

Bericht

# Optimierung des Holztransports in Baden-Württemberg

Ergebnisse verschiedener Untersuchungen



Ehningen, Freiburg und Berlin, 31.08.2015

Optimierung des Holztransports in Baden-Württemberg  
Ergebnisse verschiedener Untersuchungen

**Auftraggeber**

B. Keck GmbH, Ehningen



**Projektleitung:**

Arbeitsgemeinschaft Rohholzverbraucher

Dr. Denny Ohnesorge

Lukas Freise

**Förderung**

Dieses Projekt wird gefördert durch Mittel der Richtlinie des Ministeriums für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz zur Förderung des Clusters Forst und Holz in Baden-Württemberg und des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) der Europäischen Union.

Weitere Informationen hierzu sind im Internet verfügbar:

- [www.rwb-efre.baden-wuerttemberg.de](http://www.rwb-efre.baden-wuerttemberg.de)
- [www.mlr.baden-wuerttemberg.de](http://www.mlr.baden-wuerttemberg.de)
- [www.cluster-forstholz-bw.de](http://www.cluster-forstholz-bw.de)



## Inhaltsverzeichnis

0	Einführung .....	6
1	Einsparpotenziale verkehrsbedingter Treibhausgasemissionen .....	7
1.1	Zusammenfassung .....	7
1.2	Hintergrund .....	9
1.3	Methodisches Vorgehen.....	11
1.4	Ergebnisse.....	23
1.5	Zusammenfassung.....	30
1.6	Literatur .....	31
1.7	Anlage .....	32
2	Analyse Wettbewerbsfaktoren .....	33
2.1	Hintergrund .....	33
2.2	Methodisches Vorgehen.....	35
2.3	Ergebnisse - Wettbewerbsfaktoren im Holztransport-Gewerbe .....	35
2.4	Zusammenfassung.....	60
2.5	Literatur .....	63
3	Umfrage zur wirtschaftlichen Situation des Holztransportgewerbes .....	66
3.1	Zusammenfassung .....	66
3.2	Einleitung.....	66
3.3	Stand des Wissens – relevante Studien .....	68
3.4	Methodik .....	69
3.5	Ergebnisse und Diskussion.....	71
3.6	Schlussfolgerungen .....	99
3.7	Quellenverzeichnis.....	101
3.8	Anlagen .....	102
4	Innovationspotenziale in der Logistikkette .....	115
4.1	Einleitung.....	115
4.2	Quellenstudium .....	118
4.3	Praxisbeispiele und abgeschlossene Projekte .....	128
4.4	Zusammenstellung und Systematisierung der angewandten Methoden.....	135
4.5	Prüfung der Anwendbarkeit auf die Verhältnisse in Baden-Württemberg .....	136
4.6	Literatur .....	142
5	Fahrzeugtechnik .....	149
5.1	Betrachtete Fahrzeugtypen .....	149
5.2	Achslasten und Radaufstandsflächen .....	153

---

5.3	Innovationen und Entwicklungen zur Reduktion des Fahrzeuggewichtes .....	159
5.4	Wirtschaftlichkeitsbewertung .....	164
5.5	Assistenz- und Sicherheitssysteme .....	182
5.6	Zusammenfassung .....	187
5.7	Literaturverzeichnis .....	189
5.8	Anlagen .....	191
6	Straßen .....	195
6.1	Aufgabenstellung .....	195
6.2	Vorgehensweise .....	195
6.3	Stand der Technik und Wissenschaft .....	196
6.4	Methodik der Simulationsberechnungen .....	202
6.5	Ergebnisse der Simulationsrechnungen .....	209
6.6	Zusammenfassung .....	227
6.7	Literatur .....	231
6.8	Anlagen .....	232
7	Simulationsrechnung Brücken .....	240
7.1	Einleitung .....	240
7.2	Grundlagen .....	241
7.3	Fahrzeugkollektiv .....	242
7.4	Verkehrszustand .....	245
7.5	Brücken .....	253
7.6	Auswertung .....	254
7.7	Eingangsparameter der Berechnungen .....	255
7.8	Ergebnisse .....	269
7.9	Übersicht .....	282
7.10	Zusammenfassung .....	285
7.11	Literatur .....	288
7.12	Anlagen .....	289
8	Waldwege .....	307
8.1	Einführung und Problemstellung .....	307
8.2	Modul 1: Standards für den Waldwegebau in Baden-Württemberg .....	308
8.3	Modul 2: Beschreibung des Status Quo der Waldwege in vier ausgewählten Modellregionen .....	327
8.4	Ergebnisse .....	331
8.5	Modul 3: Restriktionen beim Waldwegebau .....	371
8.6	Modul 4: Modellierung von Rohholzflüssen .....	377

---

8.7 Zusammenfassung .....	391
8.8 Literatur .....	392
8.9 Anlagen .....	394
9 Verzeichnisse .....	397
9.1 Abkürzungsverzeichnis .....	397
9.2 Abbildungsverzeichnis .....	399
9.3 Tabellenverzeichnis .....	405

## 0 Einführung

Die B. Keck GmbH, Ehningen, hat mit Unterstützung der Arbeitsgemeinschaft Rohholzverbraucher e.V. ein Projekt zur Optimierung der Holzlogistik in Baden-Württemberg initiiert. Hintergrund waren Befürchtungen der Branche, es könnte in Zukunft zu Engpässen bei den Transportkapazitäten für Rundholz kommen, verschiedene Fachmeldungen über die erfolgreiche Realisierung von Logistikoptimierungsmodellen in anderen EU-Staaten und offene Fragen zur tatsächlichen Belastung der Verkehrsinfrastruktur durch Holztransport im LKW.

Das Projektvorhaben untersucht in einem ganzheitlichen Ansatz unterschiedliche Möglichkeiten zur Optimierung des Holztransports in Baden-Württemberg. Dazu zählen Maßnahmen wie Routenoptimierung, Kooperationsmodelle, innovative Fahrzeugtechnik oder auch die Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichts für Holztransporte.

In **Kapitel 1** (UNIQUE forestry and land use) werden Einsparpotentiale verkehrsbedingter Treibhausgasemissionen berechnet. Dabei werden der jährliche Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen von Rohholztransporten in Baden-Württemberg für Lastkraftwagen mit einem gesetzlich zulässigen Gesamtgewicht von 40 t ermittelt und mit verschiedenen anderen Gewichtsszenarien (Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichtes auf 44 t, 46 t und 53 t) verglichen.

Welche relevanten Wettbewerbsfaktoren in der Rohholz-Transportbranche wirken und positiv beeinflusst werden können, wird in **Kapitel 2** dargestellt (UNIQUE). Im Fokus stehen die Verhältnisse in Baden-Württemberg und im angrenzenden Elsass, aber auch Aussagen für ganz Deutschland werden getroffen.

Die Ergebnisse einer umfangreichen, deutschlandweiten Befragung im Holztransport-Gewerbe werden im **Kapitel 3** von der Arbeitsgemeinschaft Rohholzverbraucher e.V. (AGR) dargestellt. Die Ergebnisse resultieren aus Befragungen der AGR zu Strukturen, Stärken und Schwächen sowie Aussagen zur Wirtschafts- und Zukunftsfähigkeit des Holztransport-Gewerbes.

**Kapitel 4** legt den Fokus auf Innovationspotentiale in der Logistikkette, wie eine verbesserte Distribution oder Möglichkeiten der Transportoptimierung. Bearbeiter dieses Kapitels ist die Professur für Forstliche Verfahrenstechnik der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

**Kapitel 5** (Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugsystemtechnik) beschäftigt sich mit technischem und wirtschaftlichem Potenzial von Innovationen in der Fahrzeugtechnik wie Leichtbaumaterialien und verschiedenen Assistenzsystemen.

Die Auswirkungen einer Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichtes von Rohholztransportern auf die Verkehrsinfrastruktur werden ab Kapitel 6 behandelt:

- Auswirkungen unterschiedlicher Gesamtgewichte durch „Standard-Lastkraftwagen“ und Holztransport-LKW auf öffentliche Straßen werden in **Kapitel 6** simuliert (Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen).
- Im **Kapitel 7** stellt die Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, die Ergebnisse verschiedener Gesamtgewichts- und Fahrzeug-Simulationen auf Brücken dar.
- In **Kapitel 8** geben die Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg (FVA), Abt. Waldnutzung, und die Professur für Forstliche Verfahrenstechnik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, einen Überblick zum Stand des Wissens zur Belastbarkeit von Waldwegen. Zudem wurde der Status Quo von Waldwegen in vier ausgewählten Modellregionen in Baden-Württemberg erfasst und ausgewertet.

# 1 Einsparpotenziale verkehrsbedingter Treibhausgasemissionen

## Bearbeitung

UNIQUE forestry and land use GmbH

Martin Redmann, Irene Calo

## 1.1 Zusammenfassung

### Ziele, Vorgehensweise

Verkehrsbedingte Emissionen verursachen rd. 18 % des gesamten CO<sub>2</sub> Ausstoßes in Deutschland (SHELL, 2013) und liefern damit ein erhebliches Minderungspotenzial, um teilweise gesetzlich verankerte Ziele zur Senkung der Treibhausgasemissionen umsetzen zu können<sup>1</sup>. Aktuell entfällt ein knappes Drittel dieser verkehrsbedingten Emissionen auf den Straßengüterverkehr, der in den nächsten Jahren weiter zunehmen wird.

Aus diesen Sachverhalten resultieren folgende Zielsetzungen des Arbeitspaketes „Einsparpotenziale verkehrsbedingter Treibhausgasemissionen“ für das Projektvorhaben HoLoBaWü:

- Ermittlung von Grundlagendaten für den Rohholztransport in Baden-Württemberg (Menge des jährlich transportierten Holzes, Anzahl erforderlicher Fahrten, Kraftstoffverbrauch, etc.).
- Berechnung des jährlichen Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen von Rohholztransporten in Baden-Württemberg auf Grundlage der DIN 16258:2012<sup>2</sup>.
- Verdeutlichung der Effekte auf Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen durch verschieden starke Anhebungen des gesetzlich zulässigen Gesamtgewichtes für Rohholztransporte durch einen Szenarienvergleich.

Um den Anforderungen der DIN 16258:2012 zu entsprechen, wurde erstmals für Baden-Württemberg auf Grundlage der Clusterstudie Forst und Holz Baden-Württemberg, von regionalen Projektvorhaben im Rahmen des Clusters Forst und Holz sowie ergänzender Angaben aus dem Kreis der Projektbeteiligten Unternehmen und Institutionen (hier: ForstBW) Teil- und Gesamtfahrleistungen für den Rohholztransport ermittelt<sup>3</sup>.

### Ergebnisse

Auf Grundlage der genannten Datenquellen und Abstimmungen im Projektteam konnten folgende Grundlagendaten für den Rohholztransport in Baden-Württemberg ermittelt werden:

- Rd. 7,6 Mio. m<sup>3</sup> Holz werden jährlich in Baden-Württemberg durch Rohholz-LKWs, die überwiegend 20 t unbeladen wiegen, vom Wald zu den Holz abnehmenden Betrieben transportiert.

---

<sup>1</sup> So hat das Land Baden-Württemberg im Klimaschutzgesetz verankert, dass die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um 90 % ggü. dem Basisjahr 1990 reduziert sein sollen.

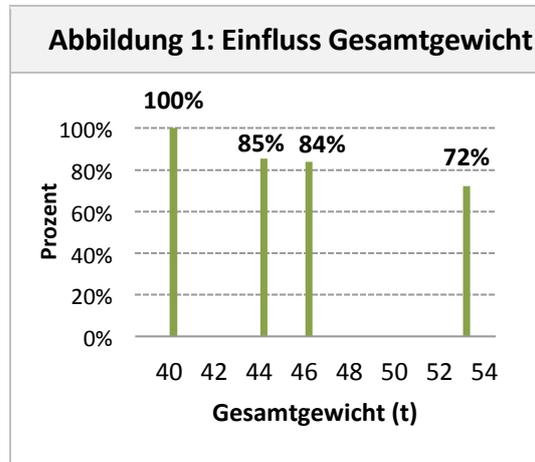
<sup>2</sup> Vgl. Obkircher, C. et. al (2013)

<sup>3</sup> Erwähnenswert ist, dass durch das Projekt Grundlagendaten verschiedener Quellen (Clusterstudie, Holzeinschlagstatistik, etc.) mit Werten und Erfahrungen aus der Betriebspraxis praxisrelevant gemacht wurden (z. B. wurde der bei anderen Untersuchungen nicht berücksichtigte Rindenanteil bewertet).

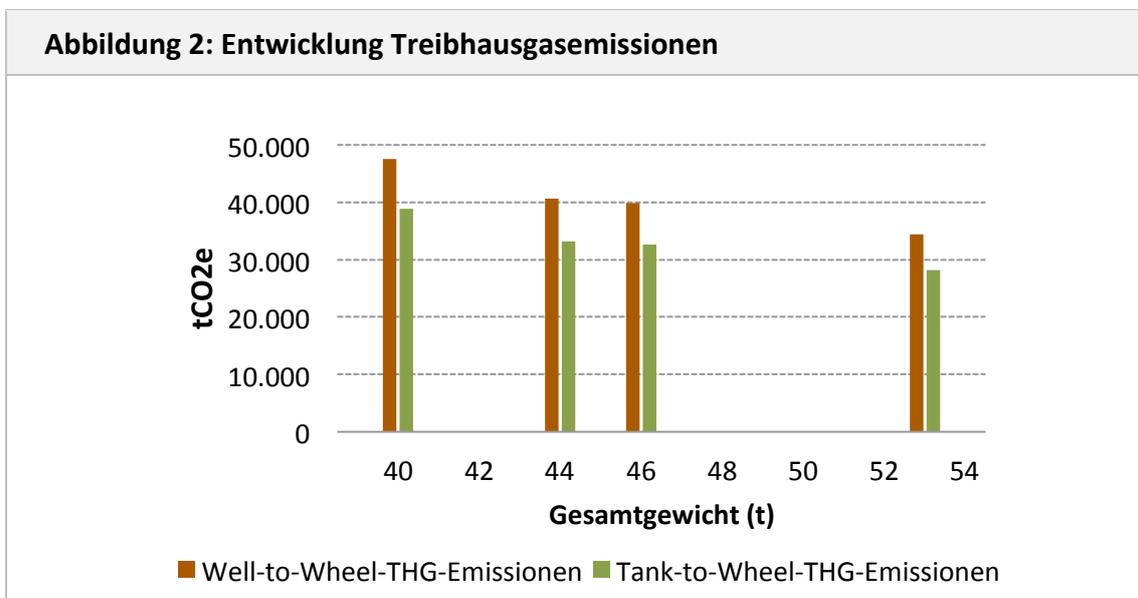
- Die eingesetzten Rohholz-LKWs (2/3 Lang- und 1/3 Kurzholz-LKWs) verbrauchen für den Gesamttransportweg von knapp 29 Mio. km jährlich 14,7 Mio. Liter Kraftstoff (davon ist 1 % Biodiesel), das entspricht 1,9 l pro m<sup>3</sup> transportiertem Holz.
- Die Verbrauchswerte bewegen sich insgesamt zwischen minimal 30 und 85 l Kraftstoff (unbeladen, Ebene und beladen, Mittelgebirge) pro 100 km Fahrstrecke, im gewogenen Mittel bei knapp 51 l / 100 km.

Eine Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichts um 10 % auf 44 t bewirkt eine Zunahme der Ladungsmenge um 20 %, weil das Beladungsgewicht von 20 t auf 24 t steigt. Dieser überproportionale Zuladungseffekt wird durch den Mehrverbrauch des Fahrzeugs durch das höhere zu transportierende Gewicht beim **Kraftstoffverbrauch** um 5 % geschmälert: 15 % geringere Kraftstoffverbrauchswerte folgen aus einer Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichtes um 10 %. 2,1 Mio. l Kraftstoff könnten dadurch jährlich beim Rohholztransport in Baden-Württemberg eingespart werden.

Den relativen Effekt der Erhöhungen des zulässigen Gesamtgewichts auf 44 t, 46 t und 53 t zeigt die Abbildung rechts.



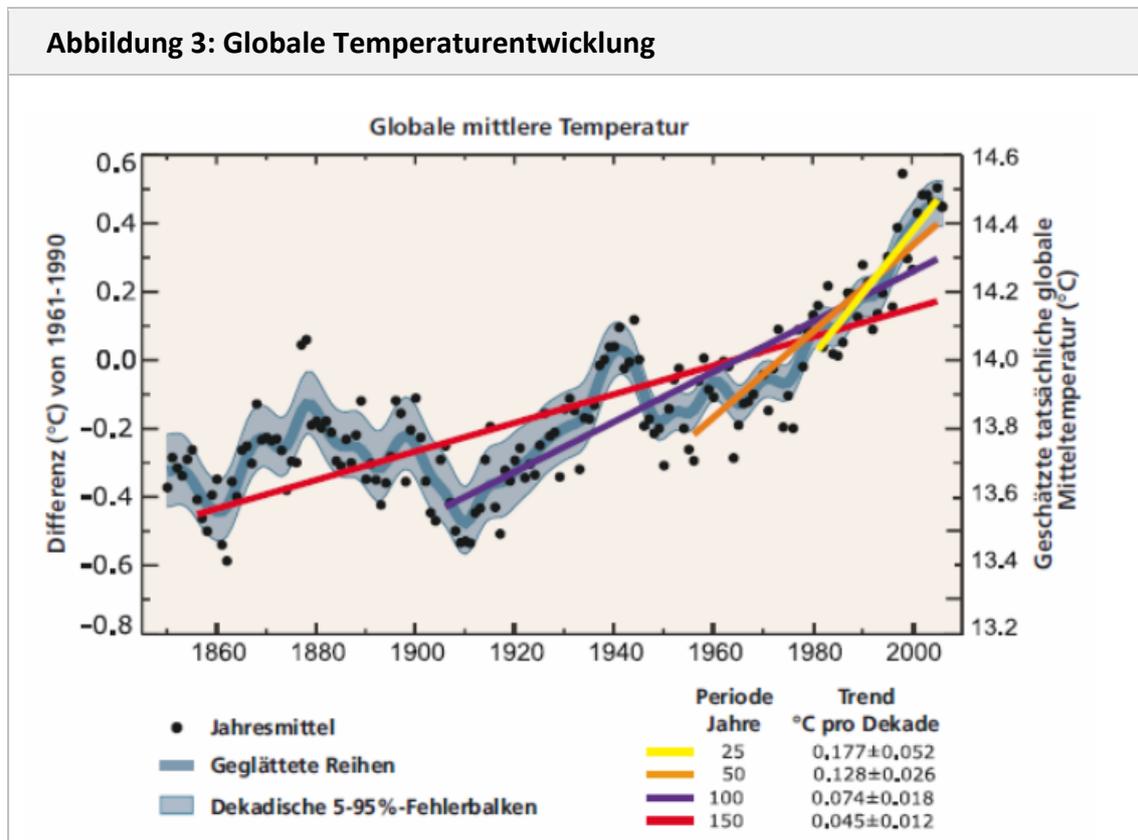
Analog zur Verringerung des Kraftstoffverbrauchs sinken auch die **Treibhausgasemissionen** mit Zunahme des gesetzlich zulässigen Gesamtgewichts. Das gilt sowohl für den gesamten Energieverbrauch („Well-to-Wheel“, vom Bohrloch bis zum Rad) als auch für die Berechnungen vom Kraftstofftank bis zum Rad („Tank-to-Wheel“).



## 1.2 Hintergrund

### Klimawandel

Der im September 2013 veröffentlichte fünfte Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) bestätigt mit verbesserter Methodik, dass Klimaänderungen stattfinden, die anthropogen verursacht sind<sup>4</sup>. Einer der Haupteffekte der Klimaänderungen ist der prognostizierte Temperaturanstieg (vgl. Abbildung 3):



Quelle: Fünfter Sachstandsbericht des IPCC, aufgerufen unter <http://www.de-ipcc.de/de/170.php>

Die angenommenen Klimaänderungen und deren Folgen werden in Mitteleuropa vergleichsweise moderat ausfallen.

Für Deutschland ist anzunehmen, dass

- es zu einem weiteren Anstieg der Temperaturen kommt,
- der Niederschlag geringfügig zunimmt, die Veränderungsrichtung aber im Jahresverlauf verschieden ist (weniger Regen im Sommer, mehr im Winter) und zu vermehrten Starkregenereignissen führen kann,
- Frosttage (Min. der Lufttemp.  $\leq 0^\circ \text{C}$ ) in der nahen Zukunft zurückgehen werden und
- insbesondere lokale Sturmereignisse zunehmen (allerdings sind Sturmereignisse weniger sicher zu prognostizieren als die vorher genannten Klimaänderungen).

Diese als wahrscheinlich eingeschätzten Klimaänderungen machen deutlich, warum das Land Baden-Württemberg Klimaschutzziele im Klimaschutzgesetz (Soer, 2013) verabschiedet hat: Bis zum Jahr 2020 sollen Treibhausgasemissionen im Vergleich zu 1990 um 25 % sinken, bis 2050

<sup>4</sup> [www.de-ipcc.de/de/200.php](http://www.de-ipcc.de/de/200.php)

um 90 %. Um diese Ziele umzusetzen, kommt der Vermeidung/Minderung von Emissionen des Treibhausgases CO<sub>2</sub> eine besondere Bedeutung zu. Der Transportsektor spielt bei einer solchen Senkung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes eine wesentliche Rolle: 18 % des gesamten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes in Deutschland werden durch Straßenverkehr verursacht (Umweltbundesamt, 2010, in SHELL, 2013), 5 % entfallen auf den Straßengüterverkehr, 13 % auf private PKW. Vor dem Hintergrund zunehmender Güterbewegungen<sup>5</sup> und damit zu erwartender Steigerungen des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes in den kommenden Jahren ist folglich auch der Straßengüterverkehr bei Maßnahmen, die den Anstieg der Treibhausgasemissionen mindern können, zu berücksichtigen.

Der vorliegende Bericht trifft Aussagen zur Klimarelevanz der Rohholz transportierenden LKW innerhalb des Clusters Forst und Holz in Baden-Württemberg. Dabei wird nach Darstellung des Status Quo ausgearbeitet, welche Effekte die Erhöhung der zulässigen Transportgewichte auf den Treibhausgasausstoß und die Minderung von THG-Emissionen haben können.

### **Rohholztransporte im Cluster Forst und Holz Baden-Württemberg**

Die Rohholz transportierenden Betriebe bewegen das von Forstbetrieben an der Waldstraße bereitgestellte Holz zu Unternehmen der ersten Be- und Verarbeitungsstufe, die der Ausgangspunkt für die gesamte Wertschöpfungskette innerhalb des Clusters Forst und Holz sind. Insofern kommt den Rohholz transportierenden Betrieben eine logistische „Schlüsselrolle“ zu. Kennzeichnend für das Holztransportgewerbe in Baden-Württemberg sind

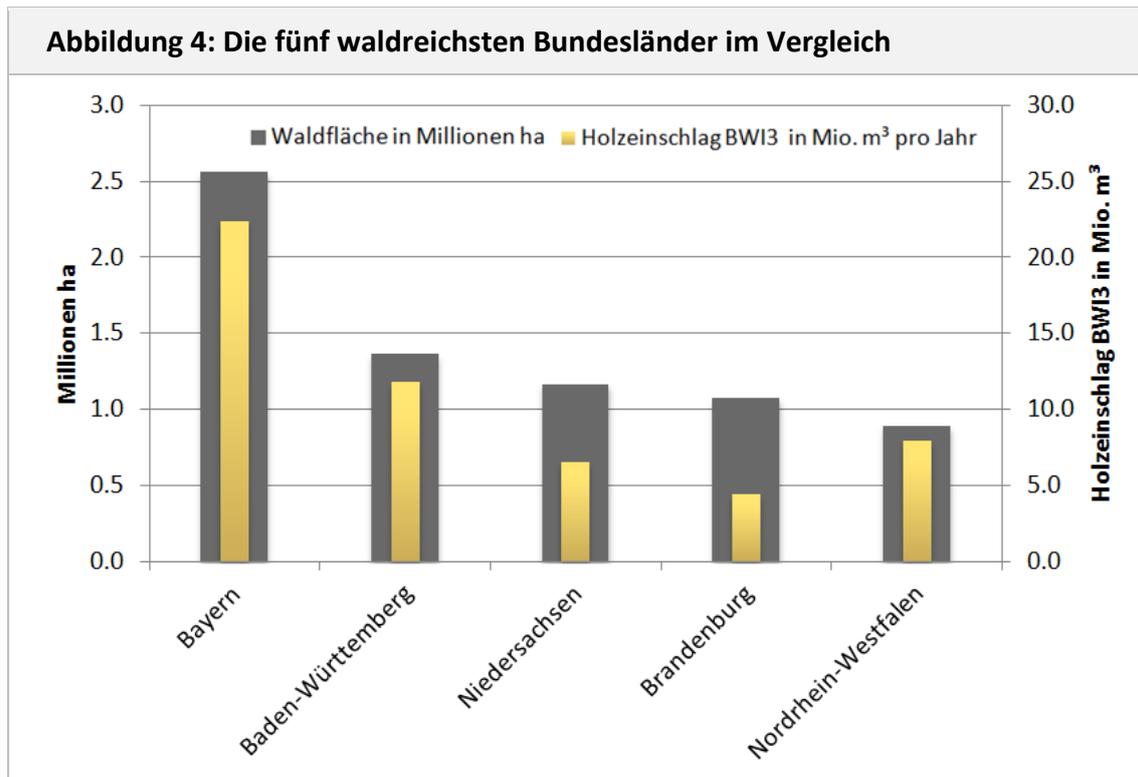
- Familienbetriebsstrukturen,
- Ausstattungen mit 2 – 5 LKWs pro Unternehmen,
- Betriebsaktivitäten im regionalen, ländlichen Umfeld und
- teilweise angespannte betriebliche Situationen: Steigende Transportradien (vgl. „Regionalstudie Holzkompetenz<sup>3</sup>“, S. 15), zunehmende Gewichtskontrollen und Kraftstoffpreise bei gleichzeitig fehlenden oder nur geringfügigen Preissteigerungen. Folge von diesen Entwicklungen sind temporäre betriebswirtschaftliche Schwierigkeiten, aber auch Insolvenzen<sup>6</sup>.

Im deutschen Vergleich (s. Abbildung 4) steht Baden-Württemberg nach Bayern bei Waldfläche und Holzeinschlag an zweiter Stelle: Die Ergebnisse des Projektes Optimierung der Holzlogistik in Baden-Württemberg haben also allein durch ihre Größenordnung auch Aussagekraft für das gesamte Bundesgebiet.

---

<sup>5</sup> Es wird erwartet (SHELL, 2013: 54), dass die knapp 70 Mrd. Kilometer, die Nutzfahrzeuge im Jahr 2005 zurücklegten, auf 117 Mrd. Kilometer im Jahr 2030 ansteigen. Bei Sattelzugmaschinen, die den höchsten Kraftstoffverbrauch haben, wird die größte Steigerung erwartet, nämlich eine Zunahme um knapp 100 %.

<sup>6</sup> Vgl. dazu z. B., Holzzentralblatt 2014, S. 687: „Vollautomatik erfordert vom Fahrer Umstellung“; Holzzentralblatt 2013, S. 485: „Masse wird immer wichtiger“; Holzzentralblatt 2012, S. 1319 „Überladung und Kostendruck im Fokus der Holztransport-Branche“.



Quelle: Bundeswaldinventur 3; eigene Abbildung

### 1.3 Methodisches Vorgehen

#### 1.3.1 Deutsche Industrie-Norm 16258

Das Deutsche Institut für Normung ist eine nationale Organisation der Bundesrepublik Deutschland. Die unter der Leitung von Arbeitsausschüssen dieser Normungsorganisation erarbeiteten Normen werden als DIN (**D**eutsche **I**ndustrie-**N**orm) bezeichnet. Diese Normen basieren auf gesicherten Ergebnissen von Wissenschaft, Technik und Erfahrung. Sie sind Empfehlungen, die bei einheitlicher Verwendung Berechnungen standardisieren, Prozesse vereinheitlichen oder auch vertragliche Vereinbarungen harmonisieren helfen.

Um den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen des Holz transportierenden Gewerbes in Baden-Württemberg zu analysieren, ist die DIN 16258:2012: „Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr) Deutsche Fassung EN 16258:2012“ geeignet<sup>7</sup>. Bei Anwendung dieser Norm können Maßnahmen, die der Minderung von Treibhausgasemissionen dienen, vergleichend bewertet und interpretiert werden.

Die Norm definiert die Berechnung der Treibhausgas-Emissionen (nachfolgend: THG-Emissionen) für sechs Gase: Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>), Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFC), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFC) und Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>). Weitere Gase sind auszuschließen.

Die Norm ist ein generelles Dokument mit Grundsätzen, Definitionen, Systemgrenzen, Berechnungsverfahren, Aufteilungsregeln und Empfehlungen, die die Berechnungen erleichtern. Durch die verschiedenen Umrechnungsfaktoren für treibhausgasrelevante Gase können ge-

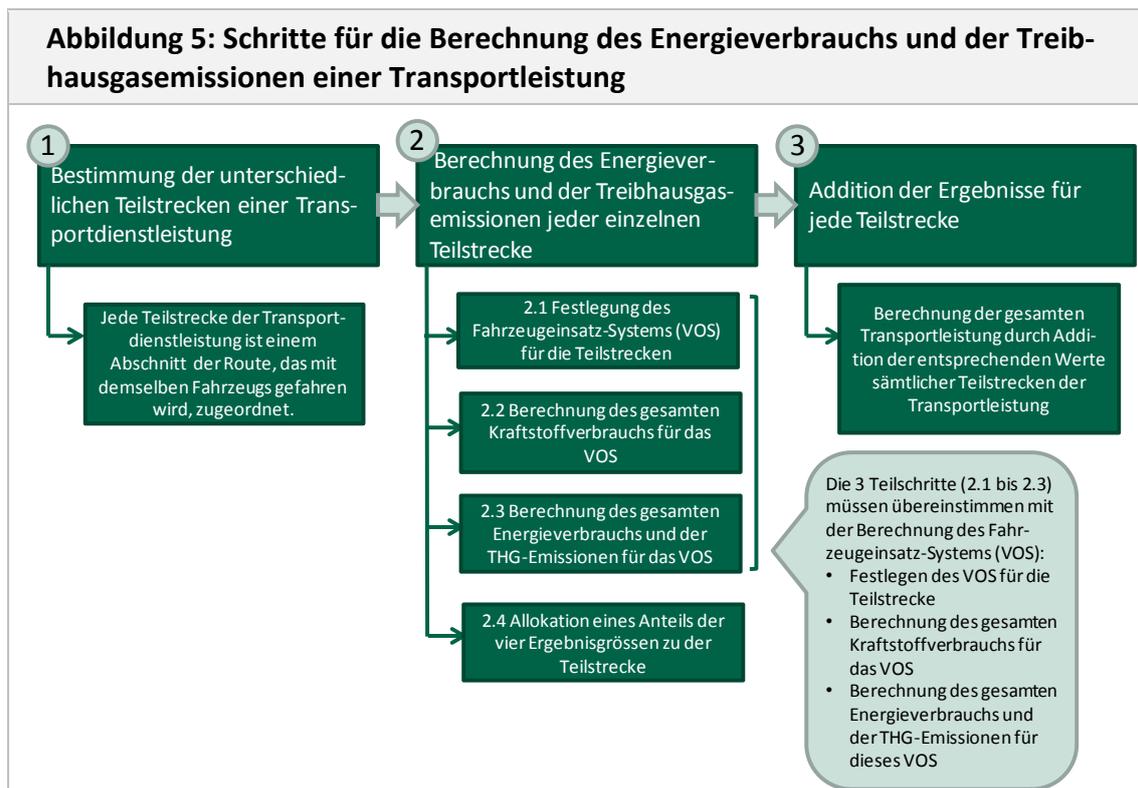
<sup>7</sup> Vgl. Obkircher, C. et al. (2013)

naue Berechnungen für Treibhausgas-Bilanzen durchgeführt werden, wenn Unternehmen den Kraftstoffverbrauch kennen.

Inhalte der DIN 16258:2012 sind:

- Definition des Anwendungsbereichs,
- Begriffe und Abkürzungen,
- Einheiten und Symbole,
- Grenzen der Berechnung,
- Grundsätze der Berechnungen und
- Anhänge mit Beispielen und Faktoren.

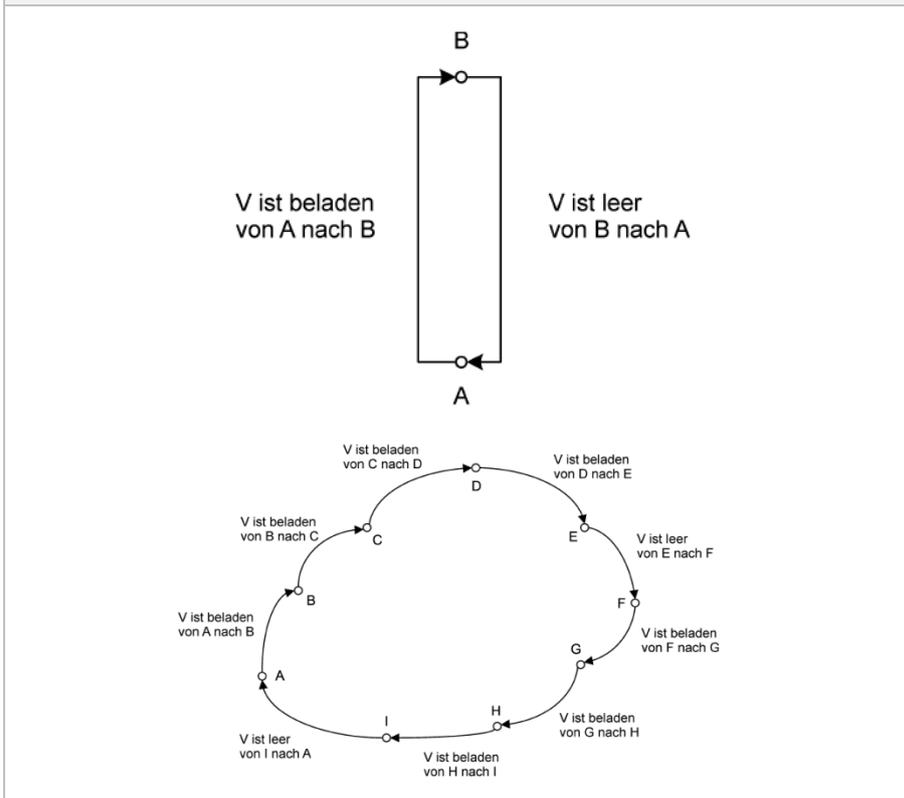
Die DIN erklärt in drei Schritten die maßgeblichen Kalkulationsschritte. Hierzu ist es wichtig, die verschiedenen Strecken jeder Transportdienstleistung exakt zu kennen und getrennt zu berechnen.



Quelle: DIN EN 13258:2013-03 EN 16258:2012 (D); eigene Abbildung; VOS = Vehicle Operation System im Anhalt an DIN 16258:2012

„Teilstrecken“ im Sinne der DIN 16258:2012 sind für Rohholz transportierende LKW zum Beispiel leere Fahrten und beladene Fahrten (vgl. folgende Abbildung 6).

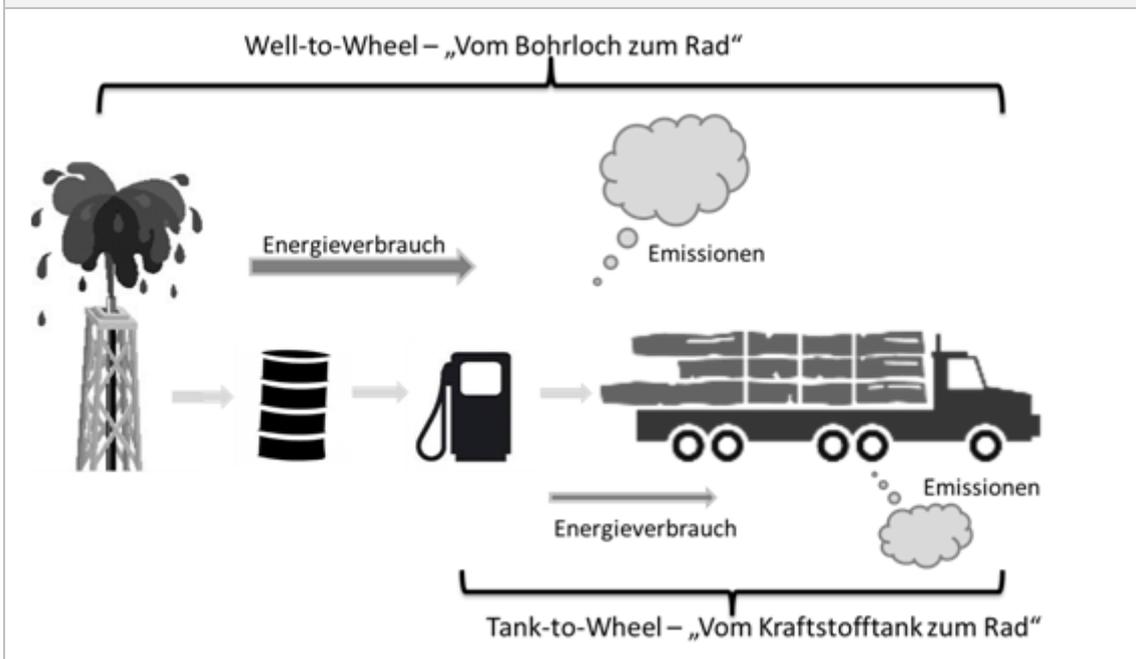
**Abbildung 6: Beispiele für Last- und Leerfahrten als Teilstrecken**



Quelle: DIN EN 13258:2013-03 EN 16258:2012 (D)

Grundsätzlich wird bei Berechnungen zwischen „Well-to-Wheel“ und „Tank-to-Wheel“ unterschieden (vgl. Abbildung 7):

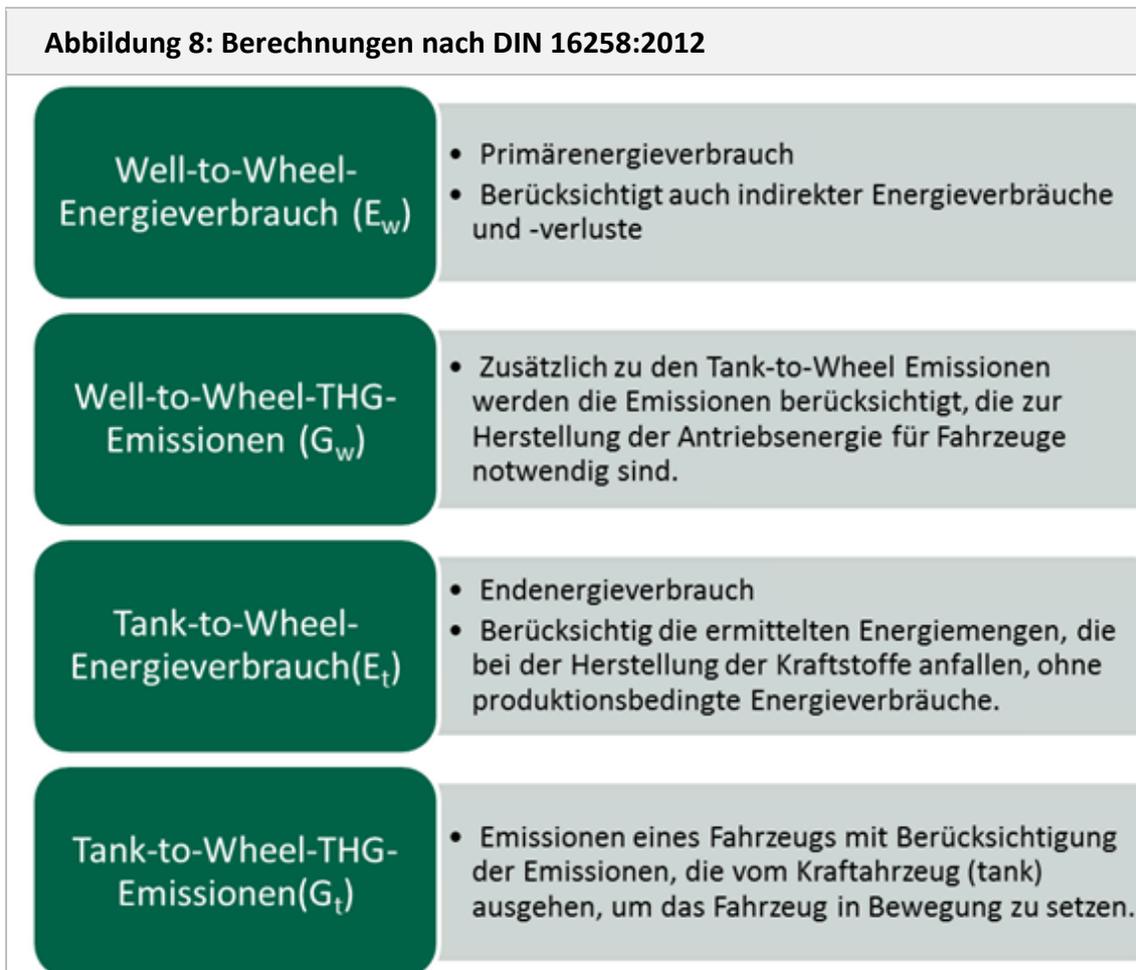
**Abbildung 7: Berechnungsweisen nach DIN 16258:2012 (vereinfacht)**



Quelle: eigene Abbildung

Zusätzlich werden für diese zwei Berechnungsansätze Energieverbrauch und Emissionen berechnet (vgl. Abbildung 8):

- Der Tank-to-Wheel-Energieverbrauch ( $E_t$ ) berücksichtigt die ermittelten Energiemengen, die bei der Herstellung der Kraftstoffe anfallen, ohne produktionsbedingte Energieverbräuche, während der Well-to-Wheel-Energieverbrauch ( $E_w$ ) auch indirekte Energieverbräuche und -verluste berücksichtigt.
- Die Tank-to-Wheel-Emissionen ( $G_t$ ) bilden die Emissionen ab, die vom Kraftfahrzeug(tank) ausgehen, um das Fahrzeug in Bewegung zu setzen. Zusätzlich berücksichtigen die Well-to-Wheel-Emissionen ( $G_w$ ) die Emissionen, die zur Herstellung der Antriebsenergie für Fahrzeuge notwendig sind.



Quelle: Kranke et al. (2011); eigene Abbildung

### 1.3.2 Parameter der Berechnung

Die für die THG-Ermittlungen erforderlichen Rechenparameter für jede Teilstrecke sind in der DIN „Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr)“ aufgelistet, um die Vergleichbarkeit der Berechnungsergebnisse sicher zu stellen. Das sind zum Beispiel der Kraftstoffverbrauch je Last- oder Leerfahrtstrecke (=Teilstrecke im Sinne der DIN), die zurück gelegten Transportentfernungen, der Auslastungsgrad des max. Gesamtgewichtes und die Nutzlast eines Fahrzeuges (vgl. Tabelle 1).

**Tabelle 1: Erforderliche Werte für die Berechnung von THG-Werten**

Kategorien von Werten, die je Teilstrecke der Transportdienstleistung verwendet werden	Vorgabewert			Flottenwert des Transportdienstleisters			Spezifischer Wert des Transportdienstleisters			Individueller Messwert		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Teilstrecke												
Kraftstoffverbrauch												
Entfernung												
Spezifischer Kraftstoffverbrauch je Entfernung												
Ladung												
Auslastungsgrad												
Nutzlast des Fahrzeugs												
Leerfahrt												
Andere												

Quelle: DIN EN 13258:2013-03 EN 16258:2012 (D)

Die für die Berechnung der in Tabelle 1 aufgelisteten Werte erforderlichen (Rechen-) Parameter werden nachfolgend erläutert.

Parameter:	F(VOS) (Kraftstoffverbrauch für das Fahrzeugeinsatz-System)
Einheit:	Liter
Beschreibung:	Gesamter Kraftstoffverbrauch für das VOS
Datenquelle:	Clusterstudie Baden-Württemberg (2011); Regionalstudie Holzkompetenz <sup>3</sup> ; Tabelle 3 und Kap. 3

Parameter:	$e_w$
Einheit:	MJ/l
Beschreibung:	Der Well-to-Wheel-Energiefaktor für den verbrauchten Kraftstoff
Datenquelle:	Clusterstudie Baden-Württemberg (2011); Regionalstudie Holzkompetenz <sup>3</sup> ; Tabelle 3 und Kap. 3

Parameter:	$g_w$
Einheit:	Kg CO <sub>2</sub> e/l
Beschreibung:	Der Well-to-Wheel-THG-Emissionsfaktor für den verbrauchten Kraftstoff
Datenquelle:	Clusterstudie Baden-Württemberg (2011); Regionalstudie Holzkompetenz <sup>3</sup> ; Tabelle 3 und Kap. 3

Parameter:	$e_t$
Einheit:	MJ/l
Beschreibung:	Der Tank-to-Wheel-Energiefaktor für den verbrauchten Kraftstoff
Datenquelle:	Clusterstudie Baden-Württemberg (2011); Regionalstudie Holzkompetenz <sup>3</sup> ; Tabelle 3 und Kap. 3

Parameter:	$g_t$
Einheit:	Kg CO <sub>2</sub> e/l
Beschreibung:	Tank-to-Wheel-THG-Emissionsfaktor für den verbrauchten Kraftstoff
Datenquelle:	Clusterstudie Baden-Württemberg (2011); Regionalstudie Holzkompetenz <sup>3</sup> ; Tabelle 3 und Kap. 3

Parameter:	$E_w(\text{VOS})$
Einheit:	MJ
Beschreibung:	Well-to-Wheel-Energieverbrauch des VOS
Datenquelle:	Formel: $F(\text{VOS}) * e_w$

Parameter:	$G_w(\text{VOS})$
Einheit:	Kg CO <sub>2</sub> e
Beschreibung:	Well-to-Wheel-THG-Emissionen des VOS
Datenquelle:	Formel: $F(\text{VOS}) * g_w$

Parameter:	$E_t(\text{VOS})$
Einheit:	MJ
Beschreibung:	Tank-to-Wheel-Energieverbrauch des VOS
Datenquelle:	Formel: $F(\text{VOS}) * e_t$

Parameter:	$G_t(\text{VOS})$
Einheit:	Kg CO <sub>2</sub> e
Beschreibung:	Tank-to-Wheel-THG-Emissionen des VOS
Datenquelle:	Formel: $F(\text{VOS}) * g_t$

Parameter:	S
Einheit:	Dimensionslos
Beschreibung:	Faktor zur Berechnung des Anteils an der Energie und den Emissionen eines VOS, welcher einer Transportleistung auf einer Teilstrecke zuzuordnen ist. Dieser Anteil beruht auf den relativen Anteilen an der Transporttätigkeit bei einer Teilstrecke und dem zugehörigen VOS.
Datenquelle:	Formel: $T(\text{Teilstrecke}) \cdot T(\text{VOS})$

Parameter:	T (Teilstrecke)
Einheit:	Tkm
Beschreibung:	Transporttätigkeit einer Transportdienstleistung auf einer Teilstrecke
Datenquelle:	Formel: Gewicht beladene Fahrt * Distanz

Parameter:	T (VOS)
Einheit:	tkm (tonnenkilometer)
Beschreibung:	Transporttätigkeit des VOS bezüglich einer Teilstrecke
Datenquelle:	Berechnungs-Tabellen: vgl. Tabelle 7 und Anhang 1.7

Parameter:	$E_w$
Einheit:	MJ
Beschreibung:	Well-to-Wheel-Energieverbrauch - Totalstrecken
Datenquelle:	Formel: $F(\text{VOS}) \cdot e_w$

Parameter:	$G_w$
Einheit:	Kg CO <sub>2</sub> e
Beschreibung:	Well-to-Wheel-THG-Emissionen - Totalstrecken
Datenquelle:	Formel: $F(\text{VOS}) \cdot g_w$

Parameter:	$E_t$
Einheit:	MJ
Beschreibung:	Tank-to-Wheel-Energieverbrauch - Totalstrecken
Datenquelle:	Formel: $F(\text{VOS}) \cdot e_t$

Parameter:	$G_t$
Einheit:	Kg CO <sub>2</sub> e
Beschreibung:	Tank-to-Wheel-THG-Emissionen - Totalstrecken
Datenquelle:	Formel: $F(\text{VOS}) \cdot g_t$

Für die Umrechnung der Verbrauchswerte verschiedener Kraftstoffe wurden die kraftstoffspezifischen Umrechnungsfaktoren der DIN verwendet (vgl. Tabelle 2). Auch Kraftstoffmischungen können unter Verwendung der Tabellen korrekt berechnet werden.

**Tabelle 2: Transportkraftstoffe: Dichte, Energiefaktor und THG-Emissionsfaktor**

Kraftstofftyp	Dichte (d) kg/l	Energiefaktor				THG-Emissionsfaktor					
		Tank-to-Wheel (e <sub>t</sub> )		Well-to-Wheel (e <sub>w</sub> )		Tank-to-Wheel (g <sub>t</sub> )			Well-to-Wheel (g <sub>w</sub> )		
		MJ/kg	MJ/l	MJ/kg	MJ/l	g CO <sub>2</sub> e/MJ	kg CO <sub>2</sub> e/kg	kg CO <sub>2</sub> e/l	g CO <sub>2</sub> e/MJ	kg CO <sub>2</sub> e/kg	kg CO <sub>2</sub> e/l
Ottokraftstoff	0,745	43,2	32,2	50,5	37,7	75,2	3,25	2,42	89,4	3,86	2,88
Ethanolkraftstoff	0,794	26,8	21,3	65,7	52,1	0	0	0	58,1	1,56	1,24
Ottokraftstoff mit 5 % Ethanol	0,747	42,4	31,7	51,4	38,4	72,6	3,08	2,30	88,4	3,74	2,80
Dieselmkraftstoff	0,832	43,1	35,9	51,3	42,7	74,5	3,21	2,67	90,4	3,90	3,24
Biodiesel	0,890	36,8	32,8	76,9	68,5	0	0	0	58,8	2,16	1,92
Dieselmkraftstoff mit 5 % Biodiesel	0,835	42,8	35,7	52,7	44,0	71,0	3,04	2,54	88,8	3,80	3,17
Autogas (LPG)	0,550	46,0	25,3	51,5	28,3	67,3	3,10	1,70	75,3	3,46	1,90
Erdgas (CNG)	0,451	45,1	50,5	50,5	59,4	59,4	2,68	68,1	3,07		
Flugbenzin (AvGas)	0,800	44,3	35,4	51,8	41,5	70,6	3,13	2,50	84,8	3,76	3,01
Jetbenzin (Jet B)	0,800	44,3	35,4	51,8	41,5	70,6	3,13	2,50	84,8	3,76	3,01
Kerosin (Jet A1 und Jet A)	0,800	44,1	35,3	52,5	42,0	72,1	3,18	2,54	88,0	3,88	3,10
Schweröl (HFO)	0,970	40,5	39,3	44,1	42,7	77,7	3,15	3,05	84,3	3,41	3,31
Marine-Dieselmöl (MDO)	0,900	43,0	38,7	51,2	46,1	75,3	3,24	2,92	91,2	3,92	3,53
Marine-Gasöl (MGO)	0,890	43,0	38,3	51,2	45,5	75,3	3,24	2,88	91,2	3,92	3,49

Quelle: DIN EN 13258:2013-03 EN 16258:2012 (D)

### Erhebung treibhausgasrelevanter Parameter im Rahmen des Projektes

Die maßgebliche Größe zur Bestimmung der jährlichen Treibhausgasemissionen der Rohholz transportierenden LKW ist der jährliche Kraftstoffverbrauch. Der Kraftstoffverbrauch eines LKW wird überwiegend gesteuert von seiner technischen Ausstattung (z. B. Motor, Eigengewicht, Aerodynamik), dem verwendeten Kraftstoff, dem Fahrverhalten des Lenkers<sup>8</sup>, dem Zuladungsgewicht, den befahrenen Straßenkategorien und der Topographie.

Für die vorliegende Fragestellung wurde vor allem zwischen Langholz- und Kurzholz-LKWs unterschieden (vgl. Abbildung 9), die Nadel- oder Laubholz transportieren:

- Langholz-LKWs transportieren überwiegend Holzlängen von 18 bis 21 m und bestehen in der Regel aus einem Sattelzug und einem „Nachläufer“.
- Kurzholz-LKWs werden zum Transport von Holz mit den Längen 2 bis 4 m eingesetzt.

<sup>8</sup> Die Auswirkungen des Fahrverhalten des Lenkers auf den Kraftstoffverbrauch wird zwischen 5 % (SHELL, 2013) und rd. 10 % (MVI, 2012) eingeschätzt. Damit hat dieser Faktor eine ähnliche oder größere Relevanz als einige technische Verbesserungsmöglichkeiten.

**Abbildung 9: Lang- und Kurzholz-LKW**

Quelle: © Kletr / Fotolia.com (linkes Bild); © Gina Sanders / Fotolia.com (rechtes Bild)

Rohholz-LKWs wiegen bei einem technischen Zulassungsgewicht von mindestens 44 Tonnen rund 20 Tonnen, dürfen also bei den gesetzlich zulässigen 40 Tonnen Gesamtgewicht 20 Tonnen Holz laden. Da Rohholz verschiedene Dichten hat, resultieren aus dem Zuladungsgewicht von 20 Tonnen rd. 22 Festmeter Zuladung waldfisches Nadelholz und 16 Festmeter waldfisches Laubholz<sup>9</sup>, wenn die Rinde bei der Berechnung des zulässigen Ladungsvolumens berücksichtigt wird. Aus diesen Zuladungsvolumen für Nadel- und Laubholz resultiert die Anzahl der Fahrbewegungen, wenn die jährlich in Baden-Württemberg eingeschlagene Holzmenge von rd. 10,7 Mio. m<sup>3</sup> (Erntefestmeter ohne Rinde) abzüglich Scheitholzverbrauch (3,1 Mio. m<sup>3</sup>) für die Holzabfuhr zu Grunde gelegt wird<sup>10</sup>. Es verbleiben jährlich ca. 7,6 Mio. m<sup>3</sup>, die mit Holz-LKWs abtransportiert werden. Rund  $\frac{3}{4}$  dieser Gesamttransportmenge sind Nadelholz,  $\frac{1}{4}$  Laubholz.

### Ermittlung der Gesamtfahrleistungen und des Treibstoffverbrauchs

Zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen, die durch Rohholz transportierende LKW in Baden-Württemberg jährlich emittiert werden, muss der gesamte Kraftstoffverbrauch bekannt sein. Dieser resultiert aus den Fahrkilometern in be- oder unbeladenem Zustand sowie einiger Annahmen und Berechnungsgrößen (vgl. Tabelle 3).

<sup>9</sup> Für Nadelholz: Ein Festmeter (m<sup>3</sup>) wiegt waldfrisch rd. 0,83 t. Da die Rinde beim Volumen nach der Holzernte abgezogen wird, aber zu transportieren ist, wird das Rindengewicht mit 10 % berücksichtigt. Laubholz: Ein Festmeter waldfrisch = 1,16 t; Rindengewicht ebenfalls im Mittel 10 % (Buche 8 %, Eiche 15 %).

<sup>10</sup> Redmann, M. et al. (2010), S. 47; Held, C.; Redmann, M. (2010).

<b>Tabelle 3: Berechnungsgrößen für den jährlichen Kraftstoffverbrauch der Rohholz-LKWs in Baden-Württemberg</b>	
<b>Parameter</b>	<b>Erläuterung</b>
	<b>Quelle</b>
Rohholzmenge, transportiert mit LKWs	Mittlerer Holzeinschlag in Baden-Württemberg, getrennt nach Laub- und Nadelholz, abzüglich Scheitholz, das weit überwiegend nicht mit LKWs abtransportiert wird.
	Redmann, M. et al. (2010), S. 47; Held, C.; Redmann, M. (2010)
Anteile Lang- und Kurzholz	Verteilung des von Rohholz-LKWs transportierten Holzvolumens auf Langholz- und Kurzholz-LKWs.
	ForstBW, Angaben zu Holzeinschlagstatistik 2014
Holzvolumen in Erntefestmeter ohne Rinde	Umrechnung des Maßes für den Holzeinschlag in Ladungsvolumen: 1 m <sup>3</sup> waldfrisch zu Volumen = 0,83 t bei Fichte/Nadelholz und 1,16 t bei Buche/Laubholz. Rinde wird mit 10 %-Zuschlag berücksichtigt (woraus geringeres Ladungsvolumen resultiert).
	Bellmann, H. (1987); Bues, C. u. Schulz, H. (1989); Mette, K. u. Korell, U. (1989), teilweise angepasst
Beschaffungs- oder Einkaufsradius	Unternehmen der Holzindustrie kaufen/beschaffen das Rohholz innerhalb eines Radius um ihren Standort herum. Der mittlere Radius ist für die Rohholz-LKWs je eine Fahrtfernung, die sie beladen oder unbeladen zurücklegen.
	(Redmann, M. et al. (2011) und ergänzende Befragung von Holzindustriepartnern im Projekt
LKW-Typ und Kraftstoffverbrauch	Differenziert nach Lang- und Kurzholz und nach überwiegendem Transport in Ebene oder Mittelgebirge. Lang- und Kurzholzwert = Anteil des Holzes, das mit Lang- oder Kurzholz-LKW transportiert wird. Kurzholzmengen, die auf Langholz-LKW transportiert werden, zählen zu Langholz.
	Befragung von Holzindustriepartnern im Projekt
Last- und Leerfahrtenanteil	Relation der Fahrten in be- und unbeladenem Zustand. Auf der Leerfahrt nach Entladung werden „Zwischenfrachten“ auf dem Weg zur nächsten Waldladung geleistet, weshalb der Lastfahrtenanteil > 50 % ist.
	Befragung Holzindustrieunternehmen (Projektpartner), Redmann, M. et al. (2011)

## Kritische Würdigung von Berechnungsgrößen und Annahmen

In diesem Kapitel werden die Berechnungsgrößen und ihre Relevanz für die verschiedenen Berechnungsergebnisse erläutert. Zusätzlich werden die Plausibilität der für die THG-Berechnung eingesetzten Größen überprüft und Vergleiche zur Vorgehensweise in anderen Studien hergestellt.

### Kraftstoffverbrauch

Rohholz transportierende Lastkraftwagen sind schwerer als vergleichbare LKW des Güterkraftverkehrs, weil sie in der Regel einen Ladekran mitführen und die technischen Ausführungen für den Einsatz auf Waldstraßen ausgelegt sind (Bodenschutz, höhere Bodenfreiheit, etc.). Hinzu kommt, dass die Holz-LKW auf vergleichsweise steileren Waldstraßen unterwegs sind und auf wassergebundenen Waldstraßen mit geringerer Reibung einen Teil des Transports leisten.

Technisch sind die Holz-LKW der Kategorie „Sattelzüge“ dem klassischen Güterverkehr zuzurechnen. Als Kraftstoffverbräuche für Sattelzüge werden genannt:

- 34 l /100 km in der SHELL-Studie (S. 54),
- für neue Sattelzug-Testfahrzeuge rd. 30 l/100 km über alle Straßenkategorien, 33 – 35 l / 100 km auf Landstraßen und 92 – 98 l /100 km bei der Bergmessung (DVZ2, 2013, S. 14),
- für den verbreitet eingesetzten MB Actros 2655 rd. 40 l / 100 km (laut Spritmonitor für Baustelleneinsatz),
- rd. 36 l / 100 km als anzunehmender Realwert nach Spielmann (2010, S. 33),
- 50 l / 100 km als Kalkulationshilfe für Holztransportunternehmer nach AFL-Info 08/09 (S. 165).

Die weite Streuung der Angaben (30 l /100 km für neue Sattelzüge mit Euro VI-Norm bis rd. 95 l / 100 km bei der Bergmessung neuer Sattelzüge) verdeutlicht vor allem den erheblichen Einfluss verschiedener Straßensteigungen und der genutzten Straßenkategorien. Hinzu kommen der Einfluss des individuellen Fahrverhaltens und die Motorleistungen der eingesetzten Fahrzeuge.

Aus den verschiedenen Quellen können als realistische Durchschnittsverbrauchswerte für Holz-LKW rd. 30 bis 35 l im unbeladenen und rd. 55 l/100 km im beladenen Zustand im flachen bis leicht geneigten Gelände angenommen werden. Im bergigen Gelände sind Kraftstoffverbrauchswerte zwischen 40 l (unbeladen) und 75 l (beladen) pro 100 Kilometer abzuleiten.

<b>Tabelle 4: Annahmen und Umrechnungsfaktoren als Grundlage für Kraftstoffverbrauchsrechnung</b>	
<b>Parameter</b>	<b>Annahme / Umrechnungsfaktor</b>
<b>Holz mengen</b>	
Holzeinschlag Baden-Württemberg (Efm o. R.)	10,7 Mio. m <sup>3</sup>
Scheitholzmenge am Holzeinschlag	3,1 Mio. m <sup>3</sup>
Holzmenge, transportiert mit LKW	7,6 Mio. m <sup>3</sup>
<i>davon Nadelholz</i>	73 %
<i>davon Laubholz</i>	27 %
<b>Nadelholz</b>	
Langholzanteil	65 %
Kurzholzanteil	35 %
Faktor waldfrisches Fi-Holz m <sup>3</sup> o. R. in t (Ladungsvolumen)	0,83
Rinde bei Umrechnung m <sup>3</sup> in t mit pauschalem Zuschlag gew.	10 %
<b>Laubholz</b>	
Langholzanteil	69 %
Kurzholzanteil	31 %
Faktor waldfrisches Bu-Holz m <sup>3</sup> o. R. in t (Ladungsvolumen)	1,16
Rinde bei Umrechnung m <sup>3</sup> in t mit pauschalem Zuschlag gew.	10 %
<b>Transportannahmen</b>	
Leerfahrten	40 %
Lastfahrten	60 %
<b>Nadelholz</b>	
Beschaffungsradius Langholz	60 km
<i>davon ebenes Gelände</i>	70 %
<i>davon bergiges Gelände</i>	30 %
Beschaffungsradius Kurzholz	110 km
<i>davon ebenes Gelände</i>	80 %
<i>davon bergiges Gelände</i>	20 %
<b>Laubholz</b>	
Beschaffungsradius Langholz	60 km
<i>davon ebenes Gelände</i>	80 %
<i>davon bergiges Gelände</i>	20 %
Beschaffungsradius Kurzholz	90 km
<i>davon ebenes Gelände</i>	80 %
<i>davon bergiges Gelände</i>	20 %

Quelle: vgl. Quellenangaben für die Berechnungsgrundlagen in Tabelle 3

### 1.3.3 Projekt szenarien

Folgende Gewichtsszenarien wurden für die Berechnung von Treibhausgasemissionen im Projekt „Optimierung der Holz-Logistik in Baden-Württemberg“ festgelegt:

- 40 t als Standard-Szenario, das den aktuellen gesetzlichen Vorgaben entspricht,
- 44 t sind das durch zeitlich begrenzte Ausnahmeregelungen (z. B. nach Sturm) zulässige Gesamtgewicht für Holz-Lkw,
- 46 t sind nahe an dem regelmäßig in Frankreich zulässigen Gesamtgewicht für Holz-Lkw von 48 t und
- 53 t geben ein Vergleichsszenario wieder, das die Gewichtssituation in einigen französischen Departements wiedergibt.

Höhere Gesamtgewichte wirken auf die Zuladungsmöglichkeiten überproportional, weil das Gewicht des Fahrzeugs unverändert bleibt: Die mögliche Zuladung bei 40 t Gesamtgewicht beträgt bei den meisten Holz-LKW rund 20 t, weil das Leergewicht 20 t beträgt (inkl. Ladekran). Wird bei dieser Ausgangslage das Gesamtgewicht um 10 % auf 44 t erhöht, bewirkt das eine 20 % höhere Zuladungsmöglichkeit, also 24 t.

## 1.4 Ergebnisse

### 1.4.1 Berechnung des Kraftstoffverbrauchs

Wie bereits erläutert (vgl. Kap. 1.3.1), liefert die Herleitung spezifischer Kraftstoffverbrauche besonders gute Grundlagen für die Berechnung von THG-Emissionen nach der entsprechenden Deutschen Industrie-Norm. Um diese Kraftstoffverbrauche zu berechnen, wurde ein Excel-Berechnungsblatt (vgl. Kap. 1.7, Anlage) erstellt, das die bereits erläuterten Berechnungsparameter (vgl. Kap. 1.3.2) für Baden-Württemberg enthält.

#### Standard-Szenario (40 t)

Die Berechnung ergibt für das Standard-Szenario folgende Ergebnisse:

- Rund 14,7 Mio. l Kraftstoff werden jährlich eingesetzt, um das in Baden-Württemberg eingeschlagene Holz zur Holzindustrie der ersten Absatzstufe zu transportieren.
- 1,9 l Kraftstoff werden pro Festmeter (m<sup>3</sup>) Rohholz für den Transport Wald – Werk verbraucht.
- Der Verbrauch der Holz-LKW beträgt im Schnitt über alle Straßenkategorien, LKW-Typen und Steigungen rd. 50 l / 100 km<sup>11</sup>.

Beispielhaft ist in Tabelle 5 dargestellt, wie der Kraftstoffverbrauch für Nadel-Langholz-LKW in Baden-Württemberg in ebenem Gelände berechnet wurde und welche Schritte dazu nötig sind.

---

<sup>11</sup> Vgl. Durchschnittswert nach AFL-Info 08/09

<b>Tabelle 5: Beispielhafte Berechnung Kraftstoffverbrauch Nadel-Langholz LKW</b>			
<b>Berechnungsgröße</b>	<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>	<b>Erläuterung; Umrechnung</b>
Holzeinschlag Baden-Württemberg	10,70	Mio. m <sup>3</sup>	
Scheitholz (Hausbrand)	3,10	Mio. m <sup>3</sup>	
zu transportierendes Holz	7,60	Mio. m <sup>3</sup>	Holzeinschlag minus Scheitholz
- davon Nadelholz	5,55	Mio. m <sup>3</sup>	Nadelholzanteil 73 %
- davon Langholz	3,61	Mio. m <sup>3</sup>	Langholzanteil 65 %
Zuladung in m <sup>3</sup> ohne Berücksichtigung Rinde	24,1	m <sup>3</sup>	20 t Zuladung / 0,83 Umrechnungsfaktor (1 m <sup>3</sup> Nadelholz = 830 kg )
Zuladung in m <sup>3</sup> mit Berücksichtigung Rinde	21,7	m <sup>3</sup>	Gewichtsprozente pauschal mit 10 % berücksichtigt
Anzahl LKW-Ladungen	166.346	Stück	
Beschaffungsradius	60	km	
gefahrene Kilometer alle Straßen "leer"	3.992.300	km	40 % Leerfahrten * Beschaffungsradius * Anzahl LKW-Fahrten
gefahrene Kilometer alle Straßen "beladen"	5.988.450	km	60 % Lastfahrten * Beschaffungsradius * Anzahl LKW-Fahrten
gefahrene Kilometer gesamt	9.980.750	km	
LKW-Typ A) normal/flaches Gelände	70	%	70 % der Fahrten finden in ebenem Gelände statt
Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km	55	l/100km	
Kraftstoffverbrauch beladen	2.305.553	l	gefahrene km in beladenem Zustand * Kraftstoffverbrauch * Anteil
Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km	30	l/100km	in ebenem Gelände
Kraftstoffverbrauch unbeladen	838.383	l	gefahrene km in unbeladenem Zustand * Kraftstoffverbrauch * Anteil
=> Kraftstoffverbrauch LKW-Typ A)	<u>3.143.936</u>	l	In ebenem Gelände

Quelle: eigene Berechnungen

### Kraftstoffverbrauch der Vergleichsszenarien 44 t, 46 t und 53 t

Die Berechnungen führen zu folgenden Ergebnissen (vgl. Tabelle 6):

- Rund 12,6 (44 t), 12,4 (46 t) und 10,6 (53 t) Mio. l Kraftstoff müssten jährlich eingesetzt werden, um das in Baden-Württemberg eingeschlagene Holz bei veränderten Gesamtgewichten zur ersten Absatzstufe zu transportieren.
- Das entspricht einem Kraftstoffeinsatz von 1,7 l (44 t), 1,6 l (46 t) oder 1,4 l (53 t) pro Festmeter (m<sup>3</sup>) Rohholz.

<b>Tabelle 6: Unterschiedlicher Kraftstoffverbrauch in Szenarien</b>					
<b>Szenario</b>	<b>LKW-Typ</b>	<b>Fahrstrecke/ Jahr (Mio. km)</b>	<b>Kraftstoffeinsatz/ Jahr (Mio. l)</b>	<b>Kraftstoffeinsatz (l /100 km)</b>	<b>Kraftstoffeinsatz (l / m<sup>3</sup>)</b>
<b>40 t</b>	Nadel-Langholz	10,0	4,9	50,8	<b>1,9</b>
	Nadel-Kurzholz	9,8	4,9		
	Laub-Langholz	5,5	2,7		
	Laub-Kurzholz	3,7	2,2		
<b>44 t</b>	Nadel-Langholz	8,3	4,2	52,1	<b>1,7</b>
	Nadel-Kurzholz	8,2	4,2		
	Laub-Langholz	4,6	2,8		
	Laub-Kurzholz	3,0	1,8		
<b>46 t</b>	Nadel-Langholz	7,7	4,1	55,4	<b>1,6</b>
	Nadel-Kurzholz	7,6	4,1		
	Laub-Langholz	4,2	2,3		
	Laub-Kurzholz	2,8	1,8		
<b>53 t</b>	Nadel-Langholz	6,0	3,5	60,6	<b>1,4</b>
	Nadel-Kurzholz	6,0	3,5		
	Laub-Langholz	3,3	2,0		
	Laub-Kurzholz	2,2	1,6		

Quelle: eigene Berechnungen, alle Werte sind auf eine Nachkommastelle gerundet; die einzelnen Berechnungsschritte in den Szenarien werden im Anhang dargestellt.

### 1.4.2 Energieverbrauchswerte und Treibhausgasemissionen

#### Standard-Szenario (40 t)

Wie bereits beschrieben, werden von Lastkraftwagen verschiedene Kraftstoffmischungen eingesetzt, die zu verschiedenen Umrechnungen führen (vgl. Tabelle 2). Die für Holz-LKW relevante Dieselmischkraftstoff/Biodiesel-Mischung und deren Energiegehalte und Emissions-Faktoren zeigt die folgende Abbildung 10.

Abweichend von den Berechnungen bei Obkircher (dort: 6,2 % nach Kranke et al., 2011) wird auf Grundlage der Befragungsergebnisse, die im Rahmen des Projektes (vgl. Kap. 3) ermittelt wurden, ein Biodieselanteil von 1,0 % angenommen.

**Abbildung 10: Berücksichtigung von Kraftstoffmischungen**

Tabelle A.5 — Mischungsfaktoren Dieselkraftstoff/Biodiesel, % Biokraftstoff (Energieanteil)

Mischung Dieselkraftstoff/Biodiesel % Biodiesel am Energiegehalt	Dichte (d) kg/l	Energiefaktor				THG-Emissionsfaktor					
		Tank-to-Wheel (e <sub>t</sub> )		Well-to-Wheel (e <sub>w</sub> )		Tank-to-Wheel (g <sub>t</sub> )			Well-to-Wheel (g <sub>w</sub> )		
		MJ/kg	MJ/l	MJ/kg	MJ/l	g CO <sub>2</sub> e/MJ	kg CO <sub>2</sub> e/kg	kg CO <sub>2</sub> e/l	g CO <sub>2</sub> e/MJ	kg CO <sub>2</sub> e/kg	kg CO <sub>2</sub> e/l
1	0,832 68	43,0	35,8	51,6	43,0	73,8	3,17	2,64	90,09	3,88	3,23
2	0,833 35	43,0	35,8	51,9	43,2	73,0	3,14	2,61	89,78	3,86	3,21
3	0,834 03	42,9	35,8	52,2	43,5	72,3	3,10	2,58	89,46	3,84	3,20
4	0,834 70	42,8	35,7	52,5	43,8	71,5	3,06	2,56	89,14	3,82	3,19
5	0,835 37	42,7	35,7	52,8	44,1	70,8	3,02	2,53	88,83	3,80	3,17
6	0,836 03	42,7	35,7	53,1	44,4	70,0	2,99	2,50	88,51	3,78	3,16



% Biodiesel am Energiegehalt	Energiefaktor		THG-Emissionsfaktor	
	Tank-to-Wheel (e <sub>t</sub> )	Well-to-Wheel (e <sub>w</sub> )	Tank-to-Wheel (g <sub>t</sub> )	Well-to-Wheel (g <sub>w</sub> )
	MJ/l	MJ/l	kgCO <sub>2</sub> e	kgCO <sub>2</sub> e
1	35,8	43,0	2,64	3,23

Quelle: DIN EN 13258:2013-03 EN 16258:2012 (D)

Werden die dargestellten Energie- und THG-Emissionsfaktoren mit dem Kraftstoffeinsatz für das Standard-Szenario verrechnet, resultieren folgende Ergebnisse (vgl. Tabelle 7):

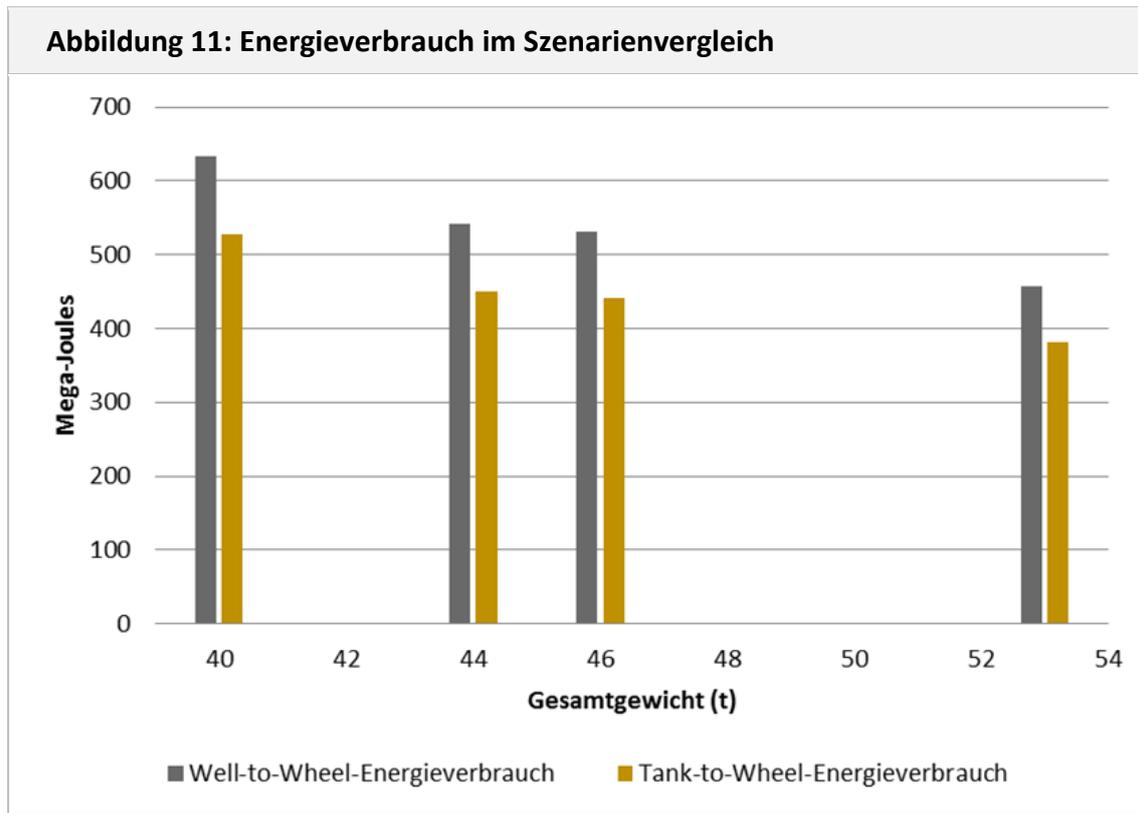
**Tabelle 7: Energieverbrauch und THG-Emissionen Rohholztransporte Baden-Württemberg (Standard-Szenario, 40 t)**

Berechnung	Energieverbrauch	THG-Emissionen
Well-to-Wheel	633,1 Mio. Mega-Joule (Tera-Joule)	47.560 tCO <sub>2</sub> e
Tank-to-Wheel	527,1 Mio. Mega-Joule (Tera-Joule)	38.870 tCO <sub>2</sub> e

Quelle: eigene Berechnungen

### Energieverbrauch im Szenarienvergleich (40 t, 44 t, 46 t, 53 t)

Für die bereits beschriebenen Vergleichsszenarien ergeben sich folgende Ergebnisse:

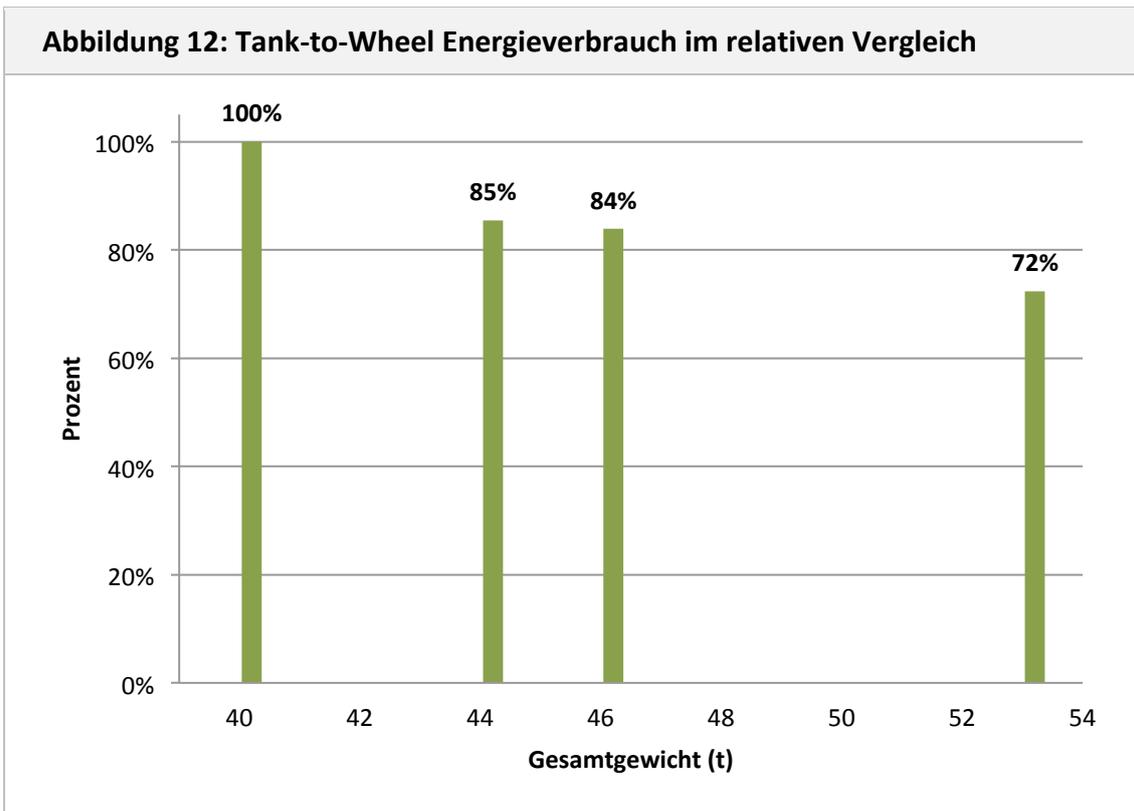


Quelle: eigene Berechnungen

Beim Energieverbrauch gibt es die größten Einsparungen zwischen dem ersten und zweiten Szenario:

- Veränderung 40 zu 44 Tonnen: Einsparung von ungefähr 89 TeraJoule und 6.346 tCO<sub>2</sub>e
- Veränderung 44 zu 46 Tonnen: Reduzierung um 34,3 TeraJoule und 2.441tCO<sub>2</sub>e
- Veränderung 46 zu 53 Tonnen: Minderung um ungefähr 87 TeraJoule und 6.213 tCO<sub>2</sub>e

Die prozentualen Reduzierungen des Energieverbrauchs für den Berechnungsabschnitt „Kraftstofftank-zu-Rad“ mit zunehmendem Gesamtgewicht zeigt die folgende Abbildung 12:



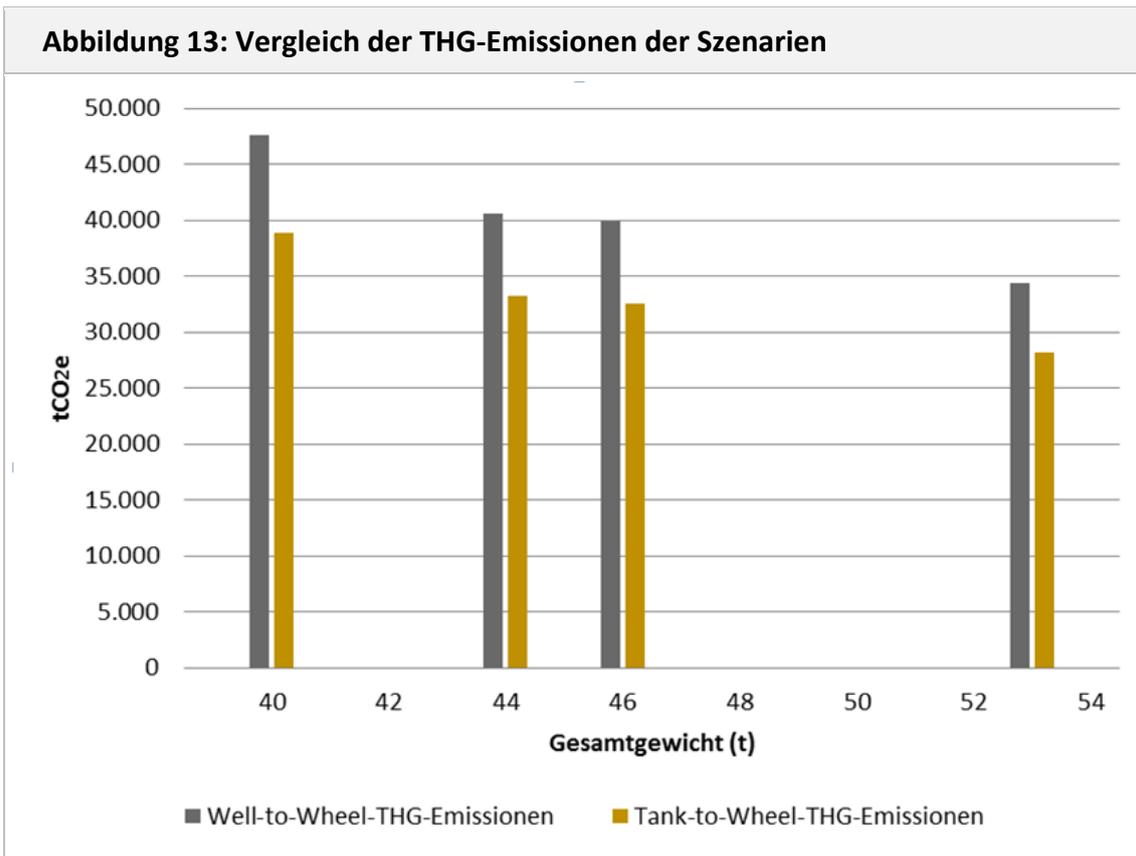
Quelle: eigene Berechnungen

Entgegen den Erwartungen führt die erste Erhöhung des Gesamtgewichtes um 4 Tonnen (40 zu 44 Tonnen) zu größeren Energie-Einsparungen als jene um 7 Tonnen (46 zu 53 Tonnen). Dieser Sachverhalt kann mit dem relativ steigenden Kraftstoffmehrverbrauch erklärt werden<sup>12</sup>:

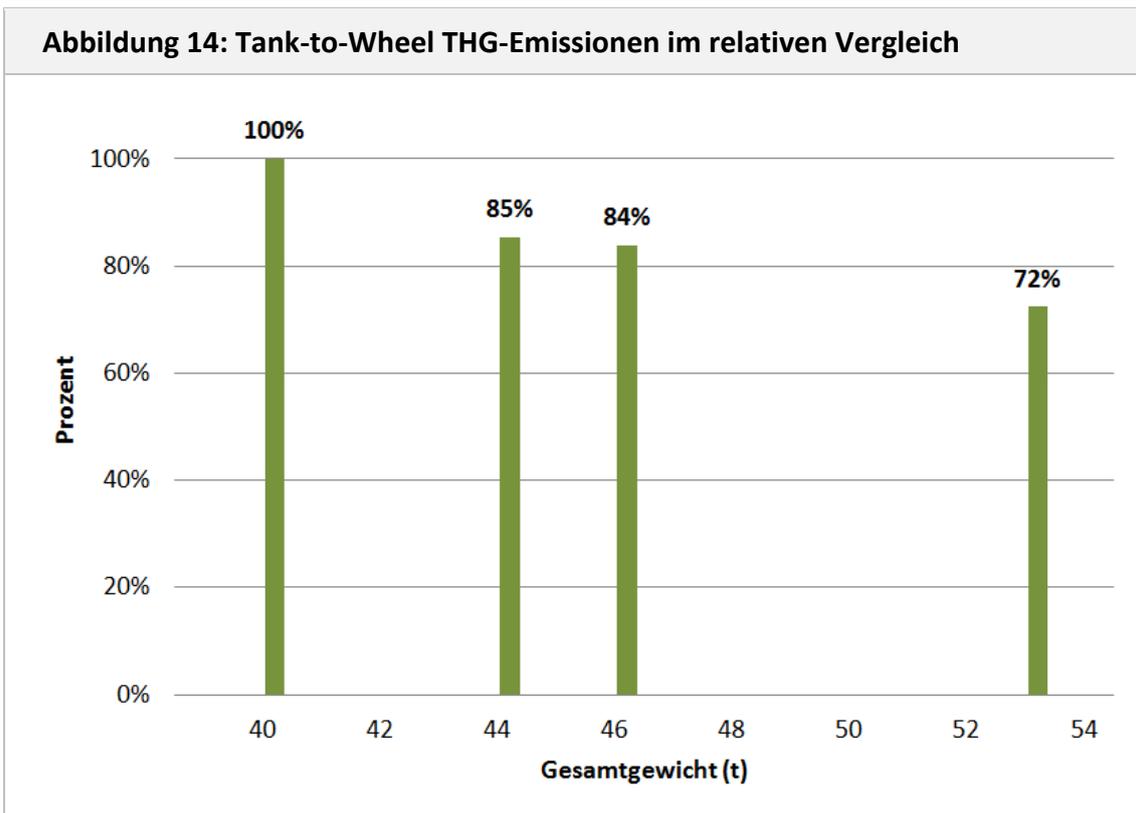
- Von 40 zu 44 Tonnen steigt der Mehrverbrauch um 4 %, also rd. 1 % pro zusätzlicher Tonne Gesamtgewicht.
- Von 40 zu 53 Tonnen steigt der Mehrverbrauch um rd. 20 %, das sind ca. 1,5 % pro zusätzlicher Tonne Gesamtgewicht.

<sup>12</sup> Simulationsberechnung der Firma MAN Truck Bus AG für Holzfahrzeuge für das Projekt HoLoBaWü.

Treibhausgasemissionen im Szenarienvergleich (40 t, 44 t, 46 t, 53 t)



Quelle: eigene Berechnungen



Quelle: eigene Berechnungen

## 1.5 Zusammenfassung

Für das Bundesland Baden-Württemberg wurde auf Grundlage des realen durchschnittlichen Holzeinschlags und dessen grober Sortimentsverteilung (Nadel-, Laubholz, kurz und lang) erstmalig der Kraftstoff- und Energieverbrauch für den Holztransport „Wald zu Werk“ ermittelt. Die Berechnungen erfolgten nach DIN 16258:2012 für das aktuell zulässige Gesamtgewicht von 40 t sowie für 44 t, 46 t und 53 t. Aktuelle Praxisdaten, die mehrfach durch Transportunternehmer, Holzindustrieunternehmen sowie Fahrzeughersteller plausibilisiert wurden, waren Grundlagen der Berechnung, so dass die ermittelten Werte den realen Bedingungen in Baden-Württemberg sehr nahe kommen dürften<sup>13</sup>.

Für den jährlichen Transport des Rundholzes ohne Scheitholz für Privathaushalte werden in Baden-Württemberg unter aktuellen Bedingungen rd. 29 Mio. Fahrkilometer von Holzfahrzeugen zurückgelegt. Dabei werden 14,7 Mio. l Kraftstoff eingesetzt, das entspricht einem Verbrauch über alle Fahrzeugtypen und Geländebedingungen von 50,8 l/100 km, bzw. 1,9 l pro transportiertem Festmeter Holz.

Eine Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichts auf 44 t, 46 t und 53 t hat zwei Effekte:

1. Das Zuladungsgewicht steigt überproportional an und die Anzahl erforderlicher Fahrten reduziert sich, weil die Fahrzeuggewichte unbeladen rd. 20 t betragen und Erhöhungen direkt das Zuladungsgewicht erhöhen (z. B. Zuladung bei 40 t = 20 t, bei 44 t = 24 t, also 20 % mehr).
2. Der Mehrverbrauch pro zusätzlicher Tonne zulässigem Gesamtgewicht steigt ebenfalls an. Dieser Mehrverbrauch steigt mit jeder zusätzlichen Tonne auch relativ an, so dass der Mehrverbrauch der ersten zusätzlichen Tonnen geringer ist als bei den letzten zusätzlichen Tonnen bis 53 t zulässigem Gesamtgewicht.

Die Berechnungen zeigen, dass Erhöhungen des zulässigen Gesamtgewichtes den Energieverbrauch und die resultierenden Emissionen deutlich senken:

- 44 t zGG bewirken eine Reduktion um rd. 15 % (entspricht 2,1 Mio. l Kraftstoff/Jahr),
- 46 t um 16 % (gleich 2,4 Mio. l Kraftstoff/Jahr) gegenüber dem aktuellen Status und
- 53 t um 28 % (4,1 Mio. l Kraftstoff/Jahr).

Der mit 15 % im Vergleich zur Gesamtgewichtssteigerung größte Effekt zur Minderung des jährlich erforderlichen Energieaufwands für den Transport des im Wald bereit gestellten Rundholzes zu den be- und verarbeitenden Betrieben ist also bei einer Erhöhung des zGG um 10 % auf 44 t zu erwarten. Das gilt in gleicher Weise und im gleichen Umfang für die Reduktion der Treibhausgasemissionen, wenn das zGG um 10 % auf 44 t erhöht würde.

---

<sup>13</sup> Das gilt für verschiedene Kraftstoffverbräuche (Ebene, Berg, beladen, unbeladen, Kurz- Langholzfahrzeug), die Verteilung auf Grobsortimente oder auch die bislang nicht obligatorische Berechnung der mittransportierten Rinde.

## 1.6 Literatur

- Arbeitsgemeinschaft forstwirtschaftlicher Lohnunternehmer Niedersachsen e.V. (AfL) (2008): AfL-Info 08/09. Richtpreise, Tarife, Kalkulation, Adressen. 191 S.
- Bechtle, M. und Müller, M: (2004): Optimierung der Logistik durch Trailer-Direktverladung. Holzzentralblatt Nr. 46/2004, S. 603-604.
- Bellmann, H. (1987): Zur Bedeutung der Holzfeuchte bei der Kesseldrucktränkung von Nadelhölzern. Holzzentralblatt Nr. 126, S. 1858.
- Borcherding, M. (2007): Rundholztransportlogistik in Deutschland – eine transaktionskostenorientierte empirische Analyse. Dissertation. Universität Hamburg.
- Bues, C. und Schulz, H. (1989): Festigkeit und Feuchtegehalt von Buchenholz aus Waldschadensgebieten. Holz als Roh- und Werkstoff Nr. 47. Springer Verlag.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (2013): Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr); Deutsche Fassung EN 16258:2012.
- Deutsche Verkehrs-Zeitung (DVZ) (2013): European Truck Challenge 2013, S. 14.
- Held, C., Redmann, M. (2010): Verbrauch von Holzbrennstoff in Baden-Württemberg. Holzzentralblatt Nr. 43. S. 1083-1084 .
- IPCC (2013a): Fünfter Sachstandsbericht des IPCC - Teilbericht 1 (Wissenschaftliche Grundlagen). Deutsche IPCC Koordinierungsstelle. Online verfügbar unter [http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/kernbotschaften\\_des\\_fuenften\\_sachstandsberichts\\_des\\_ipcc.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/kernbotschaften_des_fuenften_sachstandsberichts_des_ipcc.pdf) (abgerufen am 28.03.2014).
- Kranke, A., Schmied, M. und Schön, A. (2011): CO<sub>2</sub>-Berechnung in der Logistik-Datenquellen, Formeln, Standards. München.
- Mette, K. u. Korell, U. (1989): Richtzahlen und Tabellen für die Forstwirtschaft Grundlagen der Forstnutzung, Nutzung der Dendromasse, Verwertung von Rohholz, Arbeitskraft, Arbeitsnormung, Arbeitsleistung, Maschinen und Geräte der Rohholzerzeugung und Rohholzbereitstellung. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin.
- Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg (MVI), Hrsg. (2012): Energiesparend fahren. Broschüre, abrufbar unter <http://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/publikation/did/energiesparend-fahren/>
- Obkircher, C.; et al. (2013): Treibhausgasbilanz von Lkw-Rohholztransporten in Deutschland unter Berücksichtigung einer Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichtes. Abschlussarbeit an der TU München. 68 S.
- Redmann, M., et al. (2011): Regionalstudie Holzkompetenz<sup>3</sup> in den Landkreisen Ostalb, Heidenheim und Schwäbisch Hall. 72 S. <http://www.cluster-forstholz-bw.de/projekte/holzkompetenz3.html>
- Redmann, M. et al. (2010): Clusterstudie Forst und Holz Baden-Württemberg. Analyse der spezifischen Wettbewerbssituation des Clusters Forst und Holz und Ableitung von Handlungsempfehlungen. Hrsg.: Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg (MLR), Stuttgart. 171 S.
- SHELL Deutschland Oil GmbH, Hrsg. (2013): SHELL Lkw-Studie. Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr. 71 S.
- Spielmann, M., et al. (2010): Energiebedarfs- und Emissionsvergleich von LKW, Bahn und Schiff im Güterverkehr. Leinfelden-Echterdingen. 56 Seiten.

### 1.7 Anlage

HoLoBaWü: Szenarien-Definition Variante "Standard" (40 to)					
Mengen, Massen, Strecken für Szenario "Standard"					
<b>Holzeinschlag Baden-Württemberg abzgl. Scheitholz (Hausbrand)</b>		Mio. m <sup>3</sup>	<b>10,70</b>	Mio. m <sup>3</sup>	Erntefestmeter ohne Rinde
Rinde (bei Holzvolumenberechnung Efm o.R.)		Mio. m <sup>3</sup>	<b>3,10</b>	Mio. m <sup>3</sup>	bei Lastberechnung Lkw berücksichtigt
Nadelholz %		73		27	Laubholz %
Mio. m <sup>3</sup>		<b>5,55</b>		<b>2,05</b>	Mio. m <sup>3</sup>

ab hier weiter Nadelholz:			ab hier weiter Laubholz:		
Daten	Werte	Einheiten	Werte	Einheiten	Daten
Langholzanteil %	65	%	69	%	Langholzanteil %
=> transportierte Langholzmenge in Mio m <sup>3</sup>	<b>3,61</b>	Mio m <sup>3</sup>	<b>1,42</b>	Mio m <sup>3</sup>	=> transportierte Langholzmenge in Mio m <sup>3</sup>
Zuladung in m <sup>3</sup> ohne Berücksichtigung Rinde	24,1	m <sup>3</sup>	17,2	m <sup>3</sup>	Zuladung in m <sup>3</sup> ohne Berücksichtigung Rinde
Zuladung in m <sup>3</sup> mit Berücksichtigung Rinde	21,7	m <sup>3</sup>	15,5	m <sup>3</sup>	Zuladung in m <sup>3</sup> mit Berücksichtigung Rinde
=> Anzahl LKW-Ladungen	166.286	Anzahl	91.246	Anzahl	=> Anzahl LKW-Ladungen
Beschaffungsradius in Km (ein Weg)	60	Km	60	Km	Beschaffungsradius in Km (ein Weg)
=> gefahrene Kilometer alle Straßen "leer"	3.990.861	Km	2.189.894	Km	=> gefahrene Kilometer alle Straßen "leer"
=> gefahrene Kilometer alle Straßen "beladen"	5.986.292	Km	3.284.842	Km	=> gefahrene Kilometer alle Straßen "beladen"
<b>gefahrene Kilometer gesamt</b>	<b>9.977.153</b>	<b>Km</b>	<b>5.474.736</b>	<b>Km</b>	<b>gefahrene Kilometer gesamt</b>
LKW-Typ A) normal/flaches Gelände	70%	%	80%	%	LKW-Typ A) normales/flaches Gelände
Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km	55	l/100km	55	l/100km	Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km
Kraftstoffverbrauch beladen	2.304.722	l	1.445.330	l	Kraftstoffverbrauch beladen
Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km	30	l/100km	35	l/100km	Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km
Kraftstoffverbrauch unbeladen	838.081	l	613.170	l	Kraftstoffverbrauch unbeladen
=> Kraftstoffverbrauch LKW-Typ A)	<b>3.142.803</b>	<b>l</b>	<b>2.058.501</b>	<b>l</b>	=> Kraftstoffverbrauch LKW-Typ A)
LKW-Typ B) "bergig"	30%	%	20%	%	LKW-Typ B) "bergig"
Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km	75	l/100km	75	l/100km	Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km
Kraftstoffverbrauch beladen	1.346.916	l	492.726	l	Kraftstoffverbrauch beladen
Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km	35	l/100km	40	l/100km	Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km
Kraftstoffverbrauch unbeladen	419.040	l	175.192	l	Kraftstoffverbrauch unbeladen
<b>Kraftstoffverbrauch LKW-Typ B)</b>	<b>1.765.956</b>	<b>l</b>	<b>667.918</b>	<b>l</b>	<b>=&gt; Kraftstoffverbrauch LKW-Typ B)</b>
<b>Kraftstoffverbrauch "Langholz-LKW" Nadel</b>	<b>4.908.759</b>	<b>l</b>	<b>2.726.419</b>	<b>l</b>	<b>=&gt; Kraftstoffverbrauch LKW "Langholz-Zug"</b>
<b>Kurzholzanteil %</b>	<b>35</b>	<b>%</b>	<b>31</b>	<b>%</b>	<b>Kurzholzanteil in %</b>
=> transportierte Kurzholzmenge in Mio m <sup>3</sup>	<b>1,94</b>	<b>Mio m<sup>3</sup></b>	<b>0,64</b>	<b>Mio m<sup>3</sup></b>	=> transportierte Kurzholzmenge in Mio m <sup>3</sup>
Zuladung in m <sup>3</sup> (ohne Berücksichtigung Rinde)	24,1	m <sup>3</sup>	17,2	m <sup>3</sup>	Zuladung in m <sup>3</sup> (ohne Berücksichtigung Rinde)
Zuladung in m <sup>3</sup> mit Berücksichtigung Rinde	21,7	m <sup>3</sup>	15,5	m <sup>3</sup>	Zuladung in m <sup>3</sup> mit Berücksichtigung Rinde
=> Anzahl LKW-Ladungen	89.539	Anzahl	40.994	Anzahl	=> Anzahl LKW-Ladungen
Beschaffungsradius in Km (ein Weg)	110	Km	90	Km	Beschaffungsradius in Km (ein Weg)
=> gefahrene Kilometer alle Straßen "leer"	3.939.696	Km	1.475.798	Km	=> gefahrene Kilometer alle Straßen "leer"
=> gefahrene Kilometer alle Straßen "beladen"	5.909.545	Km	2.213.698	Km	=> gefahrene Kilometer alle Straßen "beladen"
<b>gefahrene Kilometer gesamt</b>	<b>9.849.241</b>	<b>Km</b>	<b>3.689.496</b>	<b>Km</b>	<b>gefahrene Kilometer gesamt</b>
LKW-Typ A) normal/flaches Gelände	80%	%	80%	%	LKW-Typ A) normal/flaches Gelände
Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km	55	l/100km	55	l/100km	Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km
Kraftstoffverbrauch beladen	2.600.200	l	1.217.534	l	Kraftstoffverbrauch beladen
Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km	35	l/100km	35	l/100km	Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km
Kraftstoffverbrauch unbeladen	1.103.115	l	516.529	l	Kraftstoffverbrauch unbeladen
=> Kraftstoffverbrauch LKW-Typ A)	<b>3.703.315</b>	<b>l</b>	<b>1.734.063</b>	<b>l</b>	=> Kraftstoffverbrauch LKW-Typ A)
LKW-Typ B) "bergig"	20%	%	20%	%	LKW-Typ B) "bergig"
Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km	75	l/100km	75	l/100km	Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km
Kraftstoffverbrauch beladen	886.432	l	332.055	l	Kraftstoffverbrauch beladen
Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km	40	l/100km	40	l/100km	Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km
Kraftstoffverbrauch unbeladen	315.176	l	118.064	l	Kraftstoffverbrauch unbeladen
=> Kraftstoffverbrauch LKW-Typ B)	<b>1.201.607</b>	<b>l</b>	<b>450.119</b>	<b>l</b>	=> Kraftstoffverbrauch LKW-Typ B)
<b>Kraftstoffverbrauch "Kurzholz-LKW" Nadel</b>	<b>4.904.922</b>	<b>l</b>	<b>2.184.182</b>	<b>l</b>	<b>Kraftstoffverbrauch "Kurzholz-LKW"</b>

## 2 Analyse Wettbewerbsfaktoren

### Bearbeitung

UNIQUE forestry and land use GmbH

Dr. Axel Weinreich, Martin Redmann

### 2.1 Hintergrund

#### Projektzusammenhang

Das Projektvorhaben untersucht im Kern die verschiedenen Auswirkungen, die eine Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichts von Rohholztransporten und eine Erhöhung der Lastfahrtenanteile auf Emissionen, Wegebelastungen und Wettbewerbsfähigkeit des Holztransport-Gewerbes haben. Zusätzlich werden im Rahmen des Projektes die Effekte von „Leichtbauweisen“ oder verbesserter Disposition/Logistiksteuerung dargestellt.

Die Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichts ist dabei ein Wettbewerbsfaktor, der die Rohholz-Transportbranche und die Transportkostenbelastung der Holzindustrie positiv beeinflussen kann.

Vor dem Hintergrund der nachfolgend näher dargestellten kritischen wirtschaftlichen Lage der Branche untersucht das Projekt weitere Wettbewerbsfaktoren, deren Bedeutung und Beeinflussbarkeit durch die Branche und die Holztransportbetriebe.

#### Sachverhalt

Die Rohholz transportierenden Betriebe bewegen das am Waldweg bereit gestellte Holz zu den Unternehmen der ersten Be- und Verarbeitungsstufe, die der Ausgangspunkt für die Wertschöpfung innerhalb des Clusters Forst und Holz sind. Insofern kommt den Rohholz transportierenden Betrieben eine logistische „Schlüsselrolle“ zu.

Betrachtet wird in dem Projekt „Optimierte Holzlogistik Baden-Württemberg“ der Holztransport per LKW auf der Straße. Holz wird – mit Ausnahme von Brennholz – in Deutschland und Europa mindestens einmal mit dem LKW bewegt: Der Anteil der Rohholzmengen, der per Bahn und Schiff transportiert wird, liegt unter 10 %<sup>14</sup>, in Baden-Württemberg mit einer Vielzahl an mittleren Betrieben der Holzindustrie im ländlichen Raum und wenig Anschluss an Wasserstraßen mit hoher Wahrscheinlichkeit weit darunter.

Das Holztransport-Gewerbe unterscheidet sich von Transportunternehmen des allgemeinen Güterverkehrs in erster Linie durch den Einsatz von Spezialfahrzeugen und das Fahren auf schmalen und steilen Waldwegen auch bei schwieriger Witterung.

In Deutschland arbeiteten im Jahr 2004 geschätzt rund 1.500 Unternehmen im Holztransport<sup>15</sup>, die überwiegend 1 - 3 Holz-LKW einsetzten. Zehn Jahre später gibt es laut Umfrage der AGR (vgl. Kap. 3) bundesweit zwar noch mehr kleinere als größere Betriebe, ein Konzentrationsprozess hat aber stattgefunden. Die größeren Unternehmen mit mehr als fünf LKW stellten in der Umfrage die Mehrheit der gesamten erfassten Anzahl der Transportfahrzeuge.

Für die in Baden-Württemberg Rohholz transportierenden Betriebe sind kennzeichnend:

---

<sup>14</sup> Borchering (2007, S. 18)

<sup>15</sup> Vgl. Borchering (2007, S. 22 und S. 42)

- Kleine bis mittlere Betriebsgrößen mit 2 - 5 Fahrzeugen
- Häufig Familienbetriebsstrukturen
- Betriebsaktivitäten im regionalen, ländlichen Umfeld

Dass sich die Bedingungen und Problemfelder im Holztransportsektor seit 17 Jahren kaum verändert haben, verdeutlicht das folgende Zitat aus Leinert (1998)<sup>16</sup>:

*"Obwohl die Holztransportkosten folglich als zu hoch gelten, stehen die Rundholztransporteure unter einem erheblichen wirtschaftlichen Druck. Das Holztransport-Gewerbe ist gekennzeichnet durch einen geringen Organisationsgrad, eine im internationalen Vergleich hohe Regulierungsdichte und Abgabenlast sowie einen sehr harten Wettbewerb, in dem große Nachfrager die Preise auf das gerade noch vertretbare Minimum gedrückt haben. Regelmäßige Berichte über Gesetzesverstöße wie erhebliche Überladungen und außergewöhnlich hohe Arbeitszeiten sind ein Indiz für die schlechte Verdienstsituation der Transporteure."*

2012 wird die Lage der Branche ähnlich beschrieben<sup>17</sup>:

- *Ruinöser Wettbewerb:* Zur Steigerung des Umsatzes werden oft bewusst zulässige Gesamtgewichte überschritten. Ein Entzug der Güterkraftverkehrslizenz kann bei wiederholtem Verstoß die Folge sein, wird aber dennoch in Kauf genommen. Die Holzindustrie toleriert dieses Fehlverhalten des Öfteren, aber immer seltener. Fahrer, die sich innerhalb des gesetzlichen Rahmens bewegen, geraten dadurch unweigerlich ins Hintertreffen.
- *Fachkräftemangel:* Abwanderung von Fuhrleuten in strukturstarke Räume aufgrund besserer Vergütung.
- *Dieselpreise:* Dieselpreise machen ein Drittel des Gesamtkostenblockes aus. Die Preise für Kraftstoffe sind in den letzten fünf Jahren um 50 % gestiegen. Nur ein gutes Drittel der befragten Holztransportunternehmen haben vertraglich vereinbarte „Dieselklauseln“, um Kostensteigerungen beim Kraftstoff weiter geben zu können (vgl. Kap. 3).
- *Finanzierungsschwierigkeiten:* Die Eigenkapitalquote der Unternehmen ist in der Regel sehr gering. Finanzierungen von neuen Maschinen scheitern häufig an den Kreditvergabebedingungen der Bank.

In jüngster Vergangenheit kommen weitere Herausforderungen durch steigende Transportraten und zunehmende Gewichtskontrollen bei gleichzeitig fehlenden oder nur geringfügigen Preissteigerungen hinzu<sup>18</sup>. Viele Unternehmen berichten von Nachwuchssorgen und befürchten, keine attraktiven Arbeitsplätze anbieten zu können. In den Bundesländern, die an Polen oder Tschechien angrenzen, verzerren teilweise internationale Wettbewerber die Marktchancen für regional fahrende Holztransporteure.

Zusammenfassend muss also die wirtschaftliche Situation der Rohholztransporteure in Baden-Württemberg nach wie vor als kritisch eingeschätzt und angenommen werden, dass einzelne Betriebe nicht überlebensfähig sind<sup>19</sup>.

### **Ziel des Arbeitsberichts**

Der vorliegende Arbeitsbericht untersucht Wettbewerbsfaktoren des Holztransportgewerbes und soll deren Bedeutung und Beeinflussbarkeit bewerten. Zudem werden Hinweise für die

---

<sup>16</sup> Zitiert in Borchering (2007, S.1)

<sup>17</sup> Anonymus (2012d)

<sup>18</sup> Redmann et al. (2011, S. 15)

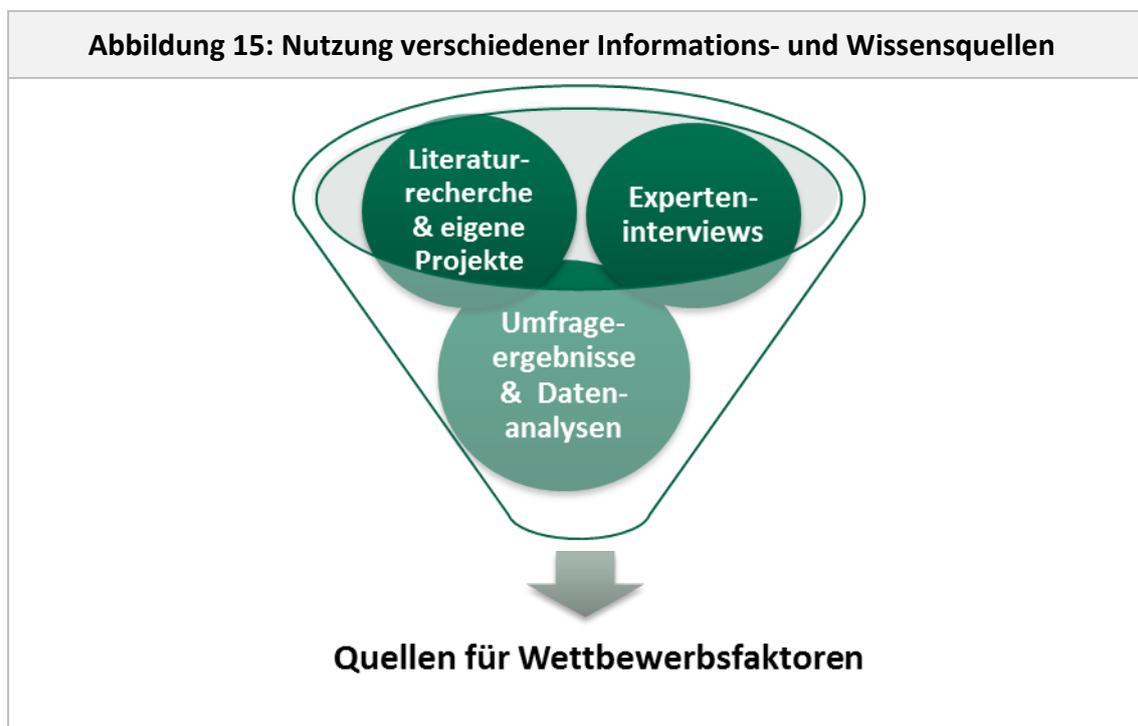
<sup>19</sup> Vgl. dazu u.a. Anonymus (2014); Anonymus (2013b); Anonymus (2012a)

Gestaltung der Wettbewerbsfaktoren gegeben, um die Zukunfts- und Wettbewerbsfähigkeit der Holztransporteure verbessern zu können und ggf. auch die Transportkostenbelastung der Holzindustrie zu senken.

## 2.2 Methodisches Vorgehen

Folgende methodische Schritte wurden zur Bearbeitung der Fragestellungen ausgewählt (vgl. Abbildung 15):

1. Durchführung einer Literaturrecherche zu wettbewerbsrelevanten Faktoren inklusive Auswertung eigener Holzlogistikprojekte.
2. Auswertung von Interviews mit Inhabern von Holztransportbetrieben und Experten aus der Forst- und Holzwirtschaft.
3. Interpretation der Ergebnisse der im Projekt durchgeführten Umfrage unter Holztransportbetrieben (vgl. Kap. 3) sowie von Datenanalysen zur Transportkostenbelastung der Holzindustrie.



Quelle: Eigene Darstellung

## 2.3 Ergebnisse - Wettbewerbsfaktoren im Holztransport-Gewerbe

Das Kapitel 2.3.1 definiert Wettbewerbsfähigkeit und führt in das betriebswirtschaftliche Konzept der Wettbewerbsfaktoren ein. Die für das Holztransportgewerbe identifizierten Wettbewerbsfaktoren werden im Kapitel 2.3.2 dargestellt. Im Kapitel 2.3.4 werden abschließend Schlussfolgerungen zur Verbesserung der Situation im Holztransportgewerbe gezogen und Ansätze für konkrete Handlungsmaßnahmen genannt.

### 2.3.1 Wettbewerbsfähigkeit und Wettbewerbsfaktoren

Wettbewerbsfähigkeit ist das Potenzial der (Transport-)Unternehmen innerhalb der Branche eine Gewinn bringende Position zu erlangen, zu behaupten oder sogar auszubauen<sup>20</sup>. Erfolg versprechende Wettbewerbsstrategien erfordern die Kenntnis und Gestaltung der relevanten Wettbewerbsfaktoren. Als klassische Wettbewerbsfaktoren können Kosten, Produkt- oder Servicequalität, Anpassungsfähigkeit und Zeit (Pünktlichkeit, Fristgerechtigkeit) unterschieden werden<sup>21</sup>:

- **Kosten:** Es kommt darauf an, das eigene Leistungsangebot für den Nachfragenden kostengünstiger als vergleichbare Konkurrenten offerieren zu können. Ziel ist Kostenführerschaft.
- **Qualität/Service:** Es kommt darauf an, mit seinem Leistungsangebot den qualitativen Ansprüchen des Nachfragers zu genügen. Ziel ist Qualitätsführerschaft.
- **Anpassungsfähigkeit:** Es kommt darauf an, bei wichtigen Merkmalen des Produktes eine kundenorientierte Differenzierung vorzunehmen. Ziel ist eine Bedarfsführerschaft.
- **Zeit (Pünktlichkeit, Fristgerechtigkeit):** Es kommt darauf an, die Leistung zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort anbieten zu können. Ziel ist eine Verfügbarkeitsführerschaft.

Zusätzlich zu diesen einzelbetrieblich beeinflussbaren Faktoren bestehen Möglichkeiten, die Wettbewerbssituation durch Kooperationen zu beeinflussen: Kooperationsfähigkeit ist deshalb ein mittelbar wirkender Wettbewerbsfaktor.

Damit ein Holztransportunternehmen eine wettbewerbsfähige Marktposition erreicht, muss vor dem Hintergrund der Einbettung in die Holzlogistik-Kette die Ausrichtung aller Aktivitäten auf das gemeinsame Ziel Holzbereitstellung erfolgen. Eine Verbesserung der Wettbewerbsposition für alle Partner der Kette ist allerdings nur dann erreichbar, wenn Kostensenkungen durch eine Optimierung dieser Supply-Chain<sup>22</sup> an alle Partner fair verteilt werden. Brown<sup>23</sup> fasst das unter „Maximierung des Kundennutzens unter Minimierung der Kosten“ zusammen.

### 2.3.2 Wettbewerbsfaktoren im Holztransport-Gewerbe

Für die Prozesse der Rohholzbereitstellung, die Dienstleistungen im Transportgewerbe und speziell für die Branche der Holztransportunternehmen wurden aufbauend auf den oben genannten "klassischen" Wettbewerbsfaktoren spezifische Wettbewerbsfaktoren identifiziert, die nachfolgend vorgestellt werden.

Die spezielle Frage der **internationalen Wettbewerbsfähigkeit** des Baden-Württembergischen Holztransport-Gewerbes im Wettbewerb mit Frankreich wird separat betrachtet.

Die für die Situation im **Holztransport-Gewerbe bedeutsamen Wettbewerbsfaktoren** sind in der nachfolgenden Grafik aufgeführt (Abbildung 16). Die im ersten Schritt identifizierten Wettbewerbsfaktoren wurden bereits im zweiten Arbeitstreffen im Projekt dem Expertenkreis vorgestellt und diskutiert. Im Zuge der weiteren Rechenschritte kamen neue Faktoren hinzu.

---

<sup>20</sup> Wirtschaftslexikon24 (2015)

<sup>21</sup> Brown (2009, S. 35)

<sup>22</sup> Supply chain: Englischer Ausdruck für Lieferkette. Die Lieferkette oder auch ein Liefer-Netzwerk umfasst alle Organisationen und Prozesse, die über vor- und nachgelagerte Verbindungen an den Prozessen der Wertschöpfung für den Endkunden beteiligt sind. In der Wald-Holz-Kette sind dies für das Produkt Rohholz vor allem Waldbesitzer, Einschlagsunternehmen, Holztransporteure und Holzhändler.

<sup>23</sup> Brown (2009, S. 37)

Die nachfolgende Grafik gibt eine Übersicht der diskutierten Wettbewerbsfaktoren, welche weiter in branchenspezifische Teil-Faktoren untergliedert sind. So lässt sich der Faktor Kosten in die Teil-Faktoren Kosten für die Holz-LKW, Lohn- und Sachkosten aufteilen.



Quelle: Eigene Darstellung

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Recherche für die Wettbewerbsfaktoren und wichtige Teilfaktoren einzeln vorgestellt und vor dem Hintergrund von Expertenaussagen, Literaturauswertungen und Ergebnissen eigener Projekte zum Thema diskutiert.

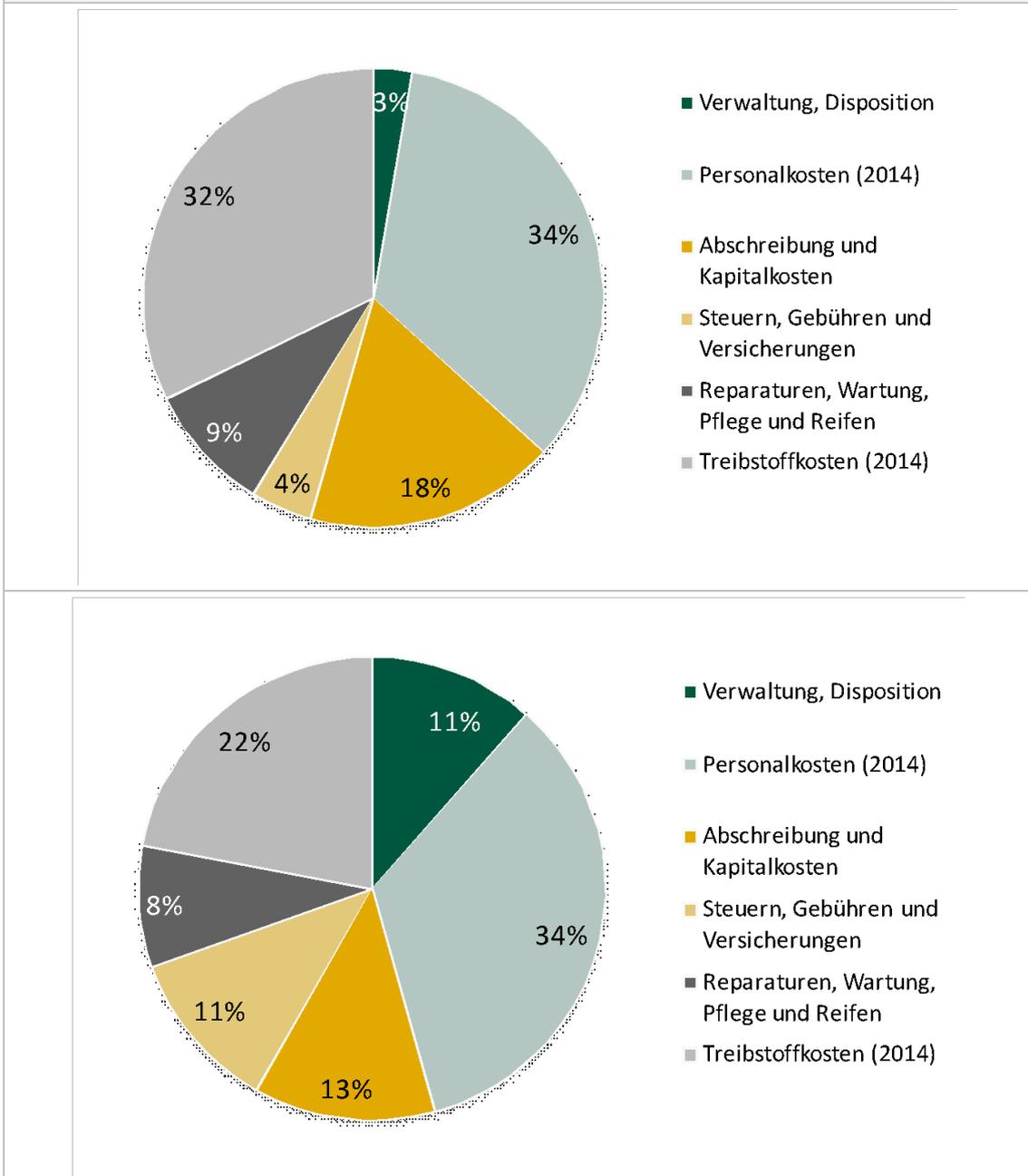
Ein auffälliger Befund ist, dass sich bislang nur wenige Studien mit den innerbetrieblich und betriebsindividuell beeinflussbaren Faktoren oder Teilfaktoren (Leistungsfähigkeit, Zukunftsfähigkeit, Geschäftsstrategien) auseinandergesetzt haben. Deutlich mehr Projekte und Studien beschäftigten sich mit denjenigen Faktoren, die die gesamte Branche beeinflussen (Technologien, Ordnungsrahmen) oder Faktoren, die nur über Kooperationen wirksam werden können (Logistik-Kette, Logistikplattformen, gesetzliche Rahmenbedingungen).

### 2.3.3 Wettbewerbsfaktor Kosten

Die wichtigsten Kostenfaktoren und ihre relative Bedeutung für die Holztransportbetriebe sind in Abbildung 17 dargestellt. Die Grafik stellt die Anteile der Kostenfaktoren eines durchschnitt-

lichen Holztransport-LKW dar (Neuwert: ca. 200.000 Euro; obere Grafik) und vergleicht diese mit den Kostenanteilen eines Standard-LKW im Stückgut- oder Schüttgutverkehr (Neuwert: ca. 130.000 Euro; untere Grafik).

**Abbildung 17: Durchschnittliche Jahreskostenanteile pro LKW**



Quelle: Eigene Darstellung. Holztransport-LKW: Basierend auf Borchering (2007, S.102); Treibstoffkosten und Personalkosten aktualisiert auf Stand 2014<sup>24</sup>; Standard-LKW: Basierend auf Kalkulation nach BGL Branchenkostenentwicklung (2014).

Deutlich werden folgende, stark abweichende Kostenpositionen eines Holztransport-LKWs gegenüber einem Standard-LKW:

<sup>24</sup> Personalkosten wurden in den im Projekt beteiligten Holztransportbetrieben abgefragt.

- Die Anschaffungskosten eines Spezial-LKW für den Holztransport liegen um ca. 70.000 Euro, bzw. rd. 50 % höher als für einen Standard-LKW.
- Der größte Kostenanteil für den Betrieb eines Rohholztransport- wie auch Standard-LKWs sind mit 34 % die Personalkosten.
- Ähnlich bedeutsam sind mit 32 % die Treibstoffkosten beim Rohholztransport-LKW, die beim Standard-LKW mit 22 % deutlich geringer sind.
- Auch die Kapitalkosten sind mit 18 % höher für einen Holztransport-LKW (13 % für Standard-LKW).
- Kosten für Verwaltung und Disposition sind mit 11 % markant höher beim Standard-LKW als beim Holztransport-LKW (3 %). Dies weist auf den im allgemeinen Güterverkehr deutlich höheren Aufwand bei Logistiksteuerung und Disposition hin.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die gesamten technischen Betriebskosten beim Spezialfahrzeug Holz-LKW erwartungsgemäß höher liegen.

### **Bedeutung der Kosten als Wettbewerbsfaktor**

In der Umfrage Holzlogistik (vgl. Kap. 3)<sup>25</sup> wurden einige branchenspezifische Kostenfaktoren als hohe und sehr hohe Risiken für die Wettbewerbssituation benannt: steigende Treibstoffpreise (91 %), steigende Mautkosten (79 %) und eine Verschärfung gesetzlicher Rahmenbedingungen (80 %).

### **Steuerbarkeit/Beeinflussbarkeit der Kosten als Wettbewerbsfaktor**

Nach Ansicht der Experten ist der Kostenrahmen für alle Holztransport-Betriebe vergleichbar. Kosten für die Anschaffung eines LKW, Treibstoffpreise und Lohnkosten pro Stunde lassen sich weniger betrieblich beeinflussen als andere betriebliche Wettbewerbsfaktoren wie Leistungsfähigkeit oder Kooperation.

Die als sehr hohe Risiken für die Wettbewerbsfähigkeit eingestuften Kostenfaktoren Maut- und Treibstoffkosten können nur dann als betriebliches Risiko gemindert werden, wenn Frachtraten mit Preisgleitklauseln vereinbart werden konnten. Dies wird nur denjenigen Betrieben gelingen – so die Meinung der Experten (vgl. Kosten Abbildung 17) –, die für Ihre Geschäftspartner "unersetzbar" und verlässliche Partner sind oder auf Ebene der Gesamtbranche über einen starken Branchenverband eine starke Verhandlungsposition haben. Bereits in der Umfrage von Borchering (2007, S. 61) nannten 87 % der Betriebe die Möglichkeit der Weitergabe von Kostensteigerungen an die Kunden als drängendes Problem.

Teilfaktoren wie das zulässige Gesamtgewicht oder Steuern und Versicherungen sind kaum betrieblich, ggfs. aber überbetrieblich beeinflussbar. Anders als bei der Auswahl eines LKWs wird hier das Kostenniveau der gesamten Holztransportbranche und das ihrer Kunden (Waldbesitz und Holzindustrie) beeinflusst. Damit sind diese Teilfaktoren auch relevant für die internationale Wettbewerbsfähigkeit. Kostenbeeinflussung gelingt hier nur durch Kooperation im Holztransport-Gewerbe und in der Holzlogistik-Kette (vgl. Wettbewerbsfaktor Kooperation).

---

<sup>25</sup> AGR (2014), Frage: „Bitte bewerten Sie, welches Risiko die nachfolgende aufgeführten Einflussfaktoren auf die Wettbewerbsfähigkeit Ihres Unternehmen in den nächsten fünf Jahren haben können“. 103-122 Teilnehmer. Mehrfachantworten möglich.

Ähnlich müsste auch dem sehr hoch eingestuften Risiko der verschärften Wettbewerbsbedingungen begegnet werden. Insbesondere ist hier die Kooperation in der Branche (Verbandsarbeit) zu benennen, die es ermöglicht eine Anpassung der Kosten an verschärfte Rahmenbedingungen durchzusetzen.

Weit mehr Gestaltungsmöglichkeiten haben die Betriebe bei Disposition, Büroorganisation und der Auslastung der Fahrzeuge und Fahrer.

### Teilfaktor LKW Kosten

Die direkten LKW bezogenen Kosten unterscheiden sich je nach Typ des LKW (Kurzholz-LKW, Langholz-LKW, Trailer ohne Kran etc.) stark<sup>26</sup>, aber kaum zwischen den Betrieben.

Eine Senkung der LKW-Kosten kann durch Einsatz neuer Holz-LKW-Technologien erreicht werden. Die technologische Entwicklung zielte in den vergangenen Jahren auf Kostensenkung durch Gewichtseinsparung und/oder Flexibilisierung. Ein eigenes Arbeitspaket des Projekts (vgl. Kap. 5) greift dieses wichtige Thema für eine Kostensenkung mit Wirkung auf die gesamte Branche auf<sup>27</sup>.

- *Leichtbauweisen*<sup>28</sup>: Leichtere LKW führen direkt zur Steigerung des zulässigen Beladungsgewichtes und damit zur Reduzierung erforderlicher Fahrten. Für eine höhere Nutzlast wird daher vermehrt Feinkornstahl im Rahmenbau favorisiert. Durch eine auf Holztransport ausgelegte Optimierung können nach Angaben der Hersteller bis zu 10 % und bei den Anhängerarten sogar bis zu 30 % des Gewichts gespart werden.
- *Wechselbrücken*<sup>29</sup>: In ausgewählten Fällen zukunftssträftig können das Rücken und der Transport von Rundholz mit Wechselbrücken<sup>30</sup> sein. Der hohen Gesamtinvestition für Wechselbrücken stehen Einsparungen durch die geringeren Maschinenkosten des Wechselbrücken-LKW gegenüber. Insbesondere erhöht sich auch die Flexibilität in den Frachtmöglichkeiten und damit der Anteil an Lastfahrten.
- *Flexible Techniken* wie Kipp-Kranzüge<sup>31</sup> oder Teleskopsattelzüge und Euro-Flat Systeme erlauben mehr Flexibilität der Produkte für Rückfrachten<sup>32</sup>.
- *Wiegeeinrichtungen*<sup>33</sup>: Die Zellstoff Stendal GmbH konnte nachweisen, dass rund 18 % der LKW unter 38 t wiegen, 28 % der LKW wiegen dagegen über 40 t. Wiegeeinrichtungen könnten an dieser Stelle die Beladungsmasse der LKW optimieren.

Steuerbarkeit/Beeinflussbarkeit der LKW Kosten: Nach Meinung der Experten muss ein Betrieb Fahrzeugarten und -kapazitäten sehr genau an seinen Markt anpassen. Das sei nur dann gut möglich, wenn entsprechende Kooperationspartner aus Industrie oder Waldbesitz vorhanden sind und die Nachfrage gut bekannt ist. Viele kleine Unternehmen können kaum flexibel auf diese Nachfrage reagieren. Ein einmal getätigter Kauf bindet an eine Technik und bestimmt damit den Kreis der Sortimente und möglichen Partner.

---

<sup>26</sup> Borchering (2007, S. 91)

<sup>27</sup> Geimer (2014)

<sup>28</sup> Anonymus (2013b); Anonymus (2013a); Anonymus (2014)

<sup>29</sup> Louen (2011)

<sup>30</sup> Wechselbrücken sind die aus dem üblichen Güterverkehr bekannten geschlossenen, containerähnlichen Transporteinheiten hinter dem Zugfahrzeug.

<sup>31</sup> Bockelmann-Holz GmbH (2014)

<sup>32</sup> Korten und Eberhardinger (2008); Korten (2009, S. 47 ff); Anonymus (2012a)

<sup>33</sup> Anonymus (2012a)

LKW Kosten einer größeren Flotte können durch die Kombination aus Spezialfahrzeugen und einfachen, kranlosen Straßen-LKW beim Abtransport größerer Holz Mengen pro Waldort positiv beeinflusst werden. Für über 80 km einfache Transportentfernung sollten dann nur noch kranlose Fahrzeuge eingesetzt werden sowie Spezialfahrzeuge zu deren Beladung und den Transport im Wald. Die 5 - 7 t mehr an Ladungsgewicht und die geringeren Betriebskosten überkompensieren dann den zusätzlichen Umladungs- und Logistikaufwand. Der Auswahl der Fahrzeuge kommt auch bei der Bemühung um die Erhöhung der Lastfahrten eine Bedeutung zu. Flexible Techniken wie Kipp-Kranzüge oder Teleskopsattelzüge erlauben mehr Flexibilität der Produkte für Rückfrachten<sup>34</sup> und lohnen den deutlichen Mehraufwand je nach Geschäftsstrategie und in Abstimmung auf den Bedarf der Kooperationspartner in Industrie/Waldbesitz.

### **Teilfaktor Verwaltungskosten, Bürokosten und Disposition**

Verwaltungs- und Dispositionskosten bestimmen im Holztransport-Gewerbe nur ca. 3 % der Kosten. Im allgemeinen Güterverkehr sind es dagegen 11 %.

Die Kosten sind somit von der absoluten Höhe wenig bedeutsam. Der höhere Aufwand im allgemeinen Güterverkehr macht aber deutlich, dass insbesondere der Disposition eine größere Rolle als Wettbewerbsfaktor zukommen könnte. Indirekte positive Effekte der Kosten für die Disposition sind bessere Auslastung und eine pünktliche Bereitstellung des Rohholzes.

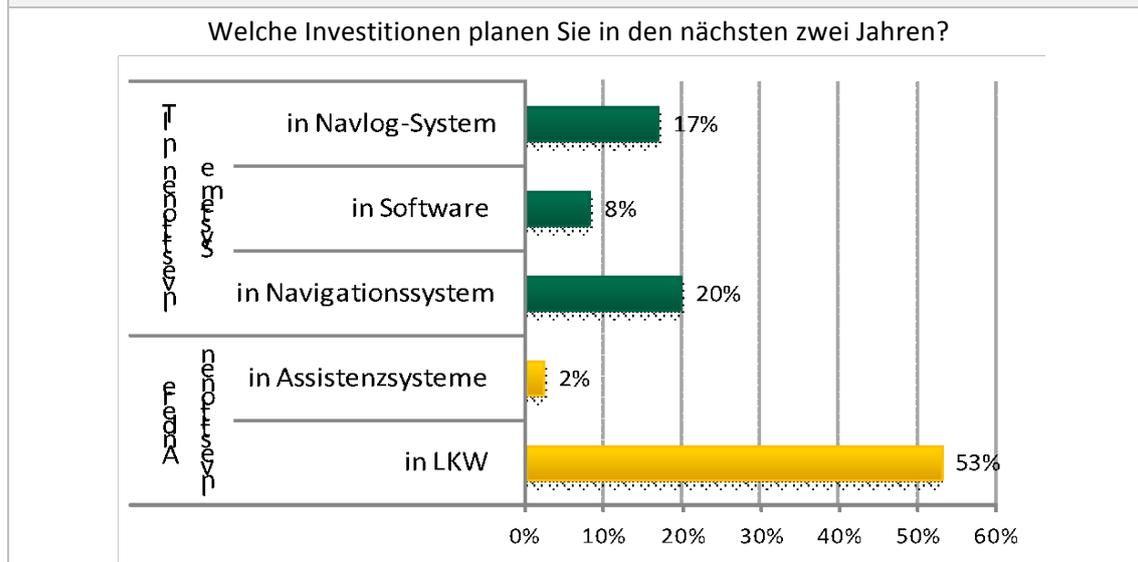
Große Betriebe können Vorteile durch effiziente Arbeitsteilung in der Verwaltung und Disposition gewinnen. Eindeutig wird von den Experten aber nur die zentrale Disposition mehrerer Fahrzeuge, basierend auf einer professionellen Software, als Vorteil größerer Betriebe angesehen. Kleine Betriebe können durch flexiblen Einsatz des Unternehmers, passende IT- und Kommunikationslösungen und schlanke Overheads (kaum Personalverwaltung, geringe Bürokosten) die Vorteile der Arbeitsteilung und Fixkostendegression wettmachen.

Das Fehlen eines Kostenmanagements und Controllings wurde von den Experten als Defizit der kleineren Betriebe benannt. Als Defizit wurde auch benannt, dass es keine guten Logistik IT Lösungen für die in der Überzahl kleinen Betriebe gibt, die diese Betriebe bei der Kostenvorkalkulation, Planung und Kostenanalyse unterstützen. Ein Betrieb äußerte beispielhaft, dass erst eine Wochentourenplanung und die tägliche Nachkalkulation der Aufträge Verhandlungssicherheit und einen Lerneffekt zum Kostenmanagement und für die Preisgestaltung bringt. Einen weiteren Hinweis auf die Wichtigkeit von Navigations- und Dispositions-IT ergab sich aus der Befragung Holzlogistik<sup>35</sup> (Abbildung 18).

---

<sup>34</sup> Korten (2009, S. 8); Borcharding (2007, S. 76)

<sup>35</sup> Freise (2014)

**Abbildung 18: Befragung Holzlogistik - Investitionsplanung**

Quelle: AGR, Befragung Holzlogistik<sup>36</sup>

Auf die Frage "Welche der folgenden Investitionen planen Sie in den nächsten zwei Jahren?" antworteten 45 % der Unternehmen<sup>37</sup>, die überhaupt investieren wollen, dass in Navigations- und Dispositions-IT investiert wird. Die Experten sind überzeugt, dass der Holztransportsektor gezwungen ist, die Defizite bei Disposition, Kostenmanagement und Routenoptimierung gegenüber den übrigen Güterverkehrsbranchen aufzuholen.

### Teilfaktor Lohnkosten

Der Anteil der Lohnkosten an den Gesamtkosten beträgt im Holztransport-Gewerbe rd. 34 %, im allgemeinen Güterverkehr sind es 35 %. Da die Löhne für Fahrer in einer Region (z. B. Baden-Württemberg) ähnlich sind, ergibt sich hier kein bedeutsamer Wettbewerbsfaktor, da er durch die Betriebe wenig steuerbar ist. „Gut bezahlte Fachkräfte lohnen sich“, äußerten die interviewten Experten, weil sie technisch versierte Holztransportspezialisten sind, die sich regional auskennen. Borchering stellte noch 2007 einen großen Unterschied zwischen West- und Ostbundesländern fest<sup>38</sup>.

Die Lohnkonkurrenz aus dem osteuropäischen Ausland wird allgemein in der Transportbranche beklagt<sup>39</sup>, wurde aber von den Experten – insbesondere aus den oben genannten Gründen – nicht als relevantes Problem im Holztransport-Gewerbe benannt.

### Teilfaktor Auslastung

Eine hohe Auslastung bei Transportfahrten der Holz-LKW senkt Abschreibungskosten und steigert die Umsätze. Zu den Anteilen der Lastfahrten im Rohholztransport gibt es einige Studien mit zumeist ähnlichen Befunden: Bodelschwingh (2001) ermittelte einen mittleren Lastfahrant-

<sup>36</sup> Freise (2014)

<sup>37</sup> Summe aus Investition Navlog (17%), Investition in Software (8%) und Investition in Navigationssysteme (20%)

<sup>38</sup> Borchering (2007, S. 93): „Die Personalkosten in Ostdeutschland (10,52 Euro pro Stunde) sind erwartungsgemäß durchschnittlich 38 % geringer als in Westdeutschland (16,93 Euro pro Stunde).“

<sup>39</sup> U.a. Kienzler (2013)

teil von 54 %, der sich bei der Zellstoff- und Papierindustrie auf 58 % und bei der Sägeindustrie nur auf 52 % beläuft, insgesamt niedrige Werte, obwohl Fahrten wie Werkstattfahrten oder Überführungen ignoriert wurden. Baumann (2008)<sup>40</sup> ermittelte in der Region Ostalb 57 %, Korten (2009) in umfangreichen eigenen Erhebungen 60 % Lastfahrtenanteil. Auch die Expertenbefragung der im Projekt HoLoBaWü beteiligten Experten nennt als realistischen Lastfahrtenanteil 60 % für die Bedingungen in Baden-Württemberg.

Erhöht werden könnten Lastfahrtenanteile nach Ergebnissen der Regionalstudie „Holzkompetenz<sup>3</sup>“ (Nordwürttemberg und nördliches Bayrisch-Schwaben) durch die Etablierung und Unterstützung (EDV) von überbetrieblich kooperierenden Netzwerken um rd. 5 %<sup>41</sup>. Korten ermittelte 2009 sogar Potenziale von 7 - 11 %<sup>42</sup>.

Im HoLoBaWü Projektrahmen wird der Wettbewerbsfaktor Auslastungsoptimierung als so bedeutsam erachtet, dass sich ein Arbeitspaket (vgl. Kap. 3) unter anderem mit der Optimierung von Lastfahrtenanteilen beschäftigt. Auch von allen befragten Experten wird die Erhöhung des Lastfahrtenanteils als herausragender Wettbewerbsfaktor hervorgehoben. Dieser Faktor ist betrieblich, durch Kooperation in der Branche und insbesondere in der Holzlogistik-Kette beeinflussbar<sup>43</sup>. Die Erwartung war damals wie heute, dass geringere Transportkosten sowohl die Wettbewerbsfähigkeit der Holz kaufenden Industrie (Sägewerke, Holzwerkstoff- und Papierindustrie) als auch der Transporteure steigern können.

Auch Schichtbetrieb wird heute von den Experten als ein "Muss" bezeichnet. Damit verbunden ist der wirtschaftlich positive Effekt der höheren Auslastung der LKW, der aber wohl nicht die Initialzündung zur Verhaltensänderung war.

Zur Steuerbarkeit und Beeinflussbarkeit: Vielfach wurde in der Vergangenheit ein Lösungsansatz gesucht, der Holzlieferanten, Transporteure und die Holzindustrie über eine vertikale und horizontale Kooperation und entsprechende Informationsplattformen zu verbinden suchte<sup>44</sup>. Wenige positive Erfahrungen stehen dabei zahlreichen gescheiterten Versuchen gegenüber (vgl. hierzu auch die Ausführungen beim Faktor Kooperation). Dass die anvisierten Kosteneinsparungen nicht realisiert werden konnten, spielte beim Scheitern solcher Projektansätze gar keine Rolle. Es kann festgehalten werden, dass die standardisierte überregionale Vernetzung der Partner in der Holzketten immer noch nur sehr punktuell existiert.

Die Lösung für eine Erhöhung des Lastfahrtenanteils wird derzeit in der Branche nicht in großen vertikalen und horizontalen Kooperationen (Logistik-Plattformen) gesucht, sondern in der Organisation der eigenen Kundenbeziehungen zu Waldbesitzern und Industrie. Anzahl und Lage der möglichen Lade- und Entlade-Region werden zum Beispiel so ausgewählt, dass ein Ringverkehr mit deutlichen kürzeren Distanzen zwischen Ladepunkten und damit geringeren Anteilen leerer Fahrten möglich wird. Die Experten sind sich einig, dass der Schlüssel für den Aufbau dieser kostensenkenden Kooperationen in den Faktoren Zuverlässigkeit und (Kunden-) Kooperation liegt. Damit verbleibt das Lastfahrten-Problem beim einzelnen Betrieb und kostet vermehrt Aufwand bei der Disposition. Auch die Diversifizierung bei den transportierten Gütern ist eine der Strategien, die Transportunternehmen derzeit vermehrt einschlagen, um die

---

<sup>40</sup> Baumann (2008, S. 151)

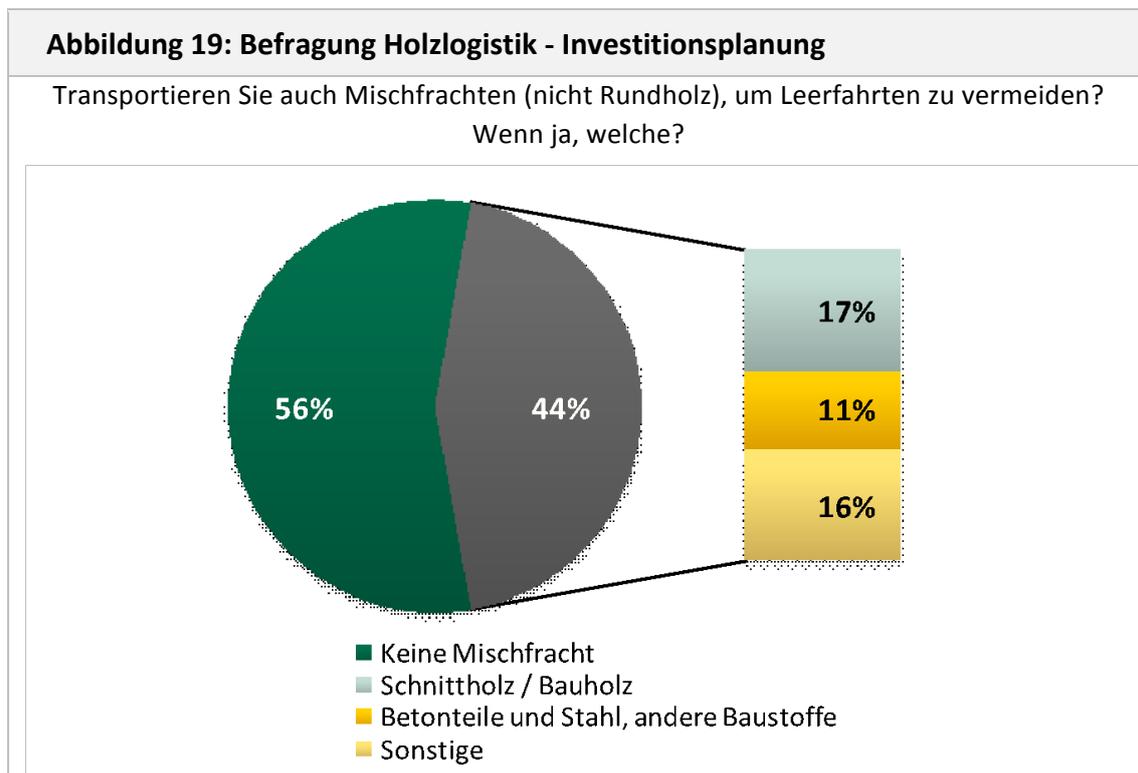
<sup>41</sup> Redmann et al. (2011)

<sup>42</sup> Korten (2009, S. 9 und S. 28)

<sup>43</sup> Bodelschwing (2006); Korten (2009); Smaltschinski (2010)

<sup>44</sup> U.a. Redmann et al. (2013); FIBOIS (2007); Anonymus (2012c)

Auslastung zu erhöhen. In der Umfrage Holzlogistik<sup>45</sup> gaben 44 % aller Rohholztransporteure an, dass sie Mischfrachten transportieren. Bauholz- u. Schnittholz transportieren dabei regelmäßig 17 % (Abbildung 19).



Quelle: Befragung Holzlogistik (Teilnehmer=124, Antwortende=63)

Für erfolgreiche Disposition im Holztransport-Gewerbe sind nach Aussagen der Experten keine gut passenden einzelbetrieblich einsetzbaren IT Lösungen auf dem Markt. Bei Angebotsverhandlungen sollten Möglichkeiten von Rückfrachten aus der gleichen Region eine bedeutende Rolle spielen. Damit das so ist, müssen diese auch bekannt sein.

### Teilfaktor Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichts

Diesem Teilfaktor ist der größte Teil im gesamten Projekt gewidmet, was seine Bedeutung für die Kosten im Holztransport unterstreicht. Er wird als wichtiger Faktor mit Wirkung auf das Kostenniveau im Holztransport-Gewerbe und damit auch als bedeutsam für die Kunden in der Holzindustrie und die gesamte Holzlogistik-Kette angesehen.

Eine Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichts wird seit langem von der Holzindustrie und dem Holztransport-Gewerbe angestrebt und begründet<sup>46</sup>.

Die Wirkungen einer Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichts sind<sup>47</sup>:

- Direkte Senkung der Transportkosten für das Holztransport-Gewerbe, aber auch für die Holzindustrie und so mittelbar auf die gesamte Holzlogistik-Kette,
- Vermeidung unnötiger Verkehre (weniger LKW, weniger Fahrten),

<sup>45</sup> Freise (2014), Frage: „Transportieren Sie auch Mischfrachten (nicht Rundholz), um Leerfahrten zu vermeiden? Wenn ja, welche?“

<sup>46</sup> U.a. Kienzler et al. (2006): Studie im Auftrag des deutschen Holzwirtschaftsrats; Kienzler et al. (2002): Studie im Auftrag des Holzabsatzfonds

<sup>47</sup> DeSH (2013)

- Minderung des Ausstoßes an CO<sub>2</sub>-Emissionen und
- Harmonisierung im europäischen Wettbewerb<sup>48</sup>.

In der Umfrage Holzlogistik (vgl. Kap. 3) wurde "höheres zulässiges Gesamtgewicht in den Nachbarländern" als vierthöchstes Risiko für die Wettbewerbsfähigkeit eingestuft<sup>49</sup>. Das verdeutlicht, dass das zentrale Thema des Projekts von den Holztransporteuren im hohen Maße unterstützt wird. In die gleiche Richtung weist, dass in der gleichen Umfrage "Überladungen bei Mitbewerbern" an dritter Stelle der Risiken für die Wettbewerbsfähigkeit eingestuft wurde. Diese Einschätzung steht im Kontrast zu der Meinung der Experten, die den Kontrolldruck auf der Straße und die verschärfte Reaktion in der Holzindustrie als Grund ansehen, dass eine Einhaltung des zulässigen Gesamtgewichts für alle Unternehmen gleichmäßig immer dringlicher wird.

Zur Beeinflussbarkeit/Steuerbarkeit: Als branchenübergreifendes Thema kann dieser Wettbewerbsfaktor nur dann verbessert werden, wenn ein starker Branchenverband als Partner der Holzindustrie und des Waldbesitzes für Veränderungen eintritt. Eine Änderung des Rechtsrahmens ist im Interesse der gesamten Wald-Holz-Kette und findet damit tatsächlich vergleichsweise breite Unterstützung. Eine Erhöhung würde auch die Wettbewerbsregeln in der EU angleichen, insbesondere denen Frankreichs mit zGG von 48 t – teilweise 57 t näher kommen. Skeptiker sehen Risiken für die Verkehrssicherheit, zusätzliche Belastungen für die Straßeninfrastruktur, insbesondere aber für Brücken und Waldwege<sup>50</sup>. Zudem wird die Reduzierung des kombinierten Verkehrs befürchtet.

Den Effekt auf die Transportkosten in der gesamten Wald-Holz-Kette illustriert die nachfolgenden Abbildung 20. Erhöht sich das zulässige Gesamtgewicht auf 44 t, verschiebt sich die in Abbildung 17 bereits vorgestellte Kostenstruktur für einen Holztransport-LKW leicht. Angenommen wird, dass Verschleiß und Wartungskosten proportional zur Gewichtserhöhung ansteigen. Zudem steigen mit höherer Zuladung auch die Treibstoffkosten, bei 4 t höherer Zuladung um ca. 5 %<sup>51</sup>.

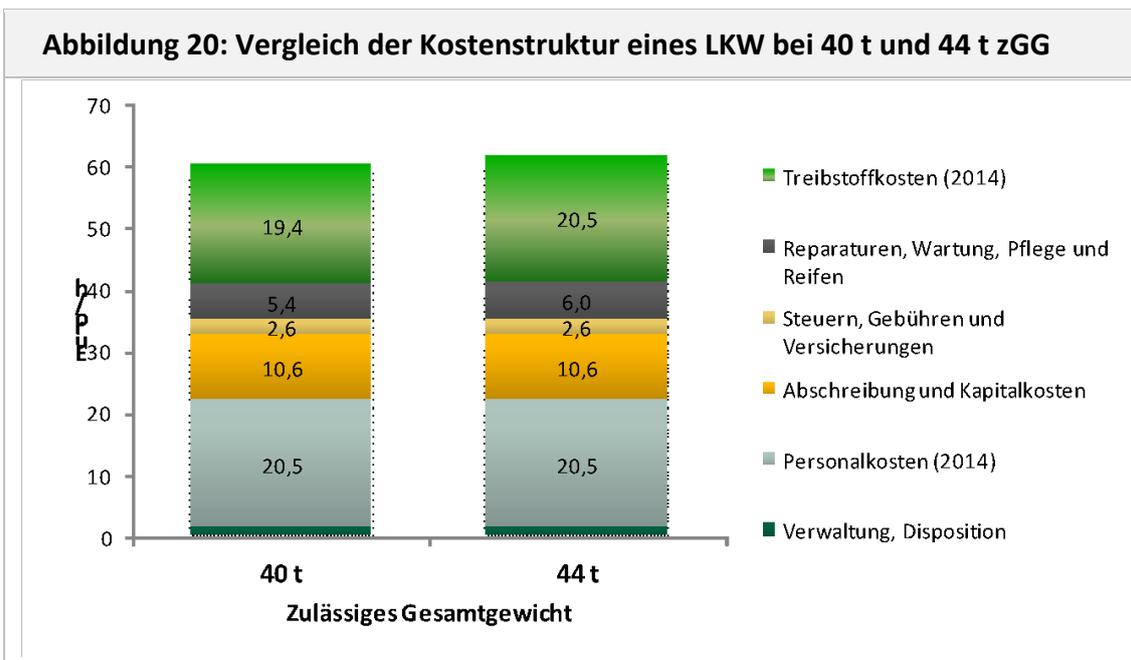
---

<sup>48</sup> Vergleiche hierzu den Vergleich der Transportkostenbelastung zwischen Frankreich und Deutschland Tabelle 9.

<sup>49</sup> Freise (2014), Frage: „Bitte bewerten Sie, welches Risiko die nachfolgende aufgeführten Einflussfaktoren auf die Wettbewerbsfähigkeit Ihres Unternehmen in den nächsten fünf Jahren haben können“. 136 Teilnehmer. Mehrfachantworten möglich.

<sup>50</sup> Borchering (2007)

<sup>51</sup> Vgl. dazu Kap. 1



Quelle: Eigene Darstellung und Berechnungen unter Verwendung des Modells nach Borchering, 2007<sup>52</sup> mit Anpassung der Treibstoffkosten und Personalkosten auf Werte des Jahres 2014.

Die resultierenden Kosteneffekte einer Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichtes auf 44 t für eine Tour bei einer Transportdistanz von 50 km und 60 % Lastfahrt veranschaulicht die folgende Tabelle 8.

**Tabelle 8: Effekt einer Erhöhung des zGG auf die Transportkosten**

Kennwerte	Einheiten	40 t Gesamtgewicht	Veränderung in %	44 t Gesamtgewicht		
Zul. Gesamtgewicht	t	40	10 %	44		
Zuladung	t	20	20 %	24		
Zeitaufwand	h / 100 t	21	-17%	17		
Treibstoffkosten (2014)	Euro / Tour	81	6 %	86		
	Euro / t	3,0	-12 %	2,7		
Reparaturen, Wartung, Pflege, Reifen	Euro / Tour	23	10 %	25		
	Euro / t	1,1	-8 %	1,0		
Gesamtkosten	Euro / Tour	251	3 %	258		
	Euro / t	12,6	-14 %	10,8		
<b>Kennwerte in m<sup>3</sup></b>		<b>Nadelholz</b>	<b>Laubholz</b>		<b>Nadelholz</b>	<b>Laubholz</b>
Zuladung	m <sup>3</sup>	24	17	19 %	29	21
Kosten	Euro / m <sup>3</sup>	10,4	14,6	-14 %	8,9	12,5

Quelle: Eigene Berechnung. Transportkostenmodell von Borchering (2007). Kostensituation im Jahr 2003; Anpassung der Treibstoffkosten und Personalkosten auf Jahreswerte 2014; Tour mit 50 km Transportdistanz und 60 % Lastfahrt.

Für eine Tour mit der Transportdistanz von 50 km würden sich durch die Anhebung des zulässigen Gesamtgewichtes um 10 % auf 44 t folgende Effekte ergeben:

<sup>52</sup> Borchering, 2007; S.102: Daten aus dem Jahr 2003.

- Das zulässige Gesamtgewicht steigt um 10 %.
- Die Zuladung steigt um 20 % auf 24 t und je nach Holzart von 24 auf 29 m<sup>3</sup> bzw. 18 auf 22 m<sup>3</sup>.
- Für den Transport von 100 t sinkt der Zeitaufwand um 4 Stunden (17 %)
- Die Treibstoffkosten der Tour steigen um ca. 6 %, da bei gleicher Motorleistung und Entfernung mehr Holz transportiert wird. Pro Tonne sinken die Kosten um 12 %.
- Ebenso steigt der Aufwand für Reparaturen und Wartung. Es wird angenommen, dass dieser um 10 % proportional zum zulässigen Gesamtgewicht ansteigt.
- Wegen des Anstiegs von Treibstoff- und Reparaturkosten liegen die Kosten der Tour um 3 % höher.
- Wegen der unterschiedlichen Holzdichten wirken sich Kosten pro Kubikmeter unterschiedlich auf Nadelholz und Laubholz aus. Die relativen Veränderungen bleiben jedoch gleich.
- **Pro Tonne Rohholz können 14 % der Kosten eingespart werden.**

### **Wettbewerbsfaktor Leistungsfähigkeit**

Der Wettbewerbsfaktor Leistungsfähigkeit umfasst die Qualität der Serviceleistung Holztransport. Durch flexible Übernahme und zuverlässige Abarbeitung von Fuhraufträgen mit der passenden Technik und der verlässlichen Einhaltung von Geschäftsusancen heben sich Holztransportbetriebe voneinander ab.

Sie sichern so eine vertrauensvolle Kooperation mit den Auftraggebern. Dies wiederum ist die Basis für Auslastung, Ausrichtung einer Geschäftsstrategie und Preisaushandlungen auf Augenhöhe.

Teilfaktoren sind dabei:

- Servicequalität als Kombination von Flexibilität und Zuverlässigkeit: Flexibilität in der Annahme von Aufträgen zeitlich wie nach Sorten. Zuverlässigkeit nach Bearbeitungszeit und vollständiger Abfuhr der Holzlisten.
- Anpassung an technische, administrative Änderungen: aktuelle Fahrzeugtechnik, Ladungssicherung oder Wiegeeinrichtung. Verlässliche Einhaltung von Geschäftsusancen.
- Breite der angebotenen Leistungen.

### **Teilfaktoren Servicequalität – Zuverlässigkeit und Flexibilität**

Nach Aussagen der interviewten Experten ist Servicequalität – Flexibilität gepaart mit Zuverlässigkeit – einer der herausragenden Wettbewerbsfaktoren. Im Gegensatz dazu nehmen in den zahlreichen Studien zur Verbesserung der Wettbewerbsbedingungen im Holztransportsektor vor allem innovative technische Lösungen oder Verbesserungen der rechtlichen Rahmenbedingungen einen breiten Raum ein (vgl. Kap. 2.3.2 oben). Der Faktor Vorteile durch Gestaltung der Serviceleistungen, der Flexibilität und Zuverlässigkeit wird in den Untersuchungen bisher kaum betrachtet.

Zur Beeinflussbarkeit/Steuerbarkeit: Eine exzellente Servicequalität durch Flexibilität und Zuverlässigkeit ist nach Expertenmeinung entscheidend für die Bindung und enge Kooperation mit Waldbesitzern und Industrie. Sich "unverzichtbar machen" wird als wichtige Strategie angesehen, um stetig akzeptable Frachtraten verhandeln zu können. Der leistungsfähige und

attraktive Service anbietende Betrieb erreicht so einen Grad an Kooperation mit Waldbesitzern oder mit Betrieben der Holzindustrie, dass die eigene Verhandlungsposition gestärkt wird. Aber nur, wenn dies bei einer genügenden Menge an Kooperationspartnern gelingt, ist die Verhandlungsposition stark, da der Transporteur dann auch unabhängig genug ist.

Herausragende Serviceleistungen können sein: Genügend Kapazität und Exklusivität, um Kunden rasch und flexibel zu bedienen, Übernahme von Logistikleistungen auf Zuruf, verlässliche Abfuhr auch von Polterresten und regelmäßige Information über den Abfuhrzustand sowie u.a. Pünktlichkeit bei der Abladung am Werk.

### **Teilfaktor Breite der angebotenen Leistung**

Die Diversifizierung der angebotenen (Transport-)Leistungen kann eine Strategie sein, um die Servicetiefe bei den üblichen Rohholzkunden zu erhöhen (Schnittholztransporte, Hackschnitzeltransporte) und damit auch die Auslastung zu steigern (vgl. Faktor Auslastung Kap. 2.3.3). Eine weitere Strategie von Holztransportunternehmen ist die Nutzung ihrer Struktur als Transportbetrieb (LKW, Fahrer, Disposition, Know-How), um weitere Frachtmärkte zu erschließen (Schüttgüter, Baustoffe etc.). Eine dritte Strategie zielt auf die Erweiterung der Dienstleistungen entlang der Holzlogistik-Kette durch das Anbieten von Einschlags- und Rückeleistungen oder den Holzhandel.

Die Umfrage Holzlogistik<sup>53</sup> (vgl. Kap. 3) zeigt die bestehende große Bandbreite der angebotenen Leistungen. Von 124 Transporteuren haben 50 % weitere Geschäftsfelder neben dem Rohholztransport, 24 % ein weiteres, 26 % sogar zwei und mehr. Als Erweiterung der Transportleistungen im Holztransportbereich nannten 19 % den Hackschnitzeltransport und 17 % den Schnittholztransport. Die Strategie eines Ausweichens auf andere Transportmärkte nannten 17 % (Speditionsgeschäft). Eine Verbreiterung der Leistungen entlang der Holzlogistik-Kette wählten 31 % in Form des Holzhandels. 8 % bieten Leistungen als Forstunternehmer an.

So wird der Markt für (Industrie-)Hackschnitzel als weniger umkämpft und als besser bezahlt beschrieben. Unter den wenigen großen Anbietern werde auch kooperiert. Oft sind es die gleichen Kooperationspartner aus der Industrie, die auch Transporte von Hackschnitzel nachfragen, was die erweiterte Nutzung der bestehenden Kundennetzwerke erlaubt.

Erweiterungen des bestehenden Kundenkreises werden als wichtiger, aber nicht als entscheidender Wettbewerbsfaktor für den einzelnen Betrieb im Rohholztransportsektor eingestuft.

Einige Holztransporteure bieten gleichzeitig auch Holzernte- und Rückearbeiten, also mehrere Arbeitsschritte entlang der Forst-Holz-Kette, an. Diese Geschäftsfelder werden teils als günstige Ergänzung gesehen, um die eigenen LKW besser auszulasten und eine gezielte und selbst gesteuerte Disposition vom Wald zum Werk zu ermöglichen. Andere Stimmen sehen diese Kombination als sehr aufwändig und komplex an.

Allgemein wird von den Experten vermutet, und dies bestätigen die Ergebnisse der Umfrage, dass die Verbreiterung des Leistungsangebots in den letzten Jahren eine Strategie ist, um die Wettbewerbsfähigkeit zu sichern.

---

<sup>53</sup> AGR (2014), Frage: "Gibt es weitere Geschäftsfelder, in denen Ihr Unternehmen tätig ist?" 124 Antworten. Liste mit Geschäftsfeldern. Mehrfachantworten möglich.

## Faktor Zukunftsfähigkeit

Durch die Erarbeitung und Umsetzung von Entwicklungsstrategien können sich Holztransportbetriebe voneinander abheben. Dabei werden folgende Teilfaktoren als bedeutsame Aspekte einer Zukunftsfähigkeit angesehen:

- *Geschäftsstrategie*: Vorhandensein einer Geschäftsstrategie
- *Personal-Nachwuchs*: Strategien für die Lösung des Personalproblems, Bindung exzellenter Fahrer
- *Finanzen*: Finanzausstattung, die es erlaubt die Leistungsfähigkeit aufrecht zu erhalten
- *Ausstattung*: technisch aktuelle und damit effiziente Transporttechnik und Dispositionstechnik

### Teilfaktor Geschäftsstrategie

Eine Geschäftsstrategie zu erarbeiten bedeutet, die betriebliche Nische zu suchen, den Markt zu sondieren und sein Angebot auf diesen abzustimmen.

Nach Meinung der Experten erscheint eine zukunftsfähige Geschäftsstrategie selbstverständlich, wird aber tatsächlich als fehlend und damit als ein Problem insbesondere der kleinen Firmen angesehen. In Umkehrung wird dies als ein wichtiger Teilfaktor eingestuft, aber auch nicht als herausragender Wettbewerbsfaktor.

### Teilfaktor Personal-Nachwuchs

Das Nachwuchsproblem ist derzeit ein für alle Betriebe ähnlich großes Problem.

In der Umfrage Holzlogistik<sup>54</sup> wird "Fahrermangel" von 77 % der Befragten als hohes oder sehr hohes Risiko eingestuft, tritt in seiner Bedeutung aber deutlich hinter die Kostenfaktoren Treibstoff (91 %), Maut (79 %), und dem Risiko der Veränderung gesetzlicher Rahmenbedingungen (80 %) zurück. Noch 2003 nennen nur 22,5 % der Betriebe dies als drängendes Problem<sup>55</sup>. In Umkehrung ist der Betrieb im Wettbewerb erfolgreich, der aktiv die Arbeitsbedingungen der Fahrer verbessert. Auf die Frage „Welche Probleme sehen Sie in der Gewinnung von neuen Mitarbeitern und insbesondere von Fahrern?“ werden die Arbeitsbedingungen angesprochen, die als verbesserungswürdig angesehen werden. Genannt wurden überwiegend die "zu anstrengenden Arbeitsbedingungen" und ein "zu geringes Gehalt".

Auch hier werden die Betriebe im Vorteil gesehen, die durch Leistungsfähigkeit bzw. Servicequalität und klare Geschäftsstrategien die Voraussetzungen schaffen, für den Nachwuchs attraktive Konditionen und Sicherheit bieten. Nur Betriebe, die in der Lage sind Fahrern attraktive Löhne und Arbeitsbedingungen zu bieten, werden das Nachwuchsproblem lösen<sup>56</sup>. Dazu kann nach Meinung der Experten auch die Senkung des Kostenniveaus in der Branche beitragen – sei es durch die Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichts, Durchsetzung höherer Frachtraten oder Senkung der Transaktionskosten in der Holzlogistik-Kette durch gelungene Kooperationen.

---

<sup>54</sup> Kap. 3, AGR (2014), Frage: „Bitte bewerten Sie, welches Risiko die nachfolgende aufgeführten Einflussfaktoren auf die Wettbewerbsfähigkeit Ihres Unternehmens in den nächsten fünf Jahren haben können“. 130 Teilnehmer. Mehrfachantworten möglich.

<sup>55</sup> Borchering (2007, S. 61)

<sup>56</sup> Blendermann (2012)

### **Teilfaktoren Finanzausstattung und technische Ausstattung**

Eine gute Finanzausstattung erlaubt es einem Transporteur sich mit aktueller und einer zur Geschäftsstrategie passenden Technik auszustatten. Ohne ausreichende Finanzausstattung sind weder Innovationen noch Ersatzbeschaffungen möglich. Damit sind beide Faktoren harte K.O.-Kriterien der Wettbewerbsfähigkeit.

Von den Experten wurden diese Teilfaktoren eher als eine Folge denn als Ursache von Wettbewerbsvorteilen gesehen. Dienstleistungsqualität durch Flexibilität und Zuverlässigkeit, eine Geschäftsstrategie und die enge Kooperation mit einer genügenden Anzahl und örtlich günstigen Kunden wird als Voraussetzung für einen betrieblichen Erfolg gesehen. Aus diesem Erfolg ergibt sich die notwendige Finanz- und in Folge auch technische Ausstattung.

### **Faktor Regionalität**

Regionalität ist ein relevanter Wettbewerbsvorteil: Die am Ort oder in der Region ansässigen Transportbetriebe kennen sich örtlich aus, kennen Ansprechpartner bei Waldbesitzern und Holzindustrie. Dies erleichtert die Kommunikation und direkte Abstimmung mit den Kunden in der gleichen Region. Unproduktive Anfahrt- und Abfahrtwege zwischen eigenem Betriebshof und der Lade- oder Entladestelle sind kurz.

Auch nach Meinung der Experten können Ortskenntnis, persönliche Kontakte und direkte Abstimmung durchaus zur Bevorzugung regional ansässiger Betriebe führen. Die Vorteile einer kurzen Anfahrtstrecke zu den zentralen Kunden werden bestätigt (unbeladene Wege vom Belade- oder Entladeort zur Betriebsstätte). Hengstberger (2011) betont, dass Mitarbeitern bei einem regionalen Einzugsgebiet die tägliche Heimkehr und Übernachtung zu Hause ermöglicht wird. Dies klinge zwar unwichtig, erhöhe aber Motivation, Loyalität und Firmenbindung der Fahrer.

Zur Beeinflussbarkeit/Steuerbarkeit: Regionalität passe unter Umständen in ganz spezifische Geschäftsstrategien eines Betriebs, so die Meinung der Experten. In einigen Fällen sind diese Betriebe dann auch in die Logistikplanung der Kunden einbezogen oder übernehmen direkt Dispositionsaufgaben des Holzindustriepartners. Zu starke Abhängigkeiten werden teils als Vorteil, teils als Gefahr eingeschätzt.

### **Faktor Kooperation**

Kooperation<sup>57</sup> wird als wichtiger eigenständiger Wettbewerbsfaktor für das Holztransport-Gewerbe angesehen, weil sie Schlüssel für den betrieblichen Erfolg sein kann, wenn eine vertrauensvolle Zusammenarbeit mit Kunden zu auskömmlichen Frachtraten führt oder Kooperation zwischen den Betrieben die Lastfahrtenanteile erhöht. Darüber hinaus können sie positive Wirkung auf einige der Wettbewerbsfaktoren haben<sup>58</sup>. Kooperationen können demnach zwischen unterschiedlichen Partnern in der Holzlogistik-Kette bestehen und sollen in Folge als getrennte Teilfaktoren betrachtet werden; nämlich als Kooperation

- zwischen Transportbetrieben,

---

<sup>57</sup> Kooperation soll hier im Sinn einer vertieften, vertrauensbasierten zweckgerichteten Zusammenarbeit verstanden werden; als „Zusammenarbeit zwischen meist wenigen, rechtlich und wirtschaftlich selbstständigen Unternehmungen zur Steigerung der gemeinsamen Wettbewerbsfähigkeit“ (Wirtschaftslexikon24 (2015)).

<sup>58</sup> Redmann et al. (2013); Korten (2009); Borcharding (2007)

- entlang der Holzlogistik-Kette: zwischen Transportbetrieben und Waldbesitzern bzw. der Holzindustrie und
- übergeordnet in der Branche: Bildung und Mitarbeit in Branchenverbänden.

### **Teilfaktor Kooperationen zwischen Transportbetrieben**

Institutionalisierte Kooperationen zwischen Holztransportbetrieben können Arbeitsteilung zum Inhalt haben (Disposition durch eines der Unternehmen) oder Ergänzung bei der technischen Ausstattung und damit der Breite der angebotenen Leistungen. Kapazitätsengpässe lassen sich überwinden und tragen so zu einer verbesserten Servicequalität bei. In vielen Fällen agieren dabei Transportunternehmen teilweise oder gänzlich als Subunternehmer.

Eine enge und regelmäßige Kooperation zwischen Transportunternehmen wird als eher seltene Form der Kooperation eingeschätzt. Die Subunternehmerschaft ist zahlenmäßig eher bedeutsam, so die Meinung der Experten, und kann für kleine Betriebe die Kosten und Risiken am Markt senken. Auch hier wird eine starke Abhängigkeit vom größeren Betrieb aber als Gefahr angesehen.

### **Teilfaktor Kooperation in der Holzlogistik-Kette**

Kooperationen zwischen Transportbetrieben auf der einen und Waldbesitzern bzw. der Holzindustrie auf der anderen Seite sind die klassischen Ansätze zur Gestaltung einer effizienten Holzlogistik-Kette vom Wald zum Werk.

In der Optimierung der Holzlogistik-Kette wurde und werden nennenswerte Rationalisierungs- und Kostensenkungspotenziale gesehen<sup>59</sup>. Entsprechend oft wurde genau dieser Clustergedanke einer vertikalen Kooperation zum Thema von Projekten, die die Vermeidung von Kosten an den Schnittstellen zwischen den Partnern in der Kette erreichen, aber auch eine gemeinsame Gestaltung der Leistungserstellung für den Endkunden. Während die Optimierung der Holzlogistik-Kette in Schweden und Finnland über Kooperationen gelungen ist, die zumeist zentrale und große Unternehmen der Holzindustrie im Zentrum haben, gibt es in Mitteleuropa kaum positive Erfahrungen mit ähnlichen Kooperationen, die eine größere Anzahl an Waldbesitzern, Transportbetrieben und Betrieben der Holzindustrie integrieren und Prozesse standardisieren und optimieren. Beispiele für positive Ansätze sind dabei:

- In Deutschland ging in der Vergangenheit die Initiative stets von einem der zentralen, großen und damit dominanten Partner aus der Waldbesitzer- oder Holzindustrieseite aus. Auf Seiten der Holzindustrie sind Kooperationen mit Holztransportunternehmen oft Ergänzungen zur eigenen LKW-Flotte (Industrien: u. a. Zellstoff Holz GmbH, Kronotex, proNARO GmbH, Stora Enso Deutschland GmbH oder auf der Waldbesitzerseite: BaySF<sup>60</sup> oder die Forstwirtschaftliche Vereinigung Lüneburg<sup>61</sup>).
- Frankreich führt den im Jahr 2006 im Elsass von FIBOIS entwickelten Holz-Logistikservice "Ser.FA"<sup>62</sup> ein – eine Plattform mit Informationen über Waldverhältnisse, Waldwege und für höhere Gesamtgewichte zulässige Straßen sowie einen frankreichweiten Austausch von

---

<sup>59</sup> Vgl. Faktor Kosten Abbildung 17

<sup>60</sup> Müller (2008)

<sup>61</sup> Hecker (2012)

<sup>62</sup> FIBOIS (2007)

Holz- und Holzauftragsdaten<sup>63</sup>. Nutzer sind Waldbesitzer, die Holzindustrie und das Holztransport-Gewerbe. Spezielle Services vermitteln Frachten, erstellen und übermitteln Frachtdokumente und Holzlisten und bieten Kartensichten und Navigationsunterstützung.

Nicht realisierte Ansätze:

- In Baden-Württemberg wurde das überregional angelegte Projekt "Holz-Logistik Netz"<sup>64</sup> im Jahr 2013 nach erfolgreichem Start beendet. Das Projektvorhaben hatte die konkrete Umsetzung von Verbesserungen beim Rundholztransport im Cluster Forst und Holz zum Ziel. Als Voraussetzung für die Erhöhung der Lastfahrtenanteile und die Kostenverringerung wurde die Gründung einer überbetrieblichen Kooperation verschiedener Holz abnehmender und Holz transportierender Unternehmen in Form einer internetbasierten Holz-Logistik-Plattform angestrebt. Das Anforderungskriterium „Bereitstellung größerer Holz-mengen“, das für den sinnvollen Einsatz einer solchen Plattform erforderlich ist, wurde letztendlich nicht gemeinsam realisiert. Die Veränderungen der marktüblichen Verhaltensweisen zur Umsetzung der Projektziele konnten nicht bewirkt werden.

### **Teilfaktor übergeordnete Kooperation in der Branche - Branchenverbände**

Branchenverbände mit einer breiten Basis und einer guten Finanzausstattung sind in der Lage, die Interessen der Branche an (kosten)günstigen Wettbewerbsbedingungen zu vertreten.

Für das Holztransport-Gewerbe wurde der Mangel an einer schlagkräftigen Branchenvertretung und der geringe Organisationsgrad von Experten einhellig beklagt. Die gesamte Branche verpasse hier die Chance realistische, auskömmliche Frachtsätze und Rahmenbedingungen (Ladebedingungen im Wald, Wartezeiten im Werk) mit Nachdruck zu verhandeln. Hier wird ein wichtiger Wettbewerbsfaktor gesehen. Vorteile für den Einzelbetrieb ergeben sich nur, wenn eine breite Unterstützung der gesamten Branche existiert und sich so Wirkung entfalten kann.

### **Ausweg regionale Kooperationen**

Als Folge der komplexen Ansprüche zur Etablierung breiter, überregionaler Kooperationen in der Holzlogistik-Kette haben sich aktuell regionale Kooperationen etabliert. Diese sind ausgehend von einem Anker-Partner der Holzindustrie oder des Waldbesitzes aufgebaut, selten von Seiten von Transportunternehmen.

- Die Forstdirektion Thurn und Taxis und Hahn Kompost haben in ihrer Kooperation den verbesserten und beschleunigten Informationsaustausch in der Holzlogistik-Kette mit einem neuen GIS basierten System in den Mittelpunkt gestellt<sup>65</sup>. Der Fahrer des LKW kann unter Benutzung eines Tablet-PCs (oder ähnlichem) die Polter sowie die wichtigen Informationen einsehen, diese anhand von GPS-Unterstützung schneller auffinden sowie den Status nach Teil- oder Komplettabfuhr ändern und übermitteln. Für die beteiligten Holztransporteure wird eine erhebliche Kostenverbesserung gesehen, die den Wettbewerbsdruck auf die Transporteure senkt. In diesem Fall hat die Kooperation explizit die Verteilung der Kosteneinsparung auf alle Kooperationspartner und damit auch das beteiligte Transportgewerbe angesprochen.

---

<sup>63</sup> Mdl. Mitteilung der Geschäftsführung FIBOIS (11/2014)

<sup>64</sup> Redmann et al. (2013)

<sup>65</sup> Anonymus (2012b)

- Das Projekt WASP steht für „Wood Application Service Providing“<sup>66</sup>. Die regionale Kooperation mit den Anker-Partnern WBV Berching-Neumarkt und FBG Amberg-Schnaittenbach hat durch die Entwicklung eines Informations- und Datenaustausch-Portals auch bei der Kostensenkung durch verbesserten Daten- und Informationsaustausch angesetzt. Ziel war eine integrierte Holzlogistik vom Wald bis in das Werk mit guter Transparenz für alle Akteure. Der Anlass der Weiterentwicklung ergab sich aus dem bisherigen stark papierintensiven Datenaustausch sowie einer intensiven personellen Kapazitätsbindung unter anderem durch zu führende Telefonate. Die Auftragsanfrage an das Holztransportunternehmen erfolgt nun online über E-Mail und beinhaltet Informationen zu Holzsorte, -güte, Bereitstellungs- und Abfuhrfristen sowie die GPS-Daten. Der Betrieb kann somit zeitnah über Annahme und Absage entscheiden, was den Prozess verschlankt und damit kosten- und zeiteffektiv gestaltet. Neben dem direkten Routing anhand von Navlog-Daten bietet die WASP Plattform zusätzlich auch eine LKW-Tourenoptimierung. Für alle beteiligten Partner lässt sich der Zustand der Holzlieferung über „Track and Trace“ einfach verfolgen und steuern. Der Empfänger hat so auch immer die Übersicht, was, wie viel und wann geliefert wird.

### Internationale Wettbewerbsfähigkeit

Internationale Wettbewerbsfähigkeit für das Holztransportgewerbe bedeutet in erster Linie, dass die Betriebe auch in Nachbarländern als Dienstleister am Markt erfolgreich auftreten können. Dies wäre dann nicht gegeben, wenn z. B. in Frankreich ordnungspolitische Regelungen deutsche Transporteure stark benachteiligen. Immer wieder wurde in der Vergangenheit der Konkurrenzdruck durch internationale Konkurrenz beim Holztransport in Deutschland als wirtschaftlich bedeutsamer Wettbewerbsfaktor genannt. Vergleichsweise hohe Transportkosten belasten aber auch die Wettbewerbsfähigkeit der Wald-Holz-Kette und die Produkte der deutschen Holzindustrie. Bei einer Analyse der internationalen Wettbewerbsfähigkeit gilt es beide Effekte getrennt zu betrachten.

Ein wichtiger Indikator für die Wettbewerbsfähigkeit ist der Vergleich der Transportkosten zwischen europäischen Ländern. Dazu liegen mehreren Studien vor<sup>67</sup>. Der aktuellste EU-weite Vergleich stammt aus dem EFORWOOD Projekt aus dem Jahr 2010. Ausgiebig diskutiert wird die Thematik bei Borchering (2007)<sup>68</sup>. Zusammengefasst kommen die Studien mit dem deutschlandweiten Fokus zu dem Ergebnis, dass bei eingehender Differenzierung der unternehmensspezifischen und landesspezifischen -damit für alle geltenden- Faktoren nur begrenzt von einer strukturellen Benachteiligung deutscher Holztransporteuren gegenüber ausländischen Konkurrenten ausgegangen werden kann.

In der Umfrage im Rahmen des Projektes wurde die „Konkurrenz durch die EU-Osterweiterung“ nicht explizit abgefragt. In der Umfrage von Borchering aus dem Jahr 2003 wurde diese Konkurrenz als wenig relevantes Risiko für die Wettbewerbsfähigkeit genannt (lediglich 4,2 % stuften das Risiko als hoch bzw. sehr hoch ein). Deutlich geringer als im allgemeinen Güterverkehr betrachten auch die interviewten Experten derzeit die Konkurrenzsituation durch osteuropäische Anbieter im Holztransport. Neben den Kabotage-Regelungen sei der Markteintritt für die Spezialtransporte schwieriger, die Anforderungen an die Spezialfahrzeuge

<sup>66</sup> Anonymus (2012c)

<sup>67</sup> Jordan (2012); Seintsch (2011); Le Net et al. (2010); Bourcet et al. (2008); Borchering (2007); Kienzler (2006); Kienzler et al. (2000)

<sup>68</sup> Borchering (2007), S. 127ff.

eine Barriere. Zudem machen sich hier der Faktor Regionalität - Kenntnisse von Wald und Gelände, aber auch der eines regionalen Kundenstamms positiv bemerkbar.

Wirksam werden die vergleichsweise hohen Transportkosten als Wettbewerbsnachteil vor allem bei der Holzindustrie, da sich Kostennachteile auf dem internationalen Markt für das Fertigprodukt gegenüber Konkurrenten aus anderen Ländern ergeben.

### **Vergleich Transportkostenbelastung Frankreich - Deutschland**

Nachfolgend wird daher die Konkurrenzsituation für die erste Stufe der Holzverarbeitenden Industrie zwischen Frankreich und Deutschland, regional konzentriert auf das Elsass und Baden-Württemberg, verglichen. Die Befragung Holzlogistik<sup>69</sup> zeigte, dass die Lieferung nach Frankreich für ca. 20 % der Unternehmen in Baden-Württemberg Alltag ist, während 66 % der Unternehmen gar nicht ins Ausland liefern.

Aktuelle Studien zum Vergleich der Transportkostenbelastung existieren nicht. Für Deutschland liegt eine bundesweite Studie von Seintsch (2011) vor, die Daten der Jahre 2002-2007 auswertete. Für Frankreich liegen die letzten Untersuchungen noch weiter zurück (Le Net et al. 2005). Daher wurden aktuelle Holzpreise für die Jahre 2013 und 2014 recherchiert. Dies gilt auch für die mittleren Transportentfernungen nach Holzindustriesektoren und die aktuellen Transportpreise in beiden Regionen.

---

<sup>69</sup> Kap. 3, AGR (2014), Frage: „In welchen Ländern im Ausland transportiert Ihr Unternehmen Rundholz?“ 39 Teilnehmer aus Baden-Württemberg. Mehrfachantworten möglich.

Tabelle 9: Transportkostenbelastung Baden-Württemberg - Elsass								
Kennwerte	Baden-Württemberg (D)				Elsass (F)			
	Sägeindustrie		Zellstoff- industrie	Holzwerk- werk- stoff- industrie	Sägeindustrie		Zellstoff- industrie	Holzwerk- stoff- industrie
	Nadel- holz	Laubholz			Nadel- holz	Laubholz		
<b>Holzrohstoffpreise frei Waldstr.</b> (in Euro/m <sup>3</sup> m.R.) [1][2] Diff. Elsass - BaWü (in %)	<b>90</b>	<b>65</b>	<b>56</b>	<b>42</b>	<b>75</b> -17 %	<b>71</b> 8 %	<b>38</b> -26 %	<b>39</b> -7 %
<b>Mittlere Transportdistanz</b> (in km) [2][3]	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>110</b>	<b>110</b>	<b>80</b>	<b>60</b>	<b>130</b>	<b>130</b>
Typischer Holztransport LKW	Langholz- -LKW	Kurzholz- LKW	Kurzholz- LKW	Kurzholz- LKW	Langholz- LKW	Kurzholz- LKW	Kurzholz- LKW	Kurzholz- LKW
<b>Zulässiges Gesamtgewicht LKW</b>	<b>40</b>				<b>53 (48-57)</b>			
Zuladung [4][2] Diff. Elsass - BaWü (in %)	20,2	18,5	20,5	20,5	31,2 154 %	29,5 159 %	31,5 154 %	31,5 154 %
Transportkosten für x km Distanz (Euro / m <sup>3</sup> m. R.) [3][2]								
- für 30 km	8	12	7	7	6	9	7	7
- für 50 km	9	14	9	9	7	11	8	8
- für 100 km	14	18	13	13	9	14	12	12
- für 150 km	19	21	17	16	13	17	15	15
<b>Transportkostenbelastung</b> (in Euro /m <sup>3</sup> m. R. für mittl. Distanz) Diff. Elsass - BaWü (in Euro/m <sup>3</sup> m.R.) Diff. Elsass - BaWü (in %)	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>14</b>	<b>13</b>	<b>8</b> -1,5 -15 %	<b>11</b> -3,2 -22 %	<b>14</b> -0,1 0 %	<b>14</b> +0,2 +2 %
<b>Transportkostenbelastung</b> (in % Holzrohstoffpreis frei Werk)	<b>10 %</b>	<b>18 %</b>	<b>21 %</b>	<b>24 %</b>	<b>10 %</b>	<b>14 %</b>	<b>26 %</b>	<b>26 %</b>
<b>Holzrohstoffpreise frei Werk</b> (in Euro/m <sup>3</sup> m.R.) Diff. Elsass - BaWü (in %)	<b>100</b>	<b>80</b>	<b>70</b>	<b>56</b>	<b>84</b> -16 %	<b>82</b> +3 %	<b>51</b> -21 %	<b>53</b> -5 %
[1] Holzpreise frei Werk und Transportpreise nach Umfrage unter Praktikern im Projektteam für 2013-2014. Holzpreis Zellstoffindustrie zudem gemittelt mit Angebotsmeldungen ForstBW 2014 (Mündliche Mitteilung).								
[2] FIBOIS d' Alsace (2014): Holzpreisstatistik für das Elsass 2013-2014 und Umfrageergebnisse zu Transportentfernungen, Zuladung und Transportpreisen bei Groupement des Transporteurs Forestiers d'Alsace Lorraine. Mündliche Mitteilung und Statistiken FIBOIS 2014. Holzpreis Zellstoffindustrie angepasst mit Daten zu Holzschliffverkäufen im Elsass aus dem Projektteam.								
[3] Mittlere Transportentfernungen nach Branchen aus Umfrage unter Praktikern im Projektteam für Baden-Württemberg								
[4] Leergewicht und Zuladungen nach Definition von Modellfahrzeugen im Projektteam								

Der Vergleich zeigt, dass die um ca. 55 % höhere Zuladung in Frankreich keine proportionalen Auswirkungen auf die Transportpreise und die Transportkostenbelastung der Holzindustrie hat. Der Vergleich der Kennwerte beginnend mit den Rohholzpreisen frei Waldstraße zeigt:

- Die Rohholzpreise liegen im Elsass zwischen 12 % und 26 % niedriger als in Baden-Württemberg. Ausnahme ist das Laubholz für die Sägeindustrie, das im Elsass unter Einbeziehung aller Baumarten etwas teurer ist. Alle Differenzen liegen im Bereich der Fehler einer unvollständigen Preisinformation zu allen branchenspezifischen Märkten in beiden Regionen.

- Die Zuladung im Elsass liegt im Mittel 11 t oder 55 % höher als in Baden-Württemberg. Erwärten könnte man somit entsprechend der Kostenvergleiche zwischen 40 t und 44 t im Kapitel 2.3.3 Tabelle 8 eine Kosteneinsparung - nicht Preissenkung - um ca. 40 %.
- Die Transportpreise liegen im Elsass bei gleichen Distanzen für Sägeholz 15 - 35 %, für Industrieholz 5 - 15 % unter den Preisen in Baden-Württemberg. Offensichtlich ist damit die ökonomische Situation für die Holztransporteure im Elsass günstiger. Der Unterschied ist für die Kurzstreckentransporte im Sägewerkssektor mit den dort möglichen Gesamtgewichten bis 57 t tatsächlich am deutlichsten.
- Somit ist auch die absolute Transportkostenbelastung der Holzindustrie im Elsass für die Sägeindustrie mit Minderkosten von 1-3 Euro / m<sup>3</sup> m. R. am deutlichsten, für die Zellstoff- und Holzwerkstoffindustrie allerdings ist kein Vorteil vorhanden, da die höheren Transportentfernungen (130 km statt 110 km) die günstigeren Frachttarife kompensieren.
- Die resultierenden Differenzen in den Holzrohstoffpreisen frei Werk spiegeln abschließend stärker die Unterschiede in den Holzpreisen frei Waldstraße und die Unterschiede in den mittleren Transportdistanzen wider als Unterschiede in den Transportkosten. Im Elsass liegen die Holzrohstoffpreise frei Werk um 5 - 20 % niedriger, für Laubsägeholz aber sogar um ca. 3 % höher als in Baden-Württemberg.

Als Fazit kann konstatiert werden, dass die Holzrohstoffpreise (außer Laubsägeholz) frei Werk zwischen 3 und 19 Euro geringer sind als in Baden-Württemberg: Für die an internationalen Märkten konkurrierenden Holzbetriebe ist das ein wesentlicher Wettbewerbsfaktor. Die Unterschiede resultieren überwiegend aus niedrigeren Holzpreisen, nicht aus geringeren Transportkosten.

Die durchschnittlich um 55 % höhere Zuladungsmöglichkeit kann Kosteneinsparungen für die Transportunternehmen von rd. 40 % bewirken. Die zwischen den französischen Holzunternehmen und Transportbetrieben vereinbarten Preise liegen allerdings nicht um 40 % niedriger, es kann also angenommen werden, dass die wirtschaftliche Situation der französischen Holztransportunternehmen weniger angespannt als jene der Betriebe in Baden-Württemberg ist.

### **2.3.4 Schlussfolgerungen - Ansatzpunkte für die Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit**

Drei Strategieebenen zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit im Holztransport-Gewerbe werden nachfolgend erläutert:

- Strategien für die gesamte Holzlogistik-Kette
- Strategien für das gesamte Holztransport-Gewerbe
- Strategien für jedes einzelne Holztransportunternehmen

#### **Strategien für die gesamte Holzlogistik-Kette**

Strategien mit Wirkung auf die gesamte Holzlogistik-Kette zielen auf Kostensenkungen durch Optimierung entlang der Holzlogistik-Kette ab. Kooperation in der Holzlogistik-Kette ist hier der entscheidende Wettbewerbsfaktor. Trotz der gescheiterten Versuche, überregional schlagkräftige Holz-Logistik Cluster zu etablieren, ist es vor dem Hintergrund des unbestritten hohen Potenzials für Kosteneinsparungen unseres Erachtens erforderlich, aus den Schwächen vergangener Initiativen zu lernen und erfolgreiche Strukturen zu etablieren. Grundlagen dafür sind Vertrauen zwischen den Akteuren und Regeln für eine transparente Verteilung der Kos-

tenvorteile zwischen den Geschäftspartnern. Kostensenkungspotenziale sind für die Holztransporteure vielfach beschrieben: Erhöhung der Auslastung, Reduktion der Transportstrecken, Senkung von Ladezeiten im Wald und Entladezeiten im Werk.

### **Strategien für das gesamte Holztransport-Gewerbe**

Strategien mit Wirkung auf das gesamte Holztransport-Gewerbe zielen ab auf Kostensenkungen, Frachtpreiserhöhung oder Beeinflussung der rechtlichen Rahmenbedingungen (wie die Anhebung des zulässigen Gesamtgewichts, Senkung der Maut) durch Kooperation der Branche. Starke Branchenvertretungen sind hier das entscheidende Werkzeug, um mit den Kunden Standards für die Transportdienstleistung zu etablieren oder Belastungen durch den ordnungspolitischen Rahmen zu reduzieren.

Konkrete Ansätze sind Beziehung zu den Kunden, die Einigung auf Frachttarifrahmen und deren Herleitung als Mischung aus Entfernung und Zu- und Abschlägen für Anzahl der Ladeorte, Volumen der Polter oder Entfernung im Wald.

Ein konkreter Ansatz mit Wirkung für das gesamte Holztransport-Gewerbe, der natürlich allen Partner der Holzlogistik-Kette ebenfalls Kosten senkt, ist die Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichts. Die große Einigkeit des Forst und Holz Clusters zur Wirksamkeit der Maßnahme führt zur entsprechend großen Unterstützung im politischen Umfeld und erhöht die Chancen für diese moderate Veränderung zulässiger Gesamtgewichte. Dagegen steht, dass die Diskussion vermischt wird mit Konzepten für "Gigaliner" oder "EuroCombi-LKW"<sup>70</sup>, was eine sachliche, argumentativ ausgewogene, gemeinsame Kampagne äußerst aufwendig macht. Letztendlich ist das Projekt ein Zeichen dafür, dass ohne diese aufwendige Studie das Thema ordnungspolitisch nicht durchgesetzt werden kann. Ohne den vertrauensvollen Schulterschluss aller Branchen im Cluster wäre der Aufwand nicht zu leisten.

### **Strategien für jedes einzelne Holztransportunternehmen**

Holztransportunternehmen stehen zuletzt im Wettbewerb untereinander. Wie eingangs beschrieben beschäftigen sich nur wenige Studien bislang mit den innerbetrieblich beeinflussbaren Wettbewerbsfaktoren (Leistungsfähigkeit, Zukunftsfähigkeit, Geschäftsstrategien), deutlich mehr Projekte und Studien beschäftigten sich mit den Wettbewerbsfaktoren, die die gesamte Branche betreffen und damit in Kooperation angegangen werden können (Logistik-Kette, Logistikplattformen, Gesetzliche Rahmenbedingungen wie zulässiges Gesamtgewicht oder Maut). Dennoch sind sich alle Experten einig, dass hier ein großes Potenzial steckt, bzw. die Nicht-Beachtung dieses Faktors zum Ausscheiden aus dem Markt führt.

Die folgende Grafik (vgl. Abbildung 21) stellt Zusammenhänge zwischen der relativen Bedeutung der Wettbewerbsfaktoren und deren Beeinflussbarkeit durch verschiedene Strategieebenen dar. Die Wettbewerbsfaktoren werden dabei in einem Koordinatensystem nach ihrer relativen Bedeutung für das einzelne Transportunternehmen im Wettbewerb eingeordnet, in dem es gilt sich am Markt für Holztransporte erfolgreich zu positionieren.

---

<sup>70</sup> BGA (2014); ADAC (2010)



Quelle: Eigene Darstellung

Folgende strategische Ansätze können für die Wettbewerbsfaktoren identifiziert werden:

- **Servicequalität: Flexibilität und Zuverlässigkeit** werden als Schlüsselfaktoren der betrieblich beeinflussbaren Faktoren gesehen. Eine **Geschäftsstrategie** beschreibt das Profil der passenden Serviceleistungen, deren Anbieter im Marktumfeld und die Auswahl einer abgestimmten Fahrzeugtechnik. **Kooperationen mit Industrie und Waldbesitzern** lassen sich mit "unverzichtbaren" Serviceleistungen etablieren.
- Wenn diese Kooperation mit ausreichend vielen und räumlich "fahrtlogistisch" gut verteilten Partnern besteht, ergeben sich **hohe Lastfahrtenanteile** und damit eine günstige Auslastung.
- Eine günstige Auslastung trägt zu einer ausreichenden **Finanzausstattung** bei, welche erlaubt in zeitgemäße **technische Ausstattung** zu investieren. Dies erlaubt auch eine Bezahlung attraktiver Löhne für den notwendigen Fahrernachwuchs.
- Die **Breite der angebotenen Leistungen** (Schüttgut, Hackschnitzel, Holzernte, Rückung, Handel) kann die Anpassungsfähigkeit durch den Aufbau mehrerer betrieblicher Sparten befördern. Das Angebot flexibler Transporttechnik kann zudem die Auslastung (Lastfahrtenanteil) verbessern.
- **Regionalität** erleichtert und intensiviert die Kooperation mit Industrie/Waldbesitzer-Partnern. Die Nähe des eigenen Betriebs zu den regionalen Hauptkunden vermindert leere Fahrten zwischen Holzindustrie und eigenem Betrieb sowie Betrieb und Wald.
- Eine vertrauensvolle **Kooperation mit den Kunden aus Industrie / Waldbesitz** und eine "unverzichtbare" Stellung bei einer ausreichend großen Anzahl an geografisch gut platzierten Kunden ermöglicht eine Auswahl der passenden LKW-Typen entsprechend der Nachfrage, die Anpassung der Leistungsbreite und beeinflusst die Auslastung (Lastfahrtenanteil)

positiv. Sie ermöglicht eine starke Verhandlungsposition und die Durchsetzung auskömmlicher Frachtpreise.

- **Kooperation in der Branche** befördert auskömmliche Frachtpreise durchzusetzen und gesetzliche Rahmenbedingungen günstig zu gestalten. Sie ist damit für eine ausreichende Finanzausstattung bedeutsam. Löhne und Ausbildung von Fahrern können so besser finanziert werden.
- Betriebliche **Kooperationen zwischen Transportbetrieben** (echte Kooperationen, Subunternehmerschaft) wirken positiv auf die Breite der Leistungen, bieten eine größere Flexibilität und Servicetiefe sowie Kosteneinsparung bei Logistik und Disposition.
- Die **LKW Kosten** sind für alle Unternehmen sehr ähnlich. Unterscheiden können sich die Unternehmen dennoch in der Auswahl der LKW-Typen passend zu Ihren Kunden und unter Nutzung kostensparender Technologien (vgl. Kap. 2.3.3) wie Leichtbauweisen oder LKW-Typen, die eine höhere Flexibilität in den transportierten Gütern gestatten.

Mit dieser Einordnung der betrieblich beeinflussbaren Wettbewerbsfaktoren wird deutlich, wo die wichtigen Ansatzpunkte für eine Stärkung der eigenen Wettbewerbssituation liegen.

- **Servicequalität** - Flexibilität und Zuverlässigkeit der Transportleistungen bei möglichst hoher Servicetiefe aufbauend auf einer Geschäftsstrategie.
- Eine ausreichend große Anzahl von **gut etablierten Kooperationen mit Kunden** (aus Waldbesitz und Holzindustrie) in günstiger geografischer Lage.
- Ein damit verbundener **hoher Lastfahrtenanteil** unterstützt durch exakte **Disposition** und Kostenmonitoring.

## 2.4 Zusammenfassung

Seit fast 15 Jahren wird die wirtschaftliche Situation der Rohholztransporteure nicht nur in Baden-Württemberg als kritisch eingeschätzt. In jüngster Vergangenheit kommen Klagen über steigende Transportraten und zunehmende Gewichtskontrollen bei gleichzeitig fehlenden oder nur geringfügigen Preissteigerungen hinzu. Viele Unternehmen berichten von Nachwuchssorgen und befürchten, keine attraktiven Arbeitsplätze anbieten zu können. Es wird angenommen, dass einzelne Betriebe nicht überlebensfähig sind.

Die B. Keck GmbH, Ehningen, hat mit Unterstützung der Arbeitsgemeinschaft Rohholzverbraucher e.V. ein Projekt zur Optimierung der Holzlogistik in Baden-Württemberg initiiert. Betrachtet wird in dem Projekt „Optimierte Holzlogistik Baden-Württemberg“ der Holztransport per LKW auf der Straße. Untersucht werden im Kern die verschiedenen Auswirkungen, die eine Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichts von Rohholztransporten und eine Erhöhung der Lastfahrtenanteile auf Emissionen, Wegebelastungen und Wettbewerbsfähigkeit des Holztransport-Gewerbes haben.

**Ziel des Arbeitsberichts** ist neben dem zulässigen Gesamtgewicht als einem Wettbewerbsfaktor für die gesamte Branche weitere relevante Wettbewerbsfaktoren des Holztransportgewerbes zu untersuchen und deren Bedeutung und Beeinflussbarkeit zu bewerten. Daraus werden Hinweise für die Gestaltung der Wettbewerbsfaktoren abgeleitet mit dem Ziel die Zukunftsfähigkeit der Holztransporteure zu verbessern und ggf. auch die Transportkostenbelastung der Holzindustrie zu senken.

Für die Studie wurde Literatur zu wettbewerbsrelevanten Faktoren und eigene Holzlogistikprojekte ausgewertet, Interviews mit Inhabern von Holztransportbetrieben und Experten aus der Forst- und Holzwirtschaft geführt und Ergebnisse der im Projekt durchgeführten Umfrage unter Holztransportbetrieben einbezogen.

Kenntnis und Gestaltung der relevanten Wettbewerbsfaktoren sind auch für die Holztransporteure Grundlage für Wettbewerbsfähigkeit, somit das Potenzial der Holztransporteure, mit dem sich innerhalb der Branche eine Gewinn bringende Position erlangen, behaupten bzw. ausbauen lässt.

Identifiziert wurden die folgenden für den Holztransportsektor wichtigen **Wettbewerbsfaktoren**:

- **Kosten** und als spezifische Teilfaktoren die LKW bezogenen Kosten, Personalkosten, Sach- und Dispositionskosten, die das Kostenniveau stark beeinflussende Auslastung der LKW sowie das zulässige Gesamtgewicht der Holztransport-LKW.
- **Leistungsfähigkeit** mit dem als herausragend wichtig bewerteten Teilfaktor Servicequalität: Flexibilität und Zuverlässigkeit sowie Anpassungsfähigkeit an technische und administrative Änderungen.
- **Zukunftsfähigkeit** aufbauend auf Teilfaktoren wie einer klaren Geschäftsstrategie, die Personal-Nachwuchs und die zukünftige Ausstattung mit aktueller Transport- und Dispositionstechnik sichern hilft.
- **Regionalität** als ein Faktor, der Betrieben hilft ihre Ortskenntnis, persönliche Kontakte und eine direkte Abstimmung vorteilhaft zu nutzen.
- **Kooperation** als ein mittelbarer Wettbewerbsfaktor, der die Wettbewerbssituation für die gesamte Branche z.B. durch starke Verbandsarbeit oder die gesamte Holz-Logistikkette z.B. durch Optimierung der Prozessgestaltung für Holztransportunternehmen in der Supply-Chain beeinflusst und damit das gesamte Kostenniveau des Holztransports.

Die Wettbewerbsfaktoren und Teilfaktoren lassen sich nach beteiligten Akteuren und ihrer Wirkung in drei Gruppen trennen:

1. **Wettbewerbsfaktoren, die die gesamte Holzlogistik-Kette beeinflussen** (Kooperation in Wald-Holz Clustern, Logistiknetzen, Transportbörsen)
2. **Wettbewerbsfaktoren mit Wirkung für das gesamte Holztransport-Gewerbe**, die auch nur durch dessen gemeinsame Positionierung zu verbessern sind (Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichts, Frachttarifstandards, Treibstoff-Preisgeleitklauseln, Forschung und Ausbildung).
3. **Wettbewerbsfaktoren, die jedes einzelne Holztransportunternehmen gestalten muss**, um am Markt erfolgreich zu sein (Geschäftsstrategie, Servicequalität, Kooperation mit Kunden, Disposition und Auslastung).

Ebenso müssen Strategien für die Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit getrennt für diese drei Gruppen betrachtet werden.

**Strategien mit Wirkung auf die gesamte Holzlogistik-Kette** zielen auf Kostensenkungen durch Optimierung entlang der Holzlogistik-Kette ab. **Kooperation in der Holzlogistik-Kette** ist hier der entscheidende Wettbewerbsfaktor. Trotz der zahlreichen gescheiterten Versuche scheint es möglich aus den Schwächen vergangener Initiativen und den Erfahrungen kleiner, regionaler Kooperationen zu lernen und erfolgreiche überregionale Strukturen zu etablieren. Die Kostensenkungspotenziale sind für die Holztransporteure vielfach beschrieben insbesondere durch Erhöhung der Auslastung, Reduktion der Transportstrecken, Senkung von Ladezeiten im Wald und Entladezeiten im Werk. Das Potenzial für eine Verbesserung der ökonomischen Situation der Holztransporteure und die Reduzierung der Transportkostenbelastung in der Holzindustrie in der Holz-Logistik-Kette liegt bei 1-3 Euro / m<sup>3</sup> oder ca. 20 %.

**Strategien mit Wirkung auf das gesamte Holztransport-Gewerbe** zielen ab auf Kostensenkungen, die Erhöhung der Frachtpreise oder Beeinflussung der rechtlichen Rahmenbedingungen (wie die Anhebung des zulässigen Gesamtgewichts, Senkung der Maut) durch Kooperation der Branche. Starke Branchenvertretungen sind hier das entscheidende Werkzeug. Wichtige Ansätze sind in Beziehung zu den Kunden die Einigung auf Frachttarifrahmen und die Einigung auf die Art der Frachttarif-Herleitung als Mischung aus Entfernung und Zu- und Abschlägen für Anzahl der Ladeorte, Volumen der Polter oder Entfernung im Wald.

Ein zentraler Ansatz, der natürlich allen Partner der Holzlogistik-Kette ebenfalls Kosten senkt, ist die im Zentrum dieses Projekts stehende **Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichts**. Letztendlich ist das Projekt ein Zeichen dafür, dass ohne diese aufwendige Studie das Thema ordnungspolitisch nicht durchgesetzt werden kann. Ohne den vertrauensvollen Schulterschluss aller Branchen im Cluster wäre der Aufwand nicht zu leisten. Das Potenzial für eine Verbesserung der ökonomischen Situation der Holztransporteure in der Holz-Logistik-Kette liegt bei weiteren 1-2 Euro / m<sup>3</sup> oder 14 %.

**Strategien für jeden einzelnen Betrieb im Wettbewerb:** Holztransportunternehmen stehen zuletzt aber im Wettbewerb untereinander. Alle Experten waren sich einig, dass in der Gestaltung **betriebsintern steuerbarer Wettbewerbsfaktoren** ein großes Potenzial steckt oder, umgekehrt, eine Nicht-Beachtung zum Ausscheiden aus dem Markt führt. **Servicequalität: Flexibilität und Zuverlässigkeit** wird als Schlüsselfaktor der betrieblich beeinflussbaren Faktoren gesehen. Diese soll auf einer **Geschäftsstrategie** aufbauen, die die Nische des Betriebs und das Profil der passenden Serviceleistungen beschreibt, deren Anbieter im Marktumfeld und die

Auswahl einer abgestimmten Fahrzeugtechnik. Ohne vertrauensvolle **Kooperation mit Kunden aus Industrie und Waldbesitzern** lässt sich ein Holztransportunternehmen nicht als "unverzichtbarer" Servicepartner etablieren. Diese Kooperation ermöglicht eine Auswahl der passenden LKW-Typen entsprechend der Nachfrage, die Anpassung der Leistungsbreite und die Auslastung (Lastfahrtenanteil) positiv. Sie ermöglicht eine starke Verhandlungsposition und die Durchsetzung auskömmlicher Frachtpreise.

Die **Breite der angebotenen Leistungen** (Schüttgut, Hackschnitzel, Holzernte, Rückung, Handel) erleichtert die Anpassungsfähigkeit durch den Aufbau mehrerer betrieblicher Sparten. Das Angebot flexibler Transporttechnik trägt zur Erhöhung der Auslastung bei.

Zuletzt wurde immer wieder auch der Konkurrenzdruck durch **internationale Konkurrenz beim Holztransport in Deutschland** als wirtschaftlich bedeutsamer Wettbewerbsfaktor genannt. Vergleichsweise lägen die Transportkosten in Deutschland hoch, belasten damit auch die Wettbewerbsfähigkeit der Wald-Holz-Kette und die Produkte der deutschen Holzindustrie. Eindeutig haben hier die skandinavischen Länder Vorteile. Bei eingehender Differenzierung der unternehmensspezifischen und landesspezifischen -damit für alle geltenden- Faktoren kann von einer strukturellen Benachteiligung der deutschen und baden-württembergischen Holztransporteure gegenüber ausländischen Konkurrenten aber nicht ausgegangen werden. Auch die Konkurrenz durch die EU-Osterweiterung wurde in der aktuellen Umfrage sowie von den Experten als wenig relevantes Risiko für die Wettbewerbsfähigkeit genannt. Neben den Kabotage-Regelungen ist der Markteintritt für Holz als Spezialtransport schwieriger, die Anforderungen an die Spezialfahrzeuge eine Barriere. Zudem machen sich hier der Faktor Regionalität - Kenntnisse von Wald und Gelände, aber auch der regionalen Kunden positiv bemerkbar.

Es verbleibt der Nachteil vergleichsweise hoher Transportkosten als Wettbewerbsnachteil für die Holzindustrie. Der **Vergleich mit dem für Baden-Württemberg wichtigen Nachbarland Frankreich und dort der Region Elsass** zeigte aber, dass die Transportkostenbelastung im Elsass und Frankreich nur für die Laub-Sägeindustrie um ca. 5 % niedriger ist. Die dort geltende um 55 % höhere Zuladung mit Kosteneinsparungen von rd. 40 % für die Holztransportunternehmen hat nicht zu einer proportionalen Senkung der Frachttarife (Preise) geführt. Die Holztransporteure im Elsass stehen also ökonomisch etwas günstiger da als die Betriebe in Baden-Württemberg. Es kann also angenommen werden, dass die positiven Effekte eines höheren zulässigen Gesamtgewichts sich auf die Partner der Wald-Holz-Kette verteilt.

Als ein Ergebnis der Studie lässt sich festhalten, dass ein Blick nach Frankreich sich für die Holztransporteure und die Holz-Logistikkette in Baden-Württemberg lohnt, um Anregungen für weitere Verbesserungen der Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten.

- Mit dem "Ser.Fa" Logistikserver gibt es eine technische Lösung für eine bessere Kooperation in der Wald-Holz-Kette,
- mit FIBOIS gibt es einen starken Verband, der die gesamte Wald-Holz-Kette vertritt und damit die Verbandsarbeit zum Wohl auch der Holztransportbranche leistet.
- Ein Ergebnis dieser Verbandsarbeit ist auch die Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichts auf 48 - 57 t, das der Industrie eine moderate Transportkostenentlastung und den Holztransporteuren ökonomisch Luft verschafft hat.

Würde dies auch in Baden-Württemberg umgesetzt, reicht dann in Zukunft die "Luft" um wichtige betriebliche Wettbewerbsfaktoren und Themen der Branche wie Nachwuchs an Personal, Ausstattung mit passenden Dispositionssystemen oder den Aufbau intensiver Kooperationen

im Cluster anzugehen. Das Projekt „Optimierte Holzlogistik Baden-Württemberg“ weist somit auch für Baden-Württemberg und Deutschland in die richtige Richtung.

## 2.5 Literatur

- ADAC (2010): Feldversuch mit Lang-LKW muss beschränkt werden. In: VerkehrsRundschau.de. 23. Juli 2010, abgerufen am 8. Mai 2014
- Anonymus (2014b): „Leichter und doch verwindungssteifer“. Holz-Zentralblatt Nr. 40, 2012. S. 1014.
- Anonymus (2014a): „Vollautomatik erfordert vom Fahrer Umstellung“. Holz-Zentralblatt Nr. 28, 2014. S. 687.
- Anonymus (2013b): „Masse wird immer wichtiger“. Holz-Zentralblatt Nr. 20, 2013. S. 485.
- Anonymus (2013a): „Doll zeigt Neuerungen auf Hausmesse“. Holz-Zentralblatt Nr. 13, 2013. S. 428.
- Anonymus (2013b): „Masse wird immer wichtiger“. Holz-Zentralblatt Nr. 20, 2013. S. 485.
- Anonymus (2012d): „Überladung und Kostendruck im Fokus der Holztransport-Branche“. Holz-Zentralblatt Nr. 51/52, 2012. S. 1319.
- Anonymus (2012c): „Dritte Dimension der Holzlogistik“. Holz-Zentralblatt Nr. 22, 2012. S. 581.
- Anonymus (2012b): „Kommunikationssystem verbessert Datenfluss“. Holz-Zentralblatt Nr. 22, 2012. S. 580.
- Anonymus (2012a): Verursacher oder Opfer steigender Kosten? IFF Veranstaltungsreihe Holzlogistik, 2012. S. 496-497.
- Baumann, T. (2008): Analyse logistischer Prozesse und deren Optimierungspotentiale entlang der Holzbereitstellungskette vom Wald zum Werk unterstützt durch spezielle Verfahren der Prozessmodellierung. Dissertation. Forstwissenschaftliche Fakultät Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. 230 S.
- Bechtle, M. und Müller, M (2004): Optimierung der Logistik durch Trailer-Direktverladung. Holzzentralblatt Nr. 46/2004, S. 603-604.
- BGL (2014): Branchenkostenentwicklung (Abruf für 2014, LKW im Regionalverkehr); [http://www.bgl-ev.de/web/initiativen/kosten\\_kalkulator.htm&v=2#form](http://www.bgl-ev.de/web/initiativen/kosten_kalkulator.htm&v=2#form), Aufruf Februar 2015; Quellen: Statistisches Bundesamt, Wiesbaden; KRAVAG, Hamburg; Deutsche Bundesbank, Frankfurt am Main; eigene Erhebungen; Keine Gewähr für die Richtigkeit der Angaben und Ergebnisse. © Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e.V.
- Bundesverband Großhandel, Außenhandel, Dienstleistungen e.V. (2014): Feldversuch mit dem Lang-Lkw - Zum Zwischenbericht der BASt Berlin, BGA-Information, 7. Oktober 2014. 5 S.
- Blendermann, H. (2012): „Holztransporte in der Zange zwischen Justiz und Ertrag“. Vortrag Tagung Holzlogistik - Dienstleister - Verursacher oder Opfer steigender Kosten? Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF), 2012.
- Bockelmann-Holz GmbH (2014): Fuhrpark. Abgerufen am 10.11.2014 von <http://www.bockelmann-holz.de/de/fuhrpark-forstmaschinen.html>.
- Bodenschwingh, E. (2006): Analyse der Rundholzlogistik in der Deutschen Forst- und Holzwirtschaft – Ansätze für ein übergreifendes Supply-Chain Management. Dissertation. Technische Universität München. 214 S.
- Borcherding, M. (2007): Rundholztransportlogistik in Deutschland – eine transaktionskostenorientierte empirische Analyse. Dissertation. Universität Hamburg. 266 S.
- Brown, M. (2009): Stand und Entwicklungstendenzen des Supply-Chain Management in der deutschen Grundstoffindustrie. Dissertation Fachbereich Wirtschaftswissenschaften Universität Kassel. 203 S.
- Bourcet, J., Bourget, C., Danguy de Deserts, D. (2008): Le transport du bois et sa logistique. Bericht für Conseil général de l'environnement et du développement durable ( N° CGEDD

- 00 48 95-01) und den Conseil général de l'agriculture, de l'alimentation et des espaces ruraux (N° CGAAER 1219). 84 S.
- Burkhardt, M. (2012): „Holztransport am Scheideweg“. Vortrag Tagung Holzlogistik - Dienstleister - Verursacher oder Opfer steigender Kosten? Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF), 2012.
- Deutscher Verband der Säge- und Holzindustrie (DeSH; 2013): Politikbrief - Positionspapier zum zulässigen Gesamtgewicht von Rohholztransporten in Deutschland. Ausgabe 01/2013.
- FIBOIS Alsace - Federation interprofessionnelle Forêt-Bois Alsace (2014): Presentation Ser.FA. Abgerufen am 10.01.2014 von <http://www.fibois-alsace.com/fr/presentation-serveur-regional-serfa/presentation.html>.
- FIBOIS Alsace - Federation interprofessionnelle Forêt-Bois Alsace (2007): Collecte des bois Finalisation du Serveur régional de FIBOIS Alsace (Ser.FA). Concept document - FIBOIS. 151 S.
- Freise, L. (2014): Optimierung der Holzlogistik in Baden-Württemberg. Präsentation anlässlich des vierten HoLoBaWü-Projektmeetings am 06.11.2014, Stuttgart: Befragung Holzlogistik für Holztransportunternehmen 2014. 136 Teilnehmer.
- Hecker, M. (2012): Dienst und Leistung - Logistik im Forstwirtschaftlichen Zusammenschluss. Vortrag Tagung Holzlogistik - Dienstleister - Verursacher oder Opfer steigender Kosten? Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF), 2012.
- Geimer, M. (2014): Analyse von Innovationspotentialen in der Fahrzeugtechnik. Präsentation anlässlich des vierten HoLoBaWü-Projektmeetings am 06.11.2014, Stuttgart.
- Hengstberger, H. (2011): Holztransport im Fokus Europas - Chancen und Herausforderungen. Vortrag Innoholz-Tagung "Holztransport-Innovativ", Herzberg 08.07.2011. [www.innoholz.org/fileadmin/user\\_upload/veranstaltungen/Veranstaltungen/4.\\_Hengstberger.pdf](http://www.innoholz.org/fileadmin/user_upload/veranstaltungen/Veranstaltungen/4._Hengstberger.pdf); Abruf 12.11.2014.
- Kienzler, H.-P. (2013): Thesen zur Entwicklung des gewerblichen Strassengüterverkehrs „Fahrenflucht“ oder Kooperation? Vortrag zum Tag der Strassenverkehrsgenossenschaften, Basel am 23.04.2013.
- Kienzler, H.-P., Selz, T., Manns, S. (2000): Auswirkung von erhöhten zulässigen Gesamtgewichten für Rundholztransporte. Untersuchung im Auftrag des Holzabsatzfonds.
- Kienzler, H.-P. (2006): Analyse der Wettbewerbsbedingungen im Holztransport. Untersuchung im Auftrag des Deutschen Holzwirtschaftsrates.
- Korten, S. (2009): Optimierung des Rundholztransportes durch betriebsübergreifende Tourenplanung. Abschlussbericht, AiF-Projekt Nr. 15027. 84 S.
- Jordan, D. (2012): Coûts de transport du bois rond en Suisse - Comparaison entre la Suisse et la France dans les domaines politique et économique.
- Le Net, E., Bajric, F., Vötter, D., Berg, S., Anderson G., und Roux, S. (2010): Identification of existing transport methods and alternative methods or new approaches with data about costs, labour input and energy consumption. Eforwood - Tools for Sustainability Impact Assessment. EFI Report 76, 2010.
- Le Net, E., Bigot, M., & Lewin, F. (2005): The impacts of new road transport regulation on forest-wood sector in France. Abgerufen am 20.11.2006 von [www.afocel.fr/Approvisionnement/LogistiqueTransport/COFE\\_AFOCEL.pdf](http://www.afocel.fr/Approvisionnement/LogistiqueTransport/COFE_AFOCEL.pdf)
- Leinert (1998) zitiert in Borchering, M. (2007): Rundholztransportlogistik in Deutschland – eine transaktionskostenorientierte empirische Analyse. Dissertation. Universität Hamburg.
- Louen, F.-J. (2011): Rückung und Transport von Rundholz mit Wechselbrücken. Tagungsbeitrag Innoholz - Workshop Holz trifft Logistik, Herzberg 08.07.2011.
- Meyer-Stamer, J. (2000): „Clusterförderung als Element lokaler und regionaler Standortpolitik: Optionen, Hindernisse und Grenzen – Perspektiven für NRW“. Projekt Meso-NRW, Universität Duisburg.

- Müller, M. (2008): Schnelle Schritte von der Produktion zum Versand - Das Logistikkonzept der BaySF. Vortrag - Workshop Logistik des Fraunhofer IFF.
- Redmann, M. und Calo, I. (2014): Einsparpotenziale verkehrsbedingter Treibhausgasemissionen. Arbeitsbericht im Projekt Optimierung des Holztransports in Baden-Württemberg, Arbeitspaket 1.0. 28 S.
- Redmann, M., Wippel, B., Winking, A. (2013): Projekt „Holz-Logistik Netz“: Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit durch Kooperation. Abschlussbericht zum vorgezogenen Projektabschluss, Projekt-Nr. 041105. L-Bank. Cluster Forst und Holz Baden-Württemberg.
- Redmann, M., et al. (2011): Regionalstudie Holzkompetenz<sup>3</sup> in den Landkreisen Ostalb, Heidenheim und Schwäbisch Hall. 72 S.
- Reith, D. (2012): „Möglichkeiten der Ertragssteigerung“. Vortrag Tagung Holzlogistik - Dienstleister - Verursacher oder Opfer steigender Kosten? Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF), 2012.
- Schmaltschinski, T., Opferkuch, M., Jaeger, D. (2014): Straßenbelastung beim Transport und TAP 2.3 Analyse Innovationspotentiale. Professur für Forstliche Verfahrenstechnik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Stuttgart, 06.11.2014. PPT.
- Smaltschinski, T. (2010): Reduktion der Leerfahrten beim Rundholztransport. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 181. Jg., 11/12.
- Seintsch, B. (2011): Stellung der Holzrohstoffe in der Kostenstruktur des Holz- und Papiergewerbes in Deutschland. Arbeitsbericht des Instituts für Ökonomie der Forst- und Holzwirtschaft, 2011/3. Hamburg. 110 S.
- Wirtschaftslexikon (2015a): Definition „Wettbewerbsfähigkeit“; Abgerufen am 18.01.2015 von <http://www.wirtschaftslexikon24.com/d/wettbewerbsfaehigkeit/wettbewerbsfaehigkeit.htm>
- Wirtschaftslexikon (2015b): Definition „Wettbewerbsfähigkeit“; Abgerufen am 18.01.2015 von <http://www.wirtschaftslexikon24.com/d/wettbewerbsfaehigkeit/wettbewerbsfaehigkeit.htm>
- Wrobel, M. (2009): „Das Konzept regionaler Cluster: zwischen Schein und Sein?“. Jahrbuch für Regionalwissenschaft 29: 85 - 103

### 3 Umfrage zur wirtschaftlichen Situation des Holztransportgewerbes

#### Bearbeitung

Arbeitsgemeinschaft Rohholzverbraucher e.V. (AGR)

Lukas Freise, Dr. Denny Ohnesorge, Paul Prawdzik, Marius Kopetzky, Jakob Degen

#### 3.1 Zusammenfassung

Im Rahmen einer deutschlandweiten Umfrage unter Rundholz-transportierenden Unternehmen wurden die Daten von 139 Unternehmen mit insgesamt 854 Transportfahrzeugen erfasst. Die Fragen bezogen sich auf die Bereiche Struktur, Fahrzeugtechnik sowie Wettbewerbsfähigkeit und Zukunftsaussichten des Holztransportgewerbes. Die Ergebnisse lassen sich mit denen früherer Untersuchungen vergleichen und zeigen laufende Trends etwa zur verstärkten Marktpräsenz größerer Transportunternehmen mit mehr Transportfahrzeugen auf.

Strukturelle Unterschiede lassen sich insgesamt stärker auf der Vergleichsebene Unternehmensgröße beobachten als im Vergleich zu den gesondert erhobenen Daten zum Holztransport in Baden-Württemberg (45 dort tätige Unternehmen) und denen des ganzen Landes. Kleine Unternehmen wiesen dabei die insgesamt geringste Fahrleistung aber den höchsten Umsatz pro LKW aus. Große Unternehmen konnten dabei tendenziell einen höheren Frachterlös pro Tonne erzielen als Kleinunternehmen.

Bei den Fahrzeugen dominieren Kurzholztransporter. Zwei Drittel aller Fahrzeuge verfügen über einen eigenen Kran und 88 % können aus technischer Sicht höhere Transportgewichte fahren als gewöhnlich zulässig. Im Durchschnitt sind die Zugmaschinen etwa vier Jahre alt, die Anhänger etwa sechs.

Die meisten Fahrer fahren in allen Betriebsgrößen in Vollzeit, Kleinunternehmen haben aber etwa ein Drittel Teilzeitarbeitskräfte. Über alle Betriebsgrößen hinweg haben die befragten Unternehmen Schwierigkeiten, Nachwuchsarbeitskräfte für ihren Betrieb zu finden. Die Altersstruktur ist in allen Betriebsgrößen ähnlich gestaffelt. Die Befragten benannten zahlreiche Risiken für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit ihrer Unternehmen. Vor allem durch die ungewissen Kostenstrukturen sehen die meisten Unternehmen ein Risiko für ihren Betrieb.

#### 3.2 Einleitung

Der Holztransport ist das Bindeglied in der Rohholz-Lieferkette ausgehend vom Wald bis in die Werke der Holzbe- und verarbeitenden Industrie. Die Holzspediteure fungieren dabei als Dienstleister für die Forst- und Holzwirtschaft. Sie sind ein wesentlicher, wenn nicht der wichtigste, Teil der Logistikkette.

Trotz dieser großen strukturellen Bedeutung findet sich das Holztransportgewerbe bei den Clusterstudien der Forst- und Holzwirtschaft auf Bundes- und Landesebene zwar als statistische Größe der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung; ihm wird aber bei der Analyse der Wettbewerbsfähigkeit des Clusters und seiner Teilbranchen kein besonderer Stellenwert beigemessen.<sup>71</sup> Dies mag an der schwierigen Datengrundlage bzw. der heterogenen Struktur der Teil-Branche liegen, wird dieser Schlüsselbranche in Ihrer Bedeutung für eine funktionierende

---

<sup>71</sup> Mrosek, Th.; Kies, U. Schulte, A. (2005): Clusterstudie Forst und Holz Deutschland 2005 – Forst- und Holzwirtschaft hat große volkswirtschaftliche und arbeitsmarktpolitische Bedeutung.

Logistikkette jedoch an dieser Stelle nicht gerecht. In der Forschung ist das Holztransportgewerbe dagegen schon lange wichtiger Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen, da man erkannt hat, dass im Transportsektor zentrale logistische Prozesse oft großes Optimierungspotenzial aufweisen. Die hier vorgelegte Untersuchung möchte diese Debatten aufgreifen, liefert aber keine konkreten Vorschläge einzelne Prozesselemente zu verbessern. Im Fokus der Befragung stand weniger der Logistikprozess selbst als eine aktuelle Bestandsaufnahme der allgemeinen Situation und Leistungsfähigkeit sowie speziell der Wettbewerbsfähigkeit des Holztransportgewerbes als Ganzem.

Die in Kapitel 3 dargestellten Grafiken und Tabellen sind, sofern nicht anders angegeben, Eigendarstellungen der Arbeitsgemeinschaft Rohholzverbraucher (AGR) auf Basis ihrer in der Umfrage gewonnenen Daten.

### 3.2.1 Problemdarstellung

Die baden-württembergische Holzindustrie befindet sich gegenwärtig in einer schwierigen wirtschaftlichen Lage. Vielen Unternehmen fällt es zunehmend schwer, bei sich gegensätzlich entwickelnden Rohstoffkosten und Produktpreisen eine ausreichend große Rendite zu erwirtschaften. Deutschland hat im internationalen Vergleich die höchsten Energie- und Rohholzpreise. Gleichzeitig müssen die heimischen Unternehmen mit ihren Produkten auf globalisierten Absatzmärkten bestehen.

Daher wird jeder Prozess im Einkauf, in der Produktion, im Verkauf und in Verwaltung auf seine Effizienz hin geprüft. Effizienzsteigerungen bei Prozessen im eigenen Unternehmen sind jedoch Grenzen gesetzt, weshalb Kostensenkungen auch bei anderen Kostenfaktoren wie den in der Regel eingekauften Logistikdienstleistungen geprüft werden. Die Logistikkosten und hier insbesondere die Holztransportkosten können einen Anteil an den gesamten Holzkosten frei Werk je nach Sortiment und Transportdistanz von bis zu 30 Prozent betragen.<sup>78</sup>

Transportpreise sind deshalb ein wichtiger Kosten- und Wettbewerbsfaktor für die be- und verarbeitende Holzindustrie. Der Kostendruck in der Holzindustrie wird an deren Dienstleister wie den Holzspediteuren weitergegeben. Sich verschärfende verkehrsrechtliche Anforderungen und steigende Kraftstoffpreise erhöhen den Wettbewerbsdruck im Transportgewerbe zusätzlich.

Der Holztransport in Baden-Württemberg ist in besonderer Weise durch verkehrspolitische Sonderregelungen, insbesondere in Bezug auf das zulässige Gesamtgewicht in benachbarten europäischen Ländern betroffen. Führende Experten gehen zudem davon aus, dass in den kommenden Jahren die vom Straßenverkehr verursachten mittelbaren CO<sub>2</sub>-Umweltkosten auf diese umgelegt, also „internalisiert werden“.<sup>72</sup>

Im Hinblick auf diese herausfordernden rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sowie einem grundsätzlich schweren und damit in Gänze auch für junge Arbeitnehmer zunehmend unattraktiven Beruf warnt die Bundesvereinigung des Holztransportgewerbes e.V. (BdHG) vor überdurchschnittlich hohen Unternehmensaufgaben. Damit verbunden wäre ein für die Holzindustrie möglicherweise existenziell werdender Kapazitätsrückgang in den kommenden Jahren.

Studien, die sich mit den Strukturen und der Wettbewerbssituation des Gewerbes auseinandergesetzt haben, liegen bereits einige Jahre zurück. Um im Rahmen dieses Projekts Empfeh-

---

<sup>72</sup> Borchering (2007), S. 49.

lungen zur Optimierung der Holztransportlogistik ausarbeiten zu können, ist eine Analyse der Strukturen, der Stärken und Schwächen sowie die Einschätzung der Wirtschafts- und Zukunftsfähigkeit des Gewerbes unerlässlich.

### 3.2.2 Zielsetzung

Mit der Durchführung und Analyse der bundesweiten Befragung von Holztransportunternehmen wurden folgende Ziele verfolgt:

- Ergänzung und Aktualisierung des Wissensstand zur Struktur und Wettbewerbssituation des Holztransportgewerbes, speziell in Baden-Württemberg
- Generierung zusätzlicher Informationen für weitere Arbeitspakete im Gesamtprojekt
- Erhebung technischer Spezifikationen von Holztransportfahrzeugen
- Erhebung von ausgewählten Faktoren zur Beurteilung der Zukunftsfähigkeit des Gewerbes
- Bundesdeutscher Vergleich des Transportgewerbes Baden-Württembergs zur Identifizierung eventueller landesspezifischer Besonderheiten

### 3.3 Stand des Wissens – relevante Studien

Wie zuvor bereits ausgeführt, stand das Holztransportgewerbe bei früheren Clusterstudien nicht im Fokus der Untersuchungen. In den vergangenen fünfzehn Jahren beschäftigen sich jedoch mehrere Projekt- und Studienarbeiten sowie zahlreiche populärwissenschaftliche Fachartikel mit dem Gewerbe. Insbesondere die Transportkosten und die Wettbewerbsfähigkeit des Gewerbes im Vergleich zu Nachbarländern standen immer wieder im Fokus der Untersuchungen. Im Folgenden wird auf die im Zusammenhang mit der Zielstellung dieses Projektteils relevanten Arbeiten eingegangen. Die Diskussion einzelner Ergebnisse im Vergleich zu früheren Studien erfolgt an der betreffenden Stelle im Ergebnisteil.

Zu nennen sind hier die Arbeiten von Bocherding und Grund (2003) sowie Borchering (2007). Während bei Borchering und Grund die Lohnstrukturen im Holztransportgewerbe im Fokus standen, beschäftigte sich Borchering im Rahmen seiner Dissertation mit den Kostenstrukturen und Kundenbeziehungen des deutschen Holztransportgewerbes im Vergleich zu anderen europäischen Nachbarstaaten. Er führte dazu im Jahr 2004 eine schriftliche Befragung unter 712 Unternehmen des Holztransportgewerbes in Deutschland durch und ergänzte diese um Experteninterviews. Borchering schätzte die Anzahl der Rundholztransportunternehmen auf etwa 1.000 in ganz Deutschland, von denen wiederum etwa 45 Prozent in den Bundesländern Bayern und Baden-Württemberg angesiedelt sein sollen. Borchering vermutet, dass sich die Verteilung der Holzeinschlagsmengen in Deutschland proportional zu der zur Verfügung stehenden Transportkapazität und damit auch zu der anzunehmenden Grundgesamtheit einer Befragung verhält. Hinsichtlich der Struktur des Transportgewerbes zeigte sich, dass das Holztransportgewerbe von Kleinunternehmen geprägt ist. Etwa 72 Prozent der antwortenden Unternehmen aus vorgenannter Arbeit hatten einen Fuhrpark bestehend aus ein bis drei Fahrzeugen und etwa 66 Prozent nicht mehr als drei Mitarbeiter.

Eine weitere für das Projekt relevante Arbeit ist die von von Bodelschwingh (2006), der sich über den Ansatz des Supply Chain Managements mit Optimierungspotentialen in der Holzernettekte und insbesondere als Teilprozess mit dem Holztransporte insbesondere befasste. Von Bodelschwingh befragte insgesamt 88 Fuhrunternehmen vorwiegend aus Bayern und Baden-Württemberg. Wie andere Autoren auch, konstatiert von Bodelschwingh, dass im Holztrans-

portgewerbe mehrheitlich kleine Familienbetriebe tätig sind, die sich auf den Transport von Rundholz spezialisiert haben. Im Ergebnis attestierte er der Branche sowohl hinsichtlich der eingesetzten Fahrzeugtechnik als auch der Organisation der Holzabfuhr ein hohes Verbesserungspotential zur Steigerung der Effizienz.

Darüber hinaus seien an dieser Stelle die Arbeiten von Kienzler et al. (2000)<sup>73</sup> und Kienzler (2006)<sup>74</sup> erwähnt, die sich mit dem Transportgewerbe unter dem Aspekt höherer zulässiger Gesamtgewichte bzw. unter Kostengesichtspunkten beschäftigten, deren Studien jedoch nicht auf umfangreichen Erhebungen im Transportgewerbe fußen.

### 3.4 Methodik

#### 3.4.1 Konzeption des Fragebogens

Der Fragebogen wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern des Projektes HoLoBaWü sowie mit Praktikern aus der Holztransportbranche entwickelt. Von besonderem Interesse waren für das Projekt – neben Informationen zur Struktur des Gewerbes und der Unternehmen – Erkenntnisse zur technischen Ausstattung des Fuhrparks sowie zur Wettbewerbssituation und Einschätzungen der Zukunftsfähigkeit des eigenen Unternehmens.

Der Fragebogen gliederte sich in folgende Bereiche:

- 1) Allgemeine Unternehmensdaten
- 2) Fuhrpark und Auslastung
- 3) Risiken und Chancen
- 4) Wirtschaftliche Aspekte
- 5) Rechtliche Aspekte

#### 3.4.2 Grundgesamtheit und Adressrecherche

Angaben zur Anzahl der Unternehmen des Holztransports in Deutschland sind nicht verfügbar. Aus der Unternehmensstatistik zum Straßengüterverkehr des Bundesamts für Güterverkehr (BAG) lässt sich die Zahl der Holztransporteure nicht ableiten, da sie je nach Spezialaufbau verschiedenen Gruppen zugeordnet sind, in denen sich auch LKW mit anderem Verwendungszweck befinden können. Ein weiterer Grund mangelnder Information über die Zahl der im Holztransport tätigen Unternehmen mag der sehr hohe Anteil von Klein- und Kleinstunternehmen<sup>75</sup> des Gewerbes sein. Die Schätzungen zur Größe des deutschen Holztransportgewerbes gehen daher auch stark auseinander. Die Angaben früherer Quellen schwanken zwischen 1.000 bis 1.750 Holztransportunternehmen mit 1.700 bis 2.400 LKW und etwa 3.000 angestellten Fahrern, wobei Borchering von einem Rückgang der Anzahl der Betriebe ausgeht und bereits im Jahr 2007 die Höhe auf etwa 1.000 Unternehmen schätzte.<sup>76</sup>

Die Ansprache der Holztransportunternehmen erfolgte über drei Ebenen: Erstens wurde eine Adressrecherche im Internet<sup>77</sup> und in Branchenverzeichnissen durchgeführt. Zweitens über die Zusammenarbeit mit dem Bundesverband des Holztransportgewerbes BdHG, welcher die

---

<sup>73</sup> Kienzler, H.-P. et al. 2000.

<sup>74</sup> Kienzler, H.-P. 2006.

<sup>75</sup> Nach Definition der EU-Kommission zählen zu den Kleinstunternehmen Betriebe mit weniger als zehn Beschäftigten oder einem Umsatzerlös von weniger als zwei Millionen Euro. Beides dürfte auf die Mehrheit der Unternehmen des Holztransportgewerbes zutreffen. EU-Kommission (2003).

<sup>76</sup> Vgl. Borchering (2007) S. 39.

<sup>77</sup> Genutzte Portale: <http://www.holz.ws>, <http://www.wlw.de> und <http://udb.bayern.de>

Befragung mit einem Begleitschreiben an seine Mitglieder verschickte und für eine Teilnahme warb. Der Organisationsgrad im BdHG ist aufgrund der oft kleinen Betriebsstrukturen jedoch relativ gering.<sup>78</sup> Daher wurde als dritter Weg die Verbreitung durch holzverarbeitende Unternehmen vornehmlich der Mitglieder der Branchenverbände gewählt, da diese als Auftraggeber regelmäßige Geschäftskontakte und damit den besten Zugang zur Holztransportbranche haben. Insgesamt lagen zu Beginn der Befragung 624 Adressen von Transportunternehmen vor. Durch die Verbreitung der Befragung über Dritte konnten 50 weitere Kontakte dokumentiert werden, so dass sich im Laufe der Befragung der Adressdatensatz auf insgesamt 674 Unternehmen erhöhte.

### 3.4.3 Versand und zeitlicher Ablauf der Befragung

Um eine zielgerichtete und möglichst große Beteiligung an der Befragung zu erlangen, wurde ein Anschreiben, welches der Befragung vorangestellt wurde, verfasst (siehe Anhang 1). Das Anschreiben erläuterte Hintergrund und Zweck der Befragung und schränkte die Zielgruppe ein, da ausschließlich rohholztransportierende Unternehmen teilnehmen sollten.

Der Befragungszeitraum erstreckte sich vom 18.07.2014 bis zum 31.08.2014, betrug also knapp sechs Wochen. Die Befragung wurde inklusive Anschreiben über drei Varianten direkt an die Holztransportunternehmen verschickt:

1. Per Fax über einen Onlinedienstleister
2. Per Post
3. Online über ein Befragungstool

Darüber hinaus erfolgte der Versand als E-Mail mit Anschreiben und Fragebogen als PDF-Anlage sowie einem Link zur Online-Befragung an die Branchenverbände des Holztransportgewerbes, der Holzindustrie und des Rohholzhandels mit der Bitte um Weiterleitung an Ihre Mitgliedsunternehmen.

Die Kleinunternehmerstrukturen des Holztransportgewerbes stellten nicht nur bei der Adressrecherche, sondern auch beim Versand (Ansprache und Erreichbarkeit der Unternehmen) und der Teilnahme an der Befragung eine Herausforderung dar. So wurde häufiger darauf verwiesen, dass der Unternehmer selbst fahre und keine Zeit für die Beantwortung von Fragebögen habe. Die Befragung wurde daher zusätzlich in den Fachmedien beworben und als zusätzlicher Motivationsanreiz zehn Tankgutscheine für vollständig ausgefüllte Fragebögen verlost.

### 3.4.4 Auswertungen der Befragung

Unter den teilnehmenden Unternehmen befinden sich auch solche, deren Kerngeschäft nicht der Rundholztransport ist. Dazu zählen beispielsweise Unternehmen der Holzindustrie und des Holzhandels, die entweder im Eigenauftrag oder als Dienstleistung mit eigenen Fahrzeugen im Holztransport tätig sind. Nicht selten ist das Transportgeschäft in Tochtergesellschaften dieser Unternehmen ausgelagert.

Der finale Datensatz wurde diesbezüglich und in Bezug auf Falscheingaben auf Plausibilität geprüft. Unternehmen, deren Kerngeschäft nicht der Transport von Rundholz darstellt, wurden bei der Analyse von ökonomischen Daten wie Gesamtumsatz und Gesamtbeschäftigte nicht einbezogen, um Verzerrungen zu vermeiden.

Bezogen auf das Untersuchungsgebiet Baden-Württemberg muss jeweils unterschieden werden zwischen im Land ansässigen Unternehmen und solchen, die mit Fahrzeugen in Baden-

---

<sup>78</sup> BdHG in Borchering (2007).

Württemberg tätig sind. Für das Projekt ist von Bedeutung, wer in Baden-Württemberg Rundholz fährt, weshalb danach gefragt wurde. In der Regel wurden deshalb bei den Auswertungen von Fragen Unternehmen berücksichtigt, die hier tätig sind.

### 3.5 Ergebnisse und Diskussion

#### 3.5.1 Rücklauf und Repräsentativität

Der Versand des Fragebogens über eine Vielzahl von Verteilern und die zugesicherte Anonymität führen zur Schwierigkeit, dass gesicherte Aussagen zur Rücklaufquote nur bedingt gemacht werden können. Es ist auch nicht für alle Rückläufe bekannt, über welchen Weg die Ansprache erfolgte.

Von den 624 Adressen zu Beginn der Befragung sind 21 abzuziehen, bei denen sich herausstellte, dass die Kontaktinformationen falsch waren, dass das Unternehmen seinen Betrieb eingestellt hat bzw. dass aus anderen Gründen nicht von einem aktiven Holztransportunternehmen ausgegangen werden konnte.

Insgesamt nahmen 143 Unternehmen an der Befragung teil, von denen 139 mit eigenen Fahrzeugen im Rundholztransport aktiv tätig sind. Von den 143 sind 98 Unternehmen der ursprünglichen Adressdatenbank zuzuordnen. Die theoretische Rücklaufquote liegt damit zwischen 16 (96 von 624 Unternehmen in der direkten Ansprache) und 21 Prozent (bei 143 teilnehmenden Unternehmen und einer Gesamtdatenbank von 674 Unternehmen).

Von den teilnehmenden Unternehmen gaben 45 an, in Baden-Württemberg Rundholz zu fahren. Sie sind die Ausgangsbasis für die Untersuchung der Wettbewerbsfähigkeit des Holztransportgewerbes dort. Durch ihr Auftreten als Transporteur und Wettbewerber im Land wirken sie dort unabhängig von der Frage, ob auch ihr Hauptsitz in Baden-Württemberg selbst zu finden ist.

**Tabelle 10: Struktur der Datensätze**

	<b>Deutschland</b>	<b>Baden-Württemberg</b>
Recherchierte Unternehmensadressen	624	105
Zusätzlich erfasste Unternehmen	50	7
<b>Gesamtanzahl Datensatz (gültige Kontakte)</b>	<b>674</b>	<b>112</b>
Anzahl teilnehmender Unternehmen	143	29 (48) <sup>1</sup>
mit eigenen Fahrzeugen im Rundholztransport tätig	139	26 (45) <sup>1</sup>
<b>Erfasste Rundholztransportzüge</b>	<b>854</b>	<b>155 (260)<sup>1</sup></b>
<sup>1</sup> in () in BW tätige Unternehmen		

**Tabelle 11: Regionale Verteilung der Unternehmen im Rundholztransport (n = 139)**

	Hauptsitz	Tätigkeit
Baden-Württemberg	26	45
Bayern	31	62
Brandenburg/Berlin	7	21
Hessen	14	61
Mecklenburg-Vorpommern	4	18
Niedersachsen/Bremen	10	30
Nordrhein-Westfalen	26	46
Rheinland-Pfalz	5	28
Saarland	0	9
Sachsen	6	16
Sachsen-Anhalt	3	19
Schleswig-Holstein/Hamburg	2	9
Thüringen	5	35
<b>Summe</b>	<b>139</b>	-

Über die Repräsentativität der generierten Adressdatensätze lässt sich kaum eine fundierte Aussage treffen, da die Anzahl der in Deutschland tätigen Unternehmen und die Verteilung der Grundgesamtheit unbekannt sind (siehe Kapitel 3.3). Borchering (2007) behalf sich zur Repräsentativitätsprüfung seines Datensatzes mit dem Vergleich zu folgenden Verteilungen:

- Regionale Verteilung der Holztransportunternehmen i. Vgl. zu früheren Studien im Holztransport sowie zur Nutzlast der Unternehmen des gewerblichen Güterkraftverkehrs in t gemäß dem Bundesamt für Güterverkehr nach Regionen
- Verteilung der Größe der Holztransportunternehmen i. Vgl. zu früheren Studien

Unternehmen, die über die Adressrecherche und über die Gast-Registrierung identifiziert werden konnten, wurden als potentielle Teilnehmer der Befragung gezählt. Nachfolgend ist die regionale Verteilung des Datensatzes dem Adressdatensatz von Borchering sowie dem Holzeinschlag im Bezugsjahr 2013 gegenübergestellt, wobei die Regionen wie bei Borchering zusammengefasst wurden.

**Tabelle 12: Vergleich der regionalen Verteilung der recherchierten Unternehmen der Adressdatenbanken zum regionalen Holzeinschlag**

Region	Holzeinschlag 2013 <sup>79</sup> (Mio. m <sup>3</sup> )*	Borcherding (2007) N = 712	AGR (2015) N = 674
Bayern, Baden-Württemberg	23,9 (46 %)	45 %	42 %
Saarland, Rheinland-Pfalz, Hessen, Nord- rhein-Westfalen	11,6 (22 %)	28 %	31 %
Niedersachsen, Bremen, Hamburg, Schles- wig-Holstein	4,8 (9 %)	12 %	12 %
Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt, Brandenburg, Berlin	7,9 (15 %)	5 %	7 %
Sachsen, Thüringen	3,7 (7 %)	10 %	8 %
<b>Gesamtergebnis</b>	<b>51,9 (100 %)</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>

\*Erläuterung: Die amtliche Holzeinschlagsstatistik weicht vom tatsächlichen Einschlag in Deutschland ab. Dieser tatsächliche Einschlag liegt je nach Baumart um bis zu 40 Prozent darüber. Dargestellt sind die Daten der unkorrigierten amtlichen Einschlagsstatistik.

Sowohl in Bezug auf die Anzahl der recherchierten Adressen als auch auf die regionale Verteilung der Adressen lässt sich eine gewisse Repräsentativität der Datensätze ableiten.

### 3.5.2 Struktur des Holztransportgewerbes

Wie sind die Unternehmen des Holztransportgewerbes strukturell aufgestellt? Welche Betriebsgrößen gibt es und inwieweit können Unternehmen des Holztransportgewerbes auf eine breitere Basis wirtschaftlicher Tätigkeit zurückgreifen und sind in ihrer Wirtschaftsfähigkeit nicht unmittelbar von Rundholztransportpreisen abhängig? Diesen Fragen widmet sich der erste Themenkomplex des Fragebogens. Eine zentrale Ausgangsbasis ist dabei die Unternehmensgröße.

#### Unternehmensgrößen

Die Unternehmensgröße wird in der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung üblicherweise nach der Anzahl der Beschäftigten oder nach Umsatz dargestellt. Eine Einteilung der Unternehmen nach Beschäftigten nach EU-Klassifikation<sup>75</sup> ergibt für die 139 Unternehmen der Befragung, dass 62 Prozent weniger als 10 Beschäftigte führen und damit gemäß dieser Definition zu den Kleinstunternehmen zu rechnen sind. Um Aussagen zur Struktur im Güterkraftverkehr machen zu können, unterteilt das Bundesamt für Güterkraftverkehr (BAG)<sup>80</sup> die Unternehmen zusätzlich nach der Anzahl der Lastkraftwagen je Unternehmen.

Diese Größenklassen werden auch für weitere Analysen in dieser Studie herangezogen und zusätzlich mit entsprechenden Klassenbezeichnungen belegt (Tabelle 10), wobei neben der Größenklasse „mittelgroße Unternehmen“ (4 bis 10 LKW je Unternehmen) die Klassen „kleine Unternehmen“ mit 1 bis 3 LKW sowie die Größenklasse „große Unternehmen“ (mehr als 10 LKW) gebildet werden.

<sup>79</sup> BMEL (2015)

<sup>80</sup> BAG (2012).

Tabelle 13 und Abbildung 22 zeigen den Vergleich der Befragungsergebnisse für Deutschland und Baden-Württemberg mit den Daten des gewerblichen Güterkraftverkehrs im Jahr 2010<sup>81</sup> sowie mit den Rundholztransporten im Jahr 2006 in Deutschland nach Borchering. Auffallend ist im Vergleich zu den Ergebnissen von Borchering, dass deutlich weniger Kleinstunternehmen mit nur einem LKW in dieser Befragung erfasst wurden. Auch von Bodelschwingh dokumentierte deutlich mehr Kleinstunternehmen bei seinen Untersuchungen, die jedoch vornehmlich in Bayern stattfand.<sup>82</sup>

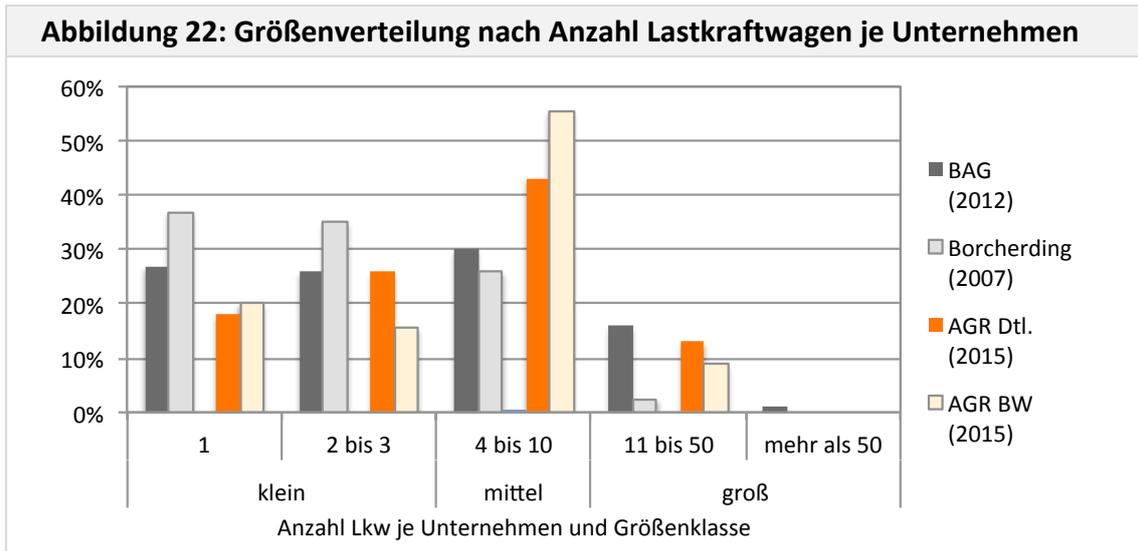
<b>Tabelle 13: Vergleich Größenverteilung (Anzahl LKW je Unternehmen)</b>					
Größenklasse nach Anzahl der LKW je Unternehmen	Bezeichnung Größenklasse AGR (2015)	Bundesamt für Güterverkehr (BAG) <sup>80</sup>		AGR Dtl.	Borchering
		(2012)	(2004)	(2015)	(2007)
1 (Kleinst)	Klein	27 %	27 %	18 % (25)	37 %
2 bis 3 (Klein)		26 %	27 %	26 % (36)	35 %
4 bis 10 (Mittel)	Mittelgroß	30 %	32 %	43 % (60)	26 %
11 bis 50 (Groß)	Groß	16 %	13 %	13 % (18)	3 %
mehr als 50 (Sehr groß)		1 %	1 %	0 %	0 %
<b>Summe (100 %)</b>		<b>49.676</b>	<b>56.500</b>	<b>139</b>	<b>120</b>

Der Vergleich mit den Ergebnissen für Baden-Württemberg zeigt zudem, dass dort vor allem mittelgroße Unternehmen an der Befragung teilgenommen haben (Abbildung 22). Kleinstbetriebe sind üblicherweise schwieriger für Befragungen zu gewinnen (participation bias), weshalb der tatsächliche Anteil dieser Gruppe am Gesamtgewerbe wahrscheinlich größer ist als in den Befragungen erfasst wird.<sup>83</sup> Dennoch erscheint die im Vergleich zu den Ergebnissen von Borchering geringe Anzahl erfasster Kleinstunternehmen erklärungsbedürftig, da die Anzahl von Adressdaten, die Versandmethodik und die Anzahl des Rücklaufs in etwa gleich sind. Eine Erklärung mag sein, dass es in den letzten Jahren tatsächlich zu vermehrten Unternehmensaufgaben kam, wie der Branchenverband der Holztransporteure BdHG immer wieder deutlich machte.

<sup>81</sup> Vgl. BAG (2012), S. 8.

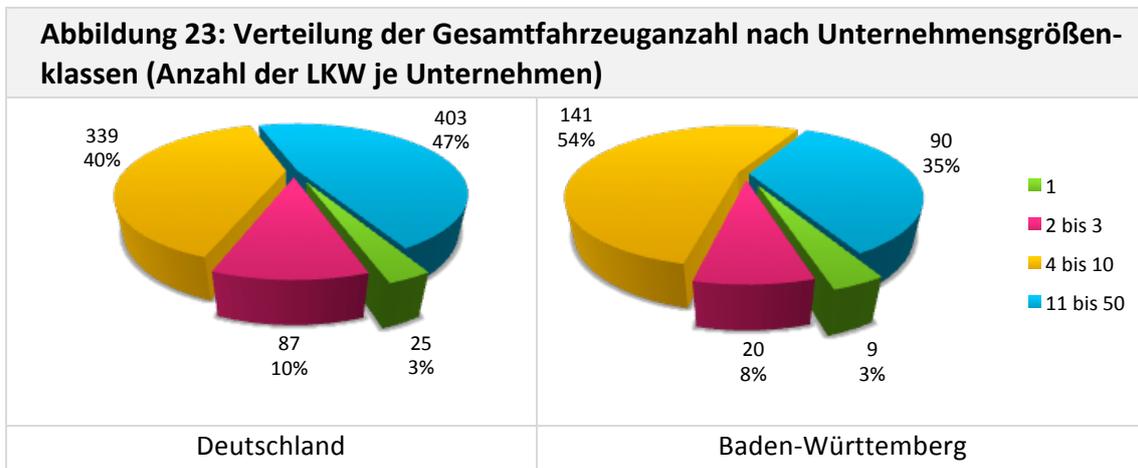
<sup>82</sup> Bodelschwingh (2001) ermittelte noch einen Anteil von mehr als 50 % der kleinen Unternehmen mit einem oder zwei LKW.

<sup>83</sup> So verfügten in einer Umfrage der Firma EGGGER im Jahr 2013 (30 Teilnehmer) 57 % der Betriebe über 1-5 Fahrer. (Witte 2013). Nach von Bodelschwingh (2001) liegt der Durchschnitt bei 2,6 LKW pro Betrieb. Insgesamt sollen 2001 zwischen 1.700 und 2.400 LKW und ca. 3.000 Fahrer existiert haben.



Quelle: Befragung AGR. Deutschland n = 139; Baden-Württemberg n = 45

Für die Gesamttransportkapazität ist die Verteilung der Gesamtzahl der Transportfahrzeuge auf die verschiedenen Unternehmensgrößen interessant. Abbildung 23 zeigt, dass deutschlandweit fast die Hälfte der Transportkapazität von großen Unternehmen mit 11 und mehr LKW bereitgestellt wird. In Baden-Württemberg sind es nach dieser Studie etwa 35 Prozent, da besonders viele mittlere Unternehmen mit 4 bis 10 Fahrzeugen erfasst wurden.

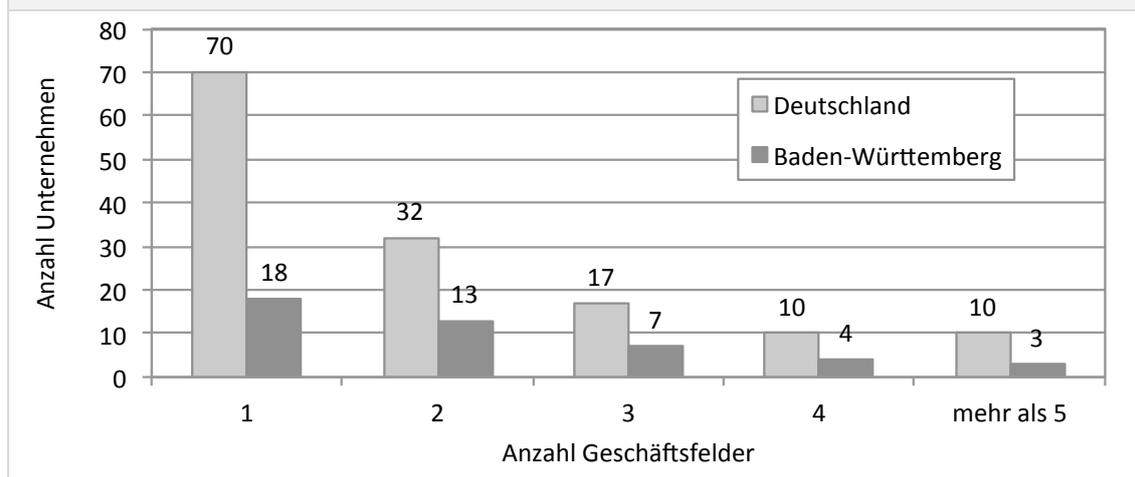


**Geschäftsfelder**

In der Frage nach der Anzahl der Geschäftsfelder der erfassten Unternehmen zeigt sich eine ähnliche Verteilung in Baden-Württemberg im Vergleich mit dem Bundesdatensatz. Grundsätzlich scheint die Diversifikation der Geschäftsfelder zuzunehmen. Borchering (2007) ermittelte nur bei 14,4 Prozent der Befragten andere Transporttätigkeiten als den Rundholztransport.

Am häufigsten ist als zweites Standbein der Holzhandel anzutreffen, zu jeweils gleichen Anteilen gefolgt von Schnittholz-, Hackgut- oder sonstigen Transporten. Weitere Geschäftsfelder sind forstliche Dienstleistungen sowie die Holzbe- und Verarbeitung.

Insgesamt kann keine breite Verteilung der Geschäftsfelder konstatiert werden, was sicherlich mit den für den Rundholztransport notwendigen Spezialfahrzeugen zusammenhängt. Diese können nur schwer für den Transport anderer Güter umgerüstet werden und fahren deshalb fast ausschließlich Lang- oder Kurzholz.

**Abbildung 24: Anzahl der Geschäftsfelder der erfassten Rundholztransportunternehmen**

n (Deutschland) = 139, n (Baden-Württemberg) = 45

**Tabelle 14: Geschäftsfelder der erfassten Unternehmen (Mehrfachantworten)**

Geschäftsfelder	Deutschland	Baden-Württemberg
Rundholztransporte	139	45
Holzhandel	46	17
Hackschnitzeltransporte	24	8
Sonst. Speditionsgeschäfte	23	8
Schnittholztransporte	21	8
Holzbe- und verarbeitende Industrie	17	8
Forstlohnunternehmen	13	5
Andere	14	6

Die Anzahl weiterer Geschäftsfelder steht im engen Zusammenhang mit der Unternehmensgröße. Während auch relativ viele Klein- und Kleinstunternehmen im Holzhandel aktiv sind, so begrenzt die Fuhrparkgröße und die Spezialisierung deren Möglichkeiten, in anderen Geschäftsfeldern aktiv zu sein. Mittlere und große Unternehmen, die ihr Kerngeschäft in der Holzbe- und Verarbeitung haben, wollen sich nicht selten mit eigenen Fahrzeugen durch ihre größere Unabhängigkeit einen Wettbewerbsvorteil bzw. gegenüber ihren Spediteuren eine gute Verhandlungsposition verschaffen. Regelmäßig liegt das Interesse dieser Unternehmen auch in der Etablierung effizienterer und flexiblerer Logistikprozesse.

### 3.5.3 Geschäftstätigkeit von Holztransportunternehmen

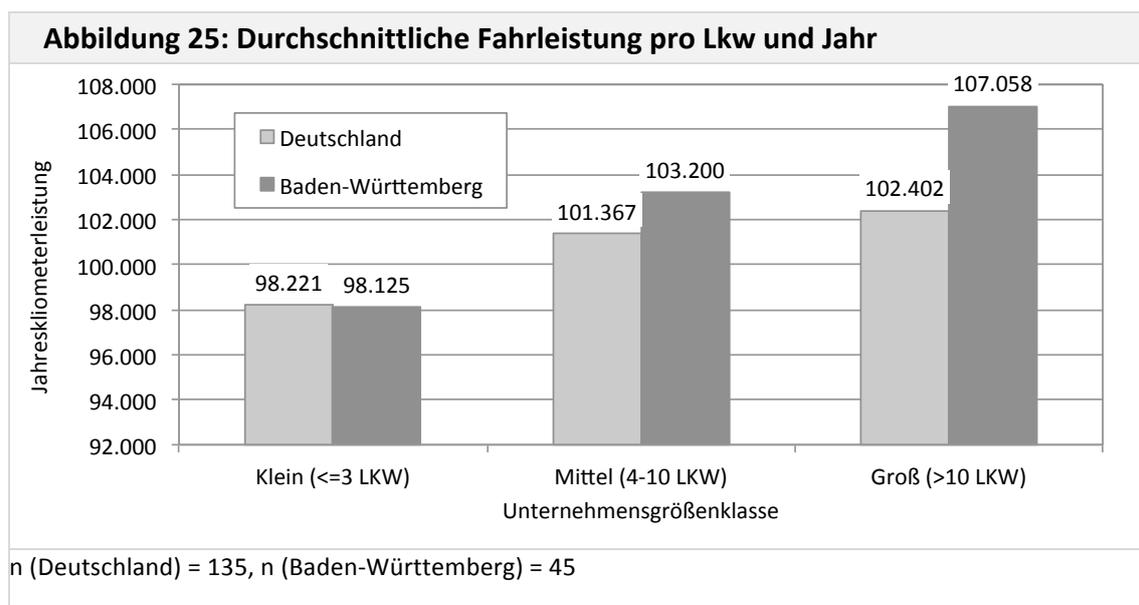
#### Auslandsaktivitäten der Rundholztransporteure

Mit 43 Antworten gab etwa ein Drittel der befragten Unternehmen an, auch im Ausland Holz zu transportieren. Am häufigsten wird von 19 Unternehmen Österreich als Land angegeben; gefolgt von Frankreich. Für in Baden-Württemberg tätige Unternehmen ist Frankreich mit neun Nennungen das wichtigste Land für die Auslandsaktivitäten im Rundholztransportbereich. Dies ist insofern interessant als es unterschiedliche gesetzliche Regelungen zum zulässigen Gesamtgewicht im benachbarten Elsass oder den Vogesen im Vergleich zu Deutschland gibt. In diesen französischen Departements sind auf bestimmten Routen Rundholztransporte mit bis zu 57 Tonnen Gesamtgewicht möglich. Eine grenzüberschreitende Transportaktivität ist

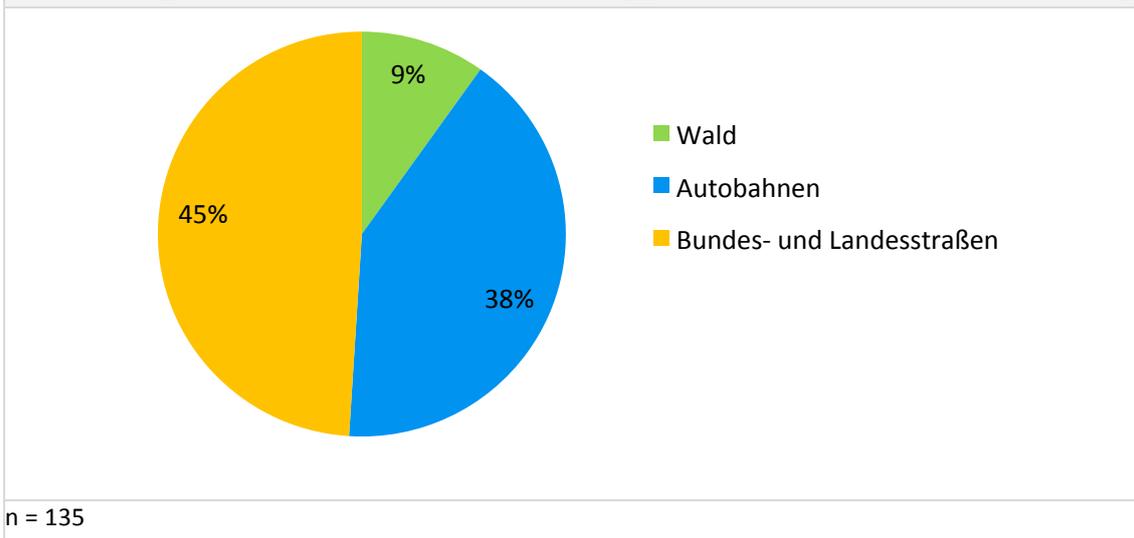
im vollbeladenen Zustand beim Rundholzimport für in Baden-Württemberg fahrende Unternehmer mit Umladeprozessen verbunden, wenn die Beladungsmöglichkeit in Frankreich voll ausgereizt wird.

### Fahrleistung

Abbildung 25 zeigt, dass die im Jahr durchschnittlich gefahrenen Kilometer von der Betriebsgröße abhängen. Betriebe mit 11 und mehr LKW fahren im Schnitt bis zu neun Prozent mehr Kilometer je Fahrzeug im Jahr als kleine und mittlere Betriebe in Deutschland. Die Daten unterstützen die These der engen Bindung kleiner Fuhrunternehmen an wenige regionale Kunden. Um mehr verschiedene Kunden bedienen zu können, werden durch größere Unternehmer weitere Strecken bedient. In Baden-Württemberg weisen die mittelgroßen und großen Betriebe im Vergleich zu Gesamtdeutschland höhere Jahreskilometerleistungen auf.



Die Betrachtung der beim Transport benutzten Wege (Abbildung 26) zeigt, dass nur etwa 9 Prozent der Transportstrecke im Wald selbst liegt. Etwa 45 Prozent des Transports findet auf Bundes- und Landstraßen statt. Bezogen auf die Untersuchung der Infrastrukturbelastung durch Holztransporte waren dies wichtige Indikatoren. Die Streckenanteile der Transporte in Baden-Württemberg weisen keine signifikanten Abweichungen zum Bundesdurchschnitt auf.

**Abbildung 26: Durchschnittliche Fahrleistung pro LKW und Jahr nach Verkehrsweg**

### Frachtaufträge

Die Umfrage ergab, dass die teilnehmenden Betriebe in Deutschland im Schnitt 16,9 Touren pro Woche fahren. Bei einer durchschnittlichen Auftragsgröße von 126 Festmetern, einer Ladungsmenge von 20 Tonnen Gewicht und einem Nadelholzgewicht von 0,83 t je Festmeter sind durchschnittliche 7,5 Touren notwendig, um einen Auftrag abzuarbeiten. Beim Laubholz brauchen die Betriebe im Schnitt 6,5 Touren pro Auftrag. Allerdings werden diese im Schnitt auch nur für 105 Festmeter erteilt. Der Unterschied ergibt sich aus dem höheren Gewicht des Laubholzes (ca. 1,2 Tonnen/Festmeter).

Bei rund 17 Touren pro Woche würde das Unternehmen 409 Festmeter Nadelholz oder 282 Festmeter Laubholz transportieren können.

### Aufenthaltszeit im Werk

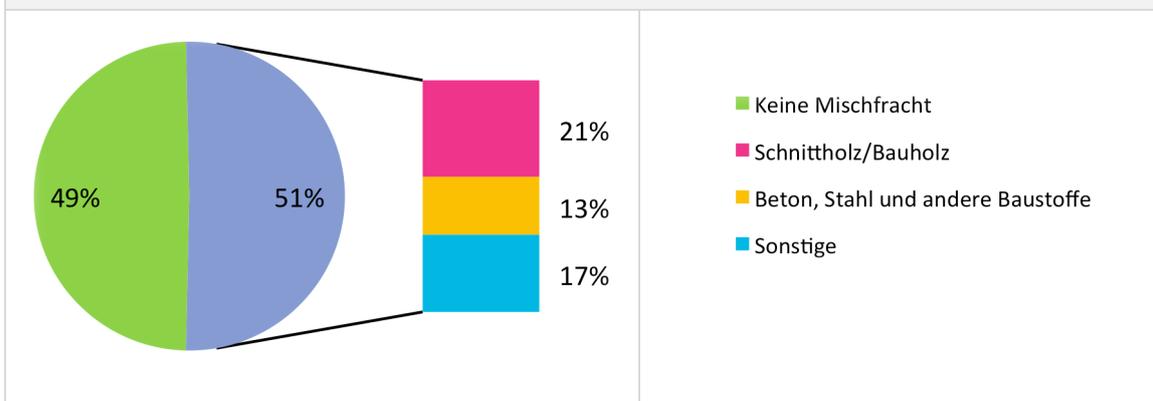
Im Schnitt beträgt die Aufenthaltszeit im Werk rund 54 Minuten. Diese Angabe variiert zwischen 15 Minuten und 120 Minuten. Davon sind im Schnitt 23 Minuten zum Entladen des LKW nötig, wobei die Zeiten zwischen 5 und 60 Minuten schwanken. Etwa die Hälfte der Zeit im Werk dient also nicht der Entladung und wird anderen Gründen zugeschrieben. Der wohl wichtigste Grund ist die Organisation im Werk, die insgesamt 43 Mal angegeben wurde bei insgesamt 68 Antworten. Gefolgt von technischer Ausstattung im Werk (7 Nennungen), Qualifikation der Werksmitarbeiter (3 Nennungen) und der Infrastruktur im Werk (3 Nennungen). Damit liegen die Gründe für die Wartezeit beim Ablauf des Anlieferungsprozesses im Werk laut der Transporteure bei den holzabnehmenden Werken. Eine Verbesserung der Organisation, etwa durch stärkeren Software-Einsatz, könnte hier Effizienzsteigerungen möglich machen.

### Mischfracht

Etwa die Hälfte der Befragten äußerte sich zum Thema Transport von Mischfracht. Mischfracht zu transportieren bedeutet i. d. R., dass gefahrene Transportwege besser genutzt werden können. Die Spezialaufbauten des Rundholztransportfahrzeugs bedeuten eine besondere Herausforderung für den Transport anderer Güter. Die Hälfte der befragten Unternehmen gibt an, Mischfrachten zu fahren (Abbildung 27). Etwa die Hälfte von ihnen entfällt dabei auf Schnitt-

und Bauholz. Die Daten machen deutlich, dass nach wie vor Effizienzsteigerungspotenziale in diesem Bereich vorhanden sind. Gerade der Mischfrachttransport mit Schnittholz stellt eine attraktive Erweiterung der Transportaktivitäten dar, da dieses oft unmittelbar am mit Rundholz belieferten Sägewerk aufgenommen werden kann, ohne dass ein anderer Standort angefahren werden muss.

**Abbildung 27: Verteilung der verschiedenen gefahrenen Arten von Mischfracht (Deutschland)**

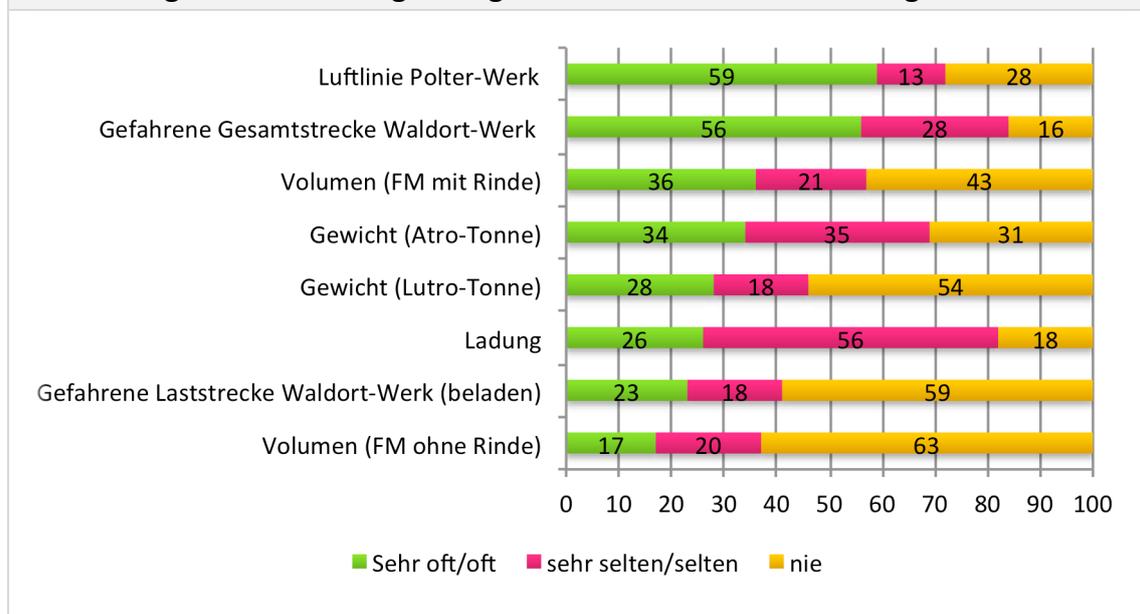


n = 71

**Abrechnungsmethoden**

Die verwendeten Abrechnungsarten überraschen durch eine große Heterogenität (vgl. Abbildung 28). Abrechnungsarten, die für eine Gruppe gängig sind, werden von anderen Unternehmen nie gewählt. Dies spricht für einen relativ begrenzten Kundenkreis der Transporteure, da die einkaufenden Unternehmen die Abrechnungsart festlegen und offenbar viele Modelle zur Anwendung kommen. Insgesamt dominiert die Abrechnung nach Strecken gegenüber den beim Holz schwieriger zu ermittelnden Volumina. Auffällig ist auch die geringere Verbreitung der Gewichtsabrechnung.

**Abbildung 28: Verwendungshäufigkeit verschiedener Abrechnungsmethoden**

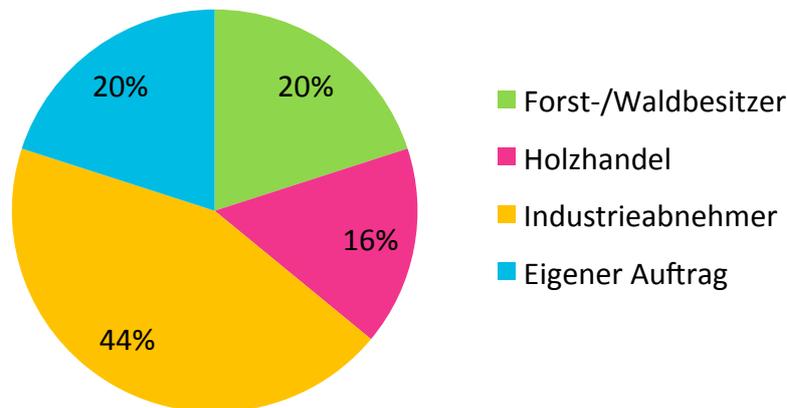


Deutschland; Antworten in Prozent; n variiert je nach Antwort von 123 bis 126

## Auftraggeber

Die Verteilung der gefahrenen Rundholzmenge auf die Auftraggeber (Abbildung 29) zeigt, dass knapp die Hälfte der Holzmenge im Auftrag der Industrie transportiert wird. Andere Bundesländer zeigen diesbezüglich leichte Abweichungen, bei in Bayern fahrenden Unternehmen ist der Waldbesitz zu 25 % der Auftraggeber. In Baden-Württemberg ähnelt die Verteilung der transportierten Rohholzmenge stärker dem Bundesdurchschnitt.

**Abbildung 29: Verteilung der transportierten Rohholzmenge auf die Auftraggeber des Transportunternehmens**



n = 135

## Frachterlöse

Die Frage nach Frachtpreisen ist naturgemäß heikel. Die Zahl der Antworten liegt hier deutlich unter dem Durchschnitt der Befragung. Dennoch beantworteten 103 Teilnehmer in Deutschland (davon 33 in Baden-Württemberg) die Frage. Der durchschnittliche Frachtpreis<sup>84</sup> wurde in Bezug zu den Unternehmensgrößenklassen und zu den Regionen dargestellt.

Unabhängig von der Mengeneinheit (Erlös je Festmeter ohne Rinde bzw. Erlös pro Tonne) zeigen sich für Baden-Württemberg und Deutschland nahezu identische Werte von im Schnitt 10,70 Euro.

Betrachtet man die Erlöse unterteilt nach Unternehmensgrößenklassen (Tabelle 16), so wird deutlich, dass der Frachterlös großer Unternehmen in Euro / Fm o. R. um 25 Prozent höher liegt als der kleiner Transportunternehmen. In der Betrachtung der Frachterlöse in Euro/Tonne liegen die Frachterlöse bei den großen Transporteuren um 24 % höher als die der Kleinen. Kleine Unternehmen schaffen es also entweder nicht, höhere Frachtpreise durchzusetzen oder sie arbeiten kostengünstiger als Großunternehmen.<sup>85</sup>

<sup>84</sup> Abgefragt wurden Durchschnittswerte, obwohl der Frachtpreis natürlich abhängig ist von den Streckenkilometern, deren Steigerung proportional zum zulässigen Transportgewicht ist (je niedriger das zGG desto flacher die Steigung der Geraden). Borchering (2007), S. 59f. Vergleich deutscher und finnischer Frachtpreise.

<sup>85</sup> Borchering stellt in seiner Analyse fest: „Die Unternehmensgröße, gemessen in Anzahl der Lkw, hat zwar keinen signifikanten Effekt auf die Gesamtkosten, führt aber bei zunehmender Unternehmensgröße zu höheren Preisen. Eine mögliche Erklärung liegt darin, dass die kleineren Unternehmer in schlechten Zeiten am ehesten Preiszugeständnisse durch (Unternehmer-) Lohnverzicht leisten können, während größere Unternehmer weiter ihre Mitarbeiter entlohnen müssen.“, ebd., S. 195.

**Tabelle 15: Durchschnittlicher Frachterlös pro Tonne im Geschäftsjahr 2013 nach Regionen in Deutschland<sup>86</sup>**

Region	Anzahl Antworten		Mittelwert	
	Euro / Tonne	Euro / Fm o. R.	Euro / Tonne	Euro / Fm o. R.
Ost: BB+ST+MV	6	6	9,63	8,92
Süd-Ost: TH+SN	7	7	9,36	9,89
Süd: BY+BW	17	30	11,71	10,51
West: NW+HE+RP	26	29	11,32	10,78
Nord-West: NI+SH	8	8	13,74	13,78
<b>Summe / Mittel</b>	<b>64</b>	<b>80</b>	<b>11,36</b>	<b>10,76</b>

**Tabelle 16: Durchschnittlicher Frachterlös pro Tonne im Geschäftsjahr 2013 nach Unternehmensgrößenklassen**

Größenklasse	Anzahl Nennungen		Mittelwert	
	Euro / Tonne	Euro / Fm o. R.	Euro / Tonne	Euro / Fm o. R.
Klein	25	37	10,59	10,43
Mittel	28	32	11,29	10,40
Groß	11	11	13,27	12,90
<b>Summe / Mittel</b>	<b>64</b>	<b>80</b>	<b>11,36</b>	<b>10,76</b>

Es wurde den Spediteuren auch die Frage gestellt, welcher Frachtpreis denn zum wirtschaftlichen Betrieb notwendig wäre. Hier war zu erwarten, dass höhere als die in 2013 erzielten Preise genannt werden. So wurden dann auch bei der Bezugsgröße Euro je Festmeter o. R. mit 3,26 Euro ein um 30 % höherer Frachterlös gefordert. Beim Abrechnungsmaß Tonne wurden mit 3,10 Euro ein etwa 27 % höherer Frachterlös gefordert.

### Umsätze

Die Betrachtung der Umsätze je LKW und Jahr in der jeweiligen Größenklasse ergab deutliche Unterschiede zwischen großen und kleinen Unternehmen. Letztere erzielten im Schnitt einen Umsatz pro LKW und Jahr in Höhe von etwa 180.000 Euro – im Gegensatz zu etwa 116.000 Euro Jahresumsatz pro LKW für große Unternehmen (Tabelle 17). Hierbei wurden die Antworten von Unternehmen, deren Kerngeschäft nicht der Holztransport ist, nicht eingeschlossen, da deren (interne) Verrechnung der Transportdienstleistungen von eigenen Fahrzeugen oder der von Tochterfirmen sehr unterschiedlich betrieben werden kann.

<sup>86</sup> Die Regionen wurden nach Unternehmensstandorten gebildet.

**Tabelle 17: Umsatz im Holztransportdienstleistungsbereich pro LKW in 2013 im Mittel unterteilt nach Betriebsgrößen in Euro (Deutschland, ohne Unternehmen der holzbe- und verarbeitenden Industrien)**

Größenklasse	Anzahl Nennungen	Umsatz je LKW / Jahr
Klein	36	179.782 €
Mittel	36	151.373 €
Groß	12	116.223 €
<b>Gesamtergebnis</b>	<b>84</b>	<b>158.527 €</b>

### Maßnahmen zur Vorbeugung von Überladungen

In den Medien wird immer wieder über Holztransportunternehmen berichtet, die das zulässige Gesamtgewicht ihrer Fahrzeuge deutlich überschritten hätten und von den Ordnungsbehörden aufgegriffen wurden. Kienzler stellte auf Grundlage einer Stichprobe im Jahr 1999 bei 295 Touren von Rundholztransporte für Sägewerke ein zulässiges Gesamtgewicht in Höhe von 45,1 Tonnen fest.<sup>87</sup> Er machte jedoch keine Aussage zur möglichen Rechtmäßigkeit der Übergewichte. Denn im Jahr 1999 und 2000 galt in einigen Bundesländern nach Orkanschäden ein höheres zulässiges Gesamtgewicht nach dem Forstschädenausgleichsgesetz.

Grundsätzlich ist es nicht einfach, das Gesamtgewicht der Ladung zu schätzen, da Holz je nach Frische, Feuchtigkeit oder Baumart unterschiedliche Gewichte aufweist. Allerdings ermöglichen moderne LKW bereits heute über unterschiedlichste Messeinrichtungen das zulässige Gesamtgewicht näherungsweise zu schätzen.

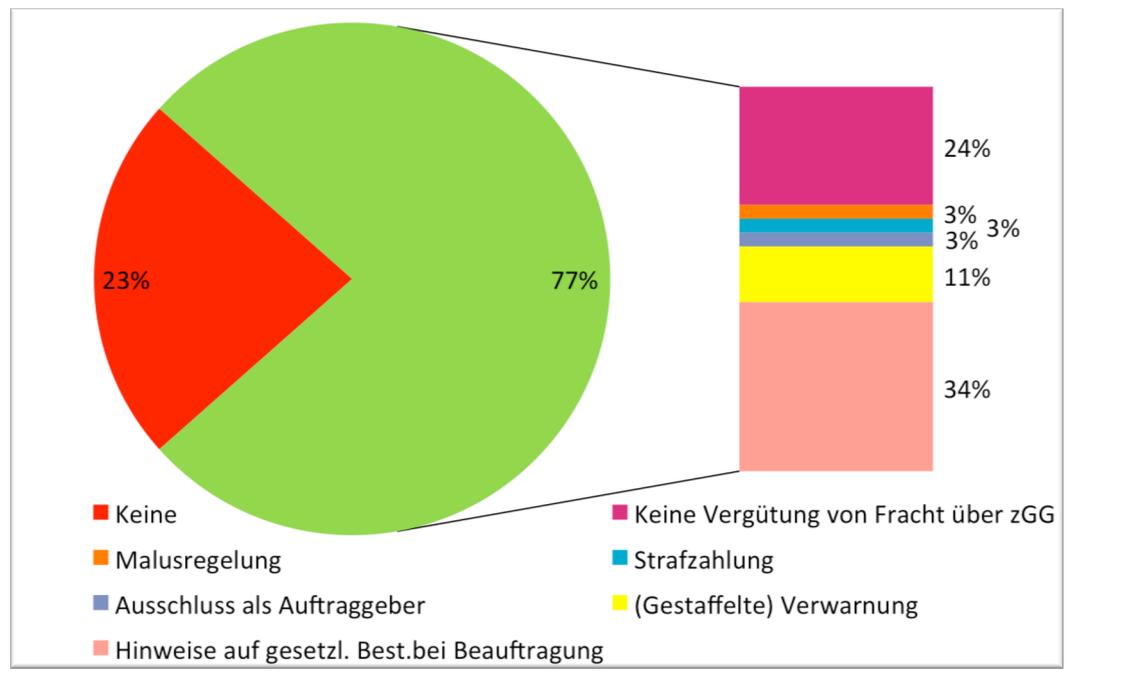
Andererseits sind bedingt durch das hohe Eigengewicht des Fahrzeugs die ladungstechnischen Kapazitäten beim Erreichen des zulässigen Höchstgewichts oft nicht ausgeschöpft.

Nicht selten wird in Medienberichten unterstellt, dass die niedrigen Gewinnmargen die Spediteure dazu verführen, das zulässige Gesamtgewicht zum Zwecke einer höheren Fahrzeugauslastung zu überschreiten.

Zahlreiche Unternehmen der Holzindustrie ahnden nach ihren Möglichkeiten konsequent Überladungen durch die von ihnen beauftragten Holztransporteure. Die Befragung zeigt jedoch, dass mehr als die Hälfte der Auftraggeber entweder überhaupt keine Maßnahmen ergreift oder sich auf das Verbreiten allgemeiner Hinweise beschränkt. Empfindliche Strafmaßnahmen (keine Vergütung über zGG, Malusregelung, Ausschluss als Auftraggeber, Strafzahlung) ergreift demnach nur ein Drittel der Auftraggeber.

<sup>87</sup> Vgl. Kienzler, M. (2000) S. 1

**Abbildung 30: Maßnahmen der Auftraggeber gegen Rechtsverstöße wie Überladungen beim Holztransport**

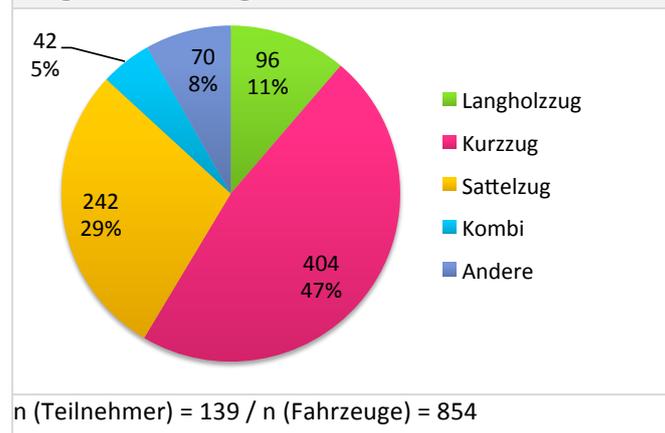


n = 216; Mehrfachantworten möglich

### 3.5.4 Technische Ausstattung des Holztransportgewerbes

Die technische Ausstattung der Fahrzeuge des Holztransportgewerbes ist eine wichtige Größe. Sie beschreibt das Fahrzeugkollektiv und gibt Auskunft über die technische Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge, ihre Fähigkeit verschiedene Gewichte und Sortimente zu fahren oder Informationen über das Gewicht zu ermitteln. Maßnahmen zur Effizienzsteigerung und strukturellen Veränderung des Holztransportgewerbes müssen die technischen Fähigkeiten des bestehenden Fuhrparks berücksichtigen. Tiefgreifende Veränderungen in den betrieblichen Strukturen können hohe Kosten nach sich ziehen. Insgesamt wurden mit der Umfrage die technischen Spezifikationen von 854 Rundholztransportern erfasst. Den größten Anteil machten dabei Kurzholzzüge mit etwa 47 Prozent aus (Abbildung 31).<sup>88</sup> Eine Schwierigkeit bei der Befragung stellt die Tatsache dar, dass bei der Vielzahl von Fahrzeugen keine detaillierte Einzelabfrage zu technischen Aspekten gestellt werden konnte. Wurden die Fahrzeugtypen noch genau erfasst, konnten bei PS, Kilometerstand und Assistenzsystemen nur Durchschnittswerte des gesamten Fuhrparks abgefragt werden.

<sup>88</sup> Der Wert scheint beständig zu sei. Schon 1988 wurde ein Anteil von 47 % Kurzholz LKWs ermittelt. Borchering, M. (2007). Bei Langholz und Sattelzügen weichen die Werte deutlicher ab: 32,4 % bzw. 17,6%.

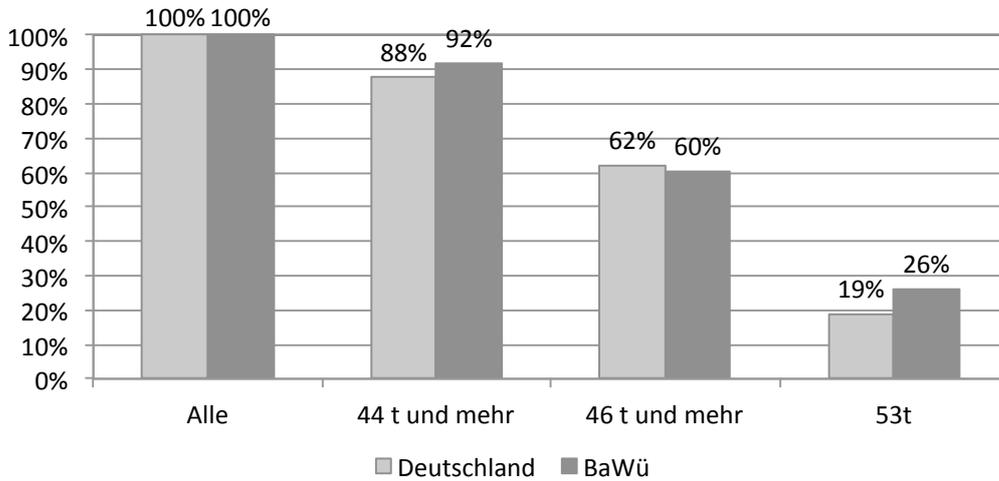
**Abbildung 31: Prozentuale Verteilung der Fahrzeug- und Anhängerarten in Deutschland**

### Technisch zulässiges Gesamtgewicht der Fahrzeuge

Abbildung 32 zeigt die Aufteilung des bestehenden Fuhrparks nach technisch zulässigen Gesamtgewichten. Trotz des zulässigen Höchstgesamtgewichts von 40 Tonnen in Deutschland, können viele Fahrzeuge technisch auch höhere Gewichte fahren. Dies liegt einerseits an den gelegentlich anfallenden zeitlich befristeten Sondergenehmigungen zum Abtransport von Kalamitätsholz, andererseits an der Exportausrichtung vieler Fahrzeughersteller, die ihre baugleichen Fahrzeuge auch in Länder exportieren, in denen höhere Gewichte gefahren werden dürfen. Abbildung 32 zeigt, dass noch über 60 % der Fahrzeuge in der Lage sind, Gewichte von bis zu 46 t fahren zu können. Dies entspricht der letzten Sondergenehmigung, die nach der Sturmkalamität, die im Jahr 2008 bedingt durch den Orkan „Kyrill“ in Baden-Württemberg erteilt wurde. 26 % der Fahrzeuge im Land sind sogar in der Lage, ohne technische Umbauten ein Gesamtgewicht von 53 t zu transportieren.

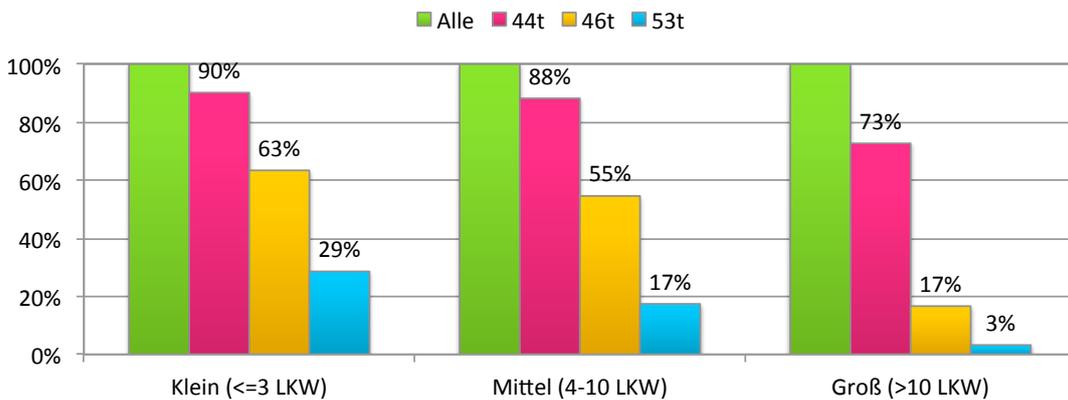
Abbildung 33 zeigt die Verteilung der möglichen Gesamtgewichte innerhalb der verschiedenen Unternehmensgrößenklassen. Die prozentuale Verteilung der technisch möglichen Gesamtgewichte in den Klassen zeigt, dass der Anteil der Fahrzeuge, die technisch für ein Gesamtgewicht von mehr als 44t ausgestattet sind, bei den kleineren Betrieben am höchsten ist. Ein Grund für das geringere technische Gesamtgewicht ist hier möglicherweise der Einsatz von Fahrzeugen mit Leichtbauweise, die jedoch höhere Investitionskosten beinhalten. Sie können zwar im Falle einer Sondergenehmigung keine hohen Gesamtgewichte tragen, kompensieren dies aber mit einem höheren regulären Ladungsgewicht. Dagegen sind bei kleinen Betrieben in Deutschland 29 % der Fahrzeuge in der Lage, sogar Gewichte bis 53 Tonnen zu fahren. Von den in Baden-Württemberg fahrenden kleinen Unternehmen sind insgesamt 69 Prozent der Fahrzeuge technisch für zulässige Gesamtgewichte bis 46t ausgelegt (nicht abgebildet).

**Abbildung 32: Akkumulierter, prozentualer Anteil der Fahrzeuge in Deutschland und Baden-Württemberg, die technisch für ein bestimmtes zulässiges Gesamtgewicht ausgestattet sind.**



n (Deutschland) = 139, n (Fahrzeuge, Deutschland) = 854 / n (BW) = 45, n (Fahrzeuge BW) = 260

**Abbildung 33 Akkumulierter, prozentualer Anteil der Fahrzeuge je Unternehmensgrößenklasse, die technisch für ein bestimmtes zulässiges Gesamtgewicht ausgestattet sind**

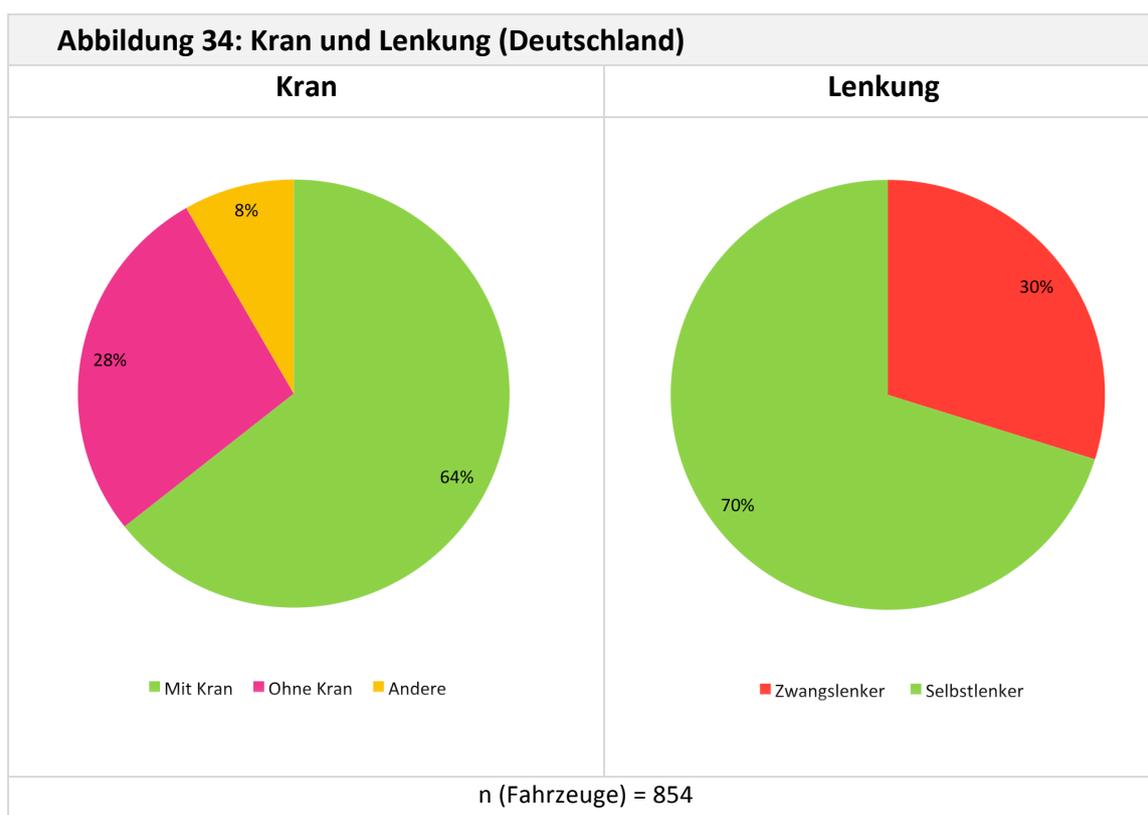


n (Deutschland) = 139, n (Fahrzeuge, Deutschland) = 854 / n (BW) = 45, n (Fahrzeuge BW) = 260

### Technische Details zu den Transportfahrzeugen

Abbildung 34 zeigt, dass knapp zwei Drittel der Holztransportfahrzeuge über einen eigenen Verladekran verfügen. Mit diesem werden die im Wald geschichteten Polter auf den LKW verladen. Die aufwändigere Alternative stellen eigene im Wald verfügbare mobile Verladekräne dar, die die Rundholztransporter beladen. Ein angebrachter Kran hat meist mehrere Tonnen Gewicht, die zur deutlichen Erhöhung des Gesamtgewichts beitragen, das mögliche Ladungsgewicht aber deutlich schmälern.<sup>89</sup> Nach der Prognose von Borchering<sup>90</sup> 2007 ist die Variante des LKW mit Kran 2014 nach wie vor dominierend. Daneben hat sich deutschlandweit aber die Variante des LKW ohne Kran mit fast 28 % etabliert. Borchering selbst konnte nur bei ca. 4 % der von ihm erfassten Fahrzeuge keinen eigenen Kran bestimmen.<sup>91</sup>

Weiterhin macht die Umfrage deutlich, dass ein Großteil (70%) der Langholztransporter und Kombizüge über eine Selbstlenkachse verfügen.



Mutmaßlich verfügt etwa ein Viertel der untersuchten Fahrzeuge über kein System zur elektronischen Gewichtsermittlung (Abbildung 35). Eine Gewichtserfassung im Kran ermöglicht es schon beim Beladen das Ladungsgewicht abzuschätzen. Moderne Systeme liefern aber auch über die an der Federung gemessenen Daten aktuelle Werte an den Kransitz. Faktisch erfassen und speichern somit bereits heute 75 % der von der Umfrage erfassten Fahrzeuge das Gewicht auf elektronische Weise. Diese Daten können auch nachträglich ausgelesen werden, um etwa Verstöße gegen die Einhaltung des zulässigen Gesamtgewichts feststellen zu können. In diesen Fällen ist nicht nur eine Strafe zu entrichten, es findet auch in Abhängigkeit der gemessenen Überladung eine „Gewinnabschöpfung“ statt, in der das mit der Überladung erwirtschaftete Geld eingezogen wird. Über einen längeren Zeitraum können selbst bei leichten Überladungen

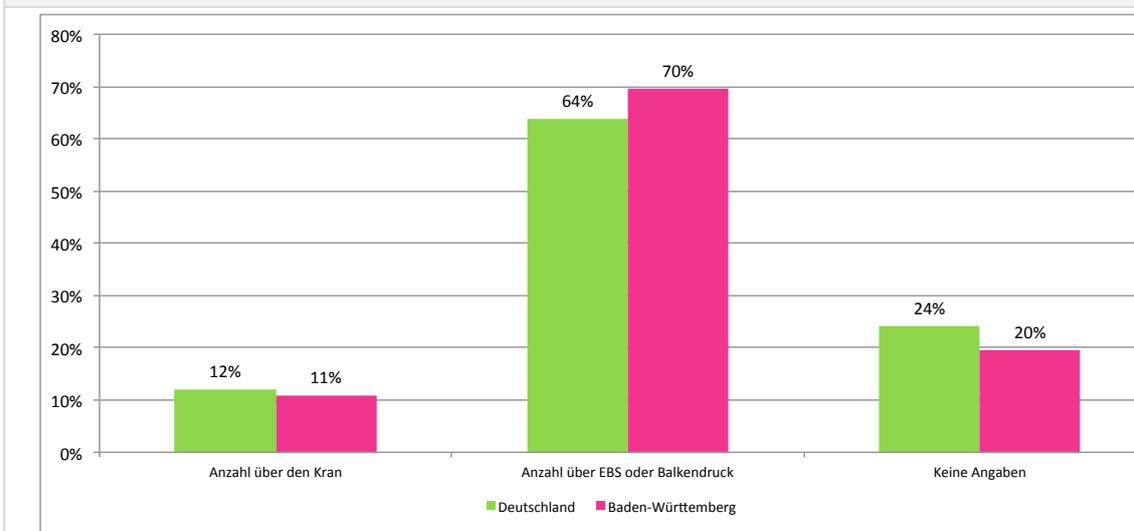
<sup>89</sup> Zu den Vorteilen des Ladekrans vgl. Borchering, 2007, S. 23ff.

<sup>90</sup> Ebd. S. 28.

<sup>91</sup> Ebd. S. 88. 11 von 261 Fahrzeugen ohne Kran.

von 5-10 % (42 t – 44 t) Strafzahlungen verhängt werden, die für die Frachtbetriebe hohe Ausmaße annehmen können. Es ist zu erwarten, dass mit der steigenden Datenerhebung im Fahrzeugbereich auch das Auslesen und Bewerten dieser Daten zunehmend leichter und in umfangreicherem Maße stattfinden wird.

**Abbildung 35: Prozentualer Anteil der Gewichtserhebungssysteme (Deutschland)**



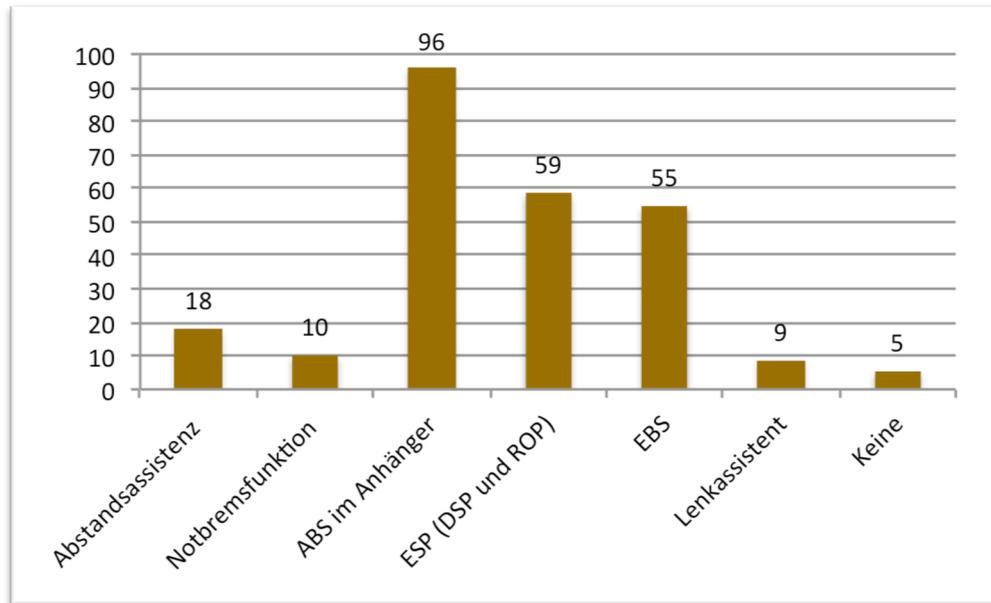
n = 141

Tabelle 18 zeigt verschiedene abgefragte technische Kennzeichen der erfassten Transportfahrzeuge. Kleine Betriebe nutzen ihre Fahrzeuge demnach länger und sind im Schnitt ein halbes Jahr älter als im Durchschnitt. Anhänger verfügen über keine komplexe Technik und werden in der Regel deutlich länger eingesetzt als die Zugmaschinen.

**Tabelle 18: Technische Kennzahlen (Deutschland)**

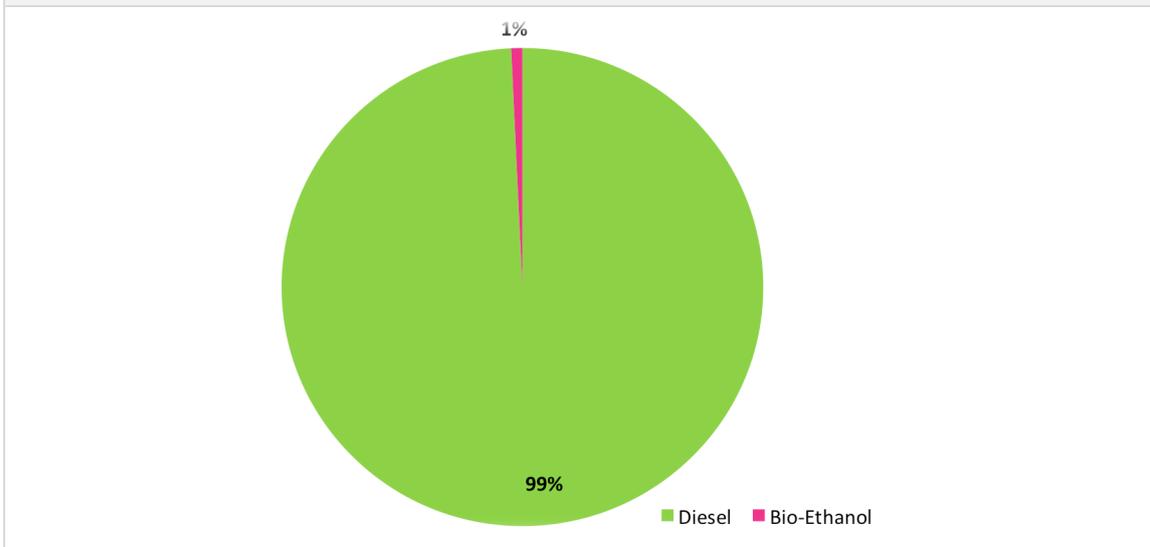
Kenndaten	MW
Antriebsleistung der Zugmaschine (in PS)	499
Antriebsleistung der Zugmaschine (in PS), (Größenklasse „klein“)	517
Mittelwert Kilometerstand (Sattelzug in km)	307.418
Mittelwert Kilometerstand (Gliederzug in km)	330.960
Mittelwert Alter Zugmaschine (Jahre)	4,2
Mittelwert Alter Zugmaschine (Jahre), kleiner Frachtbetrieb	4,6
Mittelwert Alter Anhänger (Jahre)	6,2
Mittelwert Alter Anhänger (Jahre), kleiner Frachtbetrieb	6,7
Anteil luftfederter Transportzüge (Prozent)	77
Anteil blattfederter Transportzüge (Prozent)	23

Stichprobenumfang n (Teilnehmer)= 139, n (Fahrzeuge) =854

**Abbildung 36: Prozentuale Verbreitung der Nutzung von Assistenzsystemen (Deutschland)**

n = 128

Bezüglich der genutzten Assistenzsysteme zeigt sich, dass die Nutzung hier generell nicht weit verbreitet ist. Vorhandene Systeme beschränken sich meist auf Optimierungen der Fahr- und Bremsdynamik der Fahrzeuge.

**Abbildung 37: Prozentuale Verbreitung der Nutzung verschiedener Kraftstoffe (Deutschland)**

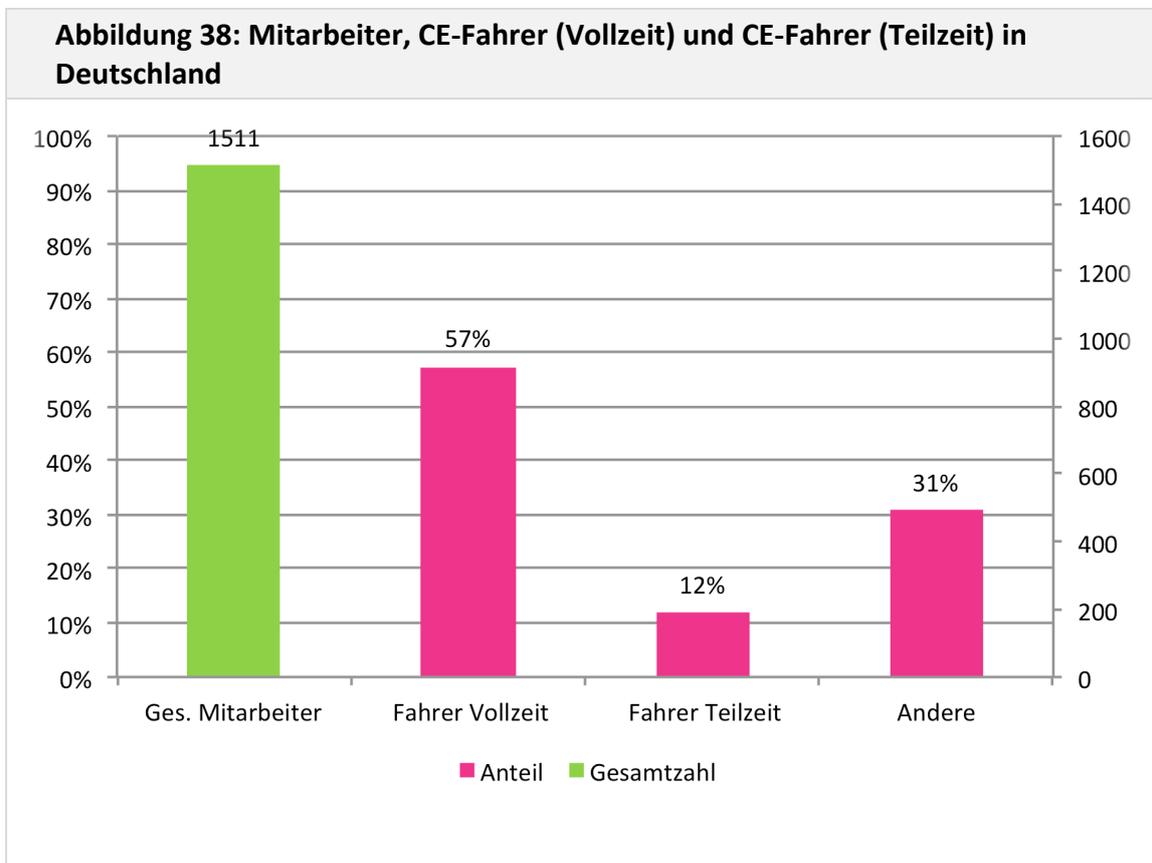
n = 134

Für die ebenfalls abgefragte Nutzung von BtL-Kraftstoff (SunDiesel), Erdgas und Wasserstoff (Abbildung 37) fand sich kein einziges Fahrzeug.

### 3.5.5 Zukunftsfähigkeit des Holztransportgewerbes

Die Fragen rund um das Thema Zukunftsfähigkeit erforschen nicht nur die innerbetrieblichen Strukturen, die in Summe einen Einblick in die wirtschaftliche und personelle Struktur der Branche geben, sondern fragen die Frächter auch nach ihren persönlichen Einschätzung der Entwicklung der Gesamtbranche in den nächsten Jahren mit ihren Chancen und Risiken.

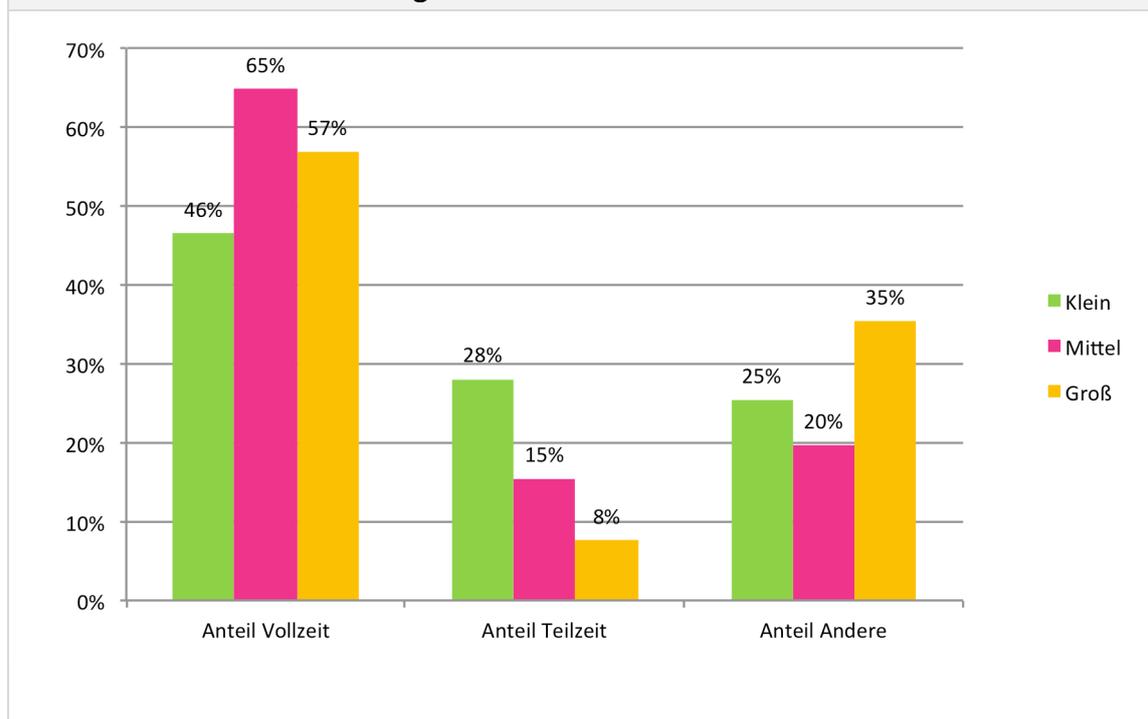
#### Personelle Zukunftsfähigkeit des Holztransportgewerbes



n = 118

Abbildung 38 zeigt die absolute Anzahl der erfassten Mitarbeiter und die Verteilung der Fahrer, die über einen CE-Führerschein verfügen, in Vollzeit und Teilzeitkräfte. Die Mitarbeiter der Unternehmen der Säge-, Papier- und Holzwerkstoffindustrie wurden dabei nicht mit bewertet. In Baden-Württemberg wurden 422 Mitarbeiter erfasst. Der Anteil der Teilzeitfahrer liegt dort mit 21 % etwas höher als im Bundesdurchschnitt. Die Grafik zeigt, dass fast jeder dritte Mitarbeiter eines Transportunternehmens nicht als Fahrer beschäftigt wird. Hier dominieren die großen Betriebe, die wahrscheinlich ihren höheren Verwaltungsaufwand mit dem entsprechenden Personal bewältigen müssen (Abbildung 39). Der Anteil von Teilzeitfahrern ist bei den kleinen Betrieben am größten. Sie können so theoretisch flexibler auf Veränderungen in der Auftragslage reagieren.

**Abbildung 39: Mitarbeiter, CE-Fahrer (Vollzeit) und CE-Fahrer (Teilzeit) in Deutschland nach Betriebsgrößen**

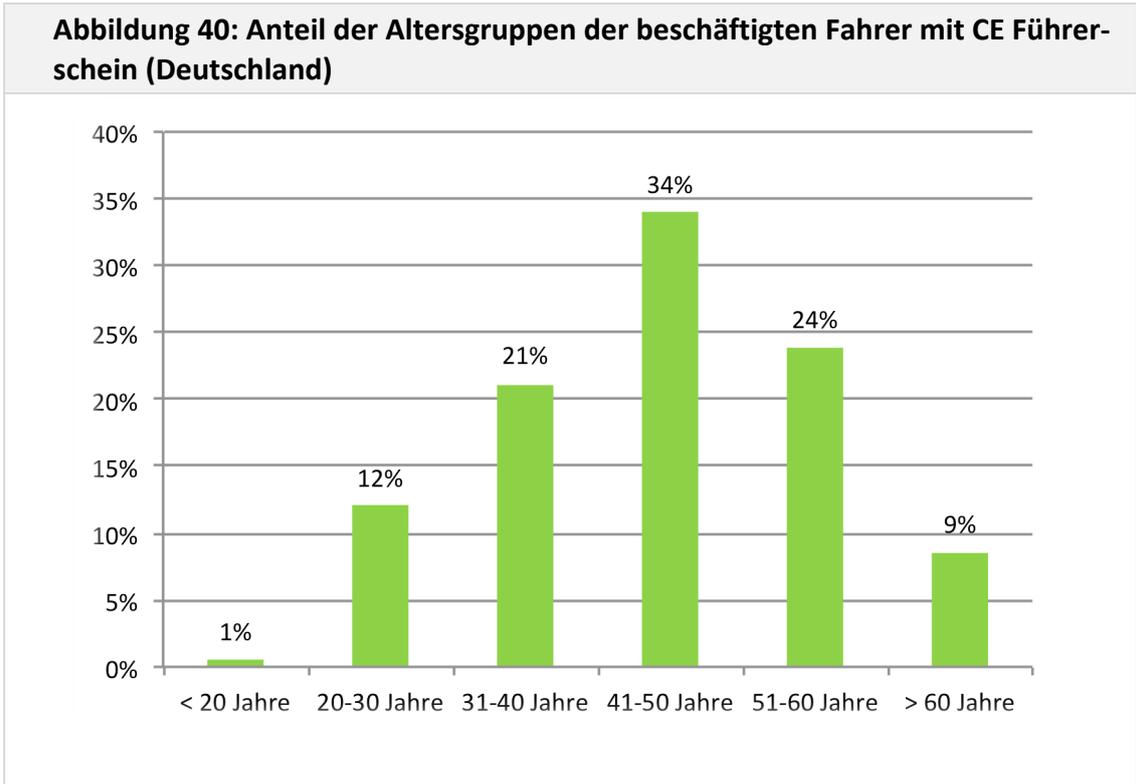


n = 118

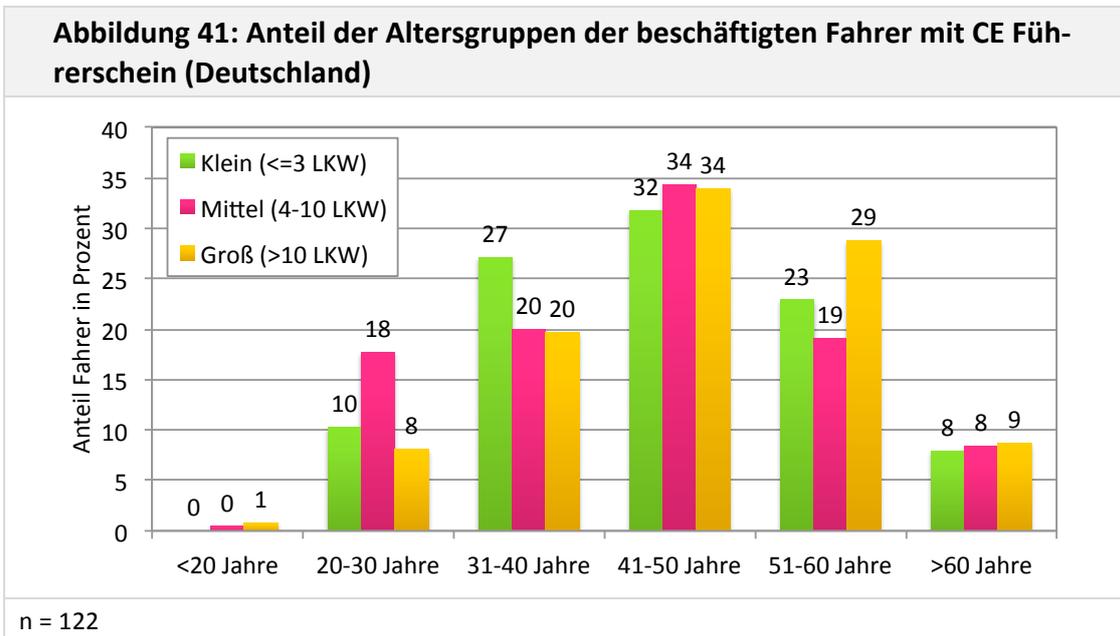
In der Altersstruktur zeigt sich eine schwierige Entwicklung (Abbildung 40). Zwei Drittel der erfassten Fahrer waren über 40 Jahre alt.<sup>92</sup> Dies ist insofern problematisch, als dass nach Expertenmeinung nur rund jeder zweite Fahrer über 50 in die nächsthöhere Alterskategorie wechselt. Grund dafür sei vor allem die hohe körperliche Belastung des Berufs. Gleichzeitig finden sich in der Kategorie der 20 – 30jährigen nur 12 % der Fahrer vertreten. Dies spricht für die Richtigkeit der im freien Kommentarbereich der Umfrage geäußerten Meinungen, die Branche habe eine schlechte Attraktivität, die Arbeit sei für potenzielle Nachwuchskräfte zu hart und das Auskommen zu gering. Entscheidend ist, dass diese Entwicklung in gleicher Weise in den verschiedenen Unternehmensgrößenklasse zu beobachten ist (Abbildung 41). Ein weiterer negativer Faktor ist das Wegfallen der allgemeinen Wehrpflicht. Im Rahmen des Wehrdienstes konnte der CE-Führerschein oft kostenlos erworben werden. So müssen von Nachwuchsfahrern dafür nun oft mehrere tausend Euro investiert werden. Die Altersstruktur in Baden-Württemberg entspricht weitestgehend dem Bundesdurchschnitt.

Auch die innerbetriebliche Ausbildung von neuen Fahrern scheint nicht als Möglichkeit genutzt zu werden, um dem zu erwartenden Mangel zu begegnen: Nur 10 % der befragten Betriebe gab an, überhaupt auszubilden. In der Umfrage konnten für ganz Deutschland nur sechs Auszubildende zum Berufskraftfahrer ermittelt werden.

<sup>92</sup> Diese Anteile decken sich mit der Untersuchung von EGGGER. Vgl. Witte, C. (2013).



n = 122



n = 122

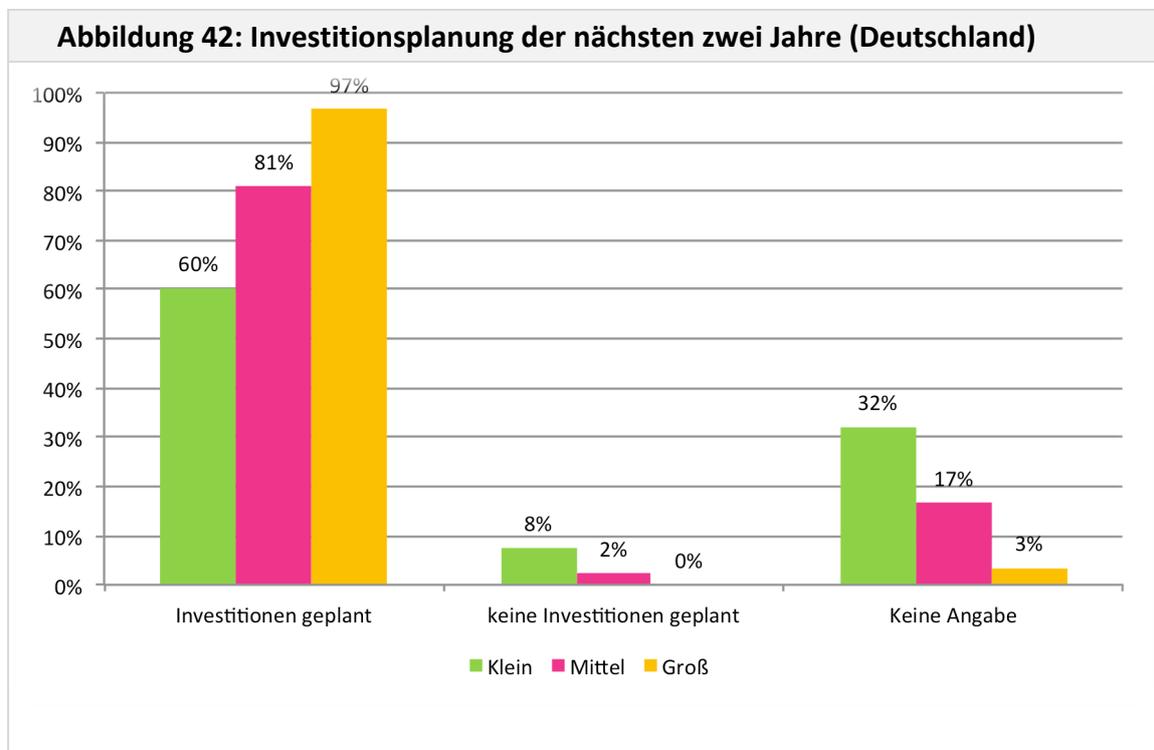
**Wirtschaftliche Zukunftsfähigkeit**

Die wirtschaftliche Zukunftsfähigkeit eines Unternehmens ermittelt sich aus seiner Fähigkeit, kontinuierlich in den eigenen Betrieb zu investieren. Bei der Frage nach den in den nächsten zwei Jahren geplanten Investitionen zeigte sich die Holztransportbranche durchaus investitionswillig (**Abbildung 42**). Zurückhaltung findet sich vor allem bei den kleinen Betrieben, wobei zu diesen sensiblen Daten etwa ein Drittel der Kleinbetriebe keine Auskunft geben mochte. Der relativ geringe Wert ergibt sich aber auch aus der Unternehmensstruktur. Weniger LKW bedeuten auch weniger Gesamtinvestitionen, die insgesamt auch seltener erfolgen müssen.

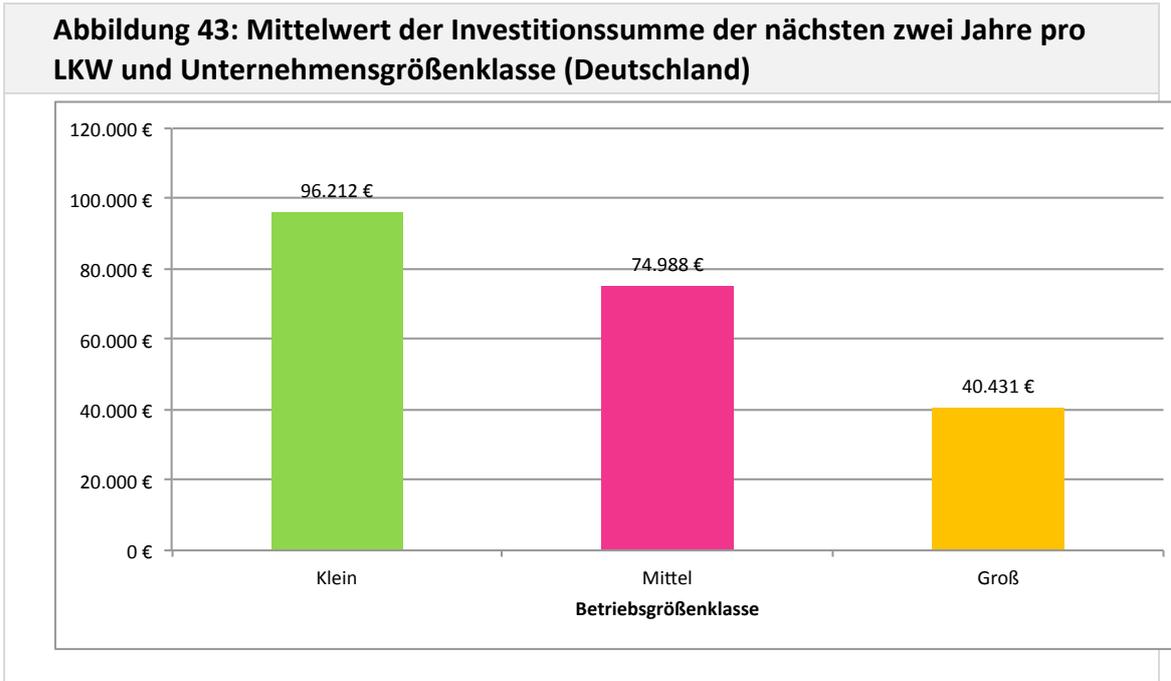
Auch aus diesem Grund steigt mit der Betriebsgröße auch der Wille bzw. die Notwendigkeit regelmäßiger Investitionen. Außerdem bedeutet die von großen Betrieben jährlich gefahrene höhere Kilometerzahl auch eine höhere Abnutzung des Fahrzeugs insgesamt.

Da bei kleineren Betrieben das Betriebsvermögen im Wesentlichen aus den Fahrzeugen besteht, konzentriert sich die Investitionstätigkeit bei diesen auch besonders auf die Fahrzeuge. Bei der Umrechnung der durchschnittlichen Investitionen pro LKW weisen deshalb die kleinen Betriebe im Mittelwert etwa 58 % höhere geplante Investitionen pro Fahrzeug aus als Großbetriebe.

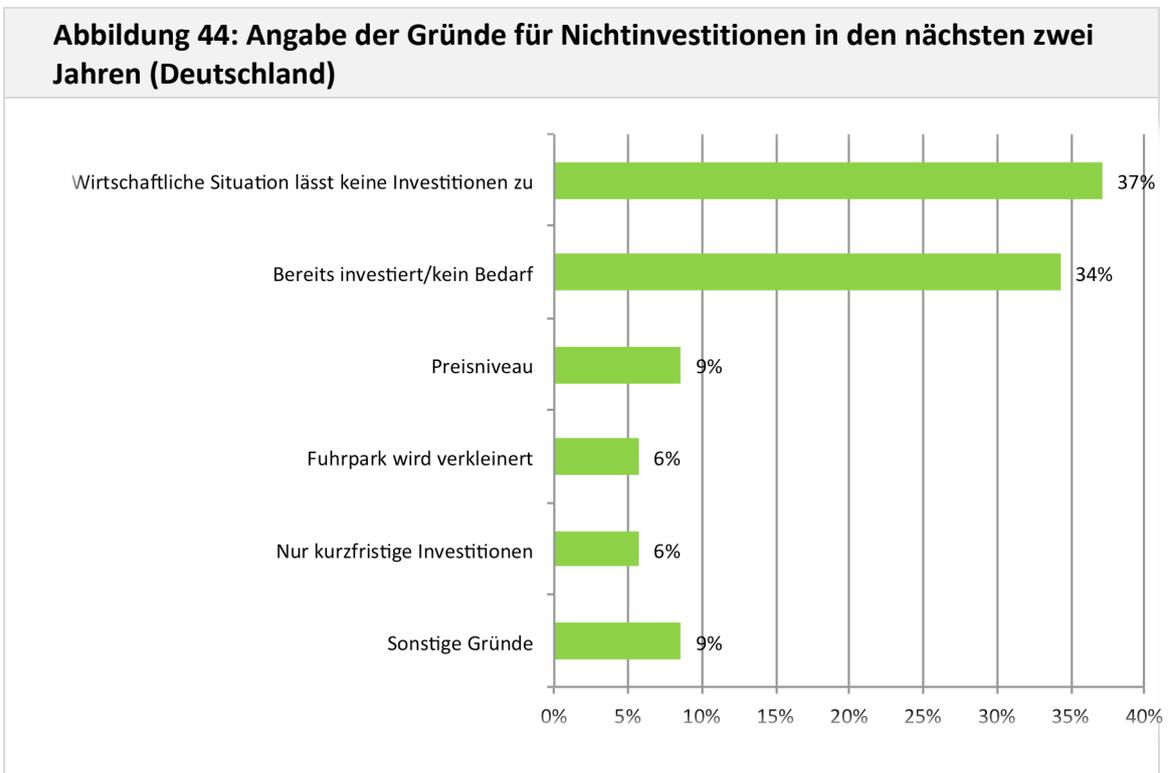
Die Unternehmen, die keine Investitionen planten, wurden gefragt, warum dies so sei. Etwas mehr als ein Drittel der betroffenen Unternehmen gab wirtschaftliche Schwierigkeiten als Hauptgrund an (Abbildung 44). Von diesen waren etwa 70 % kleine Frachtbetriebe. Die Stichprobenzahl ist für eine allgemeine Aussagekraft aber gering (35 nichtinvestierende Unternehmen). Bei der Frage, in welchem Bereich investiert werde, waren Mehrfachantworten möglich. (Abbildung 45). Hier zeigt sich eine klare Vorreiterstellung der Investitionen in den Fuhrpark (Zugmaschinen, Anhänger, Kräne). Investitionen in Assistenzsysteme als Nachrüstsatz wurden hingegen nur von 2 % der Befragten angegeben. Etwa ein Fünftel der Befragten gab an, in den nächsten Jahren im Bereich Navigationstechnologie oder NavLog Waldwegedatensatz investieren zu wollen. Für Software zur Tourenplanung und Routenoptimierung interessierten sich 8 %.



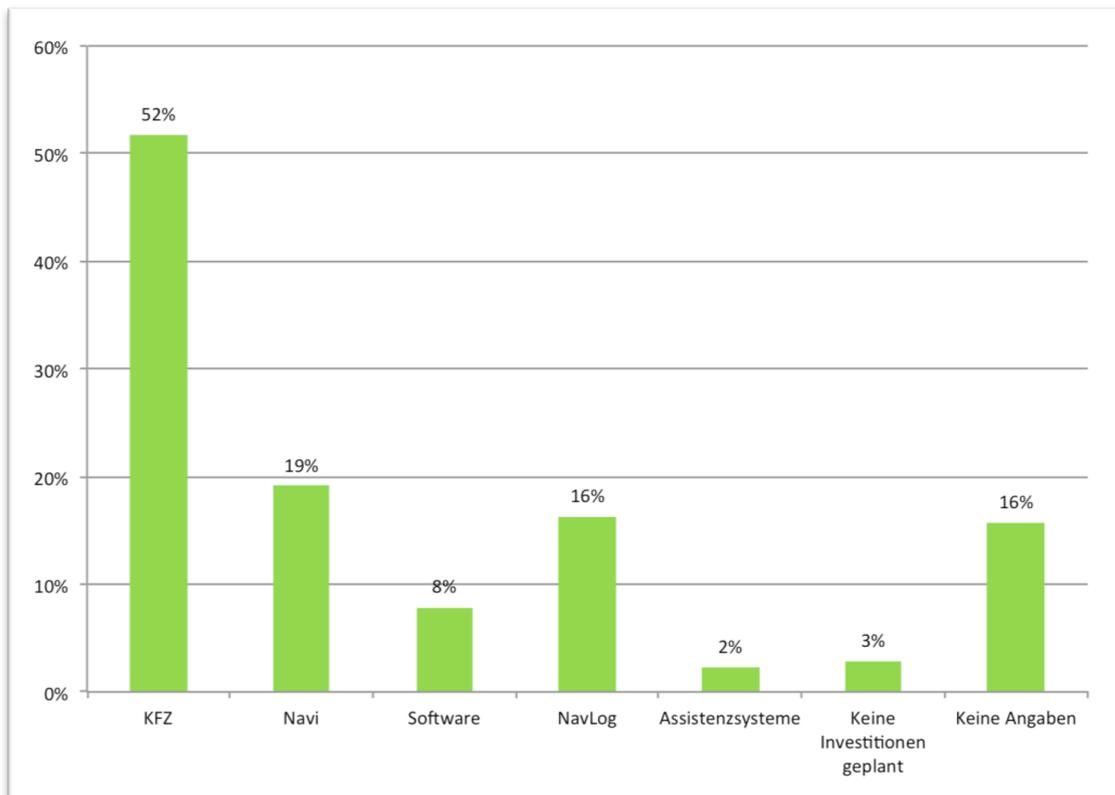
n = 103



n = 103



n = 35

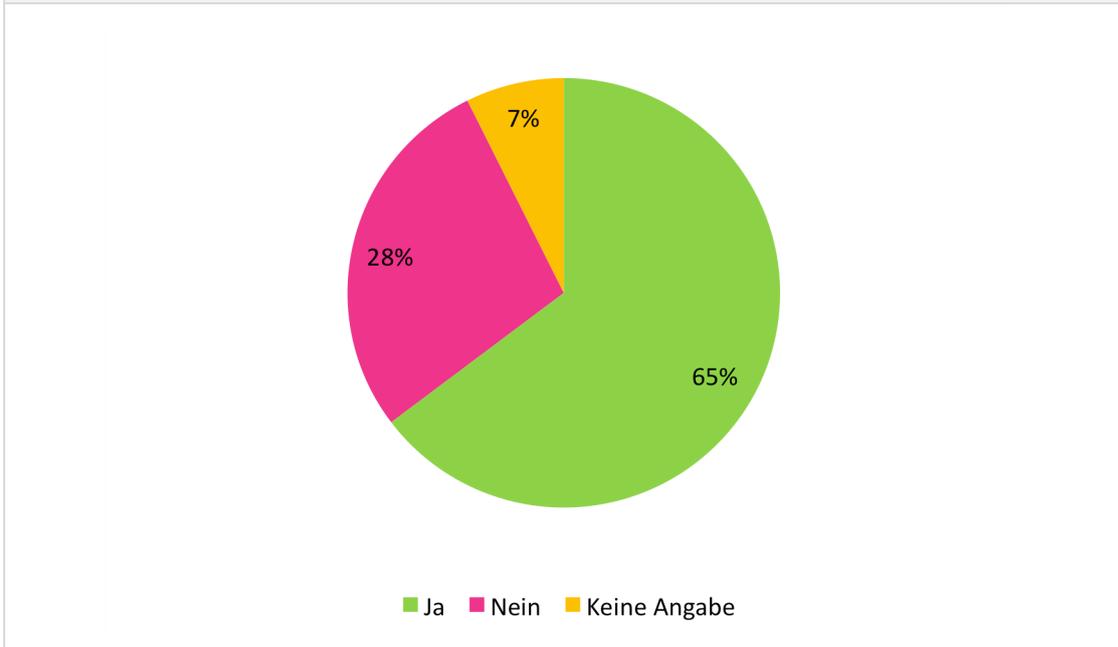
**Abbildung 45: In den nächsten zwei Jahren geplante Investitionen nach Investitionsbereichen (Deutschland)**

n (Teilnehmer) = 94, n (Antworten) = 178

### Chancen und Risiken

Die Untersuchung der Alters- und Ausbildungsstrukturen der befragten Betriebe lässt bereits auf Schwierigkeiten in der Nachwuchsarbeit schließen (s.o.). Direkt nach Schwierigkeiten gefragt, gaben fast zwei Drittel der Unternehmen an, Probleme in der Gewinnung neuer Mitarbeiter zu haben. Die Kategorien „Ja/eher ja“ und „nein/eher nein“ wurden dabei zusammengefasst. In Baden-Württemberg sind die Schwierigkeiten geringfügig höher als im Bundesdurchschnitt (Ja: 71 %).

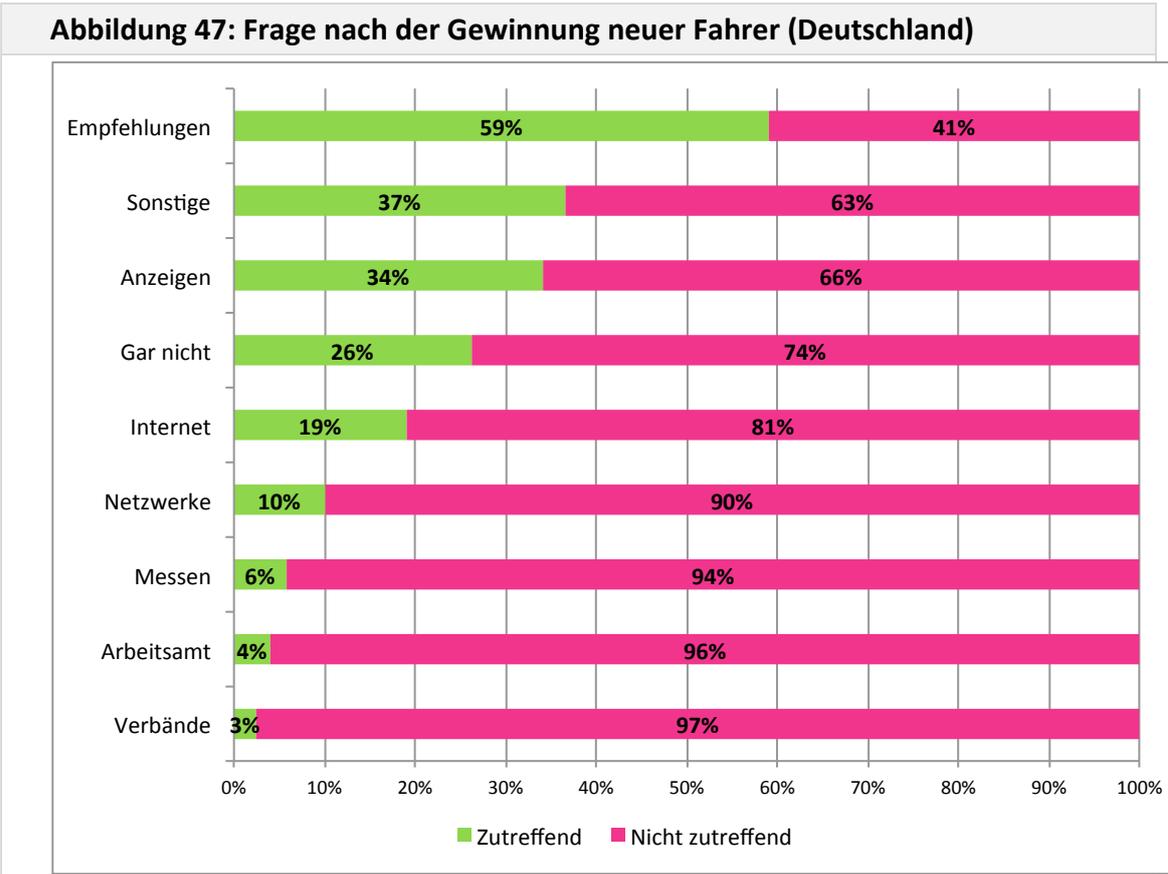
Kleine Unternehmen scheinen insgesamt leichte Vorteile zu haben. Während 76 % der Großbetriebe angeben Schwierigkeiten zu haben, sind es bei kleinen Unternehmen nur 58 %. Letztlich benötigen Kleinunternehmen aber auch schlicht weniger Personal für den Betrieb.

**Abbildung 46: Frage nach Schwierigkeiten Fahrer oder Mitarbeiter zu gewinnen (Deutschland)**

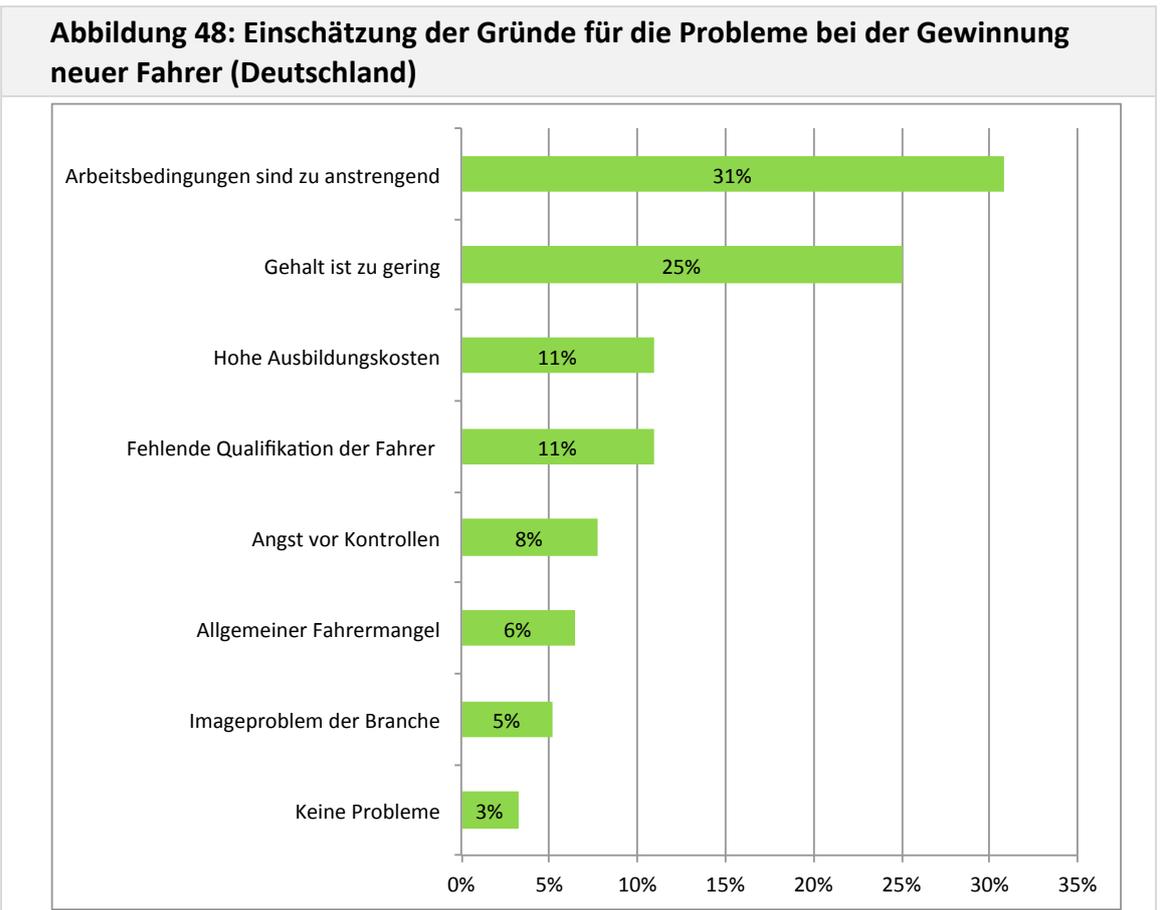
n = 139

Da die Ausbildung im Betrieb offenbar kaum als Möglichkeit genutzt wird, neue Mitarbeiter zu gewinnen, lohnt sich die Frage nach der Strategie der Unternehmen, Nachwuchskräfte zu gewinnen. Die Antwortkategorien „sehr zutreffend“ und „zutreffend“ sowie „weniger zutreffend“ und „nicht zutreffend“ wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit zusammengefasst (Abbildung 46). Mit 59 % wird die Kategorie „Empfehlungen“ als noch am ehesten geeignete Möglichkeit gesehen, neue Fahrer für sein Unternehmen zu gewinnen. Eine Nutzung der gerade für die Gewinnung junger Interessenten wichtigen Medien wie Internet oder Jobmessen gaben gerade einmal 25 % bzw. 6 % der Befragten an. Nur 3 % meldeten, die Unterstützung eines Verbandes zu nutzen; mehr als ein Viertel ist gar nicht auf der Suche nach neuen Mitarbeitern. Die Holztransportbranche scheint nicht für die Herausforderungen des demographischen Wandels gewappnet und zeigt wenig Bemühungen, sich dem Wettbewerb um die besten Arbeitskräfte zu stellen.

Bei der Frage nach den Gründen der Probleme der Fahrgewinnung waren harte Arbeitsbedingungen und schlechte Verdienstmöglichkeiten die am häufigsten genannten Ursachen (Abbildung 48).



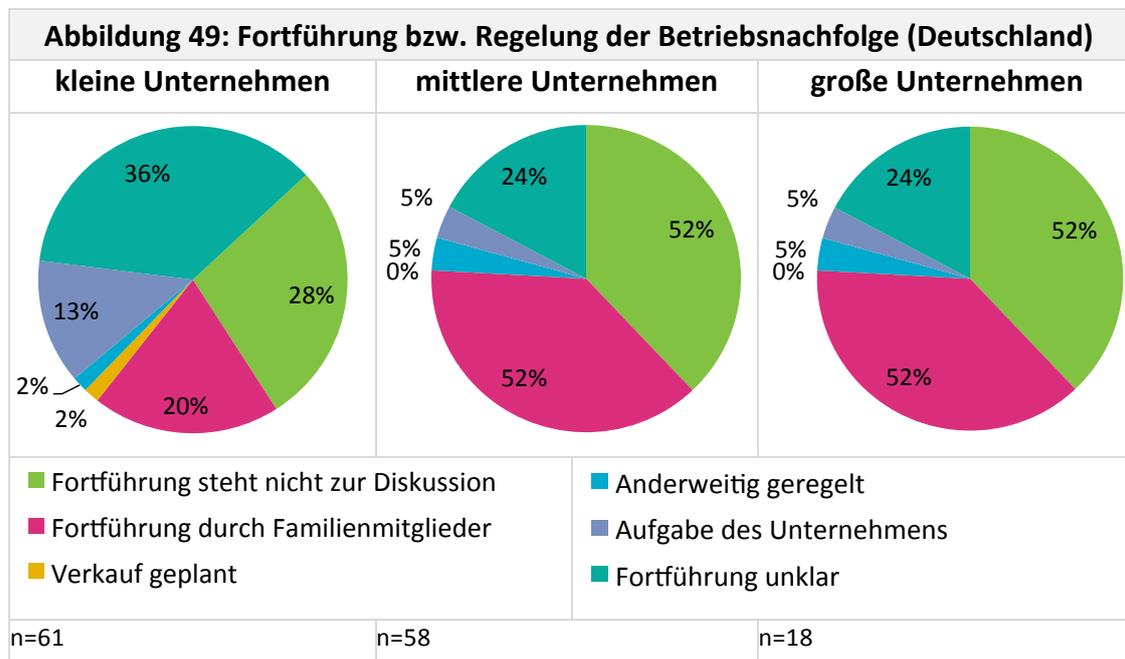
n = ja nach Frage 90-122



n = 156 (Mehrfachantworten möglich)

## Wettbewerbsfähigkeit und Zukunftschancen

Gerade für viele kleine Betriebe hängt die Zukunftsfähigkeit an der Möglichkeit der Organisation einer Unternehmensnachfolge. Für Betriebsbesitzer, die oft selbst als Fahrer tätig sind, gilt die Frage der Problematik der Fahrergewinnung (Abbildung 49) auch für die potenzielle Unternehmensnachfolge. Die Grafik zeigt, dass gerade die kleinen Unternehmen, die häufig als Familienbetrieb geführt werden, den geringsten Anteil an einer geplanten Weiterführung (Fortführung durch Familienmitglieder, Verkauf, Anderweitig geregelt) in der Familie aufweisen. Da besonders in diesen die Unternehmenseigner selbst als Fahrer arbeiten, schlägt hier die mangelnde Attraktivität des Berufes durch und hat einen negativen Einfluss auf die nachfolgende Generation. Anders zeigt sich die Situation in größeren Betrieben: Hier scheint die Nachfolgeregelung planvoller zu erfolgen. Auffallend ist, dass über alle Unternehmensklassen hinweg ein relativ großer Anteil der Antwortenden unklare Verhältnisse vorfindet. Hierbei muss aber auch berücksichtigt werden, dass bei der Umfrage auch Fragebögen von angestellten Fahrern ausgefüllt wurden, die keinen Einblick in das Betriebsmanagement bzw. die Nachfolgestrukturen haben. Ebenfalls auffallend ist der bei den kleinen Unternehmen relativ große Anteil an geplanten Unternehmensaufgaben (13 %).



## Risikoeinschätzungen

Im Rahmen der Umfrage wurden zehn Themenfelder nach ihrer jeweiligen Risikobehaftung für das eigene Unternehmen abgefragt (Abbildung 50). Vor allem finanzielle Risiken wurden als zukunftsbedrohend eingeschätzt, darunter Fracht-, Treibstoff- und Mautpreise; neben der Einnahmenseite also die klassischen „Nebenkosten“ des LKW-Frachtgewerbes. Die Treibstoffkosten wurden im Sommer 2014 abgefragt, also am Ende einer langen Phase hoher Dieselpreise. Nachdem der Durchschnittspreis seither von 135,05 ct/Liter auf 117,66 ct/Liter<sup>93</sup> gefallen ist, entspricht die Risikoaussage zwar nicht mehr der akuten Sachlage; trotzdem kann die unsichere und sprunghafte Entwicklung der Kraftstoffpreise als potentiell bedrohlicher Faktor be-

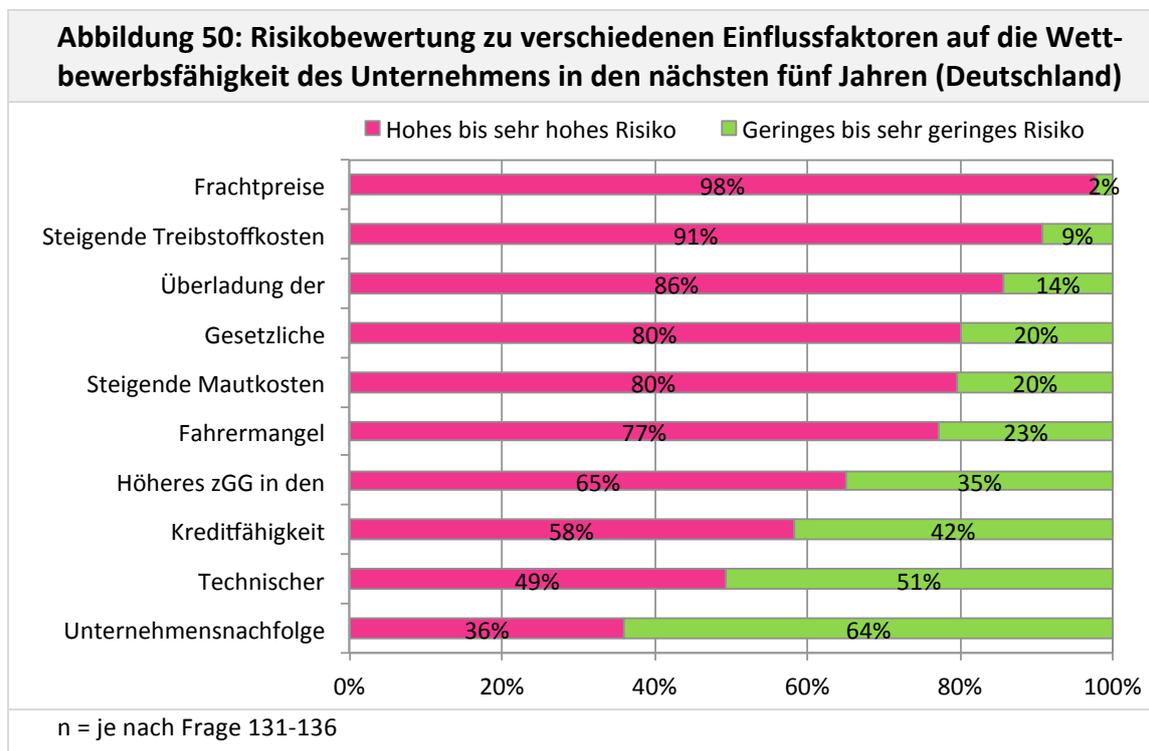
<sup>93</sup> Quelle: Statista.com (<http://de.statista.com/statistik/daten/studie/779/umfrage/durchschnittspreis-fuer-dieselmotoren-seit-dem-jahr-1950/>), abgerufen am 15.5.2015.

stehen bleiben. Einige Unternehmen setzen deshalb auf langfristige Verträge, die den Dieselpreis mit einem Faktor zum Vertragsgegenstand des Frachtvertrags werden lassen (Dieselgleitpreisklausel Abbildung 51).

80 % der Befragten gaben an, die gesetzlichen Rahmenbedingungen im Holztransportgewerbe würden ein Risiko darstellen. Hier fanden in der jüngeren Vergangenheit bereits deutliche Eingriffe statt, so 2006 der digitale Tachograph und die Mautpflicht auf deutschen Autobahnen, 2009 das Berufskraftfahrerqualifikationsgesetz mit regelmäßiger Weiterbildungspflicht oder 2011 die Zugangseinschränkungen im Rahmen der nationalen Umsetzung des EU Road Package.<sup>94</sup> Die Verschärfung der Arbeitsbedingungen durch privatwirtschaftlichen Druck etwa im Zertifizierungsbereich (RAL, ICELT) kommt da noch dazu.

Von drei Viertel der Befragten wird zudem der Fahrermangel als existenzbedrohendes Risiko angesehen. Beim Thema Überladungen fürchtet man eher den unlauteren Wettbewerb im eigenen Land als die Konkurrenz im Ausland, die nicht unmittelbar in den Wettbewerb mit deutschen Transportunternehmen tritt.

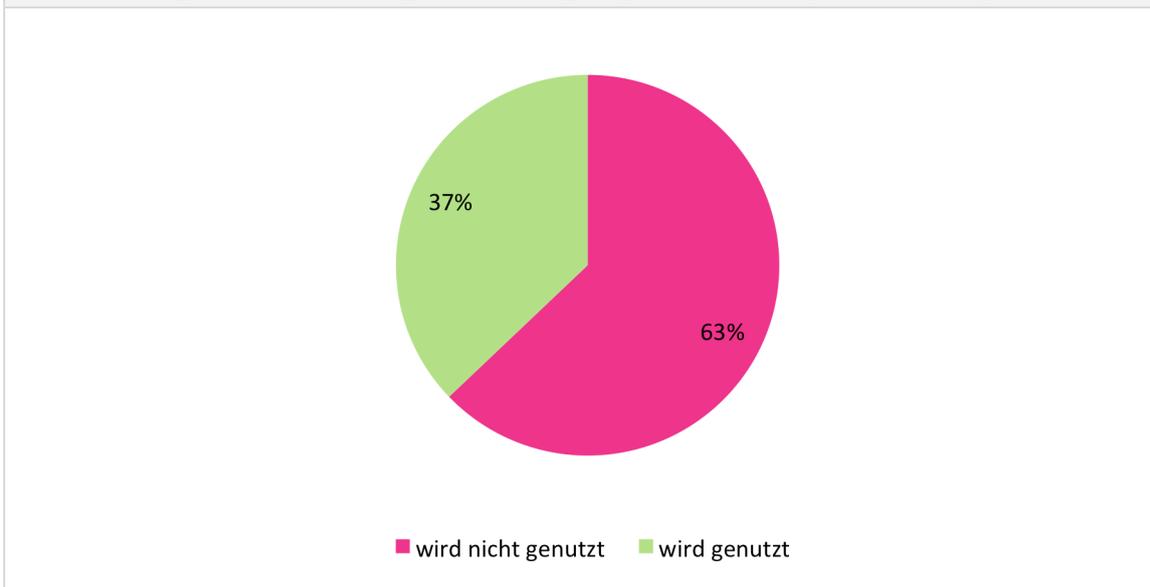
Insgesamt bewerteten mehr als die Hälfte der Teilnehmer 8 von 10 Kategorien überwiegend als riskant oder hochriskant für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit.<sup>95</sup>



Bei der freien Bewertung der Chancen waren viele Unternehmen eher pessimistisch. Einige sehen die Zukunft der Branche eher im werkseigenen Transport durch festangestellte Fahrer und einige sind der Ansicht, dass nur eine legal tragbare und rigoros durchgesetzte Lösung des Problems des zulässigen Gesamtgewichts auf nationaler oder europäischer Ebene in der Lage sein werde, die strukturellen Probleme der Branche zu lösen.

<sup>94</sup> Vgl. Witte, C. (2013).

<sup>95</sup> Vergleichswerte ergeben sich aus Borchering, M. (2007), S. 61: Dort gaben 83,3 % der Befragten an, die zu niedrigen Holzpreise seien ein großes Problem, 82,5% sahen dies in Form von Gewichtsregelungen und Überladungen gegeben.

**Abbildung 51: Verwendung von Dieseleitpreisklauseln (Deutschland)**

n=70

### 3.6 Schlussfolgerungen

Die Umfrage zeichnet ein uneinheitliches Bild des Holztransportgewerbes. Strukturelle Unterschiede ergeben sich aber weniger zwischen den Bundesländern oder im Vergleich Deutschland - Baden-Württemberg sondern im Vergleich zwischen kleinen und großen Fuhrunternehmen.

Ähnliche Probleme haben beide im Bereich der Zukunftsfähigkeit, der Überalterung und der Nachwuchsgewinnung. Auch im Bereich der Risiken durch hohe Kosten sind alle Größenordnungen betroffen.

Unterschiede ergeben sich in den wirtschaftlichen Strukturen. Das Kleingewerbe zeichnet sich in vielen Bereichen aus: Es stellt die Mehrheit der Unternehmen in Deutschland, es fährt im Jahresschnitt pro LKW die wenigsten Kilometer, generiert aber damit den im Vergleich höchsten Umsatz pro LKW, es verzeichnet ebenfalls die geringsten durchgesetzten Frachterlöse und ist damit in der Lage, am Markt kostengünstiger aufzutreten. Ein vergleichsweise hoher Anteil an Selbstfahrern und Teilzeitfahrern ermöglicht flexible Arbeitseinsätze. Gleichzeitig ist das Kleingewerbe stark auf den unmittelbaren Rundholztransport beschränkt und verfolgt wenige Nebenerwerbstätigkeiten.

Schon heute verfügen nach den Ergebnissen der Umfrage große Unternehmen über die größte Gesamtzahl der LKW im Holztransportgewerbe. Ein wachsender Anteil in diesem Segment kann aber über die strukturellen Probleme nicht hinwegtäuschen. Große, investitionskräftige Unternehmen können aber eher im Falle einer unwirtschaftlichen Betriebskalkulation das Geschäftsfeld Holztransport gänzlich aufgeben. So würden in einem unwirtschaftlichen Gesamtumfeld längerfristig große Frachtkapazitäten wegfallen.

Eine Lösungsmöglichkeit stellt das schon heute von manchen Unternehmen der Holzverarbeitenden Industrie praktizierte System der Selbstorganisation der Lieferungen dar. Unternehmenseigene Fahrzeuge transportieren das Holz mit Hilfe von angestellten Fuhrleuten.<sup>96</sup> Damit geht Innovations- und Wettbewerbsdruck in der Branche verloren; gleichzeitig fehlt es diesem

<sup>96</sup> Vgl. Witte (2013).

System an Flexibilität etwa zum Transport von über das Jahr verteilt ungleichen Rundholzmen- gen. Eine Verbesserung der Situation der Gesamtbranche durch höhere Frachtpreise und schärfere Gewichtskontrollen würde diese Probleme zwar lösen, fiel aber auf Seiten der Holz- industrie umso schwerer ins Gewicht, da die Wettbewerbsvorteile des Auslands durch ge- wichtsmäßig geringere Frachtpreise noch deutlicher zu Tage treten würden. Eine Angleichung der Regelungen zum zulässigen Gesamtgewicht im Rundholztransportbereich an den europäi- schen Durchschnitt könnte hier ausgleichend wirken und gerade die Kleinunternehmen in die Lage versetzen, ihre strukturellen Effizienzvorteile wirkungsvoll an den Markt zu bringen.

Eine Erhöhung des zGG könnte technisch gesehen vom bestehenden Fuhrpark der Unterneh- men ohne größere Umstellung und zusätzliche Investitionen umgesetzt werden.

### 3.7 Quellenverzeichnis

- BAG – Bundesamt für Güterverkehr (Hrsg.): Struktur der Unternehmen des gewerblichen Güterverkehrs und des Werkverkehrs. Köln 2012.
- BMEL: Holzmarktbericht 2014 Abschlussergebnisse für die Forst- und Holzwirtschaft des Wirtschaftsjahres 2014 Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) 2015.
- Bodenschwingh von, E.: Rundholztransport-Logistik. Situationsanalyse und Einsparpotential, Diplomarbeit München 2001.
- Bodenschwingh von, E.: Analyse der Rundholzlogistik in der Deutschen Forst- und Holzwirtschaft, Ansätze für ein übergreifendes Supply Chain Management, München 2006.
- Borcherding, M.; Grund, C.: Tarifierorientierung, Humankapitalinvestitionen und subjektive Leistungsbewertung - eine empirische Studie. Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 55 (5), 482-509, 2003.
- Borcherding, M.: Rundholztransportlogistik in Deutschland – eine transaktionskostenorientierte empirische Analyse. Dissertation Hamburg 2007.
- EU-Kommission (Hrsg.): Empfehlung der Kommission vom 6. Mai 2003 betreffend die Definition der Kleinstunternehmen sowie der kleinen und mittleren Unternehmen. (2003/361/EG). Artikel 2 des Anhangs, S. 36–41 (Online bei EUR-Lex (PDF), abgerufen am 16. Juli 2015).
- Hedden, H.: Regionalisierung der Aufkommens- und Verwendungspotenziale von Nadelstammholz in Deutschland, Hamburg 2008.
- Kienzler, H.-P.; Selz, Th.; Manns, S.: Auswirkungen von erhöhten zulässigen Gesamtgewichten für Rundholztransporte. Untersuchung im Auftrag des Holzabsatzfonds. Kessel+Partner Transport Consultants. 2000.
- Kienzler, H.-P.: Analyse der Wettbewerbsbedingungen im Holztransport. Untersuchung im Auftrag des Deutschen Holzwirtschaftsrats e.V. 2006.
- Mrosek, Th.; Kies, U. Schulte, A. (2005): Clusterstudie Forst und Holz Deutschland 2005 – Forst- und Holzwirtschaft hat große volkswirtschaftliche und arbeitsmarktpolitische Bedeutung.
- ProgTrans AG (2007): Güterverkehr Deutschland 2050.
- Seintsch, B.: Cluster Forst und Holz nach neuer Wirtschaftszweigklassifikation, Tabellen für das Bundesgebiet und die Länder, Hamburg 2013.
- Statistische Berichte Baden Württemberg, hrsg. v. Statistisches Landesamt Baden Württemberg 2014.
- Thürmer 1988 aus Borcherding 2007.
- Witte, C. (2013): Wer transportiert zukünftig unser Holz? Vortrag 8. internationaler Kongress der Säge und Holzindustrie.

## 3.8 Anlagen

### Anlage 1: Anschreiben



AG Rohholzverbraucher e.V. • Dorotheenstr. 54 • 10117 Berlin

Geschäftsstelle Berlin  
Dorotheenstraße 54 | 10117 Berlin  
Telefon: +49 30 72 02 04 38 85  
Fax: +49 30 37719457  
Email: [info@rohholzverbraucher.de](mailto:info@rohholzverbraucher.de)  
Web: [www.rohholzverbraucher.de](http://www.rohholzverbraucher.de)  
Datum: 18.Juli 2014  
Bearbeiter: PP

#### Befragung zur wirtschaftlichen Situation des Holztransportgewerbes

Sehr geehrte Damen und Herren ,

das Holztransportgewerbe in Deutschland steht vor besonderen Herausforderungen: Außergewöhnliche Kostensteigerungen durch Maut und Treibstoffe belasten die Rentabilität der Unternehmen. Hinzu kommen der zunehmende Fahrermangel, Nachwuchssorgen und ein hoher Wettbewerbsdruck.

Um die wirtschaftliche Situation des Holztransportgewerbes in Deutschland hinreichend beschreiben zu können, fehlt es jedoch an aktuellen Studien und Informationen. Die Arbeitsgemeinschaft Rohholzverbraucher e.V. (AGR) führt daher in Zusammenarbeit mit der Bundesvereinigung des Holztransportgewerbes e.V. (BdHG) eine Befragung von Unternehmen des Holztransportgewerbes durch. Zur Zielgruppe der Befragung zählen darüber hinaus Unternehmen der Forst- und Holzwirtschaft, die gewerblich auf fremde oder eigene Rechnung Holztransporte durchführen.

Mit diesem Schreiben bitten wir Sie um eine Teilnahme an dieser Befragung. Sie tragen damit maßgeblich dazu bei, ein umfassendes Bild der Situation des Holztransportgewerbes in Deutschland zu ermitteln.

Ihre Angaben werden ausschließlich in anonymisierter Form ausgewertet und nicht an Dritte weitergegeben. Auf Wunsch werden wir Sie nach Abschluss der Auswertungen über die Ergebnisse informieren. Als kleines **Dankeschön** verlosen wir unter allen Teilnahmeberechtigten<sup>1</sup> mit vollständig ausgefülltem Fragebogen zehn **Tankgutscheine im Wert von 25,00 Euro**. Bitte geben Sie für beide Fälle Ihre Kontaktdaten am Ende des Fragebogens an.

Sie haben folgende Möglichkeiten, **bis spätestens zum 31. August 2014** an der Befragung teilzunehmen:

1. Bequem online: Über folgenden Link gelangen Sie direkt zur Website der AGR und zur Befragung: <http://zumlink.de/AGR-Befragung-Holztransportgewerbe>
2. Postalisch an unten angegebene Postadresse der AGR
3. Per FAX an 030/37719457

<sup>1</sup> Teilnahmeberechtigt sind Unternehmer oder beauftragte Mitarbeiter von Unternehmen des Holztransportgewerbes bzw. Unternehmen, die gewerblich oder auf eigene Rechnung Rohholztransporte durchführen. Mehrfachteilnahmen von demselben Unternehmen bzw. Unternehmensvertreter werden nicht berücksichtigt.

Arbeitsgemeinschaft Rohholzverbraucher e.V.  
Dorotheenstr. 54 | 10117 Berlin  
Tel: 030/72 02 04 38 86 | Fax: 030/22 32 04 89  
E-Mail: [info@rohholzverbraucher.de](mailto:info@rohholzverbraucher.de)  
Web: [www.rohholzverbraucher.de](http://www.rohholzverbraucher.de)

Präsident: Leonhard Nossol  
Vorstand: Reinhard Hagenah  
Jörg Keller  
Geschäftsführer: Dr. Denny Ohnesorge  
USt.-ID: 27/620/59843

Bank: Commerzbank Berlin  
Konto: 623 456 100  
BLZ: 120 400 00  
IBAN: DE 4512 0400 0006 2345 6100  
BIC: COBADE33



Sie kennen Kollegen, die ebenfalls zur Zielgruppe der Befragung zählen könnten? Gern können Sie den Fragebogen an diese weiterleiten.

Bei der AGR ist Herr Prawdzik Ansprechpartner für die Befragung, den Sie über nachfolgenden Kontakt erreichen:

Paul Prawdzik  
E-Mail: paul.prawdzik@rohholzverbraucher.de  
Tel.: 030 72 02 04 38-82

Ich bedanke mich im Voraus für Ihr Engagement und verbleibe mit freundlichen Grüßen

Mit freundlichen Grüßen

  
Dr. Denny Ohnesorge  
Geschäftsführer

## Anlage 2 Fragebogen

agr - Arbeitsgemeinschaft Rohholzverbraucher e.V.

31.08.15 11:00



### Wirtschaftliche Situation des Holztransportgewerbes

Das Holztransportgewerbe in Deutschland steht aktuell vor besonderen Herausforderungen: Außergewöhnliche Kostensteigerungen durch Maut und Treibstoffe belasten die Rentabilität der Unternehmen. Hinzu kommen der zunehmende Fahrermangel, Nachwuchssorgen und ein hoher Wettbewerbsdruck.

Um die wirtschaftliche Situation des Holztransportgewerbes in Deutschland hinreichend beschreiben zu können, fehlt es jedoch an aktuellen Studien und Informationen. Die Arbeitsgemeinschaft Rohholzverbraucher e.V. (AGR) führt daher in Zusammenarbeit mit der Bundesvereinigung des Holztransportgewerbes e.V. (BdHG) eine Befragung von Unternehmen des Holztransportgewerbes durch. Zur Zielgruppe der Befragung zählen darüber hinaus Unternehmen der Forst- und Holzwirtschaft, die gewerblich auf fremde oder eigene Rechnung Holztransporte durchführen.

Die Ergebnisse der Befragung dienen den Verbänden dazu, Handlungsbedarf zur Verbesserung der politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen des Holztransportgewerbes abzuleiten.

Ihre Angaben werden dabei ausschließlich in anonymisierter Form ausgewertet und nicht an Dritte weitergegeben. Auf Wunsch werden wir Sie nach Abschluss der Auswertungen über die Ergebnisse informieren. Als kleines Dankeschön verlosen wir unter allen Teilnehmberechtigten (mehr dazu finden Sie hier) mit vollständig ausgefülltem Fragebogen zehn **Tankgutscheine im Wert von 25,00 Euro**. Bitte geben Sie für beide Fälle Ihre Kontaktdaten am Ende des Fragebogens an.

Sie haben folgende Möglichkeiten, **bis spätestens zum 31. August 2014** an der Befragung teilzunehmen.

### Rahmendaten des Unternehmens

- 1 In welchem der genannten Geschäftsfelder ist Ihr Unternehmen tätig?  
[mehrere Auswahlmöglichkeiten]
- Rundholztransporte
  - Schnittholztransporte
  - Hackschnitzeltransport
  - Speditionsgeschäft
  - Forstlohnunternehmen
  - Holzhandel
  - Sägewerk
  - Holzwerkstoffherstellung
  - Zellstoff- und Papierherstellung
  - Holzhandwerk/Kunsthandwerk/Holzbau

- 2 Gibt es weitere Geschäftsfelder, in denen Ihr Unternehmen tätig ist?

- 3 In welchem Bundesland hat Ihr
- Baden-Württemberg

Unternehmen seinen Hauptsitz?

- Bayern
- Brandenburg und Berlin
- Hessen
- Mecklenburg-Vorpommern
- Niedersachsen und Bremen
- Nordrhein-Westfalen
- Rheinland-Pfalz
- Saarland
- Sachsen
- Sachsen-Anhalt
- Schleswig-Holstein und Hamburg
- Thüringen

4 In welchen Bundesländern hat ihr Unternehmen 2013 regelmäßig Holz transportiert?

- Baden-Württemberg
- Bayern
- Brandenburg und Berlin
- Hessen
- Mecklenburg-Vorpommern
- Niedersachsen und Bremen
- Nordrhein-Westfalen
- Rheinland-Pfalz
- Saarland
- Sachsen
- Sachsen-Anhalt
- Schleswig-Holstein und Hamburg
- Thüringen

5 Falls Ihr Unternehmen auch im Ausland Rundholz transportiert, geben Sie bitte an welchen Ländern.

6 Wie viele Mitarbeiter waren in Ihrem Unternehmen 2013 beschäftigt (inkl. geringfügig Beschäftigte)?

Anzahl alle Mitarbeiter	<input type="text"/>
davon (Vollzeit) Fahrer mit CE-Führerschein	<input type="text"/>
davon (Teilzeit) Fahrer mit CE-Führerschein	<input type="text"/>

7 Wie viele Fahrer mit CE-Führerschein beschäftigen Sie in den folgenden Altersgruppen?

Unter 20 Jahre	<input type="text"/>
20-30 Jahre	<input type="text"/>
31-40 Jahre	<input type="text"/>
41-50 Jahre	<input type="text"/>
51-60 Jahre	<input type="text"/>
Mehr als 60 Jahre	<input type="text"/>

agr - Arbeitsgemeinschaft Rohholzverbraucher e.V.

31.08.15 11:00

- 8 In welchen Berufsfeldern bilden Sie derzeit aus? Bitte geben Sie die Anzahl der in Ihrem Unternehmen in 2013 beschäftigten Auszubildenden an.

Berufskraftfahrer	<input type="text"/>
Mechatroniker LKW	<input type="text"/>
Speditionskaufmann/frau	<input type="text"/>
Sonstige	<input type="text"/>

## Fuhrpark und Auslastung

- 9 Bitte geben Sie die Anzahl der verschiedenen Fahrzeug- und Anhängerarten Ihres Fuhrparks an.

Langholztransporter Zwangsenker mit Kran	<input type="text"/>
Langholztransporter Zwangsenker ohne Kran	<input type="text"/>
Langholztransporter Selbstlenker mit Kran	<input type="text"/>
Langholztransporter Selbstlenker ohne Kran	<input type="text"/>
Kurzholzgliederzug mit Kran	<input type="text"/>
Kurzholzgliederzug ohne Kran	<input type="text"/>
Sattelzug mit Kran	<input type="text"/>
Sattelzug ohne Kran	<input type="text"/>
Kombizug Selbstlenker mit Kran	<input type="text"/>
Kombizug Selbstlenker ohne Kran	<input type="text"/>
Kombizug Zwangsenker mit Kran	<input type="text"/>
Kombizug Zwangsenker ohne Kran	<input type="text"/>
Andere	<input type="text"/>

- 10 Bitte geben Sie an, mit welcher Art von Gewichtsermittlung Ihre Holzzüge ausgestattet sind.
- Gewichtsermittlung über den Kran  
 Gewichtsermittlung über EBS oder Balkdruck

- 11 Wie viele Ihrer Holzzüge sind technisch dafür ausgelegt, ohne zusätzliche Umbauten, mit einem höheren zulässigen Gesamtgewicht (zGG) zu fahren?

Holzzüge für 44t zGG	<input type="text"/>
Holzzüge für 46t zGG	<input type="text"/>
Holzzüge für 53t zGG	<input type="text"/>

- 12 Bitte geben Sie weitere Kenndaten Ihres Fuhrparks an.

Durchschnittliche Antriebsleistung der	<input type="text"/>
--	----------------------

agr - Arbeitsgemeinschaft Rohholzverbraucher e.V.

31.08.15 11:00

Zugmaschinen in PS	
Durchschnittlicher Kilometerstand der Sattelzüge	<input type="text"/>
Durchschnittlicher Kilometerstand der Gliederzüge	<input type="text"/>
Durchschnittliches Alter der Zugmaschinen	<input type="text"/>
Durchschnittliches Alter der Anhänger	<input type="text"/>
Anzahl der luftgefederten Transportzüge	<input type="text"/>
Anzahl der blattgefederten Transportzüge	<input type="text"/>
<hr/>	
13 Bitte geben Sie an, welche Fahrassistenzsysteme Sie nutzen.	<input type="checkbox"/> Abstandsassistent <input type="checkbox"/> Notbremsfunktion <input type="checkbox"/> ABS im Anhänger <input type="checkbox"/> ESP (DSP und ROP) <input type="checkbox"/> EBS <input type="checkbox"/> Lenkassistent <input type="checkbox"/> Keine
<hr/>	
14 Was ist die geschätzte durchschnittliche Fahrleistung Ihrer Transportfahrzeuge in einem Jahr?	
Gesamt in km/Jahr pro Fahrzeug	<input type="text"/>
Davon auf Waldwegen in km/Jahr pro Fahrzeug	<input type="text"/>
Davon auf Autobahnen in km/Jahr pro Fahrzeug	<input type="text"/>
Davon auf Bundes- und Landstraßen in km/Jahr pro Fahrzeug	<input type="text"/>
<hr/>	
15 Welchen Kraftstoff verwenden Sie für Ihre Zugmaschinen?	<input type="checkbox"/> Diesel <input type="checkbox"/> Bio-Ethanol <input type="checkbox"/> BtL-Kraftstoff (SunDiesel) <input type="checkbox"/> Erdgas <input type="checkbox"/> Wasserstoff
<hr/>	
16 Wie viele Touren (Wald-Werk) fahren Sie mit einem Fahrzeug durchschnittlich pro Woche?	
Touren pro Woche	<input type="text"/>
<hr/>	
17 Bitte schätzen Sie, wie viel Festmeter die von Ihnen angefahrenen Holzpolter durchschnittlich haben.	
Nadelholz durchschnittlich in FM/Polter	<input type="text"/>
Laubholz durchschnittlich in FM/Polter	<input type="text"/>
<hr/>	
18 Bitte schätzen Sie, wie viel Festmeter Sie durchschnittlich pro Auftrag abfahren.	
Nadelholz durchschnittlich FM/Auftrag	<input type="text"/>
Laubholz durchschnittlich FM/Auftrag	<input type="text"/>
<hr/>	
19 Bitte schätzen Sie Ihre durchschnittliche Aufenthaltszeit (ab Werksankunft bis Werksausfahrt) und Ihre durchschnittliche Entladezeit pro Tour im Werk.	
Durchschnittliche Aufenthaltszeit im	<input type="text"/>

agr - Arbeitsgemeinschaft Rohholzverbraucher e.V.

31.08.15 11:00

Werk pro Tour in Minuten	<input type="text"/>
Durchschnittliche Entladezeit im Werk pro Tour in Minuten	<input type="text"/>
20 Falls sich die Werke in Ihrer Aufenthalts- bzw. Entladezeit unterscheiden, geben Sie bitte an warum.	<div style="border: 1px solid gray; height: 60px;"></div>
21 Welche der folgenden Investitionen planen Sie in den nächsten zwei Jahren?	<input type="checkbox"/> Fahrzeuge (Zugmaschinen, Anhänger, Kräne) <input type="checkbox"/> Navigationstechnologie für Holzzüge <input type="checkbox"/> Software zur Tourenplanung und Routenoptimierung <input type="checkbox"/> Navigationstechnologie inkl. des Navlog-Waldwegedatensatzes <input type="checkbox"/> Fahrassistenzsysteme als Nachrüstsatz
22 Bitte geben Sie die geplanten Gesamtinvestitionen der kommenden zwei Jahre an.	<div style="border: 1px solid gray; height: 60px;"></div>
23 Bitte geben Sie an dieser Stelle die Gründe an, falls Sie keine Investitionen planen bzw. geben Sie an, welche anderen als die aufgeführten Investitionen Sie planen.	<div style="border: 1px solid gray; height: 60px;"></div>

## Risiken und Chancen

24 Wie gewinnen Sie neue Fahrer für Ihr Unternehmen? Neue Fahrer gewinne ich über...

Vermittlungen durch das Arbeitsamt	<input type="radio"/> sehr zutreffend <input type="radio"/> zutreffend <input type="radio"/> weniger zutreffend <input type="radio"/> nicht zutreffend
Anzeigenschaltungen in Printmedien (z.B. regionale und überregionale Tageszeitungen)	<input type="radio"/> sehr zutreffend <input type="radio"/> zutreffend <input type="radio"/> weniger zutreffend <input type="radio"/> nicht zutreffend
Vermittlungen durch Verbände	<input type="radio"/> sehr zutreffend <input type="radio"/> zutreffend <input type="radio"/> weniger zutreffend <input type="radio"/> nicht zutreffend
eigene Veranstaltungen, wie z.B. Hausmessen	<input type="radio"/> sehr zutreffend <input type="radio"/> zutreffend <input type="radio"/> weniger zutreffend

agr - Arbeitsgemeinschaft Rohholzverbraucher e.V.

31.08.15 11:00

	<input type="radio"/> nicht zutreffend
Werbung in sozialen Netzwerken	<input type="radio"/> sehr zutreffend <input type="radio"/> zutreffend <input type="radio"/> weniger zutreffend <input type="radio"/> nicht zutreffend
Stellenausschreibungen über eigenen Internetauftritt	<input type="radio"/> sehr zutreffend <input type="radio"/> zutreffend <input type="radio"/> weniger zutreffend <input type="radio"/> nicht zutreffend
Weiterempfehlung eigener Azubis, Mitarbeitern und anderer Unternehmen	<input type="radio"/> sehr zutreffend <input type="radio"/> zutreffend <input type="radio"/> weniger zutreffend <input type="radio"/> nicht zutreffend
gar nicht	<input type="radio"/> sehr zutreffend <input type="radio"/> zutreffend <input type="radio"/> weniger zutreffend <input type="radio"/> nicht zutreffend
sonstige Mittel	<input type="radio"/> sehr zutreffend <input type="radio"/> zutreffend <input type="radio"/> weniger zutreffend <input type="radio"/> nicht zutreffend
<hr/>	
25 Haben Sie Probleme Mitarbeiter/ Fahrer zu gewinnen?	<input type="radio"/> Ja <input type="radio"/> Eher Ja <input type="radio"/> Eher Nein <input type="radio"/> Nein
<hr/>	
26 Welche Probleme sehen Sie in der Gewinnung von neuen Mitarbeitern und insbesondere von Fahrern?	<div style="border: 1px solid black; height: 60px; width: 100%;"></div>
<hr/>	
27 Bitte bewerten Sie, welches Risiko die nachfolgend aufgeführten Einflussfaktoren auf die Wettbewerbsfähigkeit Ihres Unternehmen in den nächsten fünf Jahren haben können.	
Verschärfung gesetzlicher Rahmenbedingungen	<input type="radio"/> sehr hohes Risiko <input type="radio"/> hohes Risiko <input type="radio"/> geringes Risiko <input type="radio"/> sehr geringes Risiko
höhere zulässige Gesamtgewichte in den Nachbarländern	<input type="radio"/> sehr hohes Risiko <input type="radio"/> hohes Risiko <input type="radio"/> geringes Risiko <input type="radio"/> sehr geringes Risiko
Steigende Treibstoffkosten	<input type="radio"/> sehr hohes Risiko <input type="radio"/> hohes Risiko <input type="radio"/> geringes Risiko <input type="radio"/> sehr geringes Risiko
Steigende Mautkosten	<input type="radio"/> sehr hohes Risiko <input type="radio"/> hohes Risiko

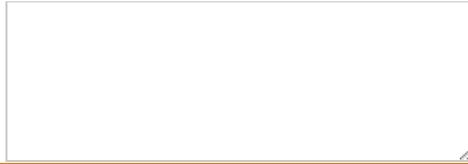
agr - Arbeitsgemeinschaft Rohholzverbraucher e.V.

31.08.15 11:00

- geringes Risiko  
 sehr geringes Risiko
- 
- Technischer Innovationsdruck
- sehr hohes Risiko  
 hohes Risiko  
 geringes Risiko  
 sehr geringes Risiko
- 
- Kreditfähigkeit
- sehr hohes Risiko  
 hohes Risiko  
 geringes Risiko  
 sehr geringes Risiko
- 
- Fahrermangel
- sehr hohes Risiko  
 hohes Risiko  
 geringes Risiko  
 sehr geringes Risiko
- 
- Regelung der Unternehmensnachfolge
- sehr hohes Risiko  
 hohes Risiko  
 geringes Risiko  
 sehr geringes Risiko
- 
- Überladungen bei Wettbewerbern
- sehr hohes Risiko  
 hohes Risiko  
 geringes Risiko  
 sehr geringes Risiko
- 
- Unwirtschaftliche Frachtpreise
- sehr hohes Risiko  
 hohes Risiko  
 geringes Risiko  
 sehr geringes Risiko
- 
- 28 Welche Chancen bestehen Ihrer Meinung nach für das Holztransportgewerbe in den nächsten fünf Jahren?
- 
- 
- 29 Welche Pläne haben Sie für die Fortführung bzw. Regelung der Nachfolge Ihres Unternehmens?
- Fortführung steht derzeit nicht zur Diskussion  
 Fortführung durch Familienmitglieder geregelt  
 Fortführung durch Verkauf geplant  
 Fortführung anderweitig geregelt  
 Aufgabe des Unternehmens geplant  
 Fortführung aktuell unklar
- 

## Wirtschaftliche Aspekte

- 30 Transportieren Sie, sofern möglich, auch Mischfracht (nicht Rundholz), um Leerfahrten zu vermeiden?  
Falls ja, welche
-



31 Auf welcher Bemessungsgrundlage werden Ihre Aufträge abgerechnet? Bitte bewerten Sie die Häufigkeit mit der Angabe von „sehr häufig“ bis "sehr selten" oder „nie“, falls diese Abrechnungsgrundlage bei Ihnen nicht zutrifft.

Volumen (FM mit Rinde)	<input type="radio"/> sehr oft
	<input type="radio"/> eher oft
	<input type="radio"/> eher selten
	<input type="radio"/> sehr selten
	<input type="radio"/> nie
Volumen (FM ohne Rinde)	<input type="radio"/> sehr oft
	<input type="radio"/> eher oft
	<input type="radio"/> eher selten
	<input type="radio"/> sehr selten
	<input type="radio"/> nie
Gewicht (Atro-Tonne)	<input type="radio"/> sehr oft
	<input type="radio"/> eher oft
	<input type="radio"/> eher selten
	<input type="radio"/> sehr selten
	<input type="radio"/> nie
Gewicht (Lutro-Tonne)	<input type="radio"/> sehr oft
	<input type="radio"/> eher oft
	<input type="radio"/> eher selten
	<input type="radio"/> sehr selten
	<input type="radio"/> nie
Ladung	<input type="radio"/> sehr oft
	<input type="radio"/> eher oft
	<input type="radio"/> eher selten
	<input type="radio"/> sehr selten
	<input type="radio"/> nie
Luftlinie Polter-Werk	<input type="radio"/> sehr oft
	<input type="radio"/> eher oft
	<input type="radio"/> eher selten
	<input type="radio"/> sehr selten
	<input type="radio"/> nie
Gefahrene Laststrecke Waldort-Werk (beladen)	<input type="radio"/> sehr oft
	<input type="radio"/> eher oft
	<input type="radio"/> eher selten
	<input type="radio"/> sehr selten
	<input type="radio"/> nie
Gefahrene Gesamtstrecke Waldort-Werk	<input type="radio"/> sehr oft
	<input type="radio"/> eher oft
	<input type="radio"/> eher selten
	<input type="radio"/> sehr selten

agr - Arbeitsgemeinschaft Rohholzverbraucher e.V.

31.08.15 11:00

 nie

- 32 Gibt es eine weitere Abrechnungsart, die Sie weiterhin verwenden? Haben Sie Anmerkungen zu dieser Frage?

- 33 Wie verteilt sich die 2013 in Ihrem Unternehmen gefahrene Rohholzmenge prozentual auf Ihre Auftraggeber? (Die Summe aller Angaben muss 100 ergeben)

Forst-/ Waldbesitzer

Holzhandel

Industrieabnehmer

Eigener Auftrag

- 34 Welchen Umsatz erzielten Sie mit Ihrem Unternehmen im Geschäftsjahr 2013?

Insgesamt in Euro:

Für Holztransportdienstleistungen in Euro:

- 35 Bitte schätzen Sie Ihren durchschnittlichen Frachterlös pro Tonne im Geschäftsjahr 2013.

ca. in Euro pro Tonne

ca. in Euro pro Festmeter (ohne Rinde)

- 36 Welcher durchschnittliche Frachtpreis pro Tonne ist Ihrer Meinung nach mindestens nötig, um wirtschaftlich arbeiten zu können?

ca. in Euro pro Tonne

ca. in Euro pro Festmeter (ohne Rinde)

## Rechtliche Aspekte

- 37 Nutzen Sie dynamische Vertragsklauseln, wie etwa Dieselpreisgleitklauseln, um Ihre Kostenentwicklung abzufedern?

Wir nutzen...

- 38 Welche Maßnahmen ergreift Ihr Auftraggeber, um Rechtsverstöße (z.B. Überladungen) zu unterbinden?

- Keine Vergütung von Fracht über dem zulässigen Gewicht  
 Malusregelung  
 Strafzahlung  
 Ausschluss als Auftraggeber

agr - Arbeitsgemeinschaft Rohholzverbraucher e.V.

31.08.15 11:00

- (Gestaffelte) Verwarnung
- Hinweise auf die einzuhaltenden gesetzlichen Bestimmungen bei Beauftragung
- Keine

39 Denken Sie, dass die gegenwärtigen gesetzlichen Bestimmungen zu Lenkzeiten den Besonderheiten des Holztransportgewerbes gerecht werden?

Ja  
 Nein

40 Falls nicht, was sollte geändert werden?

41 Raum für weitere Anmerkungen, Probleme, Herausforderungen, etc.

## Vielen Dank für die Beantwortung des Fragebogens!

42 Möchten Sie über die Ergebnisse der Studie informiert werden?

Ja  
 Nein

43 Möchten Sie an der Verlosung der Tankgutscheine teilnehmen?

Ja  
 Nein

44 Bitte geben Sie Ihre Kontaktdaten an, falls Sie an der Verlosung der Tankgutscheine teilnehmen oder über die Ergebnisse informiert werden möchten.

Firma	
Name	
Vorname	
E-Mail-Adresse	

### weitere infos

Arbeitsgemeinschaft Rohholzverbraucher e.V.  
Dorotheenstraße 54  
10117 Berlin

**Ansprechpartner:**

Lukas Freise

agr - Arbeitsgemeinschaft Rohholzverbraucher e.V.

31.08.15 11:00

Tel.: +49 3072 0204 3882  
E-Mail: [lukas.freise@rohholzverbraucher.de](mailto:lukas.freise@rohholzverbraucher.de)

Dr. Denny Ohnesorge  
Geschäftsführer

Tel.: +49 3072 0204 3886  
E-mail: [info@rohholzverbraucher.de](mailto:info@rohholzverbraucher.de)  
Web: [www.rohholzverbraucher.de](http://www.rohholzverbraucher.de)

## 4 Innovationspotenziale in der Logistikkette

### Bearbeitung

Professur für Forstliche Verfahrenstechnik

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

PD Dr. Thomas Smaltschinski, Prof. Dr. Dirk Jaeger

### 4.1 Einleitung

Ein vielfältiger Güteraustausch kennzeichnet arbeitsteilig organisierte Wirtschaftssysteme. Dabei müssen Güter von Orten der Produktion und zu Orten der Konsumtion transportiert werden. Produktions- und Konsumtionsprozesse sind dabei bestimmende Größen für die Gestaltung und Steuerung der Güterströme. Der Logistik kommt dabei die Aufgabe zu, die Versorgung dieser Prozesse durch spezifische materielle Verfügbarkeiten sicherzustellen. Die art- und mengenmäßige, räumlich und zeitlich abgestimmte Bereitstellung von Gütern gewisser Qualität bestimmt die Effektivität und Effizienz der arbeitsteiligen Wirtschaftsprozesse und ist die zentrale Aufgabe der Logistik. Bloech u. Ihde<sup>97</sup> umreißen in dieser Art den Begriff der Logistik.

Eine Logistikkette umfasst den gesamten Vorgang von der Produktion über den Gütertransfer bis hin zur Konsumtion. Das Thema dieser Untersuchung umfasst speziell die gesamte Logistikkette bei der Rundholzversorgung, die den Rundholztransport vom Wald zum Werk einschließt. Insgesamt ist der Rundholztransport dabei abhängig von den Produktionsmöglichkeiten im Wald, dem Bereitstellungswillen der Waldeigentümer und der Nachfrage nach Holzprodukten und insbesondere der räumlichen Lage von Angebots- und Nachfrageorten. Holzproduktion, Rundholztransport und Verarbeitung der Holzprodukte bilden dabei das System der Holzbereitstellungskette oder Wertschöpfungskette mit den Akteuren Forstbetriebe, Spediteure und holzverarbeitende Unternehmen. Die zwischen den einzelnen Teilprozessen der Holzbereitstellungskette existierenden kosten- und leistungsmäßigen Zusammenhänge sind für die Optimierung bedeutsam. Die zeitlich abgestimmte Versorgung der Teilprozesse mit Ressourcen und ihre Steuerung sind grundsätzliche Aufgaben der Logistik. Isolierte Optimierungen von Teilprozessen führen zwangsläufig nur zu suboptimalen Lösungen der gesamten Logistikkette.

Kantorovich<sup>98</sup> sieht aus einem etwas anderen Blickwinkel zwei Wege, um die Rentabilität eines Wirtschaftsunternehmens zu vergrößern. Der eine besteht in verschiedenen Verbesserungen der technischen Ausstattung, der andere, viel weniger genutzte, besteht in der Verbesserung von Planung und Organisation der Arbeitsprozesse. In der vorliegenden Untersuchung sollen nicht der technische Weg, sondern die Planung und Organisation behandelt werden.

Die Planung und Organisation von Arbeitsprozessen wird in drei Ebenen eingeteilt: strategische, taktische und auch operative Planung.

Die 'strategische Planung' eines Unternehmens betrifft die Entwicklung von Vorgehensweisen, um eine überlegene Grundkonfiguration des Unternehmens zu gestalten und dadurch langfristige Wettbewerbsvorteile zu erreichen<sup>99</sup>. Für ein Forstunternehmen sind dies die Entwicklung

---

<sup>97</sup> Bloech u. Ihde, 1997

<sup>98</sup> Kantorovich, 1939, S. 367

<sup>99</sup> Bleicher, 2011

geeigneter Konzepte für Waldbau (z. B. Waldentwicklungstypen in Baden-Württemberg), die Gestaltung der Organisationsstruktur, die Personalplanung, die Verbesserung der forstlichen Infrastruktur oder die Steuerung der Vermarktung von Holz, um nur einige zu nennen. Für die Holzindustrie gelten ähnliche Überlegungen hinsichtlich der Produktionsziele, der Absatzplanung, der mittel- bis langfristigen gesicherten Beschaffung von Ressourcen oder der Personal- und Arbeitsablaufplanung.

Verschiedene Unternehmen haben unterschiedliche Strategien und die zu transportierenden Holzprodukte haben für Forstunternehmen und die Unternehmen der Holzindustrie eine unterschiedliche strategische Bedeutung. Für Forstunternehmen sind sie ein wichtiges Produktionsziel, für die Unternehmen der Kunden nur noch Mittel zur Produktion ganz anderer Güter. Beispiele für die strategische Planung (Standortsfragen für Sägewerke, transportoptimale Zuordnung der Nutzungsflächen...) von Unternehmen der Holzindustrie finden sich bei Forsberg<sup>100</sup>, Carlsson u. Rönqvist<sup>101</sup>, Forsberg u. Rönqvist<sup>102</sup> oder D'Amours et al.<sup>103</sup>.

Church (2007) sieht die taktische Planung zur Bereitstellung von Holzprodukten als eine Brücke zwischen strategischer und operationaler Planung. Für einen gewissen Zeitraum werden zunächst die potentiellen Erntebestände ausgewählt und das Angebot nach Baumarten, Sortimenten und Mengen zusammengestellt. Dieses Angebot wird mit dem Bedarf der potentiellen Kunden verglichen und die Distribution des Angebots muss für den Forstbetrieb eine ökonomisch vorteilhafte Balance bilden. Die geographische Lage der Angebote im Wald und ihre Zuordnung zu Kunden determinieren lange vor dem Start der Holzbereitstellungskette die zu erwartenden Transportentfernungen, die Transportkosten und damit den forstlichen Reinerlös, den es aufgrund strategischer Unternehmensziele zu maximieren gilt.

Etwa 25 % der Waldfläche in Baden-Württemberg nehmen Forstbetriebe mit einer Waldfläche unter 200 ha ein. Die Distribution und der Transport von Holz stellen für Forstunternehmen dieser Größenordnung kein Problem dar. Die zahlreichen nächstliegenden Kunden erhalten das geerntete Holz. Kurze Transportentfernungen sind das Kennzeichen dieser regionalen Vermarktung.

Die Holzindustrie ist inzwischen auf wenige und deutlich größere Einheiten konzentriert. An die Stelle einer regionalen Holzvermarktung trat eine überregionale. Dies führt implizit zu einer unscharfen räumlichen Zuordnung der Ressourcen zu den Holzverarbeitenden Betrieben und zu höheren Transportentfernungen. Einem einzelnen Forstunternehmen ist nur die eigene Nutzung bekannt, was für mehrere Forstunternehmen zu einer Distribution, wie in Abbildung 52 (links), führen kann. Bei einer Kooperation von Forstunternehmen kann für die gemeinsame Nutzungsmenge geplant werden. Die gesamte Transportdistanz sinkt durch eine optimierte Distribution dieser Gesamtmenge (Abbildung 52, rechts).

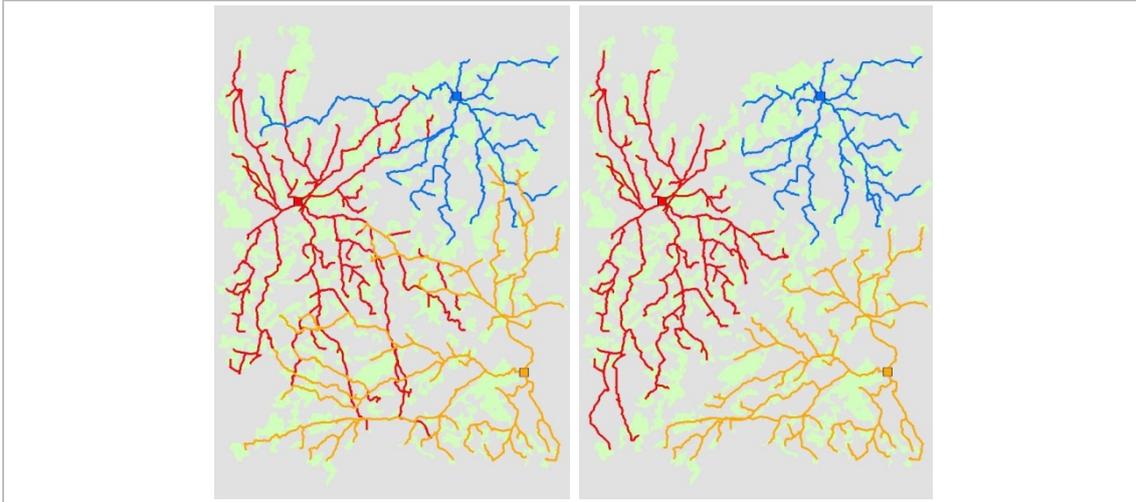
---

<sup>100</sup> Forsberg, 2002

<sup>101</sup> Carlsson u. Rönqvist, 2004

<sup>102</sup> Forsberg u. Rönqvist, 2005

<sup>103</sup> D'Amours et al., 2008

**Abbildung 52: Distribution ohne Kooperation (links) und mit Kooperation (rechts)**

Quelle: Smaltschinski et al. (2013)

Umgekehrt können auch Kunden kooperieren, indem sie Informationen über die geordneten Holzmengen und die Angebotsorte tauschen. Der starke Wettbewerb innerhalb der Holzindustrie, von wenigen Ausnahmen abgesehen, lässt dies in Deutschland nicht zu. Adam Smith beschrieb diese delikate Situation in den *Wealth of Nations*: „*Nobody ever saw a dog make a fair and deliberate exchange of one bone for another with another dog.*“<sup>104</sup>

Die ‘operationale Planung’ bei Forstunternehmen, Spediteuren und der Holzindustrie ist kurzfristig mit Planungszeiträumen von Tagen bis zu wenigen Wochen. Hier gilt es, Angebot und Bedarf in gegebenen Zeitfenstern abzugleichen. Für ein Forstunternehmen bedeutet dies die Auswahl der Bestände mit den benötigten Sortimenten, ihre Ernte und Allokation zu Kunden. Danach kommt je nach Verkaufsform, frei Werk oder ab Waldstraße, der zeitnahe Transport auf der kostengünstigsten Route und die Anlieferung beim Kunden innerhalb eines definierten Zeitfensters.

All dies sollte nahtlos ineinandergreifen, wobei das Ende jeden Prozesses den nächsten anstößt (ereignisgesteuerte Prozesskette). Je reibungsloser die Prozesse der Versorgungskette oder Logistikkette bei der Holzbereitstellung ineinandergreifen, desto höher ist ihre Effizienz. Die Verminderung vorhandener Reibungsverluste der Logistikkette bei der Holzbereitstellung bildet das Innovationspotential.

<sup>104</sup> Smith, A. (1776): *Wealth of Nations*, Book 1, Ch. 2

## 4.2 Quellenstudium

Das Quellenstudium bezieht sich auf internationale und nationale Ansätze zur Optimierung von Logistikketten. Diese beinhalten präziser die Holzbereitstellungs- oder Versorgungskette mit Rundholz (wood supply chain). Als wichtigstes Werkzeug zur Optimierung dieser Ketten ist die lineare Optimierung oder Programmierung anzusehen. Stichworte Optimierung oder lineare Programmierung führt bei einer Internetrecherche über Google zu 556.000 Einträgen (Stand 07/2015). Diese Angaben steigen stetig, was auch für die Forst- und Holzbranche gilt. Einen sehr guten, aktuellen und internationalen Literaturüberblick gibt der Artikel von Shashi u. Pulkki<sup>105</sup>, auf den hier vielfach Bezug genommen wird. International sind die eben erwähnten Stichworte lineare Programmierung oder weitere Methoden des Operations Research das Grundwerkzeug zur Optimierung von Prozessen bei der Holzbereitstellungskette. Dieses Werkzeug gehört im deutschsprachigen Raum seltsamerweise nicht zum forstlichen Standard und die Quellenlage im Hinblick auf die Versorgungsketten ist deutlich geringer.

### 4.2.1 Ansätze aus der internationalen Literatur zur Optimierung von Versorgungsketten mit Rundholz

Vor der Beschreibung der verschiedenen angewandten Methoden sollen diese systematisiert werden. Ein primäres Gliederungsmerkmal ist die Planungsebene. Hier wird in **strategische**, **taktische** und **operationale** Planung eingeteilt. Eine weitere Einteilung ergibt sich danach, ob die Versorgungskette **zentral** oder **dezentral** geplant wird. Als Unsicherheitsfaktor liegt über all diesen Planungen das **Risiko** (Witterung, etc.).

Versorgungsketten werden meistens zentral geplant. Dabei werden mathematische **Optimierungsmethoden** verwendet oder **Simulationen** oder eine Kombination von beidem. Als mathematischer Apparat kommen dabei folgende Algorithmen zur Anwendung:

**Lineare Programmierung** oder **Lineare Programme**: Lineare Programme dienen allgemein der Optimierung einer Zielfunktion (Minimierung oder Maximierung von Kosten, Reinerlösen, Transportentfernungen...). Es wäre an dieser Stelle zu aufwändig, alle Möglichkeiten aufzuzählen. Angedeutet wurde das sogenannte 'Transportproblem' zur optimierten Distribution. Dies kann erweitert werden zu sogenannten 'Umladeproblemen' (modaler Transport) oder maximalen Flüssen in Netzwerken.

**Integer-Programmierung**: Die Integer-Programmierung oder ganzzahlige Optimierung wurde gegenüber der linearen Programmierung zu einem Modellierungs- und Optimierungswerkzeug für viele praktische Probleme entwickelt, wenn keine speziellen Algorithmen bekannt sind. Durch bedeutende Fortschritte in der Entwicklung der Lösungsverfahren in den letzten 30 Jahren hat die ganzzahlige Optimierung heute viele Anwendungen, beispielsweise in der Produktion, in der Planung von Telekommunikations- und Nahverkehrsnetzen oder in der Tourenplanung. Im Gegensatz zur linearen Programmierung dürfen einige oder alle Variable nur ganzzahlige Werte annehmen.

**Heuristiken**: Hier finden sich insbesondere Simulated Annealing, Tabu Search und Genetische/Evolutionäre Algorithmen. In all diesen Verfahren werden für eine zu optimierende Zielgröße zunächst zulässige Anfangslösungen bestimmt, die dann iterativ solange verbessert werden, bis der Grad der Verbesserung kleiner als eine vorgegebene Schranke ist (Abbruchkriterium). Je nach Aufgabenstellung führen sie zu sehr guten Lösungen nahe des Optimums (s.a.

---

<sup>105</sup> Shashi u. Pulkki, 2013

Chen u. Gadow<sup>106</sup>). Heuristiken werden oft mit linearer oder Integer-Programmierung kombiniert.

**Spieltheorie:** Im Hinblick auf die Kooperation von Akteuren gewinnt die Spieltheorie zunehmend an Bedeutung. Dabei wird angenommen, dass die Akteure 'Spieler' sind und das 'Spiel' aus festgelegten Regeln besteht. Angenommen sechs konkurrierende Sägewerke sind Spieler in einer Region, wobei jeder auf seinen Vorteil bedacht ist und seine Rundholzmengen überall unabhängig von der Transportdistanz kauft. Dies ergibt langfristig eine Pattsituation, da ein Spieler einmal günstig Holzlose erwirbt und bei der nächsten Runde nicht, was für alle Spieler gilt. Gewinne und Verluste des Spiels gleichen sich langfristig aus. Bei Kooperation von zwei Spielern ergibt sich für die nicht kooperierenden Spieler langfristig ein Nachteil. Das Spiel ist wie bei einem Würfel, die kooperierenden Spieler haben eine Chance von  $2/6 = 1/3$  zu gewinnen und bei den übrigen verbleibt die Gewinnchance bei  $1/6$ . Die kooperierenden Spieler gewinnen langfristig das Spiel, da sie eine dominante Strategie haben.

**Differentialgleichungen u. Simulationsmodelle:** Differentialgleichungen werden vielfach bei der Modellierung von Systemen mit Feedback-Strukturen verwendet. Die Modellierung eines kybernetischen Systems und das Lösen von Systemen von Differentialgleichungen sind dabei eine anspruchsvolle Aufgabe und werden daher nur selten verwendet<sup>107</sup>. Simulationsmodelle sind hingegen verbreitet. Dabei werden die geschilderten Methoden durch Variationen der Eingangsvariablen modifiziert, woraus Szenarien der Form 'Was passiert, wenn..?' resultieren. Dabei entstehen Handlungsoptionen, die üblicherweise im strategischen Bereich verwertet werden.

Insgesamt gibt es noch weitere Methoden wie Kombinatorik oder dynamische Programmierung, aus denen sich der methodische Baukasten des Operations Research zusammensetzt. Dabei gibt es keine strenge Zuordnung einer Methode zu einem bestimmten Problem.

Versorgungsketten für Rundholz sind auf eine Infrastruktur angewiesen, durch die die Orte von Angebot und Nachfrage verbunden werden. Diese Infrastruktur wird auch Netzwerk genannt und auf diesem Netzwerk werden kürzeste oder schnellste Routen berechnet, um einen optimalen Fluss der Güterströme zu bestimmen. Dabei spricht man auch von Netzwerk-Optimierungsmodellen. Mit Rücksicht auf die Infrastruktur können die Modelle der Versorgungsketten klassifiziert werden.

Die Modelle der Versorgungsketten lassen sich in **strategische, taktische** oder **operative** Ebenen einteilen<sup>108</sup>. Die strategische Planung von Versorgungsketten beinhaltet im Allgemeinen breiter angelegte Entscheidungen über lange Zeiträume, die einen festen Wettbewerbsvorteil gegenüber Konkurrenten sichern<sup>109</sup>. Strategische Modelle für Versorgungsketten dienen der Identifikation, welche Arten von Maßnahmen für eine Optimierung der Versorgung ergriffen werden müssen, aber nicht die Umsetzungsschritte<sup>110</sup>.

Die Planung und Entscheidung über den Standort eines Säge- oder Zellstoffwerks mit Rücksicht auf die Lage der Rohstoffe und Transportentfernungen ist ein typisches Beispiel für eine strategische Planung. Planungsfehler werden hier mit hohen Transportentfernungen resp. Trans-

---

<sup>106</sup> Chen u. Gadow, 2002

<sup>107</sup> Borshchev u. Fillipov, 2004

<sup>108</sup> Gunn, 2007; Church, 2007

<sup>109</sup> Gunn, 2007

<sup>110</sup> Church, 2007

portkosten bezahlt. Bei der (kurzfristigen) operativen Planung werden hingegen die realen Bereitstellungsschritte innerhalb einer Versorgungskette geplant mit Lieferzeitfenstern von einem Tag bis zu wenigen Wochen. Hier wäre die Einteilung von LKW zu nennen, wie und von welchen Hiebsorten im Wald das Rundholz zu welchen Kunden zu transportieren ist<sup>111</sup>.

**Taktische Modelle** können als eine Brücke zwischen den beiden genannten Planungsebenen gesehen werden. Durch diese wird gewährleistet, die strategischen Ziele operational umzusetzen (Church, 2007). So kann beispielsweise die Planung der Holzernte auf strategischer Ebene Flächen bestimmter Altersklassen vorsehen, um die Altersklassenstruktur zu normalisieren. Das taktische Modell liefert dann weitere räumliche Informationen über Bestände, die in einer bestimmten Reihenfolge geerntet werden müssen, um bei der anschließenden operationalen Planung die Holzversorgung der Industrie möglichst effizient in bestimmten Zeitfenstern zu sichern.

Versorgungsmodelle können auch danach klassifiziert werden, wie Entscheidungen getroffen werden, **zentral** oder **dezentral**<sup>112</sup>. Bei einer zentral organisierten Versorgungskette werden alle Beschaffungs-, Produktions- und Distributionsentscheidungen von einer zentralen Stelle aus getroffen, wobei der jeweilige Systemzustand berücksichtigt wird (vorhandene Belieferung/Eingang, Wetterlage, Befahrbarkeit etc.). Dies gewährleistet eine stärkere Kontrolle über die Zusammenarbeit zwischen allen Beteiligten der Versorgungskette, lässt Korrekturmöglichkeiten offen und führt zu gesamthaft optimierten Entscheidungen.

In der Praxis ist es oft unrealistisch, alle Entscheidungen zentral zu steuern. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Akteure der Versorgungskette nicht der gleichen Organisation angehören. In diesem Fall wird jedes Unternehmen darauf abzielen, seine Vorteile unabhängig von den Auswirkungen auf die übrigen Mitglieder des gesamten Systems zu maximieren. Die Bereitschaft verschiedener konkurrierender Wirtschaftsunternehmen, Informationen über Kosten und Preise mit anderen zu teilen, ist gering. In solchen Fällen bleiben als Ausweg dezentrale Modelle<sup>113</sup>. Dabei werden die Einzelprozesse der Versorgungskette unabhängig voneinander optimiert, was dem Entscheidungsprozess in vielen realen Systemen entspricht.

Ein weiterer Ansatz zur Klassifikation von Versorgungsketten ist der Modellierungsansatz und das Lösungsverfahren. Im Rahmen einer übergeordneten Systematik werden **Optimierungs- und Simulationsmodelle** unterschieden.

Bei Optimierungsmodellen werden mathematische Programmierungsansätze verwendet, die einen gangbaren Weg zur optimalen Gestaltung einer Versorgungskette bieten; z. B. die optimale Gestaltung der Infrastruktur oder die Bestimmung eines optimalen Werksstandortes<sup>114</sup>. Simulationsmodelle erlauben hingegen, die Effizienz von Versorgungsketten in verschiedenen Szenarien zu untersuchen und dadurch Einsicht in die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Modellkomponenten zu gewinnen<sup>115</sup>. Optimierungsmodelle sind meist zentralisiert, während die Simulationsmodelle eher zur dezentralen Entscheidungsfindung genutzt werden. Simulation und Optimierung können auch für das Management von Versorgungsketten kombiniert werden.

---

<sup>111</sup> Gunn, 2007

<sup>112</sup> Stadler, 2004

<sup>113</sup> Ebd.

<sup>114</sup> Shapiro 2001

<sup>115</sup> Ebd.

## Versorgungsketten und Risiko

Versorgungsketten verbinden zahlreiche Orte von Nachfrage und Angebot, wobei unterschiedliche Risiken auftreten können (Wetter, Befahrbarkeit...). Die meisten Modelle sind **deterministisch** und nicht jedes Risiko kann abgebildet werden<sup>116</sup>. Risikomodelle basieren auf unterschiedlichen Ansätzen. Ein Teil ist an der Kontrolltheorie ausgerichtet, bei der Risiken als Störungen eines **dynamischen Systems** gesehen werden<sup>117</sup>. In einem weiteren Ansatz wird Risiko oder Unsicherheit durch Fuzzy-Logik auf der strategischen Ebene abgefangen<sup>118</sup>. Anupindi u. Bassok<sup>119</sup> belegen in ihren Untersuchungen die Variablen mit einer Wahrscheinlichkeitsverteilung, mit der ein Risiko eintreten kann. Die meisten Studien in der letzten Gruppe gelten als adaptiv, da die Risikoexposition des Kapitals durch laufende Anpassung der Operationen der Versorgungskette an die bestehende Nachfrage minimiert wird<sup>120</sup>. Unsicherheiten und Risiken können jedoch auf viele andere Faktoren bezogen werden wie Rohstoffversorgung, Produktionskapazität, Transport- und Bearbeitungszeiten.

Die Risiken in Modellen von Versorgungsketten lassen sich deterministisch nur schwer abbilden, eher stochastisch<sup>121</sup>. Obwohl schnelle Optimierungsalgorithmen existieren, bleibt der Zeitaufwand für realistische Probleme mit vielen Szenarien sehr hoch<sup>122</sup>. Manchmal sind stochastische Optimierungsprobleme zu groß, um sie lösen zu können und an ihre Stelle treten Näherungslösungen über Heuristiken<sup>123</sup>.

## Simulationsmodelle

Zur Simulation wird ein Modell eines realen Systems erstellt, welches die als wesentlich erachteten Systemelemente enthält und in ein Programm implementiert. Danach werden mit diesem Programm Experimente durchgeführt, um das Verhalten des Modells zu testen, die Ergebnisse zu bewerten oder das Modell realitätsnah zu modifizieren<sup>124</sup>. Simulationsmodelle dienen zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen (was passiert, wenn...), um Risiken und Kosten zu minimieren. Neben Theorie und Experiment haben Modellierung und Simulation eine zunehmende Bedeutung<sup>125</sup>. Simulation wird insbesondere verwendet, wenn die Modelle zu komplex werden und exakte mathematische Lösungen nicht möglich sind<sup>126</sup>. Die Bedeutung der Simulation hängt von der Gültigkeit der Daten, dem Modell und dem untersuchten Prozess ab<sup>127</sup>. Simulationsmodelle werden für das Verständnis der Dynamik von Versorgungsketten verwendet und zur Beurteilung verschiedener Szenarien.

## Simulation und System Dynamik

Das Management von Versorgungsketten wurde von Forrester (1961) durch dynamische Simulation untersucht, wobei diskrete Zeitmassenbilanzen und nichtlineare Verzögerungen einbezogen wurden. Für Simulationsmodelle bieten sich auch genetische Algorithmen in Kombinati-

---

<sup>116</sup> Bok et al., 2000; Gjedrun et al., 2001, Timpe u. Kallrath, 2000

<sup>117</sup> Bose u. Pekny, 2000

<sup>118</sup> Perea-Lopez et al., 2003

<sup>119</sup> Anupindi u. Bassok 1999

<sup>120</sup> Petkov u. Maranas, 1997

<sup>121</sup> Benders, 1962; Gutiérrez et al., 1996

<sup>122</sup> Santoso et al., 2005; Alonso-Ayuso et al., 2003

<sup>123</sup> Leung u. Tsang, 2007; Hultquist u. Olsson, 2004

<sup>124</sup> Pedgen et al., 1990

<sup>125</sup> Chang u. Makatsoris, 2001

<sup>126</sup> Behlau et al., 2003

<sup>127</sup> Chang u. Makatsoris, 2001

on mit Integer-Programmierung an, um strategische Entscheidungen über Standortwahl und Auswahl der Partner für Design-Probleme bei Versorgungsketten zu berücksichtigen<sup>128</sup>. Für Versorgungsketten kristallisieren sich dabei drei verschiedene Ansätze heraus: **ereignisdiskrete Simulation, System Dynamics** Modellierung und **agentenbasierte Modelle**<sup>129</sup>.

In diskreten Ereignis-Simulationsmodellen werden die Aktivitäten innerhalb der Versorgungskette durch einzelne Ereignisse vertreten, die zu bestimmten Zeitpunkten auftreten<sup>130</sup>.

Zahlreiche Software-Pakete stehen für diskrete Ereignis-Simulation von Lieferketten zu Verfügung. Sie sind entweder speziell auf einen bestimmten Teil der Lieferkette ausgerichtet, haben eine hohe Funktionalität bei der Modellierung und Visualisierung von Lieferketten<sup>131</sup> oder erlauben die Simulation des Verhaltens der Akteure innerhalb einer Versorgungskette in einem Netzwerk<sup>132</sup>.

Ereignis-Simulationsmodelle wurden auch verwendet, um Liefernetzwerke in der Forstindustrie zu modellieren<sup>133</sup>. Während viele dieser Studien sich auf einzelne Phasen der Produktion und Verteilung konzentrieren, enthalten einige die gesamte Wertschöpfungskette. Lonnstedt<sup>134</sup> simulierte den Forstsektor in Schweden, um die langfristige Dynamik der Kostenwettbewerbsfähigkeit zu untersuchen. Dies führte zu Änderungen der Politik, wie Steuersenkungen oder Zinsen, um die Investitionen der Branche erhöhen zu können. Randhawa et al.<sup>135</sup> entwickelten eine objektorientierte Simulationsumwelt für diskrete Ereignisse, die verwendet werden könnte, um Sägewerke mit verschiedenen Konfigurationen zu modellieren. Beaudoin et al.<sup>136</sup> kombinierten deterministisches Mixed Integer-Programming und Monte-Carlo-Methoden für taktische Entscheidungen zur Holzbeschaffung und zeigte, dass der vorgeschlagene Planungsprozess zu einer durchschnittlichen Ertragssteigerung von 8,8 % gegenüber einem deterministischen Modell führt.

System Dynamics Modellierung (SD) wird vor allem für die Simulation kontinuierlicher Systeme verwendet<sup>137</sup>. Ein SD-Modell ist durch Rückkopplungsmechanismen und Informationsverzögerungen gekennzeichnet, um das Verhalten komplexer Systeme abzubilden. In der SD-Modellierung sind reale Systeme im Hinblick auf die Bestandsgrößen (z. B. Gewinn, Wissen, Anzahl von Akteuren) dargestellt und der Informationsfluss zwischen diesen Variablen. Interagierende Rückkopplungsschleifen verbinden die Bestands- und Stromgrößen. Das resultierende Modell ist ein System von Differentialgleichungen, deren dynamisches Verhalten von der Struktur der Rückkopplungsschleifen abhängig ist<sup>138</sup>.

Der SD-Ansatz wurde mit Techniken des Operations Research kombiniert, um Versorgungsketten zu modellieren, weiter zu entwickeln und um ihre Dynamik zu untersuchen<sup>139</sup>. Angerhofer

---

<sup>128</sup> Truong u. Azadivar, 2003

<sup>129</sup> Kleijnen, 2005

<sup>130</sup> Kleijnon, 2005; Lee et al., 2002; Terzi u. Cavalieri, 2004

<sup>131</sup> Kuhn u. Rabe, 1998; Kelton et al., 2002

<sup>132</sup> Stäblein et al., 2007

<sup>133</sup> Lonnstedt, 1986; Mendoza et al., 1991; Beaudoin et al.; 2007

<sup>134</sup> Lonnstedt, 1986

<sup>135</sup> Randhawa et al., 1994

<sup>136</sup> Beaudoin et al., 2007

<sup>137</sup> Borshchev u. Fillipov, 2004

<sup>138</sup> Borshchev u. Fillipov, 2004

<sup>139</sup> Towill et al., 1992; Sterman et al., 2000

u. Angelides<sup>140</sup> haben die Literatur über SD-Modellierung im Supply Chain Management überprüft und festgestellt, dass SD in Kombination mit verschiedenen Techniken verwendet werden kann, um Bestandsverwaltung, Nachfrage und internationale Lieferketten Designs zu untersuchen. Nur wenige Studien haben SD verwendet, um in der Holzverarbeitende Industrie Lieferketten zu modellieren. Schwarzbauer u. Rametsteiner<sup>141</sup> verwenden SD, um die möglichen Auswirkungen der nachhaltigen Waldbewirtschaftung bei der Zertifizierung von Waldprodukten im westeuropäischen Forstsektor zu untersuchen. Jones et al.<sup>142</sup> modellierte die Lieferkette der Holzindustrie mit Hilfe des SD-Ansatzes, um politische Fragen zur wirtschaftlichen und ökologischen Nachhaltigkeit zu beantworten. Sie zeigten, dass die Kapazität der Sägewerke die verfügbaren Holzressourcen potenziell überschreiten könnte und dass Feedback-Mechanismen erforderlich sind, um die nachhaltige Versorgung der Sägewerke zu gewährleisten.

Insgesamt führen SD-Modelle zu einer aggregierten Sicht auf das System und sind daher eher für politische Fragen auf strategischer Ebene geeignet. Das modellierte System ist als ein Ergebnis der Beziehungen von beschreibenden Gleichungen zu verstehen, die Bestands- und Flussvariablen verknüpfen. Dabei es ist nicht immer möglich, das individuelle Verhalten von Personen oder Unternehmen zu identifizieren.

Agentenbasierte Modelle (ABM) nutzen das individuelle Verhalten der Akteure und die Eigenschaften eines Bottom-up-Systems, in dem jedes Mitglied seine eigenen Operationen optimiert<sup>143</sup>. ABM zielt darauf ab, zu untersuchen, wie die 'Spieler' in der Lieferkette bei veränderten Richtlinien und Regeln interagieren und welcher stabile Zustand für alle Beteiligten der Versorgungskette hinsichtlich Angebot und Nachfrage voraussichtlich eintritt. ABM wurde in den letzten Jahren verstärkt für die dezentrale Planung eingesetzt. Jedes Mitglied der Lieferkette kann dabei autonom oder halbautonom agieren. Alle Agenten verwenden vordefinierte Merkmale, Entscheidungsregeln und Ziele, um miteinander zu interagieren, und jeder einzelne Agent versucht, seinen eigenen Nutzen zu maximieren, tut dies aber in einer Umgebung, in der alle anderen Agenten vorhanden sind<sup>144</sup>. Die wichtigsten Vorteile der Multi-Agenten-Systeme sind ihre Qualitäten zur dezentralen Modellierung komplexer Systeme. Weiterhin bieten sie mehr Flexibilität, ohne an Effizienz zu verlieren. ABM wirkt wie ein 'Lernsystem', was schrittweise zu besseren Entscheidungen führt<sup>145</sup>.

ABM wird daher vielfach für das Management von Versorgungsketten verwendet<sup>146</sup>. Die Flexibilität von ABM erlaubt die Berücksichtigung von Risiko in der Versorgungskette durch eine Kombination mit statistischen Analysemethoden bei der Modellierung<sup>147</sup>. Diese statistischen Methoden gehen davon aus, dass die unsicheren Variablen einer bestimmten Wahrscheinlichkeitsverteilung folgen und durch wiederholte Probenahme aus dieser Verteilung eine Menge möglicher Realisierungen oder Szenarien erzeugt wird. Ein deterministischer diskreter Ereignissimulator wird dann für jedes dieser Szenarien ausgeführt. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung

---

<sup>140</sup> Angerhofer u. Angelides, 2000

<sup>141</sup> Schwarzbauer u. Rametsteiner, 2001

<sup>142</sup> Jones et al., 2001

<sup>143</sup> Parunak et al., 1998

<sup>144</sup> Forget et al., 2008; Guajardo u. Rönnqvist, 2015

<sup>145</sup> Mele et al., 2006

<sup>146</sup> Gunnarsson et al., 2006; Lin et al., 1998; Kaihara, 2001; Lee u. Lau, 1999; Shen et al., 2006

<sup>147</sup> Almeder et al., 2009

der Ergebnisgröße wird dann zur Bewertung der Qualität von Angebot und Nachfrage verschiedener Konfigurationen der Versorgungskette eingesetzt.

ABM wird in der Forstindustrie vermehrt bei der Modellierung von Versorgungsketten in den USA und Kanada verwendet<sup>148</sup>. Jede Einheit (holzverarbeitende Industrie, Großhändler oder Einzelhändler) ist ein intelligenter Agent mit einem bestimmten Verhalten (Ordnungsschema) und der Option der Zusammenarbeit mit anderen Agenten bei der Entscheidungsfindung<sup>149</sup>. Die Ergebnisse dieser Studien zeigen, dass die Kosten in der Lieferkette mit Zunahme der Zusammenarbeit von Agenten sinken. Zusammenarbeit und Informationsaustausch wirken sich nicht nur positiv auf den Ablauf der gesamten Versorgungskette aus, sondern sie lohnen sich auch für die einzelnen Akteure. Lieferketten der Holzindustrie wurden mit Multi-Verhalten Agenten modelliert<sup>150</sup>. Dabei sind die Mittel der Agenten entweder reaktiv (eine vordefinierte Aktion für jeden möglichen Zustand) oder deliberativ (verwenden Wissen aus der Vergangenheit), um Entscheidungen zu treffen. Beim Vergleich der Leistung von Single-Verhalten und adaptivem Multi-Verhalten unter verschiedenen Business-Umgebungen stellten Forget et al.<sup>151</sup> Leistungssteigerungen fest, wenn Agenten ihr Verhalten in jeder Situation anpassen, anstatt eine einzige Strategie über den gesamten Zeithorizont zu verwenden.

Aufgrund ihrer Flexibilität und geringeren Komplexität sind agentenbasierte Modelle solide Werkzeuge sowohl für die strategische als auch die operative Planung unter Unsicherheit<sup>152</sup>.

### **Kombination von Simulations- und Optimierungsmodellen**

Durch Simulationsmodelle wird zunächst kein optimales Design einer Lieferkette festgelegt<sup>153</sup>. Ein Optimierungsmodell übersetzt alle Abhängigkeiten der Versorgungskette in ein mathematisches Programm, um Verbesserungen in einer Lieferkette in Bezug auf eine bestimmte Leistung zu messen, die durch eine Zielfunktion für Gesamtgewinne oder Auftragserfüllung gekennzeichnet ist (Almeder et al., 2009). Die Kombination von Simulation und Optimierung werden als Supply-Chain-Optimierungsmodelle bezeichnet und berechnen einen Plan für die Produktions- und Vertriebsaktivitäten der Versorgungskette, der optimal ist. Das bedeutet, dass kein alternativer Plan den Wert der Zielfunktion weiter verbessern kann (Truong u. Azadivar, 2003; Swisher et al., 2000). In diese Kategorie von Supply-Chain-Modellen wird das Optimierungsproblem mit Rücksicht auf alle Beschränkungen und Variablen des Problems konstruiert. Da jedoch die Größe dieses Optimierungsproblems bei Risiko wächst und eine genaue optimale Lösung schwierig zu berechnen ist, werden in vielen Fällen approximative Techniken und Heuristiken angewandt, um eine nahezu optimale Lösung zu finden.

Simulationsbasierte Optimierungsmodelle haben sich als eine attraktive kombinierte Strategie zur Optimierung unter Unsicherheit etabliert. Fu<sup>154</sup> untersucht die Situation, in der ein Analytiker herausfinden möchte, welche der vielen möglichen Sätze von Eingabeparametern zu einer optimalen Leistung des dargestellten Systems führen. Die meisten der heutigen Simulatoren enthalten die Möglichkeit einer Black-Box-Parameteroptimierung. In derartigen Toolboxes

---

<sup>148</sup> Forget et al., 2008; Frayet et al., 2007; Moyaux et al., 2004; Lemieux et al., 2009; Fjeld, 2001; Lin, 1998; Forget et al. 2009

<sup>149</sup> Bok et al., 2000

<sup>150</sup> Forget et al., 2008

<sup>151</sup> Forget et al., 2009

<sup>152</sup> Gunnarsson et al., 2006; Lee u. Lau, 1999; Fox et al., 2000

<sup>153</sup> Almeder et al., 2009

<sup>154</sup> Fu, 2002

werden über verschiedene Meta-Heuristiken Algorithmen entwickelt, um Konfigurationsentscheidungen aus verschiedenen Simulationsläufen zu optimieren<sup>155</sup>. Dabei wird das Simulationsmodell nur dazu verwendet, um eine adäquate Zielfunktion für verschiedene Szenarien zu finden.

Viele der simulationsbasierten Optimierungsprozesse sind kompliziert, benötigen eine beträchtliche Menge an technischem Know-how seitens des Benutzers sowie eine erhebliche Rechenzeit. Dies steht in engem Zusammenhang mit der Tatsache, dass einige dieser Techniken lokale Suchstrategien enthalten und damit stark problemabhängig sind<sup>156</sup>. Bei simulationsbasierten Optimierungsmodellen ist das schnelle Finden qualitativ hochwertiger Lösungen von kritischer Bedeutung, da die Bewertung der Zielfunktion das wiederholte Ausführen des Simulationsmodells bedingt<sup>157</sup>. Genetische Algorithmen (s. Kap. 4.2.1 Anfang) werden für diesen Zweck verwendet, um multimodale, diskontinuierliche und Differenzfunktionen zu optimieren. Der Hauptvorteil dieser evolutionären Ansätze gegenüber anderen Heuristiken liegt in ihrem Ansatz, von Vorneherein eine größere Fläche des Lösungsraumes mit einer kleineren Anzahl von Evaluierungen der Zielfunktion zu erkunden<sup>158</sup>.

Die genetischen Algorithmen der simulationsbasierten Optimierungsmodelle in den Supply-Chain-Netzwerken werden durch mathematische Programmierung unterstützt<sup>159</sup>. Allerdings sind diese Studien vor allem auf strategische Entscheidungen ausgerichtet, weniger für taktische oder operative Aufgaben. In einigen Studien werden simulationsbasierte Optimierungstechniken in verschiedenen Branchen eingesetzt<sup>160</sup>. Bisher gibt es noch keine Beispiele für eine Kombination von agentenbasierter Modellierung und Optimierungstechniken unter Berücksichtigung der Unsicherheit im Forst<sup>161</sup>.

#### 4.2.2 Nationale Ansätze zur Optimierung der Versorgungskette mit Rundholz

Die nationalen Quellen unterscheiden sich von den bisherigen Ansätzen, indem stärker auf die Analyse des Rundholztransports innerhalb der Versorgungskette eingegangen wird.

So untersucht Borchering<sup>162</sup> die zwei Fragen, ob die Transportkosten in Deutschland zu hoch sind und ob die Transaktionskosten theoretisch erklärt werden können.

Die Transportkosten in Deutschland sind im Vergleich zu den nordischen Ländern tatsächlich hoch, wobei in den nordischen Ländern für den Holztransport vorteilhafte Rahmenbedingungen herrschen. Die zulässigen Gesamtgewichte sind höher und die Treibstoffkosten sind geringer aufgrund geringerer Besteuerung.

Nach Borchering<sup>163</sup> werden die Marktpreise des Transports nur in geringem Maß durch Transaktionskosten beeinflusst. Folgendes führt er als mögliche Erklärung für das vorgefundene Phänomen an: Rundholztransporteure haben aufgrund der Branchenspezifität ihrer LKW Marktaustrittsbarrieren und infolge dessen sinkt ihre Verhandlungsmacht gegenüber ihren Kunden. Bei ungleich verteilter Macht kann eine Tendenz zu ruinöser Konkurrenz entstehen,

---

<sup>155</sup> Fred et al., 1999

<sup>156</sup> Almeder et al., 2009

<sup>157</sup> Biswas u. Narahan, 2004

<sup>158</sup> Fox et al., 2000

<sup>159</sup> Syarif et al., 2002; Vergara et al., 2002; Zhou et al., 2002

<sup>160</sup> Mele et al., 2006; Gunnarsson et al., 2006; Lee et al., 1999; Dudek u. Stadler, 2005

<sup>161</sup> Shashi u. Pulkki, 2013

<sup>162</sup> Borchering, 2007

<sup>163</sup> Borchering, 2007

die sich in Preisen bemerkbar macht, die nicht die Durchschnittskosten decken. Die alternative Erklärung sieht er in der schwierigen Aufteilung der erzielbaren Renditen, wenn Spediteure und Auftraggeber kooperieren. Insgesamt sieht er generelle Vorteile in der Kooperation zwischen Spediteuren und Auftraggebern.

Grundsätzliche Verbesserungen sieht Borchering<sup>164</sup> in einer Reduktion der unproduktiven Wartezeiten der LKW im Werk, einem besseren Informationsfluss bezüglich der Holzlagerorte oder der Zusammenfassung kleinerer Holzmengen zu Poltern ausreichender Dimension. Einen LKW-Schichtbetrieb, Trailer-Systeme, Rückfrachten oder globale Flottenoptimierungsanwendungen werden prinzipiell positiv, aber in der Realität skeptisch beurteilt. Eine unternehmensübergreifende Organisation mit Anschluss Touren sieht er kritisch mit Blick auf das gegenseitige geringe Vertrauen und die daraus resultierende geringe Kooperationsbereitschaft.

Korten u. Heindl<sup>165</sup> untersuchten die Effizienz des Rundholztransports durch eine betriebsübergreifende Tourenplanung. Untersucht wird das Einsparpotential durch Kooperation zwischen einzelnen Speditionen. Dazu gingen sie in zwei Schritten vor:

**Schritt 1:** Untersuchung und Nachstellung des Transportgeschehens von 50 LKW, deren Routen über ein halbes Jahr hinweg aufgezeichnet wurden. Diese Routen wurden im Rechner mit Waldorten, Fahrstrecken und Zielorten gespeichert.

**Schritt 2:** Hier wurden die vorliegenden Transportaufträge rekombiniert, um eine betriebsübergreifende Tourenplanung zwischen den Speditionen zu simulieren. Durch die erhöhte Anzahl von Quellen (Holzlose) und Senken (holzverarbeitende Betriebe) ergaben sich mehr Möglichkeiten, sinnvolle Anschluss Touren und somit Rundläufe mit hoher Auslastung der LKW zu finden.

Insgesamt konnten die gefahrenen Kilometer planerisch um 7 bis 11 % reduziert werden. Eine Untersuchung zu Schnittholz-Rückfrachten zeigte, dass auch hier Möglichkeiten für Kosteneinsparungen gegeben sind. Technisch und organisatorisch ist die Durchführung möglich, ökonomisch unter bestimmten Voraussetzungen sinnvoll.

Aufgrund der vorteilhaften Ergebnisse der Berechnungen erarbeiteten Korten u. Heindl<sup>166</sup> drei mögliche Kooperationsmodelle:

**1. Kooperationsmodell „geschlossene Tauschbörse“** Beim Kooperationsmodell „geschlossene Tauschbörse“, an dem eine begrenzte Anzahl von Spediteuren teilnehmen kann, geht es um die Möglichkeit, Transportaufträge untereinander tauschen zu können. Sinnvoll wäre eine Zusammenarbeit von Spediteuren, die in derselben Region tätig sind und so mehrheitlich dieselben Kunden resp. Abnehmer haben. Die teilnehmenden Spediteure sollten im Vorfeld der Kooperation eine Tauschbörsenordnung festlegen, welche die Tauschprinzipien, Arbeitsqualität-, Mitglieder- und Haftungsregelungen bestimmt.

**2. Kooperationsmodell „Generalunternehmer“** Das Kooperationsmodell sieht vor, dass sich eine Anzahl von Spediteuren, die möglichst in derselben Region tätig sind, zusammenschließen. Der Zusammenschluss kann verschiedene Formen haben. Möglich wäre z. B. die Gründung einer Genossenschaft. Der Frächterzusammenschluss wählt zunächst einen an der Kooperation beteiligten Spediteur als Vertreter, der als Generalunternehmer

---

<sup>164</sup> Ebd.

<sup>165</sup> Korten u. Heindl, 2009

<sup>166</sup> Korten u. Heindl, 2009

für den Zusammenschluss auftritt und folgende Kernaufgaben, die in der gemeinsam beschlossenen Kooperationsvereinbarung festgelegt sind, übernehmen soll:

- zentrale Disposition
- Organisation und Optimierung der Tourenplanung
- Koordination und Kontrolle

**3. Kooperationsmodell „externer Logistikdienstleister“** Das Kooperationsmodell „externer Logistikdienstleister“ sieht vor, dass sich eine beliebige Anzahl von Speditionen zu einer Transportgenossenschaft zusammenschließt und sämtliche Aufgabenbereiche, die die Transportplanung betreffen, an einen externen und unabhängigen Logistikdienstleister übertragen werden. Die Transportgenossenschaft legt in einer Kooperationsvereinbarung (Genossenschaftsvertrag) ihre Zielsetzung fest. Sie wählt einen Genossenschaftsvorsitzenden, der im Namen der Genossenschaft Verhandlungen über die Aufgaben des ausgewählten Logistikdienstleisters führt und vertraglich festlegt.

Auch Bodelschwingh<sup>167</sup> weist auf die Kooperation zwischen den Akteuren hin und verfolgt dabei einen gesamthaften Ansatz der Versorgungskette mit betriebsübergreifender Planung und Steuerung der Wertschöpfungsketten. Zwischen Hiebsbeginn im Wald und Auslieferung im Werk vergehen nach seinen Untersuchungen etwa 88 Tage. Dies ist für Forstbetriebe und die Holzverarbeitende Industrie gleichermaßen nachteilig. So ergeben sich Zinskosten des gebundenen Kapitals und gleichzeitig Qualitätsverluste (z. B. Verblauung bei Kiefer), woran beide Akteure kein Interesse haben können. Bodelschwingh<sup>168</sup> sah durch den Einsatz von IuK-Technologie damals ein Einsparpotential von etwa 25 Tagen zwischen Hiebsbeginn im Wald und Auslieferung im Werk.

Eine Kooperation in der Forst- und Holzwirtschaft Deutschlands ist selten. Die Bayerischen Staatsforsten sind nach ihrer Umorganisation zu einem Wirtschaftsbetrieb im Jahre 2005 ein Beispiel für die Kooperation von Forstbetrieben (vgl. Kap. 4.3.1). Nach der strategischen Entscheidung zu zentraler und forstbetriebsübergreifender Holzvermarktung 'frei Werk' sanken die Kosten insgesamt erheblich. Insbesondere die Verweilzeiten der Holzlose im Wald sanken deutlich unter den oben angegebenen Wert von Bodelschwingh<sup>169</sup>. Die Distributionsplanung zu Beginn des Wirtschaftsjahres durch lineare Programmierung<sup>170</sup> führte zu einer Reduktion der gesamten Transportstrecke von 12 %, wobei das Optimierungspotential bei 20 % liegt. Eine Leerfahrtreduktion durch Rückfrachten und Dreiecksrouten ergeben ein weiteres Einsparpotential von etwa 12 %<sup>171</sup>.

Die bisher zitierten Quellen stimmen hinsichtlich der Vorteile von Branchen übergreifender Kooperation mit der internationalen Literatur überein. Korten u. Heidl<sup>172</sup> kommen allerdings zu dem Schluss: „Es zeigte sich, dass die Notwendigkeit, zu kooperieren, erkannt wird, eine Umsetzung aufgrund fehlenden Vertrauens aber nicht leicht ist.“

Ein weiteres Optimierungspotential besteht in der Erhöhung der Lastfahrten. Dazu liegen verschiedene Ansätze vor. Carlsson u. Rönnqvist<sup>173</sup> verwenden dazu lineare Programme, wobei

---

<sup>167</sup> Bodelschwingh, 2005

<sup>168</sup> Ebd.

<sup>169</sup> Bodelschwingh, 2005

<sup>170</sup> Smaltschinski et. al., 2011

<sup>171</sup> Smaltschinski et al., 2013

<sup>172</sup> Korten u. Heidl, 2009

<sup>173</sup> Carlsson u. Rönnqvist, 2004

die optimierte Distribution der Rundholzsortimente zu Kunden und die Leerfahrtreduktion durch Rückfrachten gleichzeitig berechnet werden. In den Programmen müssen die Distribution der Sortimente zusammen mit allen Rückfrachtkombinationen in das lineare Programm eingearbeitet werden. Die Matrizen werden dadurch sehr groß, was zu Problemen bei den Berechnungen führt<sup>174</sup>. Hirsch<sup>175</sup> entwickelte zur Leerfahrtreduktion über die Heuristik 'Tabu Search' eine Methode zur kostenoptimalen Verbindung von Last- und Leerfahrtrouten. Dies wurde von Zazgornik et al.<sup>176</sup> für Falt-Container weiterentwickelt, wobei Container-Management und Tourenplanung kombiniert werden. Hirsch u. Gronalt<sup>177</sup> änderten den Ansatz von 2008. Zunächst wird das Transportproblem gelöst und die Holzsortimente den Kunden zugeordnet, danach werden die Transportmengen für die Planungsperiode im Anhalt an den Bedarf bestimmt und letztlich das tägliche kostenoptimale Transportvolumen von den Waldorten zu den Kunden hergeleitet. Dies wird insgesamt über lineare Programme berechnet. Smaltschinski<sup>178</sup> entwickelte einen direkten kombinatorischen Ansatz zur Leerfahrtreduktion, wobei Rückfrachten und Dreiecksrouten berechnet werden. Diese werden, wie bei den eben genannten Autoren, nach vorheriger Lösung des Transportproblems berechnet.

### 4.3 Praxisbeispiele und abgeschlossene Projekte

An der Professur für Forstliche Verfahrenstechnik der Universität Freiburg, Folgeinstitution des bisherigen Instituts für Forstbenutzung, wurden mehrere Projekte im Bereich der Transportoptimierung von Rundholz durchgeführt, die die taktische und die operationale Planung der Versorgungskette mit Rundholz betreffen.

#### 4.3.1 Taktische Planung der Distribution von Rundholz bei den Bayerischen Staatsforsten

Die bayerischen Staatsforsten (BaySF) sind für die Verwaltung von 0,8 Mio. Hektar Waldfläche verantwortlich und für eine jährliche Erntemenge von ca. 5 Mio. m<sup>3</sup>. Die Waldfläche wird von 40 Forstbetrieben bewirtschaftet, die das Holz bis in die 1990er Jahre eigenständig vermarktetten. Mit der Reorganisation der BaySF im Jahr 2005 wurde die strategische Entscheidung getroffen, den Großteil der Erntemenge zentral zu vermarkten und den Rest regional. Diese Entscheidung führte zu einer Zusammenarbeit der 40 Forstbetriebe mit einer zentralisierten Steuerung und Optimierung des überregionalen Marketings von der neu gegründeten Inhouse-Logistik-Abteilung. Kurz nach der Gründung dieser Zusammenarbeit verringerten sich die Kosten erheblich, da die Distribution der verschiedenen Sortimente zentral geplant und koordiniert wurde und der Wettbewerb (Abbildung 52) zwischen den Forstbetrieben wegfiel. Diese angepasste Organisationskonfiguration von BaySF war eine Reaktion auf neue Marktbedingungen durch die Konzentration der Holzindustrie zu größeren Einheiten und trug dazu bei, die langfristige Wettbewerbsfähigkeit der BaySF zu verbessern. Die strategische Entscheidung zu einem zentralen Marketing entspricht einer Kooperation der Forstbetriebe.

Die Auswirkungen einer optimierten Distribution von Rundholz wurden für das Geschäftsjahr 2010 untersucht. Als Referenz stand die übliche Distribution des Rundholzes zur Verfügung, die auf Erfahrung und Schätzwerten beruhte.

---

<sup>174</sup> Epstein et. al, 2007

<sup>175</sup> Hirsch, 2008

<sup>176</sup> Zazgornik et al., 2012

<sup>177</sup> Hirsch u. Gronalt, 2008

<sup>178</sup> Smaltschinski, 2010

Zur Lösung des sogenannten 'Transportproblems' wurde lineare Programmierung verwendet. Das Transportproblem kann wie folgt formuliert werden<sup>179</sup>: die Mengen der Quellen (Holzlose) sind so auf die Senken (holzverarbeitende Industrie) zu verteilen, dass bei Deckung der Nachfrage die Summe der Transportstrecken minimal wird. In der klassischen Formulierung von Dantzig<sup>180</sup> wurde von einer Gleichheit von Angebot und Nachfrage ausgegangen. In dem aufzustellenden linearen Programm werden folgende Bezeichnungen verwendet: Die Entscheidungsvariablen  $x_{ij}$  sind die Rundholzmengen, die von der Quelle  $i$  zu der Senke  $j$  zu transportieren sind. Die Transportdistanzen oder allgemein die Kosten werden durch  $c_{ij}$  bezeichnet. Die Summe der Produkte  $x_{ij} c_{ij}$  sollen in der Zielfunktion minimal werden. Dies führt zu der Zielfunktion [1] und den Nebenbedingungen [2] bis [4]:

$$z(C, s, d) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \quad [1]$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = S_i, \quad i = 1 \dots m \quad [2]$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = D_j, \quad j = 1 \dots n \quad [3]$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = 1 \dots m, j = 1 \dots n \quad [4]$$

Die Nebenbedingungen in [2] schränken die auslieferbare Holzmenge auf die verfügbare Menge der Quellen ( $S_i$ ) ein und [3] beschränkt die Liefermenge auf die Nachfrage ( $D_j$ ). Dies unter der Nichtnegativitätsbedingung für  $x_{ij}$  in [4]. Im Ergebnis wurde eine Reduktion der Transportstrecke gegenüber der üblichen Distribution von 12 % erzielt, wobei Differenzen zwischen Angebot und Nachfrage proportional auf Quellen oder Senken aufgeteilt wurden, um die Gleichheit von [2] und [3] zu gewährleisten.

Das Programm wurde weiterentwickelt, indem es bei Ungleichheit von Angebot und Nachfrage als 'offenes Transportproblem' behandelt wurde. Ist das Angebot der Quellen größer als die Nachfrage, sind [2] und [3] durch [5] zu ersetzen:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq S_i \quad (i = 1 \dots m) \quad \sum_{i=1}^m x_{ij} = D_j \quad (j = 1 \dots n) \quad [5]$$

Ist hingegen das Angebot kleiner als der Bedarf, dann sind [2] und [3] durch [6] zu ersetzen:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = S_i \quad (i = 1 \dots m) \quad \sum_{i=1}^m x_{ij} \leq D_j \quad (j = 1 \dots n) \quad [6]$$

Bei [5] verbleiben Restmengen im Wald und bei [6] haben einige Senken einen unbefriedigten Restbedarf. Durch Modifikation der Nachfragemengen im Anhalt an die durchschnittlichen Transportentfernungen konnte bei der Berechnung über [5] und [6] die gesamte Transportstrecke um bis zu 20 % gesenkt werden.

Nach der optimierten Distribution wurde eine Leerfahrtreduktion durch Rückfrachten und Dreiecksrouten kalkuliert<sup>181</sup>. Dies ergab eine Reduktion der Leerfahrtstrecken von 12 %. Opti-

<sup>179</sup> Hitchcock, 1941

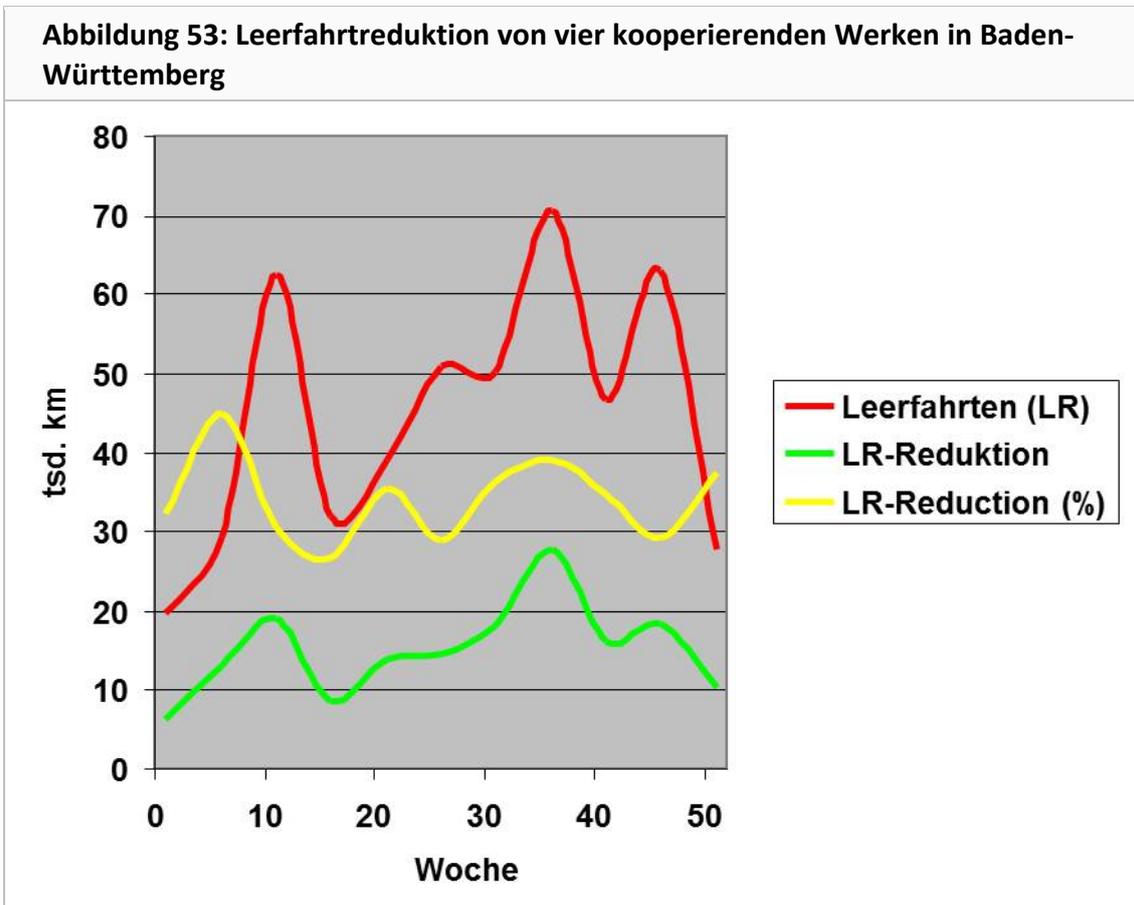
<sup>180</sup> Dantzig, 1951

<sup>181</sup> Smaltschinski, 2010

mierte Distribution und Leerfahrtreduktion zusammen lassen eine Senkung der jährlichen Transportstrecke von rund 25 % als Optimierungspotential erwarten.

#### 4.3.2 Operationale Planung von Rückfrachten

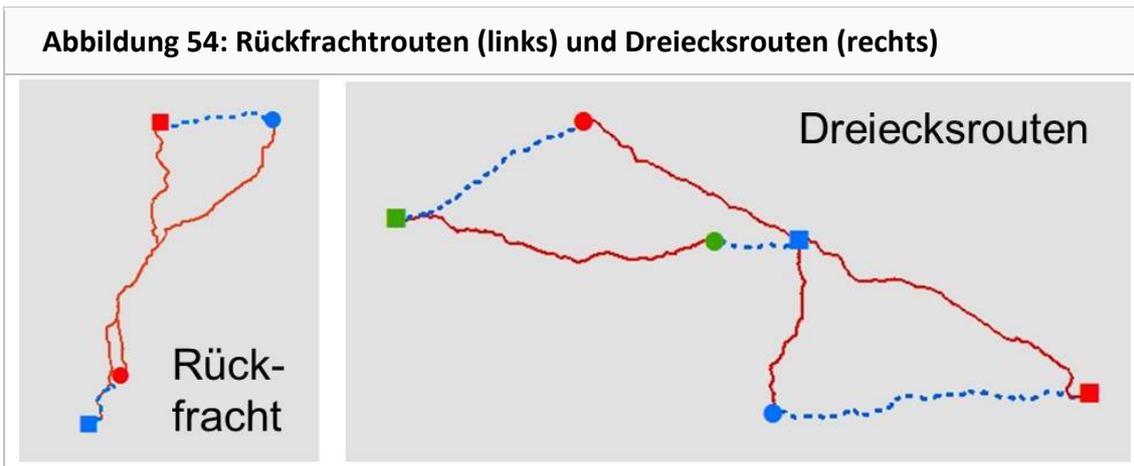
Ein erster Versuch wurde 2004 durch die Initiative der Fa. Klenk durchgeführt. Dabei kooperierten vier Werke und tauschten nachträglich Informationen über ihre Holzlose (Position und Menge) aus. Das Ergebnis der Leerfahrtreduktion im wöchentlichen Verlauf ist in Abbildung 53 dargestellt.



Quelle: Smaltschinski et al. (2013)

Insgesamt wurden etwa 1 Mio. m<sup>3</sup> Rundholz in die Berechnungen einbezogen. Als Referenzstrecke beim Transport wurde eine Leerfahrt Werk-Holzpolter und eine Lastfahrt Holzpolter-Werk unterstellt. Insgesamt ergab dies eine gesamte Transportstrecke von 5,46 Mio. km, wovon 50 % Leerfahrten waren. Diese Leerfahrtstrecke ließ sich durch einfache Rückfrachten um 0,94 Mio. km senken, was hinsichtlich der Leerfahrtstrecke eine Reduktion 34 % oder auf die gesamte Transportstrecke bezogen einer Einsparung von 17 % entspricht.

Neben den einfachen Rückfrachten können auch Dreiecksrouten eingesetzt werden (Abbildung 54).



Quelle: Smaltschinski et al. (2013)

In Abbildung 54 (links) ist eine Rückfrachtroute eingezeichnet, wobei Werke durch Quadrate und Holzpolter durch Punkte dargestellt werden. Durchgezogene Linien sind Lastfahrten und gepunktete Leerfahrten. Das Potential zur Reduktion von Leerfahrten ist evident. Auf der rechten Seite (Abbildung 54) ist eine Kombination von Holzlosen und Werken dargestellt, bei der eine Rückfracht jeweils nur für ein Paar von Werken möglich ist. Eine Dreiecksroute hingegen führt zu einer deutlich höheren Verringerung der Leerfahrtstrecke als bei einfachen Rückfrachten. Diese Form der Leerfahrtreduktion wurde über Kombinatorik abgeleitet<sup>182</sup>.

Dieses Verfahren wurde auf den Datensatz der BaySF (Kap. 4.3.1) nach optimierter Distribution der Einzelsortimente angewandt. Für Dreiecksrouten verringerte sich die Leerfahrtstrecke um 12,3 % (0,67 Mio. km) und bei ausschließlicher Anwendung von Rückfrachten nur um 9,4 % (0,51 Mio. km). Die Ergebnisse sind vielversprechend, aber auf eine Kooperation der Frächter angewiesen. Korten u. Heindl<sup>183</sup> sehen hier eine große Bereitschaft, wobei die in Kap. 4.2.2 beschriebenen Kooperationsmodelle anzuwenden wären.

#### 4.3.3 Operationale Planung modaler Transport (Projekt Heidmark)

Im Jahr 2005 wurde eine Pilotstudie in der Heidmark (Niedersachsen) durchgeführt, wobei verschiedene Transportmittel zu einem Verladebahnhof untersucht wurden. Das Rundholz war schwaches Kiefern-Industrieholz (3 m), welches zu einem Verladebahnhof transportiert werden sollte. Dabei lag ein einfacher Sternverkehr zum Verladebahnhof vor. Als Transportmittel kamen ein Trailer (Container), ein normaler Rundholz-LKW mit Ladekran und ein neu entwickelter Spezialhänger mit bodenschonenden und sehr geländegängigen Spezialreifen zum Einsatz (Abbildung 55), der von einem landwirtschaftlichen Schlepper gezogen wurde.

<sup>182</sup> Smaltschinski, 2010

<sup>183</sup> Korten u. Heindl, 2009

**Abbildung 55: Spezialhänger zum Transport von Industrieschwachholz (Kiefer)**

Quelle: Smaltschinski (2005)

Die Holzlose lagen bei der Studie im Kleinprivatwald in einer Entfernung von bis zu 25 km zum Verladebahnhof. Die Wegequalität im Privatwald war ausgesprochen niedrig (festgefahrener Sand ohne Ausbau). Die Aufgabe bestand darin, innerhalb von 16 Stunden einen Zug mit 2.000 m<sup>3</sup> Industrieholz zu minimalen Kosten zu beladen.

Die Trailer-Variante schied wegen der hohen Transaktionskosten im Verhältnis zum Wert des Holzes aus. Übrig blieben der normale LKW mit Kran und die Spezialhänger mit Traktor. Der Spezialhänger wurde direkt von einem Forwarder beladen, wobei eine optimale Beladeposition quer zur Wegachse gegeben war. Der landwirtschaftliche Schlepper fuhr dann zum Verladebahnhof, wobei auch sehr enge Kurvenradien auf Naturwegen keine Probleme darstellten (Abbildung 56).

**Abbildung 56: Durchfahren enger Kurvenradien auf Naturwegen**

Quelle: Smaltschinski (2005)

Am Verladebahnhof wurden die Spezialhänger dann mit einem Kran auf die Waggons verladen (Abbildung 57).

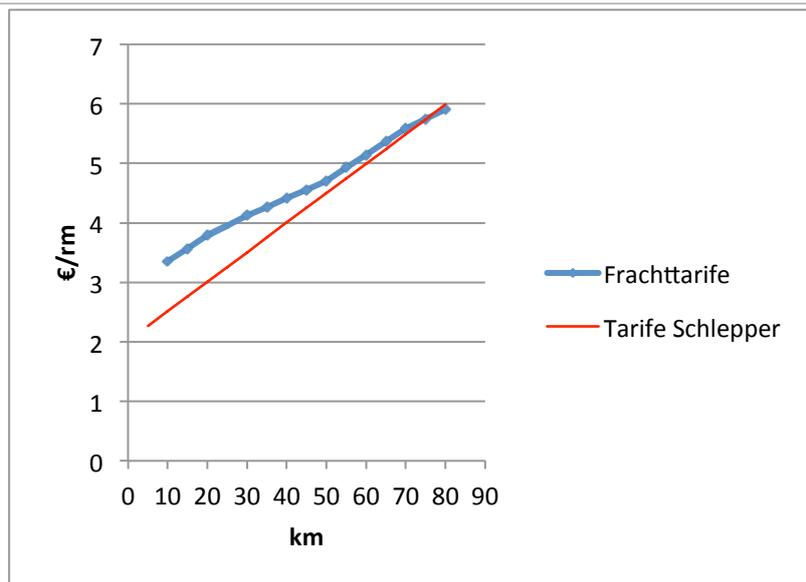
Abbildung 58 zeigt den Vergleich der Frachttarife (€/rm) zwischen LKW und Spezialhänger. Die Kosten beim Transport pro rm ( $\sim 0,6 \text{ m}^3$ ) mit Spezialhänger und Schlepper liegen bis zu einer Distanz von 70 km unter den Frachttarifen eines LKW. Die Variante mit Schlepper und Spezialhänger hat zusätzlich den Vorteil einer Einnahmequelle für die lokalen Bauern. Der Versuch war erfolgreich, wurde aber nicht in die Praxis umgesetzt, da die Frächter nach dem Versuch das Angebot von 3 €/rm machten. Der Spediteur hatte ursprünglich einen Frachttarif von 4,5 €/rm gefordert.

**Abbildung 57: Zugbeladung mit Kran**



Quelle: Smaltschinski (2005)

**Abbildung 58 Vergleich Frachttarife/rm für LKW und Schlepper mit Spezialhänger**



Quelle: Smaltschinski (2005)

#### 4.4 Zusammenstellung und Systematisierung der angewandten Methoden

Die angewandten Methoden in den verschiedenen Ländern und in Deutschland (Kap. 4.2.1 und 4.2.2) sind als Innovationspotentiale in der Logistikkette oder für die Versorgungskette zu sehen. Shahi u. Pulkki<sup>184</sup> stellen in ihrer Analyse Versorgungsketten (supply chains) bis zum Endverbraucher in Kanada in allgemeiner Form zusammen. Dabei werden schematisch zwei Zulieferer, der Endhersteller (original equipment manufacturer OEM) und der Enderbraucher der Produkte als Kette dargestellt.

In der Versorgungskette werden Zulieferer 1 mit der Forstwirtschaft, Zulieferer 2 mit der Holzverarbeitenden Industrie und der OEM ganz allgemein mit einer weiterverarbeitenden Industrie identifiziert. Der Kunde am Markt treibt durch seinen Bedarf die gesamte Kette an und eine übergeordnete Steuerinstanz regelt die Lieferkette, indem Transaktionen ausgelöst werden. Innerhalb der deutschen Forst- und Holzwirtschaft gibt es noch keine Beispiele für eine derartige Steuerinstanz, aber innerhalb anderer Produktreihen bewerkstelligen die großen Internetkonzerne dies inzwischen fast perfekt, indem die Verbraucherwünsche gesammelt, weiterverarbeitet und an die Zulieferer verkauft werden. Es ist nur eine Frage der Zeit, bis die Forst- und Holzwirtschaft mit berücksichtigt wird.

Schränkt man diese Versorgungskette auf die Akteure Forstwirtschaft und Holzverarbeitende Industrie ein, dann verbleiben als Träger der Transaktion die Spediteure. Innerhalb dieser drei Gruppen von Akteuren sind Methoden einzeln oder insgesamt zu systematisieren hinsichtlich: Erzeugung und Bereitstellung von Holzprodukten (Forstwirtschaft), Spediteure (Transaktion) und Erstverarbeiter der Rundholzprodukte (Massivholzindustrie, Zellstoff, Papier, Bioraffinerie...).

##### Methoden Forstwirtschaft

Ziel der Forstwirtschaft ist in diesem Kontext eine Erzeugung von Holzprodukten auf kostengünstigem und effizientem Weg unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeitsbedingungen. Als eine strategische Aufgabe ist die langfristige Bewirtschaftungsplanung zu nennen, wobei lineare Programmierung und Waldwachstumssimulatoren zum Einsatz kommen. Bei der Holzernte selbst wird die Distribution zu Kunden auf der taktischen Ebene über lineare Programmierung (Transportproblem) ermittelt. Im Rahmen der zeitgerechten Bedarfsdeckung der Kunden werden über Integer-Programmierung in diskreten Zeitintervallen die erforderlichen Mengen bereitgestellt, wobei die Erntereihenfolge über Gruppenbildung optimiert wird. Dazu sind minimale Spannbäume<sup>185</sup> oder genetische Algorithmen zu verwenden. Hier wird angenommen, dass als Ergebnis der Optimierung die richtige Menge des richtigen Produkts, in der richtigen Qualität, am richtigen Ort, zum richtigen Zeitpunkt und zum richtigen Preis zur Verfügung gestellt wird. Dies gilt für die üblichen Handelssortimente und die Reststoffe.

##### Methoden Spediteure

Spediteure sind in Deutschland überwiegend kleine Unternehmen, die nach Auftragsvergabe ihre Routen selbst zusammenstellen. Der GeoDat-Standard und das Unternehmen NavLog gewinnen immer mehr an Bedeutung und das Aufsuchen und Finden der Polter wird deutlich erleichtert, wobei immer noch regionale Unterschiede vorhanden sind. Viele Spediteure versu-

---

<sup>184</sup> Shashi u. Pulkki, 2013

<sup>185</sup> Smaltschinski, 2012

chen ihre Transportaufträge so auszuwählen, dass sie Rückfrachtrouten zusammenstellen können. Durch die mangelnde Kooperation der Holzindustrie profitieren sie dabei, da sie mit gleichen Sortimenten konkurrierender Sägewerke Rückfrachten bilden können.

Andererseits belegen die Untersuchungen von Korten u. Heidl<sup>186</sup>, welches Potential bei Kooperation besteht. Ein einzelner Frächter sieht nur seine eigenen Holzlose und versucht das Beste daraus zu machen, indem er nach Möglichkeit Rückfrachten organisiert. Bei Kooperation weitet sich der Blick auf mehr Holzlose und die Möglichkeiten für Rückfrachten oder günstige Anschlussfahrten steigen. Korten u. Heidl<sup>187</sup> beziffern das Einsparpotential auf 7-12 % der gesamten Transportstrecke. Insgesamt haben Frächter bei der Routenoptimierung nur die Möglichkeit der Kooperation, um Routen zu optimieren oder sie sind auf eine Kooperation der Forstwirtschaft oder Holzindustrie angewiesen, die die Routen optimieren.

### Methoden Holzindustrie

Für die Holzindustrie ist wie bei der Forstwirtschaft das Modell der Kooperation durch intensiven Informations- und Rundholzaustausch zu sehen, wobei die in Kap. 4.3.1 erwähnten Methoden zum Tragen kommen können.

## 4.5 Prüfung der Anwendbarkeit auf die Verhältnisse in Baden-Württemberg

Die Struktur der Akteure Waldeigentümer, Spediteure und Holzindustrie in Baden-Württemberg ist ausgesprochen heterogen. Die Anwendbarkeit der beschriebenen Verfahren (Kap. 4.2.1 und Kap. 4.2.2) setzt eine Kooperation zwischen den beteiligten Akteuren und bei Forstbetrieben eine gewisse Größe voraus. So ist eine optimierte Holzdistribution auf Kunden für einen Forstbetrieb von 100 ha Größe ein unnötiger Aufwand. Das Rundholz des Forstbetriebes wird in einem solchen Fall an den Kunden verkauft, der den höchsten Preis bietet. Bei den Landesforsten wird dieses Prinzip ebenfalls angewendet, wenn Rundholzmengen zentral vermarktet werden. Hier wäre eine optimierte Distribution sinnvoll, um die Transportentfernungen und die Emissionen zu verringern. Dies wird bis jetzt nicht durchgeführt. Bei der regionalen Vermarktung stehen die administrativen Forstabteilungen von ForstBW, die nach der Verwaltungsreform in die Landratsämter eingegliedert wurden, in unfreiwilliger Konkurrenz mit den Forstabteilungen benachbarter Landkreise um die Kunden. Ähnliches gilt für die Vermarktung im Gemeinde- und im Privatwald. In der Folge kann die räumliche Lage der Holzlose und damit die Transportentfernung zu den Kunden selten berücksichtigt werden. Rundholz gleicher Art und Qualität wird daher über unnötig lange Strecken transportiert oder Frächter mit Ladungen gleicher Sortimente begegnen sich in entgegengesetzter Richtung fahrend.

Weiterhin wird Rundholz auch in das Ausland verkauft. Dabei wird nicht darauf geachtet, aus welcher Region in Baden-Württemberg dieses Holz stammt. Wenn Laubholz aus dem nördlichen Württemberg in größeren Mengen (> 10.000 m<sup>3</sup>)<sup>188</sup> in Richtung Asien vermarktet wird, verbleiben für die dortigen kleinen bis mittelgroßen Laubholzsägewerke nur noch Einkaufsmöglichkeiten aus dem südlichen Württemberg mit hohen Transportentfernungen.

Der Verkauf von Rundholz nach dem Prinzip des Höchstgebotes ohne Berücksichtigung der räumlichen Lage des Rundholzes führt dabei zu Problemen. Größere Sägewerke müssen nach

---

<sup>186</sup> Korten u. Heidl, 2009

<sup>187</sup> Ebd.

<sup>188</sup> Mündl. Mitteilung B. Keck GmbH

den Konzentrationsprozessen der vergangenen Jahrzehnte die benötigte Rundholzmenge aus immer weiter entfernt liegenden Regionen herbeischaffen, was hohe Transportkosten ergibt. Für kleinere Sägewerke ist die Situation noch schwieriger. Durch die Verkaufsusancen der Forstbetriebe ohne Berücksichtigung der räumlichen Lage der Holzlose sind diese Unternehmen ebenfalls gezwungen, weiter entfernt liegende Holzlose zu kaufen. Dies führt zu einer Verdünnung der Kapitaldecke und daraus folgend zu verringerten Investitionsmöglichkeiten in neue Produktionsanlagen mit allen negativen wirtschaftlichen Begleiterscheinungen.

Die Frächter stehen als Kleinunternehmer zwischen den Akteuren Forst- und Holzwirtschaft, wobei sie ihre Akquisition durch den Verkauf frei Waldstraße bei der Holzindustrie betreiben. Ein LKW kostet ungefähr 300.000 €. Mit Abschreibungen, Reparaturen und Lohnkosten muss ein Frächter pro Tag etwa 1.000 € Umsatz einfahren. Unter Berücksichtigung der Lenkzeiten und der Zeiten für Be- und Entladung kann ein Frächter pro Tag etwa 450 km fahren. Pro Fuhre mit 25 m<sup>3</sup> Nadelholz bei einem Transportpreis von 11 €/m<sup>3</sup> kann er im Idealfall bei sternförmigem Verkehr drei Fuhren pro Tag mit einer Laststrecke von 72 km bewältigen. Dies führt zu einem Tagesumsatz von 825 €. Die Transportentfernungen für eine Laststrecke sind aber gestiegen.

Angesichts dieser Situation sind die national und international beschriebenen Verfahren (Kap. 4.2.1 und 4.2.2) nur schwer anwendbar.

#### **4.5.1 Bewertung hinsichtlich der Potentiale und Hemmnisse**

In Kap. 4.2.1 und 4.2.2 wurden die verschiedensten Innovationspotentiale in der Logistikkette vorgestellt. Diese waren nach einer Analyse auf die jeweils vorliegenden Rahmenbedingungen zugeschnitten (Organisationsstruktur von Forstbetrieben, Spediteuren und Sägewerken, wer kann welche strategischen Entscheidungen hinsichtlich Holzvermarktung fällen? etc.). Dann können Innovationspotentiale ausgeschöpft werden. Das grundlegende Stichwort für die Potentiale heißt Kooperation. Diese kann sowohl zwischen den Forstbetrieben, den Frächtern oder der Holzindustrie entstehen. Das Beispiel der BaySF kann als Kooperation zwischen den Forstbetrieben angesehen werden. Die Vermarktung frei Werk und die Optimierung der Distribution entsprechend dem Bedarf der Holzindustrie führte zu einer deutlichen Reduktion der gesamten Transportstrecke. Schweden wäre ein Beispiel für eine Kooperation der Holzindustrie. Hier werden die Einzugsgebiete für Rohholz einvernehmlich durch lineare Optimierung aufgeteilt. Die Frächter erhalten hier längerfristige Transportaufträge, die zu kostendeckenden Umsätzen führen.

Haupthemmnis in Baden-Württemberg ist eine fehlende Kooperation in allen Gruppen von Akteuren. Auch wenn vielleicht die Vorteile gesehen werden, besteht bei allen durchweg eine ablehnende Haltung.

#### **Befragung von Experten aus Praxis und Wissenschaft**

Im Zeitraum dieses Quellenstudiums wurden verschiedene Experten aus Wissenschaft und Praxis befragt, wie die Logistikkette verbessert werden könnte. Dies konnte nicht systematisch mit einem Fragebogen erfolgen, sondern vor dem Hintergrund bestimmter Fragestellungen (Kooperation, Rückfrachten, Holzdistribution).

Hinsichtlich der Innovationspotentiale der Logistikkette ist ihr Beginn von Bedeutung, nämlich die Bereitstellung von Holz über die Holzvermarktung. Bei ForstBW konnten dazu folgende Informationen eingeholt werden:

Generell wird frei Waldstraße vermarktet. Eine Vermarktung frei Werk wurde vor Jahren erprobt, dann aber wieder aufgegeben. Auf dem Markt werden 80 % Nadel- und 20 % Laubholz angeboten. In einer Grobklassifikation sind hier Nadel- und Laubstammholz und Industrieholz zu unterscheiden.

Nadelstammholz wird entweder zentral oder dezentral über die unteren Forstbehörden vermarktet. Bei der zentralen Vermarktung (~ 2/3 des Nadelholzaufkommens) melden größere Kunden im Herbst vor Beginn des neuen Jahres ihren Bedarf an und in den nachfolgenden Verhandlungen werden Liefermengen und Preise festgelegt. Die Preise haben dann Gültigkeit für die erste Hälfte des Jahres und können in der zweiten Hälfte nochmals verhandelt werden. Bei der Zuteilung der Liefermenge an einen Kunden kann dieser intervenieren, wenn zu hohe Transportentfernungen vorliegen. Durch ForstBW wird dann versucht durch Tausch von Zuteilungen zu einem befriedigenden Ergebnis zu gelangen. Die dezentrale Vermarktung von Nadelstammholz liegt in den Händen der unteren Forstbehörden. Hier werden insbesondere kleinere Sägewerke in der näheren Umgebung berücksichtigt. Das Kennzeichen dieser Regionalen Vermarktung sind dann kürzere Transportentfernungen zu den Kunden.

Beim Sortiment Laubstammholz werden knapp 1/3 der Menge zentral vermarktet, wobei das Gros der Kunden Zwischenhändler sind. Eine zentrale Vermarktung wird auch für Sondersortimente (Furnier) angewandt. Das übrige Laubstammholz wird über die unteren Forstbehörden dezentral und regional vermarktet mit maximalen Transportentfernungen von 60 - 100 km.

Industrieholz wird für größere Kunden zentral, ansonsten dezentral vermarktet. Ein modaler Transport LKW/Zug findet nur in geringem Umfang statt (< 5 %).

Insgesamt wird bei ForstBW keine gesamthafte Optimierung bei der Distribution von Holz durchgeführt, bei der die Transportentfernungen mit Rücksicht auf die räumliche Lage der Holzlose und die der Kunden bei gleichzeitiger Auftragserfüllung minimiert wird. Soweit ForstBW für die Vermarktung im Privat- und Körperschaftswald die Verantwortung übertragen wurde, erfolgt eine Vermarktung wie beschrieben. Die Beschreibung gilt für ein normales Jahr, wenn keine größeren Katastrophen mit nachfolgenden Einschlagsbeschränkungen auftreten.

Die aktuelle wirtschaftliche Situation der Frächter beim Rundholztransport wird allgemein als „sehr schlecht“ bis „ruinös“ eingeschätzt (Korten u. Heindl, 2009). Hier wurden Frächter aus dem Hochschwarzwald, Württemberg und Bayern befragt. Ihre Aussagen stimmen weitgehend mit den Untersuchungen von Korten u. Heindl<sup>189</sup> überein. Die Hauptprobleme bestehen für Frächter in einer schlechten oder ungünstigen Auftragslage im Rundholztransport. Ungünstig bedeutet hier, dass der Heimatstandort des Frächters nicht in die Frachtvergabe einbezogen wird. Dies bedeutet weniger Fahren pro Tag, Arbeitszeiten bis über die rechtlich zulässige Grenze (Lenkzeitverordnung 56 Stunden pro Woche). Dies wird aus Frächtersicht ergänzt durch niedrige Frachttarife, steigende Treibstoffkosten und Mautgebühren. Beides zusammen führt für Frächter vielfach zu einer angespannten ökonomischen Situation, da die Abschreibungen der LKW nur mühevoll zu decken sind. Diese Effekte werden verstärkt durch eine hohe Konkurrenz zwischen den Frächtern.

Eine Dispositions- oder Tourenoptimierungssoftware wird nur von wenigen Unternehmen genutzt. Die meisten sehen keinen Mehrwert in einer Navigationssoftware, da sie sich in ihrer Region sehr gut auskennen und sogar besser navigieren als eine Navigationshilfe, insbesondere bei Störungen wie Staus oder Baustellen (resp. Polizeikontrollen). Dies konnte durch eine Untersuchung eines Frächters eines größeren Laubholzsägers bestätigt werden. Andere bemän-

---

<sup>189</sup> Korten u. Heindl, 2009

geln das Fehlen einer funktionierenden Waldnavigation, die eine große Hilfe bei Planung und Durchführung der Transporte wäre. Alle Unternehmen sind jedoch der Meinung, dass in der aktuellen Situation, in der sich die Rundholztransportbranche befinde, keine große Bereitschaft zur Zusammenarbeit vorhanden sei. Gründe dafür seien das eher schlechte Verhältnis der Speditionen untereinander (Misstrauen und „Einzelkämpfer-Mentalität“).

In Kooperationsmodellen sehen einige auch Vorteile durch eine effizientere Transportlogistik im Rahmen des Rundholztransportes. Die positiven Elemente, die von allen Unternehmen genannt wurden<sup>190</sup>, sind die

- Schaffung von zentralen Strukturen,
- mögliche verbesserte Organisation,
- Einsparungspotenziale durch eine optimierte Transportplanung und
- bessere Positionen bei Preisverhandlungen über Tarife.

Ohne eine zuverlässig funktionsfähige Tourenoptimierungssoftware, die alle notwendigen Variablen im Rundholztransport berücksichtigt (Auftragsabwicklung, Restmengenverwaltung, Aktionsradien der verschiedenen Spediteure etc.), werden die Kooperationsmodelle in der Praxis nur schwer durchführbar sein. Prinzipiell sind aber alle Unternehmen zur Kooperation mit anderen Speditionen bereit. Als Gründe für eine mögliche Zusammenarbeit nennen die Spediteure die Reduktion der Transportkosten sowie eine nachhaltige Sicherung und Stärkung der eigenen wirtschaftlichen Position.

In diesem Zusammenhang wurde bei der Fa. Keck eine Bachelor-Arbeit verfasst<sup>191</sup>. Man kann diese Arbeit als Intensivbefragung auffassen, da die Fahrtstrecken eines Frächters über zwei Wochen hinweg via GPS aufgezeichnet wurden. Eine nachträgliche Berechnung des Rückfrachtpotentials ergab, dass alle Rückfrachtkombinationen von dem Frächter genutzt wurden. Es gab allerdings eine Dreiecksroute, die nicht erkannt wurde und die eine hohe Leerfahrtreduktion ergeben hätte. Insgesamt konnte bei einer 30 %-igen Leerfahrtreduktion durch Rückfrachtbildung durch den Frächter ein zusätzliches Einsparpotential von 6 % bei der gesamten Transportstrecke nachgewiesen werden, welches auf Vorladen mit Heimfahrt zurückzuführen ist. Navigationssysteme und andere IT-Einrichtungen lehnte der Frächter zum gegenwärtigen Zeitpunkt als unnötig ab. Insgesamt bestätigte der Frächter die Angaben hinsichtlich der Wirtschaftssituation von Korten u. Heindl<sup>192</sup> bis auf eine Kooperation mit anderen Frächtern. Diese hielt er praktisch für unmöglich.

Aus Gesprächen mit Sägewerken wurde deutlich, dass hier im Allgemeinen kooperative Möglichkeiten nur zwischen Betrieben denkbar sind, die nicht konkurrierende Produkte verarbeiten (Laubholz und Nadelholz, Stammholz unterschiedlicher Dimension ...). Zwischen Betrieben mit konkurrierenden Produkten finden Kooperationen nicht in größerem Maßstab statt, sondern nur in Einzelfällen und insbesondere nur bei entsprechendem Vertrauensverhältnis zwischen den Beteiligten. Allerdings gibt es durchaus Beispiele für Rückfrachtoptimierung innerhalb einzelner Betriebe mit eigenem Fuhrpark, wobei dann Rundholz und Sägeprodukte optimiert transportiert werden, um den Leerfahrtanteil so gering wie möglich zu halten. Solche Modelle

---

<sup>190</sup> Korten u. Heindl, 2009

<sup>191</sup> Klenk, 2015

<sup>192</sup> Korten u. Heindl, 2009

sind jedoch eher in Bereichen mit großen Transportentfernungen und bei entsprechend großer Betriebsgröße anzutreffen.

#### **4.5.2 Möglichkeiten des Abbaus bestehender Hemmnisse bei der Potentialausschöpfung**

Die Möglichkeiten bestehende Hemmnisse bei der Potentialausschöpfung zu beseitigen oder abzubauen sind weniger technischer als politischer Art. Die Verbände der Forst- und Holzwirtschaft sowie die der Frächter sind gefordert, gemeinsam die beschriebenen Probleme zu behandeln und tragbare Lösungen zu finden. Dabei wären insbesondere folgende Themen innerhalb und zwischen den Gruppen von Akteuren zu nennen:

- Forstwirtschaft: flächige Kooperation von Forstbetrieben und gemeinsame Vermarktung von Holz mit einer optimierten Distribution der anfallenden Sortimente zu Kunden, um die Transportstrecken zu senken. Für ForstBW bietet sich dabei eine Vermarktung frei Werk wie in Bayern an.
- Frächter: Ein Frächter sieht nur die eigenen Aufträge, die er möglicherweise über Rückfrachten zu Kunden transportieren kann. Bei Kooperation von Frächtern ist die Anzahl der Polter in einem Pool größer. Dadurch ergeben sich mehr Kombinationsmöglichkeiten für Rückfrachten.
- Sägewerke: Kooperation beim Holztransport zwischen nicht konkurrierenden Sägewerken (Laubholz/Nadelholz, Industrieholz/Abschnitte ...).

#### **4.5.3 Ergebnisse: Realistische Möglichkeiten der Transportoptimierung in Baden-Württemberg ohne Änderung der Fahrzeugkonfiguration**

Die Optimierungsmöglichkeiten und die damit verbundenen Voraussetzungen wurden in der Literaturstudie ausführlich dargestellt (Kooperation, optimierte Distribution, Rückfrachten, gesamthafte Bearbeitung der Holzbereitstellungskette). Eine wichtige Voraussetzung waren einheitliche strategische Absichten der Akteure hinsichtlich der Logistik einer Versorgungskette. Derartige Voraussetzungen sind in Baden-Württemberg auf politischer Ebene herzustellen. Eine gewisse Hoffnung gründet auf dem Plan, den Staatswald in Baden-Württemberg zu einem Wirtschaftsbetrieb ähnlich wie in Bayern umzugestalten. Dann sind die entwickelten Programme von Bedeutung und es ist auf eine gewisse Sogwirkung zu hoffen, wobei sich der Gemeinde- und Privatwald anschließen könnten. Bei der Transportstrecke sind dann Einsparpotentiale in der Größenordnung von 10 bis 15 % zu erwarten.

Für die Realisierung einer Transportoptimierung ist neben der Kooperationsbereitschaft der Akteure noch eine ganze Reihe von informationstechnischen Problemen zu lösen. Der Investitionsaufwand ist dabei sekundär: Wenn der ökonomische Vorteil als ausreichend angesehen wird, erfolgen automatisch die notwendigen Investitionen und eine Selbstregulation des Systems. Politische Anreize haben wegen des immanenten Hangs zur nachfolgenden Regulation etwas höchst Zweiseitiges. Empfehlungen an die Politik für die Schaffung sinnvoller ordnungspolitischer Rahmenbedingungen (steuerliche Belastungen, Modifikation Lenkzeiten...) sind wahrscheinlich erfolgversprechender.

Grundsätzliche Verbesserungen sieht Borchering<sup>193</sup> in einer Reduktion der unproduktiven Verweilzeiten der LKW im Werk, einem besseren Informationsfluss bezüglich der Holzlagerorte

---

<sup>193</sup> Borchering, 2007

oder der Zusammenfassung kleinerer Holzmengen zu Poltern ausreichender Dimension. Einen LKW-Schichtbetrieb, Trailer-Systeme, Rückfrachten oder globale Flottenoptimierungsanwendungen werden prinzipiell positiv, aber in der Praxis skeptisch beurteilt.

#### **4.5.4 Darstellung der Anknüpfungsmöglichkeiten zu anderen Arbeitspaketen**

Anknüpfungsmöglichkeiten zu anderen Arbeitspaketen ergeben sich bei Kap. 1 (THG-Emissionen) und Kap. 2 (Wettbewerbsfaktoren), da durch die abgeschlossenen und noch laufenden Projekte eine Vielzahl von Vergleichsdaten vorliegt, die weiter ausgewertet werden können. Als Impact für Folgeprojekte wird die Transportoptimierung durch Rückfrachten zwischen nicht konkurrierenden Sägewerken in Baden-Württemberg gesehen, um Emissionen und Straßenbelastung bei gleichem Transportvolumen zu senken und die Wettbewerbsfähigkeit der Holzwirtschaft ganz allgemein zu steigern.

Hinsichtlich der Straßenbelastung wurde bereits direkt mit der Universität Stuttgart (Simulationsrechnung Straßenbelastung; vgl. Kap. 6) und der Technischen Universität Berlin

(Simulationsrechnung Brücken; vgl. Kap. 7) zusammengearbeitet. Hier wurden reale Transportdaten aus Bayern zu Verfügung gestellt und mit Verkehrszählungen verglichen. Da für Baden-Württemberg keine belastbaren Daten vorliegen, kann dies nur durch eine Simulation berechnet werden. Dies war im gegenwärtigen Projekt nicht realisierbar, kann aber als Impact für Folgeprojekte bezeichnet werden. Weiterhin besteht in der Zusammenarbeit mit der FVA Baden-Württemberg und der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (Waldwege; vgl. Kap 8) die Möglichkeit, das forstliche Wegenetz in die öffentliche Infrastruktur einzubinden, um ein effizientes Routing zu gestalten und überhaupt die Grundlage für eine Transportoptimierung zu schaffen.

## 4.6 Literatur

- Ahmed, Sahinidis N.V. (1998): Robust Process Planning under Uncertainty. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 37, No. 5: 1883-1892.
- Almeder, C., Preusser, M., Hartl, R.F. (2009): Simulation and Optimization of Supply Chains: Alternative or Complementary Approaches? *OR Spectrum*, Vol. 31, No. 1: 95-119.
- Alonso-Ayuso, A., Escudero, L.F., Garín, A., Ortuño, M.T., Pérez G. (2003): An Approach for Strategic Supply Chain Planning under Uncertainty based on Stochastic 0-1 Programming," *Journal of Global Optimization*, Vol. 26, No. 1: 97-124.
- Angerhofer, B.J., Angelides, M.C. (2000): System Dynamics Modeling in Supply Chain Management: Research Review. 32th Conference on Winter Simulation, Orlando, 10-13 December 2000: 324-351.
- Anupindi, R., Bassok, Y. (1999): Supply Chain Contracts with Quantity Commitments and Stochastic Demand. In: S. Tayur, R. Ganeshan and M. Magazine, Eds., *Quantitative Models for Supply Chain Management*, Springer: 233-268. doi: 10.1007/978-1-4615-4949-9.
- Beaudoin, D., LeBel, L., Frayret, J.M. (2007): Tactical Supply Chain Planning in the Forest Products Industry through Optimization and Scenario-Based Analysis. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 37, No. 1: 128-140.
- Behlau, T., Strothotte, C., Ziems, D., Schurholz, A., Schmitz, M. (2003): Modeling and Simulation of Supply Chains. Zitiert in: Shashi S, Pulkki R (2013) Supply Chain Network Optimization of the Canadian Forest Products Industry: A Critical Review. *American Journal of Industrial and Business Management* 3: 631-643.
- Benders, J. (1962): Partitioning Procedures for Solving Mixed- Variables Programming Problems. *Numerische Mathematik*, Vol. 4, No. 1: 238-252.
- Biswas, S., Narahari, Y. (2004): Object Oriented Modeling and Decision Support for Supply Chains. *European Journal of Operational Research*, Vol. 153, No. 3: 704-726.
- Bleicher, K. (2011): *Das Konzept integriertes Management*. Campus, Frankfurt/Main, New York. 690 S.
- Bloech, J., Ihde, G.B. (1997): *Vahlens Großes Logistik Lexikon*. Logistik total. Verlag Vahlen. 1301 S.
- Bodelschwingh, E. von (2004): Das System VALMETrailer. *Forst & Technik* 16(6): 14-18.
- Bodelschwingh, E. von (2005): *Analyse der Rundholz-Logistik in der Deutschen Forst- und Holzwirtschaft – Ansätze für ein übergreifendes Supply Chain Management entlang der gesamten Wertschöpfungskette*. Dissertation am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München. 214 S.
- Bodelschwingh, E. von, Bauer, J., Longo M. (2003): Management von Informations- und Materialflüssen mit der Logistiksoftware GeoMail. *AFZ – Der Wald* 58(17): 855-857.
- Bodelschwingh, E. von (2001) *Rundholztransport-Logistik - Situationsanalyse und Einsparpotentiale*. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München. 94 S.
- Bok, J., Grossmann, I.E., Park, S. (2000): Supply Chain Optimization in Continuous Flexible Process Networks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 39, No. 5: 1279-1290.
- Borcherding, M. (2007): *Rundholztransportlogistik in Deutschland - eine transaktionskostenorientierte empirische Analyse*. Dissertation, Fakultät Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, Universität Hamburg. 252 S.

- Borshchev, A., Filippov, A. (2004): From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling: Reasons, Techniques, Tools. The 22nd International Conference of the System Dynamics Society, Oxford, 25-29 July 2004: 1-23.
- Bose, S., Pekny, J.F. (2000): A Model Predictive Framework for Planning and Scheduling Problems: A Case Study of Consumer Goods Supply Chain. *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 24, No. 2-7: 329-335.
- Bredström, D., Lundgren, J.T., Rönnqvist, M., Carlsson, D., Mason, A. (2004): Supply Chain Optimization in the Pulp Mill Industry-IP Models, Column Generation and Novel Constraint Branches. *European Journal of Operational Research* Vol. 156, No. 1: 2-22.
- Carlsson, D., Rönnqvist, M. (2004): Supply chain Management in forestry – case studies ä Södra Cell AB. *European Journal of Operational research* 163: 589-616.
- Chang, Y., Makatsoris, M. (2001): Supply Chain Modeling Using Simulation. *International Journal of Simulation*, Vol. 2, No. 1: 24-30.
- Chen, B.W., Gadow, K. von (2002): Timber harvest planning with spatial objectives, using the method of simulated annealing. *Forstw Cbl* 121: 25–34.
- Church, L.R. (2007): Tactical-Level Forest Management Models. In: A. Weintraub, C. Romro, T. Bjornal, R. Epstein and J. Miranda, Eds., *Handbook of Operations Research in Natural Resources* (Vol. 99), Springer, New York: 343-363.
- Dantzig, G.B. (1951): Application of the Simplex Method to the Transportation Problem. In: T.C. Koopmans (ed.), *Activity Analysis of Production and Allocation*, John Wiley & Sons, New York: 359–373.
- D'Amours, S., Rönnqvist, M., Weintraub, A. (2008): Using Operational Research for Supply Chain Planning in the Forest Products Industry. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, Vol. 46, No. 4: 265- 281.
- Dudek, G., Stadtler, H. (2005): Negotiation-Based Collaborative Planning between Supply Chains Partners. *European Journal of Operational Research*, Vol. 163, No. 3: 668-687.
- Epstein, R., Karlsson, J., Rönnqvist, M., Weintraub, A. (2007): Forest transportation. In Weintraub A, Romero C, Bjørndal T and Epstein R (eds): *Handbook on Operations Research in Natural Resources*, Chapter 20, Kluwer Academic Publishers, New York: 391-404.
- Fjeld, D.E. (2001): The Wood Supply Game as an Educational Application for Simulating Dynamics in the Forest Sector. In: K. Sjostrom and L. O. Rask, Eds., *Supply Chain Management for Paper and Timber Industries*, Växjö, 2001: 241-251.
- Forget, P., D'Amours, S., Frayret, J.M. (2008): Multi-Behaviour Agent Model for Planning in Supply Chains: An Application to the Lumber Industry. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 24, No. 5: 664-679.
- Forget, P., D'Amours, S., Frayret, J., Gaudreault, J. (2009): Study of the Performance of Multi-Behaviour Agents for Supply Chain Planning. *Computers in Industry*, Vol. 60, No. 9: 698-708.
- Forrester, J.W. (1961): *Industrial Dynamics*. Massachusetts Institute of Technology Press, see Lane DC and Sterman JD (2011) Jay Wright Forrester. Chapter 20 in *Profiles in Operations Research: Pioneers and Innovators* Gass S and Assad A(eds.). New York, Springer: 363-386.
- Forsberg, M. (2002): Estimating the efficiency of a forest supply and the value of horizontal cooperation. *Symposium on Models and Systems in Forestry, Chile 2002*: 1-11.

- Forsberg, M., Frisk, M., Rönnqvist, M. (2005): "FlowOpt – a decision support tool for strategic and tactical transportation planning in forestry", *International Journal of Forest Engineering*, 16(2): 101–114.
- Fox, M.S., Barbuceanu, M., Teigen, R. (2000): Agent-Oriented Supply Chain Management. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 12, No. 2-3: 165-188.
- Frayret, J., D'Amours, S., Rousseau, A., Harvey, S., Gaudreault, J. (2007): Agent-Based Supply-Chain Planning in the Forest Products Industry. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 19, No. 4: 358-391.
- Fred, G., Kelly, J.P., Laguna, M. (1999): New Advances for Wedding Optimization and Simulation. In: P. A. Farrington, H. B. Nembhrad, D. T. Sturrock and G. W. Evans, Eds., *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, Phoenix, 5-8 December 1999: 255-260.
- Freitag, B. (2010): Einsatz von Rundholzwechselbrücken beim Transport mit Forwarder und LKW - Potenziale eines neuartigen Transportsystems. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München; 101 S.
- Friedl, K., Kanzian, C., Stampfer, K. (2004): Netzwerk Holz Endbericht. Institut für Forsttechnik, Department für Wald und Bodenwissenschaften, Universität für Bodenkultur Wien. 109 S.
- Fu, M.F. (2002): Feature Article: Optimization for Simulation: Theory vs. Practice. *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 14, No. 3: 192-215.
- Gjerdrum, J., Shah, N., Papageorgiou, L.G. (2001): A Combined Optimization and Agent-Based Approach to Supply Chain Modelling and Performance Assessment. *Production Planning & Control*, Vol. 12, No. 1: 81-88.
- Grötschel, M. (2004): Lineare Optimierung. *Algorithmische Diskrete Mathematik II*, Vorlesung 2003/4. 229 S.
- Guajardo, M., Rönnqvist, M. (2015): Operations Research models for coalition structure in collaborative logistics. *EUROPEAN JOURNAL OF OPERATIONAL RESEARCH*, Volume 240, Issue 1, 147–159.
- Gunn, E.A. (2007): Models for Strategic Forest Management. In: A. Weintraub, C. Romro, T. Bjornal, R. Epstein and J. Miranda, Eds., *Handbook of Operations Research in Natural Resources* (Vol. 99), Springer, New York: 317-341.
- Gunnarsson, H., Rönnqvist, M., Carlsson, D. (2006): A Combined Terminal Location and Ship Routing Problem. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 57, No. 8: 928-938.
- Gunnarsson, H., Rönnqvist, M., Carlsson, D. (2007): Integrated Production and Distribution Planning for Södra Cell AB. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, Vol. 6, No. 1: 25-45.
- Gupta, A., Maranas, C.D. (2000): A Two-Stage Modeling and Solution Framework for Multisite Midterm Planning under Demand Uncertainty. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 39, No. 10: 3799-3813.
- Gupta, A., Maranas, C.D. (2003): Managing Demand Uncertainty in Supply Chain Planning. *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 27, No. 8-9: 1219-1227.
- Gutiérrez, G.J., Kouvelis, P., Kurawarwala, A.A. (1996): A Robustness Approach to Uncapacitated Network Design Problems. *European Journal of Operational Research*, Vol. 94, No. 2: 362-376.

- Hirsch, P. (2011): Minimizing empty truck loads in round timber transport with tabu search strategies. *International Journal of Information Systems and Supply Chain Management*, 4: 15–41.
- Hirsch, P., Gronalt, M. (2008): Planungsverfahren zur Leerfahrtenreduktion im Rundholztransport. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen*. 125. Jahrgang Heft 4: 267–291
- Hirsch, P. (2006): Optimization in Round Timber Transport, Doctoral thesis, University of Vienna, Vienna, Austria.
- Hitchcock, F.L. (1941): The distribution of a product from several resources to numerous localities. *Journal of Mathematical Physics*, Vol. 20: 224-230.
- Hultqvist, D., Olsson, L. (2004): Demand Based Tactical Planning of the Roundwood Supply Chain with Respect to Stochastic Disturbance. *Fiber Science and Communication Network (FSCN)*, Sundsvall, Sweden, Tech. Rep. FSCN R-03-44. 572 S.
- Jones, A., Seville, D., Meadows, D. (2001): Resource Sustainability in Commodity Systems: The Sawmill Industry in the Northern Forest. *System Dynamics Review*, Vol. 18, No. 2: 171-204.
- Kaihara, K. (2001): Supply Chain Management with Market Economics. *International Journal of Production Economics*, Vol. 73, No. 1: 5-14.
- Kantorovich, L.V. (1939): Mathematical methods in the organization and planning of production. Übersetzung in *Management Sci* 6: 366–422.
- Kelton, W.D., Sadowski, R.P., Sadowski, D.A. (2002): *Simulation with Arena*. McGraw-Hill, New York . 820 S.
- Kleijnen, J.P.C. (2005): Supply Chain Simulation Tools and Techniques: A Survey. *International Journal of Simulation and Process Modeling*, Vol. 1, No. 1-2: 82- 89.
- Klenk, A. (2015): Analyse konkreter Rundholztransporte- Optimierungsansätze. Bachelorarbeit. Hochschule für Forstwirtschaft, Rottenburg. 67 S.
- Korten, S., Heindl, U. (2008): Mehr Effizienz im Rundholztransport. *LWF aktuell* 65/2008: 12-13.
- Korten, S., Heindl, U. (2009): Optimierung des Rundholztransportes durch betriebsübergreifende Tourenplanung. Schlussbericht. Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München. 80 S.
- Kuhn, A., Rabe, M. (1998): *Simulation in Production and Logistik (Fallbeispielsammlung)*. Springer, Heidelberg. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-72068-0>.
- Law, A.M., Kelton, W.D. (2000): *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw-Hill, New York. 760 p.
- Lee, W.B., Lau, H.C.W. (1999): Multi-Agent Modeling of Dispersed Manufacturing Networks. *Expert Systems with Applications*, Vol. 16, No. 3: 297-306.
- Lee, Y.H., Cho, M.K., Kim, S.J., Kim, Y.B. (2002): Supply Chain Simulation with Discrete-Continuous Combined Modeling. *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 43, No. 1-2: 375-392.
- Lemieux, S., D'Amours, S., Gaudreault, L., Frayret, J.M. (2009): Agent-Based Simulation to Anticipate Impacts of Tactical Supply Chain Decision-Making in the Lumber Industry. *Interuniversity Research Centre on Enterprise Networks, Logistics and Transportation (CIRRELT)*, Montreal: 30 p.
- Leung SCH, Tsang SOS, Ng WL, Wu Y (2007) A Robust Optimization Model for Multi-Site Production Planning Problem in an Uncertain Environment. *European Journal of Operational Research*, Vol. 181, No. 1: 224-238.

- Lin, F.R., Tan, G.W., Shaw, M.J. (1998): Modeling Supply Chain Networks by a Multi-Agent System. 31th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Kohala Coast, 6-9 January 1998: 1-10.
- Lonnstedt, L. (1986): A Dynamic Forest Sector Model with a Swedish Case. *Forest Science*, Vol. 32, No. 2: 377-397.
- Mele, F.D., Guillén, G., Espuña, A., Puigjaner, L. (2006): A Simulation-BASED Optimization Framework for Parameter Optimization of Supply-Chain Networks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 45, No. 9: 3133-3148.
- Mendoza, G.A., Meimban, R.J., Luppold, W.G., Araman, P.A. (1991): Combining Simulation and Optimization Models for Hardwood Lumber Production. The SAP National Convention, San Francisco, 4-7 August 1991: 356- 361.
- Monostori, L., Vancza, J., Kumara, S.R.T. (2006): Agent- Based Systems for Manufacturing," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 55, No. 2: 697-720.
- Moyaux, T., Chaibdraa, B., D'Amours, S. (2004): An Agent Simulation Model for the Quebec Forest Supply Chain. The International Workshop on Cooperative Information, Agent No. 8, Erfurt, 27-29 September 2004: 226-241.
- Parunak, H.V., Savit, R., Riolo, R.L. (1998): Agent-Based Modeling vs. Equation-Based Modeling: A Case Study and User's Guide. In: J. S. Sichman, R. Conte and N. Gilbert, Eds., *Proceedings of the First International Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulations*, Paris, 4-6 July 1998: 10-25.
- Pegden, C.D., Shannon, R.E., Sadowsky, R.P. (1990): *Introduction to Simulation Using SIMAN*. McGraw-Hill, New York. 489 S.
- Perea-López, E., Ydstie, B.E., Grossmann, I.E. (2003): A Model Predictive Control Strategy for Supply Chain Optimization. *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 27, No. 8-9: 1201-1218.
- Petkov, S.B., Maranas, C.D. (1997): Multiperiod Planning and Scheduling of Multiproduct Batch Plants under Demand Uncertainty. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 36, No. 11: 4864-4881.
- Randhawa, S.U., Brunner, C.C., Funck, J.W., Zhang, G.C. (1994): A Discrete-Event Object-Oriented Modeling Environment For Sawmill Simulation. *Simulation*, Vol. 62, No. 2: 119-130.
- Rönnqvist, M. (2003): Optimization in Forestry. *Mathematical Programming*, Vol. 97, No. 1-2: 267-284.
- Rönnqvist, M., Ryan, R. (1995): Solving Truck Despatch Problem in Real Time. 31st Annual Conference of the Operational Research Society of New Zealand, Wellington, 31 August-1 September 1995: 165-172.
- Santoso, T., Ahmed, S., Goetschalckx, M., Shapiro, (2005): A Stochastic Programming Approach for Supply Chain Network Design under Uncertainty. *European Journal of Operational Research*, Vol. 167, No. 1: 96- 115.
- Scheuerer, S. (2006): A tabu search heuristic for the truck and trailer routing problem, *Computers & Operations Research*, 33: 894-909.
- Schwarzbauer, P., Rametsteiner, E. (2001): The Impact of SFM-Certification on Forest Product Markets in Western Europe-An Analysis Using a Forest Sector Simulation Model. *Forest Policy and Economics*, Vol. 2, No. 3-4: 241-256.

- Shapiro, J.F. (2001): Modeling the Supply Chain. Wadsworth Group, Pacific Grove. 606 p.
- Shashi, S., Pulkki, R. (2013): Supply Chain Network Optimization of the Canadian Forest Products Industry: A Critical Review. *American Journal of Industrial and Business Management* 3: 631-643.
- Shen, W., Hao, Q., Yoon, H.J., Norrie, D.H. (2006): Applications of Agent-Based Systems in Intelligent Manufacturing: An Updated Review. *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 20, No. 4: 415-431.
- Smaltschinski, T. (2005): Pilotstudie Heidmark Variantenvergleich verschiedener Transportmittel zu einem Verladebahnhof. Lehrstuhl für Biometrie und Forstliche Informatik Universität Tharandt. 18 S.
- Smaltschinski, T. (2010): Reduktion der Leerfahrten beim Rundholztransport. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.*, 181. Jg., 11/12: 197–205.
- Smaltschinski, T., Müller, M., Becker, G. (2011): Distributionslogistik der Bayerischen Staatsforsten für Rundholz. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.*, 182. Jg., 3/4: 53-59.
- Smaltschinski, T., Seeling, U., Becker, G. (2012): Clustering forest harvest stands on spatial networks for optimised harvest scheduling. *Annals of Forest Science* 69:651–657.
- Smaltschinski, T., Müller, M., Opferkuch, M., Jaeger, D. (2013): Distribution of logs. *FORMEC*, Stralsund Oct. 11 S.
- Stäblein, T., Baumgärtel, H., Wilke, J. (2007): The Supply Net Simulator SNS: An Artificial Intelligence Approach for Highly Efficient Supply Network Simulation. H. O. Günther, D. C. Mattfeld and L. Suhl, Eds., *Management Logistischer Netzwerke*, Physica-Verlag, Heidelberg: 85-110.
- Stadtler, H. (2004): Supply Chain Management and Advanced Planning-Basics, Overview and Challenges. *European Journal of Operational Research*, Vol. 163, No. 3: 575-588.
- Sterman, J.D. (2000): *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw Hill, New York [80].
- Swisher, J.R., Jacobson, S.H., Hyden, P.D., Schruben, L.W. (2000): A Survey of Simulation and Optimization Techniques and Procedures. In: J. A. Joines, R. R. Barton, K. Kang and P. A. Fishwick, Eds., *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, Orlando, 10-13 December 2000: 119-128.
- Syarif, A., Yun, Y., Gen, M. (2002): Study on Multi-Stage Logistic Chain Network: A Spanning Tree-Based Genetic Algorithm Approach. *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 43, No. 1-2: 299-314.
- Terzi, S., Cavalieri, S. (2004): Simulation in the Supply Chain Context: A Survey. *Computers in Industry*, Vol. 53, No. 1: 3-16.
- Timpe, C.H., Kallrath, J. (2000): Optimal Planning in Large Multi-Site Production Networks. *European Journal of Operational Research*, Vol. 126, No. 2: 422- 435.
- Towill, D.R., Naim, M.M., Wikner, J. (1992): Industrial Dynamics Simulation Models in the Design of Supply Chains. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 22, No. 5, 1992: 3-13.
- Troncoso, J.J., Garrido, R.A. (2005): Forestry Production and Logistics Planning: An Analysis Using Mixed-Integer Programming. *Forest Policy and Economics*, Vol. 7, No. 4: 625-633.

- Truong, T.H., Azadivar, F. (2003): Simulation Based Optimization for Supply Chain Configuration Design. In: S. Chick, P. J. Sánchez, D. Ferrin and D. J. Morrice, Eds., Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, New Orleans, 7-10 December 2003: 1268-1275.
- Vergara, F.E., Khouja, M., Michalewicz, Z. (2002): An Evolutionary Algorithm for Optimizing Material Flow in Supply Chains. Computers and Industrial Engineering, Vol. 43, No. 3: 407-421.
- Vila, D., Martel, A., Beauregard, D. (2006): Designing Logistics Networks in Divergent Process Industries: A Methodology and Its Application to the Lumber Industry. International Journal of Production Economics, Vol. 102, No. 2: 358-378.
- Weintraub, A., Barahona, F., Epstein, R. (1994): A Column Generation Algorithm for Solving General Forest Planning Problems with Adjacency Constraints. Forest Science, Vol. 40, No. 1: 142-161.
- Weintraub, A., Jones, G., Meacham, M., Magendzo, A., Malchuk, D. (1995): Heuristic Procedure for Solving Mixed-Integer Harvest Scheduling Transportation Planning Models. Canadian Journal of Forest Research, Vol. 25, No. 10: 1618-1626.
- Weintraub, A., Romero, C. (2006): Operations Research Models and the Management of Agricultural and Forestry Resources: A Review and Comparison, Interfaces, Vol. 36, No. 5: 446-457.
- Zazgornik, J., Gronalt, M., Hirsch, P. (2012): The Combined Vehicle Routing and Foldable Container Scheduling Problem: A Model Formulation and Tabu Search Based Solution Approaches. INFOR, Vol. 50, No. 4, November 2012: 147-162.
- Zhou, G., Min, H., Gen, M. (2002): The Balanced Allocation of Customers to Multiple Distribution Centers in the Supply Chain Network: A Genetic Algorithm Approach. Computers and Industrial Engineering, Vol. 43, No. 1-2: 251-261.

## 5 Fahrzeugtechnik

### Bearbeitung

Karlsruher Institut für Technologie

Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Tristan Reich, Bernhard Jahnke, Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

### 5.1 Betrachtete Fahrzeugtypen

Auf deutschen Straßen bewegt sich im Güterverkehr sowie im Holztransport ein breites Spektrum an unterschiedlichen Lastkraftwagen. Um im Rahmen des Holzlogistik-Projektes eine einheitliche Diskussionsgrundlage in fahrzeugbezogenen Themen zu erzeugen, ist es sinnvoll exemplarisch typische etablierte Fahrzeuge des Holztransportes zu definieren. Um die folgenden Überlegungen und Berechnungen in einem sinnvollen Rahmen zu halten, wurde auf Basis der Bestandsstatistik des Kraftfahrt-Bundesamt vom 01.01.2012, der Richtlinie 96/53/EWG sowie dem aktuellen Angebot der Fahrzeug und Aufbauhersteller repräsentative Fahrzeugkonfigurationen ausgewählt. Im Folgenden werden die entscheidenden Punkte dieser Auswahl erläutert.

*„Die statistischen Auswertungen umfassen alle nach der Fahrzeug-Zulassungsverordnung (FZV) in Deutschland zugelassenen bzw. angemeldeten Fahrzeuge, denen ein Kennzeichen zugeteilt wurde. Mit einbezogen sind Fahrzeuge, die ein Versicherungskennzeichen führen sowie Fahrzeuge der Bundespolizei und des Technischen Hilfswerkes (THW). Dagegen sind nicht einbezogen die Fahrzeuge der Bundeswehr sowie Fahrzeuge mit rotem bzw. Kurzzeitkennzeichen und mit Ausfuhrkennzeichen.“*<sup>194</sup>

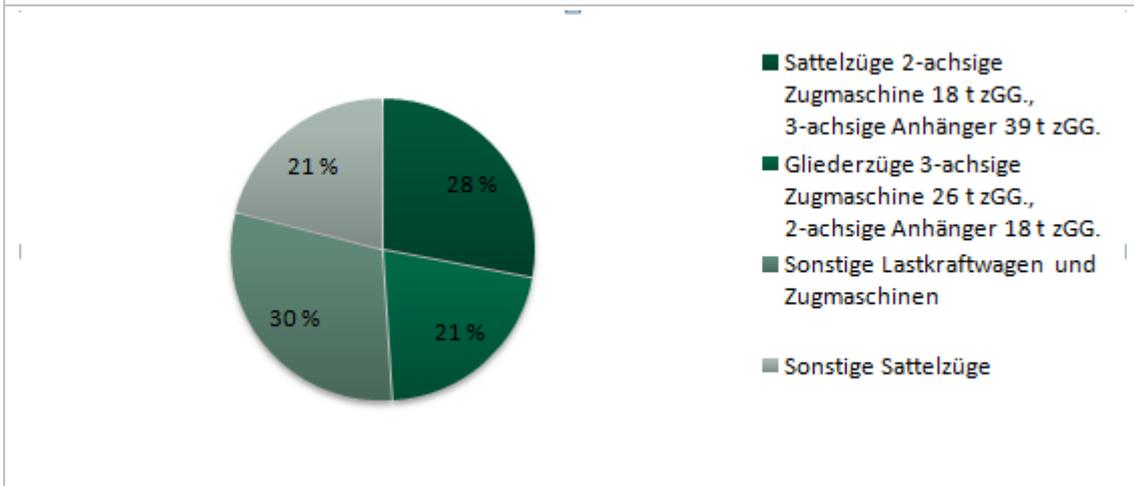
#### 5.1.1 Güterverkehr

Im deutschen Güterverkehr sind vorwiegend Lastkraftwagenzüge mit einem zulässigen Gesamtgewicht (nachfolgend: zGG) von 40 t bzw. 44 t im kombinierten Verkehr anzutreffen. Der Bestandsstatistik des Kraftfahrt-Bundesamtes vom 01.01.2014<sup>1</sup> ist hierzu zu entnehmen, dass in Deutschland etwa 367.034 Lastkraftwagenzüge mit einem zGG von über 35 t zugelassen sind.

Davon sind 49,3 % als Sattelzug ausgeführt. Bei den Sattelzügen bestehen 56,5 % aus Fahrgestellen mit 18 t zGG in Kombination mit einem Auflieger mit 39 t zGG. Das hohe zGG des Aufliegers kommt durch die Stützlast der Sattelkupplung zustande. Weiter zeigt die Verteilung des Fahrzeugbestandes, dass bei Gliederzügen Fahrgestelle mit einem zGG von 26 t die größte Verbreitung haben und überwiegend mit Deichselanhänger mit 18 t zGG kombiniert werden (insgesamt 21,1 %). Die Verteilung zwischen Gelenkdeichsel und Zentralachsanhänger kann dieser Statistik nicht entnommen werden. Abbildung 59 verdeutlicht diese Verteilung.

---

<sup>194</sup> (Kraftfahrt-Bundesamt, 2014)

**Abbildung 59: Lastkraftwagenzüge mit einem zGG über 35t**

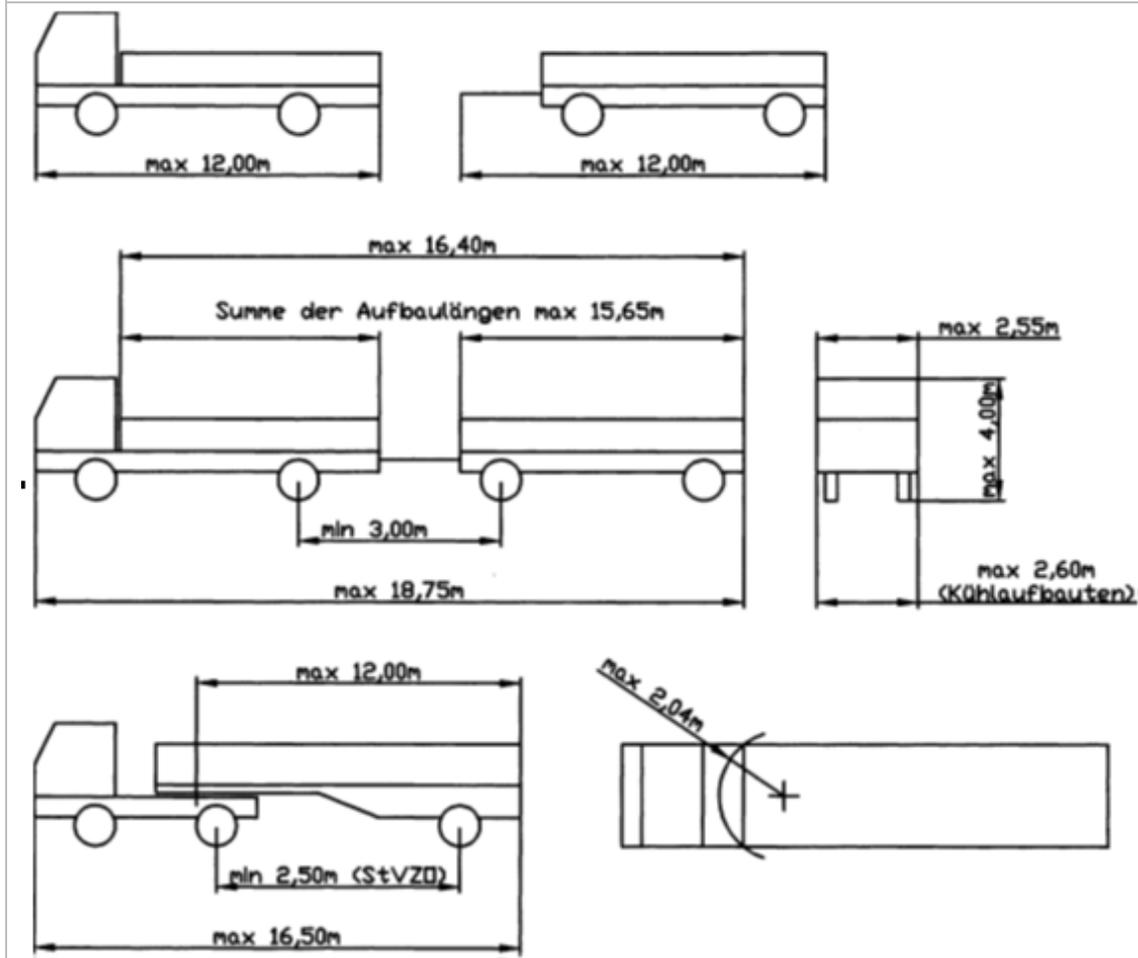
Quelle: Daten aus Kraftfahrt-Bundesamt (2014)

Höchstzulässige Achslasten sowie Längen- und Teillängen von Lastkraftwagen sind in Richtlinie 96/53/EWG<sup>195</sup> festgelegt. Zur optimalen Ausnutzung des zulässigen Transportvolumens werden die in Abbildung 60 dargestellten Maße meistens voll ausgeschöpft. Ähnlich verhält es sich mit den Achslasten. Um die Antriebsleistung mit geringem Schlupf und damit hohen Wirkungsgraden auf die Straße zu übertragen, werden insbesondere die Antriebsachsen bis auf 11,5 t beladen. „Die technisch zulässige Achslast hingegen ist diejenige Achslast, die unter Berücksichtigung der Funktion und Werkstoffbeanspruchung nicht überschritten werden darf. Sie kann je nach Bemessung von Achskörper und Radlagerung sowie der Auslegung der Bremsen von der gesetzlich festgelegten höchstzulässigen Achslast abweichen.“<sup>2</sup> Die Summe der technischen Achslasten ist in der Regel einige Tonnen über dem zGG. Damit wird ein gewisser Spielraum für die Schwerpunktage bei der Beladung eingeräumt.

Auf Basis der Fahrzeugstatistik des Kraftfahrtbundesamtes und der Richtlinie 96/53/EWG wurden die Daten für die Referenzfahrzeuge dieser Studie bestimmt. Diese Festlegung orientiert sich aufgrund des großen Marktanteils hauptsächlich am Angebot der Daimler AG. Die Abweichungen zu anderen Herstellern wurden überprüft und sind im Allgemeinen zu vernachlässigen.

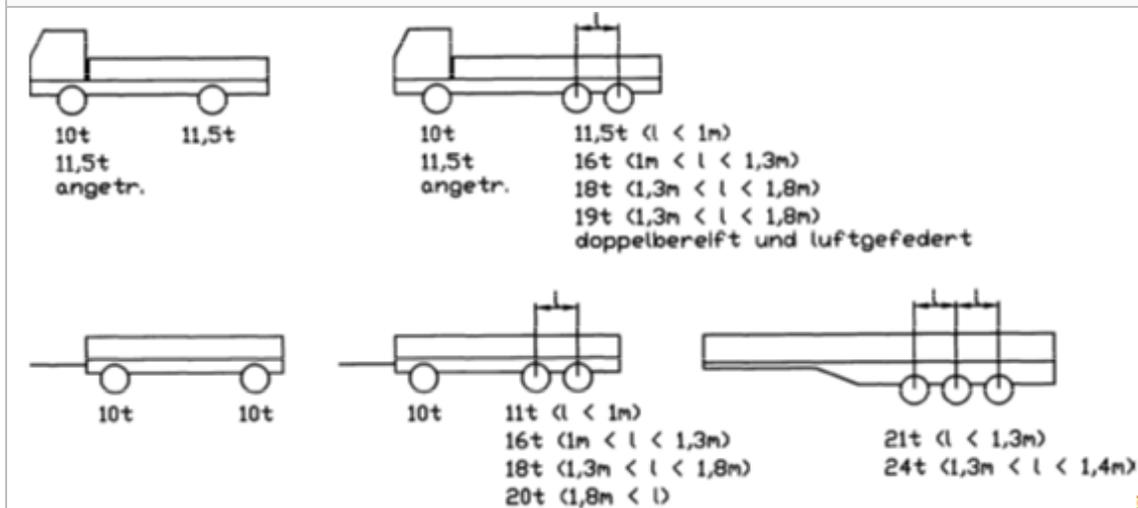
<sup>195</sup> (Erich Hoepke, 2013)

**Abbildung 60: Höchstzulässige Abmessungen nach Richtlinie 96/53/EWG**



Quelle: Erich Hoepke (2013)

**Abbildung 61: Höchstzulässige Achslasten nach Richtlinie 96/53/EWG**



Quelle: Erich Hoepke (2013)

<b>Tabelle 19: Daten der Referenzfahrzeuge</b>		
	<b>Gliederzug</b>	<b>Sattelzug</b>
		
<b>zGG Zug</b>	40 t	40 t
<b>Gesamtlänge</b>	18,75 m	16,50 m
<b>Leistung</b>	330 kW	330 kW
<b>Angetriebene Achsen</b>	2. Achse angetrieben	2. Achse angetrieben
<b>zGG Zugmaschine</b>	26 t	18 t
<b>zGG Anhänger</b>	18 t	39 t
<b>Technische Achslasten</b>	7,5 / 13 / 7,5 / 9 / 9 t	8 / 13 / 9 / 9 / 9 t
<b>Bereifung single oder doppelt</b>	s / d / s / s / s	s / d / s / s / s
<b>Reifendimension Single-Achsen</b>	315/70 R 22,5	355/50 R 22,5 (oder 295/80 R 22,5)
<b>Reifendimension Doppel-Achsen</b>	315/70 R 22,5	295/55 R 22,5 (oder 295/80 R 22,5)
<b>Reifendimension Anhänger</b>	385/65 R 22,5	385/65 R 22,5
<b>Radstände</b>	4,6 / 1,31 / 4,2 / 5,4 m	3,7 / 7,6 / 1,31 / 1,31 m
<b>Federung Blatt- oder Luftfederung</b>	B / L / L / L / L	B / L / L / L / L

Quelle: Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen des KIT (Mobima)

### 5.1.2 Rundholztransport

Für die Fahrzeuge des Rundholztransportes liegen keine entsprechenden Statistiken vor. Selbstverständlich sind jedoch auch hier gesetzliche Rahmenbedingungen, wie die zuvor erwähnte Richtlinie 96/53/EWG, gültig. Im Rahmen der Projekttreffen wurden in Abstimmung aller Projektteilnehmer insbesondere mit den Firmen DOLL Fahrzeugbau GmbH sowie der UNIQUE forestry and land use GmbH gängige Fahrzeugkonfigurationen für Kurz- und Langholz festgelegt. Hierbei wurde sich auf die klassischen Spezialisten für Kurzholz oder Langholz beschränkt. Kombilösungen wurden aufgrund Ihres Variantenreichtums nicht weiter berücksichtigt.

Die wesentlichen Unterschiede der Rundholztransportfahrzeuge zu den Referenzfahrzeugen sind zum einen, dass die Zugmaschine auf einem 6x4 oder 6x6 Fahrgestell aufgebaut ist und damit zwei oder drei statt einer angetriebenen Achse hat. Zum anderen sind bei Rundholztransportfahrzeugen in der Regel abgesehen von der Lenkachse alle Achsen mit Zwillingrädern bereift.

Analog zu Tabelle 19 ergeben sich für diese Projekt die technischen Daten für Kurzholz- und Langholztransporter entsprechend Tabelle 20. Diese Konfigurationen werden im Folgenden als Referenzfahrzeuge des Holztransportes zu Grunde gelegt.

<b>Tabelle 20: Daten der Referenz-Rundholztransportfahrzeuge</b>		
	<b>Kurzholzzug</b>	<b>Langholzzug</b>
		
<b>zGG Zug</b>	40 t	40 t
<b>Gesamtlänge</b>	18,75 m	16,50 m
<b>Leistung</b>	375 kW	375 kW
<b>Angetriebene Achsen</b>	2. & 3. Achse angetrieben	2. & 3. Achse angetrieben
<b>zGG Zugmaschine</b>	26 t / 26t / 33t	18 t
<b>zGG Anhänger</b>	18 t / 20 t / 20 t	39 t
<b>Technische Achslasten 44t</b>	8 / 9 / 9 / 9 / 9 t	9 / 8,5 / 8,5 / 9 / 9 t
<b>Technische Achslasten 46t</b>	8 / 9 / 9 / 10 / 10 t	9 / 8,5 / 8,5 / 10 / 10 t
<b>Technische Achslasten 53t</b>	9 / 12 / 12 / 10 / 10 t	9 / 12 / 12 / 10 / 10 t
<b>Bereifung single oder doppelt</b>	s / d / d / d / d	s / d / d / d / d
<b>Reifendimension Single-Achsen</b>	385/65R22,5	385/65R22,5
<b>Reifendimension Doppel-Achsen</b>	315/80R22,5	315/80R22,5
<b>Reifendimension Anhänger</b>	275/70R22,5	315/80R22,5
<b>Radstände</b>	4,2 / 1,31 / 4,2 / 4,5 m	3,6 / 1,31 / 10 / 2,6 m
<b>Blatt- oder Luftfederung</b>	B / L / L / L / L	B / L / L / L / L

Quelle: Mobima

## 5.2 Achslasten und Radaufstandsflächen

Zur Abschätzung der Änderung von Straßenschädigungen durch verschiedene LKW und Gewichtskombinationen wurden am Karlsruher Institut für Technologie die Achslasten und die sich ergebenden Radaufstandsflächen unter statischen Bedingungen berechnet. Tabelle 21 zeigt die berücksichtigten Beladungskonfigurationen.

<b>Tabelle 21: Fahrzeugkonfigurationen für die Achslastberechnung</b>				
<b>Fahrzeug</b>	<b>Zulässiges Gesamtgewicht</b>			
	<b>40 t</b>	<b>44 t</b>	<b>46 t</b>	<b>53 t</b>
<b>Lastkraftwagenzug</b>	x	x	-	-
<b>Kurzholztransporter</b>	x	x	x	x
<b>Sattelzug</b>	x	x	-	-
<b>Langholztransporter</b>	x	x	x	x

Quelle: Mobima

### 5.2.1 Achslastberechnung für verschiedene Beladungszustände

Bei der Aufstellung der Modelle zur Achslastberechnung wurde angenommen, dass innerhalb von Doppelachsaggregaten und innerhalb der drei Achsen eines Sattelanhängers ein Lastausgleich stattfindet. Doppelachsgruppen haben häufig einen konstruktiven Lastausgleich. Für die Berechnung der Achslasten wurde davon ausgegangen, dass der Ausgleich entsprechend der technischen Achslasten erfolgt. Bei Luftfederungen ist es üblich, die Federbalge einer Achsgruppe miteinander kurzzuschließen. Dadurch erreicht man ebenfalls innerhalb der Achsgruppe eine Lastverteilung entsprechend dem Verhältnis der technischen Achslasten dieser Gruppe. Bei einem Sattelaufleger führt dies beispielsweise dazu, dass alle drei Achsen die gleiche Achslast aufweisen.

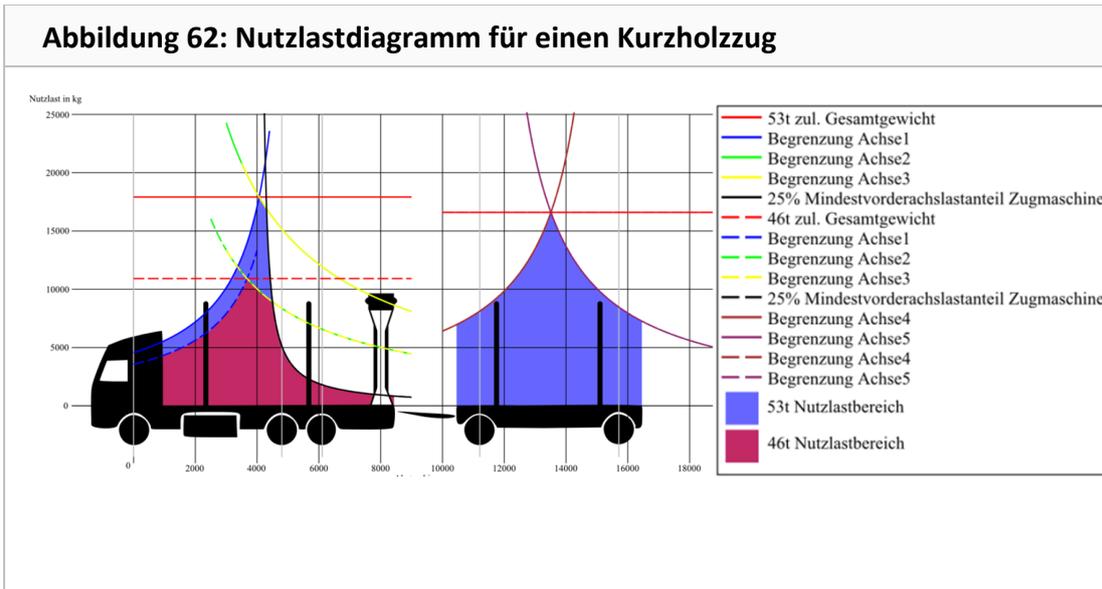
Darüber hinaus wurde ein Modell aufgestellt, das unter Berücksichtigung der Federsteifigkeiten und unter der Annahme, dass die Achsen voneinander unabhängig gelagert sind, die Achslasten für alle zwölf Konfigurationen berechnet. Diese Annahme ist eher konservativ und aufgrund der deutlichen Achslastdifferenzen die ungünstigere Variante. Da jedoch Doppelachsgruppen mit Lastausgleich weit verbreitet sind, werden für alle weiteren Untersuchungen die Ergebnisse der ersten Modellvariante verwendet.

Bei der Parametrierung der Modelle wurde auf die Festlegungen innerhalb des Projektes zurückgegriffen. Hier sind die Radstände, technischen Achslasten, Langholzlänge und Beladungen vorgegeben. Das Leergewicht wurde aus Produktdatenblättern oder Fahrgestellblättern übernommen und positioniert. Bei einem Gliederzug wurde das Leergewicht des zusätzlichen Kofferaufbaus mit 1.000 kg angenommen. Für den Kurzholzzug wurde, analog zur Differenz aus Fahrgestell und Gesamtgewicht der Langholzzugmaschine, ein Aufbaugewicht von 5.600 kg (Kran+Rungenaufbau) angenommen.

Für den Langholztransporter wurde die 18 m lange Ladung als Flächenlast angenommen. Aufgrund der üblichen Beladung mit einem Großteil der Stammfüße auf der Seite der Zugmaschine wird der Flächenschwerpunkt jedoch von 9,0 m auf 7,5 m vorgezogen. Der Abstand des Nachläufers wurde so gewählt, dass die zulässigen Gesamtgewichte von Zugmaschine und Anhänger sowie die technischen Achslasten der einzelnen Achsaggregate möglichst nicht überschritten werden. Das führt jedoch dazu, dass bei einem Zuggesamtgewicht von 53 t die zulässigen Achslasten entsprechend Richtlinie 96/53/EWG überschritten werden.

Die Berechnungsergebnisse sind in der Anlage 1 zu finden.

Die Berechnung der statischen Achslasten zeigt, dass es keinen Sinn macht, ein Fahrzeug entsprechend der Summe seiner technischen Achslast zu ballastieren. Dies wird in dem Nutzlastdiagramm in Abbildung 62 verdeutlicht. Die verschiedenen Kurven begrenzen für Zugmaschine und Anhänger den Bereich, in dem der Schwerpunkt der Ladung liegen darf, um zulässige Achslasten und gesetzliche Mindestvorderachslast einzuhalten. Auf der Ordinatenachse ist die mögliche Masse des Ladungsschwerpunktes aufgetragen. Am Beispiel des Anhängers wird schnell deutlich, dass die maximale Zuladung von 16,6 t punktgenau beladen werden muss, um die zulässigen Achslasten von 10 t entsprechend Richtlinie 96/53/EWG nicht zu überschreiten. Für die Zugmaschine sind die Begrenzungslinien eines 33 t Fahrgestells und eines 26 t Fahrgestells aufgetragen. Auch hier gilt, dass bei voller Ausnutzung der technischen Achslasten die Lage des Schwerpunktes exakt vorgeschrieben und damit in der Realität nicht zu erreichen ist. Bei einer geringeren Beladung wird der Bereich der möglichen Schwerpunktlage immer breiter und damit auch in der Praxis erfüllbar. Weiterhin ist in dem Nutzlastdiagramm zu sehen, dass die Einhaltung einer Mindestvorderachslast von 25 % (Richtlinie 97/27/EC) zum Erhalten der Lenkbarkeit die möglichen Schwerpunktlagen erheblich einschränkt.



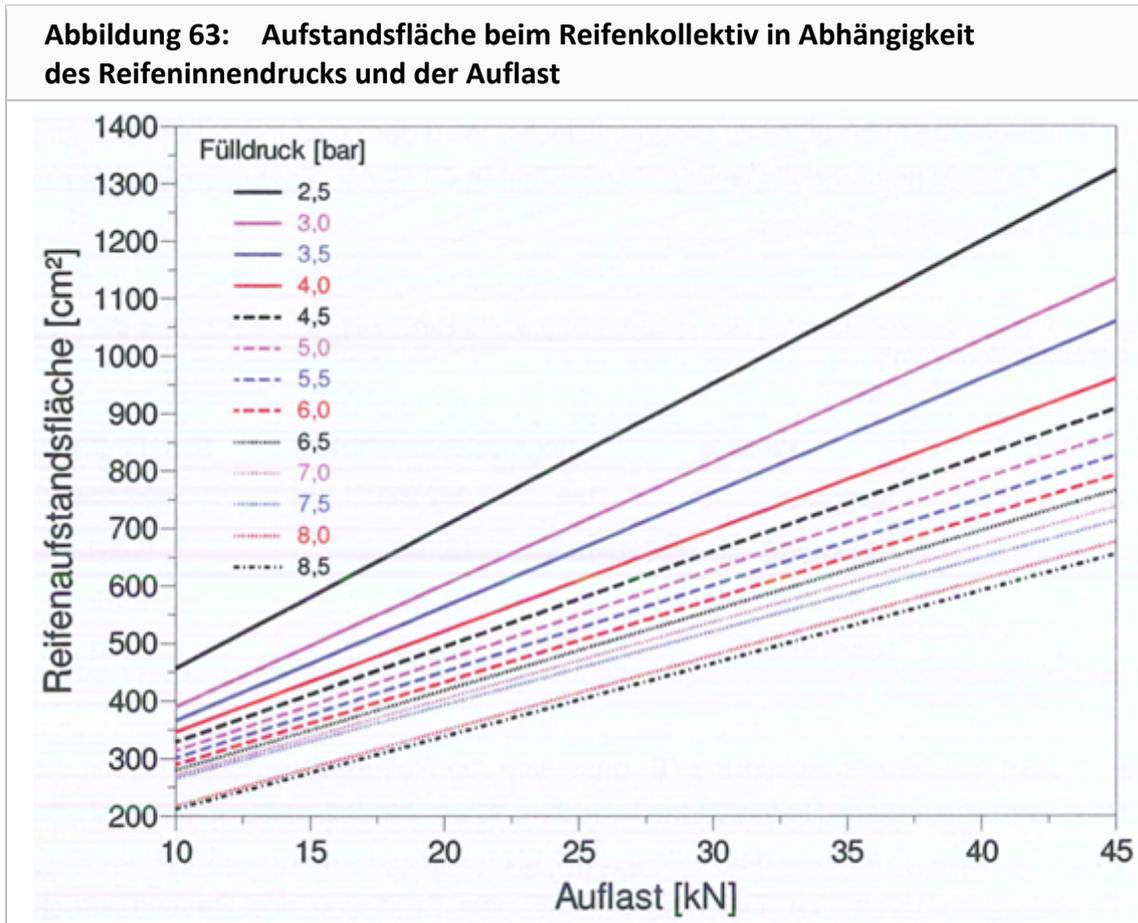
Quelle: Mobima

### 5.2.2 Berechnung der Radaufstandsflächen und Kontaktflächendrücke

Auf Basis der errechneten Achslasten und der verwendeten Reifendimension können die Reifenaufstandsfläche sowie der Kontaktflächendruck bestimmt werden. Zu diesen Zusammenhängen hat Brokmeier<sup>196</sup> Untersuchungen für LKW Reifen durchgeführt und in seiner Dissertation veröffentlicht.

Zur Berechnung der Latschflächen der 12 LKW Konfigurationen wurde zunächst in Abstimmung mit der Firma Doll Fahrzeugbau GmbH aus den Luftdruckempfehlungen für LKW Reifen der Firma Continental die geeigneten Luftdrücke der verschiedenen Reifen-Achskombinationen ausgewählt. Die Reifendrucke wurden so gewählt, dass mit dem üblichen Load index der Reifen mindestens die technische Achslast erreicht wird. Die Tabelle 46 bis Tabelle 49 der Achslastberechnung wurden jeweils um eine Zeile „Aufstandsfläche des Latsches pro Rad“, „mittlerer Kontaktflächendruck“ und „maximaler Kontaktflächendruck“ erweitert.

<sup>196</sup> (Brokmeier, 2013)



Quelle: Brokmeier (2013)

**Tabelle 22: Zusammenhang zwischen Reifen aufstandsfläche und Auflast**

Achse	Reifenbreite [m]	Reifendruck [kPa]	Formel für Reifen aufstandsfläche [m²]
Anhänger	0,275	7.500	$(13,23 \cdot \text{Auflast} + 138) / 315 \cdot 275 / 10000$
Beliebig	0,315	6.000	$(14 \cdot \text{Auflast} + 150) / 10000$
		6.500	$(13,71 \cdot \text{Auflast} + 143) / 10000$
		7.500	$(13,23 \cdot \text{Auflast} + 138) / 10000$
		8.000	$(12,86 \cdot \text{Auflast} + 91) / 10000$
		8.500	$(12,57 \cdot \text{Auflast} + 84) / 10000$
		9.000	$(12,29 \cdot \text{Auflast} + 77) / 10000$
Antrieb, zwillingsbereift	0,315	7.500	$(13,57 \cdot \text{Auflast} + 123) / 10000$
Lenkachse / Anhänger	0,385	9.000	$(12,10 \cdot \text{Auflast} + 64) / 10000$

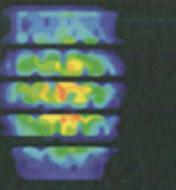
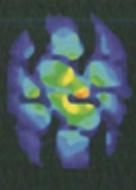
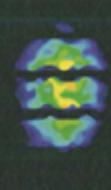
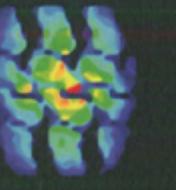
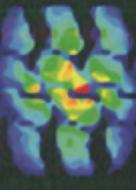
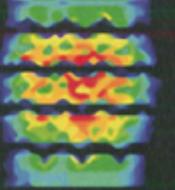
Quelle: Mobima

Mithilfe von Abbildung 63 und Tabelle 23 wurden Gleichungen für den näherungsweise linearen Zusammenhang zwischen Reifen aufstandsfläche und Auflast erstellt. Diese Gleichungen können Tabelle 22 entnommen werden. Wie in den Abbildungen in Tabelle 23 zu sehen ist, ändert sich je nach Achslast die geometrische Form des Latsches. So wird für unbeladene Achsen eine elliptische Aufstandsfläche und für beladene Achsen eine rechteckige Aufstandsfläche angenommen. Weiter ist in Tabelle 23 zu sehen, dass die Druckverteilung im Latsch keines-

wegs gleichmäßig ist. Hier kann ebenfalls von einer elliptischen Druckverteilung mit zunehmendem Druck zur Flächenmitte ausgegangen werden. Der mittlere Kontaktflächendruck wurde als Quotient aus Achslast und dem Produkt aus Reifenaufstandsfläche und Reifenzahl berechnet. Hier ergeben sich Werte, die in der Regel unterhalb des Reifeninnendruckes liegen. Im Gegensatz dazu sind die Werte des maximalen Kontaktflächendrucks deutlich über dem Reifeninnendruck.

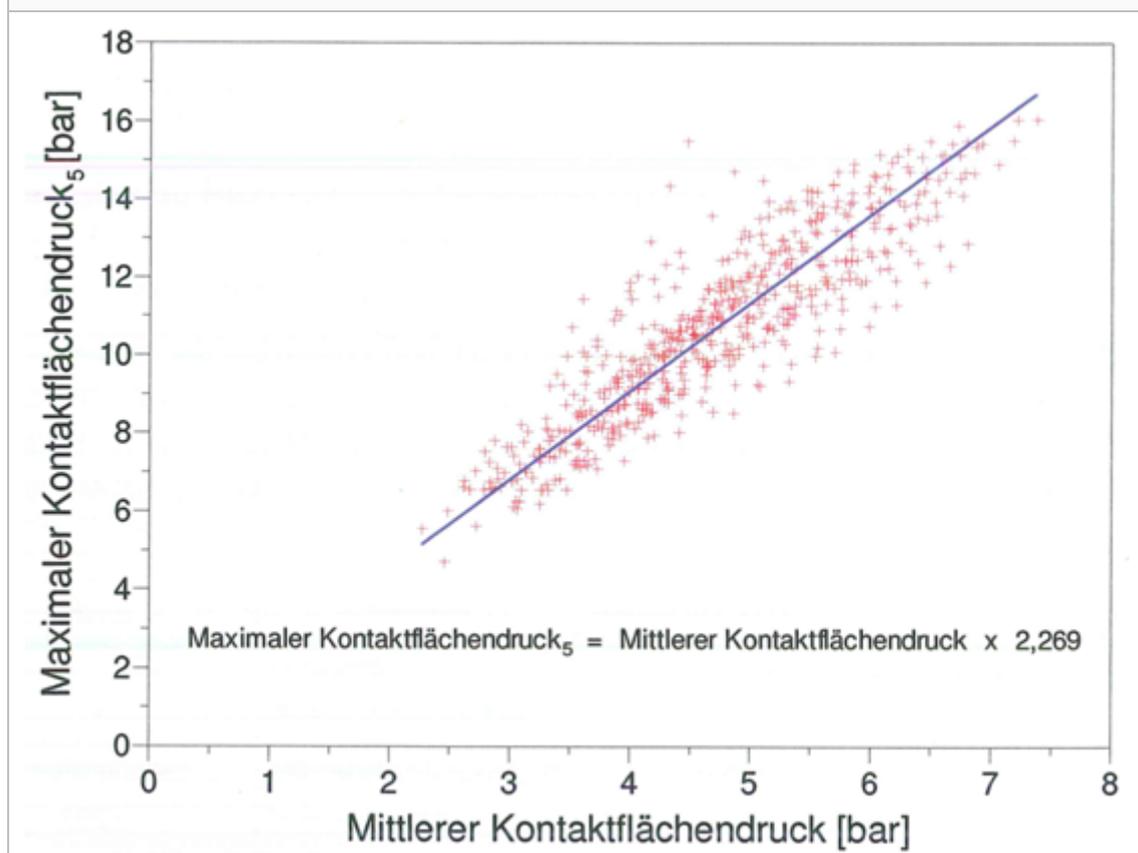
Brokmeier schließt aus seinen Untersuchungen mit zahlreichen LKW Reifen, dass sich der maximale Kontaktflächendruck näherungsweise aus dem 2,269fachen des mittleren Kontaktflächendrucks berechnen lässt. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 64 dargestellt.

**Tabelle 23: Aufstandsfläche der unterschiedlichen Reifen des Versuchsfahrzeugs in unbeladenen und beladenen Zustand**

		Lenkachse	Antriebsachsen	Anhängerachsen
Reifen- druckstufe	Auflast	22,1 kN	13,5 kN	9,8 kN
	Praxisfülldruck			
Aufstandsfläche:		398,36 cm <sup>2</sup>	306,32 cm <sup>2</sup>	182,67 cm <sup>2</sup>
Reifen- druckstufe	Auflast	36,8 kN	23,3 kN	44,1 kN
	Praxisfülldruck			
Aufstandsfläche:		547,31 cm <sup>2</sup>	439,11 cm <sup>2</sup>	597,89 cm <sup>2</sup>
Kontaktflächendruck:				

Quelle: Brokmeier (2013)

**Abbildung 64: Maximaler Kontaktflächendruck beim Reifenkollektiv in Abhängigkeit vom mittleren Kontaktflächendruck mit Ausgleich bei Verzicht auf eine zusätzliche Konstante**



Quelle: Brokmeier (2013)

Die Ergebnisse aller Beladungszustände können Tabelle 46 bis Tabelle 49 in Anlage 1: Achslasten und Radaufstandsflächen entnommen werden. Eine Zusammenfassung dieser Berechnungen liefern Tabelle 24 und Tabelle 25. Hier zeigen sich die Vorteile der Zwillingsbereifung sowie die gleichmäßigere Lastverteilung auf die angetriebenen Achsen. Selbst mit 53 t Gesamtgewicht bleibt der mittlere Kontaktflächendruck bei Holztransportfahrzeugen deutlich unter dem Kontaktflächendruck der Referenzfahrzeuge aus dem Fernverkehr.

**Tabelle 24: Durchschnitt des mittleren Kontaktflächendrucks [kPa]**

Fahrzeug	Zulässiges Gesamtgewicht			
	40 t	44 t	46 t	53 t
Kurzholztransporter	5.600	5.800	5.900	6.000
Gliederzug	6.800	6.900	-	-
Langholztransporter	5.100	5.300	5.400	5.600
Sattelzug	6.800	6.900	-	-

Quelle: Mobima

Ähnlich verhält es sich mit dem maximalen Kontaktflächendruck des Gesamtzuges. Hier werden die Druckspitzen der höchstbelasteten Achsen miteinander verglichen. Auch dieser Vergleich legt dar, dass Holztransportfahrzeuge erst mit 53 t Gesamtgewicht ähnliche Druckspitzen wie die Referenzfahrzeuge hervorbringen.

<b>Tabelle 25: Maximaler Kontaktflächendruck des Gesamtzuges [kPa]</b>				
<b>Fahrzeug</b>	<b>Zulässiges Gesamtgewicht</b>			
	<b>40 t</b>	<b>44 t</b>	<b>46 t</b>	<b>53 t</b>
<b>Kurzholztransporter</b>	16.200	16.300	16.300	16.700
<b>Gliederzug</b>	16.500	16.700	-	-
<b>Langholztransporter</b>	16.100	16.100	16.100	16.100
<b>Sattelzug</b>	16.500	16.700	-	-

Quelle: Mobima

Die Auswirkungen dieser geringeren Kontaktflächendrücke auf die Verkehrsinfrastruktur werden in Kap. 6 detailliert betrachtet. Da es bei geringen Abständen zwischen den Kontaktflächen teilweise zu Kräfteüberlagerungen kommt, ist für die Beurteilung der Schädigungswirkung auf Straßen u. a. der Mittenabstand bei Zwillingsbereifung von Bedeutung. Dieser ist in der DIN 7805 Teil 5 festgelegt. Hier sind allerdings keine Reifengrößen in Millimeterangaben aufgelistet. Bei Pirelli wird bei den „technischen Daten Truck Tyres“ 0,351 m für Reifen der Dimensionen 315/70 R 22,5 auf Felgen 22,5 x 9 und 315/80 R 22,5 auf 22,5 x 9 Felgen angegeben. Diese Zahlen entsprechen auch den Angaben anderer Hersteller, sowie der DIN 7805 Teil 5, in der für Reifen der Größe 13 R 22,5 auf 22,5 x 9 Felgen ein Mindestabstand von 0,35 m vorgeschrieben wird.

### 5.3 Innovationen und Entwicklungen zur Reduktion des Fahrzeuggewichtes

In diesem Kapitel werden die Innovationen und Entwicklungen der letzten Jahre zur Reduktion des Fahrzeuggewichtes bei Holztransportfahrzeugen zusammengefasst. Hierzu zählen u. a. die Verwendung alternativer Materialien, Strukturänderungen zur Gewichtsreduktion, die Verwendung kleinerer Antriebsaggregate und alternative technische Lösungen. Die Recherche beschränkt sich auf Lösungen, die aktiv zur Effizienzsteigerung beitragen.

Für eine Wirtschaftlichkeitsanalyse werden die Mehrkosten für effizienzsteigernde Maßnahmen in Relation zum Nutzen gestellt. Soweit bekannt wird die veränderte Lebensdauer der leichteren Varianten berücksichtigt.

#### 5.3.1 Leichtbaumaterialien

Gängige Ansätze zur Reduktion des Gewichts sind die Verwendung von Materialien mit geringer Dichte sowie die Nutzung hochfester Materialien. Änderungen des Materials ziehen im Regelfall auch Strukturänderungen nach sich. Die Wandstärken werden an die Festigkeit des Werkstoffes angepasst, die Geometrie optimiert und schwach beanspruchte Bereiche entfernt. Bei Holztransportfahrzeugen finden verschiedenste Aluminiumlegierungen vor allem bei gering belasteten Komponenten Anwendung. So werden die Tanks, Werkzeugkästen und Abdeckungen häufig aus Aluminium ausgeführt. Aber auch hochbelastete Teile, wie Schemelkörper und Rungen, Stirnwand oder Felgen werden aus Aluminium gefertigt. Wie in Tabelle 26 und Tabelle 27 dargestellt, lassen sich hier zwischen 150 kg und 400 kg einsparen.

<b>Tabelle 26: Gewichtsreduktion am Kurzholzzug durch Aluminiumeinsatz bei Schemelkörper und Rungen</b>				
Rungen	Schemel/Rungen-Gesamtgewicht bei unterschiedlicher Konfiguration: Anzahl x zul. Last/Schemel			
	(2 + 2) x 9t	(2 + 4) x 9t	(4 + 4) x 6t	(4 + 6) x 4t
Standard Rungen	699 kg	1.048 kg	1.301 kg	1.347 kg
Aluminium Rungen	524 kg	786 kg	976 kg	1.010 kg
Gewichtersparnis	175 kg	262 kg	325 kg	337 kg

Quelle: ExTe Vertriebs GmbH

<b>Tabelle 27: Gewichtsreduktion bei Felgen</b>			
Felgen	Gesamtgewicht		
	Langholz	Kurzholz	Kurzholz mit 19“ Anhängerfelgen
Stahl Felgen	734 kg	714 kg	682 kg
Aluminium Felgen	415 kg	411 kg	378 kg
Gewichtersparnis	319 kg	303 kg	304 kg

Quelle: ALCOA WHEEL PRODUCTS / BPW Bergische Achsen / Hayes Lemmerz Germany

Ein Nachteil bei Komponenten aus Aluminium ist die Reparaturfähigkeit. So lassen sich beispielsweise deformierte Schemelkörper und Rungen nur schlecht wieder richten. Deshalb setzen viele Hersteller bei mechanisch stark beanspruchten Bauteilen auf hochfeste Materialien wie Feinkornstahl. Bei Kurzholztransportern werden häufig Schemel aus hochfestem Stahl mit Aluminium Rungen kombiniert. Diese Kombination bringt etwa 15 bis 20 kg Gewichtersparnis pro Runge.

Bei tragenden Bauteilen wie dem Fahrzeugrahmen bzw. dem Hilfsrahmen oder den Kranelementen wird bevorzugt mit hochfesten Stählen gearbeitet. Laut DOLL<sup>197</sup> lassen sich hierbei der Aufbau des Zugfahrzeugs um 10 % und der Anhänger bis zu 30 % leichter als mit normalem Stahl ausführen.

<b>Tabelle 28: Gewichtsreduktion bei Reifen</b>			
Reifen	Gesamtgewicht		
	Langholz	Kurzholz	Kurzholz mit 19“ Anhängerfelgen
Hersteller A	1.377 kg	1.187 kg	1.084 kg
Hersteller B	1.246 kg	1.084 kg	973 kg
Gewichtersparnis	131 kg	103 kg	118 kg

Quelle: Continental AG / Michelin Reifenwerke AG & Co. KGaA

Neben Felgen können auch Reifen zu einer Gewichtsreduktion beitragen. Die Reifengewichte der verschiedenen Hersteller unterscheiden sich bei gleicher Reifendimension und Einsatzzweck im Bereich von 5 – 10 kg bzw. rd. 10 %. Wie Tabelle 28 zeigt, machen diese Unterschiede

<sup>197</sup> (DOLL Fahrzeugbau AG, April 2013)

de bei einem Holzzug mit 18 Reifen über 100 kg aus. In wie weit sich das geringere Reifengewicht auf die Laufleistung der Bereifung auswirkt, ist nicht bekannt.

### 5.3.2 Strukturänderungen zur Gewichtsreduktion

Wie im Kap. 5.3.1 bereits beschrieben, geht mit einer Änderung des Werkstoffes häufig auch eine Anpassung der Wandstärke und Materialgeometrie einher. Eine sehr umfangreiche Strukturänderung wird im Buch „Leichtbau-Technologien im Automobilbau“ von Ingelfinger<sup>198</sup> beschrieben. Hier wird die im LKW-Bau übliche Leiterraahmenkonstruktion mit Starrachsen durch einen Zentralrohrrahmen mit Einzelradaufhängung ersetzt. Vorteile dieser Konstruktion sind eine Gewichtsreduktion des Fahrgestells um 4 – 6 %, ein geringerer Bauraum und eine bessere Einstellbarkeit der Fahrwerksparameter, was in Kombination mit den reduzierten ungefederten Massen einen erheblichen Komfortgewinn und eine geringere Straßenbeanspruchung zur Folge hat. Aus wirtschaftlichen Gründen konnte sich diese aufwendige und kostenintensive Konstruktion in der Praxis bisher nicht gegen die einfache und günstige Starrachse durchsetzen.

### 5.3.3 Rightsizing

Aufgrund der harten Einsatzbedingungen, der hohen Nutzlastausnutzung und des Charakters als Statussymbol für einen Betrieb sind viele Holztransportfahrzeuge hervorragend motorisiert und mit sehr robusten Komponenten ausgestattet. Diese widerstandsfähigen und sicheren Komponenten haben selbstverständlich auch ihr Gewicht. Bei den Starrachsen eines zweiachsigen Anhängers liegen etwa 150 kg zwischen einer Ausführung mit 9 t Achsen und einer Variante mit 12 t Achsen. Bei der Zugmaschine liegen je nach Ausstattungsvariante etwa 250 kg zwischen dem weit verbreiteten 26 t Fahrgestell und dem selteneren 33 t Grundfahrzeug. Dieser Unterschied ist aber auch durch den stärker ausgeführten Grundrahmen begründet. In Summe kann ein Holzzug mit einem technisch zulässigen Gesamtgewicht von 44 t also mindestens 400 kg leichter als eine Fahrzeugkombination mit insgesamt 57 t technisch zulässigem Gesamtgewicht gebaut werden. Neben dem Einsparpotential beim Leergewicht zeigt dieses Beispiel deutlich, mit welchem geringen Mehrgewicht eine höhere Zuverlässigkeit und Sicherheit sowie eine wesentlich höhere Zuladung ermöglicht werden kann.

Die Motorenentwicklung hat in den vergangenen Jahren zunehmend effiziente und drehmomentstarke Motoren hervorgebracht. So kann zwischenzeitlich selbst in topografisch anspruchsvollen Gebieten der Kompromiss eines Antriebsaggregates mit geringerer Maximalleistung eingegangen werden. Die größten Gewichtsunterschiede ergeben sich hierbei zwischen den verschiedenen Hubraumklassen.

---

<sup>198</sup> (Dietmar Ingelfinger, 2014)

<b>Tabelle 29: Einfluss des Motorhubraums</b>			
<b>Motorgröße</b>	<b>Motorleistung</b>	<b>Fahrgestellgewicht 6x4</b>	
		<b>Hersteller A</b>	<b>Hersteller B</b>
<b>ca. 13 l Hubraum</b>	max. 405 kW	9.031 kg	9.335 kg
<b>ca. 16 l Hubraum</b>	min. 375 kW	9.400 kg	9.745 kg
<b>Gewichtersparnis</b>	-	369 kg	410 kg

Quelle: Daimler AG / Volvo Group Trucks Central Europe GmbH

Tabelle 29 zeigt, dass je nach Hersteller mit einem Motor mit 13 l Hubraum und 375-405 kW 370-410 kg Leergewicht gegenüber einem 16 l Aggregat eingespart werden kann. Darüber hinaus liegt der Kraftstoffverbrauch mit kleinerem Motor niedriger. Aus wirtschaftlicher Sicht ist die Auswahl einer richtig bemessenen Motorisierung uneingeschränkt zu empfehlen.

### 5.3.4 Alternative technische Lösungen

Bei den Achsherstellern BPW und SAF sind Anhängerachsen in Entwicklung, die mit elektronischen statt pneumatischen Bremsen zahlreiche Druckluftkomponenten sparen und dadurch etwa 90 kg leichter<sup>199</sup> als konventionelle Achsen werden. Gleichzeitig soll dadurch der Bremsweg verkürzt und die Sicherheit erhöht werden.

Im Bereich der Antriebsachsen erweisen sich einfach übersetzte Hypoidachsen als leichte Alternative zu klassischen Differentials mit Außenplanetenachsen. Die dezentrale Anordnung des Antriebskegelrades bedingt einen größeren Tellerraddurchmesser und eine Verzahnungsform mit großer Zahnfläche. Neben einem besseren Wirkungsgrad und einer hohen Nutzlast haben Hypoidachsen ein relativ geringes Eigengewicht<sup>200</sup>. Der große Tellerraddurchmesser schränkt jedoch die Bodenfreiheit ein. „Um das Tellerrad im Durchmesser und damit die Abmessungen des Hinterachsgehäuses zu reduzieren, werden bei geländegängigen Fahrzeugen Außenplanetenachsen eingesetzt, die in der Radnabe eine zusätzliche Übersetzungsstufe in Form eines Planetensatzes besitzen. Dadurch können sowohl die Antriebswellen zu den Rädern als auch das Ausgleichsgetriebe kleiner dimensioniert werden und die Bodenfreiheit unter der Achse nimmt zu.“<sup>201</sup> Damit ist jedoch auch der Gewichtsvorteil weitestgehend relativiert.

Das Fahrwerk kann sowohl klassisch mit Plattfedern als auch mit einer Luftfederung ausgeführt werden. Während die Plattfeder als besonders robust gilt, bietet die Luftfederung einen höheren Fahrkomfort, passt sich mithilfe einer Niveauregulierung an den Beladungszustand an und hat eine bessere Bremskraftverteilung. Diese vielen Vorteile gegenüber der Blattfederung werden durch ein höheres Gewicht erkauft (vgl. Fn. 198). Diese Aussage wird durch die Fahrgestellangaben von Volvo bestätigt und mit 150 – 230 kg beziffert. Bei Daimler hingegen ist die luftgefederte Variante in einem Direktvergleich 270 kg leichter. Hier wird vermutlich das gesamte Fahrzeug weniger robust ausgeführt.

Aufgrund des erheblichen Offroad Fahranteils werden Holztransporter häufig in einer 6x4 Antriebskonfiguration, teilweise auch als 6x6 Allradfahrzeug konfiguriert. Gerade bei der letzten Variante lassen sich mithilfe der Produkte HydroDrive bzw. Hydraulic Auxiliary Drive 400 –

<sup>199</sup> (TU Harburg)

<sup>200</sup> (MAN Truck & Bus AG, 2011)

<sup>201</sup> (Erich Hoepke, 2013)

500 kg gegenüber einem mechanischen Allradantrieb einsparen. Beide Systeme ersetzen den mechanischen Vorderachsantrieb durch zwei zuschaltbare Hydraulikmotoren in den Radnaben. Diese werden durch eine Hydraulikpumpe am Getriebeausgang (MAN) versorgt. Ebenfalls denkbar wäre eine 6x4 Konfiguration mit hydraulischer Vorderachse und nur einer angetriebenen Doppelachse.

### 5.3.5 Kranaufbau

Der Kranaufbau hat mit rd. 2.500 – 3.500 kg einen wesentlichen Anteil am Leergewicht des Fahrzeuges. Als gängige Ausstattungsvariante wurde bei einem Kurzholztransporter ein Kran mit 105 kNm Hubmoment und 9,6 m Reichweite angenommen. Bei Langholztransportern sind wesentlich stärkere Kräne mit 230 kNm Hubmoment und 8,8 m Reichweite verbreitet<sup>202</sup>. Der Vergleich verschiedener Kranmodelle zeigt, dass sich eine geringfügige Änderung der Reichweite oder des Hubmomentes nur unwesentlich auf das Gewicht auswirkt. Je nach Modellreihe bringt eine 0,5 m geringere Kranlänge nur etwa 50 kg, oder eine Variante mit um 10 kNm reduziertem Hubmoment nur 20 kg Gewichtsreduktion. Dennoch lohnt sich der Vergleich mit angrenzenden Modellen, um ein sehr gutes Verhältnis aus Gewicht und Leistungsfähigkeit auszuwählen. Deutlich größer sind die Unterschiede bei der Abstützung. Je nach technischer Ausführung und maximaler Abstützbreite gibt es hier Unterschiede von bis zu 160 kg<sup>203</sup>. Ebenso sind die Differenzen zwischen den verschiedenen Anbietern zu beachten. Durch die abweichende Ausführung beispielsweise des Teleskops oder der Bewegungskinematik ergeben sich bei vergleichbarer Kraft und Größe Gewichtsunterschiede von 100 - 400 kg. Gleichfalls gibt es bei den Holzgreifern verschiedener Hersteller mit 0,35 m<sup>2</sup> bzw. 0,40 m<sup>2</sup> Gewichtsunterschieden von 70 kg. Durch die geschickte Kombination von Abstützung, Kran und Greifer lassen sich ohne Leistungseinschränkungen in Summe rund 300 kg gegenüber dem Durchschnitt einsparen.

Fuhrunternehmer mit geringem Ladeanteil oder in klimatisch milderem Zonen können auf eine geschlossene Krankabine und auf das damit verbundene Mehrgewicht von circa 350 kg verzichten. Aus praktischer Sicht sinnvoll wäre hier die Entwicklung eines Wechselsystems, welches die Demontage der schweren Kabine über das Sommerhalbjahr erlaubt.

Die größte Gewichtsreduktion ergibt sich, wenn man auf einigen Fahrzeugen vollständig auf den Kran verzichten kann. Die Beladung im Wald muss dann durch einen zweiten LKW mit Kran oder eine Forstmaschine erfolgen. Ein derartiges Logistikkonzept erscheint jedoch vielen Fuhrunternehmen in ihren Einsatzgebieten nicht geeignet.

### 5.3.6 Zusammenfassung Fahrzeuggewicht

Innovationen und technische Entwicklungen bieten verschiedene Ansatzpunkte, das Leergewicht eines Rundholztransporters zu reduzieren und damit die Nutzladung zu erhöhen. Die meisten der aufgezeigten Lösungen werden bereits in Neufahrzeugen umgesetzt. Je nach Überzeugung des Aufbauherstellers und des Fuhrunternehmers wird in manchen Bereichen bewusst zu Gunsten von Robustheit, Langlebigkeit und Sicherheitsreserven auf Leichtbau verzichtet. Je nach Einsatzgebiet und Hauptsortiment des Fahrzeuges ist nicht jeder Kompromiss bezüglich des Leergewichtes sinnvoll.

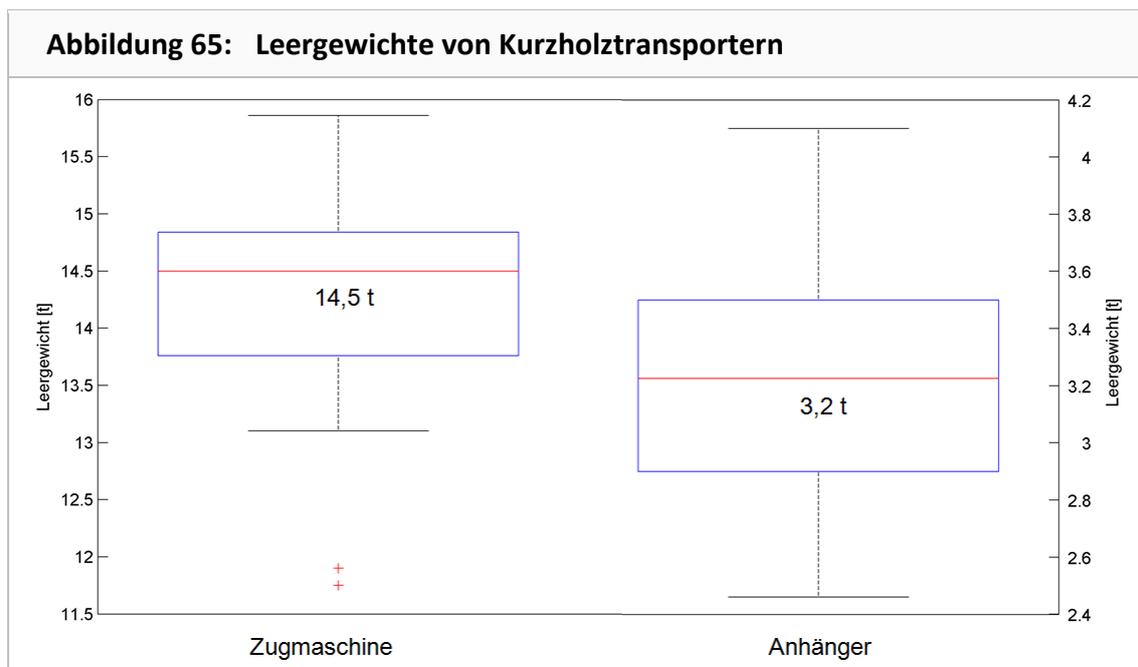
---

<sup>202</sup> DOLL Fahrzeugbau GmbH

<sup>203</sup> Palfinger AG

In Abbildung 65 wurden die Leergewichte von 19 Kurzholz Zugmaschinen und 26 passenden Anhängern unterschiedlichster Fahrgestell- und Aufbauhersteller statistisch ausgewertet. 50 % der Zugmaschinen haben ein Leergewicht zwischen 13.700 kg und 14.900 kg. Bei den Anhängern liegen die meisten Ausführungen zwischen 2.900 kg und 3.500 kg. Die besonders leichten Ausreißer haben häufig nur zwei Rungenpaare pro Ladefläche und sind damit nicht für alle Kurzholzlängen geeignet. Entsprechend der beiden Mediane kann bei einem Kurzholztransporter von einem Leergewicht von 17.700 kg ausgegangen werden.

Die in Kapitel 5.3 aufgezeigten Gewichtseinsparungen summieren sich auf über 2.000 kg. Die Verteilung in Abbildung 65 zeigt, dass diese Differenz sogar noch größer ausfallen kann. Die erzielbare Verbesserung hängt selbstverständlich im Wesentlichen von der Ausgangskonfiguration ab. Wählt man den jeweiligen Median aus Zugmaschinen und Anhängern, so zeigt sich ein verbleibendes Optimierungspotential von 1.100 kg bis 1.400 kg. Das entspricht einer Gewichtsreduktion um rund 7 % und damit einer Nutzlaststeigerung um 6 %.



Quelle: Mobima

## 5.4 Wirtschaftlichkeitsbewertung

Die in Kapitel 5.3 vorgestellten Innovationen und Entwicklungen markieren heute den Stand der Technik, wenn es um Gewichts- und Effizienzsteigerung geht. Die Kosten verschiedener Maßnahmen stehen aufgrund geringer Stückzahlen, hochwertiger Materialien und komplexerer Technik jedoch nicht zwangsläufig im Verhältnis zu dem im Holztransport erzielbaren Umsatz. Im Folgenden soll die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen bewertet werden.

### 5.4.1 Modellauswahl

Brokmeier<sup>204</sup> [BRO] hat 2012 ein umfangreiches Kostenmodell für den Rohholztransport zur Bewertung von CTI Systemen im Kontext des Rohholztransports aufgestellt. Das Modell stellt

<sup>204</sup> (Brokmeier, 2013)

die Grundlage für eine statische und eine dynamische Investitionsrechnung. Neben der Amortisationszeit kann die jährliche Annuität und der Kapitalwert geschätzt werden.

Das vorgestellte Modell kann mit gezielten Anpassungen zur Bewertung der Maßnahmen genutzt werden. Nicht zuletzt sind die bei Brokmeier verwendeten Parametrierungen des Modells aktuell und basieren auf belastbaren Datenerhebungen. U.a. wird an einigen Stellen auf Daten von Borchering<sup>205</sup> [BOR] zurückgegriffen.

### 5.4.2 Kostenrechnung für die Referenzfahrzeuge

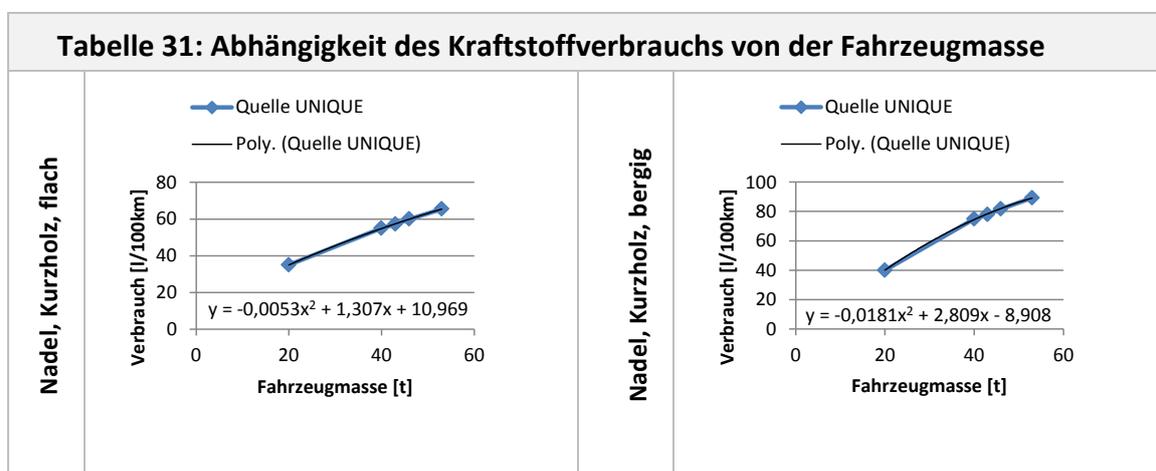
Entgegen der bei Brokmeier dargestellten Aufstellung der Kosten für unterschiedliche Wegbeschaffenheiten (Nahverkehr, Regionalverkehr, Fernverkehr) werden hier die Transportszenarien Kurz- und Langholztransport, jeweils untergliedert in Laub- und Nadelholz bei bergigen und flachen Einzugsgebieten, getrennt dargestellt. Die Beschaffungspreise basieren auf Angaben der Firma DOLL Fahrzeugbau GmbH<sup>206</sup>.

Tabelle 30: Auszug - Referenzfahrzeuge		
	Kurzholztransport	Langholztransport
		
Leergewicht	18,0 t	18,9 t
Bereifung je Achse	2-4-4-4-4	2-4-4-4-4
Beschaffungspreis mit Bereifung	165.700,- €	237.900,- €

Quelle: DOLL Fahrzeugbau GmbH

Der Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge gestaltet sich abhängig von Leergewicht und Zuladung, sowie Topografie der befahrenen Straßen (vgl. Kap.1).

Aus den vorhandenen Daten wurde mit Hilfe einer Regression die Abhängigkeit zwischen Fahrzeuggewicht und Kraftstoffverbrauch für die jeweiligen Szenarien abgeschätzt, um einen an die Leergewichte der Referenzfahrzeuge angepassten Kraftstoffverbrauch zu erlangen.



<sup>205</sup> (Borchering, 2007)

<sup>206</sup> (Schuler, 2015)

<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);"><b>Laub, Kurzholz, flach</b></p>		<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);"><b>Laub, Kurzholz, bergig</b></p>	
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);"><b>Nadel, Langholz, flach</b></p>		<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);"><b>Nadel, Langholz, bergig</b></p>	
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);"><b>Laub, Kurzholz, flach</b></p>		<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);"><b>Laub, Kurzholz, bergig</b></p>	

Quelle: Kap. 1 und 2; Regression: Mobima

Die in Tabelle 31 dargestellten Verläufe der Abhängigkeit werden im Folgenden auch zur Abschätzung der Kraftstoffreduktion bei Leerfahrten aufgrund von Leichtbaumaßnahmen genutzt. Die Unterschiede zwischen Nadel- und Laubholzfahrzeugen sind auf geringfügig unterschiedliche Fahrzeugkonfigurationen sowie Unterschiede in den Streckenanteilen auf Waldwegen, Landstraßen und Autobahnen zurückzuführen.

Da diese Aufschlüsselung für die von UNIQUE verwendeten Daten (vgl. Kap. 1 und 2) jedoch nicht vorliegt, kann eine Präzisierung des Einflusses unterschiedlicher Parameter auf den Kraftstoffverbrauch nicht erfolgen.

Der Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs kann durch Einsetzen des Fahrzeuggewichts in das entsprechende Regressionspolynom (Tabelle 31) bestimmt werden. Basierend auf den genannten Daten wurden, bezogen auf die Gesamtleistung der beobachteten Fahrzeuge, folgende Fahranteile und mit Hilfe von Tabelle 32 entsprechende Verbräuche für die Referenzfahrzeuge ermittelt:

<b>Tabelle 32: Fahranteile und Kraftstoffverbräuche</b>							
<b>Gesamtleistung aller beobachteten Fahrzeuge</b>							
100 %							
257.531 km							
Kurzholztransport				Langholztransport			
33,6 %				66,4 %			
86.486 km				171.045 km			
<b>Nadel</b>		<b>Laub</b>		<b>Nadel</b>		<b>Laub</b>	
67,3 %		32,7 %		63,2 %		36,8 %	
58.200 km		28.286 km		108.085 km		62.959 km	
Transportradius/Tour							
110 km		90 km		60 km		60 km	
<b>flach</b>	<b>bergig</b>	<b>flach</b>	<b>bergig</b>	<b>flach</b>	<b>bergig</b>	<b>flach</b>	<b>bergig</b>
80 %	20 %	80 %	20 %	70 %	30 %	80 %	20 %
46.560 km	11.640 km	22.629 km	5.657 km	75.659 km	32.425 km	50.367 km	12.592 km
Kraftstoffverbrauch leer (voll)							
34,2 l (55,0 l)	38,6 l (75,0 l)	34,2 l (55,0 l)	38,6 l (75,0 l)	29,7 l (55,0 l)	34,5 l (75,0 l)	34,8 l (55,0 l)	39,6 l (75,0 l)

Quelle: Kap. 1 und 2

Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit erfolgt getrennt nach Kurz- und Langholztransport, da sich die jeweiligen Referenzfahrzeuge in ihrer Konfiguration unterscheiden.

Die Untergliederung nach Nadel- und Laubholz schlägt sich im Mittel in unterschiedlichen Transportdistanzen je Tour und unterschiedlichen Streckenanteilen von bergigem und flachem Gelände und damit im Kraftstoffverbrauch und den damit verbundenen Kosten wieder.

Folgende Basisdaten (Tabelle 33) werden im Kostenmodell berücksichtigt und gelten für alle betrachteten Szenarien übergreifend:

Unter der Rubrik Kalkulationsdaten sind Weganteile, Zeitanteile, Geschwindigkeiten und Kosten, die für alle Szenarien gleich angenommen wurden, aufgeführt. Für alle Fahrten wird eine Durchschnittsgeschwindigkeit angesetzt, die sich aus den Fahranteilen auf Waldwegen, Landstraßen und Autobahnen mit den jeweiligen spezifischen Durchschnittsgeschwindigkeiten ergibt (Gl. 5-1). Die durchschnittlichen Weganteile wurden im Rahmen des Projektes ermittelt (vgl. Kap. 3).

$$\text{Durchschnittsgeschwindigkeit} = \left( \sum_i \frac{\text{Weganteil}_i}{\text{Durchschnittsgeschwindigkeit}_i} \right)^{-1} \quad \text{Gl. 5-1}$$

Dabei wird vernachlässigt, dass bei größeren Transportradien der Weganteil auf Waldwegen im Verhältnis in der Regel kleiner ausfällt.

Unter dem Absatz Kapitalwerte (Tabelle 33) finden sich die relevanten Daten für die kalkulatorische Bewertung der Investition in ein entsprechend ausgestattetes Neufahrzeug.

<b>Tabelle 33: Basisdaten Kostenmodell</b>	
<b>Kalkulationsdaten</b>	
Jahresfahrleistung/Fahrzeug	96.718 km [Kap. 1.2]
Leerfahrtenquote	40 % [Kap. 1.2]
Verweildauer Beladung/Entladung	1,64 h [BOR]
Waldweg Anteil	10,3 % [Kap. 3]
Landstraße Anteil	54,0 % [Kap. 3]
Autobahn Anteil	35,7 % [Kap. 3]
Wald Geschwindigkeit	19,5 km/h [BOR]
Landstraße Geschwindigkeit	45,5 km/h [BOR]
Autobahn Geschwindigkeit	75,5 km/h [BOR]
Durchschnittsgeschwindigkeit	49,0 km/h
Mautsatz	0,13 €/km [TOL] <sup>207</sup>
Nutzungsdauer	7 Jahre [BRO]
Treibstoffverbrauch Be-/Entladung	5 l/h [BRO]
Treibstoffpreis	1,35 €/l [ADAC] <sup>208</sup>
Schmierstofffaktor	3 % [BRO]
Jährliche Arbeitszeit (1-Schichtbetrieb)	2.000 h [REI]
Bruttofahrerlohn ohne Kran (Arbeitgeberbrutto)	14,50 €/h [REI]
Bruttofahrerlohn mit Kran (Arbeitgeberbrutto)	16,50 €/h [REI]
<b>Kapitalwerte</b>	
Prozentsatz Restwert (nach Nutzungsdauer)	20 % [REI]
Restwert Kurzholz-FZG	33.100,- €
Restwert Langholz-FZG	47.600,- €
Zinssatz (kalkulatorische Zinsen)	2 % [STAT]
Umlaufvermögen	20.000,- € [BRO]
Betriebsnotwendiges Kapital Kurzholz-FZG (zeitl. Begrenzte Nutzung)	119.400,- €
Betriebsnotwendiges Kapital Langholz-FZG (zeitl. Begrenzte Nutzung)	162.700,- €

Die Werte für den Prozentsatz des Restwertes nach Ende der Nutzungsdauer basieren auf Erfahrungswerten des Forstunternehmens Reith e.K.<sup>209</sup> [REI], da der bei Brokmeier angegebene Restwert von 10 % nach 7 Jahren Nutzungsdauer aus der Erfahrung deutlich zu niedrig angesetzt ist. Der Zinssatz stammt aus Daten des statistischen Bundesamtes<sup>210</sup> [STAT] und für das Umlaufvermögen wurde der Wert von Brokmeier übernommen.

<sup>207</sup> (Toll Collect, 2015)

<sup>208</sup> (ADAC, 2015)

<sup>209</sup> (Reith, 2015)

<sup>210</sup> (Statistisches Bundesamt, 2015)

Das betriebsnotwendige Kapital berechnet sich nach dem Ansatz für eine zeitlich begrenzte Nutzungsdauer des Investitionsguts (Gl. 5-2).

$$\text{Betriebsnotwendiges Kapital} = \frac{\text{Beschaffungspreis} + \text{Restwert}}{2} + \text{Umlaufvermögen} \quad \text{Gl. 5-2}$$

Bruttofahrerlohn und jährliche Arbeitszeit im 1-Schichtbetrieb stammen von [REI]. Kosten für die Bereifung sind als Verschleißkosten zu betrachten und unterscheiden sich für die beiden Referenzfahrzeuge. Aus dem mittleren Reifenpreis ergeben sich unter Berücksichtigung der Jahreslaufleistung des Fahrzeuges, sowie der unterschiedlichen Reifenlaufleistung auf den Achsen die jährlichen Wiederbeschaffungskosten der Reifen. Die durchschnittlichen Laufleistungen beziehen sich auf Erfahrungswerte des Unternehmens Forstunternehmen Reith e.K. [REI]. Die Reifenlaufleistungen unterliegen aufgrund vieler maßgebender Einflüsse wie Luftdruck, Weganteile, Lastfahrtanteil, Reifentyp (Profil, Gummi, etc.) einer großen Streuung, so dass vereinfacht mit den Erfahrungswerten gerechnet wird.

Die Kosten untergliedern sich weiterhin in Fixkosten und variable (strecken- und zeitabhängige) Kosten.

<b>Tabelle 34: Reifenkonfiguration und Kosten</b>	
<b>Kurzholztransport</b> 	<b>Langholztransport</b> 
Bereifung je Achse: 2-4-4-4-4	Bereifung je Achse: 2-4-4-4-4
Laufleistungen	
1. Achse: 120.000 km [REI]	1. Achse: 120.000 km [REI]
2./3. Achse: 90.000 km [REI]	2./3. Achse: 90.000 km [REI]
4./5. Achse: 150.000 km [REI]	4./5. Achse: 150.000 km [REI]
Mittlerer Reifenpreis Achse 1/2/3: 350,- €	Mittlerer Reifenpreis Achse 1/2/3: 350,- €
Mittlerer Reifenpreis Achse 4/5: 250,- €	Mittlerer Reifenpreis Achse 4/5: 350,- €
Reifenpannen/Jahr: 2 [BRO]	

Tabelle 36 zeigt die berücksichtigten Fixkosten und variable Kosten auf. Für die Personalkosten wird eine Auslastung des Fahrers von 90 % angenommen. Die Personalkosten ergeben sich aus der jährlichen Arbeitszeit und dem Bruttofahrerlohn (Gl. 5-3)

$$\text{Personalkosten} = \text{Jährliche Arbeitszeit} \cdot \text{Bruttofahrerlohn} \quad \text{Gl. 5-3}$$

Die kalkulatorischen Zinsen ergeben sich nach Gl. 5-4.

$$\text{kalkulatorische Zinsen} = \text{betriebsnotwendiges Kapital} \cdot \text{Zinssatz} \quad \text{Gl. 5-4}$$

Die kalkulatorische Abschreibung errechnet sich nach Gl. 5-5.

$$\text{kalkulatorische Abschreibung} = \frac{\text{Beschaffungspreis} - \text{Restwert} - \text{Reifenkosten}}{\text{Nutzungsdauer}} \quad \text{Gl. 5-5}$$

Die Wartungskosten werden unter Fix- und variablen Kosten zu je 8.000,- €/a angenommen. Verwaltungskosten, Steuern und Versicherungen werden wie bei Brokmeier vorgeschlagen übernommen.

Die Streuung der betriebsspezifischen Kosten für Versicherungen und die Verwaltungskosten ist erheblich. Während die Konditionen bei Versicherungen in weitem Bereich verhandelbar

sind, hängen die Verwaltungskosten in erster Linie von der Betriebsgröße ab. Die bei Brokmeier angegebenen jährlichen Verwaltungsausgaben liegen mit 15.000,- €/a je Fahrzeug relativ hoch. In der Praxis wird hier u.a. auch im Bereich von 2.000,- bis 4.000,- €/a kalkuliert<sup>211</sup>.

Die Mautkosten ergeben sich anhand des km-bezogenen aktuellen Mautsatzes in Abhängigkeit der durchschnittlichen Jahresfahrleistung auf der Autobahn.

In die Berechnung der Treibstoffkosten fließen, mit den entsprechenden Streckenanteilen gewichtet, die Kraftstoffverbräuche aus Tabelle 32 sowie die Verbräuche beim Be- und Entladen des Fahrzeugs ein (Gl. 5-6). An dieser Stelle wird zunächst angenommen, dass ein Fahrzeug jeweils ausschließlich für den Transport von entweder Nadel- oder Laubholz eingesetzt wird.

Die Zahl der Touren ergibt sich aus der Division der Jahresfahrleistung durch den doppelten (für Hin- und Rückweg) Transportradius (Tabelle 35).

<b>Tabelle 35: Anzahl der Touren bei 96.718 km/a</b>			
<b>Kurzholz</b>		<b>Langholz</b>	
<b>Nadel</b>	<b>Laub</b>	<b>Nadel</b>	<b>Laub</b>
439 Touren/a	537 Touren/a	439 Touren/a	537 Touren/a

Tabelle 36 schlüsselt die Fixkosten eines Unternehmens auf Jahresbasis auf.

$$\begin{aligned} \text{Treibstoffkosten} = & \text{Treibstoffpreis} \cdot [\text{Jahresfahrleistung} \cdot (\text{Anteil Leerfahrt} \cdot \\ & (\text{Anteil flach} \cdot \text{Verbrauch flach} + \text{Anteil bergig} \cdot \text{Verbrauch bergig})) + \text{Gl. 5-6} \\ & \text{Anzahl Touren} \cdot \text{Ladezeit} \cdot \text{Verbrauch Laden}] \end{aligned}$$

Die Linearität der Zusammenhänge erlaubt es, auch nachträglich die Treibstoffkosten bei gemischter Nutzung durch eine anhand entsprechender Weganteile gewichtete Überlagerung darzustellen. Die Schmierstoffkosten werden zu 3 % der Treibstoffkosten angenommen. Für die Referenzfahrzeuge ergeben sich bei der dargestellten Parametrierung folgende jährlichen Gesamtkosten (Tabelle 37).

<sup>211</sup> (Reith, 2015)

<b>Tabelle 36: Fixkosten und variable Kosten pro Jahr</b>				
<b>Fixkosten</b>				
Personalkosten ohne Kran	29.000,- €			
Personalkosten mit Kran	33.000,- €			
Kalkulatorische Zinsen Kurzholz-FZG	2.400,- €			
Kalkulatorische Zinsen Langholz-FZG	3.300,- €			
Reparatur-/ Wartungskosten (50 %)	8.000,- € [BOR]			
Steuern und Versicherung	5.000,- € [BOR]			
Verwaltungskosten	15.000,- € [BRO]			
Kalkulatorische Abschreibung Kurzholz-FZG (50 %)	9.100,- €			
Kalkulatorische Abschreibung Langholz-FZG (50 %)	13.140,- €			
<b>Variable Kosten</b>				
Reparatur-/ Wartungskosten (50 %)	8.000,- € [BOR]			
Mautkosten	4.523,- €			
<b>Untergliederung der Szenarien</b>				
	Kurzholz		Langholz	
	Nadel	Laub	Nadel	Laub
Treibstoffkosten	70.028,- €/a	71.110,- €/a	72.832,- €/a	75.549,- €/a
Schmierstoffkosten	2.100,- €/a	2.133,- €/a	2.184,- €/a	2.266,- €/a
Reifenkosten	5.562,- €/a	5.562,- €/a	6.078,- €/a	6.078,- €/a
Kalkulatorische Abschreibung Kurzholz-FZG (50 %)	9.100,- €			
Kalkulatorische Abschreibung Langholz-FZG (50 %)	13.140,- €			

Der erzielbare Gewinn ergibt sich aus der Differenz aus Transportpreis und Transportkosten. Die Preisgestaltung wird dabei von der Transportdistanz und der zu transportierenden Tonnage abhängig gemacht.

<b>Tabelle 37: Gesamtkosten der Referenzfahrzeuge pro Jahr</b>				
	Kurzholz		Langholz	
	Nadel	Laub	Nadel	Laub
Fixkosten	68.500,- €	68.500,- €	77.400,- €	77.400,- €
variable Kosten	99.290,- €	100.405,- €	104.560,- €	105.680,- €
Gesamtkosten	161.790,- €	168.905,- €	181.960,- €	183.080,- €
Holzanteile	67,3 %	32,7 %	63,2 %	36,8 %
Gemischte Nutzung	168.154,- €		182.372,- €	

### 5.4.3 Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Leichtbaumaßnahmen

Leichtbaumaßnahmen zeichnen sich durch eine Reduktion des Fahrzeugleergewichts aus, ziehen jedoch einen erhöhten Beschaffungspreis nach sich. Wiegen die Nutzlasterhöhung und die Treibstoffreduktion bei Leerfahrt über die Nutzungsdauer des Fahrzeugs die Mehrkosten auf, kann die Maßnahme unter statischen Gesichtspunkten als wirtschaftlich betrachtet werden.

Einzelne Maßnahmen können auch in anderen Kostenpunkten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit nehmen. So ist es bspw. bei Bereifung und Rungen möglich, dass aufgrund konstruktiver Einflüsse die Wartungs-, bzw. Wiederbeschaffungsintervalle verändert sind. Antriebstrangkomponenten und Arbeitshydraulik haben Einfluss auf den Schmierstofffaktor und können Einfluss auf die Schmierstoffkosten des Fahrzeugs haben.

Die Ausstattung von Fahrzeugen mit oder ohne On-Board-Kran muss separat betrachtet werden, da dies Einfluss auf den Prozessablauf hat und Be-/Entladezeiten sowie der Treibstoffverbrauch beim Be-/Entladen entscheidend beeinflusst wird.

Maßnahmen, die unter dem Begriff Rightsizing zusammengefasst werden, zeichnen sich durch einen doppelten Win-Effekt aus und sind grundsätzlich anzustreben. Zum einen wird das Fahrzeug durch den Einsatz eines 13 l Motors gegenüber einem 16 l Motor um ~400 kg leichter (Nutzlasterhöhung um 400 kg), zum anderen sinken der Beschaffungspreis und der Kraftstoffverbrauch deutlich. Hier ist auf die Empfehlung des Fahrzeugherstellers für den entsprechenden Einsatzfall zu vertrauen.

Unter den betrachteten Maßnahmen wird, soweit keine belastbaren Daten zu Standzeit, Wartungsintervallen und –kosten vorliegen, von einmaligen Investitionen ohne Folgekosten über die Laufzeit, bzw. unveränderten Wartungsintervallen bzw. –kosten der Referenzfahrzeuge ausgegangen.

In der statischen Investitionsrechnung gibt die Amortisationszeit Aufschluss über die Dauer, die zur Deckung des Investitionsaufwandes notwendig ist. Damit wird die Kapitalbindung betrachtet. Es gilt:

$$\text{Amortisationszeit} = \frac{\text{Beschaffungspreis} - \text{Restwert}}{\text{Gewinn} + \text{Abschreibung}} \quad \text{Gl. 5-7}$$

Die Berücksichtigung des Zinses erfolgt in der dynamischen Betrachtung. Der Kapitalwert hängt von Verzinsung, Einsatzzeit und jährlichem Gewinn ab.

Zinssatz und Einsatzzeit können für den Fall, dass die Differenz jährlicher Einnahmen und Ausgaben (der Gewinn) über die Einsatzzeit konstant bleibt im Rentenbarwertfaktor RBF zusammengefasst werden.

$$\text{RBF} = \frac{(1 + \text{Zinssatz})^{\text{Einsatzzeit}} - 1}{(1 + \text{Zinssatz})^{\text{Einsatzzeit}} \cdot \text{Zinssatz}} \quad \text{Gl. 5-8}$$

Damit ergibt sich der Kapitalwert zu:

$$\text{Kapitalwert} = -\text{Beschaffungspreis} + \text{Gewinn} \cdot \text{RBF} \quad \text{Gl. 5-9}$$

Ein positiver Kapitalwert bedeutet, dass sich die Investition nach der eingesetzten Einsatzzeit für den Betreiber lohnt. Zeitveränderliche Erlöse und Wartungskosten können bspw. auch dazu führen, dass der Kapitalwert nach Erreichen eines Maximums wieder sinkt. Vergleichsbasis ist die zum Kalkulationszins verzinsten Investitionssumme.

Sowohl für die statischen, als auch für die dynamischen Bewertungsverfahren müssen die erzielbaren Erlöse abgeschätzt werden. Die Preisgestaltung der Holztransportunternehmen erfolgt i.d.R. kilometer-, festmeter- und holzartbasiert (Nadel/Laub, Kurz/Lang), wird jedoch aus Wettbewerbsgründen nicht offengelegt.

Im Rahmen dieser Studie wurden von UNIQUE Daten erhoben, in denen Transportkosten der Transportunternehmen untergliedert nach Nadel- und Laubholz für unterschiedliche Transportdistanzen aufgeführt werden (vgl. Kap. 1). Demgegenüber stehen die Transportkosten von Borchering<sup>212</sup>, auf die sich Brokmeier bezieht, die sich bezogen auf den Festmeter im Bereich von 30 % unterscheiden. Zeisler<sup>213</sup> veröffentlicht mittlere Transportkosten im Kurzholztransport von 700,-€/Tag bis 800,-€/Tag, im Langholztransport von 800,-€/Tag bis 900,-€/Tag im Einschichtbetrieb. Umgerechnet auf die vier Referenzfahrten (Tabelle 32) liegen die Kosten nochmals deutlich höher. Jedoch ist nicht bekannt, von welchen Transportdistanzen und Durchschnittsgeschwindigkeiten Zeisler ausgeht.

Bezogen auf eine Tonne Transportgewicht bei einer Dichte von 950kg/Fm Nadelholz und 1.200kg/Fm Laubholz ergeben sich in den unterschiedlichen Quellen folgende Transportkosten (Tabelle 38)

<b>Tabelle 38: Transportkosten für Referenzfahrten aus Sicht eines Transportunternehmens</b>				
	<b>Kurzholz</b>		<b>Langholz</b>	
	<b>Nadel (110 km)</b>	<b>Laub (90 km)</b>	<b>Nadel (60 km)</b>	<b>Laub (60 km)</b>
<b>Borchering</b>	19,20 €/t	16,20 €/t	9,30 €/t	9,30 €/t
<b>UNIQUE</b>	19,25 €/t	14,58 €/t	13,50 €/t	15,12 €/t
<b>Zeisler</b>	25,00 €/t	21,72 €/t	19,05 €/t	19,05 €/t
<b>MOBIMA</b>	17,34 €/t	14,29 €/t	10,33 €/t	10,50 €/t

Die oben dargestellte Parametrierung des vorgestellten Modells ist in der Zeile MOBIMA aufgeführt. Die Werte ordnen sich zwischen den bei Borchering und UNIQUE recherchierten Transportkosten ein und können damit als plausibel betrachtet werden.

Um einen Betrieb, welcher der vorgestellten gemittelten Kostenstruktur entspricht, wirtschaftlich betreiben zu können, (Kapitalwert nach 7 Jahren Nutzungsdauer  $\approx 0$  €) muss bei dem veranschlagten Kalkulationszins von 2 % für die Referenzfahrten folgende Preisgestaltung gewählt werden (Tabelle 39).

<b>Tabelle 39: Preisgestaltung Betriebsmodell MOBIMA</b>				
	<b>Kurzholz</b>		<b>Langholz</b>	
	<b>Nadel (110 km)</b>	<b>Laub (90 km)</b>	<b>Nadel (60 km)</b>	<b>Laub (60 km)</b>
<b>Transportpreise</b>	18,12 €/t	14,92 €/t	11,38 €/t	11,56 €/t
<b>Amortisation</b>	5,17 a	5,17	5,19 a	5,19 a
<b>Kapitalwert (7 Jahre)</b>	0,- €	0,- €	0,- €	0,- €

<sup>212</sup> (Borchering, 2007)

<sup>213</sup> (Zeisler, 2011)

Für gewichtsreduzierende Maßnahmen, die keinen Einfluss auf Wartungskosten etc. haben, kann anhand von Amortisationsdauer und Kapitalwert nach 7 Jahren generisch die Wirtschaftlichkeit bewertet werden. Eine Maßnahme zeichnet sich dabei in den Eingangsparametern des Modells durch einen Aufpreis und eine Gewichtsreduktion gegenüber dem Referenzfahrzeug aus. Beispielhaft werden die in Tabelle 40 aufgeführten Leichtbaumaßnahmen im Folgenden eingeordnet. Die aufgeführten Kosten wurden überschlägig auf Basis konkreter Angebote der Firma Reith<sup>214</sup> [REI] und DOLL Fahrzeugbau GmbH<sup>215</sup> [DOL] beziffert.

### Kurzholzzug

Folgende Leichtbaumaßnahmen wurden betrachtet (Tabelle 40).

<b>Tabelle 40: Preisgestaltung Betriebsmodell MOBIMA</b>						
	Maßnahme	Aufpreis	Gewichts-Ersparnis	Amortisationszeit	Kapitalwert (7 a)	Aufpreis/Gew.-Ersparnis
①	Aluminium Runge/Schemel (8x) [REI]	5.000,- €	320 kg	4,92 a	8.836,- €	15.625 €/t
②	Aluminium Felgen Satz [REI]	9.000,- €	350 kg	5,08 a	3.219,- €	25.700 €/t
③	Leichtbaurahmen konstruktiv [REI]	10.000,- €	1.100 kg	4,16 a	42.730,- €	9.090 €/t

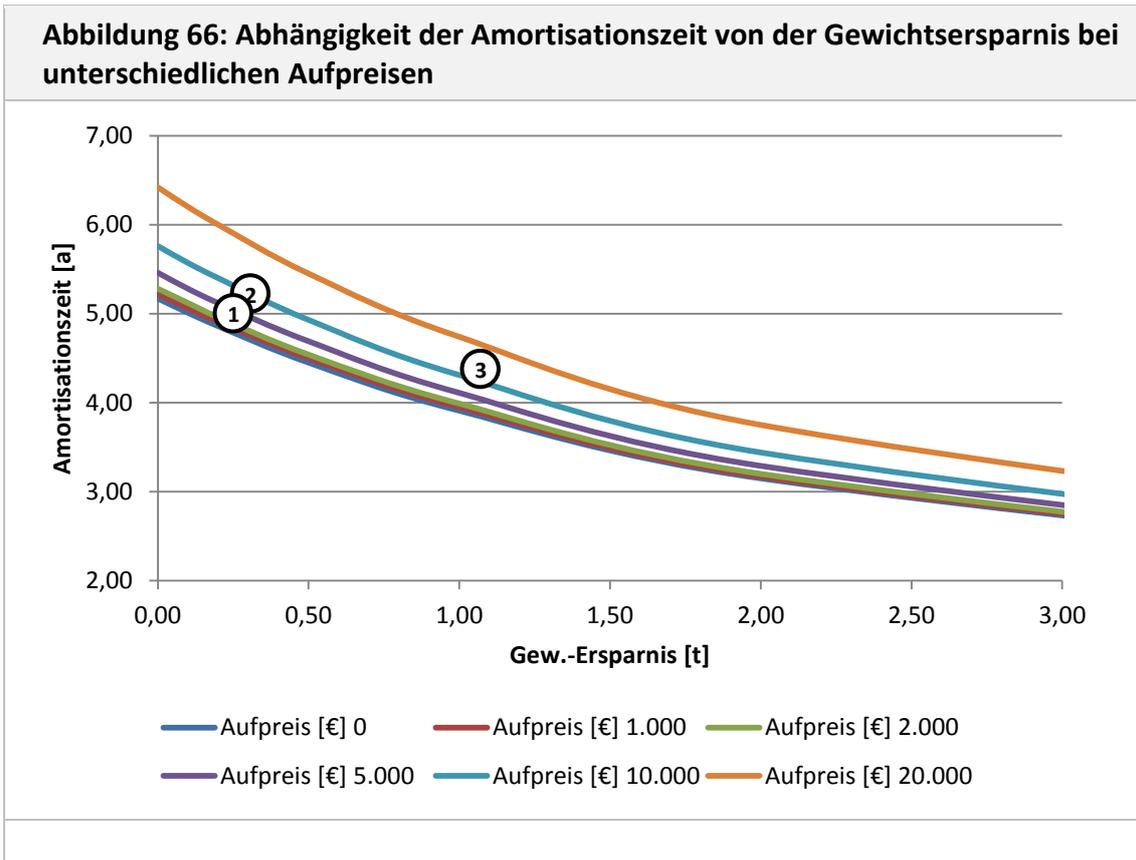
Tabelle 41 zeigt die Amortisationszeiten bei unterschiedlichen Konstellationen von Aufpreis und Gewichtsersparnis.

<b>Tabelle 41: Amortisationstabelle Kurzholz-FZG</b>						
Amortisation Kurzholz-FZG	Aufpreis [€]					
	0	1.000	2.000	5.000	10.000	20.000
Gew.-Eersp. [t]	0	1.000	2.000	5.000	10.000	20.000
0,00	5,17	5,23	5,28	5,46	5,76	6,42
0,10	5,00	5,06	5,11	5,28	5,57	6,20
0,20	4,85	4,90	4,95	5,11	5,38	5,98
0,50	4,43	4,48	4,52	4,67	4,91	5,43
1,00	3,88	3,92	3,96	4,07	4,27	4,70
2,00	3,11	3,13	3,16	3,25	3,39	3,70
5,00	1,94	1,96	1,97	2,02	2,10	2,26

Abbildung 66 verdeutlicht die Abhängigkeiten. Das Kurzholz-Referenzfahrzeug verfügt über eine Amortisationszeit von 5,17 Jahren. Liegen die Werte für eine Maßnahme darüber, so ist die zusätzliche Investition in eine Leichtbaumaßnahme aufgrund der längeren Kapitalbindung mit größerer Unsicherheit verbunden, als bei Investition in das Referenzfahrzeug. Das Wirtschaftlichkeitsmodell zeigt jedoch für den betrachteten Bereich hinsichtlich einer Amortisation innerhalb der Nutzungsdauer ein unkritisches Verhalten.

<sup>214</sup> (Reith, 2015)

<sup>215</sup> (Schuler, 2015)



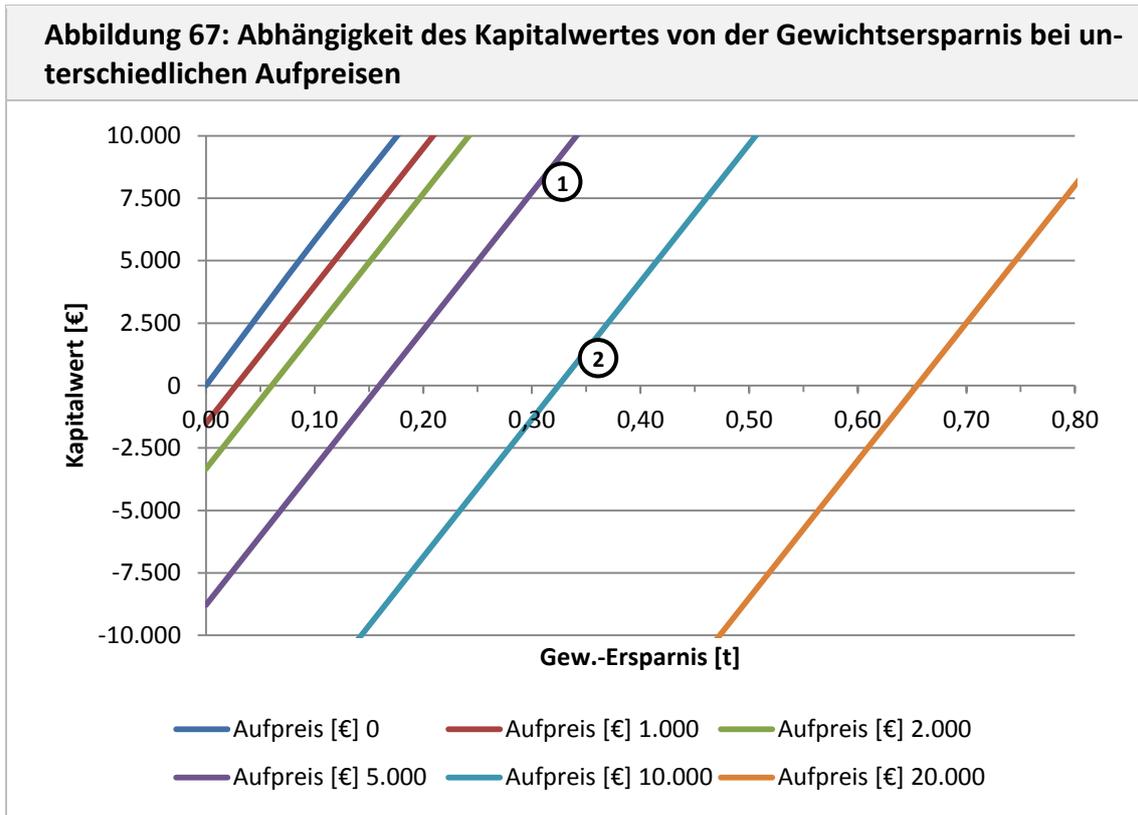
Quelle: Mobima

Für die Kapitalwerte unterschiedlicher Kombinationen von Gewichtsreduktion und Mehrpreis gegenüber dem Referenzfahrzeug ergibt sich Tabelle 42:

**Tabelle 42: Kapitalwerttabelle Kurzholz-FZG**

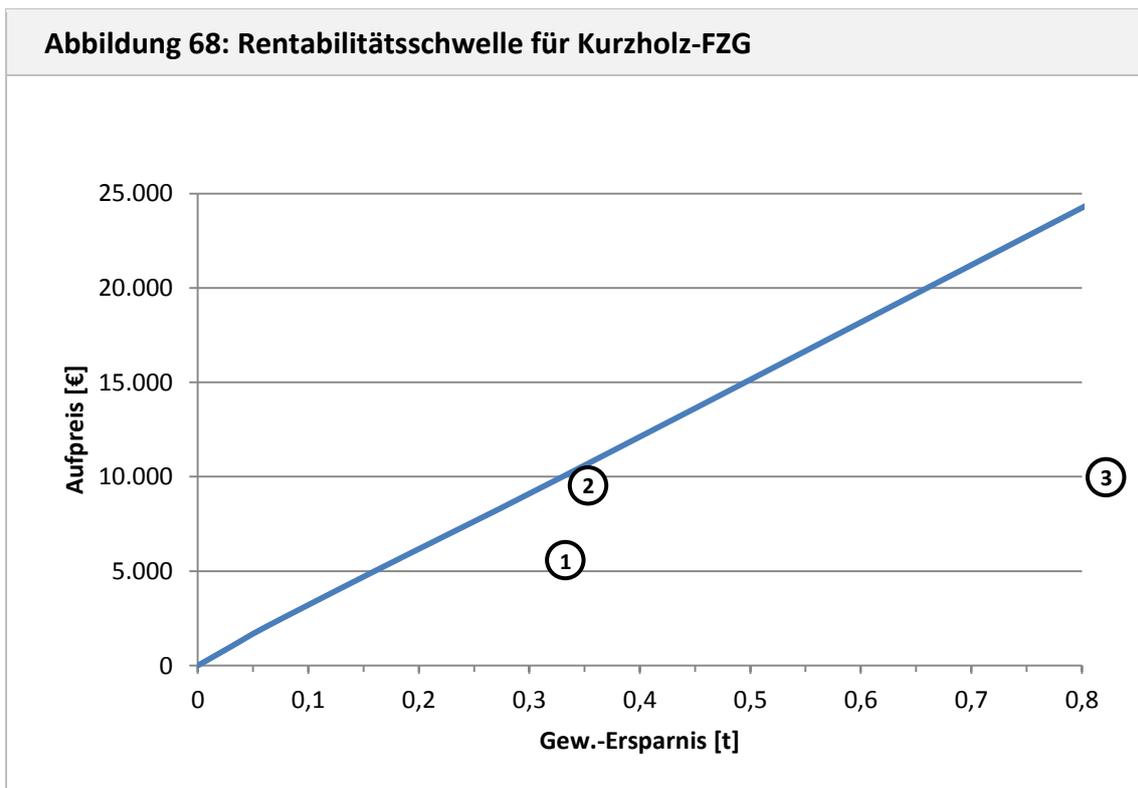
Kapitalwert Kurzholz-FZG	Aufpreis [€]					
Gew.-Erspar. [t]	0,00	1.000	2.000	5.000	10.000	20.000
0,00	0,00	-1.516	-3.333	-8.785	-17.871	-36.045
0,10	5.807	3.990	2.172	-3.279	-12.365	-30.538
0,20	11.314	9.496	7.679	2.227	-6.858	-25.032
0,50	27.838	26.020	24.204	18.751	9.665	-8.508
1,00	55.390	53.573	51.756	46.304	37.217	19.044
2,00	110.544	108.726	106.909	101.457	92.370	74.197
5,00	276.385	274.567	272.750	267.298	258.212	240.038

Abbildung 67 stellt die Daten aus Tabelle 42 in Kennlinien dar. Die Einordnung spezifischer Maßnahmen gibt Aufschluss über die Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahmen. Wertet man die Schnittpunkte der dargestellten Kennlinien mit der X-Achse aus, ergibt sich der lineare Verlauf der Rentabilitätsschwelle in Abhängigkeit von der Gewichtsreduktion durch eine Maßnahme.



Quelle: Mobima

Abbildung 68 zeigt den Verlauf der Rentabilitätsschwelle. Liegt eine Maßnahme unterhalb der Linie, ist sie für den gerechneten Betrieb rentabel.



Quelle: Mobima

So weist die Schwelle zu einem positiven Kapitalwert für derartige Maßnahmen am Kurzholz-Referenzfahrzeug ein Verhältnis von etwa 30.000,- €/t (vgl. Abb. 29: y-Wert bei x = 1,0 t) von

Aufpreis zu Gewichtsersparnis auf. Die Einordnung der Leichtbaumaßnahmen in Abbildung 68 entlang der Rentabilitätsschwelle zeigt das jeweilige wirtschaftliche Potential auf. Während sich Runge/Schemel-Kombinationen und insbesondere der Leichtbaurahmen als rentabel präsentieren, liegen die Aluminiumfelgen ziemlich genau in der Rentabilitätsschwelle. Die Investition wäre für den abgebildeten Betrieb nicht zu empfehlen, da die höhere Kapitalbindung ohne signifikanten Gewinn lediglich ein erhöhtes Risiko darstellt.

Zu diskutieren sind unabhängig die Haltbarkeit und Anfälligkeit der Leichtbauelemente über die Nutzungsdauer von 7 Jahren.

Sofern hier Daten quantifiziert werden können, kann mit Hilfe des dargestellten Modells eine präzisere Bewertung erfolgen.

### Langholzzug

Für den Langholztransport wurden die in Tabelle 43 genannten Leichtbaumaßnahmen bewertet. Dabei ist zu beachten, dass der Hydraulische Vorderachsantrieb die genannte Gewichtsersparnis gegenüber einem 6x6 Fahrzeug hervorbringt und damit vom Referenzfahrzeug abweicht. Exemplarisch wird hier dennoch die Bewertung durchgeführt.

<b>Tabelle 43: Leichtbaumaßnahmen Langholz-FZG</b>						
	<b>Maßnahme</b>	<b>Aufpreis</b>	<b>Gewichts-Ersparnis</b>	<b>Amortisationszeit</b>	<b>Kapitalwert (7 a)</b>	<b>Aufpreis/Gew.-Ersparnis</b>
①	Hydraulischer Vorderachsantrieb [DOL]	18.000,- €	425 kg	5,31 a	-6.386,- €	42.352,- €/t
②	Aluminium Felgen Satz [REI]	9.000,- €	350 kg	5,07 a	5.252,- €	25.700,- €/t

Tabelle 44 zeigt die Amortisationszeiten bei unterschiedlichen Konstellationen von Aufpreis und Gewichtsersparnis.

<b>Tabelle 44: Amortisationstabelle Langholz-FZG</b>						
<b>Amortisation Langholz-FZG</b>	Aufpreis [€]					
Gew.-Eersp. [t]	0,00	1.000	2.000	5.000	10.000	20.000
0,00	5,19	5,23	5,27	5,39	5,60	6,04
0,10	5,05	5,09	5,13	5,25	5,45	5,87
0,20	4,93	4,96	5,00	5,11	5,31	5,71
0,50	4,58	4,61	4,65	4,75	4,92	5,29
1,00	4,10	4,13	4,16	4,24	4,39	4,70
2,00	3,39	3,41	3,43	3,50	3,61	3,85
5,00	2,23	2,24	2,25	2,29	2,36	2,49

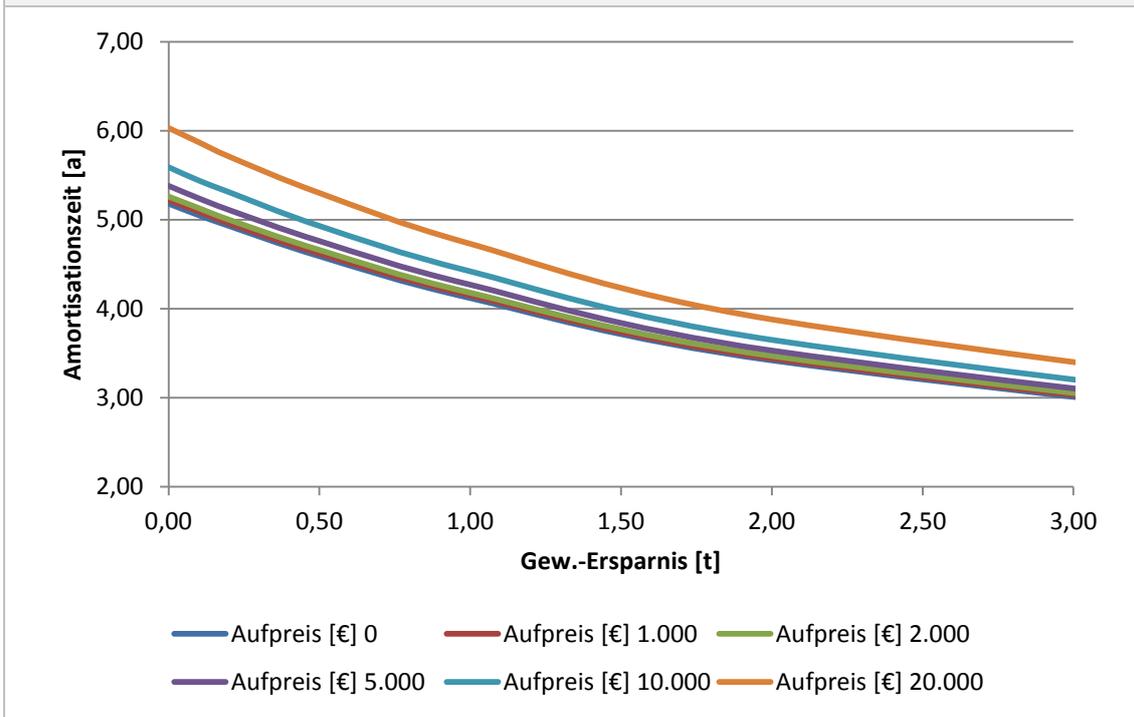
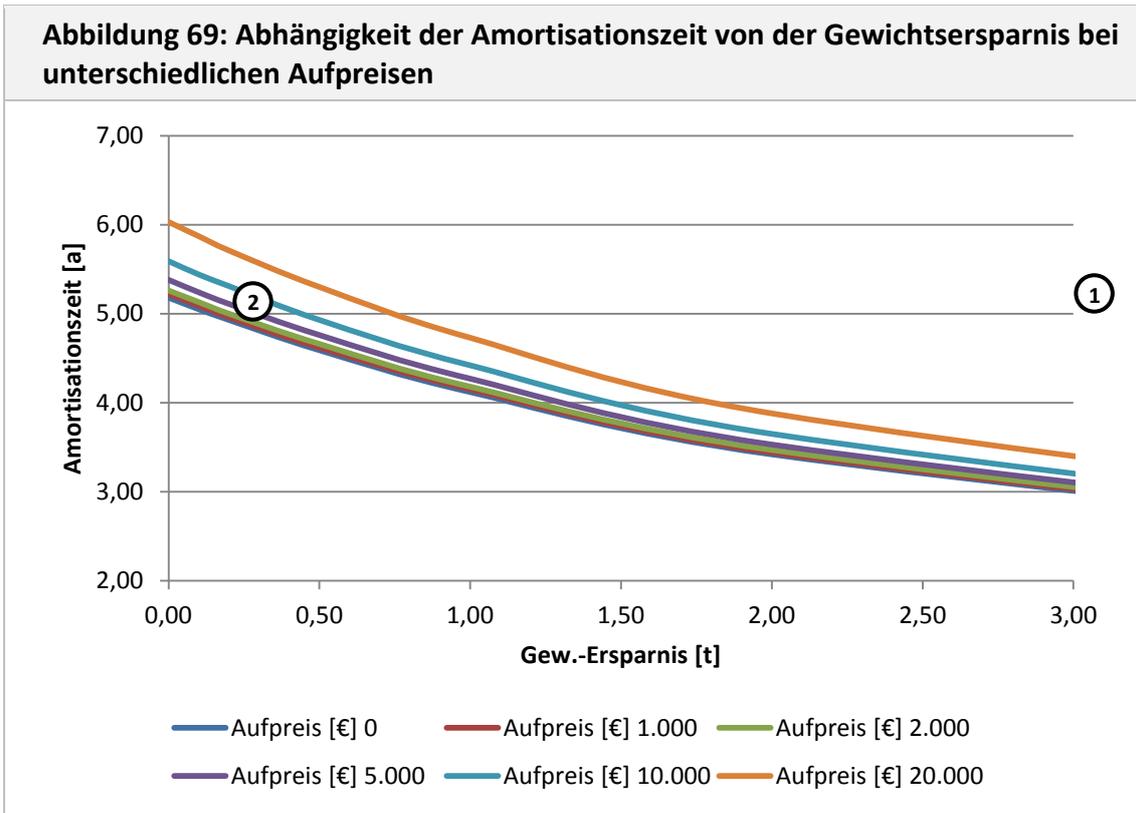
**Abbildung 69: Abhängigkeit der Amortisationszeit von der Gewichtersparnis bei unterschiedlichen Aufpreisen**

Abbildung 69 verdeutlicht die Abhängigkeiten. Das Langholz-Referenzfahrzeug verfügt über eine Amortisationszeit von 5,18 Jahren. Liegen die Werte für eine Maßnahme darüber, so ist die zusätzliche Investition in eine Leichtbaumaßnahme aufgrund der längeren Kapitalbindung mit größerer Unsicherheit verbunden, als bei Investition in das Referenzfahrzeug. Das Wirtschaftlichkeitsmodell zeigt jedoch für den betrachteten Bereich hinsichtlich einer Amortisation innerhalb der Nutzungsdauer ein unkritisches Verhalten.



Quelle: Mobima

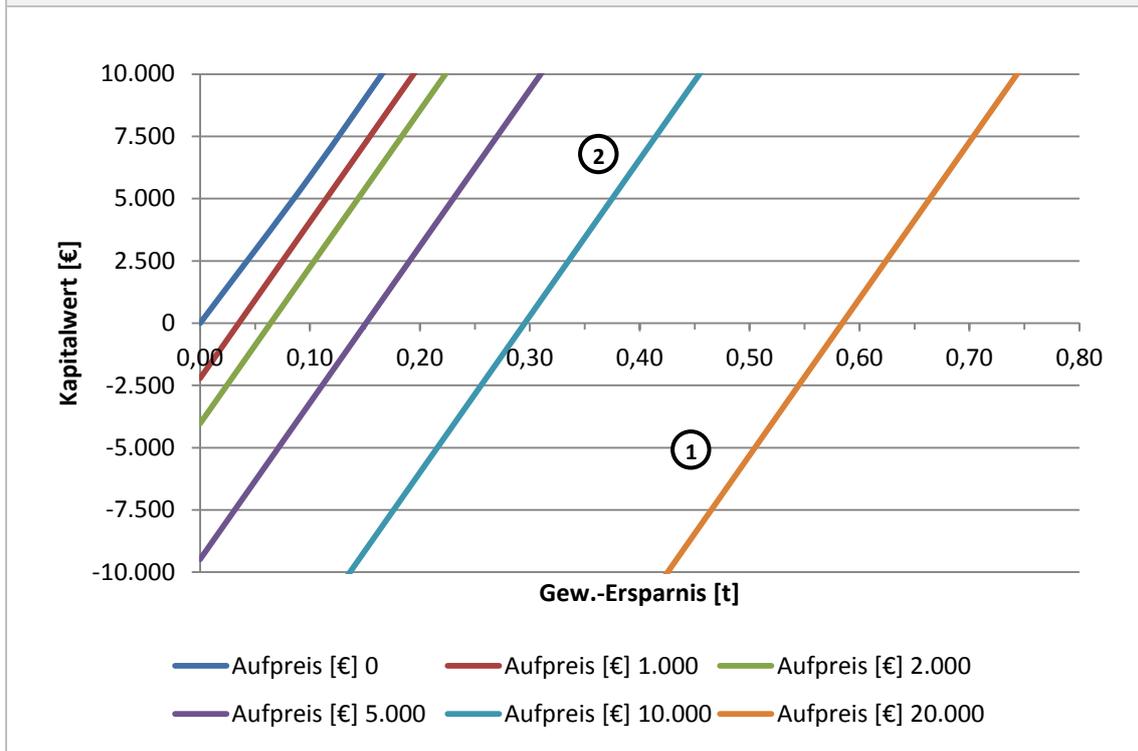
Für die Kapitalwerte ergeben sich Tabelle 45 und Abbildung 70. Liegt der Kapitalwert nach 7 Jahren Nutzungsdauer über Null, so rentiert sich die Investition gegenüber der Anlage am Kapitalmarkt zum Kalkulationszins.

**Tabelle 45: Kapitalwerttabelle Langholz-FZG**

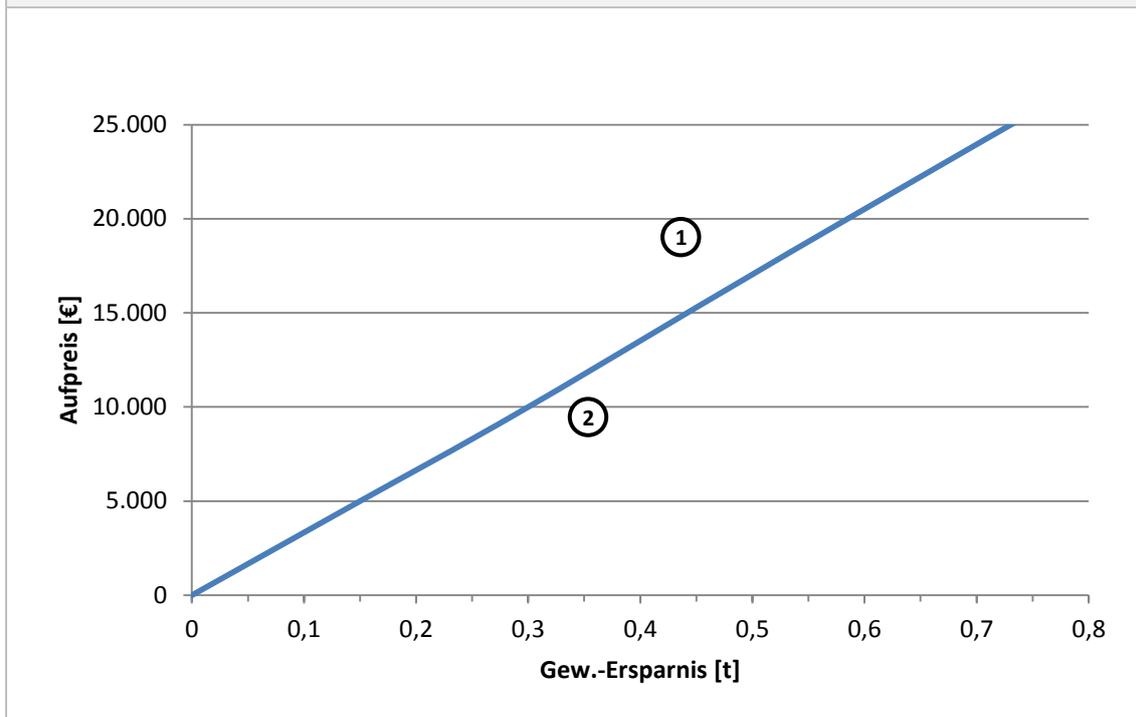
Kapitalwert Langholz-FZG	Aufpreis [€]					
Gew.-Eersp. [t]	0,00	1.000	2.000	5.000	10.000	20.000
0,00	0,00	-2.213	-4.030	-9.482	-18.568	-36.742
0,10	5.889	4.072	2.254	-3.197	-12.283	-30.218
0,20	12.176	10.358	8.541	3.089	-5.997	-24.170
0,50	31.042	29.224	27.407	21.955	12.869	-5.304
1,00	62.508	60.691	58.873	53.421	44.335	26.162
2,00	125.525	123.708	121.890	116.438	107.352	89.178
5,00	315.251	313.434	311.616	306.164	297.078	278.905

Abbildung 71 zeigt wiederum die beiden beispielhaft gewählten Leichtbaumaßnahmen aus Tabelle 43, gemessen an der Rentabilitätsschwelle. Diese liegt für den Referenz-Langholz-LKW bei 33.000 €/t und damit etwa 3.000 €/t höher als beim betrachteten Kurzholzfahrzeug. Daher weist hier der Einsatz von Aluminiumfelgen, also die gleiche Maßnahme wie beim Kurzholzfahrzeug, eine höhere Rentabilität auf. Dies spiegelt sich im Kapitalwert der Maßnahme nach 7 Jahren mit 5.205,- € wider.

**Abbildung 70: Abhängigkeit des Kapitalwertes von der Gewichtersparnis bei unterschiedlichen Aufpreisen**



Quelle: Mobima

**Abbildung 71: Rentabilitätsschwelle für Langholz-FZG**

Quelle: Mobima

#### 5.4.4 Fazit

Die Wirtschaftlichkeitsbewertung zeigt eine große Sensibilität der Kalkulation auf eine ungenaue Preisgestaltung eines Holztransportunternehmens. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass Leichtbau ein Weg zu einer besseren Rentabilität des Systems sein kann, jedoch ist jede Maßnahme auf Basis ihres Verhältnisses von Aufpreis zu Gew.-Ersparnis für jedes Gesamtfahrzeug einzeln zu bewerten. So liegt der Einsatz des beispielhaften Satzes Aluminiumfelgen für das dargestellte Kurzholzfahrzeug gerade auf der Rentabilitätsschwelle und ist daher nicht zu empfehlen, während der deutlich höhere Anschaffungspreis des Langholzfahrzeugs (siehe Tabelle 30) die Maßnahme bereits in einen rentablen Bereich verschiebt. Die Runge/Schemel-Kombination aus Aluminium, die für das Kurzholzfahrzeug betrachtet wurde, ist ein Beispiel für eine unter den gegebenen Randbedingungen durchaus rentable Maßnahme. Die Ausstattung eines Langholztransportfahrzeugs mit hydraulischer Vorderachse liegt weit jenseits der Rentabilitätsschwelle und ist ohne Berücksichtigung von z. B. Traktionsvorteilen, einem veränderten Kraftstoffverbrauch, etc. nicht empfehlenswert (wird ein 6x6 Fahrzeug zu Grunde gelegt, kann das Ergebnis hiervon abweichen.)

Das dargestellte Modell liefert darüber hinaus die Möglichkeit, die Einflüsse auf Wartungskosten, wiederkehrende Kosten aufgrund geringerer Lebensdauern als die Nutzungsdauer, etc. zu berücksichtigen.

Die quantitativen Ergebnisse des Modells sind nur für die gewählte Parametrierung basierend auf gemittelten Werten verschiedener Studien und Unternehmen gültig. Das Kostenmodell ist zur Entscheidung über konkrete Maßnahmen für jeden einzelnen Betrieb unter Berücksichtigung der betriebseigenen Preisgestaltung gegenüber dem Kunden (Sägewerk o. ä.) zu parametrieren.

## 5.5 Assistenz- und Sicherheitssysteme

Durch die voranschreitende Technik werden immer mehr elektronische Assistenzsysteme entwickelt, die den Transport von Schwergütern sicherer und vor allem kontrollierbarer machen sollen. Um die Systeme praxisnah klassifizieren zu können, wird zunächst zwischen gesetzlich vorgeschriebenen Systemen und solchen, die ein Transportunternehmen freiwillig einsetzen kann, im Folgenden als optionale Systeme bezeichnet, differenziert. Die optionalen Systeme wiederum werden in Maßnahmen unterteilt, die vom Fahrzeughersteller bereitgestellt werden oder vom Transportunternehmer selbst nachgerüstet werden können.

### 5.5.1 Gesetzlich vorgeschriebene Systeme

Aufgrund der hohen Unfallzahlen im Straßenverkehr bemühen sich seit Jahren verschiedene Fahrzeughersteller, den Transport auf der Straße sicherer zu gestalten. Neben dem technischen Zustand der LKW trägt auch der Fahrer einen Großteil zur Sicherheit bei. Da der Druck auf die Fahrer immer größer wird und die andauernde physische und psychische Belastung sich auf die Konzentration auswirkt, wurden die sogenannten Fahrsicherheitssysteme (FAS) entwickelt. Seit Jahren sind ABS (Anti-Blockier-System) und ASR (Antriebs-Schlupf-Regelung) bei allen Neuzulassungen von LKW Pflicht. Im November 2014 wurde dann auch die Ausstattung von Neufahrzeugen mit ESP (Elektronisches Stabilitätsprogramm) vorgeschrieben.

Neu hinzukommen wird im letzten Quartal 2015 das Notbremssystem AEBS (Advanced Emergency Braking System). Dies gilt zunächst für druckluftgebremste Nutzkraftwagen (NKW) mit zGG von > 8 t und luftgefedert/n Hinterachse/n. Im darauf folgenden Jahr müssen alle neuen NKW-Typen sowie ab November 2018 alle neu zugelassenen NKW mit zGG von > 3,5 t mit dem Sicherheitssystem ausgerüstet sein. Des Weiteren wird der Spurverlassenswarner LDWS (Lane Departure Warning System) ebenfalls ab November 2015 für alle zugelassenen Neufahrzeuge vorgeschrieben<sup>216</sup>.

Da diese Systeme Mehrkosten für das Transportunternehmen bedeuten, werden diese durch verschiedene Projekte subventioniert. So werden zum Beispiel seit 2009 aus den LKW-Maut-Einnahmen verschiedene Vorhaben von Unternehmen des Güterkraftverkehrs durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung gefördert. Dazu zählen auch sicherheitsbezogene Themen. Der jährliche Zuwendungshöchstbetrag soll durch das De-minimis-Förderprogramm abhängig von der Anzahl der LKW sein, die auf ein Unternehmen verkehrrechtlich zugelassen sind. In Grenzen dieses Höchstbetrages können jährlich nicht rückzahlbare Zuschüsse in Höhe von bis zu 33.000 € für ein Unternehmen beantragt werden, um zum Beispiel den Einbau eines FAS zu finanzieren.<sup>217</sup>

#### Funktion und Wirkung

- **ABS (Anti-Blockier-System):** Das Antiblockiersystem verhindert bei einer Vollbremsung das Blockieren der Reifen. Dadurch wird ein Rutschen des Fahrzeuges verhindert und die Stabilität des Fahrzeuges während des Bremsvorgangs gewährleistet.
- **AGB/AEBS (Advanced Emergency Braking System):** Die aktive Notbremsung wird häufig in Kombination mit einem abstandsgeregelten Tempomaten (ACC) angeboten. Mit einem Radarsensor werden ständig der Abstand und die Geschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug gemessen und bewertet. Die Warnung erfolgt meist in drei Stufen. Zuerst wird

---

<sup>216</sup> (Petersen, 2010)

<sup>217</sup> (DEKRA Automobil GmbH, 2009)

der Fahrer optisch/akustisch gewarnt. Reagiert dieser nicht, wird eine Teilbremsung eingeleitet. Sollte der Fahrer weiterhin nicht reagieren, wird eine Vollbremsung durchgeführt. Eine In-depth-Analyse aus dem Jahr 2009 von 500 Unfallberichten mit LKW hat ergeben, dass ca. 17 % der Unfälle hätten vermieden werden oder deren Ausgang hätte weniger schadhaft sein können, wenn diese mit AGB ausgerüstet gewesen wären.<sup>218</sup>

- **ASR (Antriebs-Schlupf-Regelung):** Die Antriebsschlupfregelung verhindert das Durchdrehen eines Reifens, wenn er zum Beispiel auf einen rutschigen Untergrund fährt. Dadurch kann ein Ausbrechen des Fahrzeuges verhindert werden.
- **ESP (Elektronisches Stabilitätsprogramm):** Die Fahrdynamikregelung stellt eine Kombination aus ABS, ASR und weiteren Systemen dar. Das System soll das Unter- bzw. Übersteuern des Fahrzeuges verhindern. Dies macht es durch gezieltes Abbremsen einzelner Räder. Besonders in Kurvenfahrten oder bei schnellen Lenkmanövern greift dieses System ein.
- **LDWS (Lane Departure Warning Systems):** Das Fahrzeug beobachtet mit Hilfe einer Kamera die Straße und registriert dabei die Fahrbahnmarkierungen. Überquert das Fahrzeug die Markierung ohne zu blinken, wird der Fahrer gewarnt. Häufig geschieht dies mit einem vibrierenden Lenkrad oder Fahrersitz. Dies soll verhindern, dass das Fahrzeug bei einem Sekundenschlaf die Fahrbahn verlässt und entweder in den Graben fährt oder andere Verkehrsteilnehmer zu Schaden kommen lässt. In derselben Analyse wie für das AGB wurde festgestellt, dass ca. 8 % der Unfälle damit hätten vermieden werden können.

### 5.5.2 Optionale Systeme

Auf dem Markt gibt es technische Lösungen, welche die Sicherheit von LKW über den gesetzlichen Standard hinaus erhöhen können. Damit kann der Umgang mit schweren Gütern verbessert oder sogar höhere Lasten beherrschbarer gemacht werden. Zu nennen wäre hier beispielsweise das CDC (Continuous Damping Control) oder das ACC (Adaptive Cruise Control).

Neben Systemen, welche die Fahreigenschaften des Fahrzeuges verbessern, gibt es auch Systeme, die der Überwachung des Fahrzeugzustandes und der Ladungssicherung dienen. Auch hier gilt es Vorschriften einzuhalten. Oft wird in diesem Bereich nur eine Empfehlung abgegeben und der Fahrer bzw. das Transportunternehmen muss selbst entscheiden, wie die Sicherung durchgeführt wird. Daher gibt es verschiedene Lösungen, um diese Vorschriften zu realisieren. Zu derartigen Lösungen zählen die automatische Niederrzurvorrichtung zur Ladungssicherung, die Reifendruckregelanlage und verschiedene weitere Wiegesysteme.

Eine erhöhte Nutzlast wirkt sich signifikant auf den Verbrauch eines Fahrzeugs aus. Der Kraftstoffverbrauch verursacht ca. 35 % der Kosten eines Transportunternehmens<sup>219</sup>. Ungefähr 20 % davon werden durch das Fahrverhalten des Fahrers bestimmt<sup>220</sup>. Aus diesem Grund werden Assistenzsysteme wie die automatische Gangermittlung eingesetzt, die bei der Optimierung des Kraftstoffverbrauchs unterstützen sollen.

Einige Systeme können nur mit technisch höherem Aufwand in bestehende Fahrzeuge integriert werden. Daher werden auch Lösungen genannt, die bei bestehenden Fahrzeugen einfach implementiert werden können und dennoch zu einer erhöhten Sicherheit und optimierter Überwachung führen. Eine Übersicht der verschiedenen Systeme ist in Abbildung 72 zu sehen.

---

<sup>218</sup> (Pfaffenbauer, Gwehenberger, Schwarz, & Wermuth, 2009)

<sup>219</sup> (UNIQUE forestry and land use GmbH, 2014)

<sup>220</sup> (Daimler AG, 2012)

## Funktion und Wirkung

- **ACC (Adaptive Cruise Control):** Ähnlich wie bei einem AEBS System wird der Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug und die Geschwindigkeit ermittelt. Mit einer angepassten Regelung wird das Fahrzeug auf passenden Abstand gehalten. Dabei werden die Geschwindigkeit, Beschleunigung und Verzögerung des Fahrzeuges eingestellt. Dieses System ist besonders für Autobahnen und Schnellstraßen geeignet<sup>221</sup>.
- **Automatische Gangermittlung:** Die automatisierte, elektrische Ansteuerung des Getriebes ermöglicht die Realisierung verschiedener, verbrauchssenkender Schaltmodi. So kann das System Schaltvorgänge beispielsweise dahingehend optimieren, dass, je nach topographischer Lage, die Motordrehzahl in einem optimalen Bereich liegt. Dadurch kann der Verbrauch gesenkt werden<sup>222</sup>.
- **CDC (Continuous Damping Control):** Die aktive Wankstabilisierung ist eine elektrisch gesteuerte Dämpfungseinheit, welche das Fahrzeug in Kurvenfahrten oder bei starkem Wind sowie beim Bremsen und Beschleunigen stabilisiert. Es wird vermieden, dass der Aufbau sich stark zur Seite neigt und somit ein Kippen des Fahrzeugs verhindert. Dies ist besonders bei Fahrzeugen mit hohem Schwerpunkt von Bedeutung<sup>223</sup>.
- **EBS (Elektronische Bremssteuerung):** Eine elektronische Bremssteuerung hat gegenüber konventioneller Bremsbetätigung verschiedene Vorteile. Dies wären zum Beispiel kürzere Ansprechzeiten, eine Anpassung an den Beladungszustand sowie die Optimierung des Belagverschleißes. Durch dieses System lässt sich auch die Bremseigenschaft des kompletten Zuges verbessern, indem die Bremsverteilung zwischen Zugmaschine und Anhänger angepasst wird. Weitere Eigenschaften sind bei Hoepke (2013) nachzulesen.
- **Ladungssicherung:** Das Vorgehen zur Ladungssicherung ist in DIN EN 12642 geregelt<sup>224</sup> und für die Sicherheit im Straßenverkehr von großer Bedeutung. Für den Holztransport, insbesondere den Kurzholztransport, gibt es seit 2006 eine Verladeempfehlung. Diese gibt in Abhängigkeit des transportierten Gutes und dessen Ausrichtung an, wo und wie viele Spannelemente genutzt werden sollten<sup>225</sup>.

Dabei wird jedoch die Tatsache, dass sich Rundhölzer aufgrund ihrer geometrischen Form während der Fahrt setzen können und die Vorspannung somit verloren geht, nicht berücksichtigt. Dies bedeutet, dass der Fahrer anhalten müsste, um die Elemente nachzuspannen. Um dies zu vermeiden, gibt es automatische Nachspannvorrichtungen, wie das mechanische System Luftman von ExTe oder das hydraulische System Woodlock von S-Tech. Das hydraulische System erreicht eine Niederspannkraft von bis zu 15 t pro Sicherungsbalken, sodass die Anzahl an Gurten reduziert werden kann<sup>226</sup>.

- **Wiegensysteme:** Lange wurde im Holzgewerbe das Gewicht der Stämme anhand von Tabellen geschätzt. Dabei haben Faktoren wie Länge, Dicke, Feuchtegrad und Holzart einen Einfluss auf das Gewicht. Nicht selten wird dies vernachlässigt und das Fahrzeug beladen, bis es voll ist. Dabei ist die Gefahr einer Überladung groß. Damit das Ladungsgewicht besser

---

<sup>221</sup> ACC - (MAN Truck & Bus AG, 2015)

<sup>222</sup> (Erich Hoepke, 2013)

<sup>223</sup> CDC - (MAN Truck & Bus AG, 2015)

<sup>224</sup> (Technisches Komitee CEN/TC 119, 2007)

<sup>225</sup> (agr Arbeitsgemeinschaft Rohholzverbraucher e.V., 2010)

<sup>226</sup> (ExTe Fabriks AB), (IHB, 2004)

abgeschätzt werden kann, gibt es verschiedene Wiegesysteme, mit denen vor Ort die Ladungsmasse bestimmt werden kann.

Zum einen gibt es telemetrische Kranwaagen, die zwischen Greifer und Kranarm montiert werden. Der Bediener kann das aktuelle Gewicht am Kran bequem ablesen. Das System ist für Kurzholz geeignet und kann sowohl statisch als auch dynamisch wiegen<sup>227</sup>. Des Weiteren gibt es On-Board-Waagen, die unter die Schemel installiert werden und damit das aufliegende Gewicht ermitteln<sup>228</sup>. Der Nachteil ist, dass für jede Runge eine eigene Waage benötigt wird. Eine andere Möglichkeit ergibt sich durch die Luftfederung des Fahrzeugs. Durch Messung des Innendruckes kann auf die Zuladung des Fahrzeuges geschlossen werden. Dies ist wohl das bevorzugte Wiegesystem, da die meisten LKW mit einer Luftfederung ausgestattet sind.

- **Reifendruckkontrolle:** Dieses System dient der Überwachung des Reifenfülldruckes bzw. des Druckabfalls im Reifen. Wird das Fahrzeug mit geeignetem Reifenfülldruck gefahren, können Kosten in Folge von Reifenschädigung und Kraftstoffkosten eingespart werden. Eine Abweichung des Reifenfülldruckes von ca. 15 % verkürzt die Lebensdauer des Reifens um ca. 10 % und der Kraftstoffverbrauch steigt um ca. 1-1,5 %<sup>229</sup>. Laut Michelin (2010) erhöht sich damit im Fernverkehr der Kraftstoffverbrauch bei einer Unterschreitung des idealen Luftdrucks von 30 % um ca. 1 l / 100 km. Dies gilt jedoch nur, je nach Einstellung, für Fahrten auf der Straße oder im Wald, da der Reifenfülldruck nicht variiert werden kann.
- **CTI (Central Tire Inflation):** Im Gegensatz zur Reifendruckkontrolle können CTI-Systeme den Luftdruck vor Ort anpassen. Dies ermöglicht es, den Reifendruck für den Wald zu senken und für den Transport auf der Straße wieder zu steigern. Der Vorteil liegt darin, dass im Wald die Traktion erhöht werden und auf der Straße der Rollwiderstand vermindert und somit Kraftstoff eingespart werden kann.

Brokmeier (2013) hat in seiner Dissertation das CTI-System auf seine Wirtschaftlichkeit für den Holztransport untersucht. Als Versuchsregion diente das Norddeutsche Tiefland. Durch seine umfangreichen Untersuchungen konnte belegt werden, dass sich die Traktion im unbefestigten Gelände um bis zu 13 % erhöhen lässt. Dadurch wäre es möglich, auch schwer zugängliche Stellen zu erreichen oder Fahrten während der Auftauphasen von gefrorenem Boden durchzuführen. Das Potential für den Verzicht auf eine zweite Antriebsachse aufgrund der Traktionserhöhung konnte nicht ermittelt werden. Das Absenken des Fülldruckes im unwegsamen Gelände führte zu einer Kraftstoffeinsparung zwischen 17 – 19 % für das beladene sowie 18 – 29 % für das unbeladene Fahrzeug. Diese Werte sind stark vom Untergrund und den eingestellten Parametern des CTI-Systems ab. Einen weiteren Vorteil sieht Brokmeier in der Tatsache, dass durch niedrigeren Reifenfülldruck die Waldwege geschont werden. Damit könnten die Intervalle zur Instandsetzung der Wege vergrößert und damit Kosten eingespart werden. Dies bedeutet, dass ein solches System Auswirkungen auf die gesamte Wertschöpfungskette Holz besitzt. Seine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hat ergeben, dass sich der Einbau eines CTI-Systems in einen üblichen 6x4-Kurzholzzug noch nicht lohnt. Dazu sind zum einen die Investitionskosten zu hoch, zum anderen gibt es derzeit noch keine praxistauglichen Systeme. Zurzeit werden die Schläuche außerhalb der Reifen geführt, was nur in Einzelfällen zugelassen wird bzw. nur eine Druck-

---

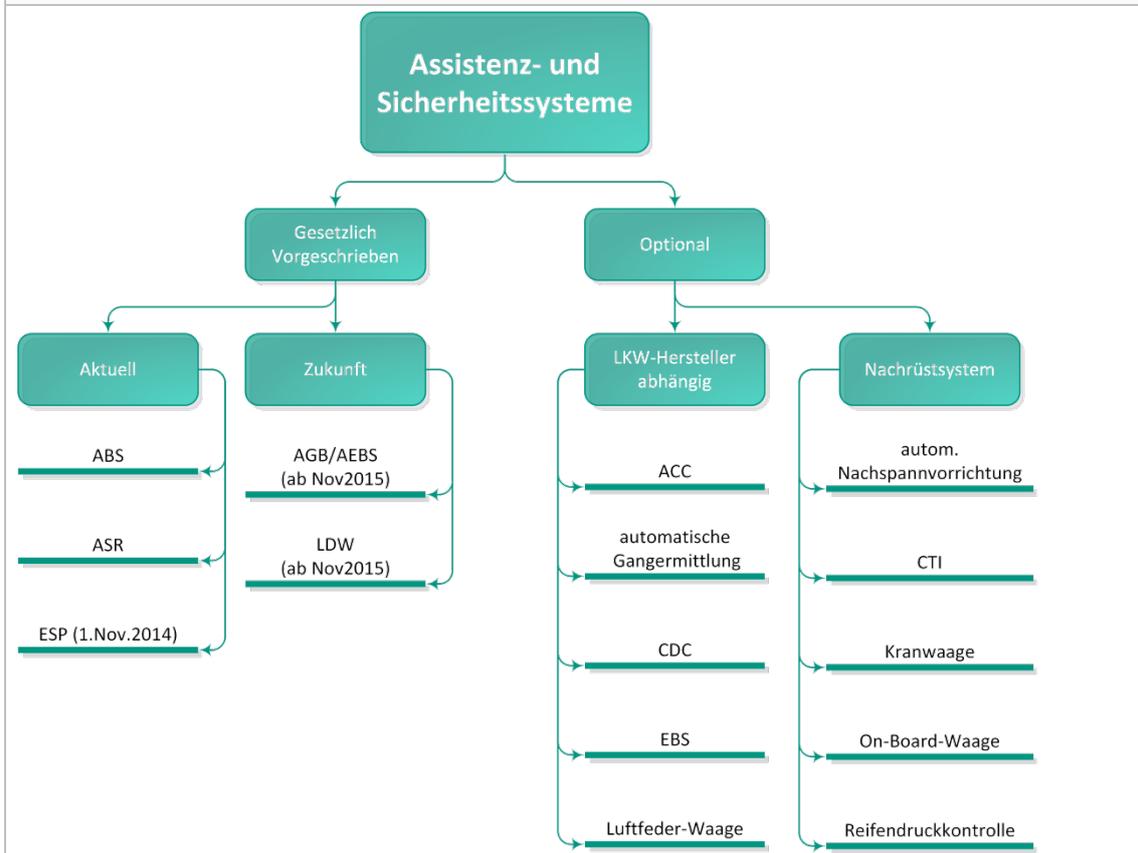
<sup>227</sup> (Esper & Panthel, 2014)

<sup>228</sup> (Borcherding, 2007)

<sup>229</sup> (SKF GmbH, 2015)

regelung im Stand ermöglicht. Auch die Lebensdauer der Systeme wird deshalb gering eingeschätzt.

**Abbildung 72: Übersicht der wichtigsten Assistenz- und Sicherheitssystemen für LKW**



Quelle: MOBIMA

Alleine mit der Einführung von ESP, LDWS und ACC wird nach Petersen (2010) davon ausgegangen, dass das Unfallrisiko im gesamten Lieferverkehr bezogen auf 2013 um mehr als 30 % gesenkt werden kann. Speziell auf den Holztransport bezogen konnten keine Daten ermittelt werden.

### 5.5.3 Fazit

Neben den ohnehin gesetzlich vorgeschriebenen Assistenzsystemen sind für den Holztransport insbesondere Systeme zur Ladungssicherung, zur Unterstützung des Fahrers beim Ladungsmanagement (z. B. Wiegesysteme) und beim effizienten Fahren (z. B. Gangermittlung) empfehlenswert. Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit dieser Systeme fehlt eine belastbare Datengrundlage. Der Einsatz von CTI-Systemen konnte jedoch bei Brokmeier<sup>230</sup> als wirtschaftlich sinnvoll bewertet werden, falls aufgrund besserer Traktionswerte bei angepasstem Luftdruck der Antriebstrang auf eine 6x2-Konfiguration anstelle einer 6x4-Konfiguration reduziert wird.

<sup>230</sup> (Brokmeier, 2013)

## 5.6 Zusammenfassung

Am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen (KIT) wurden im Rahmen des Projektes die technischen Optimierungsmöglichkeiten der Holztransportfahrzeuge identifiziert und nach wirtschaftlichen Aspekten ausgewertet.

### 5.6.1 Bestimmung LKW-Referenzwerte und Wirtschaftlichkeitsanalyse von Gewichtsreduktionen

Zunächst wurden in Abstimmung mit dem Arbeitskreis typische Referenzfahrzeuge definiert, um eine Nutzlasterhöhung zu diskutieren. Für den Kurzholztransport wurde ein 40 t Zug ohne Kran und für den Langholzsektor ein 40 t Zug mit Kran spezifiziert.

In Kapitel 5.2 wurden Achsbelastungen und Reifenaufstandsflächen berechnet.

Eine Nutzlasterhöhung durch Erhöhung der Zuladung setzt die Belastbarkeit der eingesetzten Komponenten voraus. Die Berechnung der Schwerpunktabhängigkeit der Achslasten hat gezeigt, dass ein Beladen an die Obergrenze der summierten technischen Achslasten aller einzelnen Achsen für den Holztransport i. A. nicht empfehlenswert ist, da die Schwerpunktlage nicht exakt getroffen werden kann und die Überlastung einzelner Achsen droht.

Die Reifenaufstandsflächen hängen insbesondere von der gewählten Bereifung, den Achslasten und den Reifeninnendrücken ab.

Die Berechnungen haben gezeigt, dass insbesondere durch die verbreitete Zwillingsbereifung die Kontaktflächendrücke selbst mit 53 t Gesamtgewicht im Mittel bei Holztransportfahrzeugen deutlich unter dem Kontaktflächendruck der Referenzfahrzeuge aus dem Fernverkehr bleiben. Die Ergebnisse für die definierten Referenzfahrzeuge für Lang- und Kurzholztransport wurden zur Abschätzung von Fahrbahnschädigungen den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

In Kapitel 5.3 wurden Leichtbaumaßnahmen zusammengestellt, mit denen bereits ohne Steigerung des Fahrzeuggesamtgewichtes eine höhere Nutzlast transportiert werden kann. Die aufgeführten Maßnahmen, untergliedert in klassischen Leichtbau durch Materialauswahl, geänderte Strukturen, Rightsizing, alternative Maßnahmen und Kranaufbauten sind in der Branche bekannt und kommen mit unterschiedlicher Verbreitung zum Einsatz. Je nach Überzeugung des Aufbauherstellers und des Fuhrunternehmers wird in manchen Bereichen bewusst zu Gunsten von Robustheit, Langlebigkeit und Sicherheitsreserven auf Leichtbau verzichtet. Je nach Einsatzgebiet und Hauptsortiment des Fahrzeuges ist nicht jeder Kompromiss bezüglich des Leergewichtes sinnvoll. Dieser wirtschaftliche Aspekt wurde abschließend in Kapitel 5.4 analysiert.

Die Wirtschaftlichkeitsbewertung zeigt eine große Sensibilität der Kalkulation in Reaktion auf die erzielbaren Transportpreise und untermauert damit die Bedeutung rationaler Kosten-Nutzen-Analysen als Entscheidungsgrundlage für Holztransportunternehmen Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass Leichtbau ein Weg zu einer besseren Rentabilität des Systems sein kann. Jedoch ist jede Maßnahme auf Basis ihres Verhältnisses von Aufpreis zu Gewichtersparnis für jedes Gesamtfahrzeug einzeln zu bewerten. So liegt der Einsatz des beispielhaften Satzes Aluminiumfelgen für das dargestellte Kurzholzfahrzeug gerade auf der Rentabilitätsschwelle und ist daher nicht zu empfehlen, während der deutlich höhere Anschaffungspreis des Langholzfahrzeugs (siehe Tabelle 30) die Maßnahme bereits in einen rentablen Bereich verschiebt. Die Runge/Schemel-Kombination aus Aluminium, die für das Kurzholzfahrzeug betrachtet wurde, ist ein Beispiel für eine unter den gegebenen Randbedingungen durchaus ren-

table Maßnahme. Die Ausstattung eines Langholztransportfahrzeugs mit hydraulischer Vorderachse liegt weit jenseits der Rentabilitätsschwelle und ist ohne Berücksichtigung von z.B. Traktionsvorteilen, einem veränderten Kraftstoffverbrauch, etc. nicht empfehlenswert.

Das dargestellte Modell liefert wie oben beschrieben die Möglichkeit, die Einflüsse auf Wartungskosten, wiederkehrende Kosten aufgrund geringerer Lebensdauern als die Nutzungsdauer, etc. zu berücksichtigen.

Die quantitativen Ergebnisse des Modells sind nur für die gewählte Parametrierung, basierend auf gemittelten Werten verschiedener Studien und Unternehmen, gültig. Das Kostenmodell ist zur Entscheidung über konkrete Maßnahmen für jeden einzelnen Betrieb unter Berücksichtigung der betriebseigenen Preisgestaltung gegenüber dem Kunden (Sägewerk o.ä.) zu parametrieren.

### 5.6.2 Fahrassistenz- und Sicherheitsoptionen im Holztransport

Im Bereich der Fahrerassistenz- und Sicherheitssysteme sind für LKW bereits viele Entwicklungen der letzten Jahre zur Vorschrift geworden. So ist es sinnvoll, die recherchierten Systeme nach gesetzlich vorgeschriebenen und optionalen Systemen zu untergliedern. Vorgeschrieben sind insbesondere solche Systeme, die über einen aktiven Fahrwerkseingriff die Kontrollierbarkeit eines LKWs in kritischen Situationen verbessern. Die Systeme sind auch für höhere Gesamtgewichte (> 40t) geeignet und verbessern die Unfallquoten von LKW deutlich.

- ABS (Anti-Blockier-System)
- AGB/AEBS (Advanced Emergency Braking System)
- ASR (Antriebs-Schlupf-Regelung)
- ESP (Elektronisches Stabilitätsprogramm)
- LDWS (lane departure warning systems)
- Daneben sind optional folgende Systeme verfügbar.
- ACC (Adaptive Cruise Control)
- Automatische Gangermittlung
- CDC (Continuous Damping Control)
- EBS (Elektronische Bremssteuerung)
- Ladungssicherung
- Wiegesysteme
- Reifendruckkontrolle
- CTI (Central Tire Inflation)

Für den Holztransport sind insbesondere Wiegesysteme interessant, durch die das Einhalten und Ausreizen gesetzlicher Zulassungsgrenzen besser handzuhaben ist. Die Ladungssicherung (bspw. nachstraffende Gurtsysteme) erhöhen nochmals die Sicherheit während der Fahrt.

## 5.7 Literaturverzeichnis

- ADAC (2015): Abgerufen am 06.2015 von Kraftstoffpreise: [www.adac.de/infotestrat](http://www.adac.de/infotestrat)
- agr Arbeitsgemeinschaft Rohholzverbraucher e.V. (2010): agr Themen: Logistik. Abgerufen am 07. 05 2015 von <http://www.rohholzverbraucher.de/sites/themen.php?id=3> Ladungssicherung:
- Borcherding, M. (2007): Rundholztransportlogistik in Deutschland - eine transaktionskostenorientierte empirische Analyse. Universität Hamburg.
- Brokmeier, H. (2013): Zum Einsatz von CTI-Systemen beim Rohholztransport. Göttingen: Cuvillier Verlag.
- Daimler AG. (2012): Lkw heute – Herausforderung für die Zukunft - Vom "Labor" Nado in den realen Einsatz. Bielefeld, Nordrhein-Westfalen, Deutschland.
- DEKRA Automobil GmbH (2009): Verkehrssicherheitsreport. Stuttgart.
- Dietmar Ingelfinger, M. L. (2014): Leichtbau-Fahrgestell mit Einzelradaufhängung Lkw. In W. Siebenpfeiffer, Leichtbau-Technologien im Automobilbau (S. 146-151). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- DOLL Fahrzeugbau AG (April 2013): Doll setzt auf Stahl. Forst & Technik, 68.
- Erich Hoepke, S. B. (Hrsg.) (2013): Nutzfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Esper, O., & Panthel, J. (01 2014): Gewichtsvermessung mit Kranwaage. Forst & Technik, S. 14-17.
- ExTe Fabriks AB. (kein Datum): ExTe Straße-Pradukte: Luftman. Abgerufen am 07. 05 2015 von [Luftman – für hohe Verkehrssicherheit: http://www.exte.se/de/pages.asp?r\\_id=89004](http://www.exte.se/de/pages.asp?r_id=89004)
- IHB. (02. 10 2004): IHB Das Netzwerk der Holzindustrie. Abgerufen am 07. 05 2015 von [Rundholz: Praktikable Ladungssicherung: http://www.ihb.de/fordaq/news/Rundholz\\_Ladungssicherung\\_10059.html](http://www.ihb.de/fordaq/news/Rundholz_Ladungssicherung_10059.html)
- Kraftfahrt-Bundesamt. (01. Januar 2014): Fahrzeugzulassungen (FZ) Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten. Flensburg, Deutschland. Abgerufen am 14. November 2014 von [Kraftfahrt-Bundesamt: http://www.kba.de/DE/Presse/Presseportal/FZ\\_Bestand/fz25\\_bestand\\_nutzfz\\_anhaenger\\_technischeDaten\\_inhalt.html](http://www.kba.de/DE/Presse/Presseportal/FZ_Bestand/fz25_bestand_nutzfz_anhaenger_technischeDaten_inhalt.html)
- MAN Truck & Bus AG. (2011): MAN Antriebstechnik: Hypoidachsen. Abgerufen am 29. 12 2014 von [Verlust- und geräuscharmer Achsantrieb: http://mis.mn.man.de/data/media557e.html?a=0&l=110000001&h1=6&h2=150&h3=1076&mid=&fs=1&iid=](http://mis.mn.man.de/data/media557e.html?a=0&l=110000001&h1=6&h2=150&h3=1076&mid=&fs=1&iid=)
- MAN Truck & Bus AG. (2015): MAN Faszination & Technik: ACC. Abgerufen am 07. 05 2015 von [Abstandsgeregelter Tempomat: http://www.truck.man.eu/de/de/faszination-und-technik/technologie-und-kompetenz/technik/abstandsgeregelter-tempomat/Abstandsgeregelter-Tempomat.html](http://www.truck.man.eu/de/de/faszination-und-technik/technologie-und-kompetenz/technik/abstandsgeregelter-tempomat/Abstandsgeregelter-Tempomat.html)
- MAN Truck & Bus AG. (2015): MAN Faszination & Technik: CDC. Abgerufen am 07. 05 2015 von [Continuous Damping Control \(Aktive Wankstabilisierung\): http://www.truck.man.eu/de/de/faszination-und-technik/technologie-und-kompetenz/technik/continuous-damping-control/Continuous-Damping-Control.html](http://www.truck.man.eu/de/de/faszination-und-technik/technologie-und-kompetenz/technik/continuous-damping-control/Continuous-Damping-Control.html)
- Michelin Reifenwerke AG & Co. KGaA. (2010): Baumgärtner, Burkhard: Rollwiderstand von Reifen im wirtschaftlichen und umweltpolitischen Spannungsfeld.

- Petersen, E. (November 2010): Zu Fahrerassistenzsystemen FAS für. Wissensblatt 16.
- Pfaffenbauer, T., Gwehenberger, J., Schwarz, S., & Wermuth, G. (2009): Unfallstruktur- und Wirkpotenzialanalysen zu den AKTIV-Applikationen auf der Basis von Lkw-Haftpflichtschäden. München: AZT Automotive GmbH.
- Reith, D. (Juni 2015): (B. Jahnke, Interviewer)
- Schuler, R. (Juni 2015): (B. Jahnke, Interviewer)
- SKF GmbH . (13. 04 2015): SKF Deutschland - Aktuelles. Abgerufen am 07. 05 2015 von Neues Reifendruck-Überwachungssystem von SKF verbessert Fahrsicherheit von Lkw und reduziert zugleich deren Transportkosten: <http://www.skf.com/de/news-and-media/news-search/2015-04-13%20Neues%20Reifendruck-Überwachungssystem%20von%20SKF.html>
- Statistisches Bundesamt. (2015): Abgerufen am 06 2015 von [www.destatis.de](http://www.destatis.de)
- Technisches Komitee CEN/TC 119. (2007): DIN EN 12642. Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen – Aufbauten an Nutzfahrzeugen – Mindestanforderungen.
- Toll Collect. (2015): Abgerufen am 06 2015 von Mautkosten: [www.toll-collect.de](http://www.toll-collect.de)
- TU Harburg. (kein Datum): Wirtschaftsverkehr in Ballungsräumen . Abgerufen am 29. 12 2014 von WIHAG, BPW und SAF - Technische Innovationen zur Gewichtsreduktion von Trailern: <http://www.vsl.tu-harburg.de/gv/2/test?menu=2d&inhalt=2d5>
- Zeisler, C. (2011): Holzlogistik - Diskrepanz zwischen Anspruch und Realität. Hundisburg.

## 5.8 Anlagen

### Anlage 1: Achslasten und Radaufstandsflächen

Die roten Zahlen markieren Überschreitungen der zulässigen Achslasten. Die farblich markierten Abschnitte beziehen sich auf Referenz- und Holztransportfahrzeuge mit unterschiedlichen Annahmen bzgl. des Gesamtgewichts.

Tabelle 46: Achslasten und Radaufstandsflächen des Gliederzuges								
		1. Achse	2. Achse	3. Achse	4. Achse	5. Achse	Gesamt	
zGG Zug	[kg]	40.000						
zGG Zugmaschine / Anhänger	[kg]	26.000		18.000			44.000	
Leergewicht Zugmaschine / Anhänger	[kg]	9.465		4.720			14.185	
Schwerpunkt Abstand Fahrgestell zur 1.Achse	[m]	2,03		12,61			-	
Radstände	[m]	0,00	4,60	1,31	4,20	5,40	15,51	
Federsteifigkeiten	[N/m]	0,620	1,150	0,620	0,740	0,740	-	
Reifengröße R 22,5		315/70 R	315/70 R	315/70 R	385/65 R	385/65 R		
technisch zul. Achslasten	[kg]	7.500	13.000	7.500	9.000	9.000	46.000	
Reifendruck	[kPa]	8.500	8.500	8.500	9.000	9.000		
Gesamtgewicht Zugmaschine / Anhänger	[kg]	24.000		16.000			<b>40.000</b>	
Ladung Zugmaschine / Anhänger	[kg]	14.535		11.280			25.815	
Schwerpunkt Abstand Ladung zur 1.Achse	[m]	4,55		12,88			-	
berechnete Achslasten	[kg]	7.197	10.656	6.147	8.029	7.971	<b>40.000</b>	
Aufstandsfläche des Latsches pro Rad	[m <sup>2</sup> ]	0,0528	0,0413	0,0463	0,0541	0,0537	0,5788	
mittlerer Kontaktflächendruck	[kPa]	6.689	6.335	6.512	7.281	7.274	6.779	
maximaler Kontaktflächendruck	[kPa]	15.178	14.375	14.776	16.520	16.505	15.382	
Gesamtgewicht Zugmaschine / Anhänger	[kg]	26.000		18.000			<b>44.000</b>	
Ladung Zugmaschine / Anhänger	[kg]	16.535		13.280			29.815	
Schwerpunkt Abstand Ladung zur 1.Achse	[m]	4,55		12,88			-	
berechnete Achslasten	[kg]	7.405	<b>11.792</b>	6.803	9.003	8.997	<b>44.000</b>	
Aufstandsfläche des Latsches pro Rad	[m <sup>2</sup> ]	0,0541	0,0448	0,0503	0,0599	0,0598	0,6272	
mittlerer Kontaktflächendruck	[kPa]	6.719	6.462	6.628	7.376	7.375	6.882	
maximaler Kontaktflächendruck	[kPa]	15.246	14.663	15.039	16.735	16.734	15.614	

Quelle: Mobima

**Tabelle 47: Achslasten und Radaufstandsflächen des Sattelzuges**

		1. Achse	2. Achse	3. Achse	4. Achse	5. Achse	Gesamt	
zGG Zug	[kg]	40.000						
zGG Zugmaschine / Anhänger	[kg]	18.000		39.000			57.000	
Leergewicht Zugmaschine / Anhänger	[kg]	7.130		6.160			13.290	
Schwerpunktabstand Fahrgestell zur 1.Achse	[m]	1,09		9,04			-	
Radstände	[m]	0,00	3,70	5,72	1,31	1,31	12,04	
Federsteifigkeiten	[N/m]	0,620	1,150	0,740	0,740	0,740	-	
Reifengröße R 22,5		315/70 R	315/70 R	385/65 R	385/65 R	385/65 R		
technisch zul. Achslasten	[kg]	8.000	13.000	9.000	9.000	9.000	48.000	
Reifendruck	[kPa]	9.000	8.000	9.000	9.000	9.000		
Gesamtgewicht Zugmaschine / Anhänger	[kg]	16.549		23.451			<b>40.000</b>	
Ladung Zugmaschine / Anhänger	[kg]	9.419		17.291			26.710	
Schwerpunktabstand Ladung zur 1.Achse	[m]	8,435					-	
berechnete Achslasten	[kg]	6.494	10.055	7.817	7.817	7.817	<b>40.000</b>	
Aufstandsfläche des Latsches pro Rad	[m <sup>2</sup> ]	0,0468	0,0411	0,0528	0,0528	0,0528	0,5752	
mittlerer Kontaktflächendruck	[kPa]	6.799	5.998	7.257	7.257	7.257	6.823	
maximaler Kontaktflächendruck	[kPa]	15.428	13.610	16.466	16.466	16.466	15.480	
Gesamtgewicht Zugmaschine / Anhänger	[kg]	17.753		26.247			<b>44.000</b>	
Ladung Zugmaschine / Anhänger	[kg]	10.623		20.087			30.710	
Schwerpunktabstand Ladung zur 1.Achse	[m]	8,435					-	
berechnete Achslasten	[kg]	6.680	11.073	8.749	8.749	8.749	<b>44.000</b>	
Aufstandsfläche des Latsches pro Rad	[m <sup>2</sup> ]	0,0480	0,0443	0,0584	0,0584	0,0584	0,6234	
mittlerer Kontaktflächendruck	[kPa]	6.831	6.127	7.353	7.353	7.353	6.924	
maximaler Kontaktflächendruck	[kPa]	15.499	13.902	16.683	16.683	16.683	15.710	

Quelle: Mobima

**Tabelle 48: Achslasten und Radaufstandsflächen des Kurzholztransporters**

		1. Achse	2. Achse	3. Achse	4. Achse	5. Achse	Gesamt	
zGG Zug	[kg]	40.000						
zGG Zugmaschine / Anhänger	[kg]	26.000		18.000			44.000	
Leergewicht Zugmaschine / Anhänger	[kg]	15.085		3.400			18.485	
Schwerpunkt Abstand Fahrgestell zur 1.Achse	[m]	3,85		13,30			-	
Radstände	[m]	0,00	4,80	1,35	5,10	4,50	15,75	
Federsteifigkeiten	[N/m]	0,740	1,060	1,060	0,833	0,833	-	
Reifengröße R 22,5		385/65 R	315/80 R	315/80 R	275/70 R	275/70 R		
technisch zul. Achslasten	[kg]	9.000	12.000	12.000	10.000	10.000	53.000	
Reifendruck	[kPa]	8.500	7.500	7.500	7.500	7.500		
<hr/>								
Gesamtgewicht Zugmaschine / Anhänger	[kg]	24.000		16.000			<b>40.000</b>	
Ladung Zugmaschine / Anhänger	[kg]	8.915		12.600			21.515	
Schwerpunkt Abstand Ladung zur 1.Achse	[m]	4,09		13,54			-	
berechnete Achslasten	[kg]	6.728	8.636	8.636	8.039	7.961	<b>40.000</b>	
Aufstandsfläche des Latsches pro Rad	[m <sup>2</sup> ]	0,0463	0,0410	0,0410	0,0348	0,0346	0,6987	
mittlerer Kontaktflächendruck	[kPa]	7.123	5.161	5.161	5.662	5.643	5.616	
maximaler Kontaktflächendruck	[kPa]	16.162	11.710	11.710	12.848	12.804	12.744	
<hr/>								
Gesamtgewicht Zugmaschine / Anhänger	[kg]	26.000		18.000			<b>44.000</b>	
Ladung Zugmaschine / Anhänger	[kg]	10.915		14.600			25.515	
Schwerpunkt Abstand Ladung zur 1.Achse	[m]	4,09		13,54			-	
berechnete Achslasten	[kg]	7.232	9.384	9.384	9.021	8.979	<b>44.000</b>	
Aufstandsfläche des Latsches pro Rad	[m <sup>2</sup> ]	0,0493	0,0435	0,0435	0,0376	0,0375	0,7472	
mittlerer Kontaktflächendruck	[kPa]	7.192	5.287	5.287	5.884	5.875	5.777	
maximaler Kontaktflächendruck	[kPa]	16.319	11.996	11.996	13.351	13.331	13.107	
<hr/>								
Gesamtgewicht Zugmaschine / Anhänger	[kg]	26.000		20.000			<b>46.000</b>	
Ladung Zugmaschine / Anhänger	[kg]	10.915		16.600			27.515	
Schwerpunkt Abstand Ladung zur 1.Achse	[m]	4,09		13,54			-	
berechnete Achslasten	[kg]	7.232	9.384	9.384	10.004	9.996	<b>46.000</b>	
Aufstandsfläche des Latsches pro Rad	[m <sup>2</sup> ]	0,0493	0,0435	0,0435	0,0404	0,0404	0,7699	
mittlerer Kontaktflächendruck	[kPa]	7.192	5.287	5.287	6.075	6.074	5.861	
maximaler Kontaktflächendruck	[kPa]	16.319	11.996	11.996	13.785	13.781	13.300	
<hr/>								
Gesamtgewicht Zugmaschine / Anhänger	[kg]	33.000		20.000			<b>53.000</b>	
Ladung Zugmaschine / Anhänger	[kg]	17.915		16.600			34.515	
Schwerpunkt Abstand Ladung zur 1.Achse	[m]	4,09		13,54			-	
berechnete Achslasten	[kg]	9.000	12.000	12.000	10.004	9.996	<b>53.000</b>	
Aufstandsfläche des Latsches pro Rad	[m <sup>2</sup> ]	0,0598	0,0522	0,0522	0,0404	0,0404	0,8605	
mittlerer Kontaktflächendruck	[kPa]	7.380	5.634	5.634	6.075	6.074	6.042	
maximaler Kontaktflächendruck	[kPa]	16.746	12.784	12.784	13.785	13.781	13.709	

Quelle: Mobima

**Tabelle 49: Achslasten und Radaufstandsflächen des Langholztransporters**

		1. Achse	2. Achse	3. Achse	4. Achse	5. Achse	Gesamt	
zGG Zug	[kg]	40.000						
zGG Zugmaschine / Anhänger	[kg]	26.000		18.000			44.000	
Leergewicht Zugmaschine / Anhänger	[kg]	15.250		4.050			19.300	
Schwerpunkt Abstand Fahrgestell zur 1.Achse	[m]	3,85		18,71			-	
Radstände	[m]	0,00	4,10	1,37	11,99	2,60	20,06	
Federsteifigkeiten	[N/m]	0,740	1,060	1,060	0,833	0,833	-	
Reifengröße R 22,5		315/80 R	315/80 R	315/80 R	315/80 R	315/80 R		
technisch zul. Achslasten	[kg]	9.000	12.000	12.000	10.000	10.000	53.000	
Reifendruck	[kPa]	9.000	7.500	7.500	6.000	6.000		
Gesamtgewicht Zugmaschine / Anhänger	[kg]	24.148		15.852			<b>40.000</b>	
Ladung Zugmaschine / Anhänger	[kg]	8.898		11.802			20.700	
Schemelabstand	[m]	11,40						18,00
Überhang Vorne / Hinten	[m]	1,00		5,60				
Schwerpunkt Abstand Ladung zur 1.Achse	[m]	11,38						-
berechnete Achslasten	[kg]	8.868	7.640	7.640	7.913	7.939	<b>40.000</b>	
Aufstandsfläche des Latsches pro Rad	[m <sup>2</sup> ]	0,0612	0,0377	0,0377	0,0422	0,0423	0,7618	
mittlerer Kontaktflächendruck	[kPa]	7.112	4.967	4.967	4.602	4.607	5.151	
maximaler Kontaktflächendruck	[kPa]	16.138	11.269	11.269	10.442	10.454	11.687	
Gesamtgewicht Zugmaschine / Anhänger	[kg]	25.868		18.132			<b>44.000</b>	
Ladung Zugmaschine / Anhänger	[kg]	10.618		14.082			24.700	
Schemelabstand	[m]	11,40						18,00
Überhang Vorne / Hinten	[m]	1,00		5,60				
Schwerpunkt Abstand Ladung zur 1.Achse	[m]	11,38						-
berechnete Achslasten	[kg]	8.836	8.516	8.516	9.035	9.097	<b>44.000</b>	
Aufstandsfläche des Latsches pro Rad	[m <sup>2</sup> ]	0,0610	0,0406	0,0406	0,0460	0,0462	0,8161	
mittlerer Kontaktflächendruck	[kPa]	7.109	5.139	5.139	4.815	4.825	5.289	
maximaler Kontaktflächendruck	[kPa]	16.130	11.660	11.660	10.925	10.949	12.001	
Gesamtgewicht Zugmaschine / Anhänger	[kg]	26.028		19.972			<b>46.000</b>	
Ladung Zugmaschine / Anhänger	[kg]	10.778		15.922			26.700	
Schemelabstand	[m]	10,90						18,00
Überhang Vorne / Hinten	[m]	1,00		6,10				
Schwerpunkt Abstand Ladung zur 1.Achse	[m]	11,38						-
berechnete Achslasten	[kg]	8.832	8.598	8.598	9.941	10.031	<b>46.000</b>	
Aufstandsfläche des Latsches pro Rad	[m <sup>2</sup> ]	0,0609	0,0409	0,0409	0,0491	0,0494	0,8435	
mittlerer Kontaktflächendruck	[kPa]	7.109	5.154	5.154	4.962	4.976	5.350	
maximaler Kontaktflächendruck	[kPa]	16.129	11.694	11.694	11.259	11.290	12.139	
Gesamtgewicht Zugmaschine / Anhänger	[kg]	31.716		21.284			<b>53.000</b>	
Ladung Zugmaschine / Anhänger	[kg]	16.466		17.234			33.700	
Schemelabstand	[m]	12,71						18,00
Überhang Vorne / Hinten	[m]	1,00		4,29				
Schwerpunkt Abstand Ladung zur 1.Achse	[m]	11,38						-
berechnete Achslasten	[kg]	8.726	11.495	11.495	<b>10.587</b>	<b>10.697</b>	<b>53.000</b>	
Aufstandsfläche des Latsches pro Rad	[m <sup>2</sup> ]	0,0603	0,0506	0,0506	0,0514	0,0517	0,9374	
mittlerer Kontaktflächendruck	[kPa]	7.098	5.576	5.576	5.056	5.072	5.547	
maximaler Kontaktflächendruck	[kPa]	16.105	12.653	12.653	11.473	11.507	12.585	

## 6 Straßen

### Bearbeitung

Tobias Götz, M. Sc.

Lehrstuhl für Straßenplanung und Straßenbau

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Universität Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. W. Ressel

### 6.1 Aufgabenstellung

Das hier beschriebene Teilprojekt TAP 3.1 des Projektes „HoLoBaWü“ untersucht und zeigt die Auswirkungen variierender Gesamtgewichte von LKW-Holztransporten auf die Straßeninfrastruktur befestigter Straßen (nicht Waldwege).

Die Untersuchung der (Zusatz-)Belastung durch höhere zulässige Gesamtgewichte von Holztransporten soll unter Berücksichtigung der Spezifika von Holztransportfahrzeugen anhand der geltenden Regelwerke für den Straßenbau und insbesondere der Dimensionierung von Straßen (RStO<sup>231</sup>, RDO<sup>232</sup>) sowie damit zusammenhängenden, anerkannten Modellen zur Berechnung der Belastung von Straßenaufbauten (hier: Mehrschichtentheorie) durchgeführt werden.

### 6.2 Vorgehensweise

Es erfolgt eine Literaturlauswertung zu Grundlagen und Einflussgrößen der Straßenbelastung und der damit einhergehenden Schadensmechanismen, Modellansätze für Beanspruchungen sowie Dimensionierungsansätze in Regelwerken des Straßenbaus. Dies umfasst insbesondere auch qualitative und quantitative Erkenntnisse aus der Literatur über fahrzeugseitige Aspekte, die zur Reduzierung der Straßenbelastung beitragen können.

Weiterhin werden das Vorgehen bei der Dimensionierung von Straßenaufbauten und die damit verbundenen allgemein anerkannten Regeln der Straßenbautechnik dargestellt. Darauf aufbauend werden der Stand der Technik im Straßenbau in Deutschland anhand gültiger Regelwerke und der Stand der Wissenschaft sowie aktueller Entwicklungen zusammenfassend dargestellt.

Teil der Literaturlaufbereitung ist auch eine Einführung in feststehende Begriffsbestimmungen im Straßenbau, die für das allgemeine Verständnis der Zusammenhänge in der Straßenbautechnik von Relevanz sind.

Mithilfe gängiger Regelwerke und Modellen zur Ermittlung der Straßenbelastung werden anhand von 12 fahrzeugseitigen Szenarien die Auswirkungen bezüglich der Straßeninfrastruktur beispielhaft aufgezeigt. Die einzelnen fahrzeugseitigen Szenarien werden vom Auftraggeber definiert hinsichtlich:

- Zulässiges Gesamtgewicht
- Achszahl sowie aus der Beladung resultierende Achslasten

---

<sup>231</sup> Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2012)

<sup>232</sup> Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2010)

- Bereifung hinsichtlich Reifendruck, -größen und Zwillingsbereifung
- Für die definierten fahrzeugseitigen Szenarien werden drei typische Straßenaufbauten in Asphaltbauweise für die Berechnungen angenommen, die sich im Wesentlichen durch verschiedene Schichtdicken der Straßenbefestigung unterscheiden:
  - Autobahnen
  - Landstraßen (im Folgenden auch „mittlere Landstraße“)
  - schwach befestigte Landstraße älterer Bauart (im Folgenden auch „kleine Landstraße“)

Materialspezifische Unterschiede wie bestimmte asphalttechnologische Kennwerte oder unterschiedliche Mischgutsorten für die Deckschichten werden dabei nicht berücksichtigt.

Basis für die Annahme über Schichtdicken und Bauweisen bilden die Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO, s. auch Kap. 6.3.2) mit unterschiedlichen Gültigkeitszeiträumen, in denen standardisierte Fahrbahnaufbauten und Schichtdicken aufgeführt sind. Die Aufbauten werden derart ausgewählt, dass einerseits die üblicherweise verwendeten Bauweisen in Baden-Württemberg berücksichtigt werden und andererseits Unterschiede in den Simulationen für unterschiedlich dimensionierte Straßen anschaulich dargestellt werden können.

## 6.3 Stand der Technik und Wissenschaft

### 6.3.1 Verwendete Fachbegriffe

#### 6.3.1.1 Werkstoffe

Asphalt: Mischwerkstoff aus Bitumen, Gesteinskörnung und weiteren Zusätzen; viskoelastisch mit komplexem Verhalten unter verschiedenen Bedingungen von Temperatur und Last; verschiedene Mischungen für verschiedene Schichten in der Straßenbefestigung; Beton als weitere Bauweise nicht betrachtet, da besonders im nachgeordneten Netz überwiegend Asphaltbauweise.

#### 6.3.1.2 Bemessung

Belastungsklasse / Bauklasse: Kategorie für Befestigungsstärke, Schichtenaufbau und Schichtdicken einer Straßenbefestigung.

Beanspruchung / Belastung: Über die Reifen in die Straßenbefestigung eingetragene Verkehrslast.

Dimensionierung: Methodische Abschätzung der Beanspruchung und Bemessung der Schichtenfolgen, -dicken und Werkstoffe.

Dimensionierungsrelevante Beanspruchung: Für die Dimensionierung aufbereitete Beanspruchung.

DTV: Durchschnittlicher täglicher Verkehr einer Straße, angegeben in Fahrzeugen pro 24h; Alle Fahrzeuge, die einen Straßenabschnitt in einem Jahr befahren, geteilt durch 365 Tage.

SV: Schwerverkehr, alle Fahrzeuge über 3,5 t Gesamtgewicht.

DTV<sub>sv</sub>: Durchschnittlicher täglicher Schwerverkehr.

### 6.3.1.3 Schichtaufbau

Auch als Oberbau bezeichnet; Abfolge der Schichten in der Straßenbefestigung.

#### Asphaltpaket

Deckschicht (ADS): Oberste Schicht; hohe Anforderungen an Widerstandsfähigkeit gegen Verformung, Kornzertrümmerung und Witterung; Verschiedene Ausführungen, Mischgutsorten und -arten möglich je nach Anforderung.

Binderschicht (ABS): Ausgleichsschicht zwischen feinkörniger Deckschicht und grobkörniger Tragschicht; hohe Spannungsaufnahme; entfällt bei schwach dimensionierten Aufbauten häufig.

Tragschicht (ATS): Unterste Schicht des Asphaltpakets; verteilt die Belastung auf die darunter folgenden ungebundenen Tragschichten; hohe Biegezugspannungen, besonders an der Unterseite.

#### Ungebundene Schichten

Befinden sich zwischen Asphaltpaket und Erdplanum; Aufgaben wie Lastverteilung in den Untergrund und Verhinderung von Frostschäden durch Wasserspeicherung in den Poren; können entfallen, wenn der Untergrund die Anforderungen erfüllt; kann z. B. als Schottertragschicht (STS) oder Frostschutzschicht (FSS) ausgeführt werden.

### 6.3.1.4 Schädigungsmechanismen

Schädigungen entstehen, wenn die Widerstandsfähigkeit des Oberbaus oder eines Teils davon gegenüber einer bestimmten Beanspruchung erschöpft ist.

Biegezugspannung: Zugspannung, die bei Durchbiegung an der Unterseite des Asphaltpakets entsteht.

Ermüdung: Schädigung durch wiederholte Lastwechsel und dadurch bedingte wiederholte Biegezugspannungen.

Ermüdungsrisse: Risse an der Unterseite des Asphaltpakets, wenn die Biegezugspannungen aufgrund fortgeschrittener Ermüdung nicht mehr verarbeitet werden können.

Netzrisse: Häufiges Erscheinungsbild von Ermüdungsschäden des Oberbaus an der Deckschicht.

Spurrinnen: Bleibende Verformungen im Asphaltpaket.

### 6.3.2 Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO)

Die Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 12)<sup>233</sup> stellen deutschlandweit seit Jahrzehnten den allgemeinen Standard zur Dimensionierung von Straßenaufbauten dar. Die RStO und die darin enthaltenen Grundlagen zur Berechnung der Schwerverkehrsbelastung, Tafeln mit Schichtdicken und Bauweisen für unterschiedliche Belastungen wurden dabei in unregelmäßigen Abständen den jeweils neuesten Erkenntnissen angepasst. Die neueste Ausgabe stammt aus dem Jahr 2012.

---

<sup>233</sup> Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2012)

Im Wesentlichen werden darin Schichtdicken in Abhängigkeit von prognostizierten Verkehrsbelastungen des Schwerverkehrs an Hand empirischer Erkenntnisse festgelegt. Die Einflussgrößen sind dabei

- dimensionierungsrelevante Verkehrsbelastung und
- empirische Einflüsse aus Klima, Topographie, Fahrstreifen, Steigungen und Gefälle.

Das Berechnungsverfahren nach den RStO dient der überschlägigen Abschätzung der Straßenbelastung, indem die Achslasten des betrachteten Verkehrskollektivs zu einer Referenzachslast in Bezug gesetzt werden. Als Referenzachslast ist eine Achse mit 10 t festgesetzt, deren Belastungswirkung in Versuchen (z. B. sogenannter AASHO Road Test<sup>234</sup>) ermittelt wurde. In weiteren Untersuchungen mit anderen Achslasten ergab sich ein Zusammenhang zwischen Achslast und Straßenbelastung, in welchem die Achslast in der vierten Potenz auf die Stärke der Belastung einwirkt.

Mit Hilfe dieser zur Abschätzung von Straßenbelastungen durch hohe Achslasten im Straßenbau weithin verwendeten „Vierten-Potenz-Regel“ werden vorhandene Achslasten in äquivalente 10 t-Achsen umgewandelt. Die kumulierte Anzahl dieser 10 t-Achsen über die Nutzungsdauer der Straße – korrigiert mit den Faktoren der oben genannten empirischen Einflüsse – auf dem höchstbelasteten Fahrstreifen stellt die sogenannte dimensionierungsrelevante Beanspruchung (B-Zahl) dar, welche die überschlägige Abschätzung der Belastung ermöglicht und als Grundlage für die Dimensionierung der Schichtdicken dient.

### 6.3.3 RDO Asphalt

Auf der Grundlage der 2009 eingeführten Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht (RDO Asphalt 09)<sup>235</sup> können standardisierte Bauweisen nach den RStO oder alternative Asphaltoberbauten mit abweichenden Schichtdicken auch rechnerisch – unter Verwendung mechanischer Werkstoffgleichungen anstelle von Empirie – dimensioniert werden. Durch rechnerische Dimensionierung nach den RDO ist es möglich, Achslastkollektive, Temperaturen im Verlauf des Jahreszyklus, örtliche Verhältnisse sowie Schicht- und Baustoffeigenschaften in die Dimensionierung einfließen zu lassen. Als Kriterium zur Abschätzung der voraussichtlichen Lebensdauer wird die Ermüdung der Asphalttragschicht herangezogen. Schäden in der Deckschicht, die sich in oberflächlichen Rissen oder Spurrinnen ausdrücken, sind nicht Teil der rechnerischen Dimensionierung.

Das Verfahren nach den RDO beruht zu wesentlichen Teilen auf der Mehrschichtentheorie, die für die Berechnung von schichtweisen Straßenaufbauten als eine allgemein anerkannte Theorie gilt. Für einen vorgegebenen Straßenaufbau werden die Spannungen und Dehnungen für bestimmte Last- und Temperaturfälle an maßgebenden Stellen berechnet. Über materialabhängige Ermüdungsfunktionen werden daraus die zulässigen Achsübergänge berechnet und den vorhandenen bzw. prognostizierten Achsübergängen gegenüber gestellt.

Die Summe der Quotienten aus vorhandenen und zulässigen Lastwechseln für jeden Last- und Temperaturfall ist die sogenannte MINER-Summe. Sie gibt den Ermüdungsstatus der Straße nach einer bestimmten Nutzungsdauer als prozentualen Wert an. In der Theorie gibt ein Ermüdungsstatus von 100 % den Zeitpunkt an, an dem die Entwicklung sichtbarer Schäden beginnt.

---

<sup>234</sup> Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen (1968)

<sup>235</sup> Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2010)

Das Verfahren ist unter anderem im Softwaretool TISAD umgesetzt, das von der TU Dresden, Professur für Straßenbau, entwickelt worden ist.

#### 6.3.4 Literaturlauswertung

Nicht allen Aspekten der Konstruktion eines Fahrzeugs, die einen Einfluss auf die Schädigungswirkung des Fahrzeugs auf die Straße ausüben, wird in den für die Dimensionierung des Straßenoberbaus relevanten Richtlinien Rechnung getragen. Dennoch sollen diese Merkmale und ihr Einfluss auf die Straßenschädigung nicht unbeachtet bleiben, insbesondere da sich die Rohholztransporter durch diese Merkmale von anderen Fahrzeugen des Schwerverkehrs abheben. Zu diesen Besonderheiten gehören unter anderem die Bereifung, die mitlenkende Konstruktion der Hinterachsen bei den Langholztransportern sowie der Einsatz von luftgefederten Aufhängungen an allen Achsen.

Grundsätzlich lässt sich die Schädigungswirkung einer LKW-Überfahrt an drei großen Einflussparametern festmachen: der Last, die dynamisch über das Rad in die Straße eingeleitet wird, der Aufstandsfläche des Reifens (vgl. Kap. 5.2), über die die Last verteilt wird, und die Dicke der Straßenbefestigung, die der eingeleiteten Last Widerstand leistet.

##### 6.3.4.1 Zwillingsreifen

Zwillingsbereifte Achsen werden bei nahezu allen Nutzfahrzeugen verwendet, um die Last besser verteilen zu können. Das Rad besteht dabei aus zwei identischen Reifen, die auf einer speziellen gemeinsamen Felge montiert werden. Auch die Ausführung mit zwei getrennten Felgen ist üblich. Die Felgen werden fest verschraubt, die beiden Reifen bewegen sich also immer genau gleich. Die verwendeten Reifen sind meist etwas schmaler als Einzelreifen der gleichen Laststufe.

Üblicherweise sind LKW nur an den Antriebsachsen mit Zwillingsreifen ausgerüstet, während an allen anderen Achsen Einzelreifen montiert sind. Obwohl die für die Straßenschädigung günstige Wirkung bekannt ist, werden Zwillingsreifen nur dort eingesetzt. Im Gegensatz dazu sind die im Rohholztransport verwendeten Fahrzeuge mit Ausnahme der Lenkachse an allen Achsen mit Zwillingsreifen ausgerüstet. Diese Besonderheit der besseren Lastverteilung ermöglicht es den Fahrzeugen, auch schlecht befestigte Waldwege zu befahren.

Mit Action 334 der Europäischen Kooperation für Wissenschaft und Technologie<sup>236</sup> wurde in den Jahren bis 2001 eine umfassende Untersuchung durchgeführt, zu der zahlreiche Universitäten und Forschungseinrichtungen aus ganz Europa mit der Bearbeitung spezifischer Fragestellungen beigetragen haben.

Durch Untersuchungen mit Versuchsständen und rechnerischen Simulationen wurde der Einfluss des Reifens auf die Straßenschädigung unter den vielen anderen Einflüssen isoliert. Die ermittelten Ergebnisse streuten jedoch schon innerhalb der Gruppen von Zwillingsreifen und Einzelreifen so stark, dass die Reduktion der Unterschiede zwischen den Reifentypen auf einen einzelnen Faktor nicht möglich war. Vergleiche können dadurch nur zwischen konkreten Reifenmodellen geführt werden.

Bezeichnenderweise ist einer der Hauptfaktoren für die Unterschiede zwischen den Reifen nicht in den Reifen selbst, sondern im Aufbau der Straße zu finden. Umso dünner das Asphalt-

---

<sup>236</sup> COST - European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research (2001)

paket ist, umso stärker kommen die Unterschiede der verschiedenen Reifentypen zum Tragen, während für dicke Asphaltsschichten nahezu keine Unterscheide mehr ermittelt wurden.

Der Grund dafür liegt darin, dass in dieser Untersuchung für die verschiedenen Asphaltsschichten unterschiedliche Schädigungsmechanismen ermittelt wurden. Die maßgebende Schädigung dicker Asphaltsschichten ist demnach die Spurrinnenbildung. Der Haupteinfluss des Reifens ist hier die Aufstandsfläche. Für Zwillingsreifen entspricht dies der Summe der Breite der beiden Reifen ohne Zwischenraum. Auch Reifendruck und Durchmesser beeinflussen Größe und Form der Aufstandsfläche.

Dünne Asphaltsschichten werden vorwiegend durch Ermüdungsrisssbildung zerstört, obwohl Unebenheiten in der Oberfläche, die den Spurrinnen ähneln und häufig mit zusätzlicher Netzrisssbildung auftreten, das optische Schadensbild der Straße bestimmen. Der maßgebende Parameter ist die gesamte Breite der Reifenkonfiguration. Bei Zwillingsreifen hat hier auch der Zwischenraum einen positiven Einfluss.

Auf der Basis dieser Untersuchungen wurde in der Studie ein sogenanntes „Pavement wear ratio“ entwickelt, das die Schädigungswirkung verschiedener Reifenkonfigurationen bei unterschiedlicher Befestigungsdicke und dem jeweiligen Schadensmechanismus anhand der Faktoren Reifenaufstandsfläche und Kontaktflächendruck vergleichbar macht. Die Radlast geht jedoch nicht in die Formel ein. Die Berechnung setzt einen gemeinsamen Referenzreifen voraus. Tabelle 50 zeigt die Auswertung für ausgewählte Reifenkonfigurationen. Der Einzelreifen wurde als Referenzreifen gewählt. Gut zu erkennen ist die deutlich geringere Schädigungswirkung der beiden Zwillingsreifen, die sich auf dünnen, schwach befestigten Straßen (hier verursacht der 315/80 nur rund 16 % der Belastung durch den 385/65) stärker auswirkt als bei dickeren Straßenbefestigungen (40 %).

<b>Tabelle 50: Pavement wear ratios ausgewählter Reifenkonfigurationen</b>			
	<b>385/65 Einzelreifen</b>	<b>315/80 Zwilling</b>	<b>275/70 Zwilling</b>
Ermüdung dünne Schicht	1,000	0,155	0,235
Ermüdung mittlere Schicht	1,000	0,391	0,476
Spurrinnen dicke Schicht	1,000	0,402	0,511

Quelle: eigene Darstellung nach COST (2001)

#### **6.3.4.2 Mitlenkende Hinterachsen**

Zur Verteilung des Gesamtgewichts auf mehrere Achsen sind Schwerfahrzeuge insbesondere an Sattelanhängern mit Achsgruppen ausgerüstet. Dabei sind zwei oder mehr starre Achsen in kurzem Abstand hintereinander am Rahmen angebracht.

Hahn<sup>237</sup> untersuchte Seitenkräfte, die zwischen Rad und Achse übertragen werden, indem er Kraftmessdosen zwischen Achse und Felgen anbrachte. Fahrversuche wurden mit Einzel- und Zwillingsreifen sowie Doppel- und Dreifachachsen durchgeführt. Die Ermittlung der Kräfte erfolgte während kontrollierter Versuchsfahrten, bei denen das Fahrzeug unterschiedlich große Kreisbahnen mit verschiedenen Geschwindigkeiten befuhr. Hahn konnte dabei Seitenkräfte und Radlastverlagerungen messen.

<sup>237</sup> Hahn, W.-D. (1990)

In seinen Versuchen ermittelte Hahn, dass die Seitenkräfte mit kleineren Kurvenradien und größeren Geschwindigkeiten ansteigen, wobei der Radius den größeren Einfluss hat. Die größte Seitenkraft trat grundsätzlich an der hintersten Achse auf. Bisweilen dominierte diese so stark, dass die Seitenkräfte der vordersten Achse vernachlässigbar gering waren.

Die Messergebnisse von Hahn stehen im Widerspruch zur Theorie. Eine geometrische Betrachtung des Anhängers unter den Gesetzen der technischen Mechanik schreibt der vordersten Achse aufgrund des geringeren Hebelarms zum Königszapfen eine größere Seitenkraft zu. Taramoeroa<sup>238</sup> beschreibt dies in seiner Untersuchung zu Scherkräften von Achsgruppen. Ein Grund könnte sein, dass Hahn seine Untersuchungen bei Geschwindigkeiten von 30 bis 50 km/h durchgeführt hat, während Taramoeroa sehr kleine Geschwindigkeiten bei sehr großen Winkeln untersucht hat.

Taramoeroa führte Fahrversuche durch und extrapolierte die gemessenen Werte in einer Simulation für eine größere Bandbreite von Fahrzeugkonfigurationen und Fahrvorgängen.

Starre Achsgruppen erzeugen jedoch nicht nur beträchtliche Scherkräfte. Taramoeroa entdeckte Verlagerungen der vertikalen Radlasten, die nicht aus Fliehkräften entstehen, sondern durch Verspannungen innerhalb einer Achse erzeugt werden. Dabei wird die Last der vorderen Achse von innen nach außen verlagert, während sich an der hinteren Achse die Last auf der inneren Seite erhöht. Beide Verlagerungen sind etwa gleich groß, sodass keine resultierende Kraftkomponente entsteht. Im Fall des üblichen Abbiegevorgangs eines dreiachsigen Sattelanhängers können diese Lastverlagerungen bis zu 40 % der statischen Last betragen. Gemäß dem Vierte-Potenz-Gesetz bedeutet das eine schnellere Ermüdung der Straße um Faktor 4.

Die entstehende Straßenschädigung beschreibt Taramoeroa als Abrieb. Einzelne Körner mit ca. 1 mm Durchmesser werden aus der Befestigung gebrochen. Die Schädigung steigt mit zunehmender Last und größerem Winkel bzw. engerem Kurvenradius.

Aufgrund der im normalen Straßenverkehr untypischen Fahrmanöver in Taramoeroas Versuchen und fehlenden weiteren Untersuchungen sind keine Aussagen zum Einfluss mitlenkender Hinterachsen auf die Straßenschädigung möglich. Die beschriebenen Schäden betreffen nur die Oberfläche von Straßen in Knotenpunktbereichen oder sehr engen Kurven und sind im normalen Verkehr vernachlässigbar klein. Einflüsse durch erhöhte Radlasten durch Lastverlagerungen können nicht bewertet werden. Eine günstige Wirkung der mitlenkenden Hinterachsen auf die von Holztransportern verursachte Straßenschädigung kann in dieser Untersuchung nicht bestätigt werden.

#### **6.3.4.3 Schäden an Straßenbefestigungen**

Straßenschäden können durch viele verschiedene Ursachen entstehen und in entsprechend vielfältiger Ausprägung auftreten. Die verschiedenen Schichtenaufbauten und Materialien reagieren unterschiedlich auf die Belastungen aus Witterung und Verkehr. Die Zusammensetzung des Asphalts aus Gesteinskörnung und Bitumen erzeugt ein komplexes Verformungsverhalten, das als viskoelastisch zu charakterisieren und daher in starkem Maße von Temperatur und Belastungsdauer abhängig ist. Gewöhnlich lassen sich typische Schadensmuster für die verschiedenen Straßentypen ermitteln.

Risse in ihren unterschiedlichen Ausprägungen entstehen überall da, wo die auftretenden Zugspannungen größer als die Zugfestigkeit des Materials sind. Bei Überfahrt eines Fahrzeugs biegt sich das Asphaltpaket und an seiner Unterseite entstehen Biegezugspannungen. Mit zu-

---

<sup>238</sup> Taramoeroa, N.; de Pont, J.; TERNZ Ltd., Auckland (2008)

nehmendem Alter und wiederkehrenden Belastungswechseln ermüdet der Asphalt, wird spröde und verliert insbesondere bei tiefen Temperaturen seine Fähigkeit, sich der Zugspannung durch Formänderung zu entziehen. Die Folge sind kleine Risse an der Unterseite des Asphaltpakets, die mit weiterer Belastung vergrößert werden und sich nach oben ausbreiten.

Durch die gerissene Unterseite verliert die Befestigung an Tragwirkung. Die Verformungen an der Oberseite werden dadurch auch größer und es entstehen auch Risse an der Straßenoberfläche, häufig in Form sogenannter Netzrisse. Diese Art von Rissen in Verbindung mit Verformungen der Asphaltbefestigung sind typische Ermüdungserscheinungen schwach befestigter Asphaltstraßen.<sup>239</sup>

Wiederkehrende hohe Belastung, insbesondere bei warmer Witterung, führt aufgrund der viskoelastischen Eigenschaften von Asphalt zu bleibenden Verformungen und unebener Straßenfläche in Form von Spurrinnen. Spurrinnen können zum einen direkt aus Verformungen in der Deckschicht oder Binderschicht (im oberen Bereich des Asphaltpakets) entstehen. Dabei verdrängt der Reifen Material, wodurch direkt in der Rollspur eine Vertiefung entsteht, während sich das Material unmittelbar neben der Rollspur aufwölbt. Zum anderen können Spurrinnen auch durch Verformungen der unteren Schichten des Oberbaus (Asphalttragschicht oder ungebundene Tragschichten) entstehen, infolge Nachverdichtung oder mangelnder Tragfähigkeit. Diese Form entwickelt keine Aufwölbung am Rand der Vertiefung.<sup>240</sup>

Straßenschäden infolge Ermüdung treten meist linienhaft, in längeren zusammenhängenden Bereichen einer Straße, auf. Daneben existieren zahlreiche punktuelle Schadensmechanismen, die u. a. aus lokalen Unzulänglichkeiten des Materials, der Einbautemperatur, mangelnder Verdichtung beim Einbau, schadhafte Anschlüssen, Fugen und Nähten, Aufgrabungen, Flickstellen oder auch durch besondere Belastung (z. B. im Knotenpunktbereich), Witterung und mangelhafter Entwässerung des Oberbaus entstehen können. Diese letztgenannten Schadensmechanismen werden der Vollständigkeit halber erwähnt; im Weiteren beschränkt sich diese Untersuchung jedoch auf die Ermüdungsmechanismen.

## 6.4 Methodik der Simulationsberechnungen

### 6.4.1 Szenarien

Die Untersuchung soll in Form von Simulationsberechnungen mit verschiedenen zugrundeliegenden Modellen (s. Kap. 6.3.2, 6.3.3, 6.4.3) verschiedene Fahrzeugkonfigurationen untereinander vergleichbar machen, um Aussagen über das Schädigungsverhalten auf verschiedenen Straßentypen (s. Kap. 6.4.1.1) zu ermöglichen. Die genannten Verfahren werden in zwei aufeinander aufbauenden Stufen angewandt. Zunächst werden in einer ersten Stufe die Fahrzeuge innerhalb der Szenarien einzeln betrachtet (s. Kap. 6.4.1.2). Dabei werden die Achsen der Fahrzeuge zu einem Kollektiv zusammengefasst, analog zur Beschreibung realer Verkehrsbelastungen, und gemäß geltender Richtlinien die Belastung ermittelt (Kap. 6.5.1).

Da die betrachteten Fahrzeuge nicht allein für die Straßenschädigung verantwortlich sind, sondern die Straßen gemeinsam mit anderen Verkehrsteilnehmern nutzen, soll in einer weiteren Stufe auch der Aspekt der anteilmäßigen Schädigungswirkung der Holzfahrzeuge innerhalb eines Verkehrskollektivs untersucht werden (Kap. 6.4.1.3 und 6.5.2).

---

<sup>239</sup> Velske, S.; Eymann, P.; Mentlein, H. (2013)

<sup>240</sup> Velske, S.; Eymann, P.; Mentlein, H. (2013)

#### 6.4.1.1 Schichtenaufbauten und Umwelteinflüsse

Die Simulationsrechnungen mit den Methoden RDO und erweiterter RDO (Kap. 6.4.2.2 und 6.4.3) benötigen als Eingangsdaten konkrete Schichtenaufbauten und -dicken. Diese Schichtenaufbauten werden unter Berücksichtigung geltender Regelwerke so gewählt, dass die mutmaßlich typischerweise in Baden-Württemberg angetroffenen Straßen abgebildet werden können.

Vom Grundsatz her lassen sich Außerortsstraßen stark vereinfacht in zwei Typen einteilen: Zweibahnige Autobahnen oder autobahnähnliche Straßen mit Richtungstrennung und einbahnige Landstraßen. Um die Auswirkungen auf die Straßenschädigung bei unterschiedlichen Straßentypen mit unterschiedlichen Oberbaustärken abschätzen zu können, werden drei Schichtenaufbauten gewählt.

Der Schichtaufbau für Autobahnen entspricht dem Aufbau für Belastungsklasse Bk100 als Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht gemäß Tafel 1 Zeile 1 der RStO 12<sup>241</sup> mit einem Asphaltpaket von insgesamt 34 cm Dicke, bestehend aus Asphalttragschicht, Asphaltbinder-schicht und Asphaltdeckschicht.

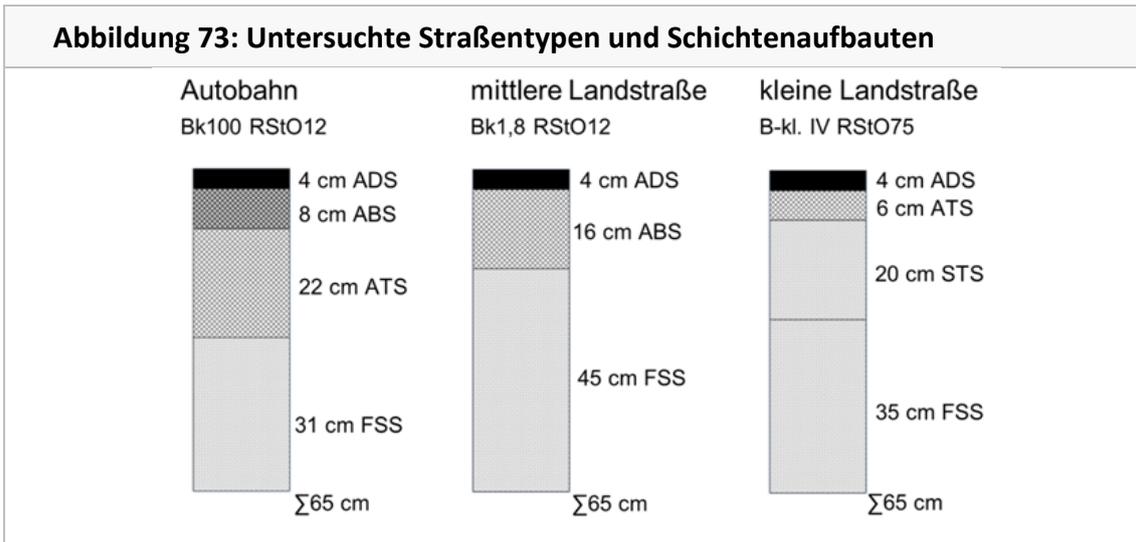
Für die Landstraßen werden zwei verschiedene Schichtenaufbauten untersucht: Ein Schichten-aufbau gemäß derzeit gültiger RStO 12 für Belastungsklasse Bk1,8 als Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht mit einer Gesamtdicke des Asphaltpakets von 20 cm. Dieser Aufbau wird im Folgenden als „mittlere Landstraße“ bezeichnet. Um auch die Auswirkungen bei einem schwächeren Oberbau aufzeigen zu können, wird der zweite Landstraßen-aufbau als älterer Aufbau gemäß Bauklasse IV aus den (bis ca. Mitte der 1980er Jahren gültigen) RStO 75<sup>242</sup> als Asphalt-schicht auf Schottertragschicht mit lediglich 10 cm Asphalt-dicke gewählt. Solche Aufbauten mit nur 10 cm Gesamtdicke des Asphaltpakets sind nach den heute gültigen RStO nicht mehr vor-gesehen, ggf. liegen vergleichbar schwache Aufbauten aber im nachgeordneten Landstraßen-netz oder innerörtlichen Straßen – gerade im ländlichen Raum – teilweise noch vor. Dieser schwach befestigte Aufbau dient daher hinsichtlich des Schichtenaufbaus als ein „Worst-Case“-Szenario und wird im Folgenden als „kleine Landstraße“ bezeichnet.

Alle Aufbauten haben aus Vergleichsgründen unter Einbeziehung der ungebundenen Schichten eine Gesamtdicke von 65 cm. Sie sind auch so gewählt worden, dass die zu erwartenden Un-terschiede bei verschiedenen Oberbaustärken deutlich herausgearbeitet werden können. Ab-bildung 73 zeigt die drei beschriebenen Schichtenaufbauten mit den jeweiligen Schichtenfol- gen und Schichtdicken im Überblick.

---

<sup>241</sup> Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2012)

<sup>242</sup> Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen (1975)



Quelle: eigene Darstellung, teilweise aus Software TISAD, TU Dresden

Die Materialkennwerte entsprechen weitgehend dem Vergleichsmaterial aus den RDO Asphalt, in denen die Temperaturabhängigkeit des Asphalts nur durch temperaturabhängige Steifigkeiten dargestellt wird. Dass auch die Ermüdung des Asphalts temperaturabhängig ist, konnte durch Forschungen, u. a. von Mollenhauer<sup>243</sup>, gezeigt werden.

#### 6.4.1.2 Einzelfahrzeuge

Die Untersuchungen zur Straßenbelastung durch spezifische Holztransporter mit verschiedenen Gesamtgewichten erfolgt anhand festgelegter LKW-Szenarien, bestehend aus geometrisch definierten Fahrzeugtypen mit definierter Beladung. Den Holztransportern werden Referenz-LKW eines ähnlichen Typs gegenübergestellt. Die Definition der LKW-Szenarien wurde von Projektpartnern des Lehrstuhls für Mobile Arbeitsmaschinen des Karlsruher Instituts für Technologie erarbeitet und zur Verfügung gestellt. Aus diesen LKW-Szenarien wurden alle für die Simulationsrechnungen benötigten Parameter abgeleitet. Die genaue Definition aller Fahrzeugszenarien ist Kap. 5, Anlage 1 zu entnehmen.

**Tabelle 51: Untersuchte Fahrzeugszenarien**

Sattelzug	Langholztransporter	Lastzug	Kurzholzzug
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 40t</li> <li>• 44 t</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 40 t</li> <li>• 44 t</li> <li>• 46 t</li> <li>• 53 t</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 40t</li> <li>• 44 t</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 40 t</li> <li>• 44 t</li> <li>• 46 t</li> <li>• 53 t</li> </ul>

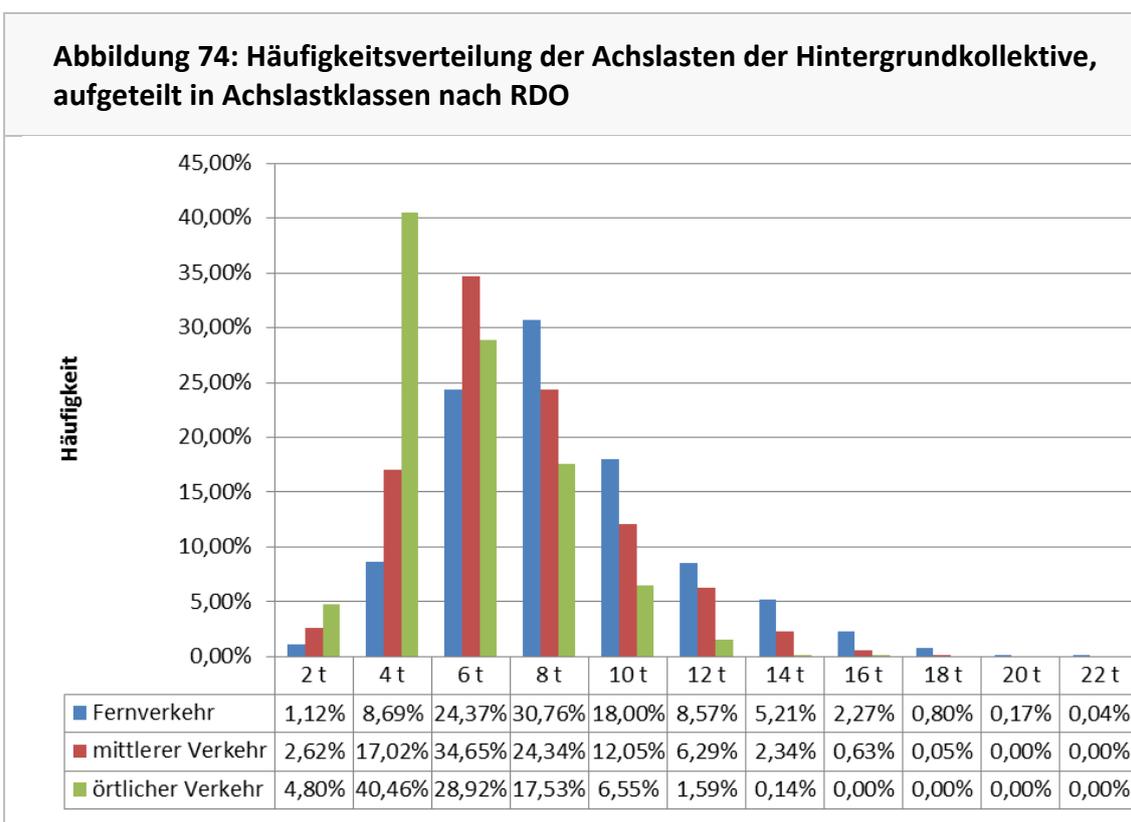
#### 6.4.1.3 Schwerverkehrskollektive

Neben der Frage der potentiellen Belastung von Straßenaufbauten durch die im vorangehenden Kapitel beschriebenen Einzelfahrzeuge soll weiterhin untersucht werden, welchen Anteil der Holztransport an der gesamten, durch den Schwerverkehr erzeugten Straßenbelastung ausmacht.

<sup>243</sup> Mollenhauer, K. (2008)

Die Untersuchung der Auswirkungen erhöhter Gesamtgewichte auf die Straßenbelastung erfolgt daher vor dem Hintergrund verschiedener Schwerverkehrszusammensetzungen, die aus einer Gesamtschwerverkehrsbelastung für die Straßentypen Autobahn und Landstraße und verschieden großen Anteilen des Holzverkehrs am Schwerverkehr – im Folgenden „Hintergrundkollektiv“ und „Holztransportanteil“ genannt – bestehen.

Die Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand<sup>244</sup> liefert ein Schätzverfahren für drei verschiedene Verkehrsarten, die im Folgenden als Fernverkehr, mittlerer Verkehr und örtlicher Verkehr bezeichnet werden. Die Beschreibung der Verkehrszusammensetzung erfolgt mit fünf repräsentativen Fahrzeugtypen, für die in jeder Verkehrszusammensetzung eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für deren Auftretenshäufigkeit, Gesamtgewicht (bestehend aus Leergewicht und Ladungsgewicht) sowie der Verteilung des Gewichts auf die Achsen definiert ist (vgl. Anlage 1, Kap. 5). Um die Informationen für die Dimensionierungsmethoden der Straßenbelastung nutzbar zu machen, werden aus den genannten Wahrscheinlichkeitsverteilungen die in Abbildung 74 dargestellten Achslastverteilungen in den nach RDO definierten Achslastklassen generiert.



Quelle: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2010)

Die so definierten Verkehrsarten werden gemäß Tabelle 52 den untersuchten Straßentypen zugeordnet. Dabei werden die beiden Landstraßentypen jeweils mit mittlerem und örtlichem Verkehr untersucht.

<sup>244</sup> Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2011):

<b>Tabelle 52: Zuordnung der Verkehrsarten und Straßentypen</b>	
<b>Straßentyp</b>	<b>zugeordnete Verkehrsart</b>
Autobahnen	Fernverkehr
Landstraßen (mittlere Landstraße, kleine Landstraße)	mittlerer Verkehr, örtlicher Verkehr

Zur Ermittlung der Holztransportanteile am Verkehrsaufkommen wurde vom Projektpartner Universität Freiburg eine Verkehrszählung des bayerischen Verkehrsnetzes zur Verfügung gestellt (vgl. Kap. 4, bzw. Kap. 6 Anlage 2), die mit der aus Holzeinschlag und Routenwahl geschätzten Anzahl an Holzfahrten für jede Straße hinterlegt war. Ein Auszug ist in Anlage 2 dargestellt.

Die Datensätze der einzelnen Straßen werden den Kategorien Autobahn und Landstraße zugeordnet. Die daraus berechneten Holztransportanteile ergeben eine sehr stark rechtsschiefe Verteilung. Rund 55 % der Landstraßen in Bayern werden von unter einem Prozent Holztransportfahrzeugen befahren, nur 5 % weisen einen Holztransportanteil von mehr als 10 % auf. Der Maximalwert liegt bei rund 80 %. Bei den Autobahnen ist die Schiefe noch etwas stärker. Hier liegen rund 98 % aller Datensätze unter einem Prozent, während das Maximum bei 3 % liegt. In der Verteilung der absoluten Anzahl der Holzfahrten unterscheiden sich die Autobahnen jedoch kaum von den Landstraßen.

Diese in der Realität vorhandene Bandbreite an verschiedenen Verkehrszusammensetzungen soll in der Untersuchung soweit möglich berücksichtigt werden, indem statistische Szenarien entwickelt werden.

Zur besseren Vergleichbarkeit der Szenarien wird der  $DTV_{sv}$  für beide Straßentypen jeweils konstant als gerundeter Mittelwert gewählt.

Der größte Teil der Straßen weist nur sehr kleine Holztransportanteile auf und wird durch den Medianwert der Holztransportanteile aller betrachteten Straßenabschnitte gut repräsentiert.

Als repräsentativer Wert für von Holzfahrzeugen hoch frequentierte Straßen wird der 98 %-Quantilwert gewählt. Dadurch wird ein hoher Wert für den Holztransportanteil generiert, ohne dass ungewöhnlich hohe oder fehlerhafte Datensätze zu großen Einfluss gewinnen. Oberhalb des genannten Quantil befinden sich dennoch einige sehr hohe Werte, die aufgrund der geographischen Situation der Straße durchaus plausibel erscheinen. Für die Landstraßen wird deshalb noch ein zusätzliches Szenario in Form einer realen Staatsstraße untersucht, das im Folgenden „St2xxx“ genannt wird.

Aus statistischen Gründen wird auch der Mittelwert aller Holztransportanteile untersucht. Der Quantilwert des Mittelwerts beträgt für beide Straßenkategorien ca. 75 %. Die Szenarien des Medians und des Mittelwerts decken rund 80 bis 85 % aller Straßen ab. Die Tabellen 53 und 54 zeigen eine Übersicht der gewählten Szenarien.

<b>Tabelle 53: Szenarien Verkehrszusammensetzung Landstraßen</b>				
	<b>Mittelwert</b>	<b>Median</b>	<b>98 %-Quantil</b>	<b>St2xxx</b>
DTV SV [Fz/24h]	178			68
Holztransportanteil [%]	2,48	0,79	17,72	64,66

<b>Tabelle 54: Szenarien Verkehrszusammensetzung Autobahnen</b>			
	<b>Mittelwert</b>	<b>Median</b>	<b>98 %-Quantil</b>
DTV SV [Fz/24h]	5.700		
Holztransportanteil [%]	0,14	0,04	1,20

Der Holztransportanteil am gesamten Schwerverkehr wird dargestellt durch die Achslasten der in Tabelle 51 Kapitel 6.4.1.1 definierten Holzfahrzeuge. Die Aufteilung des Holztransportanteils in Langholztransporter und Kurzholzzüge erfolgt gemäß der Annahmen in Kap. 1 (Berechnung verschiedener Treibhausgasemissionen; siehe Anlage 3) mit 66 % als Langholztransporter und 34 % als Kurzholzzug. Jedes der Verkehrsszenarien wird mit den vier Gewichtsszenarien 40, 44, 46 und 53 t berechnet, indem die Achslastverteilung des Holztransportanteils dem Fahrzeugszenario der jeweiligen Gewichtsklasse entnommen wird.

Durch die höhere Nutzlast kommt es bei Fahrzeugen mit höherem Gesamtgewicht zu Fahrtenersparungen, die ebenfalls in Kap. 1 berechnet wurden. Die Reduzierung der Holzfahrten soll in den Berechnungen berücksichtigt werden und ist in Tabelle 55 dargestellt. Eine Übersicht aller Verkehrsszenarien mit den jeweiligen Schwerverkehrszahlen ist Anlage 4 zu entnehmen.

<b>Tabelle 55: Reduktion des Holzverkehrs durch höhere Gesamtgewichte</b>	
<b>Gewicht</b>	<b>Anzahl Holzfahrzeuge</b>
40 t	100 %
44 t	83 %
46 t	77 %
53 t	61 %

## 6.4.2 Anwendung der Richtlinien

### 6.4.2.1 RStO

Die potentielle Schädigungswirkung der betrachteten Holzfahrzeuge und der Referenzfahrzeuge lässt sich mit Hilfe der Methodik nach RStO (s. auch Kap. 6.3.2) darstellen, indem die Summe der äquivalenten 10 t-Achsen der einzelnen Fahrzeuge ermittelt wird. Diese Summe wird im nachfolgenden „B-Zahl“ genannt und berechnet sich wie folgt:

$$B\text{-Zahl} = \sum_{\text{alle Achsen}} \left( \frac{\text{Achslast}}{10 \text{ t}} \right)^4$$

Dies wird für alle Achsen eines Fahrzeugs durchgeführt. Einflüsse aus Reifenart und Schichtenaufbau bleiben hier methodenbedingt unberücksichtigt. Die Ergebnisse nach den RStO lassen

sich interpretieren als die isolierte Betrachtung der Einflüsse, die rein aus der Verteilung des Gesamtgewichts auf die einzelnen Achsen entstehen.

#### 6.4.2.2 RDO Asphalt

Das Verfahren nach RDO Asphalt (s. auch Kap. 6.3.3) geht standardmäßig von Einzelbereifungen und einer festgelegten lastunabhängigen Reifenaufstandsfläche aus. Die Achslasten werden in Klassen mit der Breite 2 t eingeteilt, wobei die obere Klassengrenze als maßgebender Wert in die Berechnung eingeht. Eine Abschätzung veränderter Kontaktdrücke durch Zwillingbereifung, Reifendrucke oder dergleichen, ist mit der zugrundeliegende Mehrschichtentheorie prinzipiell möglich, jedoch im Verfahren nach RDO streng genommen nicht vorgesehen.

Das Verfahren ermöglicht eine über die RStO hinausgehende Untersuchung unter Berücksichtigung des tatsächlichen Schichtenaufbaus verschiedener Straßen und kann daher die unterschiedlichen Auswirkungen erhöhter Gesamtgewichte für unterschiedliche Straßentypen aufzeigen. Die Betrachtungen nach RDO-Methodik schließen eine jahreszeitliche Untersuchung mit ein, indem Materialparameter den veränderten Temperaturen angepasst werden können.

#### 6.4.3 Mehrschichtentheorie in Erweiterung der RDO-Methodik

Die Besonderheiten in der Konstruktion der Holzfahrzeuge werden in einem erweiterten Bewertungsverfahren untersucht. Die Berechnung der Belastung, die auf die Straße wirkt, mit der Mehrschichtentheorie und die Abschätzung der Ermüdung entsprechen dem Verfahren nach den RDO. Die Eingabe der Belastung in das RDO-Modell erfolgt jedoch mit der tatsächlich vorhandenen Achslast sowie den vorhandenen Reifen in Form von Konfiguration als Einzelreifen oder Zwillingreifen mit entsprechenden Reifengrößen und -drücken.

Innerhalb der Untersuchung mit der erweiterten RDO-Methodik soll der Einfluss der Temperatur nicht nur durch temperaturabhängige Steifigkeiten berücksichtigt werden, auch die Ermüdungsfunktion soll auf die Temperatur angepasst sein. Die jahreszeitlichen Einflüsse werden anhand von winterlichen und sommerlichen Temperaturen untersucht, die durch 2,5°C und 22,5°C repräsentiert werden.

Die Berechnungen der Dehnungen erfolgen mit der im Softwaretool KenPave<sup>245</sup> der University of Kentucky implementierten Mehrschichtentheorie.

Tabelle 56 zeigt eine Übersicht der verschiedenen Simulationsmethoden und welche Einflüsse in den jeweiligen Methoden berücksichtigt werden können sowie auf welche Effekte sich die Analyse verstärkt konzentriert.

---

<sup>245</sup> Huang, Y. h. (2012)

Tabelle 56: Übersicht der Simulationsmethoden		
Simulationsmethode	Berücksichtigte Einflüsse	Untersuchte Zusammenhänge
RStO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Achslasten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Achslastverteilung</li> </ul>
RDO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Achslasten</li> <li>• Schichtenaufbauten</li> <li>• Temperatur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• klassifizierte Achslastverteilung</li> <li>• Straßentypen</li> <li>• Jahreszeit</li> </ul>
Mehrschichtentheorie in Erweiterung der RDO-Methodik	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Achslasten</li> <li>• Reifenkonfiguration</li> <li>• Reifengröße</li> <li>• Reifendruck</li> <li>• Schichtenaufbauten</li> <li>• Temperatur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• genaue Achslastverteilung</li> <li>• Bereifung</li> <li>• Straßentypen</li> <li>• Jahreszeit</li> </ul>

Quelle: eigene Darstellung

## 6.5 Ergebnisse der Simulationsrechnungen

### 6.5.1 Einzelfahrzeuge

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse für die in Tabelle 51 definierten Fahrzeuge dargestellt und analysiert. Die Fahrzeuge werden dabei isoliert betrachtet. Die Auswirkungen der Gewichtserhöhung vor dem Hintergrund realistischer Verkehrszusammensetzungen werden in Kapitel 6.5.2 erläutert.

#### 6.5.1.1 RStO

Die Berechnungsmethodik nach RStO berücksichtigt ausschließlich die Achslasten als Einzelachsen, keine Reifengrößen oder Einflüsse aus dem Schichtenaufbau. Das Ergebnis ist ein Schätzung der potentiell möglichen Belastung durch die Fahrzeuge, der die Straßenbefestigung Widerstand leisten muss. Als Bewertungsmaß wird die B-Zahl verwendet (vgl. Kap. 6.4.2/RStO)

#### Sattelzug

Für den Sattelzug ergibt sich eine B-Zahl von 2,3 äq.-10-t-Achsen für 40 t Gesamtgewicht sowie 3,5 äq.-10-t-Achsen bei 44 t Gesamtgewicht. Das entspricht einer Steigerung der Belastung von 52 % bei einer Zunahme des Gewichts von nur 10 %. Deutlich zu erkennen ist der hohe Anteil der Antriebsachse (Achse 2), die allein fast die Hälfte der gesamten Belastung ausmacht.

Tabelle 57: Straßenbelastung durch den Sattelzug nach RStO				
Achse	40 t		44 t	
	Achslast		Achslast	
	[t]	10-t-äq. [-]	[t]	10-t-äq. [-]
1	6,494	0,178	6,680	0,199
2	10,055	1,022	11,073	1,503
3	7,817	0,373	8,749	0,586
4	7,817	0,373	8,749	0,586
5	7,817	0,373	8,749	0,586
B-Zahl		2,320		3,460

### Langholztransporter

Für den Langholztransporter ergeben sich die in Tabelle 58 dargestellten B-Zahlen. Die Erhöhung des Gesamtgewichts von 40 auf 44 t ergibt beispielsweise eine Steigerung der B-Zahl um 44 %. Die Anteile der einzelnen Achsen an der B-Zahl sind für niedrigere Gesamtgewichte sehr ausgeglichen, die Last ist gut auf die Achsen verteilt. Auffallend ist die hohe Last auf der Lenkachse, die in einem großen Anteil an der B-Zahl resultiert. Im Fall des 40-Tonnners beträgt der Anteil beinahe das Doppelte der anderen Achsen.

Weitere Erhöhungen des Gesamtgewichts lassen die B-Zahl sehr deutlich ansteigen. Bei 53 t Gesamtgewicht hat sich die B-Zahl gegenüber dem Fall mit 40 t etwa verdreifacht.

Tabelle 58: Straßenbelastung durch den Langholztransporter nach RStO								
Achse	40 t		44 t		46 t		53 t	
	Achslast		Achslast		Achslast		Achslast	
	[t]	10-t-äq. [-]						
1	8,868	0,618	8,836	0,610	8,832	0,609	8,726	0,580
2	7,640	0,341	8,516	0,526	8,598	0,547	11,495	1,746
3	7,640	0,341	8,516	0,526	8,598	0,547	11,495	1,746
4	7,913	0,392	9,035	0,666	9,941	0,977	10,587	1,256
5	7,939	0,397	9,097	0,685	10,031	1,013	10,697	1,309
B-Zahl		2,089		3,013		3,691		6,637

### Lastzug

Für den Lastzug ergeben sich die in Tabelle 59 dargestellten B-Zahlen von 2,5 äq.-10-t-Achsen für 40 t Gesamtgewicht und 3,8 äq.-10-t-Achsen für 44 t Gesamtgewicht. Dies entspricht einer Steigerung von 50 %. Auffallend ist auch hier wieder der hohe Anteil der Antriebsachse, ihr Anteil an der B-Zahl beträgt mehr als die Hälfte. Hieraus ist auch zu erkennen, dass auch ungleiche Beladung mit sehr hohen Einzelachslasten die Belastung der Straße maßgebend beeinflussen kann.

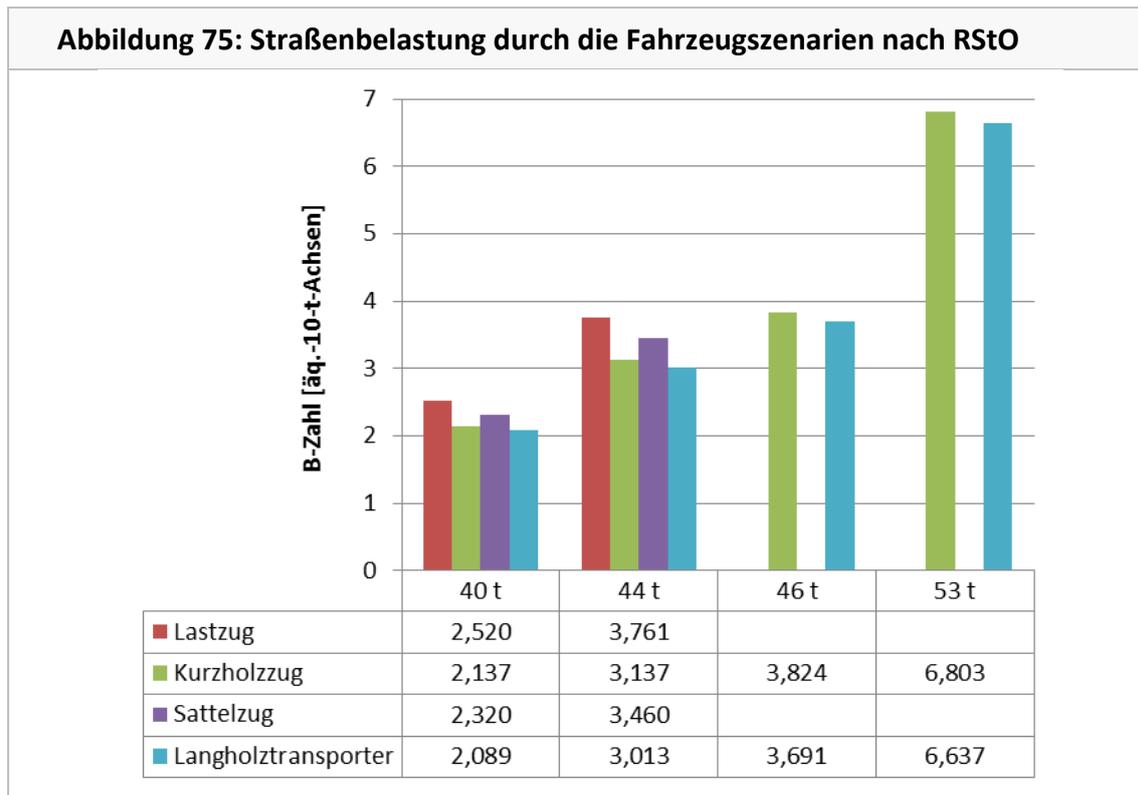
Tabelle 59: Straßenbelastung durch den Lastzug nach RStO				
Achse	40 t		44 t	
	Achslast		Achslast	
	[t]	10-t-äq. [-]	[t]	10-t-äq. [-]
1	7,197	0,268	7,405	0,301
2	10,656	1,289	11,792	1,934
3	6,147	0,143	6,803	0,214
4	8,029	0,416	9,003	0,657
5	7,971	0,404	8,997	0,655
B-Zahl		2,520		3,761

### Kurzholzzug

Für den Kurzholzzug ergeben sich die in Tabelle 60 dargestellten B-Zahlen. Auch hier sind die Lasten sehr gut verteilt, jedoch ist die Lenkachse deutlich geringer belastet. Eine Erhöhung von 40 auf 44 t Gesamtgewicht resultiert in einer Steigerung der B-Zahl um 47 %. Im Fall der Erhöhung auf 53 t hat sich die B-Zahl mehr als verdreifacht.

Tabelle 60: Straßenbelastung durch den Kurzholzzug nach RStO								
Achse	40 t		44 t		46 t		53 t	
	Achslast		Achslast		Achslast		Achslast	
	[t]	10-t-äq. [-]						
1	6,728	0,205	7,232	0,274	7,232	0,274	9,000	0,656
2	8,636	0,556	9,384	0,775	9,384	0,775	12,000	2,074
3	8,636	0,556	9,384	0,775	9,384	0,775	12,000	2,074
4	8,039	0,418	9,021	0,662	10,004	1,002	10,004	1,002
5	7,961	0,402	8,979	0,650	9,996	0,998	9,996	0,998
B-Zahl		2,137		3,137		3,824		6,803

Eine Übersicht aller Fahrzeugszenarien nach RStO ist in Abbildung 75 dargestellt. Bei gleichem Gewicht liegt die Straßenbelastung durch die Holztransporter etwa 10 % - 15 % unter der Straßenbelastung der Referenzfahrzeuge. Eine Erhöhung des Gesamtgewichts lässt die Straßenbelastung jedoch gegenüber dem Gesamtgewicht überproportional ansteigen.



### 6.5.1.2 RDO Asphalt

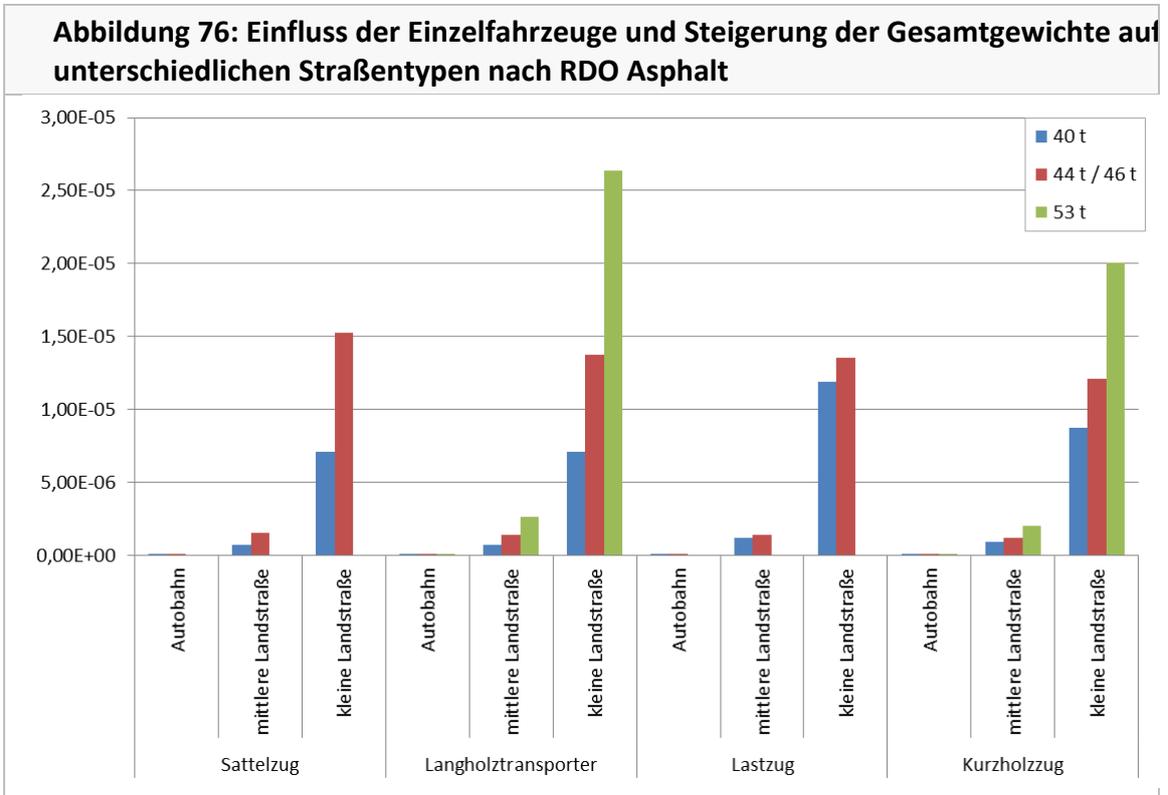
Das Regelwerk nach den RDO ermöglicht die Abschätzung des Schädigungsverhaltens unter Berücksichtigung des Schichtenaufbaus der betrachteten Straßen (vgl. Kap. 6.4.1.1), während Einflüsse aus verschiedenen Reifengrößen und -arten nicht untersucht werden. Die Achslasten werden in Klassen von zwei Tonnen Breite eingeteilt und gehen auch so in die Berechnung ein (vgl. Kap. 6.4.2.2). Die Untersuchungsmethode ist daher nicht geeignet, kleine Unterschiede zu bewerten. Die Holztransporter mit 44 und 46 t Gesamtgewicht sind sogar identisch und werden daher im Folgenden nicht getrennt. Die Darstellungen der Straßenbelastung in Form der MINER-Summe sind Tabelle 61 und Abbildung 76 zu entnehmen.

Auffallend sind zunächst die unterschiedlichen Größenordnungen der Ermüdung der Straßentypen. Die Ermüdung der kleinen Landstraße beispielsweise liegt für alle Fahrzeug- und Gewichtsszenarien um rund Faktor 280 höher als die Ermüdung der Autobahn.

In Abbildung 76 sehr gut zu erkennen ist die progressive Zunahme der Ermüdung mit steigendem Gesamtgewicht auf allen Straßentypen. Eine Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichts von 40 t auf 44 t resultiert für den Langholztransporter in einer um Faktor 1,95 größeren Ermüdung. Eine weitere Erhöhung auf 53 t ergibt eine Zunahme um Faktor 3,7 im Vergleich zu 40 t Gesamtgewicht. Die relativen Zunahmefaktoren für die Straßentypen unterscheiden sich dabei kaum.

Aufgrund der methodenbedingten Klassifizierung der Achslasten eignet sich die Untersuchung nach RDO Asphalt jedoch nicht dazu, kleine Unterschiede zwischen den Fahrzeugszenarien sichtbar zu machen.

<b>Tabelle 61: Einfluss der Einzelfahrzeuge und Steigerung der Gesamtgewichte auf unterschiedlichen Straßentypen nach RDO Asphalt</b>			
<b>Gewicht</b>	<b>Autobahn</b>	<b>mittlere Landstraße</b>	<b>kleine Landstraße</b>
Sattelzug			
40 t	2,49E-08	7,13E-07	7,07E-06
44 t	5,37E-08	1,54E-06	1,52E-05
Langholztransporter			
40 t	2,49E-08	7,13E-07	7,07E-06
44 t / 46 t	4,84E-08	1,39E-06	1,37E-05
53 t	9,29E-08	2,66E-06	2,64E-05
Lastzug			
40 t	4,19E-08	1,20E-06	1,19E-05
44 t	4,78E-08	1,37E-06	1,36E-05
Kurzholzzug			
40 t	3,08E-08	8,81E-07	8,74E-06
44 t / 46 t	4,26E-08	1,22E-06	1,21E-05
53 t	7,07E-08	2,03E-06	2,01E-05



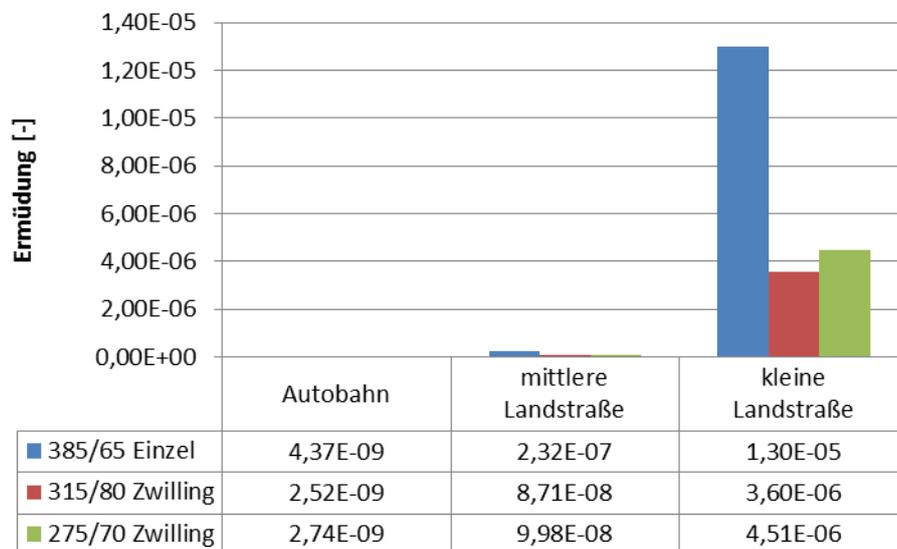
### 6.5.1.3 Mehrschichtentheorie in Erweiterung der RDO Methodik

Das erweiterte RDO-Verfahren ermöglicht die Berücksichtigung der genauen Achslasten und Reifenkonfigurationen (vgl. Kap. 6.4.3). Das Temperaturverhalten des Asphalts wird um temperaturabhängige Ermüdungsfunktionen erweitert.

#### Beispielhafte Betrachtung von Zwillingsreifen

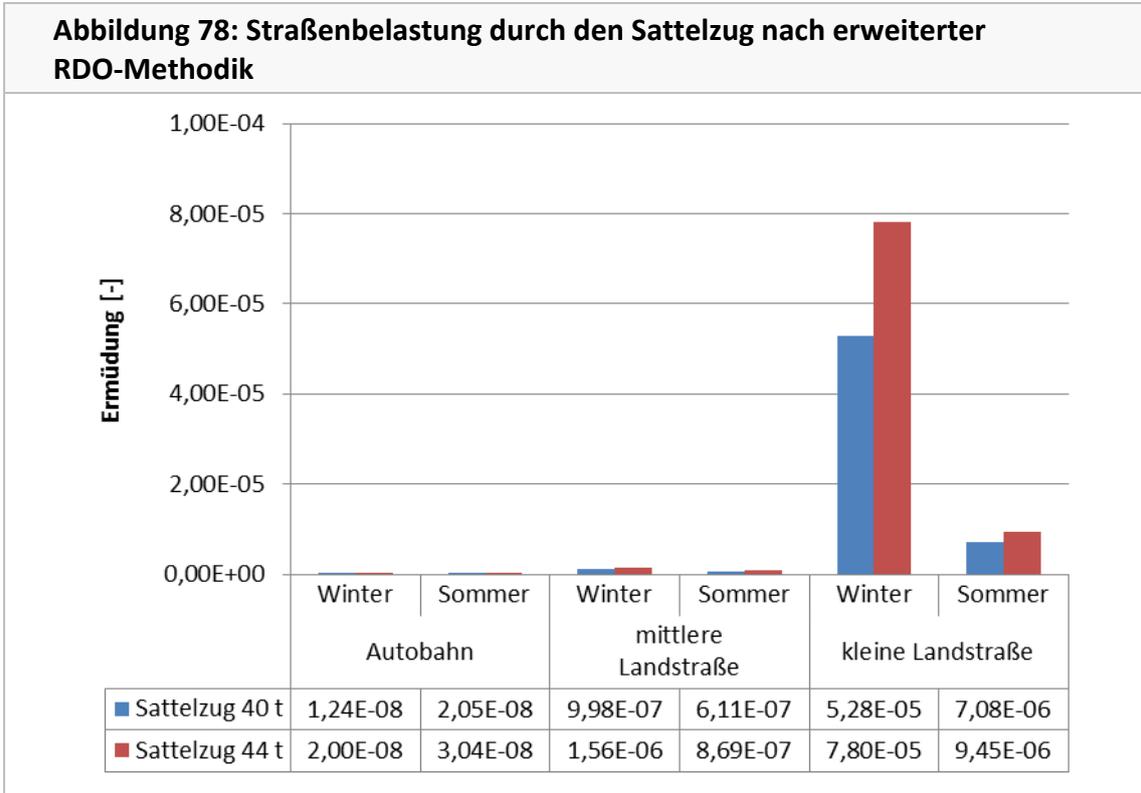
Der Einfluss, den die Reifenkonfiguration als Zwillingsreifen auf die Straßenbelastung (Ermüdung, ausgedrückt als MINER-Summe) ausübt, ist in Abbildung 77 beispielhaft mit einem Vergleich verschiedener Reifenkonfigurationen einer 8-t-Achse dargestellt. Im Wesentlichen werden in der Simulation die Ergebnisse der in Kapitel 6.3.4.1 beschriebenen Literatur bestätigt. Die kleine Landstraße mit dünnem Asphaltpaket profitiert in diesem Beispiel enorm, die Ermüdung unter einem Zwillingsreifen reduziert sich gegenüber der Ermüdung unter einem Einzelreifen um etwa zwei Drittel. Auf dicken Asphaltpaketen der Autobahn reduziert sich die Ermüdung zwar immer noch um mehr als ein Drittel, die absolute Ermüdungsreduktion ist gegenüber der Landstraße jedoch sehr gering.

**Abbildung 77: Einfluss der Reifenkonfiguration auf unterschiedliche Straßentypen nach erweiterter RDO-Methodik**



**Sattelzug**

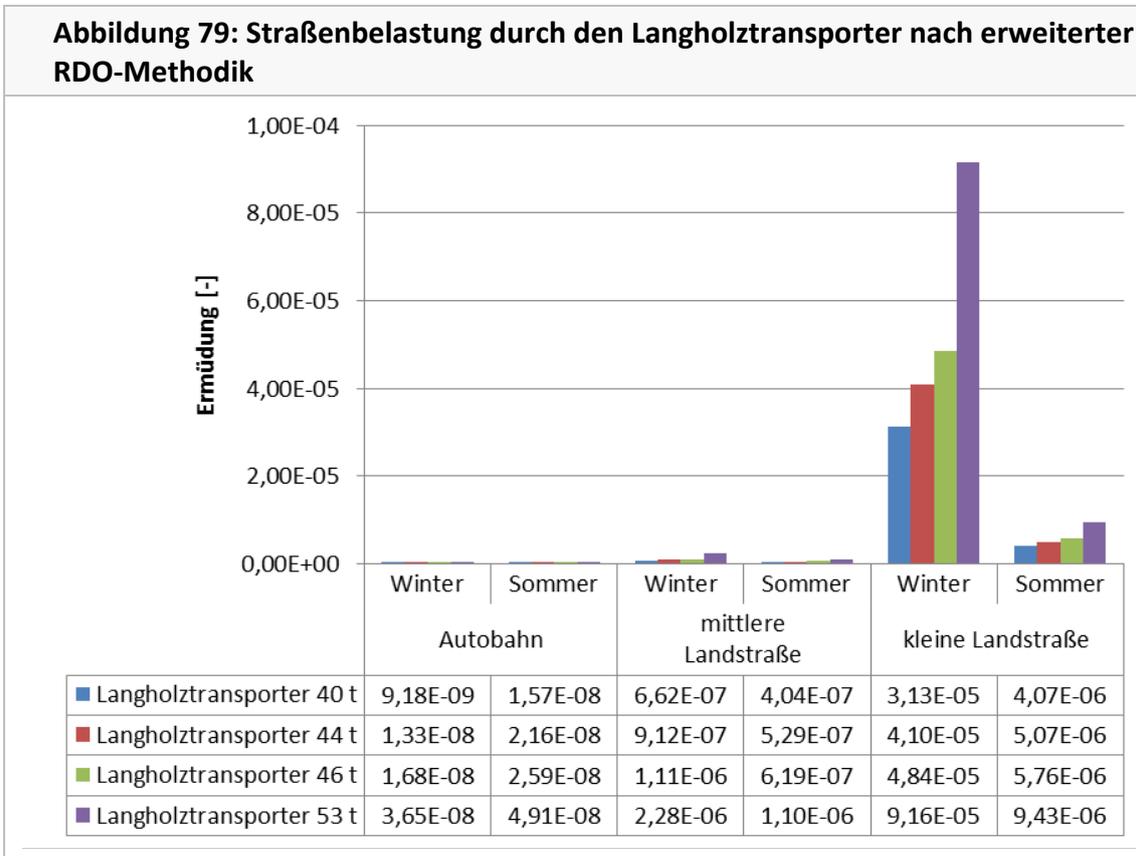
Die Straßenbelastung durch den Sattelzug ist in Abbildung 78 als MINER-Summe dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die hohe Belastung der kleinen Landstraße bei tiefen Temperaturen. Im Fall von 40 t Gesamtgewicht ist die Ermüdung 87 % höher als im Sommer.



**Langholztransporter**

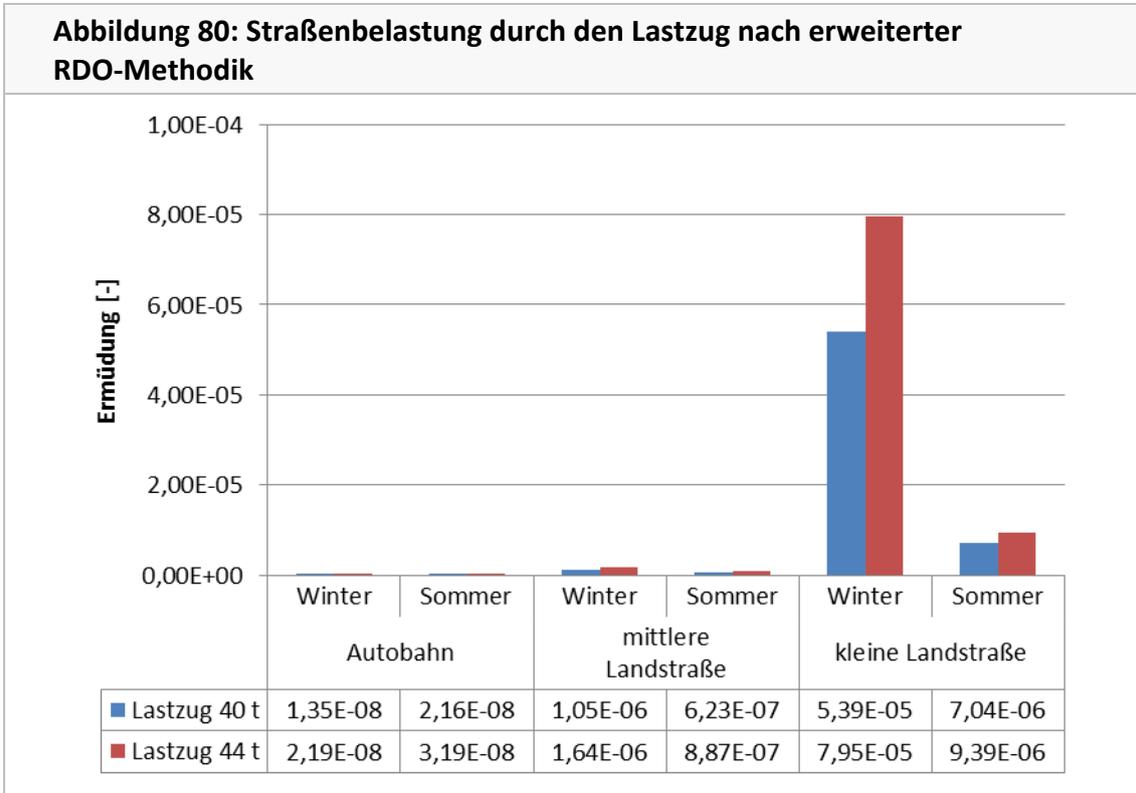
Die Straßenbelastung des Langholztransporters ist in Abbildung 79 als MINER-Summe dargestellt. Bei gleichem Gewicht von 40 t liegt die verursachte Ermüdung durch den Langholztransporter auf kleinen Landstraßen etwa 42 % unter der des Sattelzugs, bei Autobahnen verringert sich der Wert auf 26 %.

Eine Erhöhung des Gesamtgewichts von 40 t auf 44 t erhöht die Straßenbelastung je nach Straßentyp und Jahreszeit um 25 % bis 45 %. Bei einer Erhöhung auf 53 t verstärkt sich die Straßenbelastung im Vergleich zu 40 t um Faktor 2,3 bis 4,0.



**Lastzug**

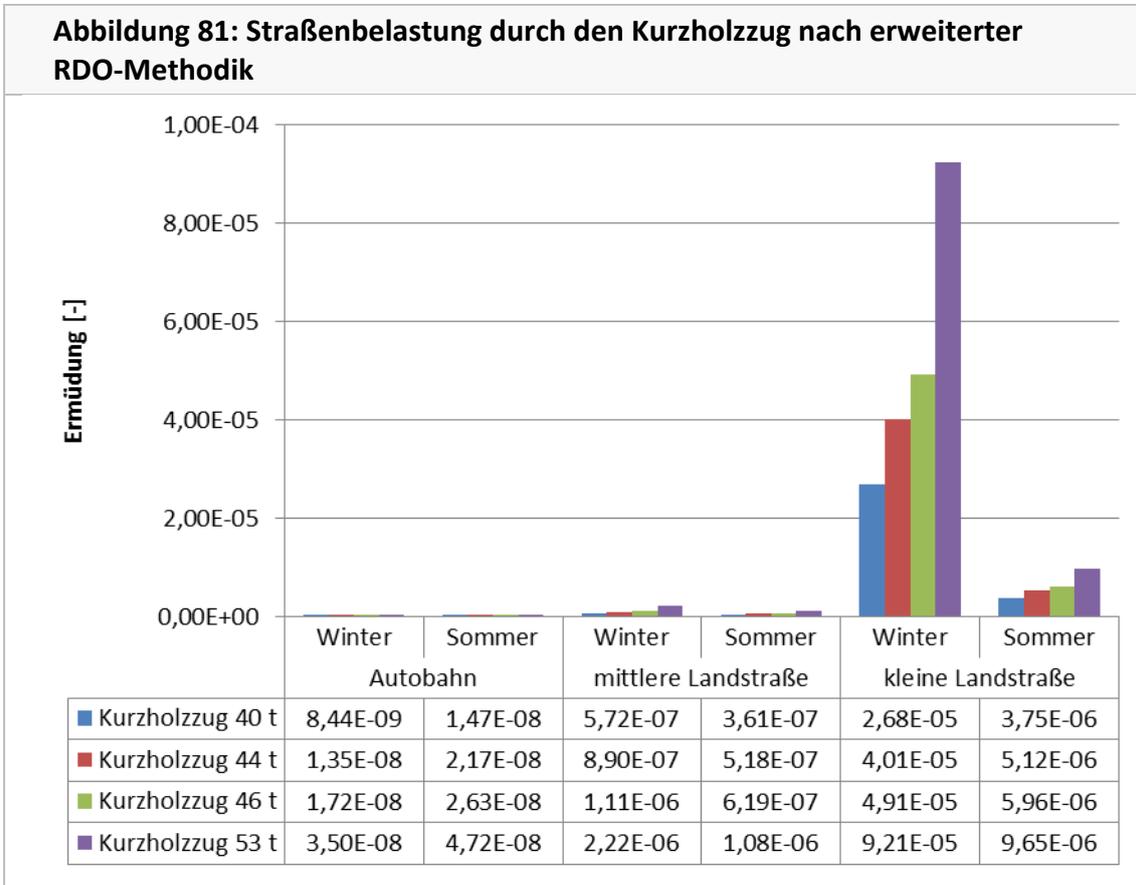
Die Straßenbelastung durch den Lastzug ist in Abbildung 80 dargestellt. Die Straßenbelastung ist wie bei den oben genannten Beispielen umso größer, je dünner der Schichtenaufbau der Straße ist. So ist die Belastung der kleinen Landstraße ca. 300 Mal stärker als die Belastung der Autobahn. Der Lastzug weist von allen Fahrzeugszenarien die höchsten Belastungswerte (ausgedrückt als MINER-Summe) auf.



**Kurzholzzug**

Die Straßenbelastung durch den Kurzholzzug, dargestellt in Abbildung 81, ist im Vergleichsfall mit 40 t Gesamtgewicht zum Lastzug auf kleinen Landstraßen etwa 47 % günstiger, auf Autobahnen reduziert sich der Wert auf etwa 38 %.

Eine Erhöhung des Gesamtgewichts von 40 auf 44 t erhöht die Straßenbelastung auf kleinen Landstraßen um etwa 37 %. Bei einer Erhöhung auf 53 t verstärkt sich die Straßenbelastung auf kleinen Landstraßen um etwa Faktor 2,6 im Vergleich zu 40 t Gesamtgewicht.



### 6.5.2 Schwerverkehrskollektive

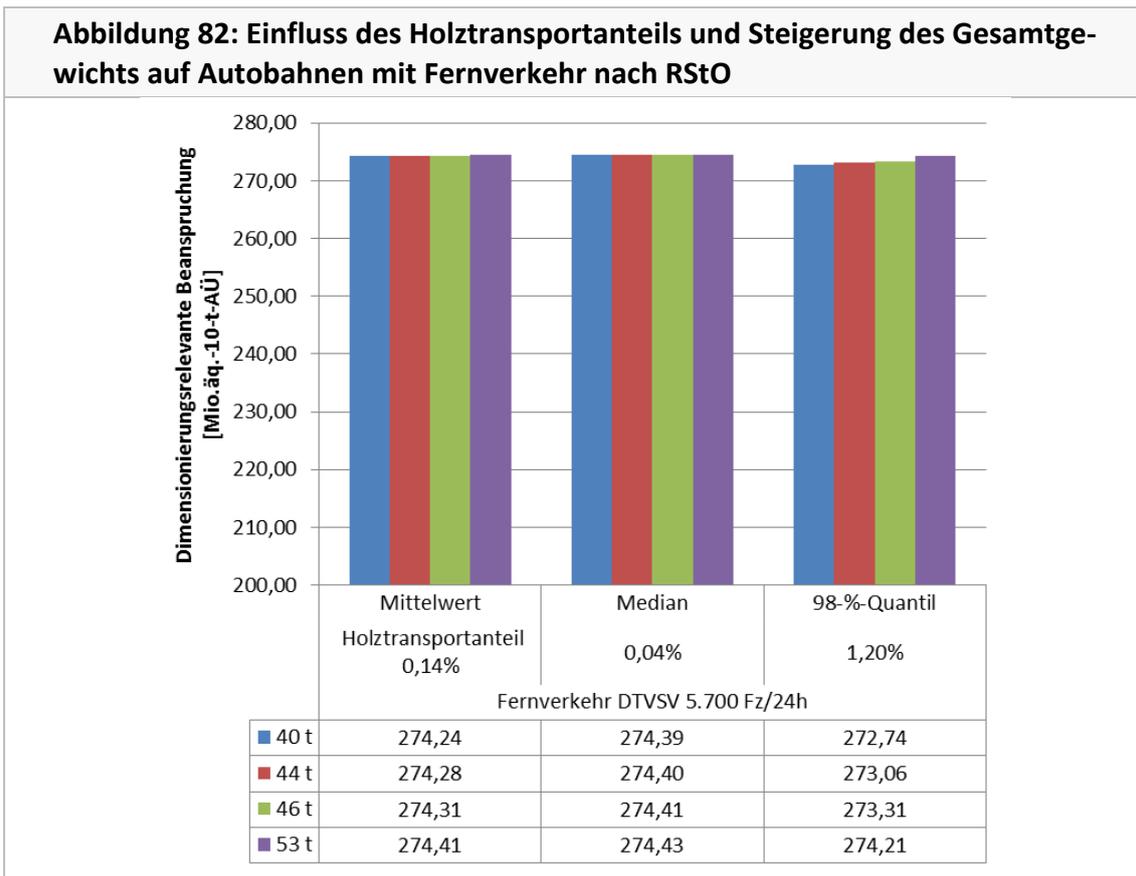
Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse für die in Kapitel 6.4.1.3 beschriebenen Verkehrszusammensetzungen dargestellt und erläutert. Die Schwerverkehrskollektive setzen sich dabei aus konstant bleibendem Hintergrundkollektiv und den Holztransportfahrzeugen zusammen, deren Anzahl mit zunehmendem Gesamtgewicht abnimmt (vgl. Kap.1). Die Bewertung der Einzelfahrzeuge erfolgt in Kapitel 6.5.1, auf die Holztransporter wird hier im Einzelnen nicht mehr eingegangen.

#### 6.5.2.1 RStO

Die Untersuchung der Auswirkungen höherer Gesamtgewichte für Holztransporter erfolgt gemäß den RStO ohne Einflüsse aus dem Schichtenaufbau der verschiedenen Straßentypen (vgl. Kap. 6.4.2.1), deshalb wird nicht zwischen den beiden Landstraßentypen unterschieden. In der Untersuchung liegt das Augenmerk speziell auf der Entwicklung der B-Zahl als Summation der äquivalenten 10-t-Achsübergänge über 30 Jahre Nutzungsdauer.

#### Fernverkehr auf Autobahnen

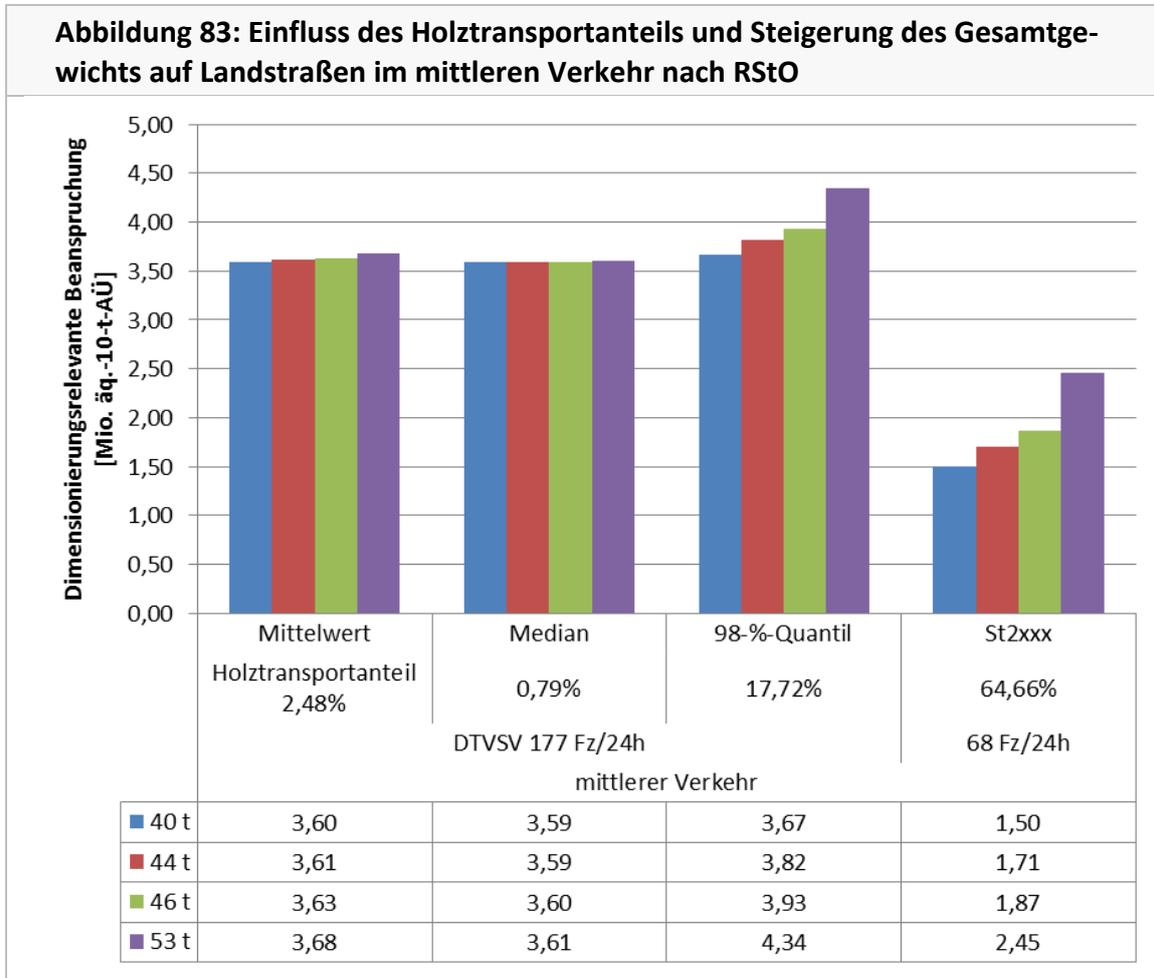
Die Abschätzung der Straßenbelastung nach den RStO ist in Abbildung 82 dargestellt. Die beiden Szenarien Mittelwert und Median als Repräsentanten von Streckenabschnitten mit geringem Holztransportanteil zeigen selbst für eine Erhöhung des Gesamtgewichts der Holztransporter auf 53 t keine erkennbare Erhöhung der Beanspruchung. Das 98%-Quantil für Streckenabschnitte mit einem für Autobahnen hohen Holztransportanteil von 1,20 % zeigt bereits einen erkennbaren Anstieg der Belastung für eine Erhöhung auf 53 t Gesamtgewicht. Die Steigerung beträgt jedoch relativ zum Vergleichsfall mit 40 t Gesamtgewicht lediglich 0,5 %.



**Mittlerer Verkehr auf Landstraßen**

Die Ergebnisse der Untersuchung des mittleren Verkehrs auf Landstraßen (vgl. Kap. 6.4.1.3) sind in Abbildung 83 dargestellt. Der Großteil aller Straßen, durch den Median mit einem geringen Holztransportanteil von 0,79 % beschrieben, zeigt mit einem Anstieg der B-Zahl von 0,6 % bei einer Erhöhung des Gesamtgewichts von 40 auf 53 t keine nennenswerte Veränderung. Im Fall der hochfrequentierten Landstraße mit einem Holztransportanteil von 17,7 % ist eine Erhöhung auf 53 t Gesamtgewicht mit einer Steigerung der B-Zahl um mehr als 18 % im Vergleich zum Szenario mit 40 t Gesamtgewicht deutlich erkennbar.

Aufgrund des geringeren  $DTV_{SV}$  von 68 Fz/24h liegt die Beanspruchung der St2xxx deutlich unter den anderen Verkehrsszenarien. Durch die geringe Zahl des Hintergrundkollektivs ist der Holzverkehr sehr viel relevanter, eine Erhöhung des Gesamtgewichts von 40 auf 46 t resultiert bereits in einer Steigerung der Beanspruchung um 25 % und einer erwarteten Belastung von 1,8 Mio. äq.-10-t-Achsgängen. Damit würde eine Straße, die eine solche Verkehrszusammensetzung aufwiese, in die nächsthöhere Belastungsklasse eingestuft, was einen entsprechend stärkeren Schichtenaufbau notwendig machen würde. Eine Erhöhung auf 53 t resultiert sogar in einer um mehr als 60 % höheren Belastung.

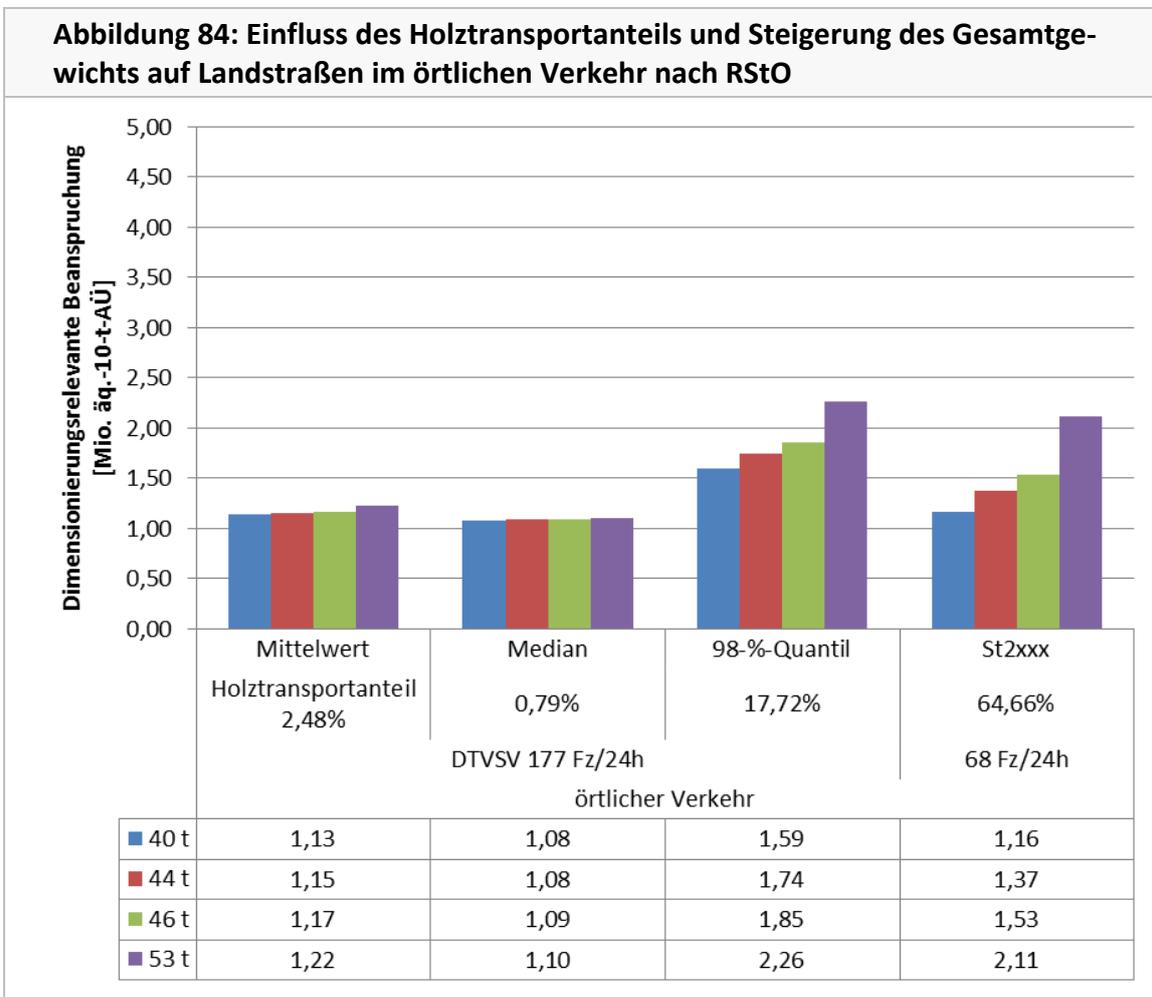


### Örtlicher Verkehr auf Landstraßen

Die Ergebnisse der Untersuchung des örtlichen Verkehrs auf Landstraßen sind in Abbildung 84 dargestellt. Auch hier sind für den Großteil der Straßen, dargestellt durch den Median, keine nennenswerten Steigerungen der Belastung zu erkennen. Da das Hintergrundkollektiv im örtlichen Verkehr überwiegend aus kleinen und leichten bzw. nur teilbeladenen Lkw besteht, vergrößert sich trotz der geringen Holztransportanteile der Einfluss, den das Gesamtgewicht der Holztransporter auf die Beanspruchung ausübt, gegenüber dem Szenario des mittleren Verkehrs.

Bei einer Erhöhung des Gesamtgewichts von 40 auf 46 t steigt die B-Zahl im Szenario des 98%-Quantils um 16 %. Eine weitere Steigerung auf 53 t Gesamtgewicht steigert die Belastung um 42 % im Vergleich zu einem Gesamtgewicht von 40 t.

Der sehr hohe Holztransportanteil auf der St2xxx führt dazu, dass bereits im 40-t-Szenario die Belastung auf Augenhöhe ist mit den Szenarien Mittelwert und Median, obwohl der DTV<sub>SV</sub> nur halb so groß ist. Eine Erhöhung auf 46 t Gesamtgewicht führt zu einer um 30 % höheren Belastung im Vergleich zu 40 t Gesamtgewicht, im Fall einer Erhöhung auf 53 t steigt die Belastung sogar um mehr als 80 %.

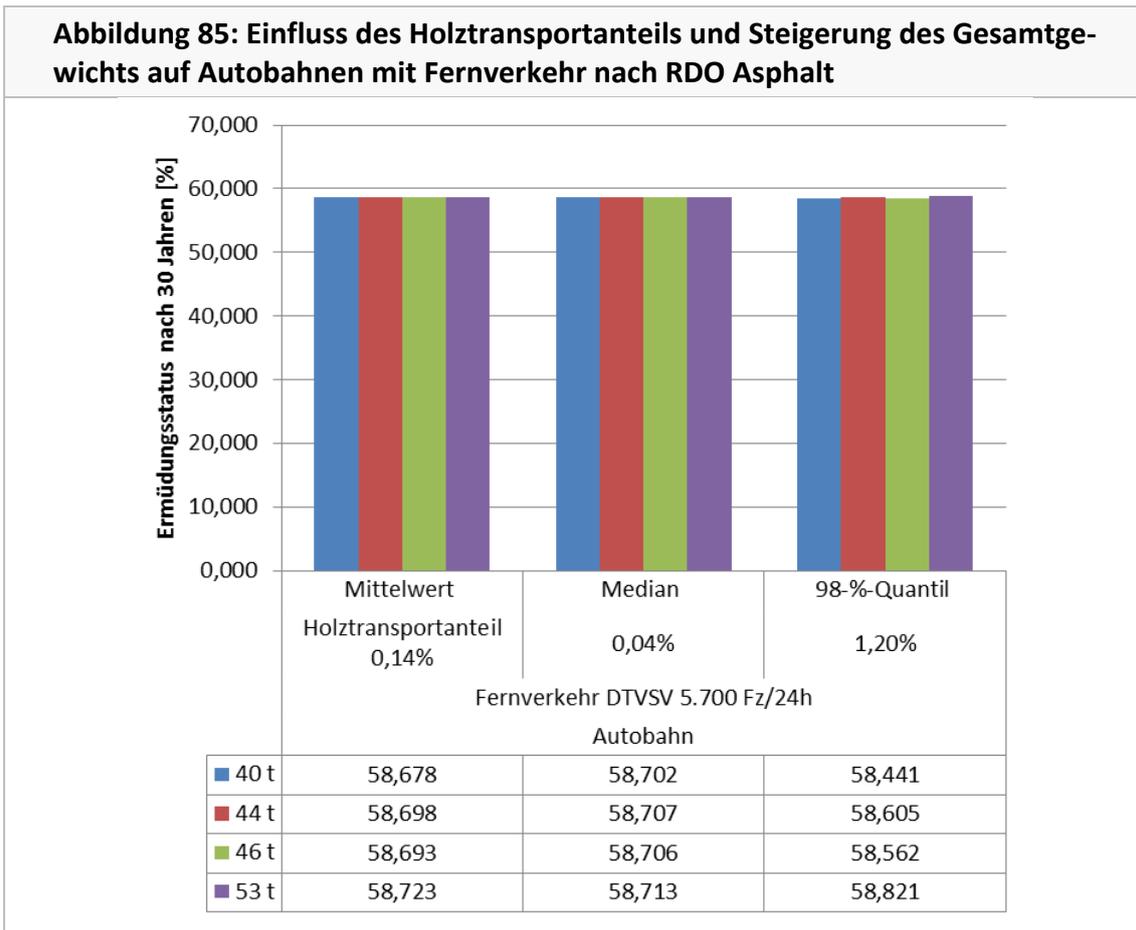


### 6.5.2.2 RDO Asphalt

Die Untersuchung gemäß den RDO erfolgt anhand der in Kapitel 6.4.16.4.1.3 beschriebenen Verkehrszusammensetzungen. Als Bewertungsmaß dient der Ermüdungsstatus nach 30 Jahren, ausgedrückt in der MINER-Summe (s. auch Kap. 6.3.3 und 6.4.2.2).

#### Autobahnen

Die Untersuchungsergebnisse sind in Abbildung 85 dargestellt. Der größte Teil der Autobahnen, repräsentiert durch den Median, zeigt tatsächlich bis in den Promillebereich überhaupt keine Änderungen für erhöhte Gesamtgewichte. Das Szenario des 98%-Quantils als Repräsentant für Streckenabschnitte mit einem für Autobahnen sehr hohen Holztransportanteil von 1,2 % zeigt ebenfalls sehr geringe und damit vernachlässigbare Änderungen hinsichtlich der geschätzten Straßenbelastung.



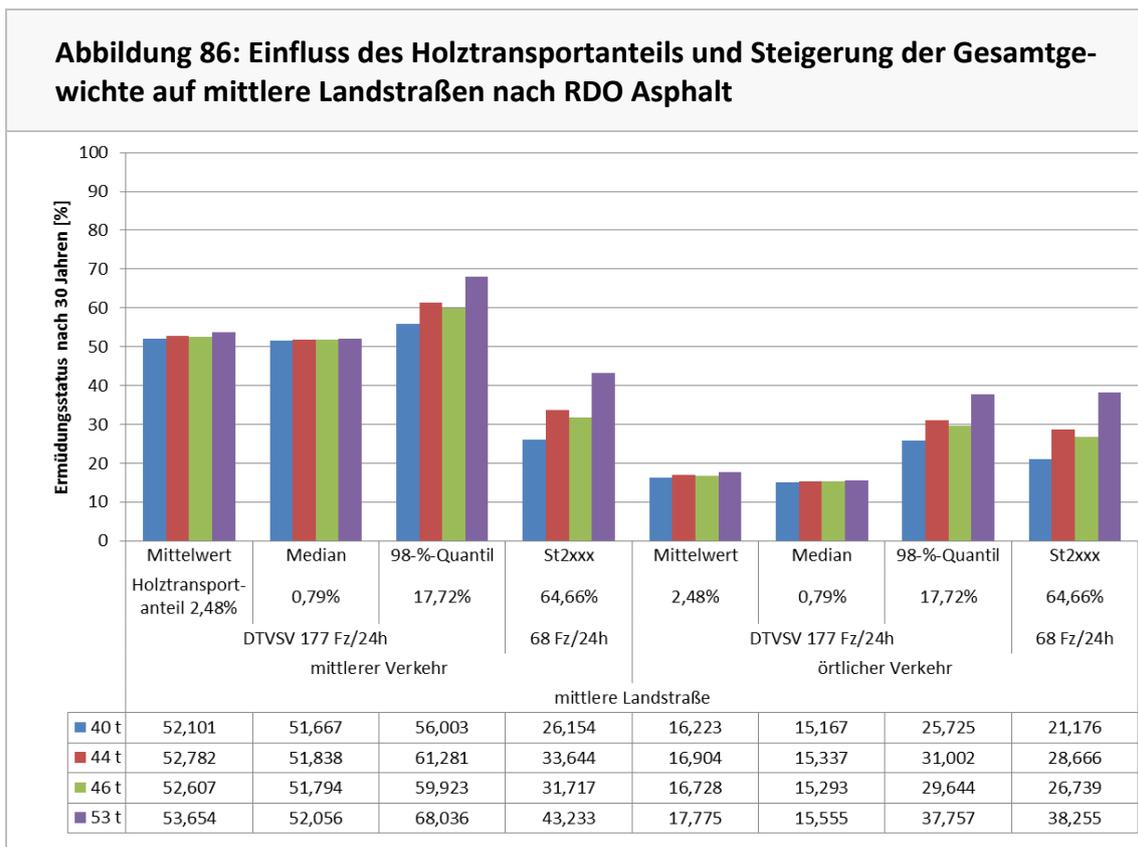
### Mittlere Landstraßen

Abbildung 86 zeigt die Untersuchungsergebnisse zur mittleren Landstraße (s. Kap. 6.4.1.1). Die linke Seite des Schaubilds zeigt die Ergebnisse der vier Verkehrsszenarien zum mittleren Verkehr, die rechte Seite den örtlichen Verkehr (s. auch Kap. 6.4.1.3). Für den Großteil aller Straßen, repräsentiert durch den Median, sind wegen der geringen Holztransportanteile weder im mittleren noch im örtlichen Verkehr nennenswerte Zunahmen der Straßenbelastung durch die Anhebung der Gesamtgewichte zu erwarten.

Vom Holzverkehr hochfrequentierte Straßen, dargestellt durch das 98%-Quantil, weisen bereits bei 40 t Gesamtgewicht eine etwas höhere Ermüdung auf. Eine Erhöhung der Gesamtgewichte auf 53 t resultiert in einer um 20 % höheren Ermüdung im Vergleich zu 40 t Gesamtgewicht. Für den hohen Holztransportanteil von ca. 65 % auf der St2xxx liegt dieser Wert bei 65 %.

Die Straßenbelastung der vom Holzverkehr hochfrequentierten Straßen im örtlichen Verkehr wird – da sich der örtliche Verkehr vorwiegend aus leichten Fahrzeugen zusammensetzt – nahezu ausschließlich vom Holzverkehr verursacht. Dadurch verstärkt sich die Zusatzbelastung bei einer Anhebung des Gesamtgewichts von 40 auf 53 t im Fall des 98%-Quantils auf 47 %, bei der St2xxx erhöht sich die Ermüdung sogar um 80 %.

Die Straßenbelastung der 46-t-Szenarien, dargestellt durch die grünen Säulen in Abbildung 86, ist methodisch bedingt etwas geringer als der 44-t-Fall, da durch die Klassifizierung der Achslasten gemäß RDO Asphalt die Holztransporter mit 44 t und 46 t Gesamtgewicht identisch sind, für das 46-t-Fahrzeug jedoch eine geringere Fahrtenzahl angenommen wurde (vgl. Kap. 6.4.1.3 Tabelle 55).

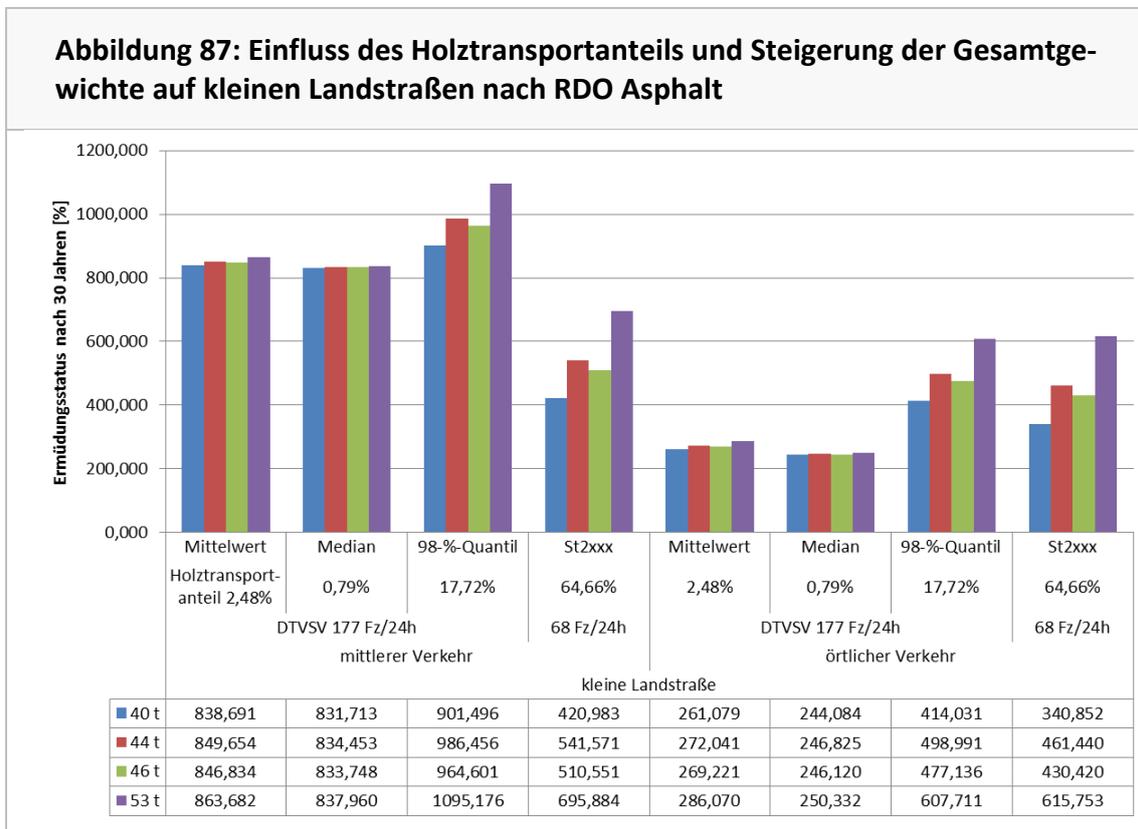


### Kleine Landstraßen

Der sehr dünne Schichtenaufbau der kleinen Landstraße wäre, wie Abbildung 87 zeigt, mit der Schwerverkehrsbelastung aus den Verkehrsszenarien völlig überfordert und würde sehr schnell ermüden. Der gesamte (fiktive) Ermüdungsstatus beträgt daher nach 30 Jahren bis zu über 1.000 %, dennoch können daraus relative Vergleiche zwischen den Verkehrsszenarien und Annahmen zum Gesamtgewicht gezogen werden.

Die Szenarien mit dem Median des Holzverkehrs zeigen sowohl beim mittleren als auch beim örtlichen Verkehr nur sehr geringe Steigerungen der Belastung. Die Ermüdung der vom Holzverkehr hochfrequentierten Streckenabschnitte im mittleren Verkehr steigt bei einer Erhöhung des Gesamtgewichts von 40 auf 53 t um ca. 21 % im Fall des 98%-Quantils bzw. um ca. 65 % für die St2xxx, ähnlich dem Szenario der mittleren Landstraße. Die absoluten Anteile der Mehrbelastung (MINER-Summen) an der gesamten ertragbaren Belastung sind hier jedoch wesentlich höher.

Im örtlichen Verkehr wiegen die höheren Gesamtgewichte sehr viel stärker. Eine Gewichtserhöhung von 40 auf 53 t verstärkt die Ermüdung im 98%-Quantil um ca. 47 %, im Szenario der St2xxx um ca. 81 %.

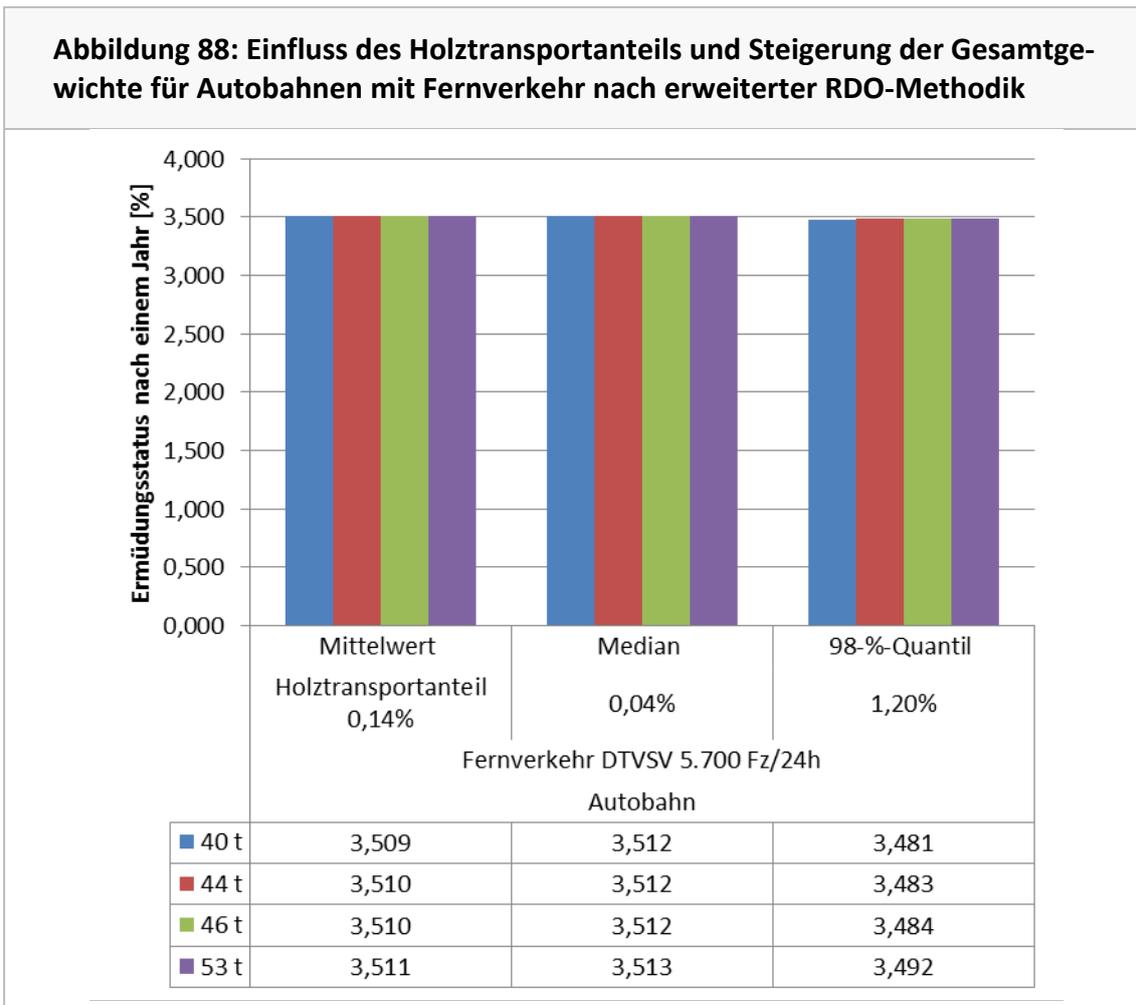


### 6.5.2.3 Mehrschichtentheorie in Erweiterung der RDO Methodik

Um die spezifische Konfiguration der Holzfahrzeuge zu berücksichtigen, wird die Berechnungs- und Bewertungsmethodik der RDO Asphalt erweitert (vgl. Kap. 6.4.3). Die Achslasten der Holztransporter werden nicht, wie in der RDO-Methodik, klassifiziert berechnet und auch die Bereifung in Form von Anzahl der Reifen, Größe der Reifen und Kontaktflächenspannung gehen exakt in die Berechnung ein. Zusätzlich wird das Temperaturverhalten des Asphalts genauer berücksichtigt. Als Bewertungsmaß dient, in Anlehnung zur RDO-Methodik, der Ermüdungsstatus (ausgedrückt als MINER-Summe) nach einem Jahr.

#### Autobahnen

Wie Abbildung 88 zeigt, ist für keines der untersuchten Holztransportanteil-Szenarien eine nennenswerte Erhöhung der Straßenbelastung zu erwarten, da die Anteile der Holztransporter am Gesamtschwerverkehr auf Autobahnen, selbst für das 98-%-Quantil mit lediglich 1,2 %, sehr gering sind.



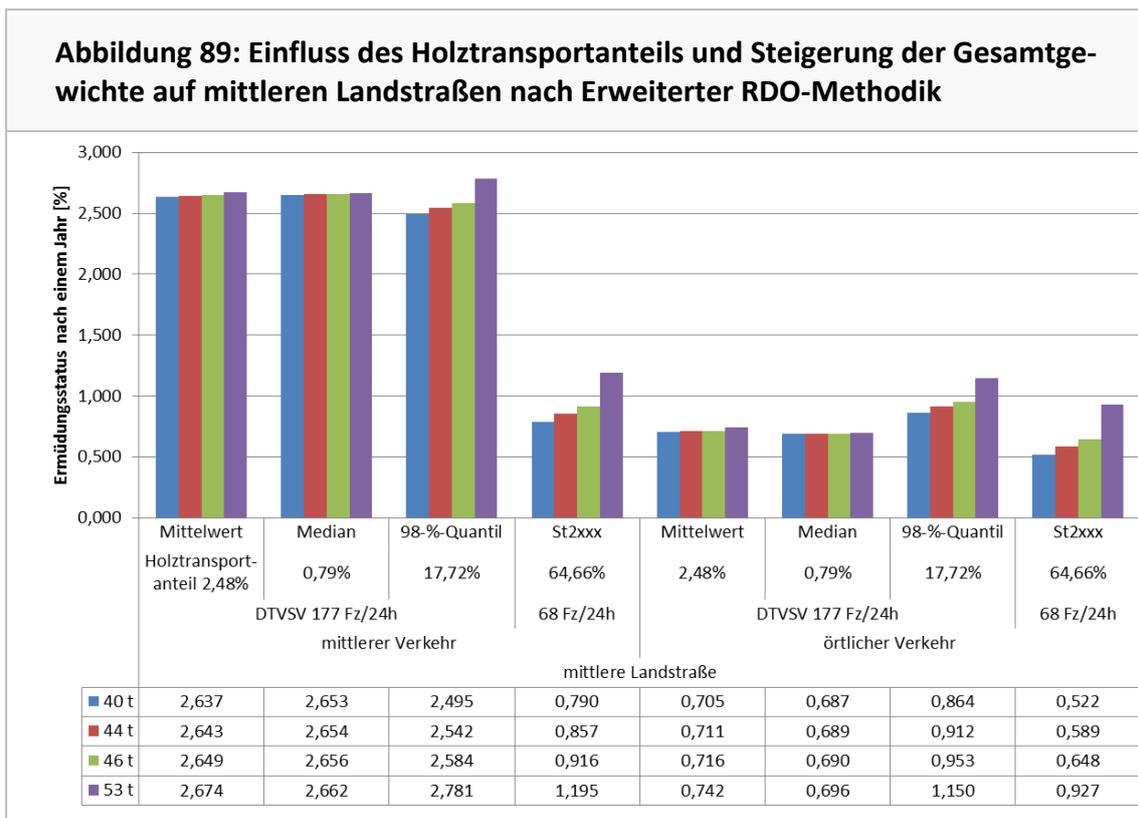
### Mittlere Landstraßen

Die Ergebnisse des Szenarios für die mittleren Landstraßen sind in Abbildung 89 dargestellt. Gut zu erkennen ist die bei Anwendung dieser Berechnungsmethodik deutlich geringere Steigerung der Straßenbelastung durch höhere Gesamtgewichte gegenüber den Berechnungen der RDO-Methodik, da die in die Berechnungen eingehenden Achslasten durch den Wegfall der Klassifizierung geringer werden und auch Lastverteilung und Zwillingsreifen berücksichtigt werden.

Die Szenarien Median und Mittelwert zeigen für den mittleren Verkehr als auch für den örtlichen Verkehr kaum Steigerungen der Belastung durch eine Anhebung der Gesamtgewichte.

Im Fall der hochfrequentierten Straße des 98%-Quantils im mittleren Verkehr steigt die Ermüdung bei einer Erhöhung des Gesamtgewichts auf 44 t um 1,9 %, eine Erhöhung auf 46 t steigert die Ermüdung um 3,6 % (RDO-Methodik: ca. 10 %). Eine Erhöhung auf 53 t führt zu einer Erhöhung der Straßenbelastung um 11 % (RDO-Methodik: 20 %). Im Vergleich des 98%-Quantils mit dem Median-Szenario, beide im 40-t-Fall, ist die Straßenbelastung im 98%-Quantil trotz höherem Holztransportanteil um 6 % geringer, während die Straßenbelastung des 98%-Quantils nach RDO noch 2,5 % höher als die Straßenbelastung des Median war. Auch hier zeigen sich methodenbedingt die Einflüsse der besonderen Bauweise der Holztransporter auf die Straßenbelastung.

Die tendenziell leichteren Schwerfahrzeuge im örtlichen Verkehr verstärken diesen Effekt. Eine Erhöhung auf 44 t Gesamtgewicht verstärkt die Ermüdung im 98%-Quantil um 5,6 %, (RDO: 20,5 %). Eine Erhöhung des Gesamtgewichts auf 53 t würde die Ermüdung um 33 % steigern (RDO: 47 %).

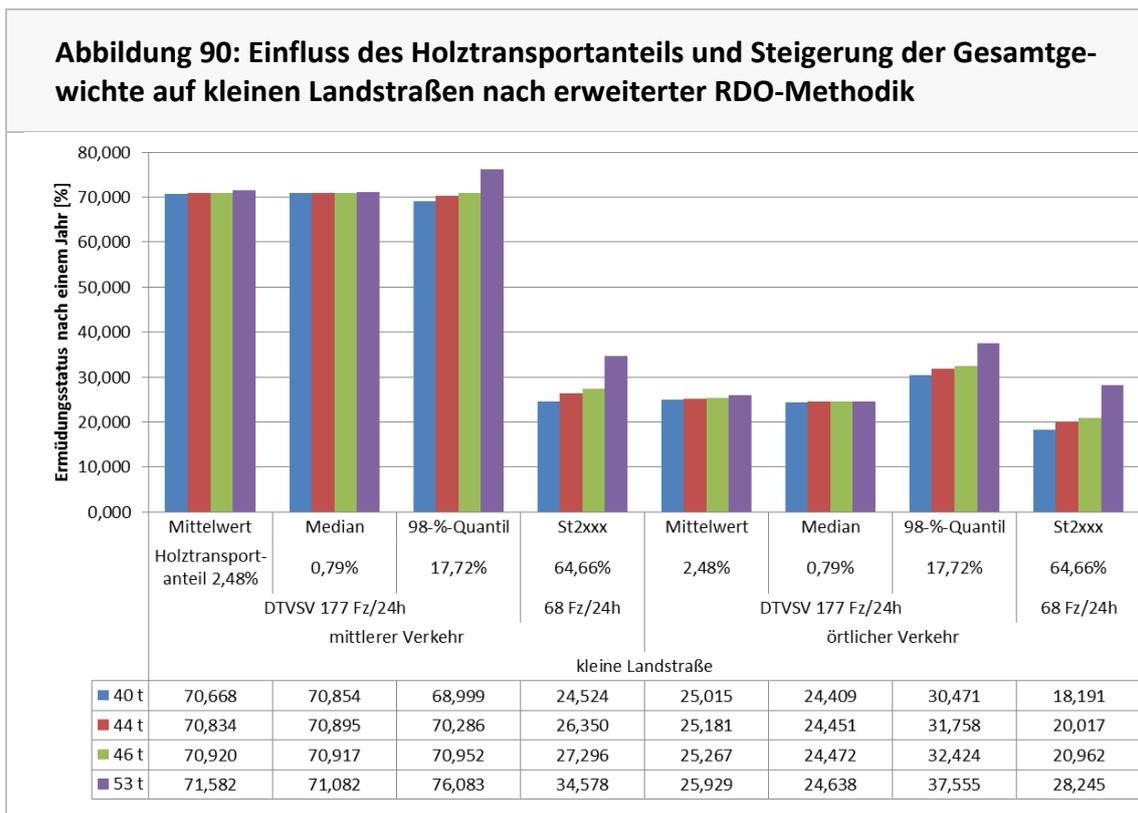


### Kleine Landstraßen

Die Entwicklung der Ermüdung im Szenario der kleinen Landstraße, dargestellt in Abbildung 90, verhält sich sehr ähnlich zur mittleren Landstraße. Die Szenarien für Median und Mittelwert zeigen für höhere Gesamtgewichte nur geringe Steigerungen der Straßenbelastung.

Für hochfrequentierte Straßen im mittleren Verkehr steigt die Ermüdung bei einer Gewichtserhöhung auf 44 t um 1,9 % für das 98-%-Quantil und um 7,5 % für die St2xxx. Eine weitere Erhöhung auf 46 t Gesamtgewicht steigert diese Werte auf 2,8 % bzw. 11,3 %. Bei einer Erhöhung des Gesamtgewichts auf 53 t würde sich die Mehrbelastung der Straße auf 10,3 % bzw. 41 % belaufen.

Im örtlichen Verkehr beträgt die Mehrbelastung bei 44 t Gesamtgewicht 4,2 % für das 98-%-Quantil und 10 % für die St2xxx. Eine Erhöhung des Gesamtgewichts auf 53 t steigert diese Werte auf 23 % bzw. 55 %.



### 6.6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Untersuchung sind Belastungen durch Rohholztransport mit den spezifischen Holzfahrzeugen („Kurzholz- und Langholzzug“) sowie variierende Gesamtgewichte dieser Holzfahrzeuge auf verschiedene Straßentypen (nicht Waldwege) geprüft worden.

Die Untersuchung der Belastung verschiedener Straßentypen (hinsichtlich Aufbau und Verkehrszusammensetzung) durch Holzfahrzeuge sowie die fiktive Untersuchung erhöhter zulässiger Gesamtgewichte wird unter Berücksichtigung der Spezifika von Holztransportfahrzeugen anhand der geltenden Regelwerke für den Straßenbau und insbesondere der Dimensionierung von Straßen (RSto<sup>246</sup>, RDO<sup>247</sup>) sowie damit zusammenhängenden, anerkannten Modellen zur

<sup>246</sup> Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2012):

Berechnung der Belastung von Straßenaufbauten (hier: Mehrschichtentheorie bzw. „erweiterte RDO-Methodik“) durchgeführt.

Die angewandten drei Berechnungsmodelle unterscheiden sich in der Methodik der Berechnung und Erfassung der Straßenbelastung sowie der eingehenden Parameter wie z. B. Achslasten, Straßenaufbau und spezifische Reifenkonfigurationen der Fahrzeuge (s. Kap. 6.4.2 und 6.4.3, insbesondere Tabelle 56). Die ermittelten „Kennziffern“ der Straßenbelastung (B-Zahl bei den RStO bzw. MINER-Summe bei den RDO und deren Erweiterung durch die Mehrschichtentheorie) beziehen sich dabei jeweils auf die Belastung bzw. Ermüdung des gesamten Oberbaus, also der Substanz des Bauwerks Straße als Ganzem im Laufe ihrer Liegedauer durch wiederholte schwere dynamische Lasten (LKW des Schwerverkehrs). Es handelt sich dabei um idealtypische Berechnungen. Dies bedeutet, dass nicht-substantielle Schäden einzelner Schichten, wie z. B. Spurrinnenbildung ausschließlich innerhalb der Deckschicht, Kornausbrüche in engen Kreuzungsbereichen oder Verdrückungen am Rand der Befestigung (bei schmalen Straßen) durch die hier angewandten Berechnungsmethoden und Modellvorstellungen nicht berücksichtigt sind. Diese potenziellen Schadensmechanismen werden jedoch gleichwohl durch erhöhte Gesamtgewichte verstärkt, auch wenn dies hier nicht explizit quantitativ rechnerisch nachgewiesen wird. Zudem wirken neben der Schwerverkehrsbelastung weitere lastunabhängige Faktoren auf die Straßenschädigung wie Materialfehler, Alterungserscheinungen, Witte-rung, mangelhafte Entwässerung des Oberbaus, die jedoch nicht eindeutig quantifizierbar sind und deshalb in den Modellberechnungen nicht explizit berücksichtigt werden können (vgl. Kap. 6.3.4.3).

In Kapitel 6.5.1 wird die Straßenbelastung (basierend auf den erwähnten drei Modellen) von einzelnen Schwerverkehrsfahrzeugen (Holzfahrzeuge im Vergleich zu herkömmlichen „Referenz“-Lkw) vergleichend gegenübergestellt.

In Kapitel 6.5.2 werden darüber hinaus Kollektive des Schwerverkehrs für unterschiedliche Straßentypen und Verkehrszusammensetzungen betrachtet (vgl. Kap. 6.4.1.3), um die Auswirkungen des Holztransports (auch unter Zunahme des Gesamtgewichts) und dessen Relevanz für die Straßenbelastung unter Berücksichtigung des sonstigen Schwerverkehrs aufzeigen zu können. Die Annahmen zu den Schwerverkehrskollektiven stammen dabei zum Einen aus der Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand<sup>247</sup> (bezüglich üblicher Achslastverteilungen des Schwerverkehrs, im Weiteren auch „Hintergrundkollektiv“ genannt und als „Fernverkehr“, „mittlerer Verkehr“ und „örtlicher Verkehr“ charakterisiert). Zum Anderen (bezüglich typischer Holzfahrzeuganteile am Schwerverkehr) aus Zähl-daten sowie einer Umlage-rechnung anhand des bayerischen Straßennetzes. Letztgenannte Daten stammen aus einer Untersuchung der Universität Freiburg, die im Rahmen des Gesamtprojekts zur Verfügung gestellt wurden.

Berücksichtigt sind sowohl bei der Betrachtung von Einzelfahrzeugen als auch bei der Untersuchung von Schwerverkehrskollektiven verschiedene typische Straßenaufbauten mit unterschiedlicher Dicke der Befestigung, soweit die Berechnungsmethodik die Berücksichtigung des Straßenaufbaus zulässt. Neben einem typischen Autobahnaufbau sind diesbezüglich zwei verschieden starke Landstraßenaufbauten („mittlere Landstraße“, „kleine Landstraße“) untersucht worden.

---

<sup>247</sup> Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2010):

<sup>248</sup> Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2011):

Folgende Aussagen können aus den Simulationsrechnungen mit den unterschiedlichen Modellen getroffen werden, wobei stets die Grundlagen der Modelle, Eingangswerte sowie getroffene Annahmen zu berücksichtigen sind:

### **Einzelfahrzeugbelastung**

- Anhand der Methodik der „erweiterten RDO“ kann gezeigt werden, dass die Spezifika der Holztransportfahrzeuge die zunehmende Straßenbelastung durch höhere Gesamtgewichte zwar abschwächen (s. Kap. 6.4.3), jedoch trotzdem eine (je nach Gesamtgewicht mehr oder weniger) deutliche Mehrbelastung der Straßen durch die Gewichtszunahme zu erwarten sein würde.
- Die hier betrachteten Holztransportfahrzeuge zeigen bei gleichem Gesamtgewicht aufgrund ihrer Fahrzeugspezifika tendenziell geringere Straßenbelastungen als die Referenz-Lkw (vgl. Kap. 6.5.1). Besonders auffällig ist dies bei expliziter Berücksichtigung der Bereifung. Die Straßenbelastung durch die Holztransporter liegt bei gleichem Gesamtgewicht (40 t) etwa 25 % bis 50 % unterhalb der von den Referenzfahrzeugen erzeugten Straßenbelastung.
- Bei angenommenen zunehmenden Gesamtgewichten der Holzfahrzeuge (44 t, 46 t, 53 t) würde die Straßenbelastung durch diese Fahrzeuge im Vergleich zur Zunahme des Gesamtgewichts stark überproportional ansteigen (s. Kap. 6.5.1). Beispielsweise kann eine Erhöhung des Gesamtgewichts um 10 % von 40 t auf 44 t die Straßenbelastung durch einzelne Fahrzeuge selbst bei Berücksichtigung der spezifischen Bauweise der Holztransporter um 30 % bis 50 % steigern. Eine Erhöhung auf 53 t kann die Straßenbelastung im Vergleich zu 40 t mehr als verdreifachen.
- Die Zunahme der Straßenbelastung ist dabei auf schwächeren Befestigungen („kleine Landstraße“) erheblich größer als auf stark befestigten Autobahnen (s. Kap. 6.5.1).
- Die Stärke des Oberbaus bzw. die Gesamtdicke der Asphaltsschichten beeinflusst maßgeblich die Schädigungswirkung, die Unterschiede zwischen der Autobahn und der „kleinen Landstraße“ können bis zu Faktor 4.000 betragen. Dementsprechend sind höhere Gesamtgewichte vor allem auf dünneren Asphaltaufbauten im Landstraßennetz als kritisch zu betrachten, insbesondere im nachgeordneten Netz oder bei innerörtlichen Straßen, die u. U. nur schwach befestigt sind bzw. nur dünne Asphaltaufbauten aufweisen (z.B. „kleine Landstraße“).
- Straßen mit mittlerer bis schwacher Befestigung ermüden im Winter deutlich schneller als im Sommer (vgl. Kap. 6.5.1).

### **Kollektivbetrachtung**

- Die Kollektivbetrachtungen in Kapitel 6.5.2 zeigen den meist geringen Anteil der Holzfahrzeuge an der Straßenbelastung aufgrund ihres geringen Anteils am Schwerverkehrsaufkommen.
- Auf Autobahnen ist der Einfluss der Holztransportfahrzeuge (selbst bei Autobahnen mit relativ hohem Holztransportanteil von 1,2 % am gesamten Schwerverkehr) auf die Straßenbelastung weitgehend vernachlässigbar (s. Kap. 6.5.2, Abbildung 83, Abbildung 86 und Abbildung 89).

- Dementsprechend hätte in Bezug auf Autobahnen (Aufbau und Schwerverkehrskollektiv) auch eine Anhebung des Gesamtgewichts – ausschließlich der Holztransportfahrzeuge, die nur einen sehr kleinen Anteil am gesamten Schwerverkehr ausmachen – kaum Auswirkungen auf die Straßenbelastung (basierend auf den hier berechneten Kennziffern).
- Etwa 80 % aller Landstraßen werden nur von sehr wenigen Holztransportern befahren (unter 3 % Anteil am Schwerverkehr), ausgehend von der Umlegungsrechnung im bayerischen Straßennetz und einer angenommenen Übertragbarkeit auf das Landstraßennetz Baden-Württembergs. Auf diesen Straßen hat eine Erhöhung der Gesamtgewichte der Holzfahrzeuge (aufgrund ihres niedrigen Anteils am Schwerverkehr) relativ geringe Auswirkungen auf die Straßenbelastung (Median- und Mittelwertszenarien in Kap. 6.5.2). Bei einer Anhebung des Gesamtgewichts der Holzfahrzeuge von 40 t auf 44 t bleibt die Mehrbelastung unter 3 %. Eine Erhöhung auf 53 t würde die Mehrbelastung auf bis zu 10 % ansteigen lassen.
- Im Fall von Landstraßen, auf denen sehr viele Holzfahrzeuge verkehren (98%-Quantile und die beispielhaft betrachtete Staatsstraße St2xxx in Kap. 6.5.2) wäre eine Erhöhung der Gesamtgewichte mit erheblich deutlicheren Auswirkungen hinsichtlich der Straßenbelastung verbunden.
- Eine Erhöhung des Gesamtgewichts der Holzfahrzeuge von 40 t auf 44 t bewirkt auf diesen Straßen mit hohem Holztransportanteil nach aktueller Berechnungsmethodik (RStO und RDO Asphalt) und je nach betrachtetem „Hintergrundkollektiv“ des sonstigen Schwerverkehrs („örtlicher Verkehr“ oder „mittlerer Verkehr“) eine Zunahme der Straßenbelastung um bis zu 32 %. Eine Erhöhung auf 53 t würde die Mehrbelastung um 46 % bis 82 % ansteigen lassen. Dies stellt eine sehr erhebliche Zunahme des Schädigungspotentials dar, auch wenn mutmaßlich nur wenige Straßen bzw. geringe Teile des Gesamtnetzes betroffen sind.
- Es ist festzustellen, dass durch die Berücksichtigung der spezifischen Bauweise der Holztransporter mit Zwillingbereifung und doppelter Antriebsachse die Straßenbelastung etwas abgemindert wird, gerade auf den vom Holztransport stark genutzten Straßen. Dennoch ist auf diesen Straßen insgesamt mit einer deutlichen Zunahme der Straßenschädigung durch erhöhte Gesamtgewichte der Holztransporter zu rechnen. Mit Berücksichtigung der Zwillingbereifung und der doppelten Antriebsachse würde sich die Mehrbelastung bei einer Erhöhung des Gesamtgewichts auf 44 t reduzieren auf 15 % höhere Belastung. Ein Gesamtgewicht von 53 t würde die Straße mit 55 % mehr belasten.

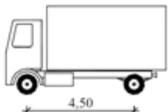
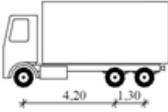
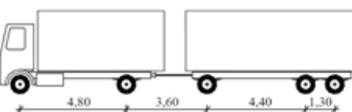
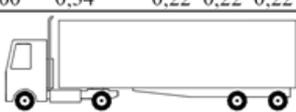
## 6.7 Literatur

- Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (2010): Modell zur straßenbautechnischen Analyse der durch den Schwerverkehr induzierten Beanspruchung des BAB-Netzes. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - Straßenbau 61.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (2011): Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - Straßenbau 45.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2011): Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie). Berlin.
- COST - European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research (2001): COST 334 - Effects of Wide Single Tyres and Dual Tyres. Luxemburg.
- Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen (1968): Der AASHO-Road-Test: Hauptergebnisse und Folgerungen zum Problem der Bemessung von Fahrbahnbefestigungen; Bericht des AASHO-Road-Test-Ausschusses. Bad Godesberg.
- Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen (1975): Richtlinien für den Straßenoberbau - Standardausführungen (RStO 75). Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2010): Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen. Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2012): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen. Köln.
- Goodyear Dunlop Tires Germany GmbH (2013): Technisches Handbuch LKW-/Busreifen. Hahnau.
- Hahn, W.-D. (1990): Auswirkungen der Nutzfahrzeugkonstruktion auf die Straßenbeanspruchung. Forschungsvereinigung Automobiltechnik. Schriftenreihe Nr. 85. Frankfurt.
- Huang, Y. h. (2012): Pavement Analysis and Design. Pearson Education. Upper Saddle River.
- Mollenhauer, K. (2008): Dimensionierungsrelevante Prognose des Ermüdungsverhaltens von Asphalt mittels einaxialer Zug-Schwellversuche. Dissertation. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.
- Taramoeroa, N.; de Pont, J. (2008): Characterising pavement surface damage caused by tyre scuffing forces. Land Transport New Zealand research report 347. Wellington, N.Z..
- Velske, S.; Eymann, P.; Mentlein, H. (2013): Strassenbau, Strassenbautechnik. Werner Verlag. Köln.

## 6.8 Anlagen

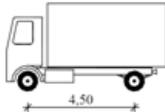
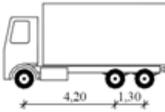
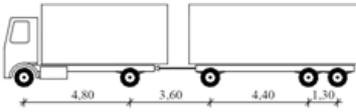
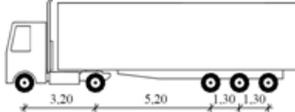
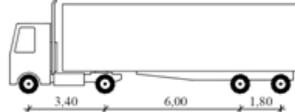
### Anlage 1: Verkehrszusammensetzungen gemäß Nachrechnungsrichtlinie

#### örtlicher Verkehr

LKW – Typ	Geometrie und Lastverteilung	Auftrittens- wahrschein- lichkeit [%]	Gesamtgewicht von Fahrzeug und Ladung	
			Mittelwert [kN]	Standardabw. [kN]
Lkw 1		80,0 ab 2010 nach NaRiLi: 80%		
Fahrzeug	0,60 0,40		30	10
Ladung	0,20 0,80		60	25
Lkw 2		5,0 ab 2010 nach NaRiLi: 5%		
Fahrzeug	0,60 0,20 0,20		35	15
Ladung	0,12 0,44 0,44		110	40
LKW mit Anhänger		5,0 ab 2010 nach NaRiLi: 5%		
Fahrzeug	0,30 0,22 0,18 0,15 0,15		90	35
Ladung	0,06 0,32 0,22 0,20 0,20		135	50
Sattelzug 1		5,0 ab 2010 nach NaRiLi: 5%		
Fahrzeug	0,36 0,25 0,13 0,13 0,13		95	35
Ladung	0,00 0,34 0,22 0,22 0,22		150	60
Sattelzug 2		5,0 ab 2010 nach NaRiLi: 5%		
Fahrzeug	0,40 0,28 0,16 0,16		75	30
Ladung	0,04 0,40 0,28 0,28		125	45

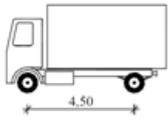
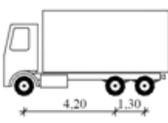
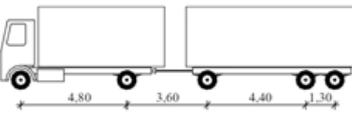
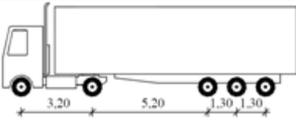
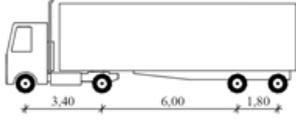
Quelle: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2011)

**mittlerer Verkehr**

LKW – Typ	Geometrie und Lastverteilung	Auftrittens- wahrschein- lichkeit [%]	Gesamtgewicht von Fahrzeug und Ladung	
			Mittelwert [kN]	Standardabw. [kN]
Lkw 1		50,0 ab 2010 nach NaRiLi: 40%	45 80	20 30
Fahrzeug Ladung	0,60 0,40 0,20 0,80			
Lkw 2		5,0 ab 2010 nach NaRiLi: 10%	45 150	20 60
Fahrzeug Ladung	0,60 0,20 0,20 0,12 0,44 0,44			
LKW mit Anhänger		10,0 ab 2010 nach NaRiLi: 5%	105 160	40 65
Fahrzeug Ladung	0,30 0,22 0,18 0,15 0,15 0,06 0,32 0,22 0,20 0,20			
Sattelzug 1		20,0 ab 2010 nach NaRiLi: 30%	110 180	40 70
Fahrzeug Ladung	0,36 0,25 0,13 0,13 0,13 0,00 0,34 0,22 0,22 0,22			
Sattelzug 2		15,0 ab 2010 nach NaRiLi: 15%	90 150	35 60
Fahrzeug Ladung	0,40 0,28 0,16 0,16 0,04 0,40 0,28 0,28			

Quelle: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2011)

**Fernverkehr**

LKW – Typ	Geometrie und Lastverteilung	Auftrittens- wahrschein- lichkeit [%]	Gesamtgewicht von Fahrzeug und Ladung	
			Mittelwert [kN]	Standardabw. [kN]
Lkw 1		20,0		
Fahrzeug	0,60 0,40	ab 2010	50	20
Ladung	0,20 0,80	nach NaRiLi: 10%	95	40
Lkw 2		5,0		
Fahrzeug	0,60 0,20 0,20	ab 2010	50	20
Ladung	0,12 0,44 0,44	nach NaRiLi: 5%	180	70
LKW mit Anhängen		10,0		
Fahrzeug	0,30 0,22 0,18 0,15 0,15	ab 2010	135	50
Ladung	0,06 0,32 0,22 0,20 0,20	nach NaRiLi: 10%	200	70
Sattelzug 1		40,0		
Fahrzeug	0,36 0,25 0,13 0,13 0,13	ab 2010	135	50
Ladung	0,00 0,34 0,22 0,22 0,22	nach NaRiLi: 60%	230	80
Sattelzug 2		25,0		
Fahrzeug	0,40 0,28 0,16 0,16	ab 2010	110	40
Ladung	0,04 0,40 0,28 0,28	nach NaRiLi: 15%	180	70

Quelle: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2011)



### Anlage 3: Auszug aus Szenarien Holztransport und THG Emissionen

HoLoBaWü: Szenarien-Definition Variante "Standard" (40 to)			
Mengen, Massen, Strecken für Szenario "Standard"			
Holzeinschlag Baden-Württemberg	10,70	Mio. m <sup>3</sup>	Erntefestmeter ohne Rinde
abzgl. Scheitholz (Hausbrand)	1,30	Mio. m <sup>3</sup>	
Rinde (bei Holzvolumenberechnung Efm o.R.)			bei Lastberechnung Lkw berücksichtigt
	<b>9,40</b>	<b>Mio. m<sup>3</sup></b>	
Nadelholz %	73		Laubholz %
Mio. m <sup>3</sup>	<b>6,86</b>		<b>2,54</b>

ab hier weiter Nadelholz:		
Daten	Werte	Einheiten
Langholzanteil %	65	%
=> transportierte Langholzmenge in Mio m <sup>3</sup>	4,46	Mio m <sup>3</sup>
Zuladung in m <sup>3</sup> ohne Berücksichtigung Rinde	24,1	m <sup>3</sup>
Zuladung in m <sup>3</sup> mit Berücksichtigung Rinde	21,7	m <sup>3</sup>
=> Anzahl LKW-Ladungen	205.669	Anzahl
Beschaffungsradius in Km (ein Weg)	60	Km
=> gefahrene Kilometer alle Straßen "leer"	4.936.065	Km
=> gefahrene Kilometer alle Straßen "beladen"	7.404.098	Km
gefahrene Kilometer gesamt	12.340.163	Km
LKW-Typ A) normal/flaches Gelände	75%	%
Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km	55	l/100km
Kraftstoffverbrauch beladen	3.054.190	l
Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km	30	l/100km
Kraftstoffverbrauch unbeladen	1.110.615	l
=> Kraftstoffverbrauch LKW-Typ A)	4.164.805	l
LKW-Typ B) "bergig"	25%	%
Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km	75	l/100km
Kraftstoffverbrauch beladen	1.388.268	l
Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km	35	l/100km
Kraftstoffverbrauch unbeladen	431.906	l
Kraftstoffverbrauch LKW-Typ B)	1.820.209	l
Kraftstoffverbrauch "Langholz-LKW" Nadel	5.985.014	l
Kurzholzanteil %	35	%
=> transportierte Kurzholzmenge in Mio m <sup>3</sup>	2,40	Mio m <sup>3</sup>
Zuladung in m <sup>3</sup> (ohne Berücksichtigung Rinde)	24,1	m <sup>3</sup>
Zuladung in m <sup>3</sup> mit Berücksichtigung Rinde	21,7	m <sup>3</sup>
=> Anzahl LKW-Ladungen	110.745	Anzahl
Beschaffungsradius in Km (ein Weg)	110	Km
=> gefahrene Kilometer alle Straßen "leer"	4.872.782	Km
=> gefahrene Kilometer alle Straßen "beladen"	7.309.174	Km
gefahrene Kilometer gesamt	12.181.956	Km
davon % LKW-Typ "Standard-Kurz"		
Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km	55	l/100km
Kraftstoffverbrauch beladen	4.020.046	l
Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km	35	l/100km
Kraftstoffverbrauch unbeladen	1.705.474	l
Kraftstoffverbrauch "Kurzholz-LKW" Nadel	5.725.554	l

ab hier weiter Laubholz:		
Werte	Einheiten	Daten
69	%	Langholzanteil %
1,75	Mio m <sup>3</sup>	
17,2	m <sup>3</sup>	
15,5	m <sup>3</sup>	
112.856	Anzahl	
60	Km	
2.708.554	Km	
4.062.830	Km	
6.771.384	Km	
100%	%	LKW-Typ "Langholz-Zug"
55	l/100km	Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km
2.234.557	l	Kraftstoffverbrauch beladen
35	l/100km	Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km
947.994	l	Kraftstoffverbrauch unbeladen
3.182.550	l	=> Kraftstoffverbrauch LKW "Langholz-Zug"
31	%	Kurzholzanteil %
0,79	Mio m <sup>3</sup>	
17,2	m <sup>3</sup>	
15,5	m <sup>3</sup>	
50.704	Anzahl	
60	Km	
1.216.886	Km	
1.825.330	Km	
3.042.216	Km	
55	l/100km	davon 100% LKW-Typ "Kurzholz-Zug"
1.003.931	l	Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km
35	l/100km	Kraftstoffverbrauch unbeladen 100 / Km
425.910	l	Kraftstoffverbrauch unbeladen
1.429.842	l	Kraftstoffverbrauch Laub "Kurzholz-Zug"

Quelle: UNIQUE

HoLoBaWü: Szenarien-Definition Variante "44 to"			
Mengen, Massen, Strecken für Szenario "Standard"			
Holzeinschlag Baden-Württemberg	10,70	Mio. m <sup>3</sup>	Erntefestmeter ohne Rinde
abzgl. Scheitholz (Hausbrand)	1,30	Mio. m <sup>3</sup>	
Rinde (bei Holzvolumenberechnung Efm o.R.)			bei Lastberechnung Lkw berücksichtigt
	<b>9,40</b>	<b>Mio. m<sup>3</sup></b>	
Nadelholz %	73		Laubholz %
Mio. m <sup>3</sup>	<b>6,86</b>		<b>2,54</b>

ab hier weiter Nadelholz:		
Daten	Werte	Einheiten
Langholzanteil %	65	%
=> transportierte Langholzmenge in Mio m <sup>3</sup>	4,4603	Mio m <sup>3</sup>
Zuladung in m <sup>3</sup> ohne Berücksichtigung Rinde	28,92	m <sup>3</sup>
Zuladung in m <sup>3</sup> mit Berücksichtigung Rinde	26,0	m <sup>3</sup>
=> Anzahl LKW-Ladungen	171.391	Anzahl
Beschaffungsradius in Km (ein Weg)	60	Km
=> gefahrene Kilometer alle Straßen "leer"	4.113.388	Km
=> gefahrene Kilometer alle Straßen "beladen"	6.170.082	Km
gefahrene Kilometer gesamt	10.283.469	Km
LKW-Typ A) normal/flaches Gelände	75%	%
Kraftstoffverbrauch beladen	57,2	l/100km
Kraftstoffverbrauch beladen	2.646.965	l
Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km	31	l/100km
Kraftstoffverbrauch unbeladen	962.533	l
=> Kraftstoffverbrauch LKW-Typ A)	3.609.498	l
LKW-Typ B) "bergig"	25%	%
Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km	78	l/100km
Kraftstoffverbrauch beladen	1.203.165,93	l
Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km	36	l/100km
Kraftstoffverbrauch unbeladen	374.318	l
Kraftstoffverbrauch LKW-Typ B)	1.577.521	l
Kraftstoffverbrauch "Langholz-LKW" Nadel	5.187.018	l
Kurzholzanteil %	35	%
=> transportierte Kurzholzmenge in Mio m <sup>3</sup>	2,40	m <sup>3</sup>
Zuladung in m <sup>3</sup> (ohne Berücksichtigung Rinde)	28,9	m <sup>3</sup>
Zuladung in m <sup>3</sup> mit Berücksichtigung Rinde	26,0	m <sup>3</sup>
=> Anzahl LKW-Ladungen	92.288	m <sup>3</sup>
Beschaffungsradius in Km (ein Weg)	110	Anzahl
=> gefahrene Kilometer alle Straßen "leer"	4.060.652	Km
=> gefahrene Kilometer alle Straßen "beladen"	6.090.978	Km
gefahrene Kilometer gesamt	10.151.630	Km
davon % LKW-Typ "Standard-Kurz"		
Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km	57,2	l/100km
Kraftstoffverbrauch beladen	3.484.039	l
Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km	36	l/100km
Kraftstoffverbrauch unbeladen	1.478.077	l
Kraftstoffverbrauch "Kurzholz-LKW" Nadel	4.962.153	l

ab hier weiter Laubholz:		
Werte	Einheiten	Daten
69	%	Langholzanteil %
1,75	Mio m <sup>3</sup>	
20,7	m <sup>3</sup>	
18,6	m <sup>3</sup>	
94.047	Anzahl	
60	Km	
2.257.128	Km	
3.385.692	Km	
5.642.820	Km	
100%	%	LKW-Typ "Langholz-Zug"
55	l/100km	Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km
1.862.131	l	Kraftstoffverbrauch beladen
35	l/100km	Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km
789.995	l	Kraftstoffverbrauch unbeladen
2.652.125	l	=> Kraftstoffverbrauch LKW "Langholz-Zug"
31	%	Kurzholzanteil %
0,79	Mio m <sup>3</sup>	
20,7	m <sup>3</sup>	
18,6	m <sup>3</sup>	
42.253	Anzahl	
60	Km	
1.014.072	Km	
1.521.108	Km	
2.535.180	Km	
55	l/100km	davon 100% LKW-Typ "Kurzholz-Zug"
836.609	l	Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km
35	l/100km	Kraftstoffverbrauch unbeladen 100 / Km
354.925	l	Kraftstoffverbrauch unbeladen
1.191.535	l	Kraftstoffverbrauch Laub "Kurzholz-Zug"

Quelle: UNIQUE

HoLoBaWü: Szenarien-Definition Variante "46 to"			
Mengen, Massen, Strecken für Szenario "Standard"			
Holzschlag Baden-Württemberg	10,70	Mio. m <sup>3</sup>	Erntefestmeter ohne Rinde
abzgl. Scheitholz (Hausbrand)	1,30	Mio. m <sup>3</sup>	
Rinde (bei Holzvolumenberechnung Efm o.R.)			bei Lastberechnung Lkw berücksichtigt
	<b>9,40</b>	<b>Mio. m<sup>3</sup></b>	
Nadelholz %	73		Laubholz %
<b>Mio. m<sup>3</sup></b>	<b>6,86</b>		<b>Mio. m<sup>3</sup></b>

ab hier weiter Nadelholz:		
Daten	Werte	Einheiten
Langholzanteil %	65	%
=> transportierte Langholzmenge in Mio m <sup>3</sup>	4,46	Mio m <sup>3</sup>
Zuladung in m <sup>3</sup> ohne Berücksichtigung Rinde	31,3	m <sup>3</sup>
Zuladung in m <sup>3</sup> mit Berücksichtigung Rinde	28,2	m <sup>3</sup>
=> Anzahl LKW-Ladungen	158.207	Anzahl
Beschaffungsradius in Km (ein Weg)	60	Km
=> gefahrene Kilometer alle Straßen "leer"	3.796.973	Km
=> gefahrene Kilometer alle Straßen "beladen"	5.695.460	Km
gefahrene Kilometer gesamt	9.492.433	Km
LKW-Typ A) normal/flaches Gelände	75%	%
Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km	59,95	/100km
Kraftstoffverbrauch beladen	2.560.821	l
Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km	33	/100km
Kraftstoffverbrauch unbeladen	931.208	l
=> Kraftstoffverbrauch LKW-Typ A)	3.492.029	l
LKW-Typ B) "bergig"	25%	%
Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km	81,75	/100km
Kraftstoffverbrauch beladen	1.164.010	l
Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km	38	/100km
Kraftstoffverbrauch unbeladen	362.136	l
Kraftstoffverbrauch LKW-Typ B)	1.526.184	l
Kraftstoffverbrauch "Langholz-LKW" Nadel	5.018.213	l
Kurzholzanteil %	35	%
=> transportierte Kurzholzmenge in Mio m <sup>3</sup>	2,40	Mio m <sup>3</sup>
Zuladung in m <sup>3</sup> (ohne Berücksichtigung Rinde)	31,3	m <sup>3</sup>
Zuladung in m <sup>3</sup> mit Berücksichtigung Rinde	28,2	m <sup>3</sup>
=> Anzahl LKW-Ladungen	85.189	Anzahl
Beschaffungsradius in Km (ein Weg)	110	Km
=> gefahrene Kilometer alle Straßen "leer"	3.748.294	Km
=> gefahrene Kilometer alle Straßen "beladen"	5.622.441	Km
gefahrene Kilometer gesamt	9.370.735	Km
davon % LKW-Typ "Standard-Kurz"		
Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km	59,95	/100km
Kraftstoffverbrauch beladen	3.370.654	l
Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km	38	/100km
Kraftstoffverbrauch unbeladen	1.429.974	l
Kraftstoffverbrauch "Kurzholz-LKW" Nadel	4.800.666	l

ab hier weiter Laubholz:		
Werte	Einheiten	Daten
69	%	Langholzanteil %
1,75	Mio m <sup>3</sup>	
22,4	m <sup>3</sup>	
20,2	m <sup>3</sup>	
86.813	Anzahl	
60	Km	
2.083.503	Km	
3.125.254	Km	
5.208.757	Km	
100%	%	LKW-Typ "Langholz-Zug"
59,95	/100km	Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km
1.873.590	l	Kraftstoffverbrauch beladen
38	/100km	Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km
794.856	l	Kraftstoffverbrauch unbeladen
2.668.446	l	=> Kraftstoffverbrauch LKW "Langholz-Zug"
31	%	Kurzholzanteil in %
0,79	Mio m <sup>3</sup>	
22,4	m <sup>3</sup>	
20,2	m <sup>3</sup>	
39.003	Anzahl	
60	Km	
936.066	Km	
1.404.100	Km	
2.340.166	Km	
		davon 100% LKW-Typ "Kurzholz-Zug"
59,95	/100km	Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km
841.758	l	Kraftstoffverbrauch beladen
38	/100km	Kraftstoffverbrauch unbeladen 100 / Km
357.109	l	Kraftstoffverbrauch unbeladen
1.198.867	l	Kraftstoffverbrauch Laub "Kurzholz-Zug"

HoLoBaWü: Szenarien-Definition Variante "53 to"			
Mengen, Massen, Strecken für Szenario "Standard"			
Holzschlag Baden-Württemberg	10,70	Mio. m <sup>3</sup>	Erntefestmeter ohne Rinde
abzgl. Scheitholz (Hausbrand)	1,30	Mio. m <sup>3</sup>	
Rinde (bei Holzvolumenberechnung Efm o.R.)			bei Lastberechnung Lkw berücksichtigt
	<b>9,40</b>	<b>Mio. m<sup>3</sup></b>	
Nadelholz %	73		Laubholz %
<b>Mio. m<sup>3</sup></b>	<b>6,86</b>		<b>Mio. m<sup>3</sup></b>

ab hier weiter Nadelholz:		
Daten	Werte	Einheiten
Langholzanteil %	65	%
=> transportierte Langholzmenge in Mio m <sup>3</sup>	4,46	Mio m <sup>3</sup>
Zuladung in m <sup>3</sup> ohne Berücksichtigung Rinde	39,8	m <sup>3</sup>
Zuladung in m <sup>3</sup> mit Berücksichtigung Rinde	35,8	m <sup>3</sup>
=> Anzahl LKW-Ladungen	124.648	Anzahl
Beschaffungsradius in Km	60	Km
=> gefahrene Kilometer alle Straßen "leer"	2.991.555	Km
=> gefahrene Kilometer alle Straßen "beladen"	4.487.332	Km
gefahrene Kilometer gesamt	7.478.887	Km
LKW-Typ A) normal/flaches Gelände	90%	%
Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km	65,45	/100km
Kraftstoffverbrauch beladen	2.643.263	l
Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km	36	/100km
Kraftstoffverbrauch unbeladen	961.187	l
=> Kraftstoffverbrauch LKW-Typ A)	3.604.450	l
LKW-Typ B) "bergig"	10%	%
Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km	89,25	/100km
Kraftstoffverbrauch beladen	400.494	l
Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km	42	/100km
Kraftstoffverbrauch unbeladen	124.598	l
Kraftstoffverbrauch LKW-Typ B)	525.134	l
Kraftstoffverbrauch "Langholz-LKW" Nadel	4.129.584	l
Kurzholzanteil %	35	%
=> transportierte Kurzholzmenge in Mio m <sup>3</sup>	2,40	Mio m <sup>3</sup>
Zuladung in m <sup>3</sup> (ohne Berücksichtigung Rinde)	39,8	m <sup>3</sup>
Zuladung in m <sup>3</sup> mit Berücksichtigung Rinde	35,8	m <sup>3</sup>
=> Anzahl LKW-Ladungen	67.118	Anzahl
Beschaffungsradius in Km (ein Weg)	110	Km
=> gefahrene Kilometer alle Straßen "leer"	2.953.201	Km
=> gefahrene Kilometer alle Straßen "beladen"	4.429.802	Km
gefahrene Kilometer gesamt	7.383.004	Km
davon % LKW-Typ "Standard-Kurz"		
Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km	65,45	/100km
Kraftstoffverbrauch beladen	2.899.306	l
Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km	42	/100km
Kraftstoffverbrauch unbeladen	1.230.008	l
Kraftstoffverbrauch "Kurzholz-LKW" Nadel	4.129.356	l

ab hier weiter Laubholz:		
Werte	Einheiten	Daten
69	%	Langholzanteil %
1,75	Mio m <sup>3</sup>	
28,4	m <sup>3</sup>	
25,6	m <sup>3</sup>	
68.398	Anzahl	
60	km	
1.641.548	Km	
2.462.321	Km	
4.103.869	Km	
100%	%	LKW-Typ "Langholz-Zug"
65,45	/100km	Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km
1.611.589	l	Kraftstoffverbrauch beladen
42	/100km	Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km
683.705	l	Kraftstoffverbrauch unbeladen
2.295.294	l	=> Kraftstoffverbrauch LKW "Langholz-Zug"
31	%	Kurzholzanteil in %
0,79	Mio m <sup>3</sup>	
28,4	m <sup>3</sup>	
25,6	m <sup>3</sup>	
30.729	Anzahl	
60	Km	
737.507	Km	
1.106.260	Km	
1.843.767	Km	
		davon 100% LKW-Typ "Kurzholz-Zug"
65,45	/100km	Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km
724.047	l	Kraftstoffverbrauch beladen
42	/100km	Kraftstoffverbrauch unbeladen 100 / Km
307.172	l	Kraftstoffverbrauch unbeladen
1.031.219	l	Kraftstoffverbrauch Laub "Kurzholz-Zug"

Quelle: UNIQUE

#### Anlage 4: Übersicht der Verkehrsszenarien

<b>Autobahnen</b>			
<b>DTV<sub>SV</sub> in [Fz/24h]</b>			
<b>Holztransportanteilszenario</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>Median</b>	<b>98-%-Quantil</b>
<b>Szenario 40 t</b>			
Hintergrund	5.692	5.698	5.632
Kurzholz 40 t	2,72	0,68	23,12
Langholz 40 t	5,28	1,32	44,88
DTV <sub>SV</sub> gesamt	5.700	5.700	5.700
<b>Szenario 44 t</b>			
Hintergrund	5.692	5.698	5.632
Kurzholz 44 t	2,26	0,56	19,19
Langholz 44 t	4,38	1,10	37,25
DTV <sub>SV</sub> gesamt	5.698,64	5.699,66	5.688,44
<b>Szenario 46 t</b>			
Hintergrund	5.692	5.698	5.632
Kurzholz 46 t	2,09	0,52	17,80
Langholz 46 t	4,07	1,02	34,56
DTV <sub>SV</sub> gesamt	5.698,16	5.699,54	5.684,36
<b>Szenario 53 t</b>			
Hintergrund	5.692	5.698	5.632
Kurzholz 53 t	1,66	0,41	14,10
Langholz 53 t	3,22	0,81	27,38
DTV <sub>SV</sub> gesamt	5.696,88	5.699,22	5.673,48

<b>Landstraßen</b>				
<b>DTV<sub>SV</sub> in [Fz/24h]</b>				
<b>Holztransportanteilszenario</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>Median</b>	<b>98-%-Quantil</b>	<b>ST2xxx</b>
<b>Szenario 40 t</b>				
Hintergrund	173	176	146	24
Kurzholz 40 t	1,36	0,34	10,54	14,96
Langholz 40 t	2,64	0,66	20,46	29,04
DTV <sub>SV</sub> gesamt	177	177	177	68
<b>Szenario 44 t</b>				
Hintergrund	173	176	146	24
Kurzholz 44 t	1,1288	0,2822	8,7482	12,4168
Langholz 44 t	2,1912	0,5478	16,9818	24,1032
DTV <sub>SV</sub> gesamt	176,32	176,83	171,73	60,52
<b>Szenario 46 t</b>				
Hintergrund	173	176	146	24
Kurzholz 46t	1,0472	0,2618	8,1158	11,5192
Langholz 46 t	2,0328	0,5082	15,7542	22,3608
DTV <sub>SV</sub> gesamt	176,08	176,77	169,87	57,88
<b>Szenario 53 t</b>				
Hintergrund	173	176	146	24
Kurzholz 53 t	0,8296	0,2074	6,4294	9,1256
Langholz 53 t	1,6104	0,4026	12,4806	17,7144
DTV <sub>SV</sub> gesamt	175,44	176,61	164,91	50,84

## 7 Simulationsrechnung Brücken

### Bearbeitung:

Technische Universität Berlin

Institut für Bauingenieurwesen

Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Stahlbau

Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler, M.Sc. Josef Karl Kraus

### 7.1 Einleitung

Der Transport von Holz aus dem Wald in die verarbeitenden Werke ist ein wichtiger Prozess in der Logistikkette und ein Wettbewerbsfaktor für die Holzindustrie. Eine Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichtes der Holztransporter, verbesserte Logistiksysteme oder Fahrzeugtechniken können sowohl die Holzindustrie in Baden-Württemberg international wettbewerbsfähiger machen als auch gleichzeitig einen Beitrag zur Einsparung verkehrsbedingter Treibhausgas-Emissionen leisten.

Um die Auswirkung der Holztransporte auf die vorhandene bauliche Substanz der Brücken in Baden-Württemberg zu erfassen, werden Verkehrslastsimulationen insbesondere im regionalen Bereich durchgeführt. Als Eingangsdaten zur Simulation dienen statistische Daten des Straßenverkehrs und des Brückenbestands, mit deren Hilfe eine stochastische Behandlung der Verkehrslasten ermöglicht wird. Die Ergebnisse werden eine Aussage darüber liefern, welche Auswirkung ein höheres Gesamtgewicht der Holz-LKW auf die Beanspruchungen der Brücken im Grenzzustand der Tragfähigkeit hat.

Für die Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichtes der Holztransporter werden unterschiedliche Szenarien betrachtet, darunter 40 t, 44 t, 46 t und 53 t. Voraussetzung für die Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichtes ist der Einbau von Achslastmesssystemen. Derartige Systeme sollen als Kompensationsmaßnahme garantieren, dass Überladungen ausgeschlossen werden und ansonsten eine Weiterfahrt verhindert wird. Da bisherige Untersuchungen von einer nach oben offenen Streuung der Gesamtgewichte ausgehen, könnten durch Achslastmesssysteme höhere Gesamtgewichte ermöglicht werden, da sich oben abgeschnittene Verteilungen der Gesamtgewichte deutlich günstiger in der Bestimmung der Beanspruchungen auswirken.

In einem ersten Schritt werden vier Beispielregionen definiert. Innerhalb dieser Beispielregionen werden Dauerzählstellen an Autobahnen, Bundes-, Landes- und Kreisstraßen ausgewertet und für die Simulation aufbereitet. Es werden Verkehrskategorien aus einem durchschnittlichen täglichen Schwerverkehrsaufkommen (DTSV) und einer zugehörigen Verkehrsart ("Lang-", "Mittel-" oder "Kurzstreckenverkehr") gebildet. Anschließend wird der Anteil an Holz-LKW in den einzelnen Verkehrskategorien bestimmt und die zu untersuchenden Fahrzeugkonfigurationen in die bestehenden Fahrzeugkollektive der Verkehrskategorien integriert.

Die untersuchten Brückenkonstruktionen entstammen einer Datensammlung, die vom Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg zur Verfügung gestellt wurde. Zur Auswahl der maßgebenden Brücken wird die Datensammlung nach statistischen und statischen Gesichtspunkten ausgewertet und anschließend ein Brückenkatalog definiert.

Mit den genannten Eingangsparametern werden Verkehrslastsimulationen durchgeführt. Die daraus resultierenden charakteristischen Werte sind Ausgangspunkt zur Bewertung eines hö-

heren Gesamtgewichtes der Holz-LKW. Zum Vergleich der Ergebnisse dienen die normativen Lastmodelle LM1 nach DIN EN 1991-2/NA (Ausgabe 2012), BK 60/30 und BK 30/30 nach DIN 1072 (Ausgabe 1985) sowie BK 60 und BK 30 nach DIN 1072 (Ausgabe 1967).

## 7.2 Grundlagen

Das Simulationsprogramm PATLoB (Probabilistic Analysis of Traffic Loads on Bridges) ermöglicht Verkehrslastsimulationen für Brücken durch Auswertung quasi unendlich langer stochastisch erzeugter Verkehrsströme. Die Überfahrt der Verkehrsströme wird als schrittweise Verschiebung entlang der Einflusslinien betrachtet. Aus jedem Schritt ergibt sich eine Beanspruchung infolge der aktuell vorhandenen Achslasten auf der Einflusslinie. Aus der Gesamtheit der einzeln ermittelten Beanspruchungen ergeben sich Extremwertverteilungen und aus Quantilwerten dieser Extremwertverteilungen schließlich charakteristische Werte.

Die Eingangsgrößen einer Verkehrslastsimulation werden in der unten dargestellten Abbildung zusammengefasst. Ein Großteil der Eingangsgrößen ist stochastischer Art, wodurch auch eine stochastische Berechnung unumgänglich ist. In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Eingangsgrößen genauer betrachtet.



Quelle: Eigene Abbildung

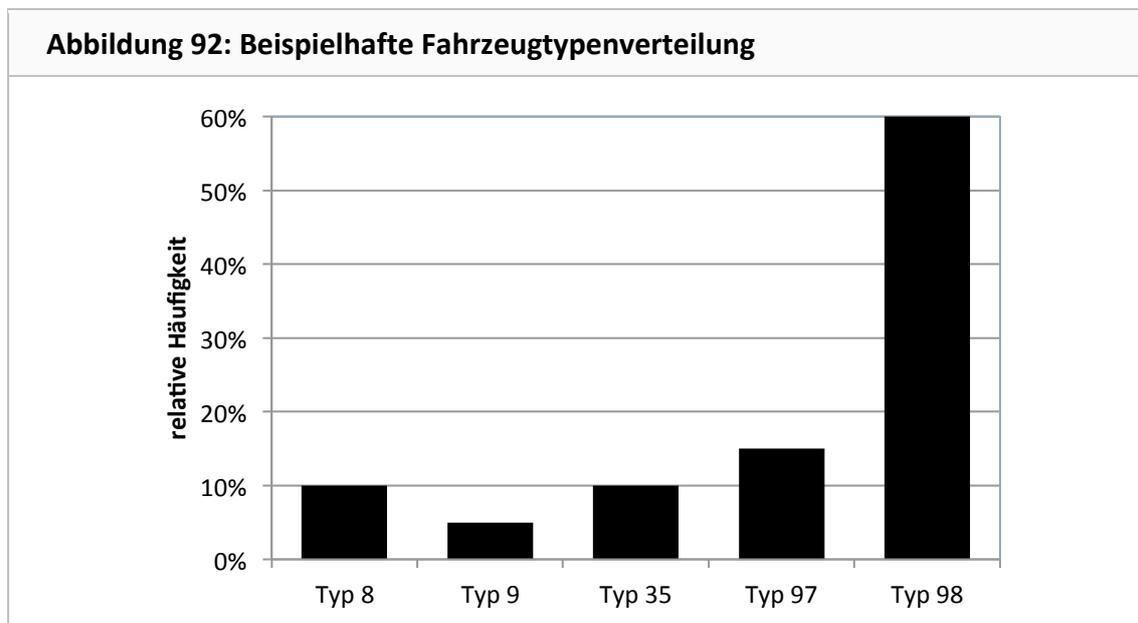
Im Allgemeinen werden stochastische Größen über Verteilungsfunktionen beschrieben. Die programmtechnische Umsetzung dieser Verteilungsfunktionen erfolgt über Zufallszahlengeneratoren. Diese Generatoren erzeugen Zufallszahlen, die in ihrer Gesamtheit der jeweiligen Verteilungsfunktion folgen. Bei der Erzeugung von Zufallszahlen entsprechend einer Verteilungsfunktion gibt es nahezu unendlich viele mögliche Zustände (begrenzt durch den Datentyp Double), die jeweils mit einer unterschiedlichen Wahrscheinlichkeit auftreten. Da ein Großteil der Eingangsgrößen stochastischer Art ist und die einzelnen Eingangsgrößen bei der Erzeugung von Verkehrsströmen miteinander kombiniert werden, wird die Anzahl der möglichen Zustände noch vervielfacht. Aus diesem Umstand wird ersichtlich, dass quasi unendlich lange Verkehrsströme aus Zufallszahlen generiert und ausgewertet werden müssen, bis eine ausreichende Sicherheit in der Ergebnissen vorhanden ist. In weiteren Arbeiten wird diese Strategie zur Problemlösung auch als Monte-Carlo-Algorithmus bezeichnet.

### 7.3 Fahrzeugkollektiv

Das Verkehrsaufkommen setzt sich aus einer Vielzahl verschiedener Fahrzeugtypen zusammen, darunter beispielsweise Motorräder, PKW, Lieferwägen, LKW mit Anhänger, Sattelzüge, usw. Jeder Fahrzeugtyp wird durch eine Häufigkeit, Achsabständen, Achslastverteilung und Gesamtgewicht charakterisiert. Eine Sammlung dieser Informationen für alle Fahrzeugtypen im betrachteten Straßennetz wird hier als Fahrzeugkollektiv bezeichnet. Für jeden Fahrzeugtyp werden in TLS<sup>249</sup> Kennziffern vergeben, die auch in dieser Arbeit Verwendung finden. Ein überaus häufig vorkommendes Fahrzeug stellt beispielsweise der Typ 98 dar, ein Sattelzug mit zweiachsiger Zugmaschine und dreiachsigem Sattelaufleger.

#### 7.3.1 Fahrzeugtypenverteilung

Für die Simulation ist es zielführend, die Gesamtheit aller Fahrzeugtypen auf die häufigsten und maßgebendsten Typen zu reduzieren. Abbildung 92 zeigt dazu eine beispielhafte Fahrzeugtypenverteilung.



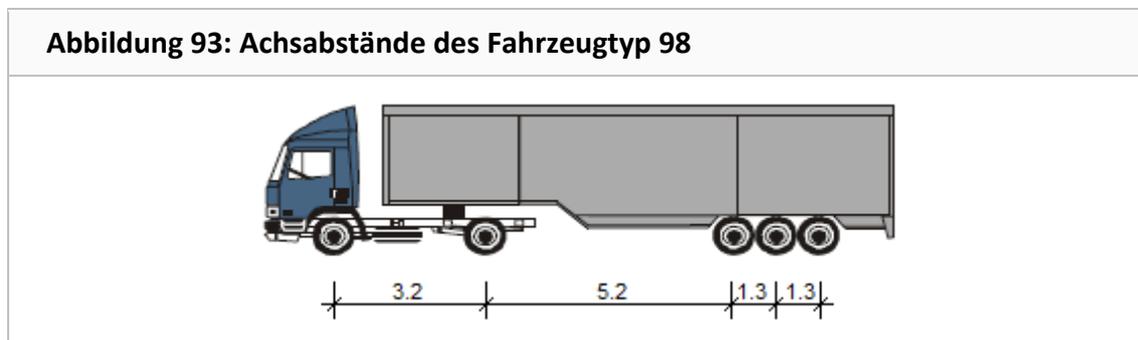
Quelle: Eigene Abbildung

Die Fahrzeugtypenverteilung in der obigen Abbildung wurde bereits auf die häufigsten Typen reduziert. Außerdem beschränkt sich diese Auswahl auf Fahrzeuge des Schwerverkehrs, da diese zu den maßgebendsten Typen zählen. Eine grundlegende Annahme ist hier, dass leichte Fahrzeuge, wie etwa Motorräder und PKW, aufgrund ihrer verhältnismäßig geringen Gesamtmasse vernachlässigt werden können, ohne dass dadurch eine signifikante Änderung an den Ergebnissen entstehen würde. Diese Annahme wird dadurch gestützt, dass sich die extremsten Zustände der Verkehrslast aus LKW im Stau ergeben und sämtliche PKW in diesem Zustand nur zu einer geringeren Belastung führen.

<sup>249</sup> BASt (2012): Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen. Berlin.

### 7.3.2 Achsabstände

Die Achsabstände eines Fahrzeugtyps werden üblicherweise über deren Mittelwerte deterministisch angegeben. Da die Achsabstände ebenfalls einer gewissen Streuung unterliegen, wäre es prinzipiell auch möglich, Verteilungsfunktionen der Achsabstände anzugeben. Da die Streuung der Achsabstände jedoch sehr moderat ausfällt, kann vereinfachend mit den Mittelwerten gerechnet werden. In Abbildung 93 werden die Achsabstände beispielhaft für den Fahrzeugtyp 98 gezeigt.



Quelle: Pohl, S. (1993)

### 7.3.3 Achslasten

Die Achslasten eines Fahrzeugtyps resultieren aus dem Gesamtgewicht und der Achslastverteilung. Gesamtgewicht und Achslastverteilung eines Fahrzeugtyps lassen sich über verschiedene Herangehensweisen beschreiben. Zu den unterschiedlichen Modellen zählen:

1. Jede Achslast folgt einer eigenen Verteilungsfunktion.
2. Gesamtgewicht folgt einer Verteilungsfunktion. Jede Achslast wird über einen prozentualen Anteil am Gesamtgewicht bestimmt. Leere und beladene Fahrzeuge desselben Typs werden gemeinsam behandelt.
3. Gesamtgewicht folgt einer Verteilungsfunktion. Jede Achslast wird über einen prozentualen Anteil am Gesamtgewicht bestimmt. Leere und beladene Fahrzeuge desselben Typs werden getrennt behandelt.
4. Eigengewicht und Ladungsgewicht des Fahrzeugs folgen jeweils einer Verteilungsfunktion. Jede Achslast setzt sich aus einem prozentualen Anteil am Eigengewicht und am Ladungsgewicht zusammen.

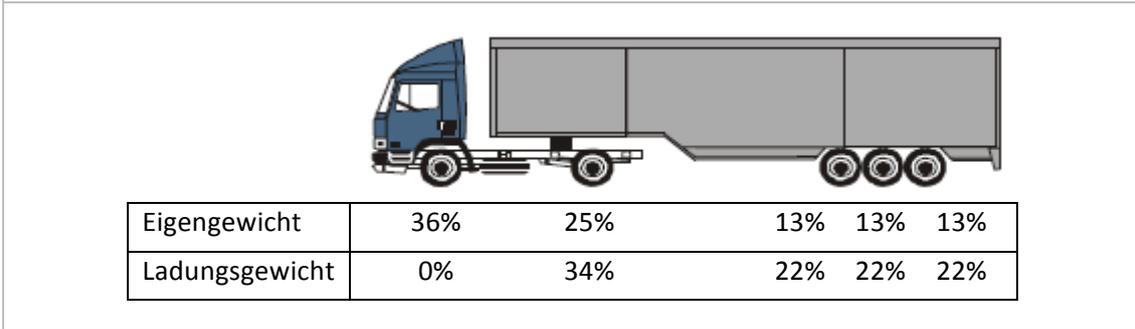
Aus den Modellen 2 bis 4 lassen sich noch weitere theoretische Modelle ableiten, indem der prozentuale Anteil der Achslast als zusätzliche streuende Größe betrachtet wird. Die Vor- und Nachteile der einzelnen Modelle werden in den Arbeiten von Merzenich<sup>250</sup>, Geißler<sup>251</sup> und Günther<sup>252</sup> diskutiert. Zusammenfassend lässt sich folgern, dass die Modelle 3 und 4 alle wesentlichen Aspekte zuverlässig beschreiben. Abbildung 94 und Abbildung 95 zeigen die Achslastverteilungen und Gewichtsverteilungen beispielhaft für den Fahrzeugtyp 98.

<sup>250</sup> Merzenich, G. (1994)

<sup>251</sup> Geißler, K. (1995)

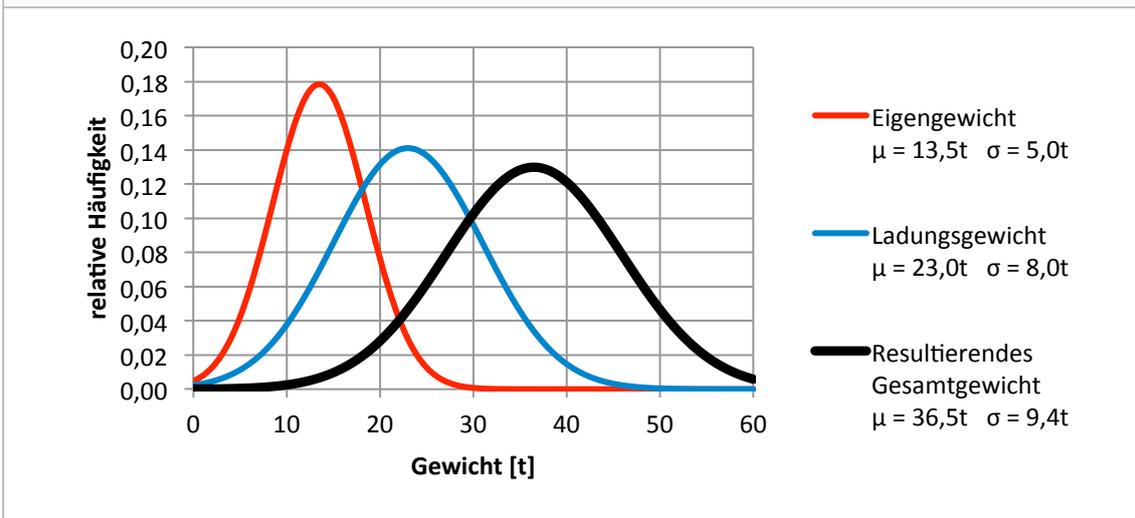
<sup>252</sup> Günther, H.-P. (2002)

**Abbildung 94: Achslastverteilungen des Fahrzeugtyps 98**



Quelle: Pohl, S. (1993)

**Abbildung 95: Gewichtsverteilungen des Fahrzeugtyps 98**



Quelle: Pohl, S. (1993)

**7.3.4 Technische Umsetzung**

Zur Generierung der Verkehrsströme werden verschiedene Fahrzeuge zufällig erzeugt. In ihrer Gesamtheit spiegeln alle Fahrzeuge dieser Verkehrsströme ein ausgewähltes Fahrzeugkollektiv wider.

Der Algorithmus zur Generierung der Fahrzeuge folgt stets dem gleichen Schema. Zunächst wird eine Zufallszahl zwischen 0 und 1 erzeugt. Über die relativen Häufigkeiten der Fahrzeugtypenverteilung kann damit ein bestimmter Fahrzeugtyp ausgewählt werden. Anschließend werden die zugehörigen Achsabstände und Achslastverteilungen dieses Fahrzeugtyps geladen. Im nächsten Schritt wird eine weitere Zufallszahl zwischen 0 und 1 generiert und entsprechend der Gewichtsverteilungsfunktion umgerechnet. Zur Umrechnung wird dabei die inverse Verteilungsfunktion  $F(q)^{-1}$  genutzt. Über die Gewichtsverteilungen des Fahrzeugtyps wird ein also zufälliges Fahrzeuggewicht bestimmt. Die Achslasten ergeben sich aus dem Fahrzeuggewicht (alternativ aus Eigengewicht und Ladung) und der Achslastverteilung.

Das so erzeugte Fahrzeug wird letztendlich an eine Liste von Fahrzeugen angehängt, die insgesamt den Verkehrsstrom einer Spur darstellt. Werden die Fahrzeuge des Verkehrsstroms auf ihre Achslasten und Achsabstände reduziert, kann die Liste auch als Aneinanderreihung von Achslasten aufgefasst werden. Diese Liste wird im Rechenmodul schrittweise über die Einflusslinie einer Spur geschoben.

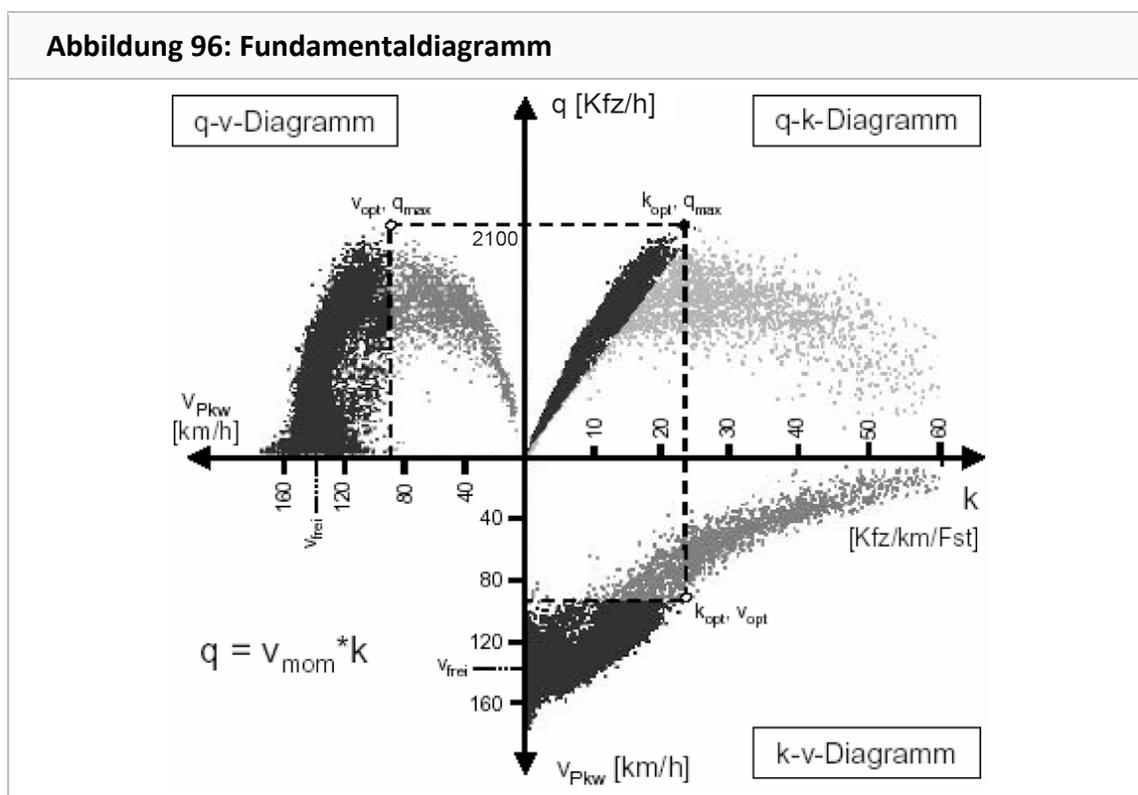
## 7.4 Verkehrszustand

Zur Simulation der Verkehrszustände wurden in der Vergangenheit je nach Anwendungsgebiet unterschiedliche Methoden entwickelt. Die verschiedenen Ansätze lassen sich einteilen in:

- Mikroskopische Simulation
- Makroskopische Simulation

In einer mikroskopischen Simulation werden die einzelnen Verkehrsteilnehmer als Individuen betrachtet, die ihrerseits selbstständige Entscheidungen treffen und auf die Entscheidungen anderer Verkehrsteilnehmer reagieren. Zu den wesentlichen Aspekten dieser Methode zählt die Motorisierung der Fahrzeuge sowie Reaktionszeit, Beschleunigungs-, Brems- und Spurwechselverhalten der Fahrer.

Eine makroskopische Simulation fasst die oben genannten Daten der Einzelfahrzeuge zu Zustandsgrößen zusammen. Die wesentlichen Größen sind danach Verkehrsstrom  $q$  [Kfz/h], Verkehrsdichte  $k$  [Kfz/km] und die mittlere Geschwindigkeit  $v$  [km/h]. Die Abhängigkeiten zwischen diesen Zustandsgrößen können einem Fundamentaldiagramm wie in Abbildung 96 entnommen werden. Eine gewisse Analogie zu thermodynamischen Prozessen ist unverkennbar.



Quelle: Kühne, R. (2004): FGSV Merkblatt (Entwurf)

Das Fundamentaldiagramm zeigt bereits, dass viele Vorgänge des Verkehrs einen stochastischen Charakter haben. Der Verkehrsstrom  $q$  ist dabei einer kontinuierlichen Änderung unterworfen. Je mehr Fahrzeuge auf einem Streckenabschnitt fahren, desto geringer werden die mittlere Geschwindigkeit und die Fahrzeugabstände. Der daraus resultierenden Verkehrszustände lassen sich in fließenden Verkehr, stockenden Verkehr und Stau untergliedern.

Das Simulationsprogramm PATLoB verwendet einen Ansatz, der tendenziell eher einer mikroskopischen Simulation zuzuordnen ist, wobei unwesentliche Prozesse stark vereinfacht abgebildet werden.

Im Gegensatz zu üblichen Verkehrssimulationen ist hier nur eine Teilstrecke (entsprechend der Brückenlänge) relevant. Da die Dauer einer Überfahrt relativ kurz ist, können sämtliche Vorgänge vernachlässigt werden, die zur Entstehung der unterschiedlichen Verkehrszustände führen. Wesentlich ist nur, welcher Verkehrszustand zum Zeitpunkt der Überfahrt tatsächlich vorhanden ist.

Dazu wird für jede Fahrspur ein Fahrzeugband generiert. Die einzelnen Fahrzeuge werden entsprechend dem Fahrzeugkollektiv (Abschnitt 7.3) zufällig erzeugt. Die Fahrzeugabstände werden nach den Gesetzmäßigkeiten der folgenden Abschnitte ebenfalls zufällig erzeugt. Vereinfachend werden die folgenden grundsätzlichen Annahmen getroffen:

- PKW werden in den Fahrzeugbändern nicht modelliert.

Im Vergleich zu üblichen LKW haben PKW ein sehr geringes Gesamtgewicht. Da der Fokus auf den extremsten Beanspruchungen einer Brücke und der zugehörigen Wahrscheinlichkeit liegt, spielt das relativ geringe Gesamtgewicht der PKW eine untergeordnete Rolle. PKW werden daher als Abstandshalter zwischen den LKW betrachtet.

- Die Geschwindigkeit der LKW wird auf allen Fahrspuren einer Richtungsfahrbahn als annähernd gleich angenommen.

Im Gegensatz zu PKW fahren LKW im Allgemeinen mit einer annähernd gleichen Geschwindigkeit. LKW auf der Nebenspur fahren dabei mit einer geringfügig höheren Geschwindigkeit als auf der Hauptspur. In den Verkehrslastsimulationen ist allerdings nur eine kurze Teilstrecke des Verkehrs (Brückenlänge) relevant. Es kann also davon ausgegangen werden, dass bei einer vereinfachten Betrachtungsweise mit identischen Geschwindigkeiten der LKW keine relevanten Änderungen der Ergebnisse eintreten.

- Fahrzeugabstände ändern sich während der Überfahrt nicht.

Wie bereits erwähnt, werden gleiche Geschwindigkeiten der LKW angenommen. Zusätzlich werden Beschleunigungs- und Bremsvorgänge ausgeschlossen. Die Fahrzeugabstände ändern sich also während einer Überfahrt nicht. Da eine Überfahrt relativ kurz ist, kann auch hier eine Beeinträchtigung der Ergebnisse ausgeschlossen werden.

- Spurwechselforgänge werden nicht abgebildet.

LKW werden entweder der Hauptspur oder einer Nebenspur zugeordnet. Zwischenzustände werden nicht modelliert. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Zustände nicht maßgebend werden, da LKW während eines Spurwechsels nicht nebeneinander fahren können.

- LKW sind nur dann auf der Nebenspur, wenn ein LKW auf der Hauptspur überholt wird.

Diese Annahme stellt den Regelfall des Verkehrsgeschehens dar. In Ausnahmefällen mag es auch Abweichungen von diesem Regelfall geben. Da nebeneinander fahrende LKW allerdings einen ungünstigeren Lastfall darstellen, werden die wenigen Ausnahmefälle nicht berücksichtigt.

### 7.4.1 DTV und DTSV

Der durchschnittliche tägliche Verkehr (DTV) und der durchschnittliche tägliche Schwerverkehr (DTSV) stellen ein Maß für die Priorität des Streckenabschnitts dar. Zudem lässt das tägliche Verkehrsaufkommen in Kombination mit der Linienführung, der Streckenart und der Anzahl an Fahrstreifen näherungsweise Rückschlüsse auf die Verkehrsqualität des Streckenabschnitts zu.

Der DTSV gilt als wesentliche Eingangsgröße der Verkehrslastsimulation. Die Anzahl der simulierten LKW steht dabei in direktem Zusammenhang mit der Wahrscheinlichkeit, dass extreme Situationen der Verkehrslast auftreten. Je mehr LKW an einem Tag oder in einem Jahr fahren, desto wahrscheinlicher wird auch eine ungünstige Stellung besonders schwerer LKW in diesem Zeitabschnitt.

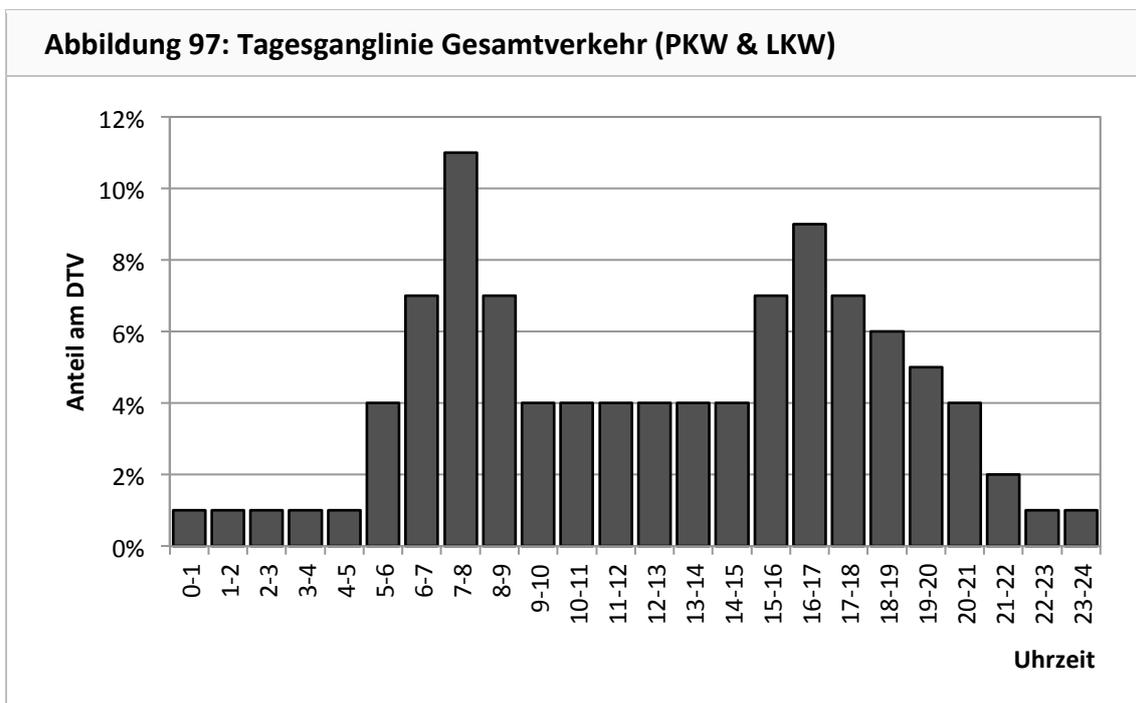
In den hier durchgeführten Simulationen wird das Verkehrsaufkommen eines jeden Tages dem DTSV entsprechend angenommen. Das heißt, die Anzahl der LKW in den Fahrzeugbändern eines Tages ist konstant.

### 7.4.2 Tagesganglinie

Jedes Fahrzeugband wird in Zeitabschnitte von jeweils einer Stunde unterteilt. Die Anzahl an Fahrzeugen, die in dieser Stunde das Brückenbauwerk passieren, wird entsprechend einer Tagesganglinie bestimmt. Der Verkehrsstrom  $q$  [Fzg/h] beziehungsweise [LKW/h] ist damit stets bekannt.

Tagesganglinien werden nach BAST<sup>253</sup> in die Typen A bis H unterteilt, wobei jeder Tagesganglinien-Typ eigene Besonderheiten aufweist.

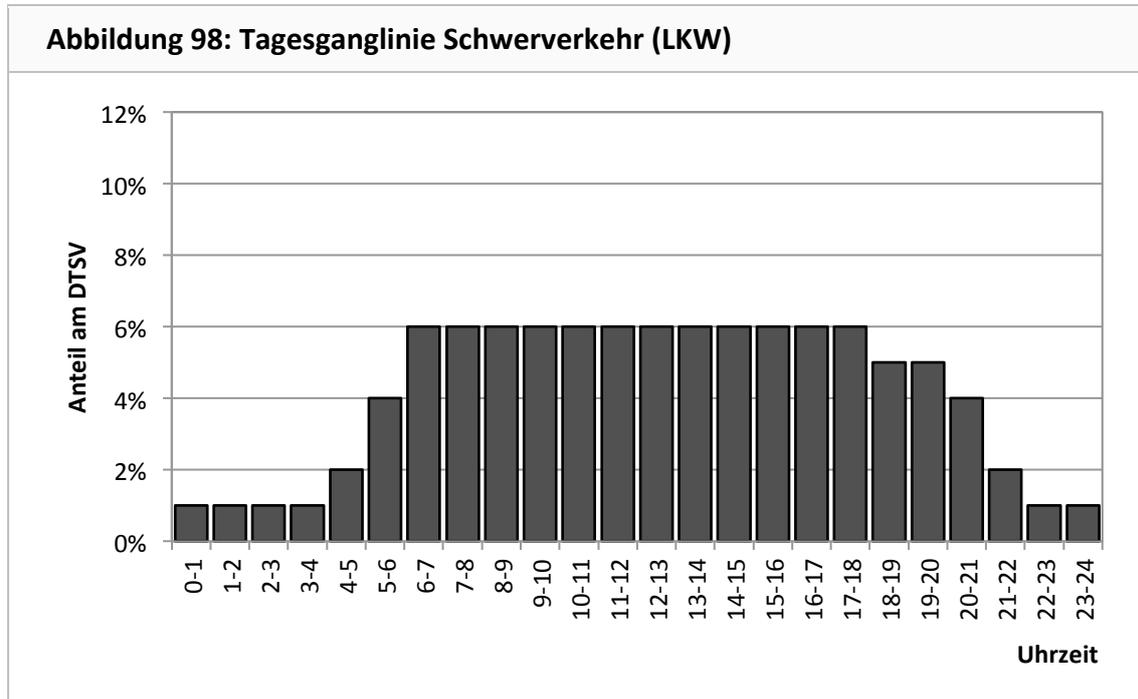
Für den Gesamtverkehr (PKW und LKW) wird von einer Ganglinie mit Doppelspitze ausgegangen. Die Verkehrsspitzen entsprechen dabei den Hauptverkehrszeiten von 6 bis 9 Uhr und von 15 bis 19 Uhr. Die entsprechende Ganglinie wird in Abbildung 97 dargestellt.



Quelle: Fitschen, A.; Nordmann, H. (2014)

<sup>253</sup> Fitschen, A.; Nordmann, H. (2014)

In der Tagesganglinie des Schwerververkehrs sind keine Verkehrsspitzen zu erwarten. Dementsprechend wird auch von einer relativ ausgeglichenen Verkehrsverteilung ausgegangen. Das Verkehrsgeschehen findet hier hauptsächlich tagsüber statt, wobei nachts mit einer reduzierten Verkehrsmenge zu rechnen ist.



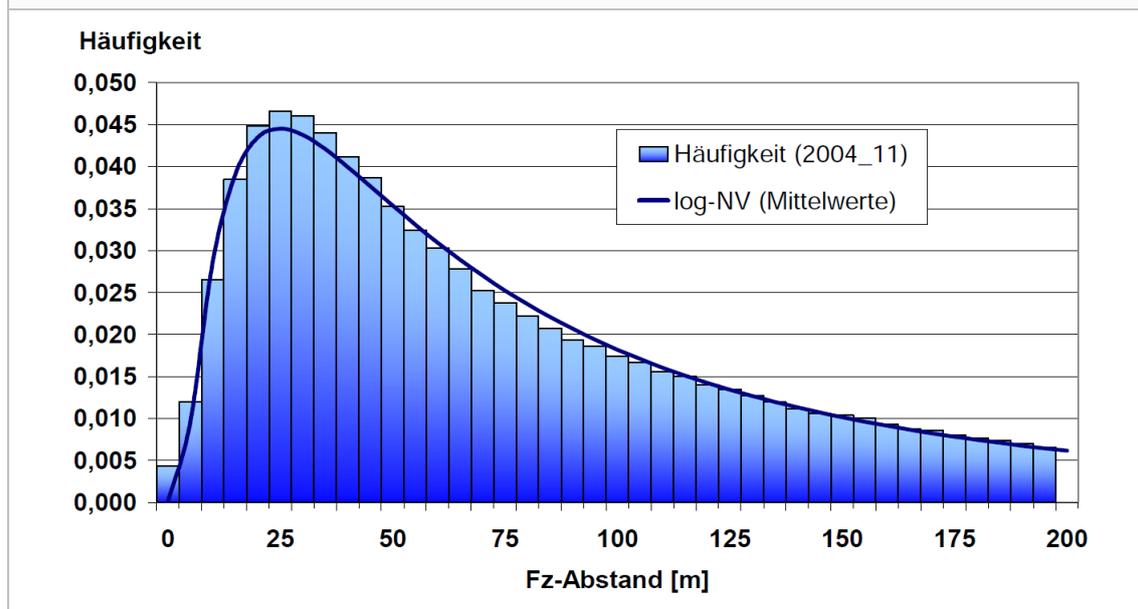
Quelle: Eigene Abbildung

### 7.4.3 Fahrzeugabstände

Die Fahrzeugabstände stehen in direktem Zusammenhang mit den Verkehrszuständen. Es ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen den Abständen im fließenden Verkehr und im Stau.

Verkehrsmessungen haben gezeigt, dass die Abstände im fließenden Verkehr einer logarithmischen Normalverteilung folgen. In den Verkehrslastsimulationen dieser Arbeit werden Messergebnisse der Bundesanstalt für Straßenwesen<sup>254</sup> verwendet (siehe Abbildung 99). Den Ergebnissen entsprechend, werden für die Fahrzeugabstände im fließenden Verkehr die Parameter  $x_0 = 1.44m$ , Erwartungswert  $E = 133m$  und Standardabweichung  $S = 193m$  einer Log-Normalverteilung verwendet.

<sup>254</sup> Kaschner, R. (2009)

**Abbildung 99: Fahrzeugabstände im fließenden Verkehr**

Quelle: Kaschner, R. (2009)

Die Fahrzeugabstände im Stau sind dadurch charakterisiert, dass viele kurze Abstände hintereinander folgen. In der oben gezeigten Log-Normalverteilung sind prinzipiell auch sehr geringe Abstände von wenigen Metern enthalten. Es ist allerdings unwahrscheinlich, dass mehrere kurze Abstände zufällig nacheinander erzeugt werden. Für die Fahrzeugabstände im Stau wird daher analog zu Frenzel<sup>255</sup>, Geißler<sup>256</sup> und Böning<sup>257</sup> ein konstanter Wert von 5 m angesetzt.

#### 7.4.4 Stauwahrscheinlichkeit

Zur Modellierung von Stauverkehr wurde in der Arbeit von Geißler<sup>258</sup> ein Verfahren vorgestellt, das zufällig entstehende Abschnitte mit dichtem Verkehr in die Fahrzeugbänder integriert. Dazu werden die beiden Parameter  $P_{Stau}$  und  $P_{Fließ}$  mit Werten zwischen 0 und 1 eingeführt.

$P_{Stau}$  entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass auf ein Fahrzeug im Stau ein weiteres Fahrzeug im Stau folgt. Analog dazu entspricht  $P_{Fließ}$  der Wahrscheinlichkeit, dass einem Fahrzeug im fließenden Verkehr auch ein Fahrzeug im fließenden Verkehr folgt. Bei der Generierung eines neuen Fahrzeugs wird zunächst der aktuelle Verkehrszustand überprüft (fließender Verkehr oder Stau) und anschließend eine Zufallszahl zwischen 0 und 1 erzeugt. Sobald eine Zufallszahl generiert wird, die höher liegt als der aktuelle Schwellenwert  $P_{Stau}$  oder  $P_{Fließ}$ , wird der Verkehrszustand gewechselt. Je höher diese Schwellenwerte gewählt werden, desto länger werden auch die zugehörigen Abschnitte des Staus oder des fließenden Verkehrs.

Für die Untersuchungen in dieser Arbeit werden die Parameter  $P_{Stau} = 0.99$  und  $P_{Fließ} = 0.9995$  verwendet. Vergleichsrechnungen haben ergeben, dass mit diesen Parametern und einem DTSV-Wert von 10.000 im Mittel zirka fünf Staus pro Tag erzeugt werden. Für niedrigere DTSV-Werte wird die mittlere Anzahl an Staus pro Tag entsprechend geringer.

<sup>255</sup> Frenzel, B.; et al. (1996)

<sup>256</sup> Geißler, K. (2009)

<sup>257</sup> Böning, S. (2013)

<sup>258</sup> Geißler, K. (1995)

### 7.4.5 Mehrspuriger Verkehr

Die bisher erläuterten Methoden zur Modellierung der verschiedenen Verkehrszustände, wie Stau und fließender Verkehr, die zugehörigen Fahrzeugabstände und Tagesganglinien beschränken sich auf einen einspurigen Verkehr. Zur Erweiterung auf mehrspurigen Verkehr werden in den folgenden Abschnitten die dazu notwendigen Schritte erläutert.

#### Richtungsfahrbahnen

Der Verkehrszustand einer Richtungsfahrbahn ist in der Realität unabhängig vom Verkehrsgeschehen der Gegenrichtung.

Bei der Generierung der Fahrzeugbänder wird jede Richtungsfahrbahn separat behandelt. Der durchschnittliche tägliche Schwerverkehr (DTSV) einer Richtung wird entsprechend der Tagesganglinie in Stunden unterteilt. Das Fahrzeugband einer Stunde ist also Teil einer Fahrspur, die wiederum einer Richtungsfahrbahn zugeordnet ist. Jede Fahrspur enthält eine eigene Zustandsvariable, die angibt, ob aktuell Stau oder fließender Verkehr vorherrscht. Damit wird sichergestellt, dass sich die Richtungsfahrbahnen nicht gegenseitig beeinflussen.

Zur Simulation der Überfahrten werden die Fahrzeugbänder der beiden Richtungsfahrbahnen gleichzeitig (in entgegengesetzter Richtung) entlang der Einflusslinien verschoben. Die Schwierigkeit besteht darin, die Fahrzeugbänder synchron zu verschieben. Da Fahrzeugabstände und Fahrzeuglängen zufällig erzeugte Größen sind, sind die Fahrzeugbänder im Regelfall auch unterschiedlich lang. Eine konstante Schrittweite  $\Delta x$  kann also nicht zu einer synchronen Verschiebung führen.

Alle Fahrzeugbänder haben allerdings die Gemeinsamkeit, dass sie jeweils eine Stunde des Verkehrsgeschehens darstellen. Eine Synchronisierung wird also erreicht, indem um einen konstanten Zeitschritt  $\Delta t$  verschoben wird. In Abhängigkeit von der Länge des Fahrzeugbandes wird dieser Zeitschritt (hier:  $\Delta t = 0.05s$ ) in eine Schrittweite  $\Delta x$  umgerechnet. Es gelten dabei die folgenden Beziehungen:

$$\Delta x = \frac{\text{Länge des Fahrzeugbandes}}{1h} \cdot \Delta t$$

$$\Delta x = v \cdot \Delta t \quad ; v \hat{=} \text{Stromgeschwindigkeit} \left[ \frac{km}{h} \right]$$

#### Spurbelegung

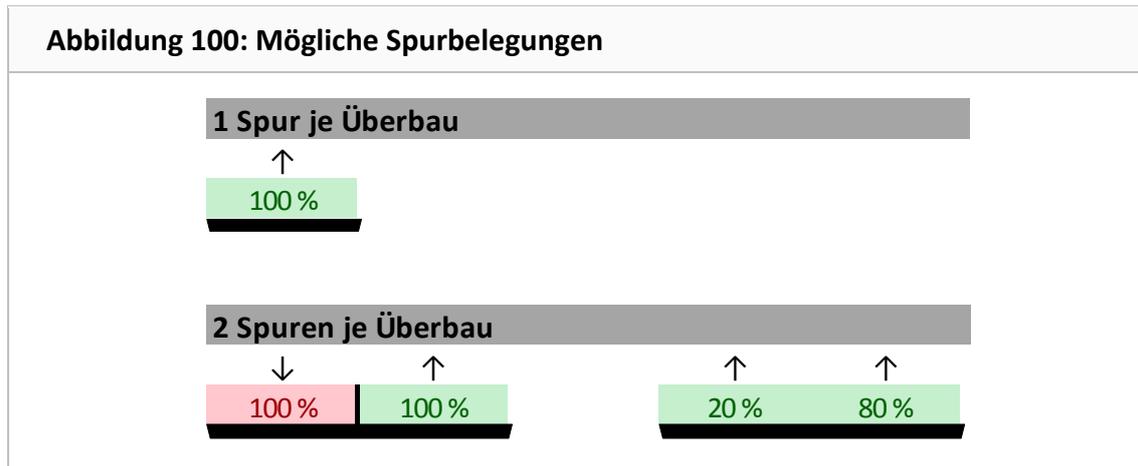
Jede Richtungsfahrbahn kann in eine Hauptspur und mehrere Nebenspuren aufgeteilt werden. Die Hauptspur bedient im Regelfall den größten Anteil des Schwerverkehrs. LKW in einer Nebenspur sind allerdings besonders dann nicht zu vernachlässigen, wenn mehrere LKW nebeneinander fahren.

Im Simulationsprogramm PATLoB wird von einem ungünstigen Grenzwert der Spurbelegung ausgegangen. Das gewählte Vorgehen entspricht damit der Herangehensweise von Freundt und Böning<sup>259</sup>. Der Anteil der einzelnen Fahrspuren am gesamten Schwerverkehr kann der

---

<sup>259</sup> Freundt, U.; Böning, S. (2011)

folgenden Abbildung entnommen werden. Der durchschnittliche tägliche Schwerververkehr einer Richtung wird also entsprechend der Spurbelegung auf die einzelnen Fahrspuren aufgeteilt.

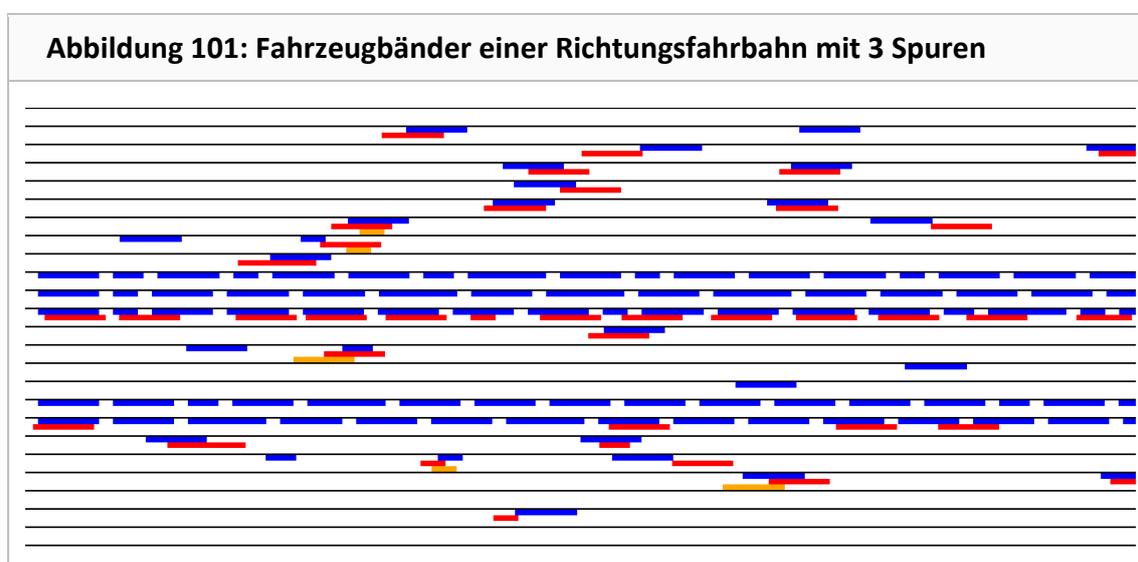


Quelle: Freundt, U.; Böning, S. (2011)

### LKW auf der Nebenspur

Es wird die Annahme getroffen, dass ein LKW nur dann auf der Nebenspur fährt, wenn er einen LKW auf der Hauptspur überholt. Der Algorithmus zur Generierung der Nebenspur muss sich also an der Hauptspur orientieren.

Die dargestellte Abbildung zeigt beispielhaft die Fahrzeugbänder einer Richtungsfahrbahn mit drei Fahrstreifen (Blau = Hauptspur, Rot = Nebenspur 1, Orange = Nebenspur 2). Die Abbildung enthält einen Ausschnitt von 24 x 3 Fahrzeugbändern. Je Stunde werden drei Fahrzeugbänder für die Richtungsfahrbahn erstellt. Ein Fahrzeugband enthält die LKW einer Spur für eine Stunde (siehe Tagesganglinie). Die Abbildung zeigt daher den Ausschnitt eines Tages. Je nach Verkehrszustand ergeben sich Abschnitte mit fließendem Verkehr oder Stau. Letztere sind durch die geringen Fahrzeugabstände deutlich zu erkennen.



Quelle: Eigene Abbildung

Wie bereits beschrieben, werden die Fahrzeugbänder in der Simulation schrittweise um einen Zeitschritt von  $\Delta t = 0.05s$  verschoben. Da ein Fahrzeugband jeweils eine Stunde abbildet,

kann ein Zeitschritt  $\Delta t$  in eine Schrittweite  $\Delta x$  umgerechnet werden. Die nötigen Beziehungen werden im Folgenden nochmals dargestellt.

$$\Delta x = \frac{\text{Länge des Fahrzeugbandes}}{1h} \cdot \Delta t$$

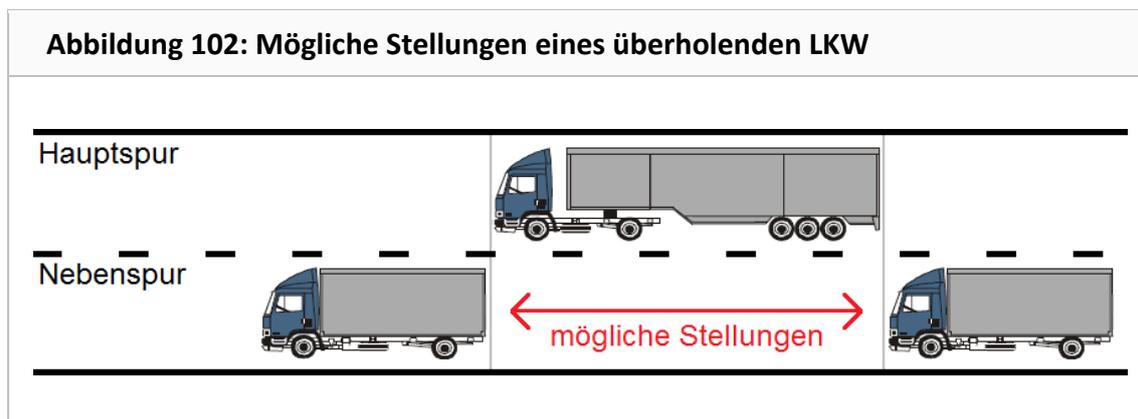
$$\Delta x = v \cdot \Delta t \quad ; v \hat{=} \text{Stromgeschwindigkeit} \left[ \frac{\text{km}}{\text{h}} \right]$$

Die Stromgeschwindigkeit der LKW kann auf allen Fahrspuren einer Richtungsfahrbahn als annähernd gleich angenommen werden. Mit Hilfe der oben dargestellten Beziehungen kann damit gefolgert werden, dass alle Fahrzeugbänder einer Stunde eine gleiche Länge haben müssen.

Die Erstellung der Fahrzeugbänder der Nebenspuren erfolgt in drei Schritten:

1. Erstelle ein Fahrzeugband für eine Stunde (analog zur Hauptspur).
2. Passe die Länge des erstellten Fahrzeugbandes an die Länge der Hauptspur an. (betrifft nur die Fahrzeugabstände)
3. Verschiebe die LKW, sodass LKW der Nebenspur und LKW der Hauptspur annähernd auf gleicher Höhe sind. In Abbildung 102 werden die möglichen Zustände dieser Verschiebung dargestellt. Wo der überholende LKW zwischen vorderster oder hinterster Stellung steht, wird mit Hilfe einer Zufallszahl zwischen 0 und 1 ermittelt

(bei drei Fahrstreifen sind zusätzlich die LKW der Nebenspur 2 und LKW der Nebenspur 1 auf gleicher Höhe).



Quelle: Eigene Abbildung

#### 7.4.6 Dynamischer Schwingbeiwert

Die Eingangsdaten der Fahrzeuggesamtgewichte können als statische Lasten aufgefasst werden. Während einer Überfahrt erfahren diese Lasten eine dynamische Anregung infolge von Fahrbahnnunebenheiten und einer Interaktion zwischen Fahrzeug, Federung, Bereifung und Tragwerk.

Die Höhe der dynamischen Anregung ist maßgeblich von der Geschwindigkeit der LKW abhängig. Je höher die Geschwindigkeit, desto höher ist auch die dynamische Anregung. Im Umkehr-

schluss bedeutet dies, dass für den Verkehrszustand Stau keine dynamische Erhöhung der statischen Lasten berücksichtigt werden muss.

In den Verkehrslastsimulationen wird die komplexe Interaktion zwischen Fahrzeug und Tragwerk nicht modelliert. Stattdessen wird ein Ersatzverfahren analog zu Geißler<sup>260</sup> eingesetzt, das die ungünstige Erhöhung der statischen Lasten über einen Schwingbeiwert berücksichtigt:

$$\begin{aligned}\varphi_{\text{fließender Verkehr}} &= 1.1 \\ \varphi_{\text{Stau}} &= 1.0\end{aligned}$$

## 7.5 Brücken

Das statische System einer Brücke gilt als wesentliche Eingangsgröße einer Verkehrslastsimulation. Eine Betrachtung ohne ein konkretes statisches System ist hingegen nicht möglich, da sich erst durch das Tragwerk eine Beanspruchung infolge der Verkehrslast ableiten lässt.

Je nach statischem System rufen dabei die verschiedenen Verkehrszustände unterschiedliche Tragwerksreaktionen hervor. Die feldweise Anordnung der Verkehrslasten stellt beispielweise bei vielen Brückentypen den maßgebenden Lastfall dar. In der Realität ist die Wahrscheinlichkeit, dass exakt diese Laststellung auftritt jedoch abhängig von der Länge der einzelnen Felder und von der Häufigkeit der verschiedenen Verkehrszustände, wie zum Beispiel Stau oder fließender Verkehr.

Erst mit Hilfe des statischen Systems kann also eine stochastische Aussage bezüglich der Beanspruchungen (wie etwa Biegemoment, Querkraft, Auflagerkraft, usw.) infolge der Verkehrseinwirkungen abgeleitet werden.

Für eine stochastische Berechnung bietet es sich an, das Tragwerksverhalten über Einflusslinien darzustellen. Dieses Vorgehen hat in erster Linie Geschwindigkeitsvorteile für die Berechnung, da für jeden Berechnungsschritt nicht die komplette inverse Systemsteifigkeitsmatrix mit dem Lastvektor multipliziert werden muss. Eine Einflusslinie kann stattdessen als eine reduzierte inverse Steifigkeitsmatrix aufgefasst werden, deren Elemente sich auf die Laststellungen entlang der Fahrspur beschränkt. Für einfache statische Systeme kann die Einflusslinie auch analytisch dargestellt werden.

Jeder Fahrspur wird eine Einflusslinie zugeordnet. Die Lage der Fahrspur in Brückenquerrichtung ist dabei entscheidend für den Einfluss auf die Beanspruchungen.

Die Einflusslinie einer Fahrspur ergibt sich aus der Längseinflussflusslinie des Tragwerks und der Quereinflusslinie des Brückenquerschnitts. Dieses Vorgehen zeigt sich bei einfachen statischen Systemen und vor allem ausreichend langen Feldweiten als praktikable und ausreichend genaue Herangehensweise.

Bei plattenartigen Tragwerken, also auch kurzen Feldweiten, ist eine andere Herangehensweise nötig. Die Längs- und Quereinflusslinie kann hier nicht durch Handrechnung analytisch bestimmt werden. Daher werden zunächst Einflussflächen mit Hilfe von Finite-Elemente-Programmen erstellt. Auf der Einflussfläche werden anschließend die Fahrspuren angeordnet, so dass sich letztendlich wieder Einflusslinien der Fahrspuren ergeben.

Die generierten Verkehrsströme werden schrittweise entlang ihrer Fahrspur auf der Brücke, also entlang ihrer Einflusslinie, verschoben. Verkehrsströme der Gegenrichtung werden in ent-

---

<sup>260</sup> Geißler, K. (2009)

gegengesetzter Richtung entlang ihrer Einflusslinie verschoben. Ein Verkehrsstrom kann dabei als Aneinanderreihung von Achslasten aufgefasst werden. Die Achslast und der Achsabstand sind dabei, wie in den vorherigen Abschnitten erläutert, zufällig erzeugte Größen. Jeder Schritt, um den die Verkehrsströme verschoben werden, stellt einen eigenen Lastfall dar. Bei Verkehrslastsimulationen handelt es sich also um eine extrem hohe Anzahl an Laststellungen, die ausgewertet werden müssen.

## 7.6 Auswertung

Grundlage der Auswertung ist, dass sich charakteristische Werte der Beanspruchung aus Quantil-Werten einer Extremwertverteilung ableiten lassen.

Zur Festlegung des gesuchten Quantils wird üblicherweise auf eine Definition der mittleren Wiederkehrperiode zurückgegriffen. Die mittlere Wiederkehrperiode entspricht dabei der Auftretenswahrscheinlichkeit des charakteristischen Wertes. Für Beanspruchungen infolge vertikaler Verkehrslasten definiert DIN EN 1991-2 (Ausgabe 2010) eine Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren. Anders ausgedrückt, würde sich der gesuchte charakteristische Wert der Beanspruchung im Mittel alle 1000 Jahre wiederholen.

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis  $r$  mit einer mittleren Wiederkehrperiode von  $m_{TR}$  Jahren im Zeitraum von  $j$  Jahren überschritten wird, beträgt nach Spaethe<sup>261</sup>:

$$P(x > r) = 1 - \left(1 - \frac{1}{m_{TR}}\right)^j$$

Im Umkehrschluss ergibt sich auch eine Wahrscheinlichkeit, dass dieses Ereignis  $r$  im Zeitraum von  $j$  Jahren nicht überschritten beziehungsweise unterschritten wird:

$$P(x \leq r) = 1 - P(x > r)$$

Für eine Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren ergibt sich bezüglich der Jahresextremwertverteilung also eine Wahrscheinlichkeit von 0,999, dass das Ereignis  $r$  nicht überschritten wird. Der gesuchte charakteristische Wert ist demnach das 99.9 %-Quantil der Jahresextremwertverteilung.

Zur Auswertung einer Verkehrslastsimulation wird zunächst ein Zeitraum von 1.000 Jahren simuliert. Für ein Jahr werden dabei 250 Verkehrstage angesetzt. Es sollte berücksichtigt werden, dass sich die Verkehrsstärke und Verkehrszusammensetzung im Laufe der Simulation nicht ändern. Demzufolge wird vielmehr ein Zeitraum von einem Jahr tausendmal simuliert. Während der Simulation wird jeweils der Jahresextremwert in ein Histogramm geschrieben, das sich letztendlich aus 1.000 Einzelwerten zusammensetzt.

Für das weitere Vorgehen muss das so erzeugte Histogramm durch eine Jahresextremwertverteilung angenähert werden. Die Histogramme haben zum einen stets nur einen Modalwert und weisen zum anderen auch eine Rechtsschiefe auf. Es hat sich erwiesen, dass mit der Gumbelverteilung (Extremwertverteilung Typ I) eine gute Annäherung an die Histogramme möglich ist.

---

<sup>261</sup> Spaethe, G. (1992)

Anschließend wird das 99.9 %-Quantil dieser Jahresextremwertverteilung bestimmt. Dieser Wert entspricht, wie oben beschrieben, dem gesuchten charakteristischen Wert mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren.

## 7.7 Eingangsparmeter der Berechnungen

Zur Ermittlung des Einflusses der Holztransporter auf die extremsten Brückenbeanspruchungen infolge Verkehrs werden vier Beispielregionen definiert. Ziel dieser Beispielregionen ist, eine repräsentative Teilmenge für das gesamte Bundesland Baden-Württemberg darzustellen. Über eine Untersuchung dieser Teilmenge kann schließlich auf den Einfluss der Holztransporter im gesamten Bundesland geschlossen werden.

Konkret handelt es sich bei den Beispielregionen um die Landkreise Emmendingen, Rems-Murr-Kreis, Breisgau-Hochschwarzwald und Reutlingen.

### 7.7.1 Dauerzählstellen

Zur Erfassung des aktuellen Verkehrs werden üblicherweise Dauerzählstellen eingesetzt. Eine Auswertung dieser Zählstellen gibt Aufschluss darüber, welche Verkehrsstärke und Verkehrszusammensetzung im zugehörigen Streckenabschnitt vorherrscht. In Abbildung 103 bis Abbildung 106 wurde die Lage der Dauerzählstellen in den vier Beispielregionen visualisiert. Auffällig ist, dass insbesondere im regionalen Bereich, der Bereich mit erwartungsgemäß höchstem Anteil an Holz-LKW, sehr viele Zählstellen vorliegen.

Ein Auszug des Verkehrsmonitoring 2013<sup>262</sup> in Tabelle 62 zeigt je Zählstelle unter anderem:

- DTV (durchschnittlicher täglicher Verkehr)  
D.h.: Motorrad (Mot), PKW, PKW mit Anhänger (PmA) & Lieferwagen (Lfw)
- DTSV (durchschnittlicher täglicher Schwerverkehr)  
D.h.: Bus, LKW ohne Anhänger (LoA), LKW mit Anhänger (LmA) & Sattelzüge (Sat)
- grobe Einteilung der Fahrzeugtypen (Bus, LoA, LmA, Sat, ...)

Eine Auswertung der Dauerzählstellen in den vier Beispielregionen wird in den folgenden Abschnitten vorgenommen. Durch eine Gruppierung der maßgebenden Parameter können letztendlich typische Kategorien des aktuellen Verkehrs definiert werden.

---

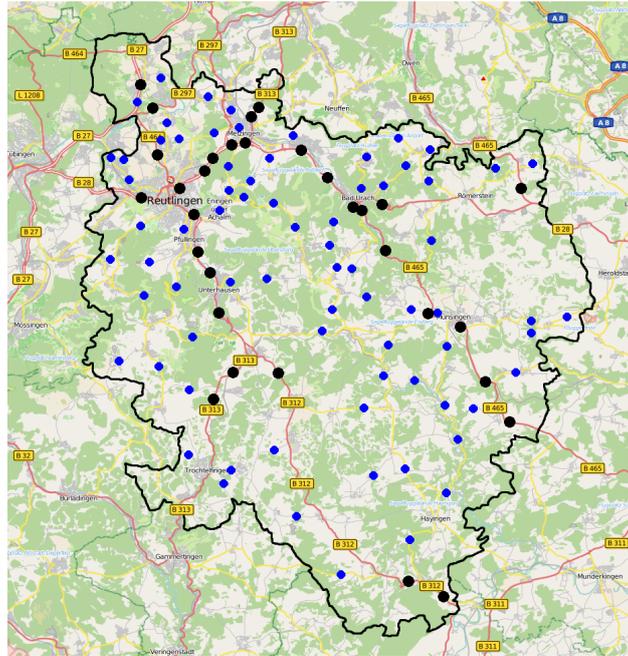
<sup>262</sup> Verkehrsmonitoring BW (2013)

**Tabelle 62: Auszug aus dem Verkehrsmonitoring 2013 (Dauerzählstellen)**

Verkehrsmonitoring 2013: Amtliches Endergebnis für 1-bahnig, 2-streifige Landesstraßen in Baden-Württemberg																			
Allgemeine Angaben			DTV		DTV 2013						Kennwerte 2013								
			Kfz		Kfz	SV	Mot	Pkw + PmA + Lfw	Bus + LoA	LmA + Sat	Faktoren	MSV	MSV <sub>R</sub>	Ant. SV	M	p	L <sub>m</sub> <sup>(25)</sup>		
Straße	E-Str.	ZEUS-Zählstellen-Nr. zust. Stelle TK-Zählstelle Region von nach Anz. FS [n] Abschnittslänge [km]	Mo-So	Mo-So	Mo-So	Mo-So			fer b <sub>50</sub> b <sub>75</sub> Daulityp	Mo-So			Tag 06-22 day 06-18 evening 18-22 Nacht / night 22-06						
			W	W	W	W	U	S		S	W	U	S	Ant. SV	von [hh] bis [hh]	von [hh] bis [hh]	[dB(A)]		
			[Kfz/24h]	[Kfz/24h]	[Kfz/24h]	[Kfz/24h]	[Kfz/24h]	[Kfz/24h]	[Kfz/24h]	[Kfz/24h]	[Kfz/24h]	[Kfz/24h]	[Kfz/24h]	[Kfz/24h]	[Kfz/24h]	[Kfz/24h]			
L 67	08211	<b>81647</b> <b>7115 1201</b> L67/K9603 Baden-Baden Hauenebe L67/K3711 bei Kuppenheim 2	12.916	12.757	<b>12.651</b>	323	2,6	126	12.202	205	118	1,01	1.334	786	5,9	733	2,5	66,8	
			13.808	13.698	13.562	383	2,8	119	13.060	240	143	0,61	1.334	786	5,9	801	2,8	67,2	
			13.860	13.793	13.650	398	2,9	145	13.107	253	145	-	1.198	677	5,6	525	1,3	64,9	
			8.490	8.250	8.235	40	0,5	131	8.064	36	4	D	539	286		116	3,4	59,0	
			Fortschreibung																
L 67	08216	<b>81655</b> <b>7115 1221</b> L67/K3711 bei Kuppenheim L67/L77 Kuppenheim 2	9.462	9.346	<b>9.633</b>	307	3,2	120	9.206	188	119	0,91	988	571	9,1	560	3,2	65,8	
			9.956	9.877	10.529	364	3,5	104	10.061	221	143	0,62	988	571	9,1	601	3,7	66,2	
			9.994	9.946	9.549	341	3,6	139	9.069	207	134	1,07	834	468	8,9	436	1,4	64,2	
			6.995	6.797	6.550	58	0,9	154	6.338	43	15	E	499	268		84	2,4	57,3	
L 67	08216	<b>81656</b> <b>7115 1222</b> L67/L77 Kuppenheim	8.189	8.088	<b>8.157</b>	326	4,0	213	7.618	262	64	-	771	445	-	472	3,9	65,2	
			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	517	4,3	65,7	
			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	330	2,0	63,3	

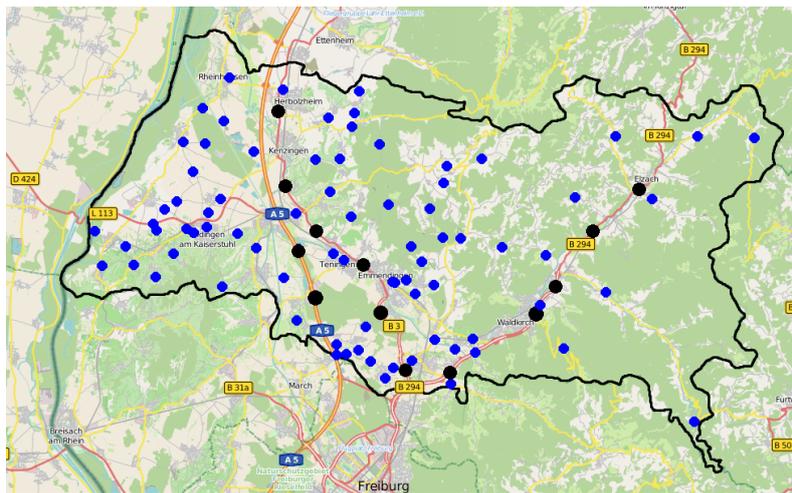
Quelle: Verkehrsmonitoring BW (2013)

**Abbildung 103: Dauerzählstellen im Landkreis Reutlingen**



Quelle: Eigene Abbildung

**Abbildung 104: Dauerzählstellen im Landkreis Emmendingen**



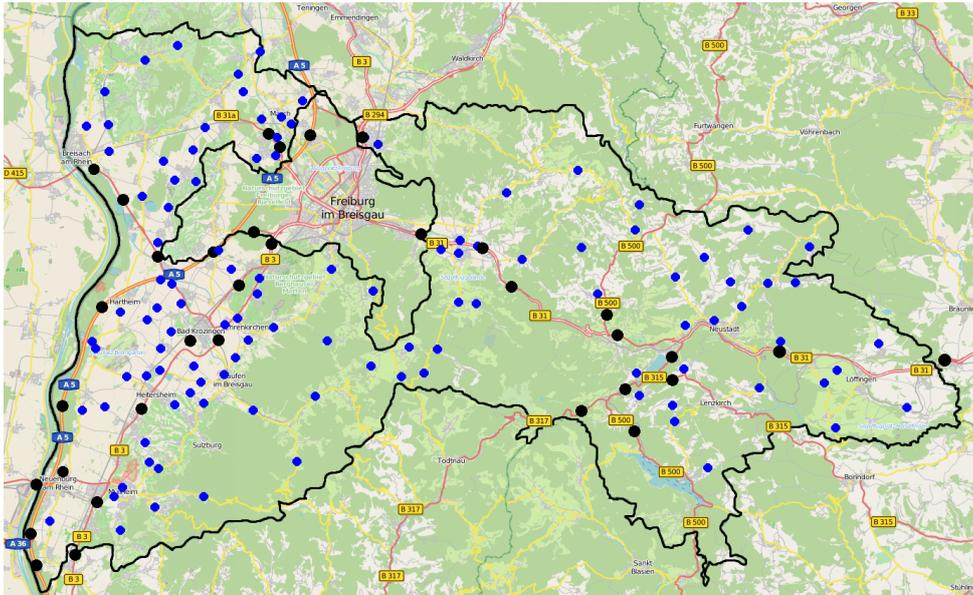
Quelle: Eigene Abbildung

**Legende**

Dauermessstellen an...

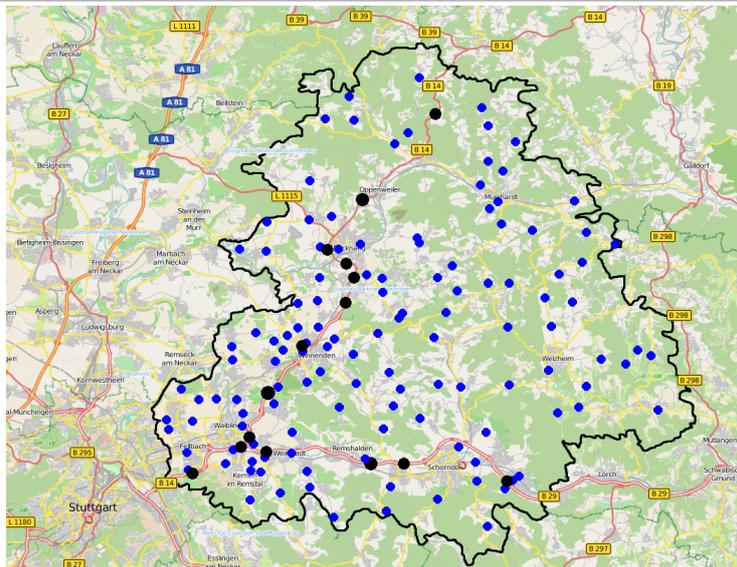
- Autobahnen & Bundesstraßen
- Landes- & Kreisstraßen

**Abbildung 105: Dauerzählstellen im Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald**



Quelle: Eigene Abbildung

**Abbildung 106: Dauerzählstellen im Landkreis Rems-Murr-Kreis**



Quelle: Eigene Abbildung

**Legende**

Dauermessstellen an...

- Autobahnen & Bundesstraßen
- Landes- & Kreisstraßen

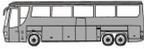
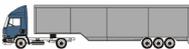
## 7.7.2 Verkehrskategorien

### Grundlegende Fahrzeugkollektive

In der Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (NaRiLi)<sup>263</sup> wird ein Schätzverfahren vorgestellt, das aus den Ergebnissen einer Dauerzählstelle die dort vorherrschende Verkehrsart (Lang-, Mittel oder Kurzstreckenverkehr) näherungsweise bestimmt.

Maßgebendes Kriterium zur Bestimmung der Verkehrsart ist das Verhältnis zwischen leichten und schweren LKW im DTSV (siehe Tabelle 63). Man geht davon aus, dass Sattelzüge und LKW mit Anhänger hauptsächlich im Langstreckenverkehr eingesetzt werden. Busse und LKW ohne Anhänger dominieren hingegen den Kurzstreckenverkehr. Im Mittelstreckenverkehr erwartet man ein ausgewogenes Verhältnis zwischen leichten und schweren LKW.

**Tabelle 63: Summarische Verkehrszusammenstellung des DTSV [%] zur Bestimmung der objektbezogenen Verkehrsart**

1	2	3	4	5
Fahrzeuggruppe		Verkehrsart		
LKW	Beispielfahrzeuge	Große Entfernung	Mittlere Entfernung	Ortsverkehr
LKW > 3,5 t mit 2 oder 3 Achsen ohne Anhänger		25	50	85
Busse				
LKW > 3,5 t mit Anhänger		75	50	15
Sattelzüge				
Andere Schwerfahrzeuge > 3,5 t				

Quelle: NaRiLi (2011)

In Anlehnung an die drei Verkehrsarten Lang-, Mittel- und Kurzstreckenverkehr ist in der Arbeit von Pohl<sup>264</sup> jeweils ein zugehöriges Fahrzeugkollektiv definiert. Die Kollektive enthalten Informationen zu Häufigkeit, Achsabständen, Achslastverteilung und Gesamtgewicht der maßgebenden Fahrzeugtypen. In NaRiLi wird zusätzlich eine Aktualisierung der Fahrzeugtypenverteilung angegeben. Die Fahrzeugkollektive nach Pohl in Kap. 7.12, Anlage 1 "Grundlegende Fahrzeugkollektive" wurden dementsprechend modifiziert.

Das hier verwendete Fahrzeugkollektiv Langstreckenverkehr stellt einen durchschnittlichen Autobahnverkehr dar. Es ist daher nicht identisch mit dem extremen Fahrzeugkollektiv der Brohltalbrücke entlang der A61.

Jeder Dauerzählstelle und dem zugehörigen Streckenabschnitt kann somit eine Verkehrsart zugewiesen werden. Entsprechend dieser Verkehrsart lässt sich in der späteren Berechnung eines der Fahrzeugkollektive Lang-, Mittel- oder Kurzstreckenverkehr ansetzen.

<sup>263</sup> NaRiLi (2011)

<sup>264</sup> Pohl, S. (1993)

## DTSV

Die Auswertung der Dauerzählstellen in den vier Beispielregionen zeigt DTSV-Werte von 0 bis ca. 5.000 LKW pro Tag und pro Richtung. Dieser Wertebereich wird für die spätere Berechnung in drei Kategorien eingeteilt. Streckenanteile mit ähnlichem Schwerverkehrsaufkommen werden in den folgenden Kategorien zusammengefasst. Auf der sicheren Seite liegend wird jeweils das Maximum des DTSV pro Richtung angesetzt:

- Extrem:                    2.500 < DTSV ≤ 5.000
- Durchschnittlich:    500 < DTSV ≤ 2.500
- Leicht:                    0 < DTSV ≤ 500

### Zuordnung der grundlegenden Fahrzeugkollektive zum DTSV

Aus der Auswertung der Dauerzählstellen ergeben sich jeweils drei Kategorien für die Fahrzeugkollektive (Verkehrsart) und den DTSV. Theoretisch ergeben sich daraus insgesamt neun Kombinationsmöglichkeiten.

Eine detailliertere Untersuchung der Dauerzählstellen hinsichtlich dieser Kombinationsmöglichkeiten zeigt eine Abhängigkeit zwischen dem Fahrzeugkollektiv und dem DTSV. Es tritt etwa im Bereich extremer DTSV-Werte lediglich das Fahrzeugkollektiv des Langstreckenverkehrs auf. Erwartungsgemäß können also Strecken ausgeschlossen werden, die zum Beispiel einen Kurzstreckenverkehr bei 5.000 LKW pro Tag aufzeigen würden. In Tabelle 64 werden die sechs tatsächlich auftretenden Kombinationsmöglichkeiten zusammengefasst.

<b>Tabelle 64: Zuordnung der Fahrzeugkollektive zum DTSV</b>	
	DTSV - je Richtung (Fahrzeugkollektiv)
Extrem	2.500 < DTSV ≤ 5.000 (L)
Durchschnittlich	500 < DTSV ≤ 2.500 (L + M)
Leicht	DTSV ≤ 500 (L + M + K)
	<b>Legende:</b> <i>L</i> → Langstreckenverkehr <i>M</i> → Mittelstreckenverkehr <i>K</i> → Kurzstreckenverkehr

Quelle: Eigene Abbildung

Die Kombinationsmöglichkeiten stellen Verkehrskategorien dar, die in der späteren Berechnung untersucht werden. Diese sechs Verkehrskategorien bilden demnach die Grundlage der Verkehrslastsimulation. Wie bereits erwähnt, wird je Kategorie der Maximalwert des DSTV pro Richtung angesetzt.

### 7.7.3 Holz-LKW

#### Fahrzeugkonfigurationen

Die in dieser Arbeit untersuchten Fahrzeugkonfigurationen der Holz- und Referenz-LKW entstammen einer projektinternen Ausarbeitung des Lehrstuhls für Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) am Karlsruher Institut für Technologie. Die Details dieser Ausarbeitung sind der Anlage 2, Kap. 5.8 zu entnehmen. Eine Zusammenstellung der wesentlichen Parameter findet sich in Abbildung 107.

Um eine mögliche Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichtes der Holz-LKW zu untersuchen, werden unterschiedliche Szenarien betrachtet, darunter jeweils 40 t, 44 t, 46 t und 53 t. Die Referenz-LKW werden mit einem Gesamtgewicht von 40 t und 44 t betrachtet.

Für die Verkehrslastsimulation werden die Fahrzeuggewichte dieser LKW deterministisch, also ohne Streuung angesetzt. Dieses Vorgehen schließt zum einen leichtere und zum anderen schwerere LKW der hier untersuchten Fahrzeugtypen aus.

Leichtere LKW werden ausgeschlossen, da sich der Einfluss nicht oder unvollständig beladener Holz-LKW auf die extremsten Belastungssituationen der Bestandsbrücken nur günstig auswirken kann. Für das weitere Vorgehen werden daher nur vollständig beladene Holz-LKW betrachtet.

Schwerere LKW als die oben definierten Gesamtgewichte werden in dieser Untersuchung ebenfalls ausgeschlossen. Die Voraussetzung für dieses Vorgehen ist der Einbau von Achslastmesssystemen. Derartige Systeme sollen als Kompensationsmaßnahme garantieren, dass Überladungen ausgeschlossen werden und ansonsten eine Weiterfahrt verhindert wird.

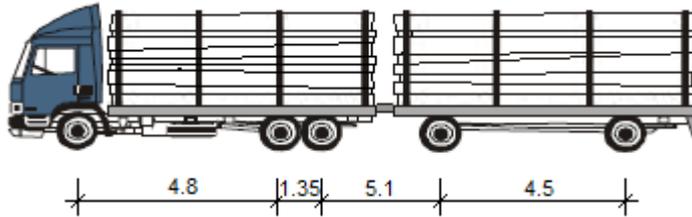
In bisherigen Untersuchungen wurde keine obere Schranke der streuenden Gesamtgewichte definiert. Ersichtlich wird dies in den bereits erwähnten grundlegenden Fahrzeugkollektiven in Anlage 1, Kap. 7.12. Aus dem Mittelwert und der Standardabweichung der dort definierten Ladungs- und Fahrzeuggewichte ergibt sich auch eine gewisse Wahrscheinlichkeit für extrem hohe Gesamtgewichte. Entsprechend dieser statistischen Verkehrsbeobachtung muss auch mit Gesamtgewichten gerechnet werden, die sich außerhalb der bisherigen Zulassung befinden.

Die hier durchgeführten Verkehrslastsimulationen basieren auf den grundlegenden Fahrzeugkollektiven. Die Holz- und Referenz-LKW werden in diese Fahrzeugkollektive integriert. In diesem Zusammenhang werden im nächsten Abschnitt Anteile der Holz-LKW am DTSV ermittelt. Die grundlegenden Fahrzeugkollektive können dabei als Hintergrundverkehr betrachtet werden, während der Fokus der Untersuchung auf den Holz- und Referenz-LKW liegt.

In den hier durchgeführten Verkehrslastsimulationen werden also, der Statistik entsprechend, für den Hintergrundverkehr auch Fahrzeuggesamtgewichte berücksichtigt, die sich außerhalb der bisherigen Zulassung befinden. Diese Notwendigkeit ergibt sich auch dadurch, dass für diese Fahrzeuge keine Begrenzung des tatsächlichen Gesamtgewichts garantiert werden kann. Aufgrund der oben beschriebenen Kompensationsmaßnahme werden für die Holz- und Referenz-LKW hingegen nur klar definierte Fahrzeuggesamtgewichte ohne Streuung angesetzt.

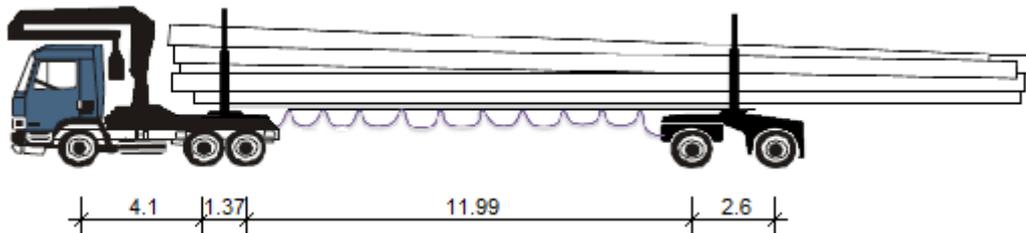
**Abbildung 107: Achsabstände [m] und Achslasten [t]**

**Kurzholztransporter:**



40t	6,73	8,64	8,64	8,04	7,96
44t	7,23	9,38	9,38	9,02	8,98
46t	7,23	9,38	9,38	10,0	10,0
53t	9,00	12,0	12,0	10,0	10,0

**Langholztransporter:**



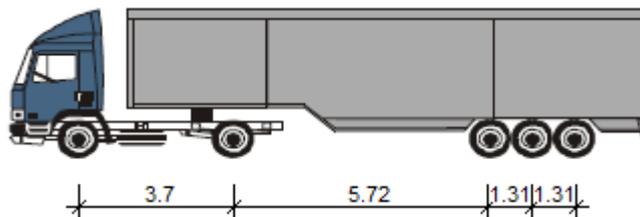
40t	8,87	7,64	7,64	7,91	7,94
44t	8,84	8,52	8,52	9,04	9,10
46t	8,83	8,60	8,60	9,94	10,0
53t	8,73	11,5	11,5	10,6	10,7

**Referenz LKW mit Anhänger (Lastkraftwagenzug):**



40t	7,20	10,7	6,15	8,03	7,97
44t	7,41	11,8	6,80	9,00	9,00

**Referenz Sattelzüge (Sattelkraftzug):**



40t	6,49	10,1	7,82	7,82	7,82
44t	6,68	11,1	8,75	8,75	8,75

Quelle: Eigene Abbildung

### Anteil der Holz-LKW am DTSV

Zur Integration der Holz- und Referenz-LKW in die grundlegenden Fahrzeugkollektive in Anlage 1, wird in diesem Abschnitt der Anteil der Holz-LKW am DTSV hergeleitet. Ausgangspunkt dieser Rechnung ist eine projektinterne Ausarbeitung des Unternehmens UNIQUE in Anlage 2: "Berechnung der Transportbewegungen in den Beispielregionen nach UNIQUE". Eine Zusammenstellung der jährlichen Transportbewegungen findet sich in Tabelle 65.

Tabelle 65: Zusammenstellung der jährlichen Transportbewegungen	
Landkreis	Transportbewegungen pro Jahr
Reutlingen	14.729
Rems-Murr	14.130
Emmendingen	10.618
Breisgau-Hochschwarzwald	27.286
<b>Maximal</b>	<b>27.286</b>

Quelle: Eigene Abbildung

Unter Annahme von durchschnittlich 250 Werktagen pro Jahr ergeben sich für den maßgebenden Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald  $27.286 / 250 \approx 110$  Transportbewegungen der Holz-LKW pro Tag und pro Landkreis. Diese Anzahl an Transportbewegungen verteilt sich auf das gesamte Straßennetz des Landkreises. Um den Anteil der Holz-LKW am DTSV einer Dauerzählstelle zu bestimmen, ist eine Verteilung der Holz-LKW auf die einzelnen Streckenabschnitte des Straßennetzes nötig. Die ungünstigste Annahme ist hier, dass die Fahrtrouten sämtlicher Holz-LKW täglich einen gemeinsamen Streckenabschnitt passieren. Mit dieser stark auf der sicheren Seite liegenden Annahme werden die täglichen Transportbewegungen eines gesamten Landkreises mit dem DTSV-Wert einer einzelnen Dauerzählstelle verglichen. In den unter Kap. 0 definierten Verkehrskategorien ergeben sich somit folgende Anteile an Holz-LKW.

Tabelle 66: Verkehrskategorien als Kombination von Fahrzeugkollektiv, DTSV und Anteil an Holz-LKW		
	DTSV - je Richtung (Fahrzeugkollektiv)	Anteil an Holz-LKW
Extrem	$2500 < \text{DTSV} \leq 5.000$ (L)	... davon 110 Holz-LKW $\rightarrow 110 / 5.000 = 2.2\%$
Durchschnittlich	$500 < \text{DTSV} \leq 2.500$ (L + M)	... davon 110 Holz-LKW $\rightarrow 110 / 2.500 = 4.4\%$
Leicht	$\text{DTSV} \leq 500$ (L + M + K)	... davon 110 Holz-LKW $\rightarrow 110 / 500 = 22.0\%$
	<b>Legende:</b> L $\rightarrow$ Langstreckenverkehr M $\rightarrow$ Mittelstreckenverkehr K $\rightarrow$ Kurzstreckenverkehr	

Quelle: Eigene Abbildung

Je Verkehrskategorie wird der Anteil an Holz- bzw. Referenz-LKW in das grundlegende Fahrzeugkollektiv integriert. Für jeden zu untersuchenden LKW wird dafür ein neuer Fahrzeugtyp im jeweiligen Fahrzeugkollektiv erzeugt. Die Auftretenswahrscheinlichkeit dieses neuen Fahrzeugtyps entspricht dem oben ermittelten Anteil am DTSV. Die Auftretenswahrscheinlichkeit der restlichen Fahrzeugtypen wird entsprechend angepasst. Um Vergleiche auf einer einheitlichen Grundlage anstellen zu können, werden für die Referenz- und Holz-LKW stets identische Anteile verwendet.

Durch höhere zulässige Gesamtgewichte der Holz-LKW lässt sich die Anzahl der nötigen Fahrten reduzieren, da mit weniger LKW dieselbe Menge an Holz transportiert werden kann. Die voraussichtliche Reduktion der Fahrten wird einer projektinternen Ausarbeitung des Unternehmens UNIQUE entnommen. Die Ergebnisse dieser Betrachtung finden sich in Tabelle 67. Im Vergleich zur heutigen Zulassung von 40 t, kann zum Beispiel durch einen 46 t Holz-LKW eine Reduktion der Holztransporte auf 77 % erreicht werden.

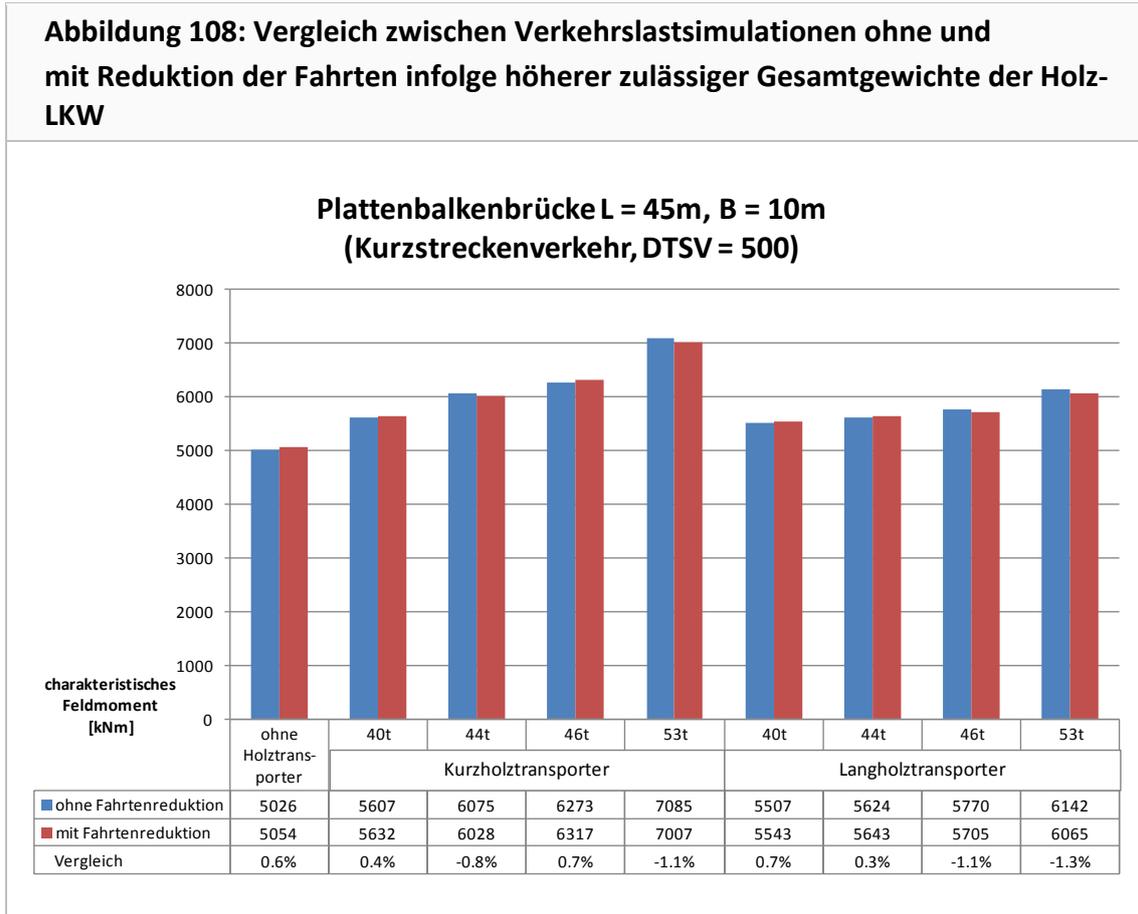
<b>Tabelle 67: Reduktion der Fahrbewegungen von Holztransporten durch höhere zulässige Gesamtgewichte</b>				
<b>Fahrten Holz-LKW nach zGG</b>				
<b>40 t</b>				
<b>Nadel</b>		<b>Laub</b>		
leer	voll	leer	voll	
66.514	99.772	36.498	54.747	
<b>44 t</b>				
<b>Nadel</b>		<b>Laub</b>		
leer	voll	leer	voll	
55.429	83.143	30.415	45.623	
<b>46 t</b>				
<b>Nadel</b>		<b>Laub</b>		
leer	voll	leer	voll	
51.165	76.747	28.076	42.113	
<b>53 t</b>				
<b>Nadel</b>		<b>Laub</b>		
leer	voll	leer	voll	
40.312	60.468	22.120	33.180	
<b>Darstellung prozentuale Veränderung zu 40 t</b>				
40 t	257.531	100%		
44 t	214.610	83%		
46 t	198.101	77%		
53 t	156.080	61%		

Quelle: UNIQUE

Der Einfluss dieser Reduktion auf die extremsten Brückenbeanspruchungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit wird in Abbildung 108 dargestellt.

Die Voruntersuchung wurde beispielhaft an einem zweistegigen Plattenbalken mit einer Spannweite von 45 m durchgeführt. Als Verkehrskategorie wurde der Kurzstreckenverkehr bei einem DTSV-Wert von 500 LKW pro Tag gewählt. Die Abbildung zeigt den Unterschied zwischen Verkehrslastsimulationen ohne und mit Reduktion der Fahrten infolge höherer zulässiger Gesamtgewichte der Holz-LKW. Der Anteil der Holz-LKW im Fahrzeugkollektiv wurde hier entsprechend der Tabelle 67 angepasst. Das heißt, im Szenarium der 44 t LKW wurden 18,3 %

anstatt der ursprünglichen 22 % angesetzt. Analog dazu werden die Holz-LKW in den Szenarien der 46 t und 53 t LKW auf 16,9 % beziehungsweise 13,4 % reduziert.



Quelle: Eigene Abbildung

Die maximale Reduktion der charakteristischen Feldmomente beläuft sich in diesem Beispiel auf 1,3 %. Da es sich bei Verkehrslastsimulationen um stochastische Berechnungen handelt, ist in den Ergebnis jedoch auch eine geringfügige Schwankung zu erwarten. Die leichte Schwankung in den obigen Ergebnissen ist daher vielmehr ein Resultat dieser stochastischen Berechnung. Aus den Ergebnissen kann daher abgelesen werden, dass die Fahrtenreduktion durch höhere zulässige Gesamtgewichte einen vernachlässigbaren Einfluss auf die extremsten Brückenbeanspruchungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit hat.

Aufgrund des geringfügigen Einflusses wird auf der sicheren Seite liegend für die folgenden Verkehrslastsimulationen eine Reduktion der Fahrten nicht berücksichtigt.

### 7.7.4 Brückenkatalog

Die in dieser Arbeit untersuchten Brückenkonstruktionen entstammen einer Datensammlung, die vom Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg zur Verfügung gestellt wurde.

Die Datensammlung enthält eine Auflistung von ca. 900 Straßenbrücken an Autobahnen, Bundes- und Landesstraßen in den vier Beispielregionen Emmendingen, Rems-Murr-Kreis, Breisgau-Hochschwarzwald und Reutlingen. Von den insgesamt ca. 9.000 Straßenbrücken im gesamten Bundesland wurden also 10 % für eine netzweite Analyse herangezogen und ausgewertet. Die Beispielregionen stellen dabei kein zusammenhängendes Gebiet dar und weisen in

ihrer geografischen Lage eine gute Verteilung auf. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die hier betrachtete Teilmenge in guter Näherung eine repräsentative Aussage für das gesamte Bundesland zulässt.

Brücken an Forstwegen, die im Zuständigkeitsbereich des Landesbetriebs Forst Baden-Württemberg liegen, können aus Mangel an Daten für das weitere Vorgehen nicht betrachtet werden.

Um eine netzweite Betrachtung zu ermöglichen, ist es selbstverständlich nicht zielführend, sämtliche Brücken einzeln zu untersuchen. Im Folgenden werden daher die maßgebenden Brücken ausgewählt.

Die Datensammlung der Brücken an Autobahnen, Bundes- und Landesstraßen enthält unter anderem Angaben zur Bauwerksart und der jeweiligen Konstruktion. Besonders häufige Typen sind dabei die Rahmen-, Platten- und Plattenbalkenbrücken. Zusätzlich können noch detaillierte Angaben, wie zum Beispiel zur Anzahl der Felder, Stützweiten und Brückenbreiten, entnommen werden.

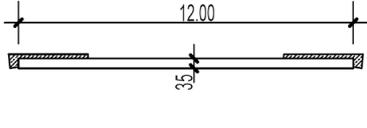
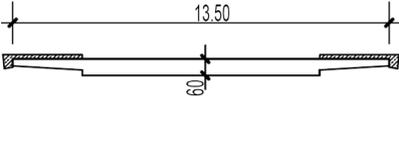
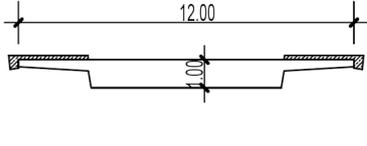
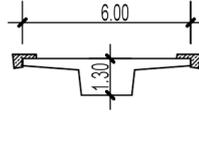
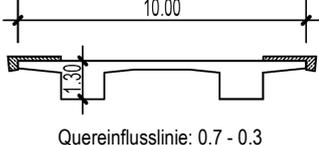
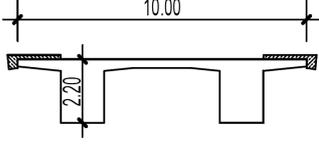
Zur Auswahl der maßgebenden Brücken wird die Datensammlung statistisch ausgewertet. Die häufigsten Konstruktionen werden in einen Katalog der hier untersuchten Brücken aufgenommen. Neben den häufigsten Konstruktionen werden zusätzlich auch Grenzfälle aufgenommen, die zum Beispiel hinsichtlich ihrer Spannweite besonders auffällig sind.

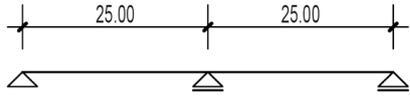
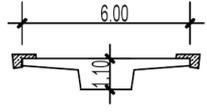
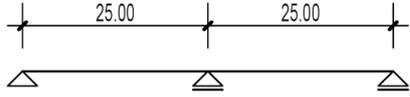
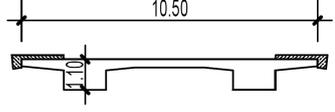
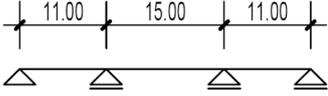
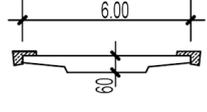
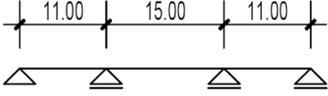
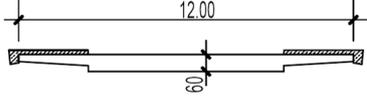
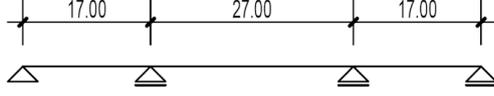
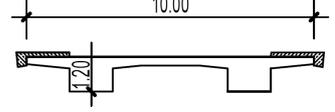
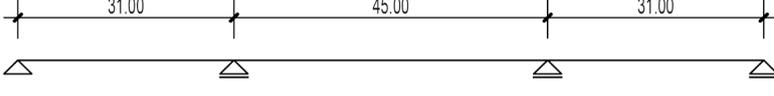
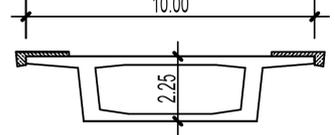
Fehlende Angaben werden durch ingenieurmäßige Annahmen ergänzt. Dabei wird insbesondere die Detailausbildung der Querschnitte so angenommen, wie es von einer Bauweise im Regelfall auch zu erwarten ist. Es wird darüber hinaus davon ausgegangen, dass Geh- und Radwege durch steife abweisende Schutzeinrichtungen gegen das Auffahren von Straßenfahrzeugen gesichert sind.

Die Ergebnisse dieser Auswertung werden im nachfolgenden Brückenkatalog zusammengefasst.

Für das weitere Vorgehen werden zu jeder Brückenkonstruktion des Katalogs Einflusslinien erzeugt, die jeweils eine Fahrspur des Überbaus darstellen. Die dazu notwendigen Methoden werden in Abschnitt 7.5 erläutert. Die Einflusslinien dienen wiederum als Eingangsdaten der Verkehrslastsimulation.

Entsprechend der Fahrbahnbreite werden ein bis maximal zwei Spuren je Querschnitt angeordnet. Die Simulation geht stets von Richtungsverkehr aus. Ein Begegnungsverkehr aus zwei Richtungsfahrbahnen würde hingegen zu Ergebnissen auf der unsicheren Seite führen, da die Wahrscheinlichkeit von schweren LKW nebeneinander in ungünstigster Stellung geringer ist.

Tabelle 68: Brückenkatalog	
Statisches System	Querschnitt
<p>1. Rahmenbrücke L = 5m, B = 12m</p> 	
<p>2. Plattenbrücke L = 11m, B = 13.5m</p> 	
<p>3. Plattenbrücke L = 25m, B = 12m</p> 	
<p>4. Plattenbalkenbrücke L = 25m, B = 6m</p> 	
<p>5. Plattenbalkenbrücke L = 25m, B = 10m</p> 	 <p>Quereinflusslinie: 0.7 - 0.3</p>
<p>6. Plattenbalkenbrücke L = 45m, B = 10m</p> 	 <p>Quereinflusslinie: 0.6 - 0.4</p>

<p>7. Plattenbalkenbrücke L = 25+25m, B = 6m</p> 	
<p>8. Plattenbalkenbrücke L = 25+25m, B = 10.5m</p> 	 <p>Quereinflusslinie: 0.7 - 0.3</p>
<p>9. Plattenbalkenbrücke L = 11+15+11m, B = 6m</p> 	
<p>10. Plattenbalkenbrücke L = 11+15+11m, B = 12m</p> 	
<p>11. Plattenbalkenbrücke L = 17+27+17m, B = 10m</p> 	 <p>Quereinflusslinie: 0.8 - 0.2</p>
<p>12. Hohlkastenbrücke L = 31+45+31m, B = 10m</p> 	 <p>Quereinflusslinie: 0.6 - 0.4</p>

Quelle: Eigene Abbildung

## 7.8 Ergebnisse

Mit den Eingangsparametern in den vorhergehenden Abschnitten wurden Verkehrslastsimulationen durchgeführt, die Jahrestremwerte der Schnittgrößen aufgezeichnet und anschließend statistisch ausgewertet. In den Simulationen wurden je Brückentyp insgesamt 78 Szenarien untersucht. Diese Szenarien ergaben sich aus der Kombination der Verkehrskategorien mit den Holz- und Referenz-LKW. Im Folgenden wurden für jeden Brückentyp die Szenarien der Holz-LKW hinsichtlich der charakteristischen Beanspruchung untersucht. In Anlage 4 "Ermittelte charakteristische Werte" werden sämtliche Ergebnisse inklusive der Referenz-LKW detailliert aufgeführt.

Zum Vergleich der Ergebnisse mit den normativen Lastmodellen wurden die aus den Lastmodellen resultierenden charakteristischen Beanspruchungen in die Ergebnisse integriert. Als normative Referenz dienen die Lastmodelle LM1 nach DIN EN 1991-2/NA (Ausgabe 2012), BK 60/30 und BK 30/30 nach DIN 1072 (Ausgabe 1985) sowie BK 60 und BK 30 nach DIN 1072 (Ausgabe 1967).

### 7.8.1 Rahmenbrücke L = 5 m, B = 12 m

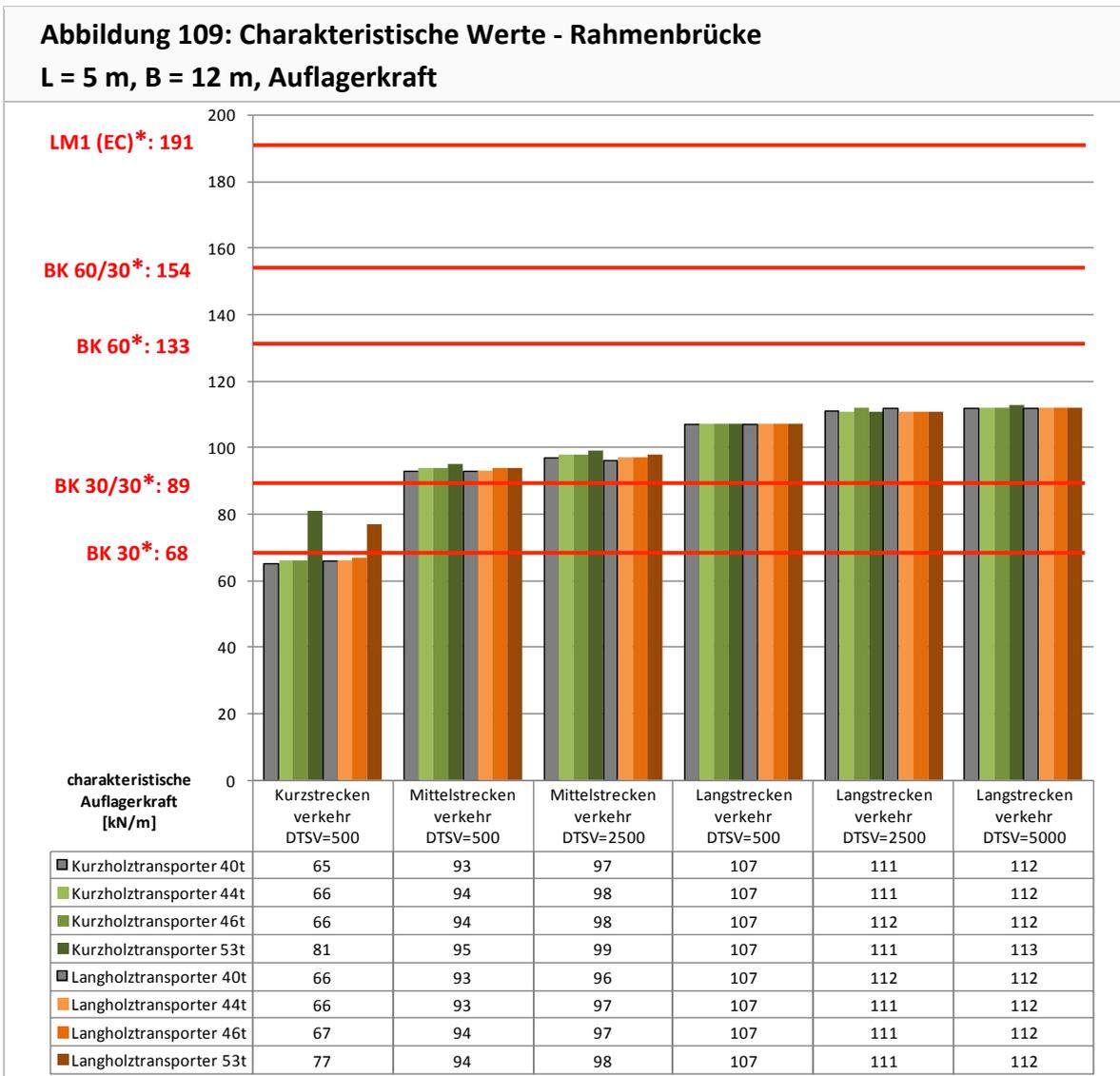
Für die Rahmenbrücke mit der Spannweite 5 m und einem Plattenquerschnitt in Massivbauweise zeigt die folgende Abbildung die charakteristischen Auflagerkräfte.

Im Vergleich zur bisherigen Zulassung der 40 t Kurzholztransporter (graue Balken) erhöht sich die Beanspruchung durch 44 t, 46 t und 53 t Kurzholztransporter um maximal 1,5 %, 1,5 % bzw. 24,6 %. Die Erhöhungen durch 44 t, 46 t und 53 t Langholztransporter im Vergleich zu 40 t Langholztransportern (graue Balken) betragen maximal 1,0 %, 1,5 % bzw. 16,7 %. Die Verkehrskategorie mit der höchsten relativen Steigerung stellt dabei der Kurzstreckenverkehr dar.

Aus der Abbildung sind die mindestens notwendigen normativen Lastmodelle ersichtlich:

- Kurzstreckenverkehr: BK 30\*
- Mittelstreckenverkehr: BK 60\*
- Langstreckenverkehr: BK 60\*

Ab den 53 t Kurz- oder Langholztransportern wäre das notwendige Lastmodell im Kurzstreckenverkehr nicht mehr ausreichend.



\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet.

### 7.8.2 Plattenbrücke L = 11 m, B = 13,5 m

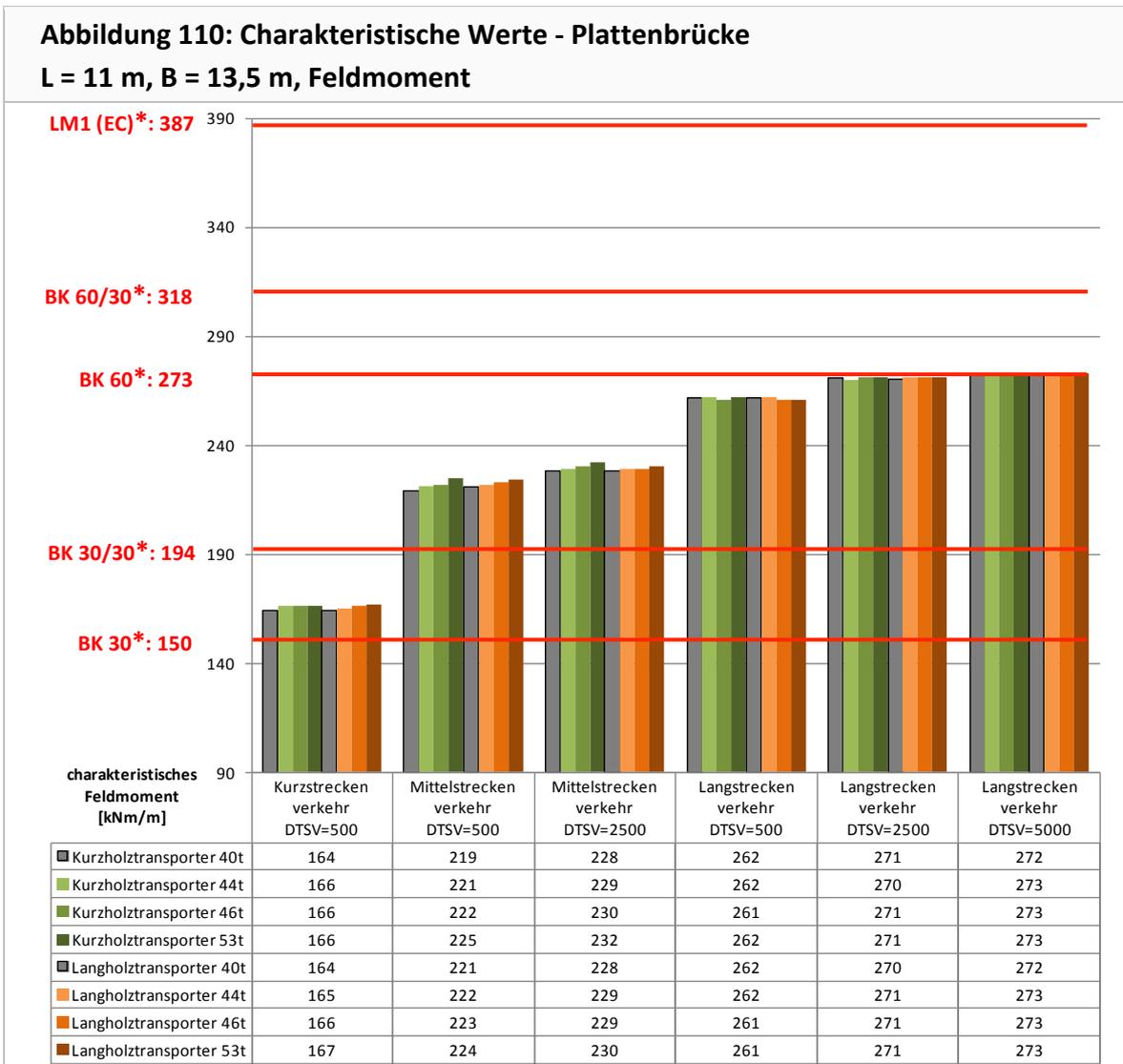
Für den Einfeldträger mit der Spannweite 11 m und einem Plattenquerschnitt in Massivbauweise zeigt die folgende Abbildung die charakteristischen Feldmomente.

Im Vergleich zur bisherigen Zulassung der 40 t Kurzholztransporter (graue Balken) erhöht sich die Beanspruchung durch 44 t, 46 t und 53 t Kurzholztransporter um maximal 1,2 %, 1,3 % bzw. 2,7 %. Die Erhöhung durch 44 t, 46 t und 53 t Langholztransporter im Vergleich zu 40 t Langholztransportern (graue Balken) betragen maximal 0,6 %, 1,2 % bzw. 1,8 %. Die Verkehrskategorie mit der höchsten relativen Steigerung stellt dabei der Kurzstreckenverkehr dar.

Aus der Abbildung sind die mindestens notwendigen normativen Lastmodelle ersichtlich:

- Kurzstreckenverkehr: BK 30/30\*
- Mittelstreckenverkehr: BK 60\*
- Langstreckenverkehr: BK 60\*

Die notwendigen Lastmodelle wären hier für sämtliche Kurz- und Langholztransporter ausreichend.



\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet.

### 7.8.3 Plattenbalkenbrücke L = 25 m, B = 6 m

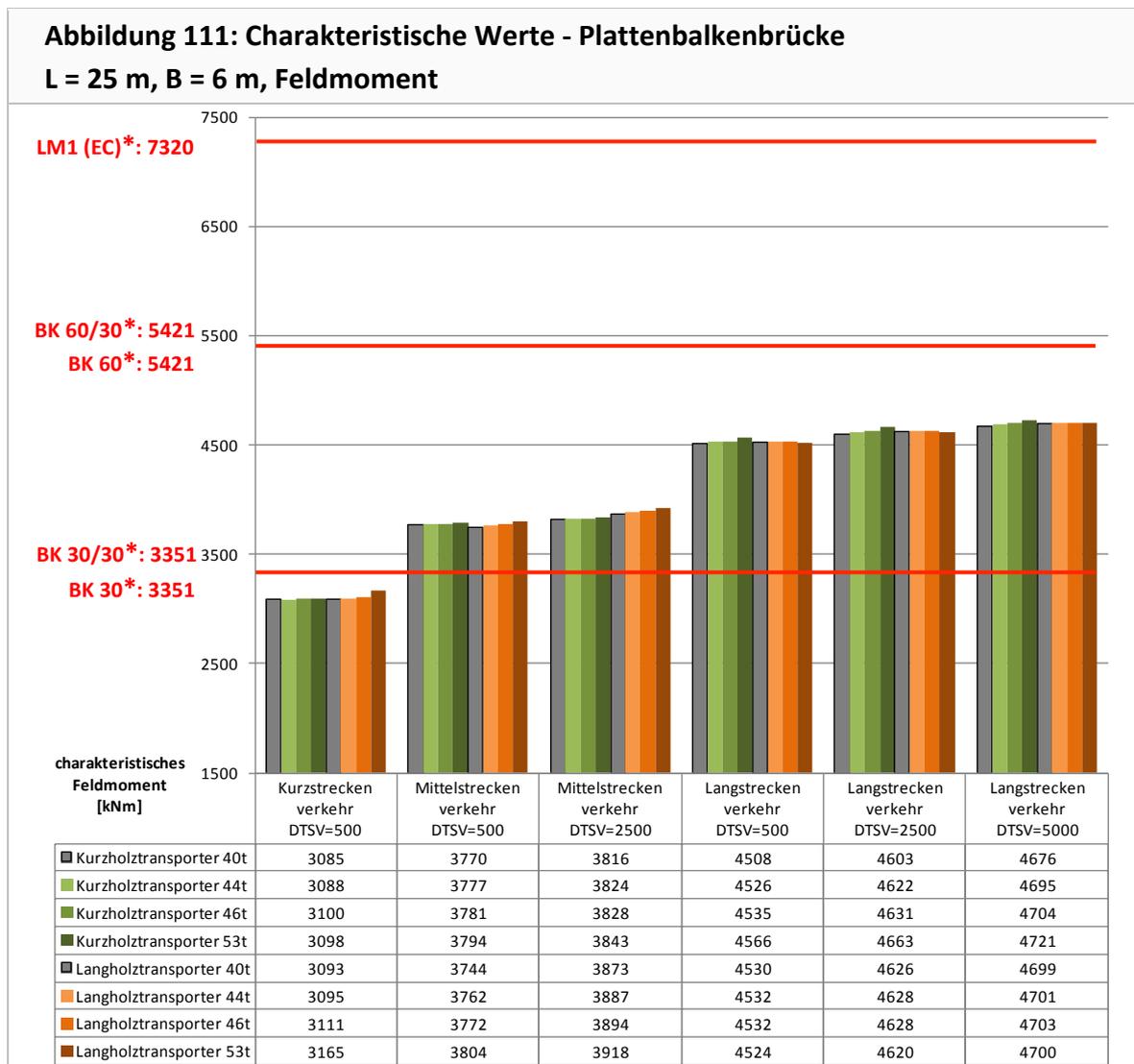
Für den Einfeldträger mit der Spannweite 25 m und einem einsteigigen Plattenbalken in Massivbauweise zeigt die folgende Abbildung die charakteristischen Feldmomente.

Im Vergleich zur bisherigen Zulassung der 40 t Kurzholztransporter (graue Balken) erhöht sich die Beanspruchung durch 44 t, 46 t und 53 t Kurzholztransporter um maximal 0,4 %, 0,6 % bzw. 1,3 %. Die Erhöhung durch 44 t, 46 t und 53 t Langholztransporter im Vergleich zu 40 t Langholztransportern (graue Balken) betragen maximal 0,5 %, 0,7 % bzw. 2,3 %. Die Verkehrskategorien mit der höchsten relativen Steigerung stellen dabei der Kurz- und Langstreckenverkehr dar.

Aus der Abbildung sind die mindestens notwendigen normativen Lastmodelle ersichtlich:

- Kurzstreckenverkehr: BK 30\*
- Mittelstreckenverkehr: BK 60\*
- Langstreckenverkehr: BK 60\*

Die notwendigen Lastmodelle wären hier für sämtliche Kurz- und Langholztransporter ausreichend.



\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet.

### 7.8.4 Plattenbalkenbrücke L = 25 m, B = 10 m

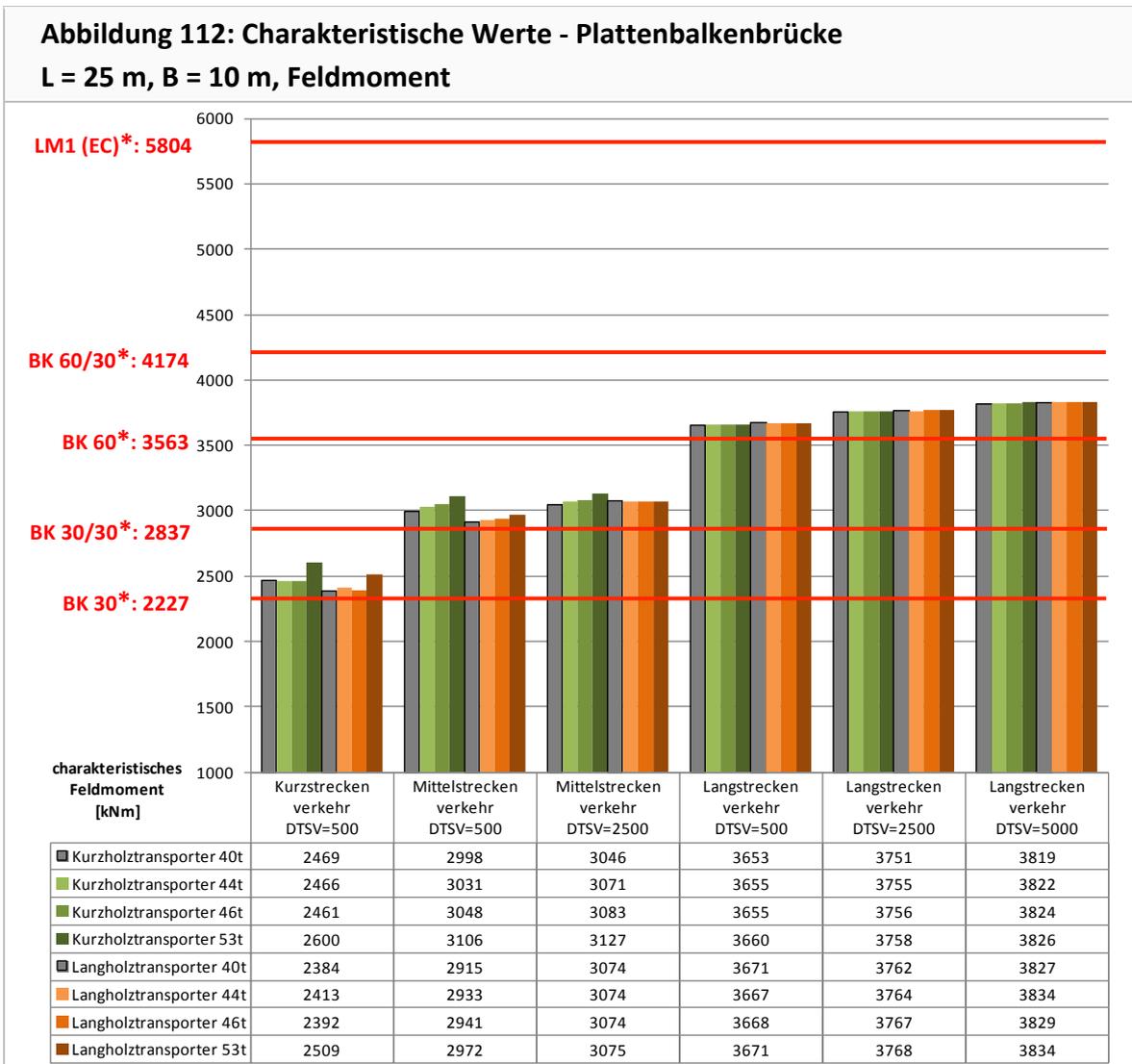
Für den Einfeldträger mit der Spannweite 25 m und einem zweistegigen Plattenbalken in Massivbauweise zeigt die folgende Abbildung die charakteristischen Feldmomente.

Im Vergleich zur bisherigen Zulassung der 40 t Kurzholztransporter (graue Balken) erhöht sich die Beanspruchung durch 44 t, 46 t und 53 t Kurzholztransporter um maximal 1,1 %, 1,7 % bzw. 5,3 %. Die Erhöhung durch 44 t, 46 t und 53 t Langholztransporter im Vergleich zu 40 t Langholztransportern (graue Balken) betragen maximal 1,2 %, 0,9 % bzw. 5,2 %. Die Verkehrskategorien mit der höchsten relativen Steigerung stellen dabei der Kurz- und Mittelstreckenverkehr dar.

Aus der Abbildung sind die mindestens notwendigen normativen Lastmodelle ersichtlich:

- Kurzstreckenverkehr: BK 30/30\*
- Mittelstreckenverkehr: BK 60\*
- Langstreckenverkehr: BK 60/30\*

Die notwendigen Lastmodelle wären hier für sämtliche Kurz- und Langholztransporter ausreichend.



\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet.

### 7.8.5 Plattenbrücke L = 25 m, B = 12 m

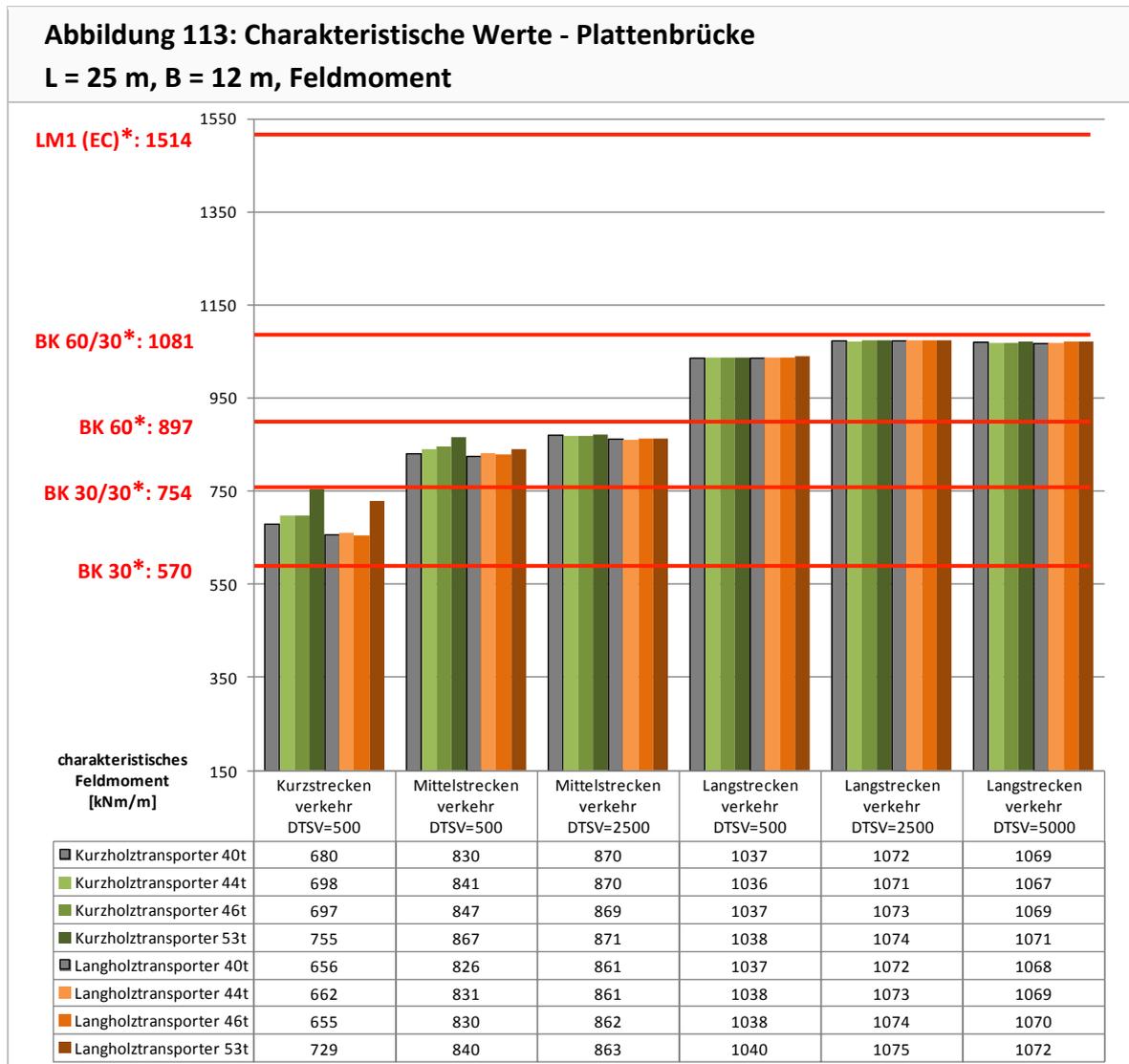
Für den Einfeldträger mit der Spannweite 25 m und einem Plattenquerschnitt in Massivbauweise zeigt die folgende Abbildung die charakteristischen Feldmomente.

Im Vergleich zur bisherigen Zulassung der 40 t Kurzholztransporter (graue Balken) erhöht sich die Beanspruchung durch 44 t, 46 t und 53 t Kurzholztransporter um maximal 2,6 %, 2,6 % bzw. 11,0 %. Die Erhöhung durch 44 t, 46 t und 53 t Langholztransporter im Vergleich zu 40 t Langholztransportern (graue Balken) betragen maximal 0,9 %, 0,9 % bzw. 11,1 %. Die Verkehrskategorie mit der höchsten relativen Steigerung stellt dabei der Kurzstreckenverkehr dar.

Aus der Abbildung sind die mindestens notwendigen normativen Lastmodelle ersichtlich:

- Kurzstreckenverkehr: BK 30/30\*
- Mittelstreckenverkehr: BK 60\*
- Langstreckenverkehr: BK 60/30\*

Ab den 53 t Kurzholztransportern wäre das notwendige Lastmodell im Kurzstreckenverkehr nicht mehr ausreichend.



\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet.

### 7.8.6 Plattenbalkenbrücke L = 45 m, B = 10 m

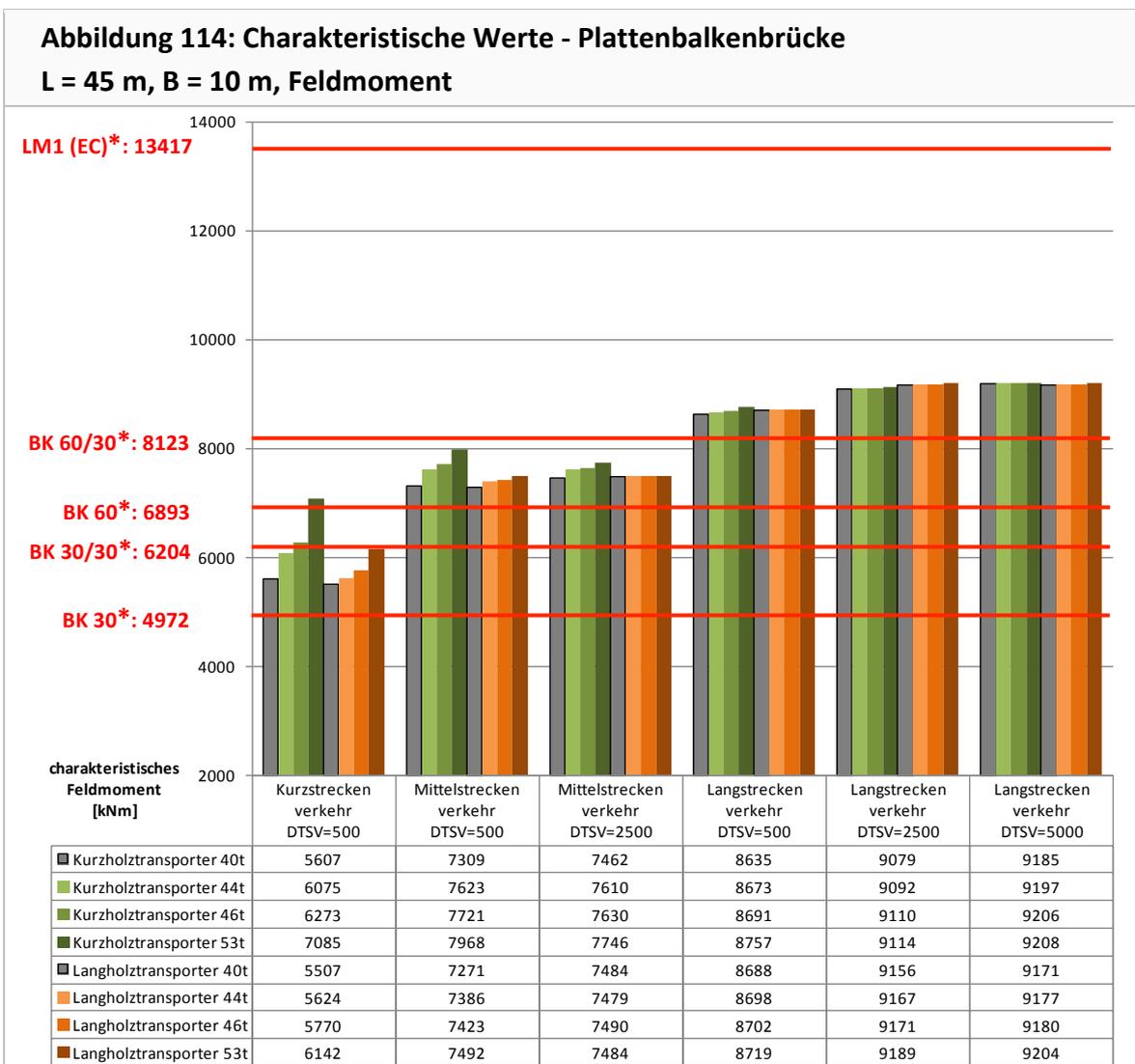
Für den Einfeldträger mit der Spannweite 45 m und einem zweistegigen Plattenbalken in Massivbauweise zeigt die folgende Abbildung die charakteristischen Feldmomente.

Im Vergleich zur bisherigen Zulassung der 40 t Kurzholztransporter (graue Balken) erhöht sich die Beanspruchung durch 44 t, 46 t und 53 t Kurzholztransporter um maximal 8,3 %, 11,9 % bzw. 26,4 %. Die Erhöhung durch 44 t, 46 t und 53 t Langholztransporter im Vergleich zu 40 t Langholztransportern (graue Balken) betragen maximal 2,1 %, 4,8 % bzw. 11,5 %. Die Verkehrskategorie mit der höchsten relativen Steigerung stellt dabei der Kurzstreckenverkehr dar.

Aus der Abbildung sind die mindestens notwendigen normativen Lastmodelle ersichtlich:

- Kurzstreckenverkehr: BK 30/30\*
- Mittelstreckenverkehr: BK 60/30\*
- Langstreckenverkehr: LM1 (EC)\*

Ab den 46 t Kurzholztransportern wäre das notwendige Lastmodell im Kurzstreckenverkehr nicht mehr ausreichend.



\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet.

**7.8.7 Plattenbalkenbrücke L = 25 + 25 m, B = 6 m**

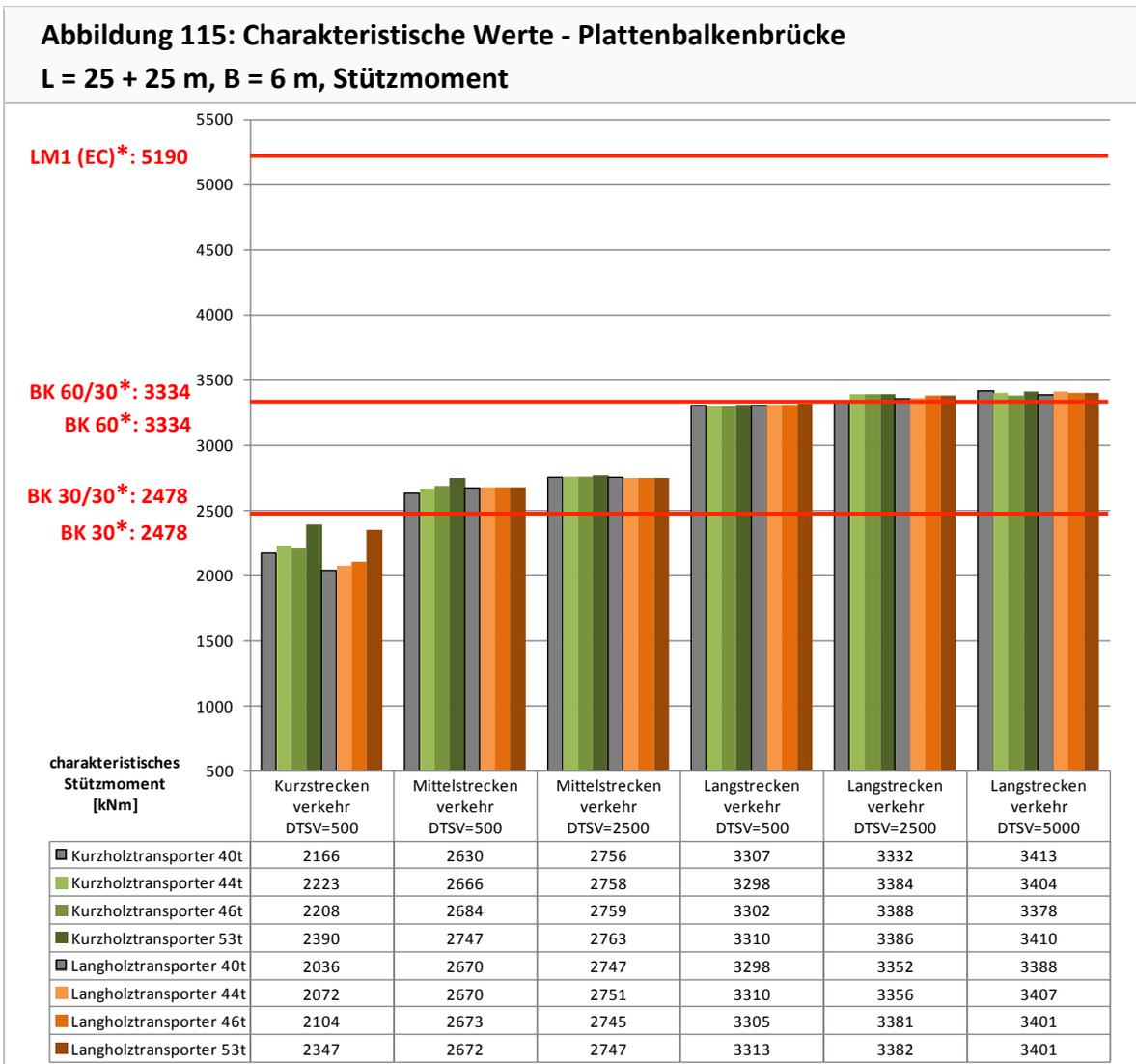
Für den Zweifeldträger mit den Spannweiten 2 x 25 m und einem einsteigigen Plattenbalken in Massivbauweise zeigt die folgende Abbildung die charakteristischen Stützmente.

Im Vergleich zur bisherigen Zulassung der 40 t Kurzholztransporter (graue Balken) erhöht sich die Beanspruchung durch 44 t, 46 t und 53 t Kurzholztransporter um maximal 2,6 %, 2,6 % bzw. 10,3 %. Die Erhöhung durch 44 t, 46 t und 53 t Langholztransporter im Vergleich zu 40 t Langholztransportern (graue Balken) betragen maximal 1,8 %, 3,3 % bzw. 15,3 %. Die Verkehrskategorie mit der höchsten relativen Steigerung stellt dabei der Kurzstreckenverkehr dar.

Aus der Abbildung sind die mindestens notwendigen normativen Lastmodelle ersichtlich:

- Kurzstreckenverkehr: BK 30\*
- Mittelstreckenverkehr: BK 60\*
- Langstreckenverkehr: LM1 (EC)\*

Die notwendigen Lastmodelle wären hier für sämtliche Kurz- und Langholztransporter ausreichend.



\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet.

**7.8.8 Plattenbalkenbrücke L = 25 + 25 m, B = 10,5 m**

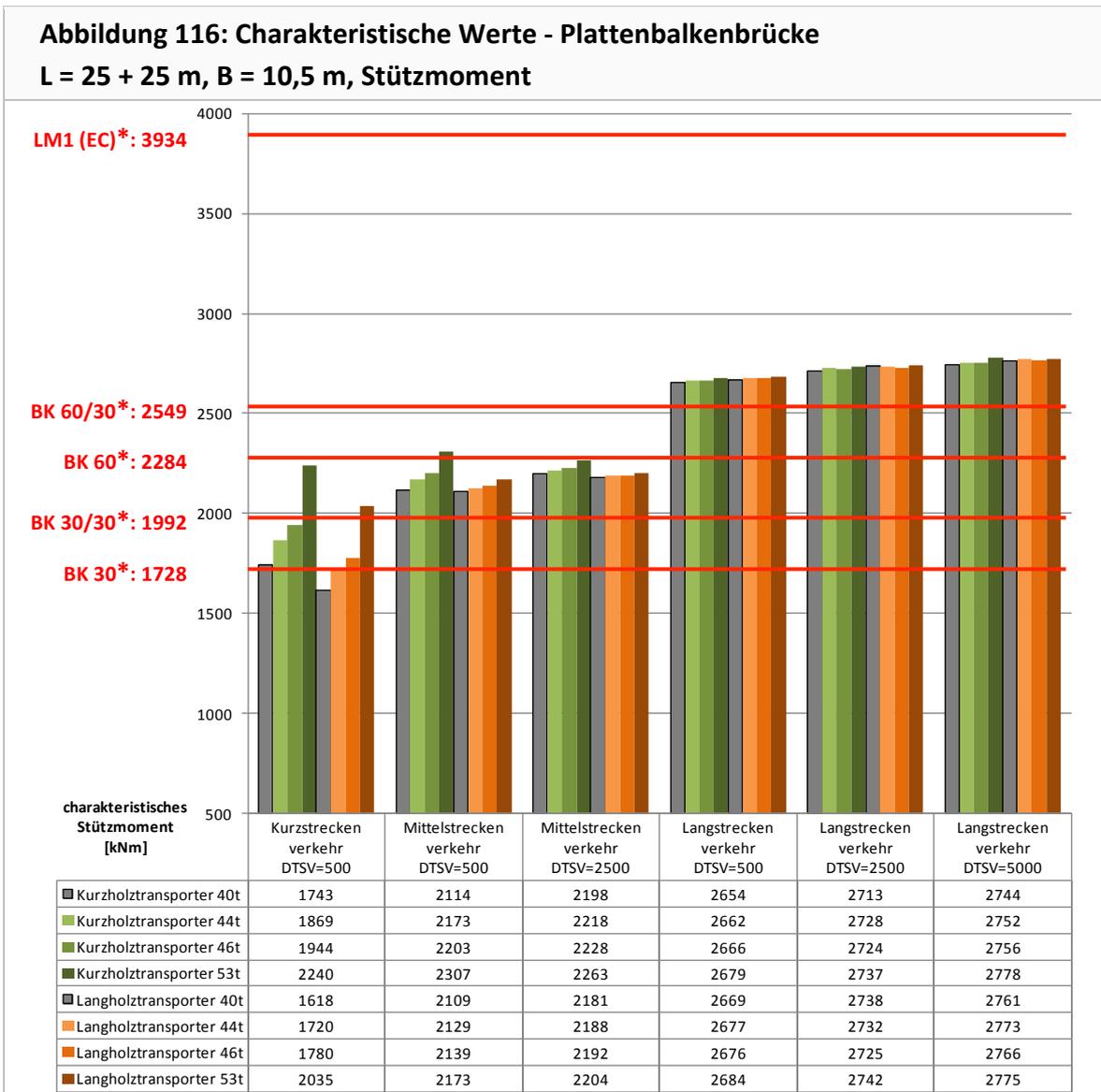
Für den Zweifeldträger mit den Spannweiten 2 x 25 m und einem zweistegigen Plattenbalken in Massivbauweise zeigt die folgende Abbildung die charakteristischen Stützmente.

Im Vergleich zur bisherigen Zulassung der 40 t Kurzholztransporter (graue Balken) erhöht sich die Beanspruchung durch 44 t, 46 t und 53 t Kurzholztransporter um maximal 7,2 %, 11,5 % bzw. 28,5 %. Die Erhöhung durch 44 t, 46 t und 53 t Langholztransporter im Vergleich zu 40 t Langholztransportern (graue Balken) betragen maximal 6,3 %, 10,0 % bzw. 25,8 %. Die Verkehrskategorie mit der höchsten relativen Steigerung stellt dabei der Kurzstreckenverkehr dar.

Aus der Abbildung sind die mindestens notwendigen normativen Lastmodelle ersichtlich:

- Kurzstreckenverkehr: BK 30/30\*
- Mittelstreckenverkehr: BK 60\*
- Langstreckenverkehr: LM1 (EC)\*

Ab den 53 t Kurz- oder Langholztransportern wäre das notwendige Lastmodell im Kurzstrecken- und für 53 t Kurzholztransporter auch im Mittelstreckenverkehr nicht mehr ausreichend.



\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet.

**7.8.9 Plattenbalkenbrücke L = 11 + 15 + 11 m, B = 6 m**

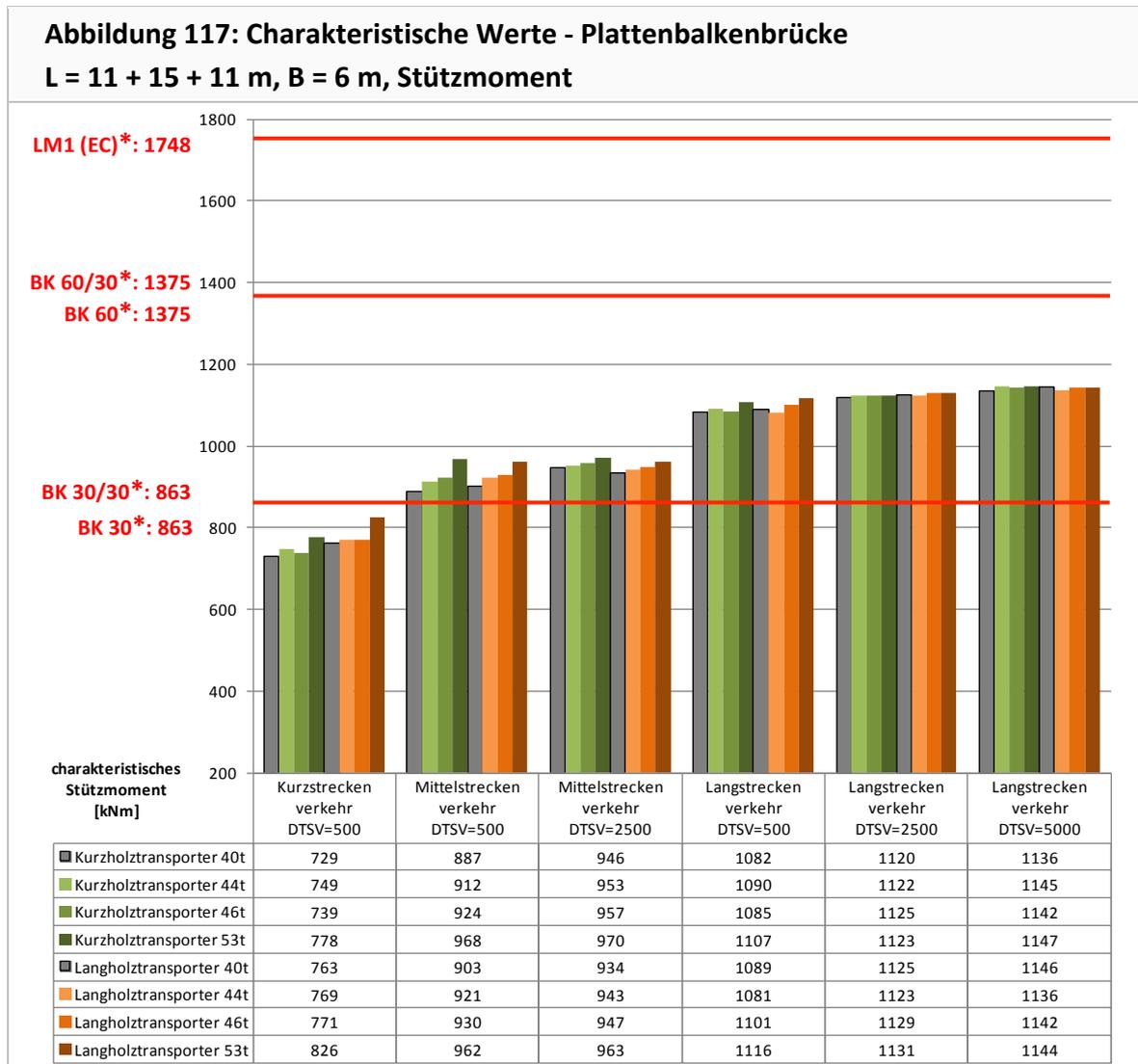
Für den Dreifeldträger mit den Spannweiten 11 + 15 + 11 m und einem einsteigigen Plattenbalken in Massivbauweise zeigt die folgende Abbildung die charakteristischen Stützmente.

Im Vergleich zur bisherigen Zulassung der 40 t Kurzholztransporter (graue Balken) erhöht sich die Beanspruchung durch 44 t, 46 t und 53 t Kurzholztransporter um maximal 2,8 %, 4,2 % bzw. 9,1 %. Die Erhöhung durch 44 t, 46 t und 53 t Langholztransporter im Vergleich zu 40 t Langholztransportern (graue Balken) betragen maximal 2,0 %, 3,0 % bzw. 8,3 %. Die Verkehrskategorien mit der höchsten relativen Steigerung stellen dabei der Kurz- und Mittelstreckenverkehr dar.

Aus der Abbildung sind die mindestens notwendigen normativen Lastmodelle ersichtlich:

- Kurzstreckenverkehr: BK 30\*
- Mittelstreckenverkehr: BK 60\*
- Langstreckenverkehr: BK 60\*

Die notwendigen Lastmodelle wären hier für sämtliche Kurz- und Langholztransporter ausreichend.



\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet.

### 7.8.10 Plattenbrücke L = 11 + 15 + 11 m, B = 12 m

Für den Dreifeldträger mit den Spannweiten 11 + 15 + 11 m und einem Plattenquerschnitt in Massivbauweise zeigt die folgende Abbildung die charakteristischen Stützmomente.

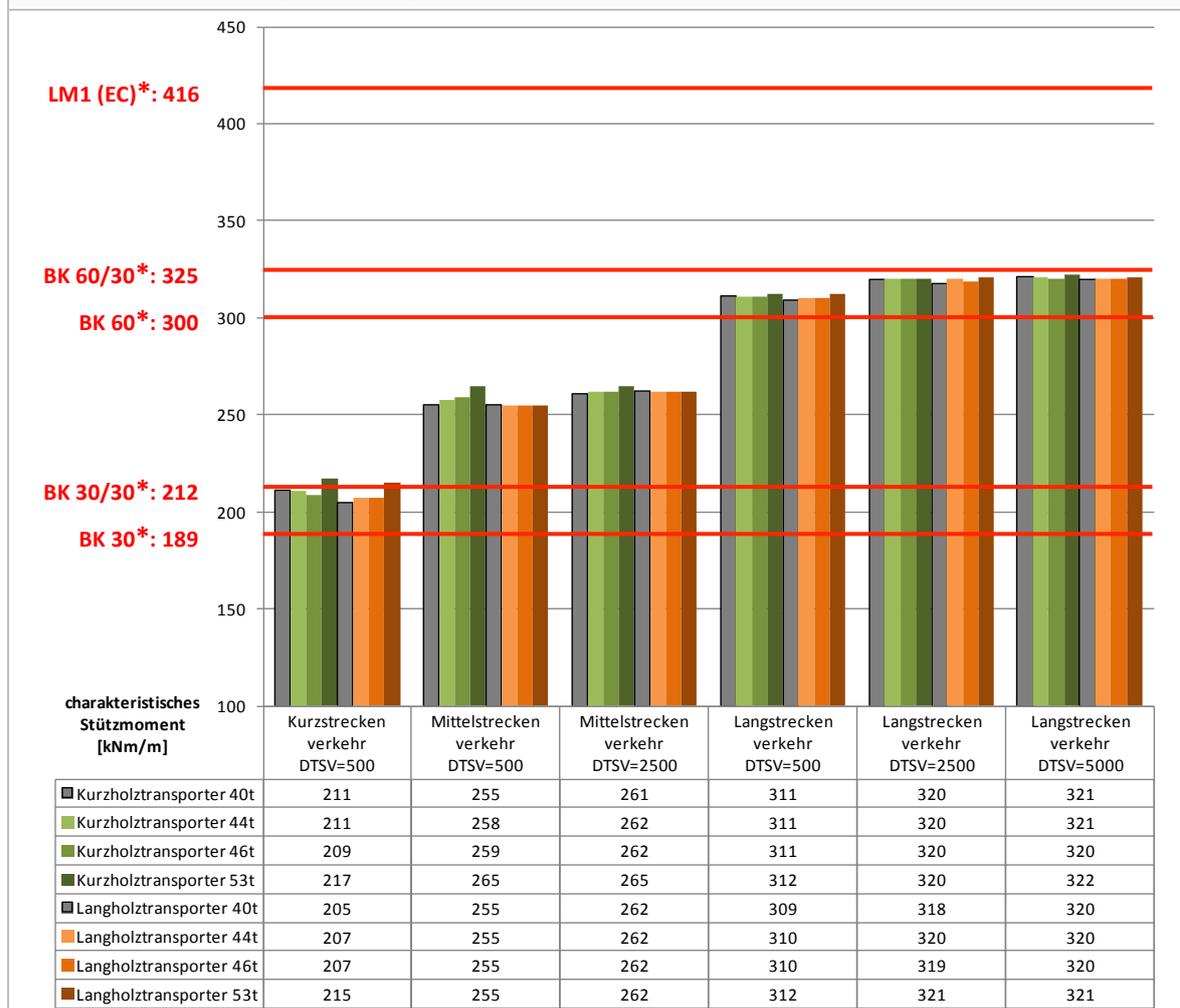
Im Vergleich zur bisherigen Zulassung der 40 t Kurzholztransporter (graue Balken) erhöht sich die Beanspruchung durch 44 t, 46 t und 53 t Kurzholztransporter um maximal 1,2 %, 1,6 % bzw. 3,9 %. Die Erhöhung durch 44 t, 46 t und 53 t Langholztransporter im Vergleich zu 40 t Langholztransportern (graue Balken) betragen maximal 1,0 %, 1,0 % bzw. 4,9 %. Die Verkehrskategorien mit der höchsten relativen Steigerung stellen dabei der Kurz- und Mittelstreckenverkehr dar.

Aus der Abbildung sind die mindestens notwendigen normativen Lastmodelle ersichtlich:

- Kurzstreckenverkehr: BK 30/30\*
- Mittelstreckenverkehr: BK 60\*
- Langstreckenverkehr: BK 60/30\*

Ab einer Zulassung von 53 t Kurz- oder 53 t Langholztransportern wäre das notwendige Lastmodell im Kurzstreckenverkehr nicht mehr ausreichend.

**Abbildung 118: Charakteristische Werte - Plattenbrücke**  
**L = 11 + 15 + 11 m, B = 12 m, Stützmoment**



\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet.

**7.8.11 Plattenbalkenbrücke L = 17 + 27 + 17 m, B = 10 m**

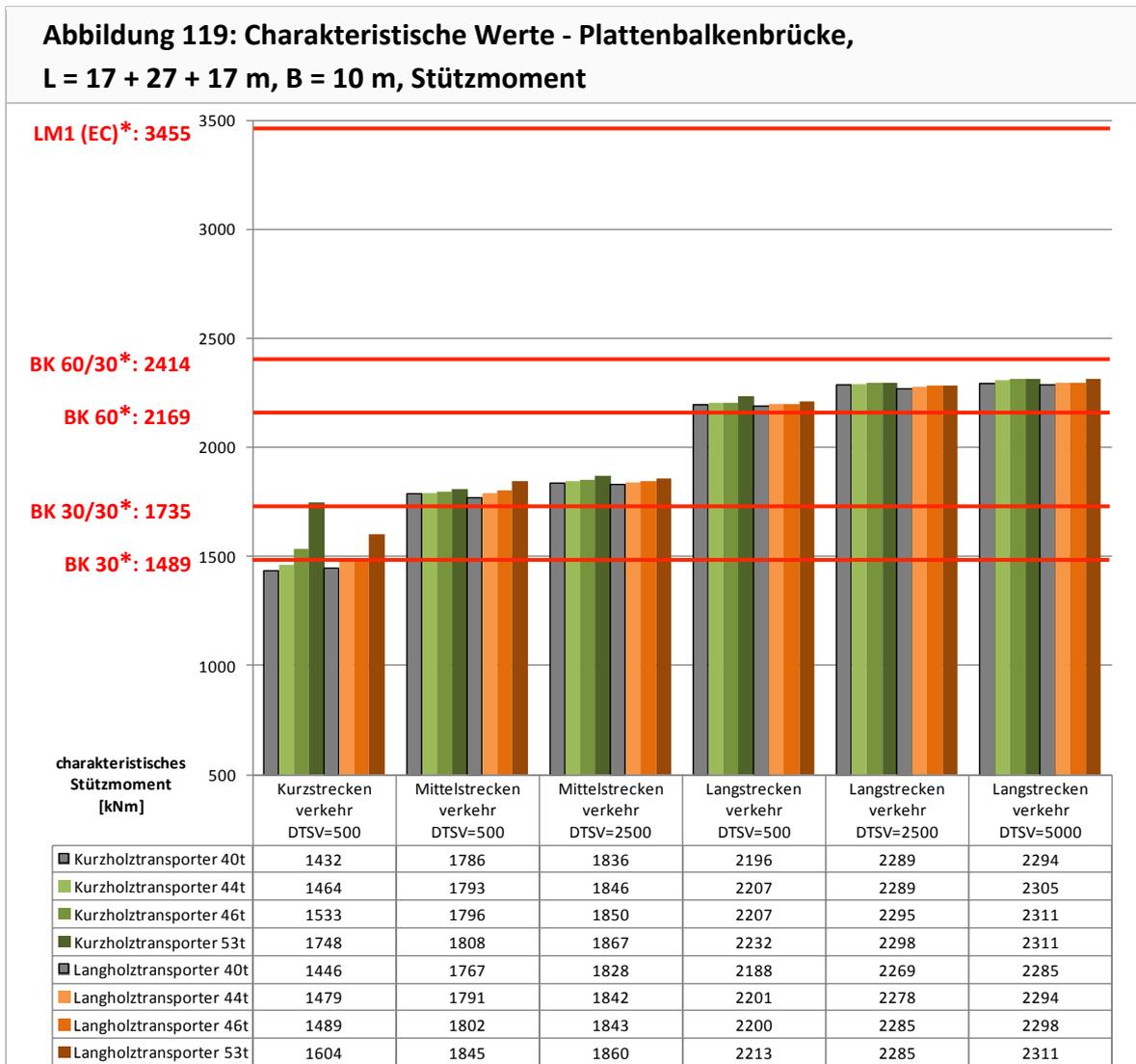
Für den Dreifeldträger mit den Spannweiten 17 + 27 + 17 m und einem zweistegigen Plattenbalken in Massivbauweise zeigt die folgende Abbildung die charakteristischen Stützmente.

Im Vergleich zur bisherigen Zulassung der 40 t Kurzholztransporter (graue Balken) erhöht sich die Beanspruchung durch 44 t, 46 t und 53 t Kurzholztransporter um maximal 2,2 %, 7,1 % bzw. 22,1 %. Die Erhöhung durch 44 t, 46 t und 53 t Langholztransporter im Vergleich zu 40 t Langholztransportern (graue Balken) betragen maximal 2,3 %, 3,0 % bzw. 10,9 %. Die Verkehrskategorie mit der höchsten relativen Steigerung stellt dabei der Kurzstreckenverkehr dar.

Aus der Abbildung sind die mindestens notwendigen normativen Lastmodelle ersichtlich:

- Kurzstreckenverkehr: BK 30\*
- Mittelstreckenverkehr: BK 60\*
- Langstreckenverkehr: BK 60/30\*

Ab einer Zulassung von 46 t Kurz- oder 53 t Langholztransportern wäre das notwendige Lastmodell im Kurzstreckenverkehr nicht mehr ausreichend.



\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet.

**7.8.12 Hohlkastenbrücke L = 31 + 45 + 31 m, B = 10 m**

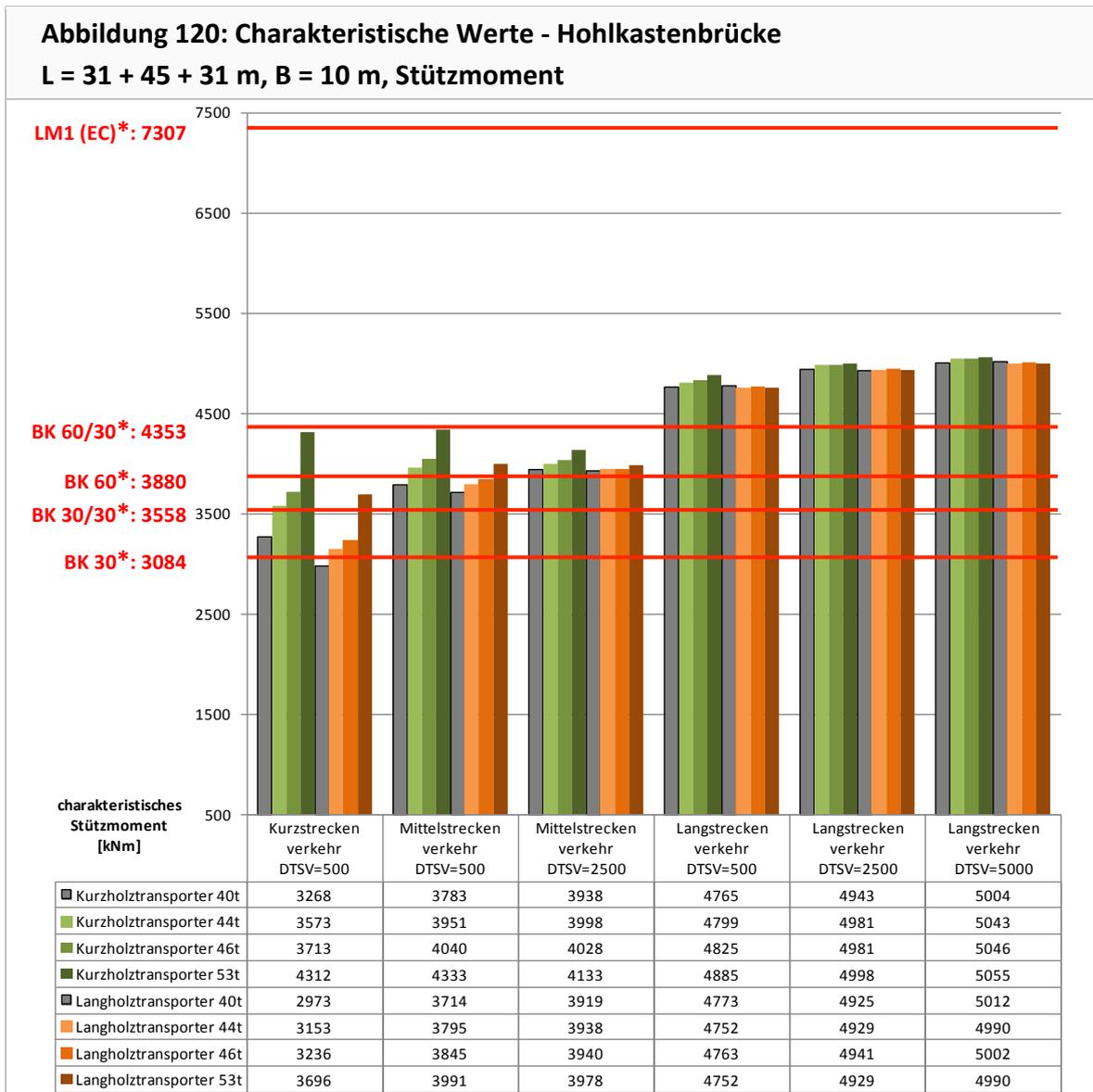
Für den Dreifeldträger mit den Spannweiten 31 + 45 + 31 m und einzelligem Hohlkastenquerschnitt in Massivbauweise zeigt die folgende Abbildung die charakteristischen Stützmente.

Im Vergleich zur bisherigen Zulassung der 40 t Kurzholztransporter (graue Balken) erhöht sich die Beanspruchung durch 44 t, 46 t und 53 t Kurzholztransporter um maximal 9,3 %, 13,6 % bzw. 31,9 %. Die Erhöhung durch 44 t, 46 t und 53 t Langholztransporter im Vergleich zu 40 t Langholztransportern (graue Balken) betragen maximal 6,1 %, 8,8 % bzw. 24,3 %. Die Verkehrskategorie mit der höchsten relativen Steigerung stellt dabei der Kurzstreckenverkehr dar.

Aus der Abbildung sind die mindestens notwendigen normativen Lastmodelle ersichtlich:

- Kurzstreckenverkehr: BK 30/30\*
- Mittelstreckenverkehr: BK 60/30\*
- Langstreckenverkehr: LM1 (EC)\*

Ab einer Zulassung von 44 t Kurz- oder 53 t Langholztransportern wäre das notwendige Lastmodell im Kurzstreckenverkehr nicht mehr ausreichend.



\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet.

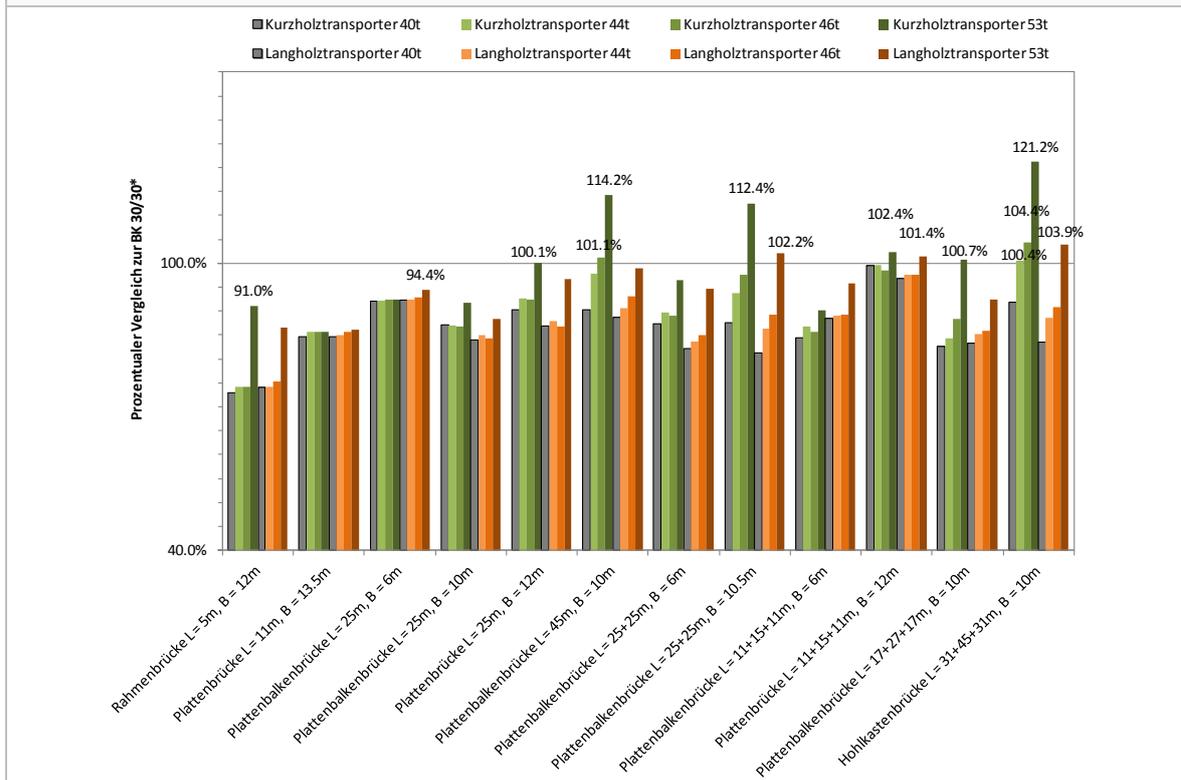
## 7.9 Übersicht

Die Ergebnisse der Verkehrslastsimulationen werden nachfolgend in einer Übersicht zusammengefasst dargestellt. Dazu werden die charakteristischen Werte der untersuchten Brückentypen so aufbereitet, dass je Verkehrsart ein einheitlicher Vergleich möglich ist. Als Referenz dient jeweils ein normatives Lastmodell.

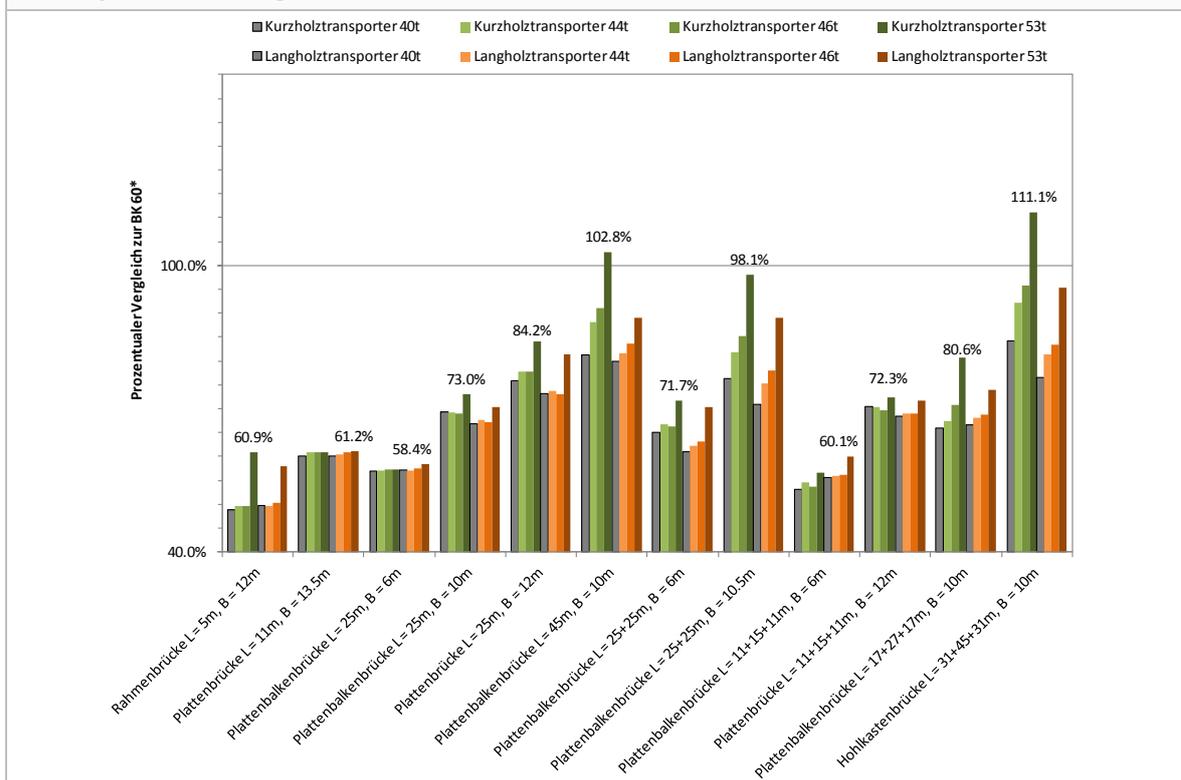
Gemäß der aktuellen Zulassung sind auch im heutigen Verkehr 40 t LKW zu erwarten. Bei Betrachtung der charakteristischen Beanspruchung der Szenarien mit 40 t LKW lässt sich daher für jede Verkehrsart ein mindestens notwendiges normatives Lastmodell begründen. Eine Zusammenfassung sämtlicher Brückentypen dieser Arbeit zeigt für den hier definierten "Langstreckenverkehr" erwartungsgemäß das LM1\*, für den "Mittelstreckenverkehr" BK 60/30\* und für "Kurzstreckenverkehr" BK 30/30\* als jeweils notwendiges Lastmodell.

In Abbildung 121 bis Abbildung 124 wird der Vergleich prozentual dargestellt. Werte über 100 % zeigen eine Überschreitung des normativen Lastmodells an. Deutlich erkennbar ist der "Kurzstreckenverkehr" als maßgebende Verkehrsart aufgrund der teilweise deutlichen Überschreitung des mindestens notwendigen normativen Lastmodells. Im "Mittel-" und "Langstreckenverkehr" sind keine Überschreitungen der mindestens notwendigen normativen Lastmodelle festzustellen.

**Abbildung 121: Auslastung bei Verkehrsart "Kurzstreckenverkehr", beispielhaft bezogen auf BK 30/30\***

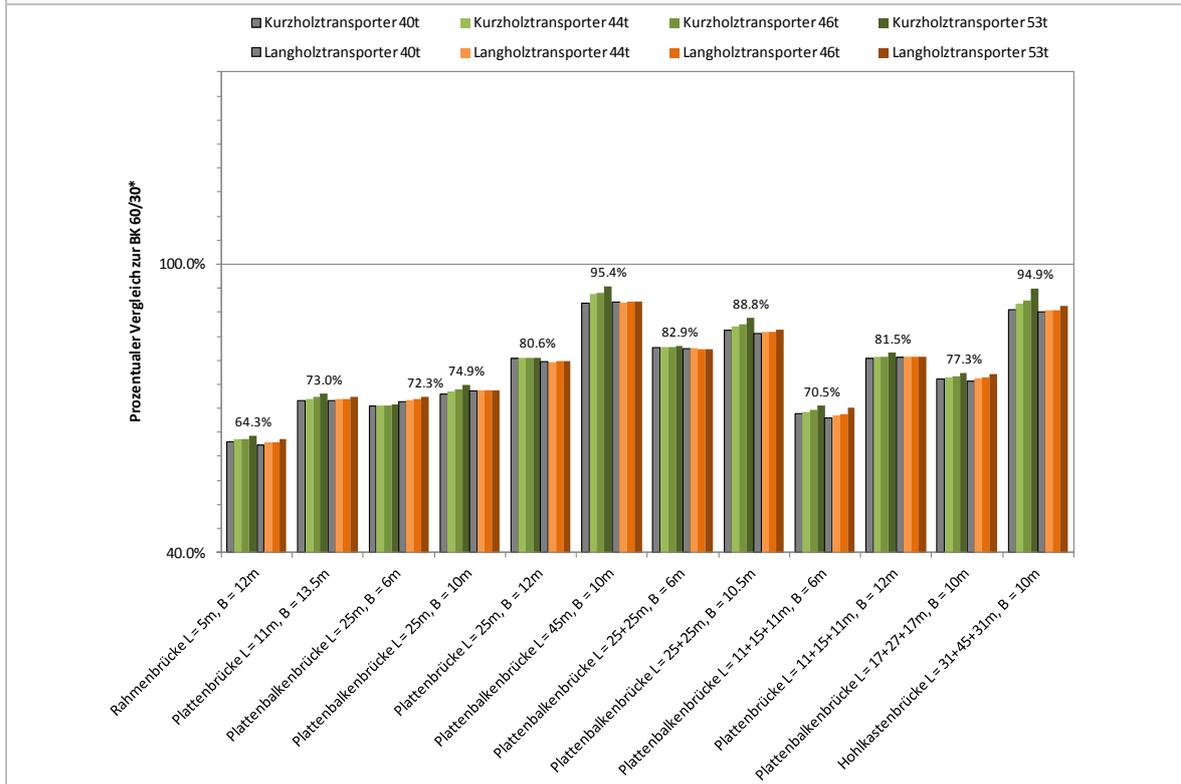


**Abbildung 122: Auslastung bei Verkehrsart "Kurzstreckenverkehr", beispielhaft bezogen auf BK 60\***

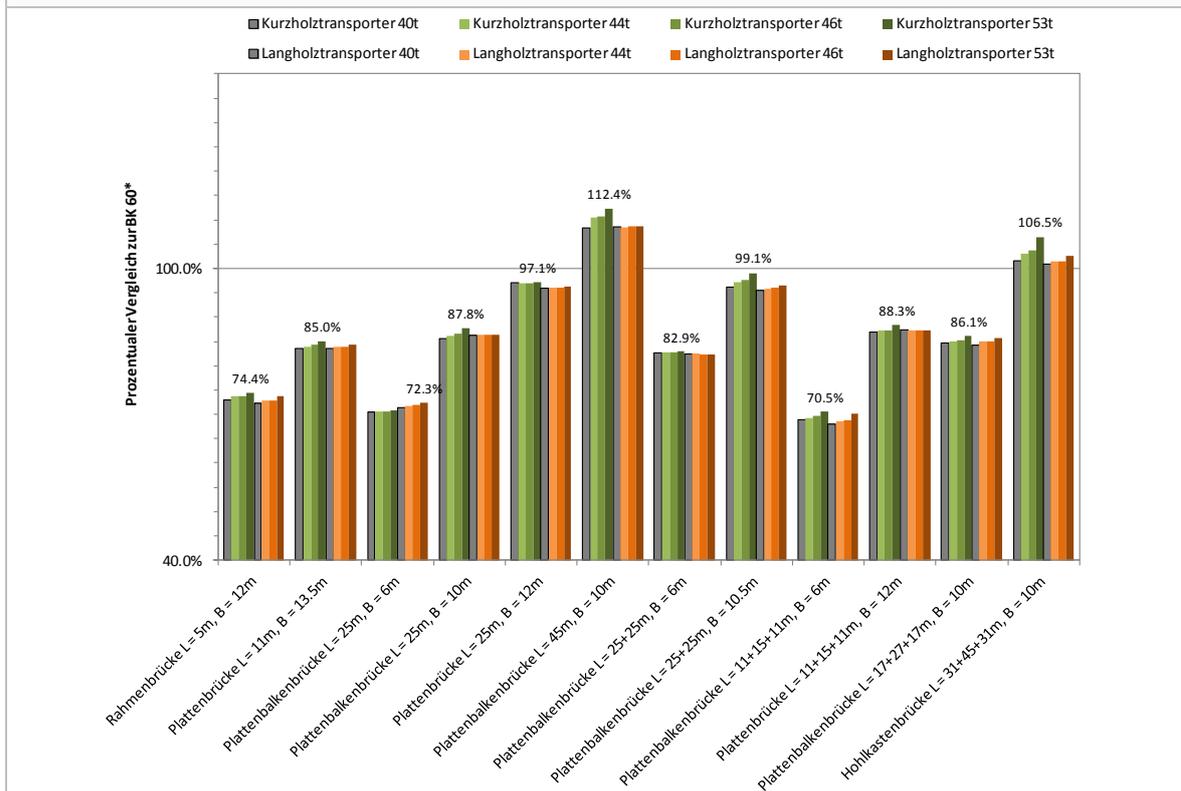


\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet.

**Abbildung 123: Auslastung bei Verkehrsart "Mittelstreckenverkehr", beispielhaft bezogen auf BK 60/30\***



**Abbildung 124: Auslastung bei Verkehrsart "Mittelstreckenverkehr", beispielhaft bezogen auf BK 60\***



\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet.

## 7.10 Zusammenfassung

### Einfluss der Fahrzeuggeometrie

Allgemein lässt sich feststellen, dass neben dem zulässigen Gesamtgewicht insbesondere auch die Fahrzeuggeometrie einen maßgebenden Einfluss auf die Beanspruchung der Brücken hat. Langholztransporter haben aufgrund ihrer günstigen Geometrie (großer Abstand der Hinterachsen zur Zugmaschine) eine deutlich geringere Flächenlast als Kurzholztransporter bei gleichem Fahrzeuggesamtgewicht. Die wesentlich größere Gesamtlänge des Langholztransporters macht sich besonders auch im Vergleich zum typischen Sattelzug (Typ 98, mit zweiachsiger Zugmaschine und dreiachsigem Sattelaufleger) durch eine geringere Beanspruchung der Brücken bei gleichem Fahrzeuggesamtgewicht bemerkbar.

### Einfluss des Hintergrundverkehrs

Das hier verwendete Fahrzeugkollektiv "Langstreckenverkehr" stellt keinen extremen, sondern durchschnittlichen Autobahnverkehr dar. Es ist daher nicht identisch mit dem extremen Fahrzeugkollektiv der Brohltalbrücke entlang der A61.

Die Auswertung von Dauerzählstellen außerhalb der hier untersuchten Beispielregionen zeigt weiterhin, dass auch deutlich höhere Schwerverkehrsaufkommen als die hier untersuchten DTSV-Werte von täglich 5.000 LKW je Richtung auftreten können.

Die Auswertung der Verkehrslastsimulationen zeigt jedoch, dass eine Zulassung höherer Gesamtgewichte der Holztransporter im Bereich des "Langstreckenverkehrs" (DTSV = 5000) nur geringfügige Auswirkungen hat. Die maximale Zunahme der charakteristischen Beanspruchung beträgt hier 1,2 %. Auswirkungen im "Kurzstreckenverkehr" (DTSV = 500) sind dagegen deutlich bemerkbar. Die maximale Zunahme beträgt hier 32 %. Der Einfluss nimmt also bei zunehmender Verkehrsbeanspruchung ab.

### Einfluss von Achslastmesssystemen

Ein weiteres Ergebnis der hier durchgeführten Untersuchungen betrifft den Einfluss von Achslastmesssystemen als Kompensationsmaßnahme zur Verhinderung von Überladungen.

Durch die natürliche Streuung der Fahrzeuggesamtgewichte musste in bisherigen Untersuchungen von einer nach oben offenen Verteilung der Gesamtgewichte ausgegangen werden. Dementsprechend wurden die Fahrzeuge des Hintergrundverkehrs in dieser Arbeit ohne Begrenzung der Streuung abgebildet. Mit Achslastmesssystemen als Voraussetzung für höhere Gesamtgewichte konnten dagegen die Gesamtgewichte der Holz-LKW deterministisch angesetzt werden.

Der positive Effekt dieser abgeschnittenen Verteilung macht sich den Ergebnissen zufolge erst im "Langstreckenverkehr" bemerkbar. Im "Kurzstreckenverkehr" lässt sich jedoch kein positiver Effekt beobachten. Je mehr Fahrzeuge mit hohen Gesamtgewichten im Hintergrundverkehr auftreten, desto deutlicher ist der positive Effekt erkennbar.

Die Auswirkungen einer Erhöhung der zulässigen Gesamtgewichte ohne Achslastmesssystem wurden in dieser Untersuchung nicht ermittelt.

### Zunahme der charakteristischen Brückenbeanspruchung

Die vergleichende Auswertung sämtlicher Verkehrslastsimulationen dieser Arbeit liefert eine Aussage über die maximal zu erwartende Zunahme der charakteristischen Brückenbeanspruchung bei unterschiedlich schweren Holztransportern.

Gemäß der aktuellen Zulassung ist in allen Verkehrskategorien bereits jetzt mit 40 t LKW zu rechnen. Dementsprechend werden die Simulationen mit höherem zulässigem Gesamtgewicht jeweils mit dem Szenario der 40 t Holz-LKW verglichen. Zu beachten ist, dass sämtliche Holztransporter mit festen (deterministischen) Gesamtgewichten betrachtet werden.

Die folgende Tabelle zeigt die maximale prozentuale Zunahme der charakteristischen Beanspruchung zusammenfassend über sämtliche Brückentypen dieser Untersuchung. Die maßgebende Verkehrskategorie stellt dabei stets der "Kurzstreckenverkehr" dar. Kurz- und Langholztransporter werden aufgrund ihrer Fahrzeuggeometrie getrennt betrachtet.

<b>Tabelle 69: Maximale Zunahme der charakteristischen Brückenbeanspruchungen im Vergleich zur bisherigen Zulassung der 40 t-LKW</b>				
	<b>40 t</b>	<b>44 t</b>	<b>46 t</b>	<b>53 t</b>
<b>Kurzholztransporter</b>	100 %	109 %	114 %	132 %
<b>Langholztransporter</b>	100 %	106 %	110 %	126 %

Quelle: Eigene Abbildung

### Vergleich der Ergebnisse mit mindestens notwendigen normativen Lastmodellen

Der entscheidende Vergleich lässt sich schließlich zwischen den Ergebnissen der Verkehrslastsimulationen und den mindestens notwendigen normativen Lastmodellen anstellen.

Wie bereits erwähnt, sind 40 t LKW gemäß der aktuellen Zulassung auch im heutigen Verkehr zu erwarten. Bei Betrachtung der charakteristischen Beanspruchung der Szenarien mit 40 t LKW lässt sich daher für jede Verkehrsart ein mindestens notwendiges normatives Lastmodell begründen. Eine Zusammenfassung sämtlicher Brückentypen dieser Arbeit zeigt für den hier definierten "Langstreckenverkehr" erwartungsgemäß das LM1\*, für den "Mittelstreckenverkehr" BK 60/30\* und für "Kurzstreckenverkehr" BK 30/30\* als jeweils notwendiges Lastmodell.

Die mindestens notwendigen Lastmodelle werden schließlich mit den Szenarien der höheren zulässigen Gesamtgewichte verglichen. Im "Lang-" und "Mittelstreckenverkehr" sind keine Überschreitungen festzustellen. Im "Kurzstreckenverkehr" treten teilweise größere Überschreitungen gegenüber BK 30/30\* auf. Diese maßgebenden Überschreitungen werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

<b>Tabelle 70: Maßgebende Überschreitungen des mindestens notwendigen normativen Lastmodells BK 30/30* im "Kurzstreckenverkehr"</b>				
	<b>40 t</b>	<b>44 t</b>	<b>46 t</b>	<b>53 t</b>
<b>Kurzholztransporter</b>	0 %	+0,4 %	+4,4 %	+21,2 %
<b>Langholztransporter</b>	0 %	0 %	0 %	+3,9 %

Quelle: Eigene Abbildung

\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet.

Es zeigt sich, dass in den Szenarien der Kurzholztransporter ab einem zulässigen Gesamtgewicht von 44 t geringfügige (0,4 %) und ab 46 t bereits deutliche Überschreitungen (4,4 %) der mindestens notwendigen Lastmodelle auftreten. Bezüglich der Langholztransporter treten erste Überschreitungen im Szenario der 53 t LKW auf (3,9 %). In den 0 %-Kategorien zeigen die zugehörigen Szenarien der Verkehrslastsimulation auf sämtlichen Brückentypen dieser Arbeit keine Überschreitung der mindestens notwendigen normativen Lastmodelle. Ein Vergleich der beiden Fahrzeugtypen bestätigt den entscheidenden Einfluss der Fahrzeuggeometrie, wonach sich größere Gesamtlängen günstiger bezüglich der charakteristischen Brückenbeanspruchung auswirken.

## 7.11 Literatur

- Böning, S. (2013): Entwicklung einer geschlossenen Vorgehensweise zur Ermittlung von Beanspruchungen von Brückenbauwerken infolge Straßenverkehr. Dissertation. Bauhaus-Universität Weimar.
- Fitschen, A.; Nordmann, H. (2014): Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2012. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach.
- Frenzel, B.; et al. (1996): Bestimmung von Kombinationsbeiwerten und -regeln für Einwirkungen auf Brücken. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Bundesministerium für Verkehr. Bonn-Bad Godesberg.
- Freundt, U.; Böning, S. (2011): Anpassung von DIN-Fachberichten "Brücken" an Eurocodes, Teil 1: DIN-FB 101: "Einwirkungen auf Brücken". Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach.
- Geißler, K. (1995): Beitrag zur probabilistischen Berechnung der Restnutzungsdauer stählerner Brücken. Dissertation. TU Dresden.
- Geißler, K. (2009): Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen, Teil 4: Auswirkung der Zulassung von 60t-Lkw auf Brückenbauwerke im Zuge der Bundesfernstraßen. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach.
- Günther, H.-P. (2002): Ermüdungsverhalten von Stahlträgern mit schlanken Stegblechen im Brückenbau. Dissertation. Universität Stuttgart.
- Kaschner, R. (2009): Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen, Teil 1: Auswirkungen des zunehmenden Schwerverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach.
- Kühne, R. (2004): FGSV Merkblatt (Entwurf) - Das Fundamentaldiagramm - Grundlagen und Anwendung. Berlin.
- Merzenich, G. (1994): Entwicklung eines europäischen Verkehrslastmodells für die Bemessung von Straßenbrücken. Dissertation. RWTH Aachen.
- NaRiLi (2011): Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- Pohl, S. (1993): Definition von charakteristischen Werten für Straßenverkehrslastmodelle auf der Basis der Fahrzeuge sowie Fraktilwert der Lasten des Eurocode 1 - Modells. Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Spaethe, G. (1992): Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen. Springer Verlag. Berlin.
- TLS (2012): Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen. Bundesanstalt für Straßenwesen. Berlin.
- Verkehrsmonitoring BW (2013): Verkehrsmonitoring 2013 Baden-Württemberg. RP Tübingen, Abt. 9 Landesstelle für Straßentechnik.

---

## 7.12 Anlagen

---

### Anlage 1: Grundlegende Fahrzeugkollektive

---

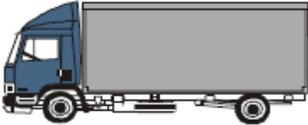
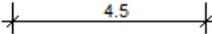
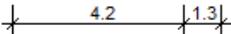
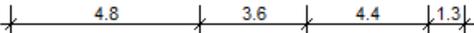
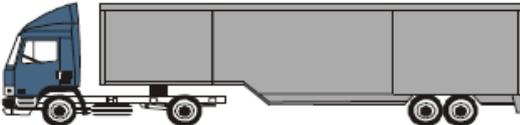
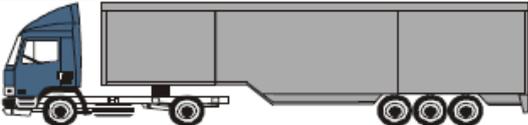
Die hier verwendeten Fahrzeugkollektive entsprechen weitestgehend der Arbeit von Pohl<sup>265</sup>. Neuere Verkehrsmessungen bezüglich der Fahrzeugtypenverteilung können der Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand<sup>266</sup> entnommen werden. Die Fahrzeugkollektive wurden dementsprechend modifiziert.

---

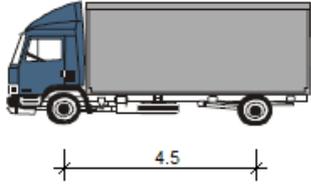
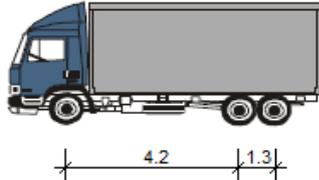
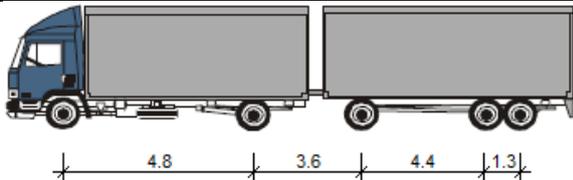
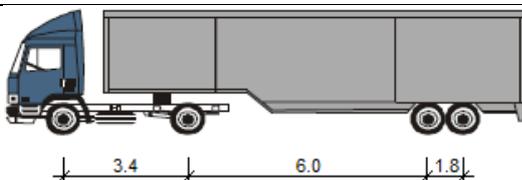
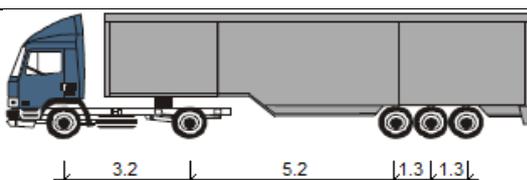
<sup>265</sup> Pohl, S. (1993)

<sup>266</sup> NaRiLi (2011)

**Fahrzeugkollektiv "Kurzstreckenverkehr" nach Pohl**

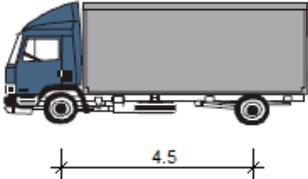
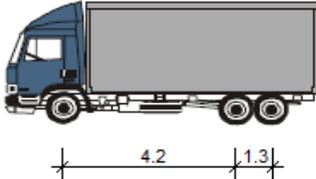
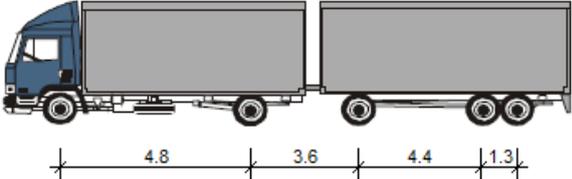
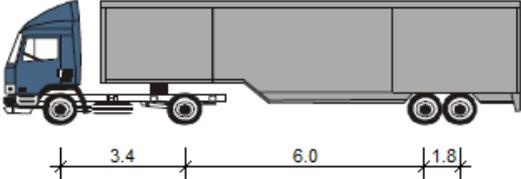
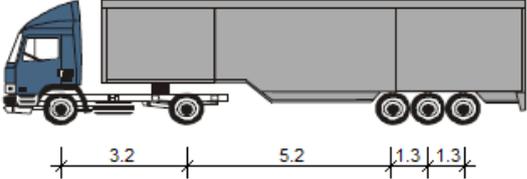
LKW-Typ (Kennziffer)	Geometrie und Lastverteilung	Auftrittens- wahrschein- lichkeit [%]	Gesamtgewicht von Fahrzeug und Ladung (normalverteilt)	
			$\mu$ [kN]	$\sigma$ [kN]
<b>Typ 8</b>   <div style="text-align: center;">  </div> Fahrzeug 0,60            0,40 Ladung 0,20            0,80	80	30	10	
<b>Typ 9</b>   <div style="text-align: center;">  </div> Fahrzeug 0,60            0,20 0,20 Ladung 0,12            0,44 0,44	5	35	15	
<b>Typ 35</b>   <div style="text-align: center;">  </div> Fahrzeug 0,30            0,22 0,18 0,15 0,15 Ladung 0,06            0,32 0,22 0,20 0,20	5	90	35	
<b>Typ 97</b>   <div style="text-align: center;">  </div> Fahrzeug 0,40    0,28                    0,16 0,16 Ladung 0,04    0,40                    0,28 0,28	5	75	30	
<b>Typ 98</b>   <div style="text-align: center;">  </div> Fahrzeug 0,36    0,25                    0,13 0,13 0,13 Ladung 0,00    0,34                    0,22 0,22 0,22	5	95	35	
			125	45
			135	50
			150	60

**Fahrzeugkollektiv "Mittelstreckenverkehr" nach Pohl, modifiziert nach NaRiLi**

LKW-Typ (Kennziffer)	Geometrie und Lastverteilung	Auftrittens- wahrschein- lichkeit [%]	Gesamtgewicht von Fahrzeug und Ladung (normalverteilt)	
			$\mu$ [kN]	$\sigma$ [kN]
<b>Typ 8</b>  Fahrzeug Ladung	 <p>4.5</p> <p>0,60      0,40</p> <p>0,20      0,80</p>	40	45 80	20 30
<b>Typ 9</b>  Fahrzeug Ladung	 <p>4.2      1.3</p> <p>0,60      0,20 0,20</p> <p>0,12      0,44 0,44</p>	10	45 150	20 60
<b>Typ 35</b>  Fahrzeug Ladung	 <p>4.8      3.6      4.4      1.3</p> <p>0,30      0,22      0,18      0,15 0,15</p> <p>0,06      0,32      0,22      0,20 0,20</p>	5	105 160	40 65
<b>Typ 97</b>  Fahrzeug Ladung	 <p>3.4      6.0      1.8</p> <p>0,40      0,28      0,16 0,16</p> <p>0,04      0,40      0,28 0,28</p>	15	90 150	35 60
<b>Typ 98</b>  Fahrzeug Ladung	 <p>3.2      5.2      1.3 1.3</p> <p>0,36      0,25      0,13 0,13 0,13</p> <p>0,00      0,34      0,22 0,22 0,22</p>	30	110 180	40 70

**Fahrzeugkollektiv "Langstreckenverkehr" nach Pohl, modifiziert nach NaRiLi**

LKW-Typ		Auftrittens-	Gesamtgewicht von
---------	--	--------------	-------------------

(Kennziffer)	Geometrie und Lastverteilung	wahrscheinlichkeit [%]	Fahrzeug und Ladung (normalverteilt)	
			$\mu$ [kN]	$\sigma$ [kN]
<b>Typ 8</b>   Fahrzeug Ladung	0,60      0,40 0,20      0,80	10	50 95	20 40
<b>Typ 9</b>   Fahrzeug Ladung	0,60      0,20 0,20 0,12      0,44 0,44	5	50 180	20 70
<b>Typ 35</b>   Fahrzeug Ladung	0,30      0,22   0,18   0,15 0,15 0,06      0,32   0,22   0,20 0,20	10	135 200	50 70
<b>Typ 97</b>   Fahrzeug Ladung	0,40      0,28                  0,16 0,16 0,04      0,40                  0,28 0,28	15	110 180	40 70
<b>Typ 98</b>   Fahrzeug Ladung	0,36      0,25                  0,13 0,13 0,13 0,00      0,34                  0,22 0,22 0,22	60	135 230	50 80

## Anlage 2: Berechnung der Transportbewegungen in den Beispielregionen nach UNIQUE

Berechnung Transportbewegungen Landkreis Reutlingen			
203 000	m <sup>3</sup>	Holzeinschlag 2013, gesamt	
258 583	m <sup>3</sup>	korrigierter Holzeinschlag	
105 994	m <sup>3</sup>	Nadelholz nach Landkreisquotient	
152 589	m <sup>3</sup>	Laubholz nach Landkreisquotient	
4 885		Nadelholz-Fuhren (je 21,7m <sup>3</sup> )	
9 844		Laubholz-Fuhren (je 15,5m <sup>3</sup> )	
<b>14 729</b>		<b>Transportbewegungen/Fahrten Rundholz-LKW</b>	
<b>22</b>		<b>LKWs pro Jahr nach Schätzformel</b>	

Tabelle A2-1: Berechnung der Transportbewegungen pro Jahr im Landkreis Reutlingen

Berechnung Transportbewegungen Landkreis Rems-Murr			
211 000	m <sup>3</sup>	Holzeinschlag 2013, gesamt	
268 774	m <sup>3</sup>	korrigierter Holzeinschlag	
174 170	m <sup>3</sup>	Nadelholz nach Landkreisquotient	
94 604	m <sup>3</sup>	Laubholz nach Landkreisquotient	
8 026		Nadelholz-Fuhren (je 21,7m <sup>3</sup> )	
6 103		Laubholz-Fuhren (je 15,5m <sup>3</sup> )	
<b>14 130</b>		<b>Transportbewegungen/Fahrten Rundholz-LKW</b>	
<b>22</b>		<b>LKWs pro Jahr nach Schätzformel</b>	

Tabelle A2-2: Berechnung der Transportbewegungen pro Jahr im Landkreis Rems-Murr

Berechnung Transportbewegungen Landkreis Emmendingen			
162 000	m <sup>3</sup>	Holzeinschlag 2013, gesamt	
206 357	m <sup>3</sup>	korrigierter Holzeinschlag	
146 209	m <sup>3</sup>	Nadelholz nach Landkreisquotient	
60 148	m <sup>3</sup>	Laubholz nach Landkreisquotient	
6 738		Nadelholz-Fuhren (je 21,7m <sup>3</sup> )	
3 881		Laubholz-Fuhren (je 15,5m <sup>3</sup> )	
<b>10 618</b>		<b>Transportbewegungen/Fahrten Rundholz-LKW</b>	
<b>17</b>		<b>LKWs pro Jahr nach Schätzformel</b>	

Tabelle A2-3: Berechnung der Transportbewegungen pro Jahr im Landkreis Emmendingen

Berechnung Transportbewegungen Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald			
420 000	m <sup>3</sup>	Holzeinschlag 2013, gesamt	
535 000	m <sup>3</sup>	korrigierter Holzeinschlag	
392 234	m <sup>3</sup>	Nadelholz nach Landkreisquotient	
142 766	m <sup>3</sup>	Laubholz nach Landkreisquotient	
18 075		Nadelholz-Fuhren (je 21,7m <sup>3</sup> )	
9 211		Laubholz-Fuhren (je 15,5m <sup>3</sup> )	
<b>27 286</b>		<b>Transportbewegungen/Fahrten Rundholz-LKW</b>	
<b>45</b>		<b>LKWs pro Jahr nach Schätzformel</b>	

Tabelle A2-4: Berechnung der Transportbewegungen pro Jahr im Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald

---

### Anlage 3: Ermittelte charakteristische Werte

---

Die Ergebnisse der Verkehrslastsimulationen werden im Folgenden detailliert aufgeführt. Für die untersuchten Brückentypen wird je Verkehrskategorie die ermittelte charakteristische Beanspruchung angegeben. Enthalten sind hier sowohl die Szenarien der Holz- als auch der Referenz-LKW.

Zum Vergleich der Ergebnisse mit den normativen Lastmodellen werden die aus den Lastmodellen resultierenden charakteristischen Beanspruchungen in die Ergebnisse integriert. Als normative Referenz dienen die Lastmodelle LM1 nach DIN EN 1991-2/NA (Ausgabe 2012), BK 60/30 und BK 30/30 nach DIN 1072 (Ausgabe 1985) sowie BK 60 und BK 30 nach DIN 1072 (Ausgabe 1967).

Zusätzlich wird ein prozentualer Vergleich zwischen den heutigen 40t-Holz-LKW und den untersuchten Holz-LKW angeführt. Aus dem Vergleich wird die prozentuale Erhöhung der Beanspruchung ersichtlich. Zur Übersichtlichkeit werden Erhöhungen von mindestens 2 % rot eingefärbt.

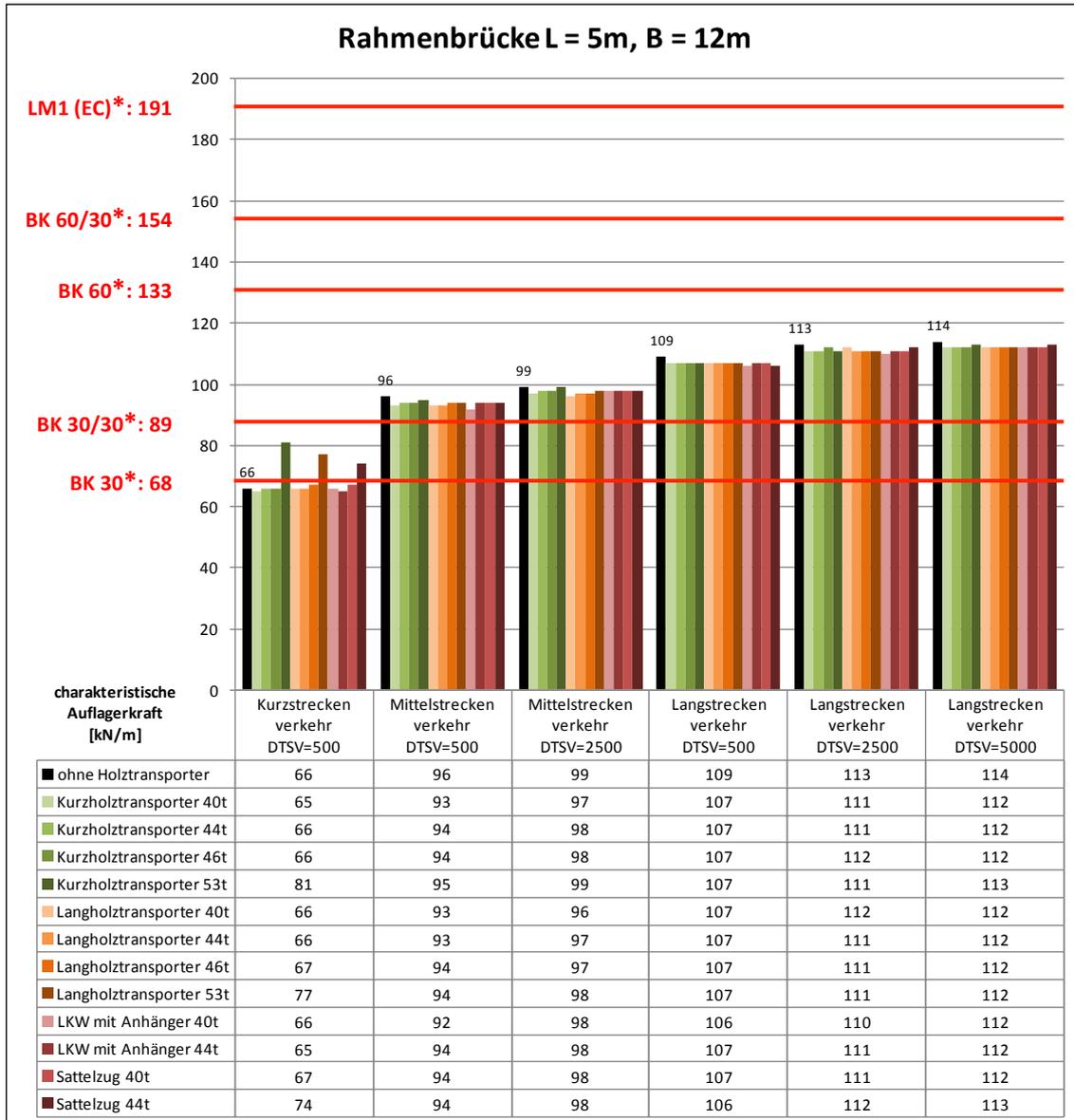


Abbildung A3-1: Charakteristische Werte - Rahmenbrücke L = 5m, B = 12m, Auflagerkraft

	Kurzstreckenverkehr DTSV=500	Mittelstreckenverkehr DTSV=500	Mittelstreckenverkehr DTSV=2500	Langstreckenverkehr DTSV=500	Langstreckenverkehr DTSV=2500	Langstreckenverkehr DTSV=5000
Kurzholztransporter 40t	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Kurzholztransporter 44t	101.5%	101.1%	101.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Kurzholztransporter 46t	101.5%	101.1%	101.0%	100.0%	100.9%	100.0%
Kurzholztransporter 53t	124.6%	102.2%	102.1%	100.0%	100.0%	100.9%
Langholztransporter 40t	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Langholztransporter 44t	100.0%	100.0%	101.0%	100.0%	99.1%	100.0%
Langholztransporter 46t	101.5%	101.1%	101.0%	100.0%	99.1%	100.0%
Langholztransporter 53t	116.7%	101.1%	102.1%	100.0%	99.1%	100.0%

Tabelle A3-1: Prozentualer Vergleich der Holz-LKW - Rahmenbrücke L = 5m, B = 12m, Auflagerkraft

\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet.

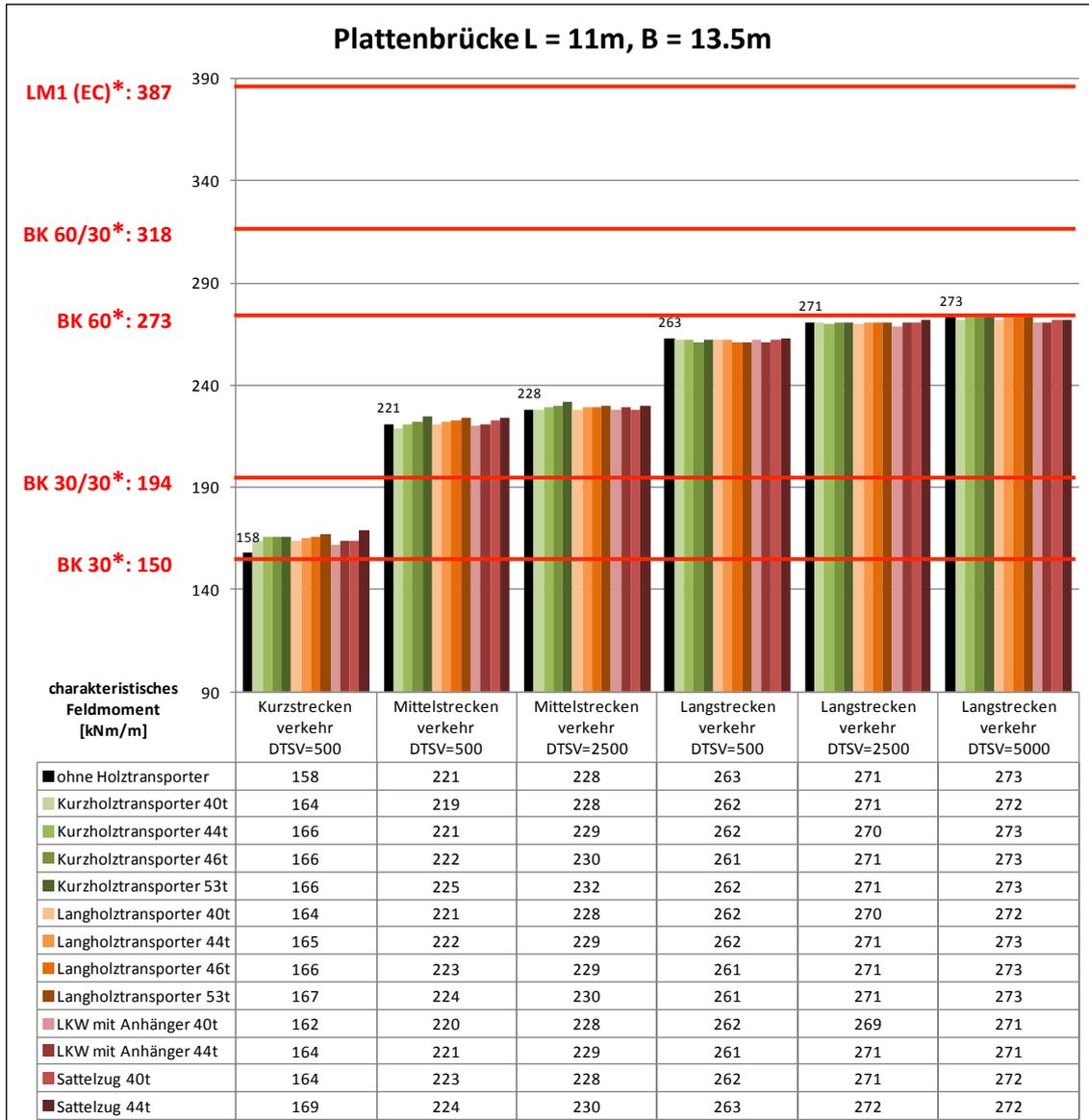


Abbildung A3-2: Charakteristische Werte - Plattenbrücke L = 11m, B = 13.5m, Feldmoment

	Kurzstrecken verkehr DTSV=500	Mittelstrecken verkehr DTSV=500	Mittelstrecken verkehr DTSV=2500	Langstrecken verkehr DTSV=500	Langstrecken verkehr DTSV=2500	Langstrecken verkehr DTSV=5000
Kurzholztransporter 40t	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Kurzholztransporter 44t	101.2%	100.9%	100.4%	100.0%	99.6%	100.4%
Kurzholztransporter 46t	101.2%	101.4%	100.9%	99.6%	100.0%	100.4%
Kurzholztransporter 53t	101.2%	102.7%	101.8%	100.0%	100.0%	100.4%
Langholztransporter 40t	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Langholztransporter 44t	100.6%	100.5%	100.4%	100.0%	100.4%	100.4%
Langholztransporter 46t	101.2%	100.9%	100.4%	99.6%	100.4%	100.4%
Langholztransporter 53t	101.8%	101.4%	100.9%	99.6%	100.4%	100.4%

Tabelle A3-2: Prozentualer Vergleich der Holz-LKW - Plattenbrücke L = 11m, B = 13.5m, Feldmoment

\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet

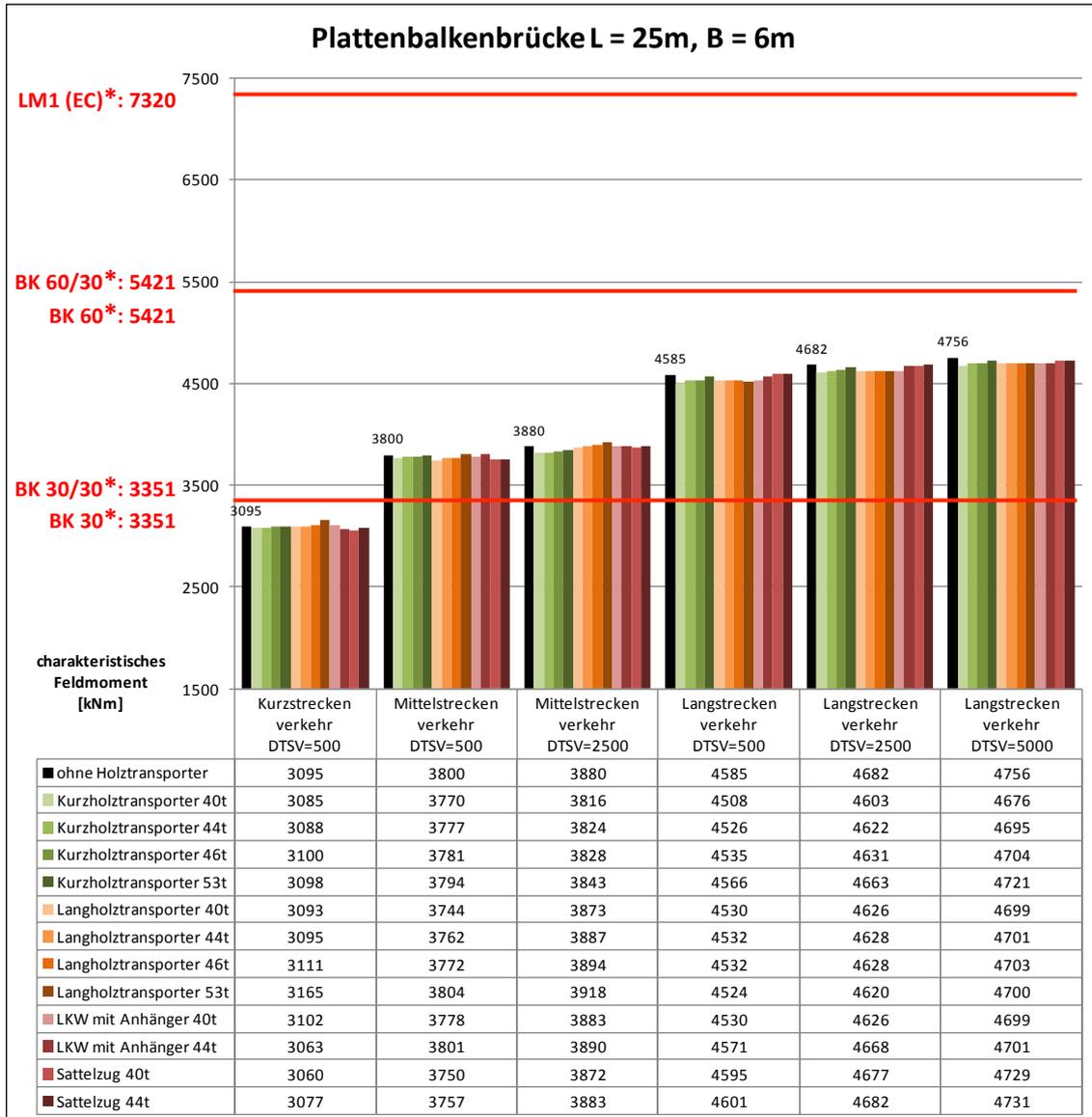


Abbildung A3-3: Charakteristische Werte - Plattenbalkenbrücke L = 25m, B = 6m, Feldmoment

	Kurzstreckenverkehr DTSV=500	Mittelstreckenverkehr DTSV=500	Mittelstreckenverkehr DTSV=2500	Langstreckenverkehr DTSV=500	Langstreckenverkehr DTSV=2500	Langstreckenverkehr DTSV=5000
Kurzholztransporter 40t	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Kurzholztransporter 44t	100.1%	100.2%	100.2%	100.4%	100.4%	100.4%
Kurzholztransporter 46t	100.5%	100.3%	100.3%	100.6%	100.6%	100.6%
Kurzholztransporter 53t	100.4%	100.6%	100.7%	101.3%	101.3%	101.0%
Langholztransporter 40t	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Langholztransporter 44t	100.1%	100.5%	100.4%	100.0%	100.0%	100.0%
Langholztransporter 46t	100.6%	100.7%	100.5%	100.0%	100.0%	100.1%
Langholztransporter 53t	102.3%	101.6%	101.2%	99.9%	99.9%	100.0%

Tabelle A3-3: Prozentualer Vergleich der Holz-LKW - Plattenbalkenbrücke L = 25m, B = 6m, Feldmoment

\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet.

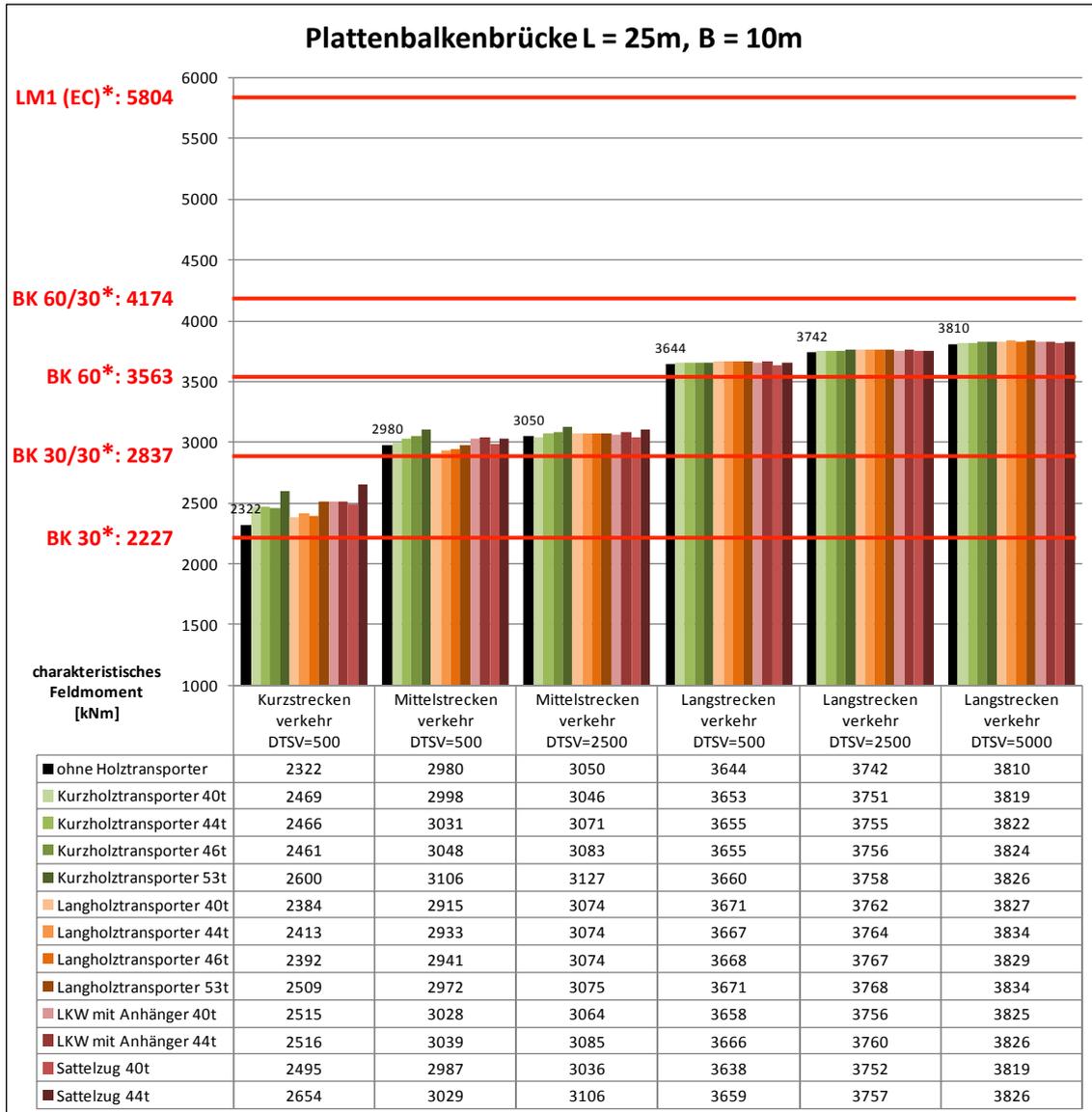


Abbildung A3-4: Charakteristische Werte - Plattenbalkenbrücke L = 25m, B = 10m, Feldmoment

	Kurzstreckenverkehr DTSV=500	Mittelstreckenverkehr DTSV=500	Mittelstreckenverkehr DTSV=2500	Langstreckenverkehr DTSV=500	Langstreckenverkehr DTSV=2500	Langstreckenverkehr DTSV=5000
Kurzholztransporter 40t	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Kurzholztransporter 44t	99.9%	101.1%	100.8%	100.1%	100.1%	100.1%
Kurzholztransporter 46t	99.7%	101.7%	101.2%	100.1%	100.1%	100.1%
Kurzholztransporter 53t	105.3%	103.6%	102.7%	100.2%	100.2%	100.2%
Langholztransporter 40t	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Langholztransporter 44t	101.2%	100.6%	100.0%	99.9%	100.1%	100.2%
Langholztransporter 46t	100.3%	100.9%	100.0%	99.9%	100.1%	100.1%
Langholztransporter 53t	105.2%	102.0%	100.0%	100.0%	100.2%	100.2%

Tabelle A3-4: Prozentualer Vergleich der Holz-LKW - Plattenbalkenbrücke L = 25m, B = 10m, Feldmoment

\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet.

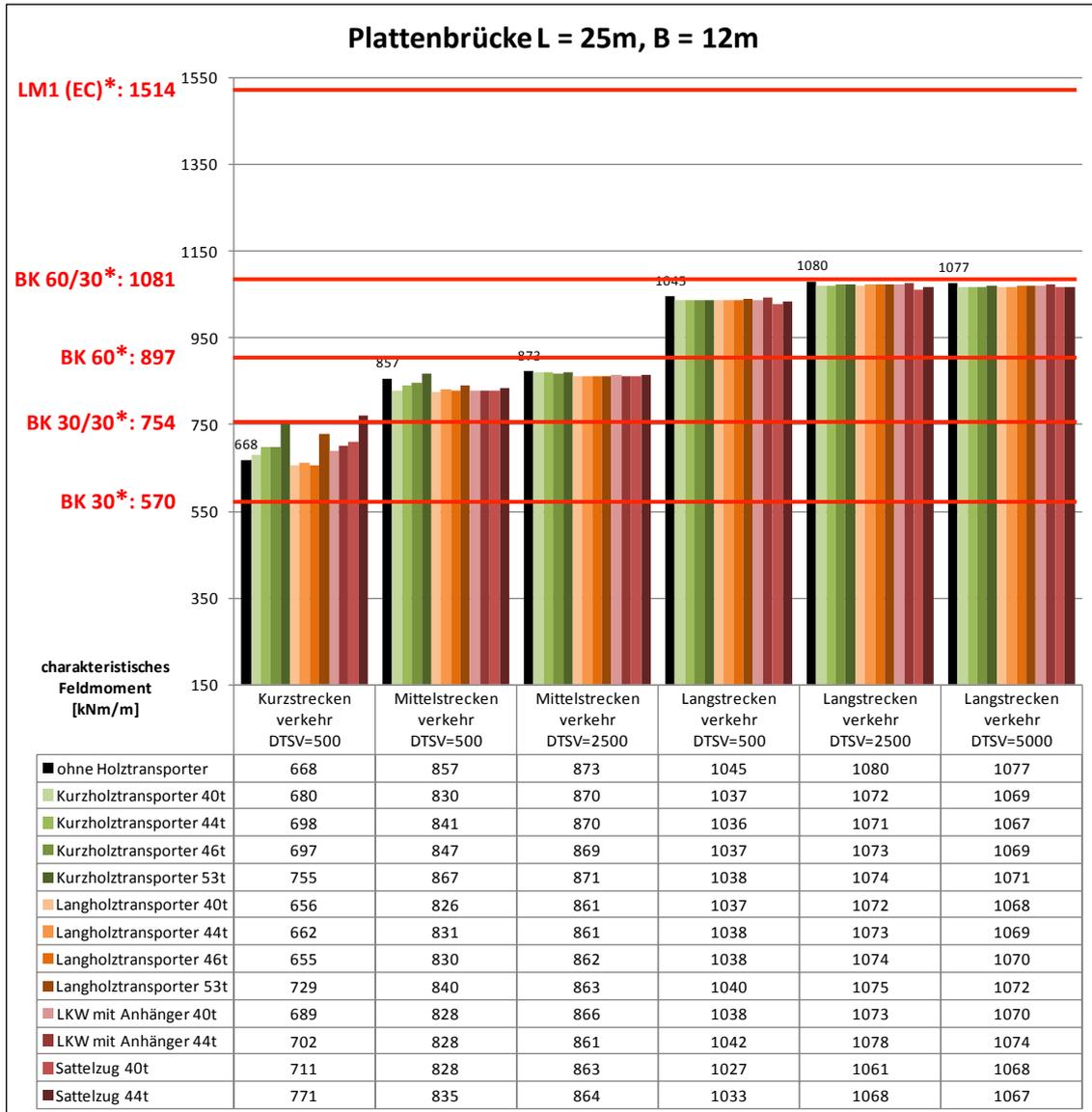


Abbildung A3-5: Charakteristische Werte - Plattenbrücke L = 25m, B = 12m, Feldmoment

	Kurzstreckenverkehr DTSV=500	Mittelstreckenverkehr DTSV=500	Mittelstreckenverkehr DTSV=2500	Langstreckenverkehr DTSV=500	Langstreckenverkehr DTSV=2500	Langstreckenverkehr DTSV=5000
Kurzholztransporter 40t	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Kurzholztransporter 44t	102.6%	101.3%	100.0%	99.9%	99.9%	99.8%
Kurzholztransporter 46t	102.5%	102.0%	99.9%	100.0%	100.1%	100.0%
Kurzholztransporter 53t	111.0%	104.5%	100.1%	100.1%	100.2%	100.2%
Langholztransporter 40t	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Langholztransporter 44t	100.9%	100.6%	100.0%	100.1%	100.1%	100.1%
Langholztransporter 46t	99.8%	100.5%	100.1%	100.1%	100.2%	100.2%
Langholztransporter 53t	111.1%	101.7%	100.2%	100.3%	100.3%	100.4%

Tabelle A3-5: Prozentualer Vergleich der Holz-LKW - Plattenbrücke L = 25m, B = 12m, Feldmoment

\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet.

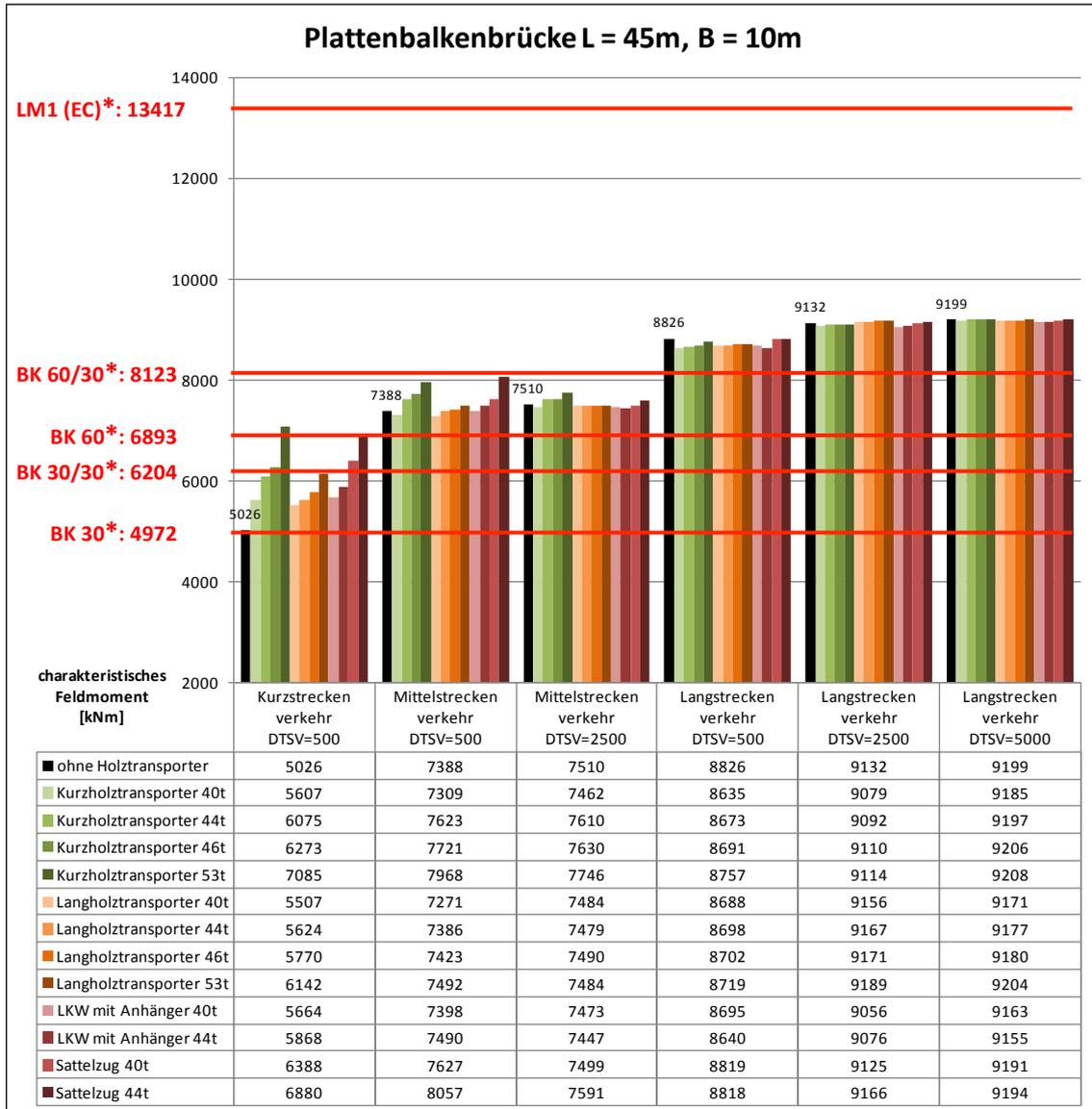


Abbildung A3-6: Charakteristische Werte - Plattenbalkenbrücke L = 45m, B = 10m, Feldmoment

	Kurzstreckenverkehr DTSV=500	Mittelstreckenverkehr DTSV=500	Mittelstreckenverkehr DTSV=2500	Langstreckenverkehr DTSV=500	Langstreckenverkehr DTSV=2500	Langstreckenverkehr DTSV=5000
Kurzholztransporter 40t	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Kurzholztransporter 44t	108.3%	104.3%	102.0%	100.4%	100.1%	100.1%
Kurzholztransporter 46t	111.9%	105.6%	102.3%	100.6%	100.3%	100.2%
Kurzholztransporter 53t	126.4%	109.0%	103.8%	101.4%	100.4%	100.3%
Langholztransporter 40t	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Langholztransporter 44t	102.1%	101.6%	99.9%	100.1%	100.1%	100.1%
Langholztransporter 46t	104.8%	102.1%	100.1%	100.2%	100.2%	100.1%
Langholztransporter 53t	111.5%	103.0%	100.0%	100.4%	100.4%	100.4%

Tabelle A3-6: Prozentualer Vergleich der Holz-LKW - Plattenbalkenbrücke L = 45m, B = 10m, Feldmoment

\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet.

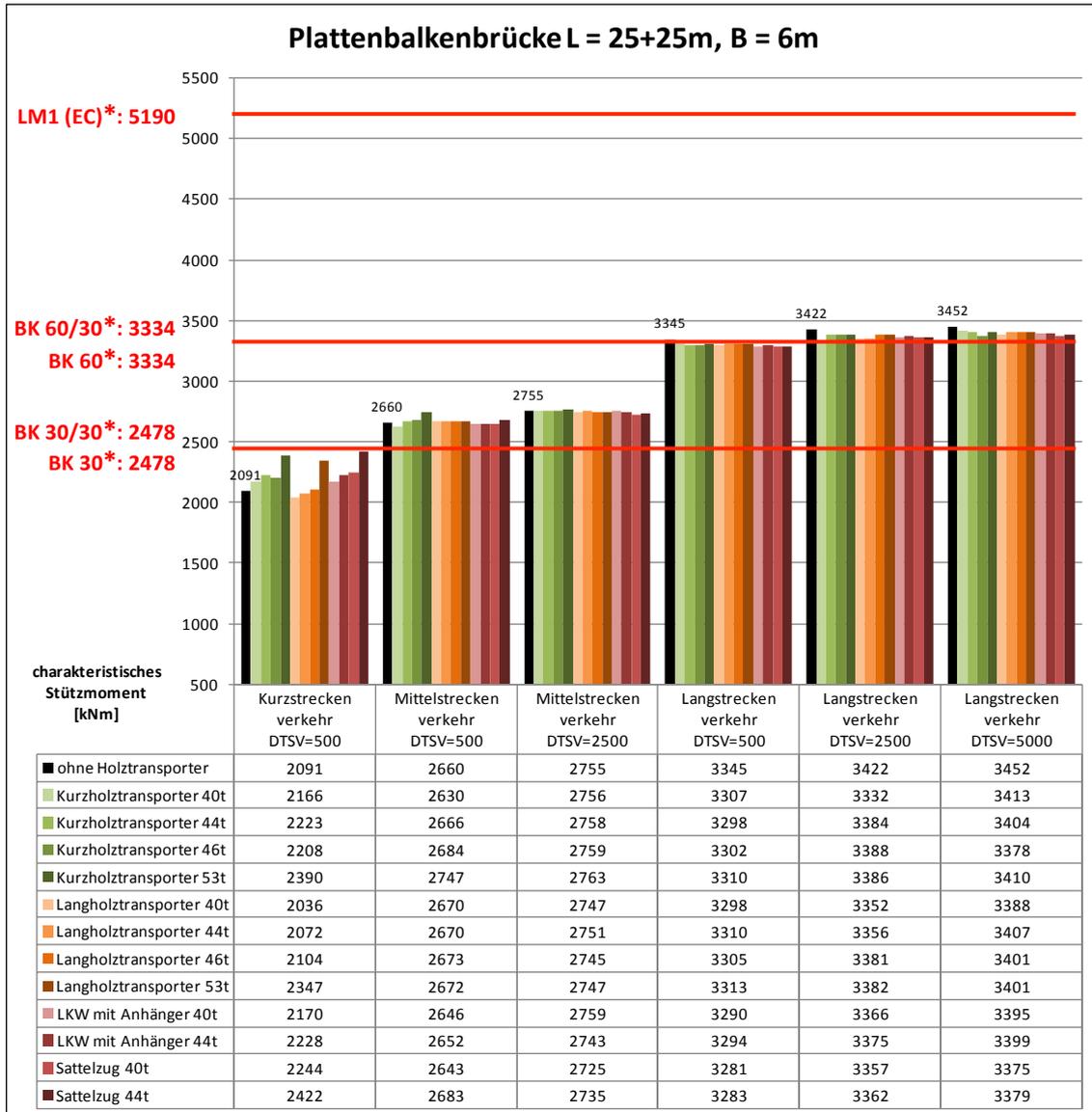


Abbildung A3-7: Charakteristische Werte - Plattenbalkenbrücke L = 25+25m, B = 6m, Stützmoment

	Kurzstreckenverkehr DTSV=500	Mittelstreckenverkehr DTSV=500	Mittelstreckenverkehr DTSV=2500	Langstreckenverkehr DTSV=500	Langstreckenverkehr DTSV=2500	Langstreckenverkehr DTSV=5000
Kurzholztransporter 40t	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Kurzholztransporter 44t	102.6%	101.4%	100.1%	99.7%	101.6%	99.7%
Kurzholztransporter 46t	101.9%	102.1%	100.1%	99.8%	101.7%	99.0%
Kurzholztransporter 53t	110.3%	104.4%	100.3%	100.1%	101.6%	99.9%
Langholztransporter 40t	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Langholztransporter 44t	101.8%	100.0%	100.1%	100.4%	100.1%	100.6%
Langholztransporter 46t	103.3%	100.1%	99.9%	100.2%	100.9%	100.4%
Langholztransporter 53t	115.3%	100.1%	100.0%	100.5%	100.9%	100.4%

Tabelle A3-7: Prozentualer Vergleich der Holz-LKW - Plattenbalkenbrücke L = 25+25m, B = 6m, Stützmoment

\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet.

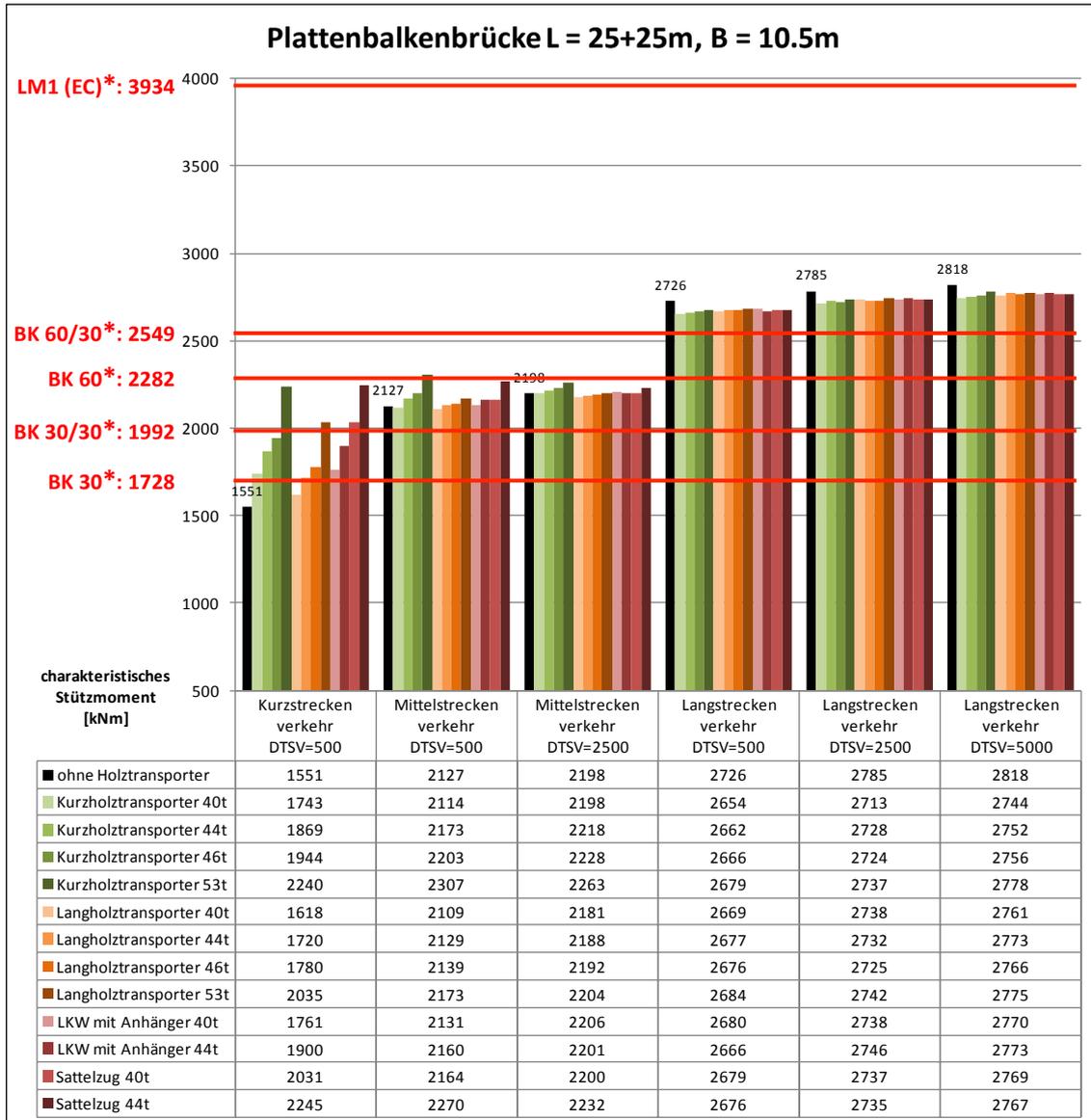


Abbildung A3-8: Charakteristische Werte - Plattenbalkenbrücke L = 25+25m, B = 10.5m, Stützmoment

	Kurzstreckenverkehr DTSV=500	Mittelstreckenverkehr DTSV=500	Mittelstreckenverkehr DTSV=2500	Langstreckenverkehr DTSV=500	Langstreckenverkehr DTSV=2500	Langstreckenverkehr DTSV=5000
Kurzholztransporter 40t	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Kurzholztransporter 44t	107.2%	102.8%	100.9%	100.3%	100.6%	100.3%
Kurzholztransporter 46t	111.5%	104.2%	101.4%	100.5%	100.4%	100.4%
Kurzholztransporter 53t	128.5%	109.1%	103.0%	100.9%	100.9%	101.2%
Langholztransporter 40t	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Langholztransporter 44t	106.3%	100.9%	100.3%	100.3%	99.8%	100.4%
Langholztransporter 46t	110.0%	101.4%	100.5%	100.3%	99.5%	100.2%
Langholztransporter 53t	125.8%	103.0%	101.1%	100.6%	100.1%	100.5%

Tabelle A3-8: Prozentualer Vergleich der Holz-LKW - Plattenbalkenbrücke L = 25+25m, B = 10.5m, Stützmoment

\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet.

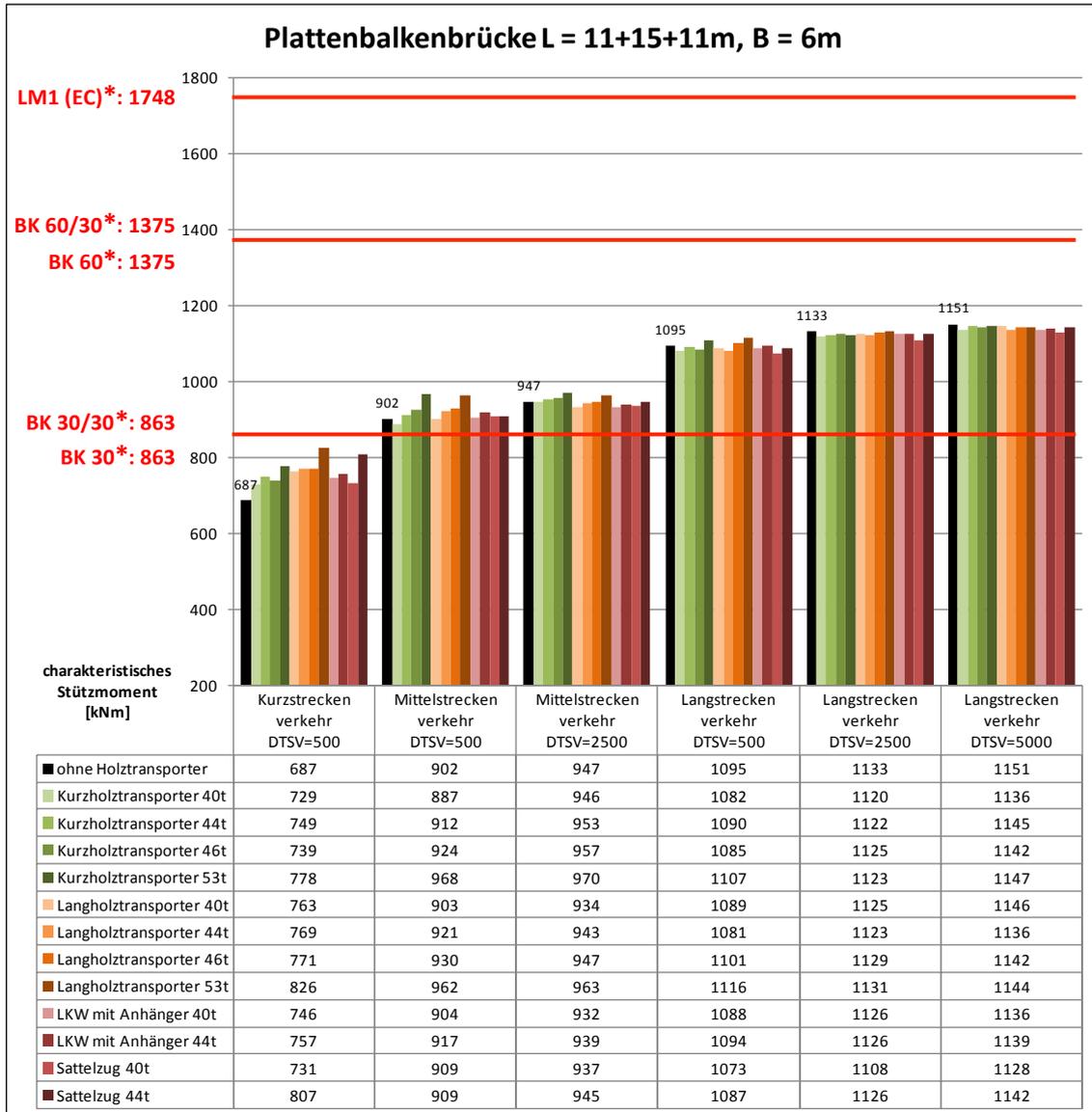


Abbildung A3-9: Charakteristische Werte - Plattenbalkenbrücke L = 11+15+11m, B = 6m, Stützmoment

	Kurzstreckenverkehr DTSV=500	Mittelstreckenverkehr DTSV=500	Mittelstreckenverkehr DTSV=2500	Langstreckenverkehr DTSV=500	Langstreckenverkehr DTSV=2500	Langstreckenverkehr DTSV=5000
Kurzholztransporter 40t	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Kurzholztransporter 44t	102.7%	102.8%	100.7%	100.7%	100.2%	100.8%
Kurzholztransporter 46t	101.4%	104.2%	101.2%	100.3%	100.4%	100.5%
Kurzholztransporter 53t	106.7%	109.1%	102.5%	102.3%	100.3%	101.0%
Langholztransporter 40t	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Langholztransporter 44t	100.8%	102.0%	101.0%	99.3%	99.8%	99.1%
Langholztransporter 46t	101.0%	103.0%	101.4%	101.1%	100.4%	99.7%
Langholztransporter 53t	108.3%	106.5%	103.1%	102.5%	100.5%	99.8%

Tabelle A3-9: Prozentualer Vergleich der Holz-LKW - Plattenbalkenbrücke L = 11+15+11m, B = 6m, Stützmoment

\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet.

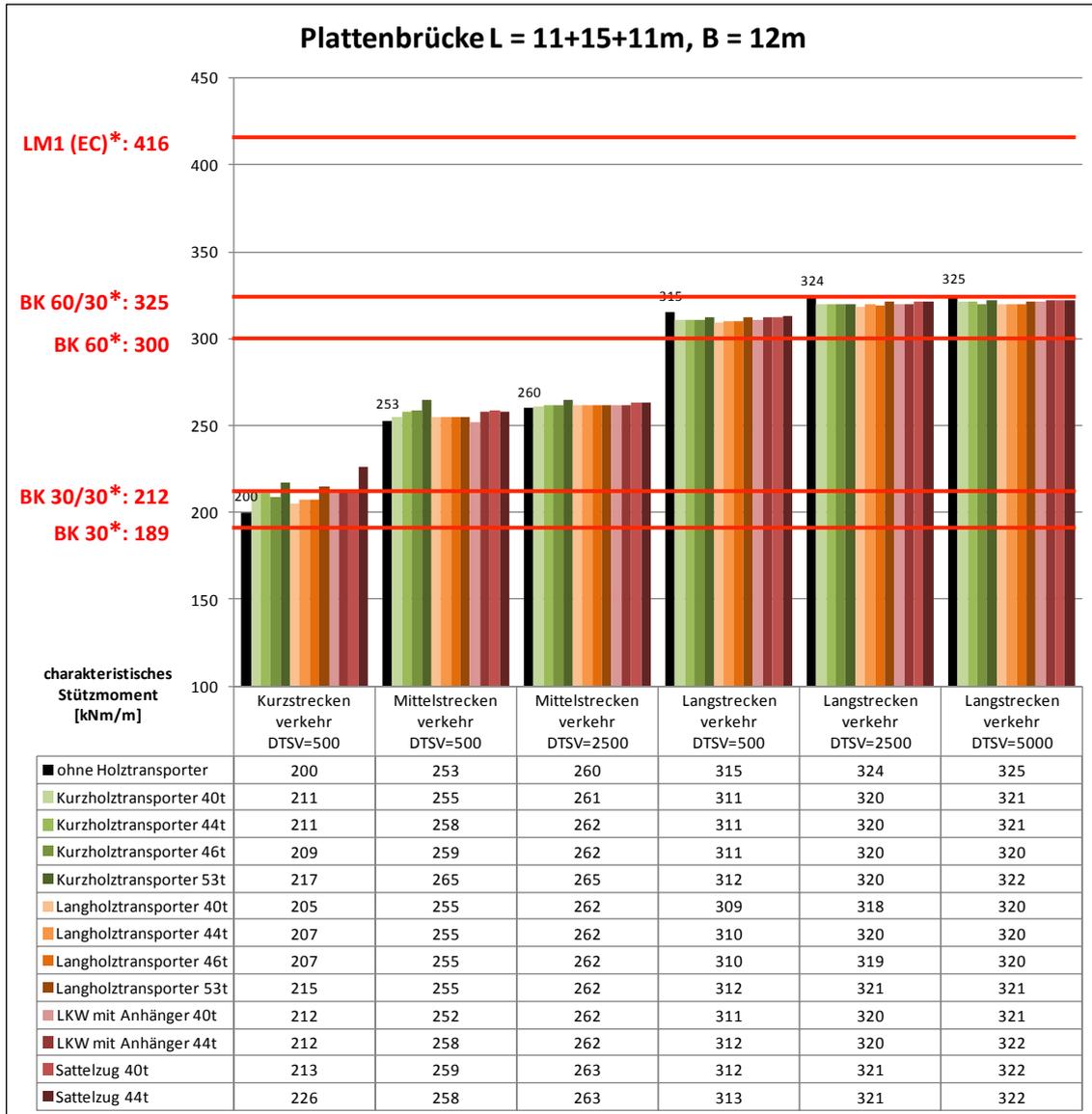


Abbildung A4-10: Charakteristische Werte - Plattenbrücke L = 11+15+11m, B = 12m, Stützmoment

	Kurzstreckenverkehr DTSV=500	Mittelstreckenverkehr DTSV=500	Mittelstreckenverkehr DTSV=2500	Langstreckenverkehr DTSV=500	Langstreckenverkehr DTSV=2500	Langstreckenverkehr DTSV=5000
Kurzholztransporter 40t	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Kurzholztransporter 44t	100.0%	101.2%	100.4%	100.0%	100.0%	100.0%
Kurzholztransporter 46t	98.1%	101.6%	100.4%	100.0%	100.0%	99.7%
Kurzholztransporter 53t	102.8%	103.9%	101.5%	100.3%	100.0%	100.3%
Langholztransporter 40t	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Langholztransporter 44t	101.0%	100.0%	100.0%	100.3%	100.6%	100.0%
Langholztransporter 46t	101.0%	100.0%	100.0%	100.3%	100.3%	100.0%
Langholztransporter 53t	104.9%	100.0%	100.0%	101.0%	100.9%	100.3%

Tabelle A3-10: Prozentualer Vergleich der Holz-LKW - Plattenbrücke L = 11+15+11m, B = 12m, Stützmoment

\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet.

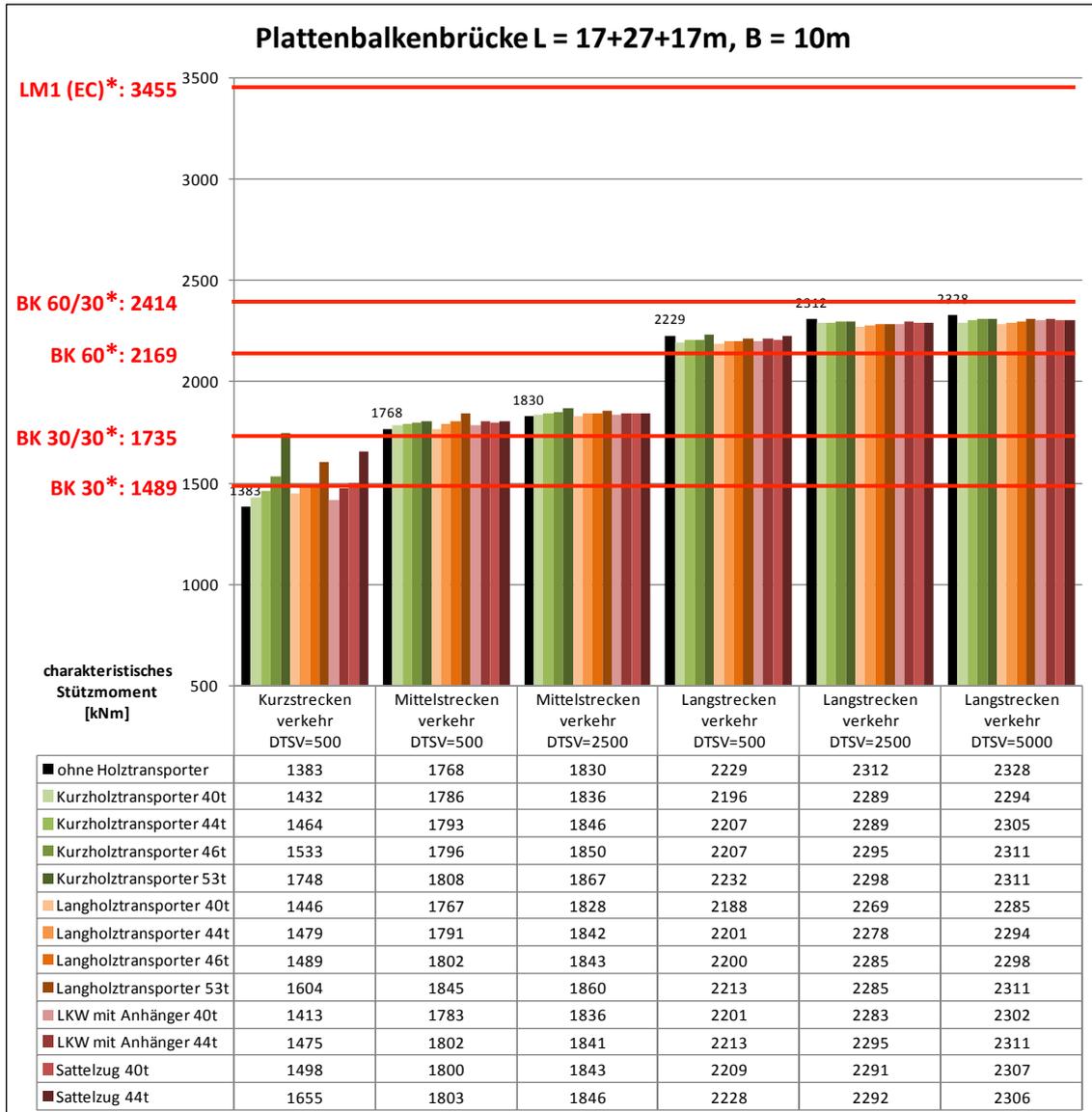


Abbildung A3-11: Charakteristische Werte - Plattenbalkenbrücke L = 17+27+17m, B = 10m, Stützmoment

	Kurzstreckenverkehr DTSV=500	Mittelstreckenverkehr DTSV=500	Mittelstreckenverkehr DTSV=2500	Langstreckenverkehr DTSV=500	Langstreckenverkehr DTSV=2500	Langstreckenverkehr DTSV=5000
Kurzholztransporter 40t	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Kurzholztransporter 44t	102.2%	100.4%	100.5%	100.5%	100.0%	100.5%
Kurzholztransporter 46t	107.1%	100.6%	100.8%	100.5%	100.3%	100.7%
Kurzholztransporter 53t	122.1%	101.2%	101.7%	101.6%	100.4%	100.7%
Langholztransporter 40t	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Langholztransporter 44t	102.3%	101.4%	100.8%	100.6%	100.4%	100.4%
Langholztransporter 46t	103.0%	102.0%	100.8%	100.5%	100.7%	100.6%
Langholztransporter 53t	110.9%	104.4%	101.8%	101.1%	100.7%	101.1%

Tabelle A3-11: Prozentualer Vergleich der Holz-LKW - Plattenbalkenbrücke L = 17+27+17m, B = 10m, Stützmoment

\* In den Brückenklassen 30, 30/30, 60, 60/30 und LM1 werden hier Geh- und Radwege nicht belastet.

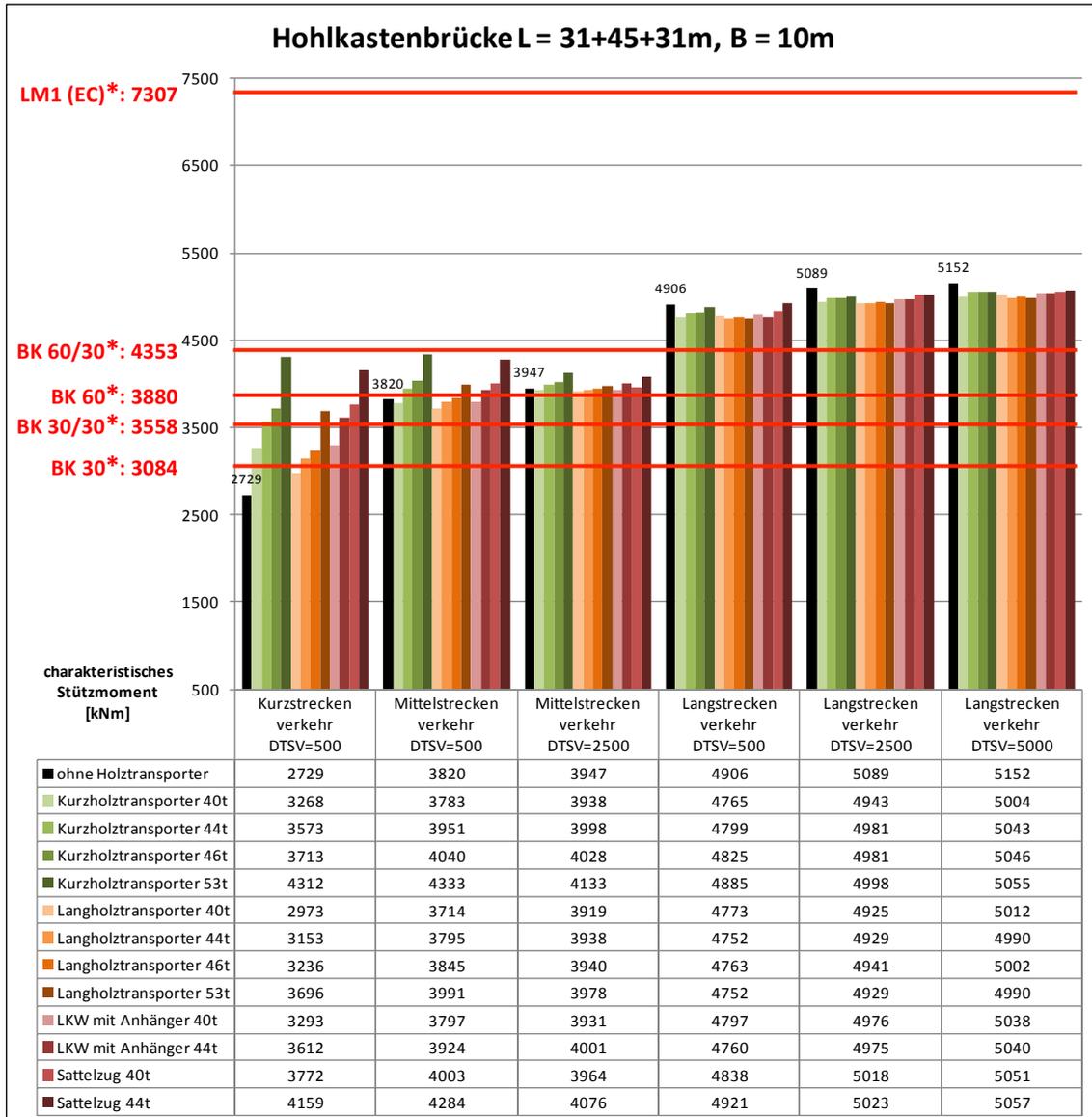


Abbildung A3-12: Charakteristische Werte - Hohlkastenbrücke L = 31+45+31m, B = 10m, Stützmoment

	Kurzstreckenverkehr DTSV=500	Mittelstreckenverkehr DTSV=500	Mittelstreckenverkehr DTSV=2500	Langstreckenverkehr DTSV=500	Langstreckenverkehr DTSV=2500	Langstreckenverkehr DTSV=5000
Kurzholztransporter 40t	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Kurzholztransporter 44t	109.3%	104.4%	101.5%	100.7%	100.8%	100.8%
Kurzholztransporter 46t	113.6%	106.8%	102.3%	101.3%	100.8%	100.8%
Kurzholztransporter 53t	131.9%	114.5%	105.0%	102.5%	101.1%	101.0%
Langholztransporter 40t	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Langholztransporter 44t	106.1%	102.2%	100.5%	99.6%	100.1%	99.6%
Langholztransporter 46t	108.8%	103.5%	100.5%	99.8%	100.3%	99.8%
Langholztransporter 53t	124.3%	107.5%	101.5%	99.6%	100.1%	99.6%

Tabelle A3-12: Prozentualer Vergleich der Holz-LKW - Hohlkastenbrücke L = 31+45+31m, B = 10m, Stützmoment

## 8 Waldwege

### Bearbeitung

Jörg Weißhaar, Dr. Frank Brodbeck, Dr. Udo Hans Sauter (Modul 1-3)

FVA Baden-Württemberg, Abt. Waldnutzung

Prof. Dr. Dirk Jaeger, PD Dr. Thomas Smaltschinski, Martin Opferkuch, Siegmund Schönherr (Modul 1 und Modul 4)

Professur für Forstliche Verfahrenstechnik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

### 8.1 Einführung und Problemstellung

Der Holztransport in Baden-Württemberg ist in besonderer Weise durch verkehrspolitische Sonderregelungen in benachbarten Ländern betroffen. Das Projekt soll untersuchen, welche verkehrspolitischen, technischen und logistischen Maßnahmen geeignet sind, die Wettbewerbsfähigkeit der baden-württembergischen Holzindustrie und des Holztransportgewerbes gegenüber ausländischen Mitbewerbern zu erhalten und zu stärken. Eine Fragestellung zur Senkung von Transportkosten ist die Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichtes über die bisher erlaubten 40 t hinaus. Um die möglichen Auswirkungen erhöhter zulässiger Gesamtgewichte auf die Walderschließungs-Infrastruktur abschätzen zu können, wurden im Teilarbeitspaket 3.3 Waldwege deshalb zunächst die im Land Baden-Württemberg gebräuchlichen bzw. aktuell gültigen Richtlinien und Regelwerke zum Waldwegebau zusammengestellt. Ein weiterer Schritt umfasste die Erfassung des Wegezustandes in vier Modellregionen, um die tatsächliche Qualität der Infrastruktur vor Ort zu bestimmen und um die möglichen Abweichungen von Vorgaben in der Praxis darzustellen. Hierbei wurde mit Hilfe des leichten Fallgewichtgeräts auch ein für die Tragfähigkeit der Wege aussagekräftiger Wert vor Ort an zufällig ausgewählten Wegen erhoben. Intention dieser Messung war es zu prüfen, inwieweit die aktuelle Tragfähigkeit der Waldwege den gängigen Tragfähigkeitsstandards für 40 t zulässiges Gesamtgewicht entspricht und ob eine höhere Belastung der Wege durch schwerere Lastkraftwagen (LKW) überhaupt durch das derzeit bestehende Wegenetz verkraftet werden kann bzw. ob und wie die Wege dafür ertüchtigt werden müssten. Außerdem wurden die Wege anhand weiterer Kriterien einer Bewertung unterzogen. Dabei wurden vor allem auch für einen mit höherer Tonnage laufenden Holztransportverkehr entscheidende Kriterien, wie z.B. Maximalsteigungen oder die Gestaltung des Querprofils der Waldfahrwege, erfasst.

Im Land Baden-Württemberg sind derzeit ca. 47.700 km Wege im Wald vorhanden, davon entfallen rund 16.500 km auf den Staatswald im Land. Von diesen 16.500 km Waldwegen in der Hand von ForstBW sind ca. 11.700 km (und damit ca. 70 % der gesamten Wegelänge) der Wegekategorie drei nach dem GeoDat-Standard (Sonstiger LKW-Weg, nicht bevorzugt zur Holzabfuhr zu nutzen) zugeordnet.

Eine Arbeitshypothese war, dass die vorhandenen Waldwege zumindest teilweise ausgebaut und verstärkt werden müssten, um höheren Belastungen standhalten zu können. Daher wurden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung auch die möglichen Restriktionen beim Neubau oder Ausbau von Waldfahrwegen beschrieben.

## 8.2 Modul 1: Standards für den Waldwegebau in Baden-Württemberg

Bearbeiter: Jörg Weißhaar, Dr. Frank Brodbeck, Dr. Udo Hans Sauter  
FVA Baden-Württemberg, Abt. Waldnutzung  
Prof. Dr. Dirk Jaeger, Siegmund Schönherr, Martin Opferkuch  
Professur für Forstliche Verfahrenstechnik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

### 8.2.1 Standards nach Richtlinie für den ländlichen Wegebau (RLW)

#### Grundsätzliches

Verwiesen werden muss auf den Benutzerhinweis zur DWA-A 904 (=RLW). Hierbei wird ausgeführt, dass es sich um ein Dokument handelt, für welches nach der Rechtsprechung eine tatsächliche Vermutung besteht, dass es inhaltlich und fachlich richtig sowie allgemein anerkannt ist. Es steht jedermann die Anwendung dieses Arbeitsblattes frei. Außerdem ist dieses Arbeitsblatt eine wichtige, aber nicht die einzige Erkenntnisquelle für fachgerechte Lösungen<sup>267</sup>. Waldwege werden in der Regel in Holzabfuhrwege (Fahrwege) und Betriebswege (Maschinenwege) unterteilt. Waldfahrwege müssen hierbei so angelegt werden, dass sie ihrer Mehrfachfunktion gerecht werden. Sie müssen dem Verkehr durch PKW, LKW (zugelassen nach StVZO) und Arbeitsmaschinen gerecht werden.

Grundsätze für ländliche Wege sind laut RLW<sup>268</sup>:

- landschaftsbezogene, erosionsmindernde und wasserrückhaltende Linienführung,
- Anpassung an das Gelände bei gleichzeitig günstigen Schlaglängen und –formen,
- Wegeeinmündungen sind möglichst an gerade Strecken und Wannsen zu legen und
- Längsneigungsänderungen und Neigungswechsel werden durch Kreisbögen ausgerundet.

Die Wegebenutzungsanweisung des Ministeriums für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg für die Waldwege im Staatswald (WBA<sup>269</sup>) schreibt eine Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h vor. Waldfahrwege sollen eine Fahrbahnbreite von 3,5 m und eine Kronenbreite von 5 m aufweisen. Dabei sollten die Fahrwege möglichst einen direkten Anschluss an das öffentliche Straßennetz finden. Besondere Berücksichtigung verdienen dabei auch mögliche Verkehrseinschränkungen im vorauslaufenden Straßennetz, wie z.B. Lastbeschränkungen, Engpässe in Ortslagen oder auch Brücken mit eingeschränkter Tragfähigkeit. Fahrwege sollten dabei beidseitig erschließen. Im Bergland sollte das Wegenetz den überwiegenden Bergabtransport von Lasten gewährleisten. Bei der Erschließung mit Fahrwegen ist stets der Rundverkehr zu favorisieren. Ist der Rundverkehr nur über lange Wegstrecken zu erreichen, sollten zusätzliche Wendemöglichkeiten geschaffen werden. Entlang der Fahrwege muss je nach Geländesituation beidseitig oder auch nur einseitig Holz bereitgestellt werden können und dieses auch durch den LKW-Ladekran erreichbar sein. Diese Forderung muss in der Linienführung des Fahrweges berücksichtigt werden. Fehlender Lagerraum an Engpässen muss an den sich beidseitig anschließenden Wegstrecken ausgeglichen werden.

---

<sup>267</sup> DWA-A 904 2005

<sup>268</sup> DWA-A 904 2005

<sup>269</sup> Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg (28.03.2007): Wegebenutzungs-Anweisung für die Waldwege im Staatswald; Az.: 54-8603.24

## Lageplan

Die horizontale **Linienführung** ist dem Gelände anzupassen und sollte möglichst mit geraden Strecken und Bögen mit großen Radien geplant werden. Die Radien der Bögen sollten ausgeglichen sein und häufige Richtungswechsel vermieden werden<sup>270</sup>. In der Regel ist eine **Höchstlängsneigung** von 8 % einzuhalten<sup>271</sup> bzw.  $\pm 2$  bis 8 (10) %.<sup>272</sup> Nur in begründeten Ausnahmefällen darf ein Maximalwert von 12 % überschritten werden (vgl. Abbildung 125).

Abrupte **Neigungsänderungen** und –wechsel sind aus fahrtechnischen Gründen (Aufsitzen des LKW-Nachläufers und Einhaltung der Haltesichtweite) zu vermeiden und gegebenenfalls auszurunden<sup>273</sup>. Neigungsänderungen bzw. –wechsel sollten auf 1-2 % auf 10 m beschränkt werden. Für Mindestausrundungsradien gelten dabei: 400 m für Kuppen und 200 m für Wannen. Dies entspricht einem vertikalen Ausrundungsradius von 500 bzw. 1.000 m.

## Kurvenradien

Für eine reibungslose und sichere Benutzung der Wege gelten bestimmte Mindeststandards.

Folgende **Mindestradien** von Kurven sollten nicht unterschritten werden:

- Im flacheren Gelände 20 m<sup>274</sup> [50 m im Flachland]<sup>275</sup>
- Im steileren Gelände 12 m<sup>276</sup> [20 m im Bergland, in Kehren und steilem Gelände 12 m]<sup>277</sup>

In engen Kurven und Kehren ist eine **Fahrbahnverbreiterung** nach innen und eine Ausschwenkverbreiterung nach außen notwendig, um die unterschiedlichen Kreisbögen der Vorder- und Hinterräder und das Ausschwenken der Stammenden zu berücksichtigen:

- Bei Bögen mit Richtungsänderungen von mehr als 50 gon und geringem Radius ( $\leq 50$  m) werden Fahrbahnverbreiterungen nach innen notwendig (Abbildung 126)<sup>278</sup>.
- Verbreiterung notwendig ab einem Radius von 40 m.<sup>279</sup>
- Bei Kehren sind die Kurvenverbreiterungen jeweils zur Hälfte außen und innen zu installieren.<sup>280</sup>

---

<sup>270</sup> Dietz et al. 1984, S. 112

<sup>271</sup> DWA = Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. 2009

<sup>272</sup> Dietz et al. 1984, S. 111

<sup>273</sup> Ebd., S. 112

<sup>274</sup> DWA 2009

<sup>275</sup> Dietz et al. 1984, S. 112

<sup>276</sup> DWA 2009

<sup>277</sup> Dietz et al. 1984, S. 112

<sup>278</sup> DWA 2009; Dietz et al. 1984, S. 112

<sup>279</sup> Oppermann, 1991

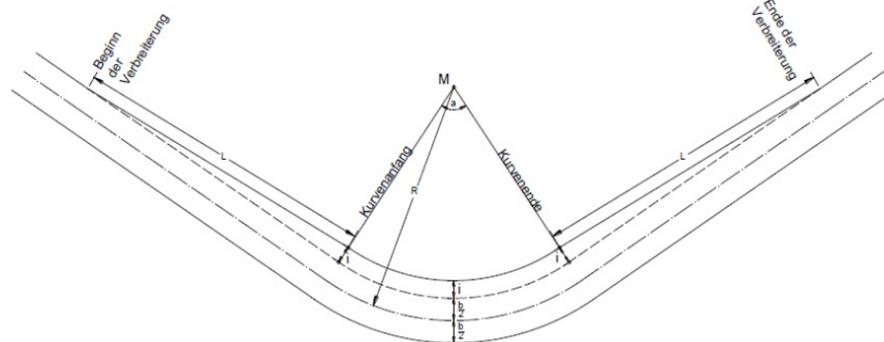
<sup>280</sup> Dietz et al., 1984

**Abbildung 125: Entwurfparameter Holzabfuhrwege (DWA 2009)**

Wegeart	Linienführung im		Querschnitt			
	Lageplan	Höhenplan	F = Fahrbahnbreite [m] K = Kronenbreite [m]		Quemeigung q [%]	
	Kurvenmindestradius $R_{min}$ [m]	Längsneigung max s [%]	2-streifig	1-streifig		
1	2	3	4	5	6	
Holzabfuhrwege	Flaches Gelände:	20	Flaches Gelände:	8	–	Ungebundene Decke: Im Regelfall als Uhrglasprofil: 0 bis 6 In engen Kurven mit einseitiger Neigung: 6 Gebundene Decke: 3
	Steiles Gelände:	12	Steiles Gelände: Ausnahme: Kehren:	12 > 12 6	– In Bögen mit Richtungsänderungen von mehr als 50 gon und $R < 50$ ist die Fahrbahn nach innen zu verbreitern	

Quelle: DWA (2009)

**Abbildung 126: Fahrbahnverbreiterung in einem engen Boden (DWA 2009)**



Verbreiterungsmaße i und Verlängerungsmaße L

Wegeart	Bezeichnung	Kurvenradius R [m]									
		5,5	7,5	10	12	15	20	30	50	75	100
Verbindungswege Fahrwege Wirtschaftswege mit Holzabfuhr	i			3,2	2,7	2,1	1,6	1,1	0,6	0,4	0,3
	L			24	22	20	16	10	6	4	3
Wirtschaftswege	i	2,9	2,1	1,6	1,3	1,1	0,8	0,5	0,3		
	L	15	13	12	11	10	8	5	3		

Quelle: DWA (2009)

- Gegenläufige Kehren sollten mit einer Zwischengeraden von einer Fahrzeuglänge (ca. 20 m) verbunden werden. Bei gleichläufigen Bögen soll eine Verbindung durch einen Übergangsbogen erfolgen. Die Längsneigung in Kehren ist aus fahrtechnischen Gründen auf max. 6 % zu reduzieren<sup>281</sup> bzw., nach Dietz et al. (1984) auf maximal 5 %.<sup>282</sup>
- Holzabfuhrwege sind grundsätzlich im Rundverkehr anzulegen. Ist dies nicht möglich, sind **Wendeplätze** anzulegen, um die Fahrstrecke zu verkürzen. Abhängig von der Verkehrsdichte sind alle 300 - 500 m sowie in Sackgassen Kehrlplätze einzufügen.<sup>283</sup> Wendeplätze können in Form von Wendehammern (Einzel-LKW) und Wendeplätzen/ -

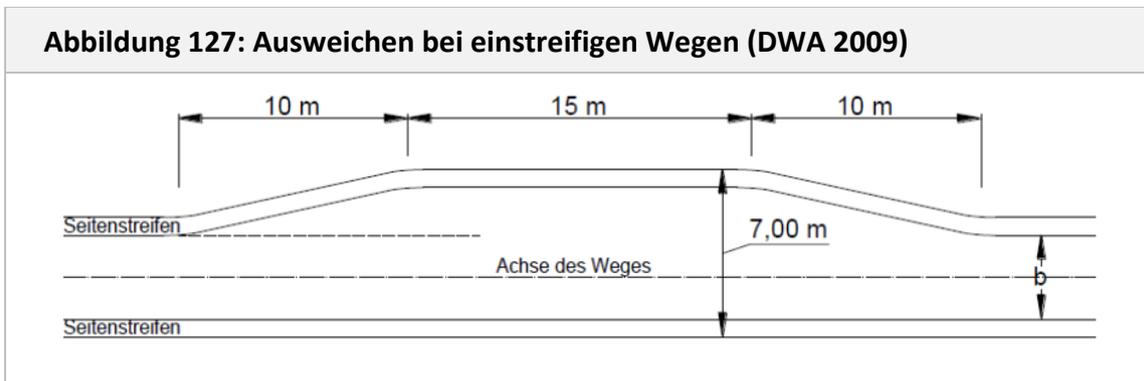
<sup>281</sup> DWA 2009

<sup>282</sup> Dietz et al. 1984, S. 111

<sup>283</sup> Kuonen 1983, S. 168

schleifen (Lastzüge) angelegt werden. Da Wendeplatten eine große Fläche einnehmen, werden vor allem im Gebirge Wendehammer bevorzugt.

Auf allen Wegen, die nicht im Einbahnverkehr befahren werden, müssen in regelmäßigen Abständen **Ausweichstellen** angelegt werden, vor allem um die Seitenstreifen zu entlasten.<sup>284</sup> Anzahl und Abmessung sind dabei stark vom Einzelfall abhängig, vor allem in schwierigen Geländebedingungen wird häufig auf die Anlage von Ausweichstellen verzichtet. Abbildung 127 zeigt eine Ausweiche nach RLW<sup>285</sup>. In vielen Fällen kann jedoch eine Reduktion auf die Hälfte der Längen möglich sein.<sup>286</sup>



Quelle: DWA (2009)

### Längsneigung

Fahrsicherheitsanforderungen und Vermeidung hoher Wegeunterhaltungskosten bedingen eine Höchstlängsneigung von 2 - 8 %. Nach den Richtlinien zur Walderschließung der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg von 1984 sind maximal 12 % Längsneigung anzustreben, welche nur in begründeten Einzelfällen überschritten werden darf.

### Querprofil

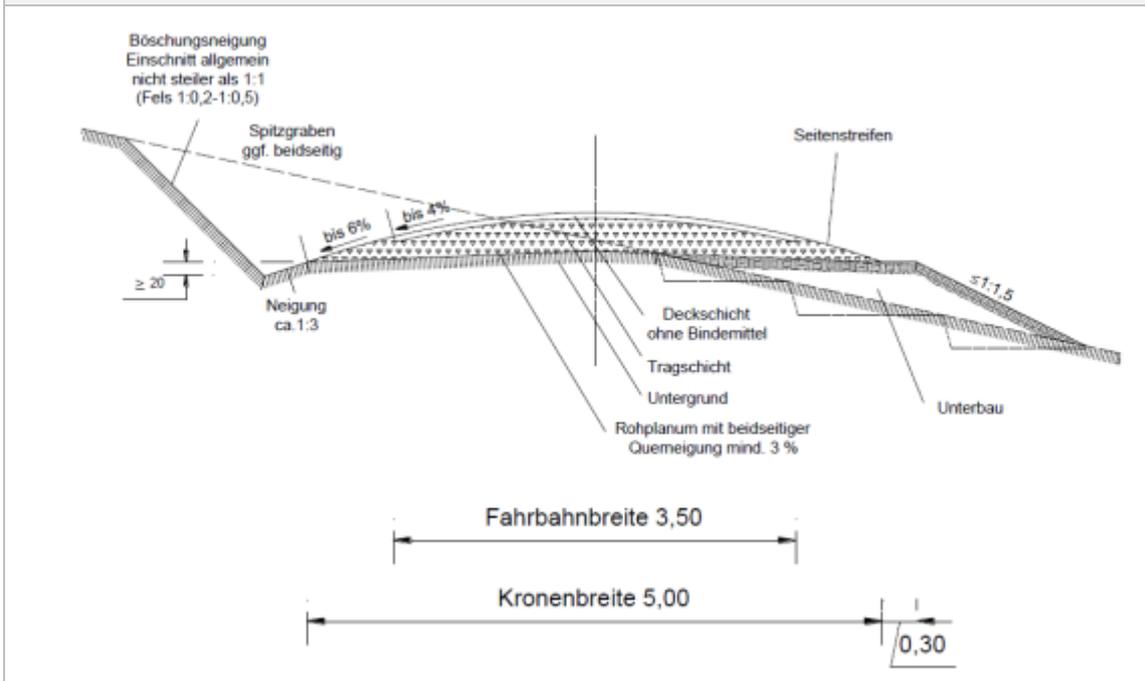
Bei der Gestaltung des Querprofils kommen Uhrglas- bzw. Dachprofil infrage (Abbildung 128). Bei ungebundenen Deckschichten ist die Uhrglasform vorgesehen. Dabei fällt das Profil zunächst beidseitig bis ca. 1,3 m um 4 - 6 % im Fahrbahnbereich und danach bis zum Rand der Wegekrone deutlicher um 8 - 12 % ab, was einerseits den zügigen seitlichen Wasserabfluss gewährleisten soll, andererseits können damit hohe Radlasten bei möglichst geringer Querneigung gleichmäßig auf die Fahrbahn übertragen werden. Die einseitige Neigung in engen Kurven soll ca. 6 % betragen. Die Fahrbahnbreite beträgt normalerweise 3,5 m mit beiderseits in den Seitenraum auslaufend befestigten und befahrbaren Seitenstreifen von mind. 0,5 m. Die Kronenbreite beträgt somit i. d. R. 4,5 m. In engeren Bögen ist außerdem eine Fahrbahnverbreiterung von 0,5 m vorzusehen. In ebenen Lagen kann die einseitige Neigung des Weges geeignet sein, wenn die Wasserableitung auf einen Graben beschränkt werden kann. Bei extrem beengten Situationen am Hang sind einseitige Querneigungen tolerierbar, wenn die Fahrwege von untergeordneter Funktion sind. Bei talseitiger Querneigung ist zu beachten, dass der Verkehr bei Glätte eingeschränkt ist, wegen der Gefahr des talseitigen Abrutschens von Fahrzeugen.

<sup>284</sup> ebd.; DWA 2009

<sup>285</sup> DWA 2009

<sup>286</sup> Dietz et al. 1984, S. 119

**Abbildung 128: Querprofil Holzabfuhrweg mit Uhrglas-/ Graderprofil nach RLW**



Quelle: DWA (2009)

Die Regelquerschnitte für Wege in Baden-Württemberg nach bisherigem Standard (1984) sind in Kapitel 8.2.2 dargestellt.

**Böschungen**

werden in Abtrags- und Auftragsböschung unterschieden, da aufgrund der Materialzusammensetzung verschiedene Winkel angelegt werden. So kann gewachsener Boden (Abtragsböschung) steiler anstehen als aufgeschütteter Boden (Auftragsböschung)<sup>287</sup>.

Die Abtragsböschung wird je nach Ausgangsboden mit Böschungsneigungen von 1:1, 4:5, 5:1 und 10:1 angelegt (Abbildung 129). Die Auftragsböschung je nach verwendetem Auftragsmaterial mit Böschungsneigungen von 4:5, 2:3 und 1:2<sup>288</sup>.

Hafner<sup>289</sup> empfiehlt folgende Böschungswinkel, in Abhängigkeit vom Material (Tabelle 71):

<b>Tabelle 71: Empfehlungen für Böschungswinkel in Abhängigkeit vom Ausgangsmaterial</b>		
<b>Material</b>	<b>Böschungswinkel</b>	
	<b>von</b>	<b>bis</b>
Feiner, loser Sand	1:2	1:1,17
Grober, lehmiger Sand	1:1,17	1:1,14
Festgelagerter Kies	1:1,25	1:1
Lehm und Ton, soweit trocken	1:1,5	1:1

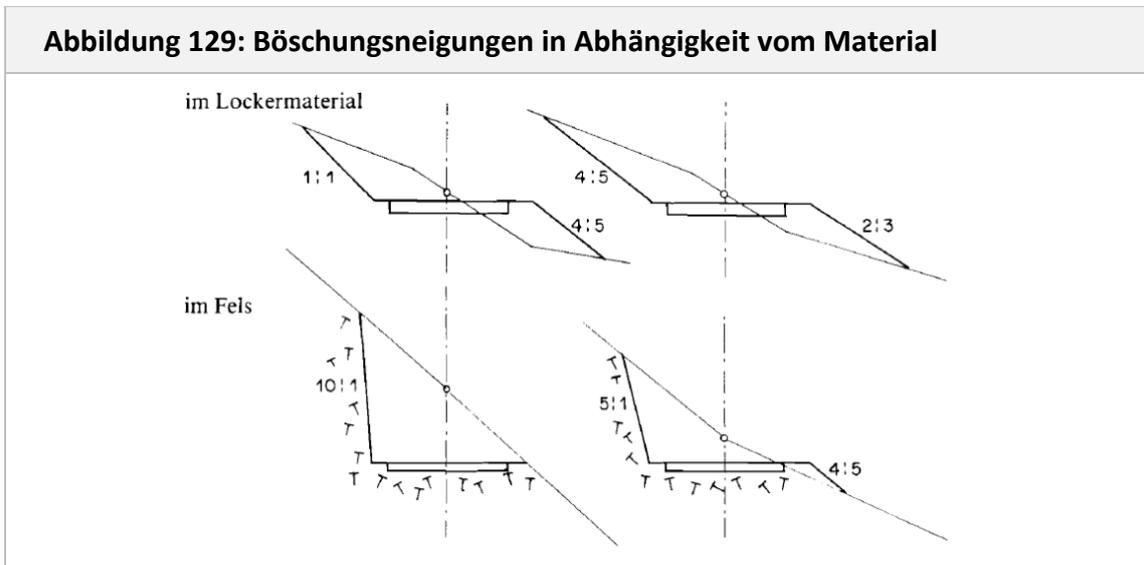
<sup>287</sup> Dietz et al., 1984

<sup>288</sup> Kuonen, 1983

<sup>289</sup> Hafner, 1971

Geröll	1:1,25	1:1
Gewachsener Fels	1:05	1:0,1

Quelle: Hafner, 1971<sup>289</sup>



Quelle: Kuonen (1983)<sup>290</sup>

Zur Sicherung der Böschungstabilität sind Böschungen mittels standortgerechter Einsaat zu begrünen. In steilerem Gelände bedarf es einer Befestigung durch biologische und/oder mechanische Mittel wie Stützwerken aus Holz, Schotterkästen oder Beton<sup>290</sup>.

Bei starker Geländeneigung ist zur Abrutschsicherung talseitig eine Stützfläche (sog. Böschungsfuß) anzulegen.

### Wasserableitung

Der Bestand und die Tragfähigkeit des Weges können nur erhalten bleiben, wenn der Wegekörper trocken gehalten wird. Einer angemessenen Entwässerung kommt somit eine entscheidende Funktion zu. Ziel ist hierbei auch ein möglichst unverändertes bzw. wenig gestörtes natürliches Abflussverhältnis. Deshalb soll die bestehende Vorflut erhalten bleiben. Damit alles ober- und unterirdisch abzuleitende Wasser schadlos und mit natürlichem Gefälle abfließen kann, ist die Höhenlage des Weges entsprechend festzulegen. Die Ableitung des Wassers erfolgt dabei zum einen als seitlicher Abfluss über die geneigte Gestaltung des Längs- und Querprofils, zum anderen über bauliche Merkmale wie Gräben und Durchlässe.

Kann das Wasser nicht direkt seitlich abgeführt werden, muss dies über Seitengräben geschehen. Diese sollen mit ihrer Sohle mindestens 0,2 m unter dem Wegeplanum liegen. Die Sohlbreite soll dabei größer 0,3 m sein.

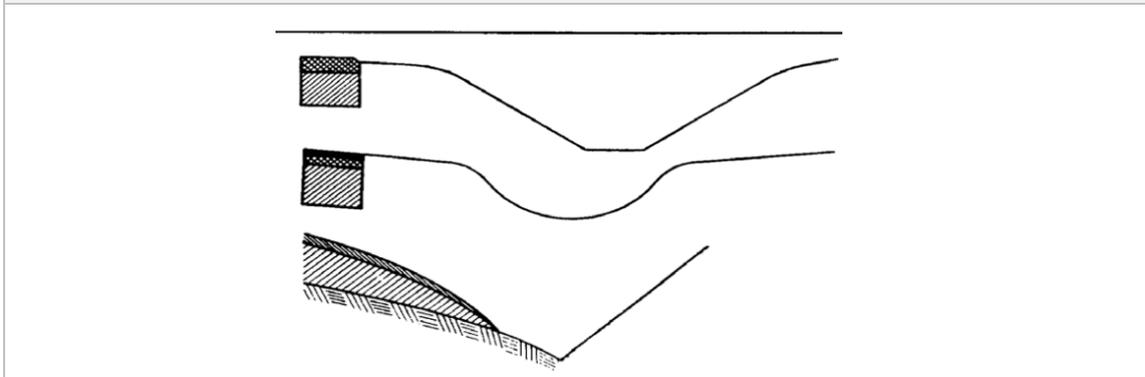
Dabei wird mit zunehmender Sohlbreite der Abflussbeschleunigung entgegengewirkt. Das Längsgefälle, welches i. d. R. der Neigung des Geländes folgt, sollte 0,3 % nicht unterschreiten.

Gräben sollten gegebenenfalls beidseitig angelegt werden, in Hangwegen als bergseitiger Seitengräben. Die Entwässerung erfolgt bei beidseitig geneigten Profilen zur Hälfte talwärts, zur anderen Hälfte in einen bergseitig angelegten Graben

<sup>290</sup> Kuonen, 1983

Als Wasserabzugsgräben kommen sowohl Spitz- als auch Trapezgräben (siehe Abbildung 130) infrage, wenn es sich um einen bergseitigen Entwässerungsgraben handelt. In Bereichen mit größerer Längsneigung (d.h. größer 8 %), bei zeitweise starker Wasserführung bzw. in erosionsgefährdeten Bereichen, können Sohlsicherungen erforderlich sein. Die Gräben sollen dabei in der Lage sein, sowohl das Hang- und Oberflächenwasser als auch Wasser aus dem Wegeplanum aufzunehmen.

**Abbildung 130: Grabenquerschnitte von Waldwegen. Oben: Trapezgraben. Mitte: Muldengraben. Unten Spitzgraben**



Quelle: Dietz et al. (1984)<sup>291</sup>

Durchlässe werden in der Regel aus Betonrohren ausgeführt, dabei finden Rohre Verwendung, die die Nennweite DN 400 [= 400 mm] nicht unterschreiten sollen. Diese Größe wird gewählt, um die Selbstreinigung zu erleichtern. Aus diesem Grund sollten die Durchlässe möglichst kurz sein. In besonderen Fällen müssen den Durchlässen Sand- und Geröllfänge vorgeschaltet werden, um eine gute Durchlässigkeit zu gewährleisten. Die Bemessung der Geröllfänge richtet sich nach dem zu erwartenden Abfluss und den Geschiebemengen. Außerdem sollte ihre Räumung jederzeit leicht möglich sein. Vorrang als Geröllfang haben vorhandene oder neu zu schaffende Geländevertiefungen oder Erdmulden. Ist dies nicht möglich, können Geröllfänge aus Beton hergestellt werden. In jedem Fall ist eine Fluchtmöglichkeit für Kleintiere einzuplanen.

Zur Entwässerung von Wegen sind auch unterirdische Ableitungen in Form von Sickerschichten bzw. Quersickerungen möglich.

Große Schäden auch durch die Vernachlässigung der Wasserableitungen und die damit verbundenen hohen Kosten führten unter anderem zum Erlass<sup>292</sup> des Ministeriums für Ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Baden-Württemberg vom 15.08.1994 zur Wasserableitung. Nach diesem Schreiben gelten klare Regeln zur Wasserableitung auf Waldwegen. Dolen sind dabei offen zu halten, die Funktionsfähigkeit ist regelmäßig zu überprüfen und wenn notwendig sind die entsprechenden Dolen auch zu ersetzen. Weiterhin sollen Gräben, Durchlässe und Wasserläufe, vor allem nach der Holzernte, von Hindernissen usw. freigemacht werden. Die Wegeböschungen und Seitenstreifen müssen so unterhalten werden, dass eine ordnungsgemäße Wasserableitung gewährleistet ist. Außerdem wird als wichtig erachtet, dass die Abstände von Entwässerungsanlagen zu groß oder die Dimension zu gering gewählt wurden, mit den entsprechend negativen Folgen für eine angemessene Wasserableitung. Laut

<sup>291</sup> Dietz et al. (1984)

<sup>292</sup> Ministerium für Ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (15.06.1994): Erlass zur Wegeunterhaltung und Wasserableitung im Staatsforstbetrieb, Az.: 56-8644.21

diesem Schreiben sollte dieser Zustand im Rahmen der zur Verfügung stehenden Mittel verbessert werden. Mit der Grabenreinigung beschäftigt sich ein gesondertes Schreiben vom 06.03.1996 des damaligen Ministeriums für Ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Baden-Württemberg. Hierin wird auf den Einsatz von im Vergleich zur Grabenfräse schonenderen Verfahren eingegangen z.B. durch den Einsatz des Grabenbaggers mit seinen Vorteilen in Bezug auf Schutz von im Graben lebenden Tieren. Weitere Vorteile des Baggers werden angeführt: So bleibt beispielsweise die teilweise wertvolle und seltene Böschungflora durch die gezielte, punktuelle talseitige Ablage erhalten. Außerdem werden die Randbäume und die angrenzenden Bestände vor Beschädigung und Verschmutzung bewahrt. Ebenso unterbleibt eine Beschädigung und/oder Verschmutzung von Wegschildern, Abteilungstafeln oder Jagd- und Erholungseinrichtungen. Durch die talseitige Ablage erfolgt zusätzlich bei Niederschlägen kein erneutes Einschwemmen des Aushubs in den Graben, was eine Verlängerung der Grabenreinigungsintervalle ermöglicht. Im Zuge der Grabenreinigung mithilfe des Baggers können auch kleinere Rutschungen und sonstige Unterhaltungsarbeiten durchgeführt werden. Der Einsatz des Grabenbaggers lohnt auch für kleinere Grabenabschnitte, während sich die Grabenfräse nur bei längeren Wegeabschnitten lohnt. Die höheren Kosten des Baggers im Vergleich zur Grabenfräse sollen durch die Verlängerung der Reinigungsintervalle kompensiert werden. Die Grabenfräsen sollen nur noch dann zum Einsatz kommen, wenn keine negativen ökologischen und technischen Folgen zu erwarten sind.

### Tragfähigkeit

Ein ausreichend tragfähiger Untergrund und Unterbau sind eine wesentliche Voraussetzung für die Haltbarkeit der Befestigung<sup>293</sup>. Eine gleichmäßige Tragfähigkeit ist anzustreben. Die Standfestigkeit eines Weges (d.h. die Vermeidung von unnötiger Setzung) ist im weitesten Umfang abhängig von der Tragfähigkeit des Untergrundes. Daher benötigt es im individuellen Fall eine Anpassung des Oberbaus in Abhängigkeit von vorhandenem und aufgetragenem Untergrund<sup>294</sup>. Die Tragfähigkeit wird in der Regel durch das Verformungsmodul  $E_{v2}$  [MN/m<sup>2</sup>] angegeben und nach DIN 18 134 gemessen. In der Praxis wird dies häufig durch die Befahrung eines beladenen LKWs abgeschätzt<sup>295</sup>.

In der Praxis hat sich bei der Planung von Waldwegen eine Anlehnung an die Bauvorschriften und Mindesttragwerte der Bauklasse V in Verbindung mit den „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen für den Bau von Wegen und Plätzen außerhalb Flächen des Straßenverkehrs“<sup>296</sup> eingebürgert<sup>297</sup>. Demnach ergibt sich für forstliche Wege ein **Verformungsmaß** von mind. 80 MN/m<sup>2</sup> als Richtwert für die Oberflächenfestigkeit. Dieser Wert sollte an der Oberseite der ersten Tragschicht erreicht werden<sup>298</sup>. Abbildung 131 zeigt die Standardbauweisen und Befestigungen in Abhängigkeit der Untergrundtragfähigkeit und Beanspruchung bei bindemittelfreien Wegen.

---

<sup>293</sup> DWA 2009, S. 59

<sup>294</sup> ebd.

<sup>295</sup> ebd., S. 62

<sup>296</sup> ZTV 2013

<sup>297</sup> Becker et al. 1995, S. 60

<sup>298</sup> DWA 2009, S. 70

**Abbildung 131: Standardbauweisen für den ländlichen Wegebau nach RLW (Ausschnitt)**

Zeile	Bauweise	Beanspruchung						Gering			
		Hoch	Mittel	Mittel		Gering					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
		Spalte		T		T		T		T	
		T		T		T		T		T	
		E <sub>v,2</sub> = 30 MN/m <sup>2</sup> E <sub>v,2</sub> = 45 MN/m <sup>2</sup> E <sub>v,2</sub> = 80 MN/m <sup>2</sup>		E <sub>v,2</sub> = 30 MN/m <sup>2</sup> E <sub>v,2</sub> = 45 MN/m <sup>2</sup> E <sub>v,2</sub> = 80 MN/m <sup>2</sup>		E <sub>v,2</sub> = 30 MN/m <sup>2</sup> E <sub>v,2</sub> = 45 MN/m <sup>2</sup> E <sub>v,2</sub> = 80 MN/m <sup>2</sup>		E <sub>v,2</sub> = 30 MN/m <sup>2</sup> E <sub>v,2</sub> = 45 MN/m <sup>2</sup> E <sub>v,2</sub> = 80 MN/m <sup>2</sup>		E <sub>v,2</sub> = 30 MN/m <sup>2</sup> E <sub>v,2</sub> = 45 MN/m <sup>2</sup> E <sub>v,2</sub> = 80 MN/m <sup>2</sup>	
		häufige Überfahrten zentrale Funktion im Wegenetz maßgebende Achslast 11,5 t großer Schwierigkeitsgrad	gelegentliche / saisonale Überfahrten mittlere Funktion im Wegenetz maßgebende Achslast 5 t, gelegentlich 11,5 t mittlerer Schwierigkeitsgrad	gelegentliche / saisonale Überfahrten mittlere Funktion im Wegenetz maßgebende Achslast 5 t, gelegentlich 11,5 t mittlerer Schwierigkeitsgrad	gelegentliche / saisonale Überfahrten mittlere Funktion im Wegenetz maßgebende Achslast 5 t, gelegentlich 11,5 t mittlerer Schwierigkeitsgrad	gelegentliche / saisonale Überfahrten mittlere Funktion im Wegenetz maßgebende Achslast 5 t, gelegentlich 11,5 t mittlerer Schwierigkeitsgrad	gelegentliche / saisonale Überfahrten mittlere Funktion im Wegenetz maßgebende Achslast 5 t, gelegentlich 11,5 t mittlerer Schwierigkeitsgrad	seltene Überfahrten untergeordnete Funktion im Wegenetz maßgebende Achslast 5 t, ausnahmsweise 11,5 t geringer Schwierigkeitsgrad	seltene Überfahrten untergeordnete Funktion im Wegenetz maßgebende Achslast 5 t, ausnahmsweise 11,5 t geringer Schwierigkeitsgrad	seltene Überfahrten untergeordnete Funktion im Wegenetz maßgebende Achslast 5 t, ausnahmsweise 11,5 t geringer Schwierigkeitsgrad	seltene Überfahrten untergeordnete Funktion im Wegenetz maßgebende Achslast 5 t, ausnahmsweise 11,5 t geringer Schwierigkeitsgrad
1	Ohne Bindemittel, ohne Deckschicht										
2	Ohne Bindemittel, mit Deckschicht										

**Legende:**

- = Deckschicht
- = Asphalttragdeckschicht
- = Betondecke
- = Pflasterbett, 3 - 5 cm
- = hydraulisch gebundene Tragdeckschicht (HGTD)
- = hydraulisch gebundene Deckschicht (HGD)
- = Tragschicht aus Schotter
- = Tragschicht aus Kies
- = Tragschicht aus unsortiertem Gestein

Quelle: DWA (2009)<sup>299</sup>

<sup>299</sup> DWA, 2009

### Umgang mit Ingenieurbauwerken in Baden-Württemberg

Zur Überwachung und Prüfung von Brücken, Durchlässen, Stützmauern und Dämmen/Deichen sowie von sonstigen Ingenieurbauwerken liegt das entsprechende Schreiben des Ministeriums für Ernährung und Ländlichen Raum vom 09.06.2004<sup>300</sup> vor. Ziel war die einheitliche Erfassung und Überwachung solcher Bauwerke im Land Baden-Württemberg auf Grundlage der DIN 1076. Hierbei sollen etwaige Mängel frühzeitig erkannt und zeitnah behoben werden, bevor größere Schäden eintreten, welche zu hohen Kosten bei der Instandsetzung führen können. Für die Überwachung und Prüfung von Ingenieurbauwerken, deren Baulast ganz oder teilweise der Staatsforstverwaltung obliegt, gilt in Anlehnung an die DIN 1076 folgendes: Die Überwachung und Prüfung sind von den Forstämtern in Bauwerkseinzelblättern für nachstehende Bauwerke zu erfassen:

- alle Brücken und Durchlässe mit einer lichten Weite größer als 1,00 m (rechtwinklig zwischen den Widerlagern oder Wandungen gemessen),
- alle Stützmauern mit einer sichtbaren Höhe größer als 1,50 m,
- alle Dämme/Deiche mit einer Dammhöhe größer als 5 m über der Wasserlaufsohle bzw. dem tiefsten Geländepunkt am Absperrbauwerk oder mit einem Stauraum größer als 100.000 m<sup>3</sup> oder kleinere Becken (in der Regel über 5.000 m<sup>3</sup>), die nach den örtlichen Verhältnissen bei einem Bruch erhebliche Gefahren befürchten lassen.

Dabei wird jedem Bauwerk ein Bauwerkskennzeichen zugewiesen, welches sich aus der Landkreisnummer, dem Bauwerkstyp und einer laufenden Bauwerksnummer zusammensetzt. Die angesprochenen Bauwerkseinzelblätter enthalten dabei alle wichtigen Daten des Bauwerks und dienen dem Revierleiter als Dokumentation vorgenommener Überwachungen und Prüfungen. Im Übrigen bestimmt das Forstamt, wer die erforderlichen Überwachungen vornimmt, i. d. R. handelt es sich dabei um den Revierleiter. Zum besseren Überblick über die für die Verkehrssicherheit relevanten Ingenieurbauwerke im Staatswald ist ein Bauwerksverzeichnis in FOKUS 2000 umgesetzt, welches durch die Forstämter geführt wird. Dem Revierleiter ist dieses Verzeichnis zur Verfügung zu stellen. Für Bauwerke, an denen Sanierungs- oder Umbaumaßnahmen durchgeführt wurden, ist eine Bauwerksakte anzulegen. Empfohlen wird außerdem das Führen einer Bauwerkskarte. Ebenfalls sollen die Bauwerke in die digitalen Wegekarten miteinbezogen werden. Im baden-württembergischen Staatswald sind die Bauwerke im verwendeten FoGIS (Forstliches Geographisches Informationssystem) eingepflegt und Informationen zum einzelnen Bauwerk sind in der entsprechend zugehörigen Tabelle festgehalten. Bis zu einem Durchmesser von 1m gelten entsprechende Anlagen als Durchlässe und werden nicht als Bauwerk erfasst. Die Bauwerksüberwachung gliedert sich in die Besichtigung sowie in die laufende Beobachtung dieser. Bauwerke, die keiner grundsätzlichen Prüfungs- und Überwachungspflicht unterliegen, werden im Rahmen der Verkehrssicherungspflicht kontrolliert. Das Ergebnis der Bauwerksüberwachung mündet u. a. in eine Zustandsbewertung. Vorgesehen ist bei Ingenieurbauwerken eine regelmäßige einmal jährlich stattfindende Kontrolle auf offensichtliche Mängel bzw. Schäden.

Protokolliert werden sollen dabei:

- außergewöhnliche Veränderungen am Bauwerk,

---

<sup>300</sup> Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg (09.06.2004): Überwachung und Prüfung der Brücken, Durchlässe und Stützmauern sowie der sonstigen Ingenieurbauwerke an Waldwegen und Stauanlagen im Staatswald (Aktenzeichen: 54-8644.21)

- erhebliche Mängel / Schäden an und Fehlen von Verkehrszeichen, Schutzeinrichtungen und Absturzsicherungen (z.B. Geländer, Brüstungen),
- erhebliche Mängel / Schäden und Verunreinigungen an Entwässerungseinrichtungen und Übergangskonstruktionen (Oberflächenwasser staut sich auf dem Bauwerk oder im Bereich des Überganges, verstopfte Abflussrohre),
- erhebliche Mängel / Schäden an Belägen (z.B. Schlaglöcher, Folgeschäden an der Abdichtung mit Sinterungen an der Unterseite des Überbaues, Korrosion der Stahlträger, Fäulnis an Holzteilen),
- erhebliche Anprallschäden und Betonabplatzungen, auffallende Risse, Steinausbrüche im Mauerwerk, freiliegende Stahlbewehrung,
- augenscheinliche Verformungen und Verschiebungen des Bauwerkes (z.B. Verformungen von Steinmauerwerk am Widerlager oder an Flügelmauern, Verschiebungen von Stützmauern, Verformungen an Dämmen/Deichen),
- Mängel / Schäden an Böschungen (z.B. Rutschungen, Bewuchs, Wasseraustritt),
- Auskolkungen und Anlandungen an Gewässern (z.B. Steinausbrüche aus den Sohlenpflasterungen, Unterspülung der Widerlagerfundamente, Zerstörung der Schwellen und Abtreppungen).

Außerdem müssen die Bauwerke nach außergewöhnlichen Ereignissen, welche die Stand- und Verkehrssicherheit beeinträchtigen können, besichtigt werden (z.B. nach Ablauf eines größeren Hochwassers oder nach schweren Unfällen). Bauwerksbesichtigungen sind immer auf dem Bauwerkseinzelblatt innerhalb der Bauwerksakte zu dokumentieren. Im Zuge der allgemeinen Überwachung der Verkehrswege sind auch die Ingenieurbauwerke zu beobachten. Im Falle der Beeinträchtigung eines dieser Bauwerke sind gegebenenfalls Sofortmaßnahmen zu veranlassen. Die Bauwerksprüfung hingegen ist für alle erfassten Ingenieurbauwerke in regelmäßigen Abständen durch sachkundige Personen durchzuführen. Hierbei sind vor allem die sachkundigen Ingenieure aus der Landesverwaltung einzusetzen (z.B. im Rahmen der Amtshilfe). Diese Prüfungen sind im Abstand von 6 Jahren vorgesehen. Bei Bedarf kann das Prüfungsintervall verkürzt werden (z.B. für sehr stark beanspruchte Brücken zu Nasslagerplätzen). Die Forstämter erhalten dann vom zuständigen Prüfer einen Prüfungsbefund unter Angabe der erforderlichen Maßnahmen. Im Nichtstaatswald verbleibt die gesetzliche Verkehrssicherungspflicht beim jeweiligen Waldbesitzer (Baulastträger). Das Forstamt soll allerdings beim Feststellen von Mängeln den Waldbesitzer informieren.

### **Landeswaldgesetz Baden-Württemberg**

In Bezug auf den Waldwegebau sind im Landeswaldgesetz Baden-Württemberg entsprechende Regelungen enthalten.

So ist im §14 LWaldG „**Pflegliche Bewirtschaftung des Waldes**“ aufgeführt:

(1) Zur pfleglichen Bewirtschaftung gehört insbesondere

6. den Wald nach Leistungsfähigkeit des Waldbesitzers ausreichend mit Waldwegen zu erschließen.

Der § 19 „**Bau und Unterhaltung von Waldwegen**“ des derzeit gültigen Landeswaldgesetz des Landes Baden-Württemberg lautet:

#### **Unterhaltung von Waldwegen**

1. Waldwege dienen der Erschließung des Waldes zum Zwecke seiner Bewirtschaftung und der Erholung der Waldbesucher. Unberührt bleiben die Vorschriften dieses Gesetzes über das Betreten des Waldes sowie sonstige Vorschriften über die Benutzung der Waldwege.
2. Waldwege sind so anzulegen und zu unterhalten, dass unter Berücksichtigung technischer und wirtschaftlicher Gesichtspunkte das Landschaftsbild, der Waldboden und der Naturhaushalt möglichst geschont werden.
3. Absatz 2 gilt sinngemäß für den Bau und die Unterhaltung von Skiabfahrten, Waldparkplätzen und sonstigen Erholungseinrichtungen.

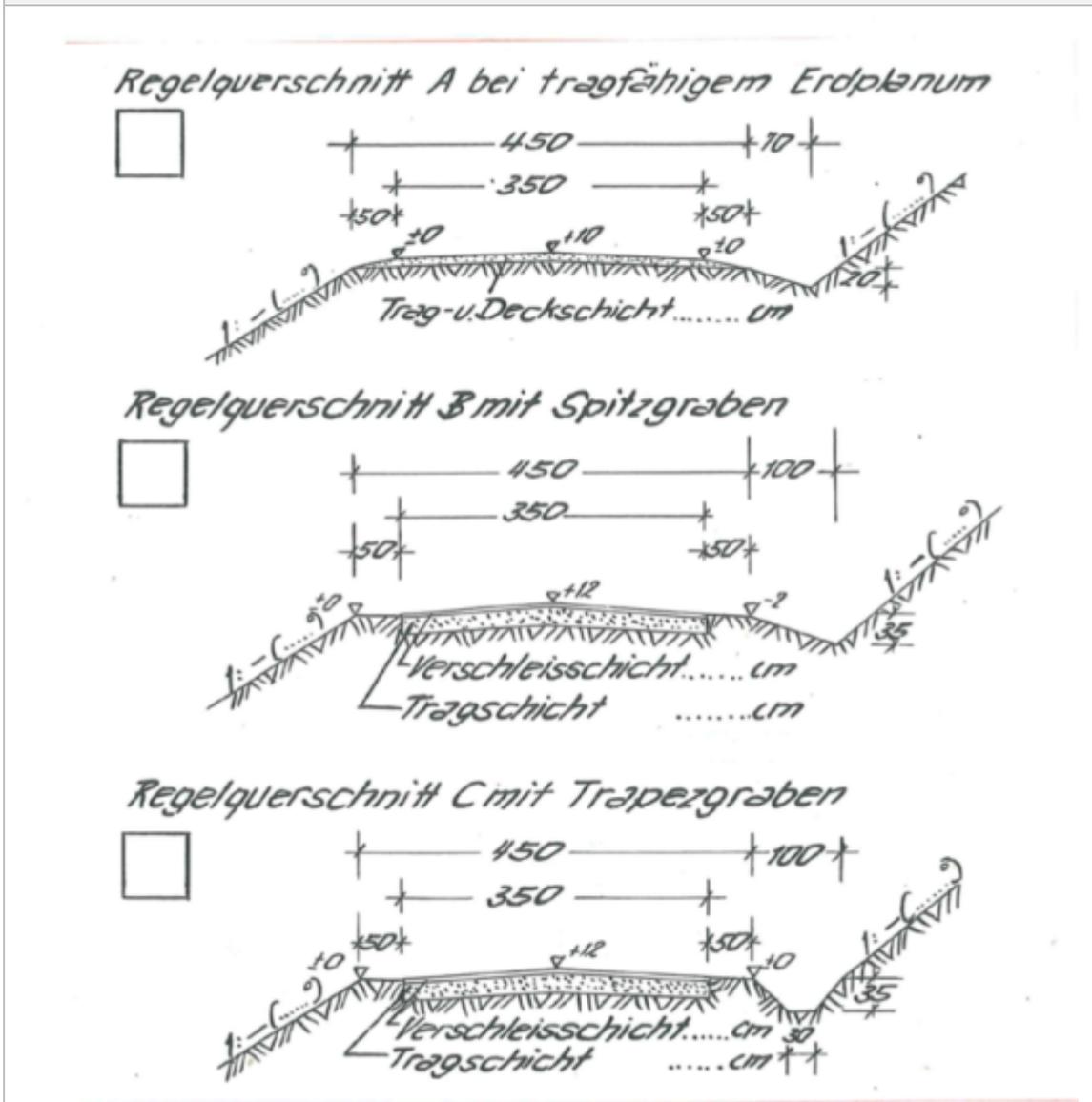
Zur Frage, inwieweit der Bau von Waldwegen Bestandteil der ordnungsgemäßen Forstwirtschaft bzw. als forstwirtschaftliche Bodennutzung gilt, gibt es derzeit unterschiedliche Auffassungen, die z.T. aus dem LWaldG oder dem BNatschG abgeleitet sind.

#### **8.2.2 Standards nach der Richtlinie zur Walderschließung der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg (Stand: Oktober 1984)**

In dieser Richtlinie wird in Bezug auf die Grundanforderungen für Fahrwege auf die Richtlinien für den ländlichen Wegebau (RLW 2005) und auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen. Die wesentlichen Hinweise werden dann benannt. Ein Fahrweg in Baden-Württemberg soll demnach eine Längsneigung von 2 - 8 % (in Ausnahmefällen bis 12 %) aufweisen, der Linienverlauf soll mit ausgeglichenem Gefälle ausgestattet sein. Bei der Linienführung ist vor allem eine weitgehend an das Gelände angepasste Form anzustreben. Bei den Kurvenradien sollen bestimmte Mindestradien nicht unterschritten werden, wobei im flachen Gelände mindestens 50 m, im steileren Gelände mindestens 20 m als Radius einzuplanen sind. Bei Kehren im steileren Gelände wiederum sollte der Außenradius mindestens 15 m betragen, der Innenradius mindestens 7,50 m. Dies wird in der RLW nicht geregelt. Steilhänge mit Hangneigungen über 50 - 60 % und Rutschhänge sollen im Regelfall weder durch Fahrwege noch durch Maschinenwege angeschnitten werden, um negative Auswirkungen zu vermeiden. Für einen reibungslosen Verkehr sollen außerdem Sackwege vermieden werden. Die Fahrbahnbreite soll 3,50 m betragen, wobei in Kurven mit einem Radius kleiner 50 m Fahrbahnverbreiterungen vorgesehen sind. Die Einmündung dieser Hauptfahrwege in öffentliche Straßen ist aus Sicherheitsgründen an übersichtlichen Stellen vorzusehen. Hierbei ist zu beachten, dass die Verkehrsrechtsbehörde und der Straßenbaulastträger rechtzeitig einzubeziehen sind und, dass mit diesen Benehmen hergestellt werden muss.

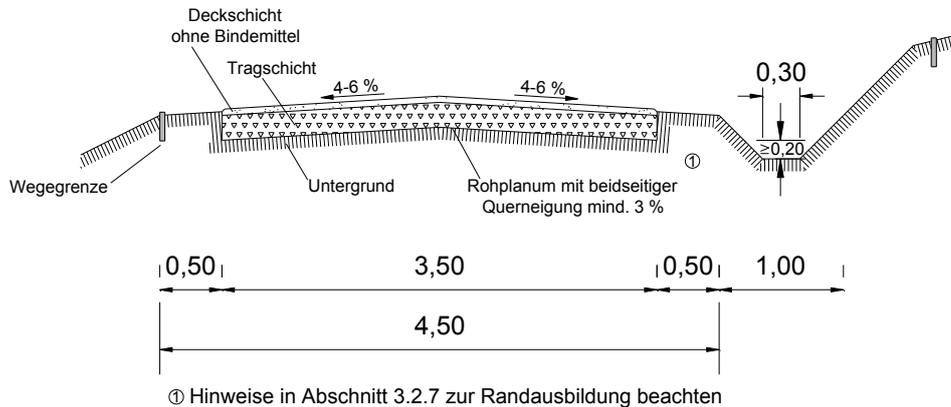
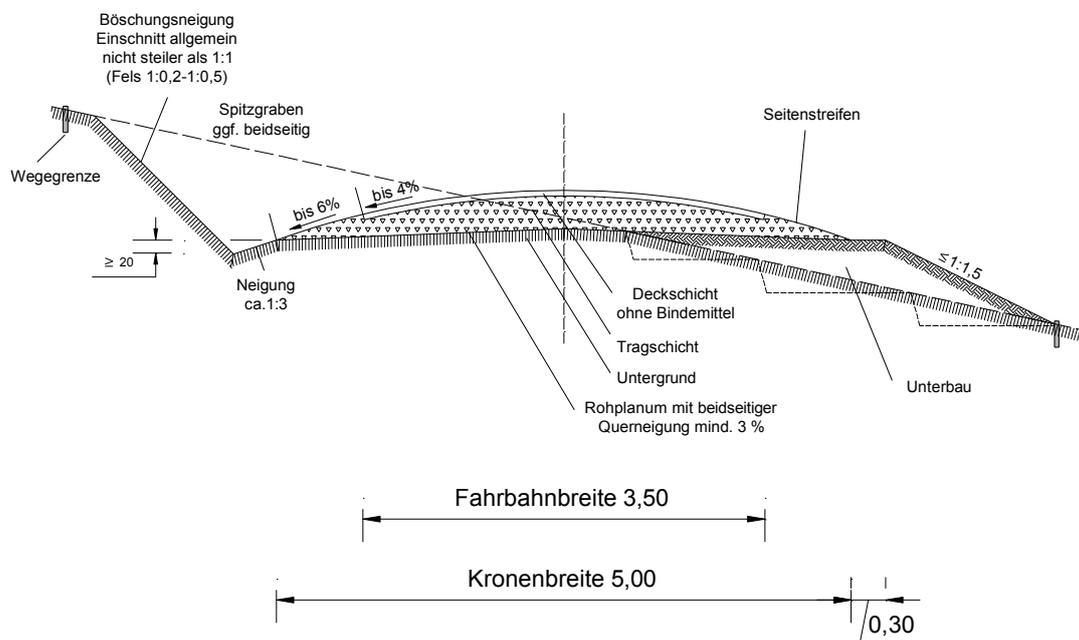
Die Regelquerschnitte für Wege in Baden-Württemberg nach bisherigem Standard (1984) sind in Abbildung 132 dargestellt:

Abbildung 132: Regelquerschnitte Waldwege



Quelle: Dietz et al. (1984)

In Abbildung 133 sind die aktuell überarbeiteten Regelprofile dargestellt, wie sie künftig in der RLW zu finden sein werden.

**Abbildung 133: Querprofile Holzabfuhrweg nach künftigem Standard****Dachprofil****Uhrglasprofil**

Quelle: DWA (2015)

Anschlüsse für Maschinenwege sind bereits zusammen mit dem Fahrwegbau herzustellen. Weiterhin sollen ausreichende Entwässerungsanlagen eingeplant werden; eine detailliertere Angabe zur Anlage der Dolen und Gräben wird im Rahmen dieser Richtlinie nicht getroffen.

Der Fahrbahnaufbau soll in Abhängigkeit vom Untergrund und dem zur Verfügung stehenden Baumaterial erfolgen. Bituminöse Fahrbahndecken bzw. Tragdeckschichten aus Beton hingegen sollen nur auf begründete Ausnahmefälle beschränkt bleiben.

Der fachgerechten Wegeinstandhaltung kommt im Hinblick auf die hohen Investitionskosten eine große Bedeutung zu. Laut Richtlinie sind je nach Grad der Abnutzung Maßnahmen in unterschiedlichen Zeitabständen nötig. Dazu gehören:

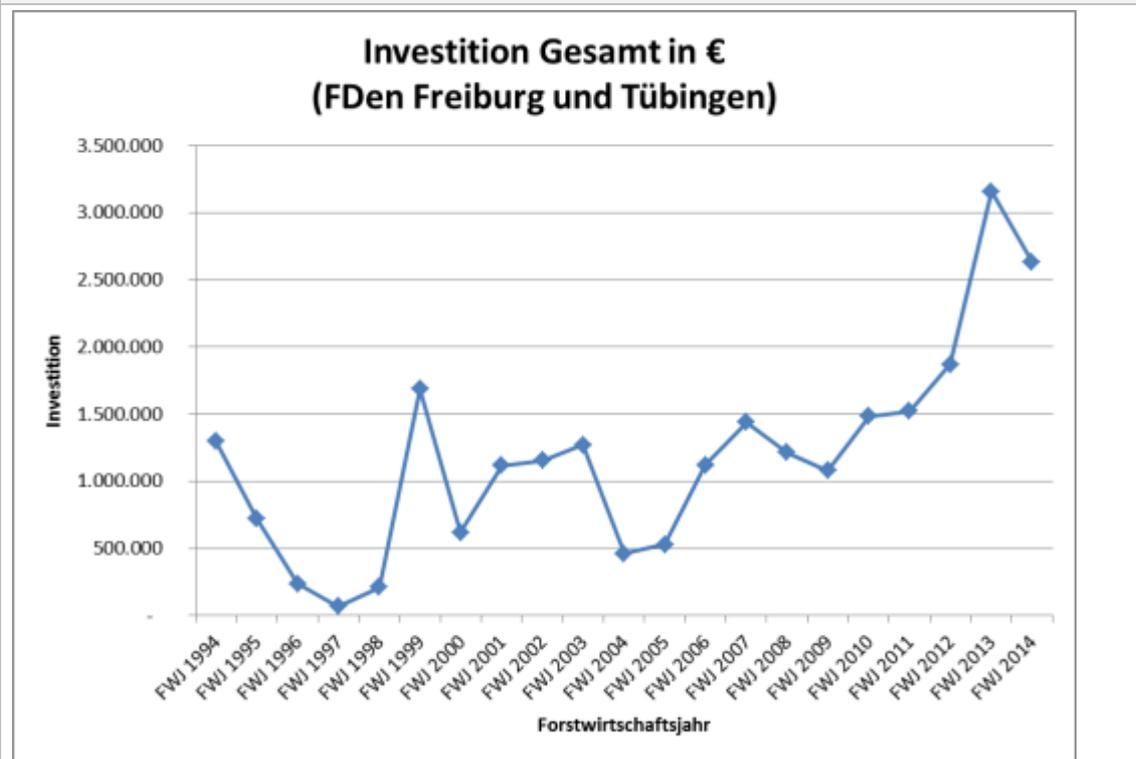
- Instandhaltung bzw. Wiederherstellung des Regelquerschnitts
- Mähen der Bankette; jedoch nur dort, wo erforderlich

- Grabenreinigung und Instandhaltung der übrigen Entwässerungseinrichtungen, möglichst nach der Laich- und Aufwuchszeit dort vorkommender gefährdeter Amphibienarten. Diese Arbeiten werden laut Richtlinie überwiegend maschinell durchgeführt.
- Kontrolle und Instandhaltung der Kunstbauten (Mauern, Durchlässe, Brücken)
- Freihalten des Lichtraumprofils

### 8.2.3 Investitionen des Landes Baden-Württemberg in Waldwege

Die Auswertung der Investitionen des Landes in die Wegeinfrastruktur beruht auf Daten, die von der Betriebsleitung ForstBW, Fachbereich Tü 84 (Waldarbeit) zur Verfügung gestellt wurden. Ausgewertet wurden die Jahre 1994 bis 2014 (s. Abbildung 134). Die Investitionen beziehen sich auf das gesamte Wegenetz im Staatswald Baden-Württembergs, also rund 16.500 km.

**Abbildung 134: Investitionen in die Waldwege des Landes Baden-Württemberg 1994 bis 2014**



Quelle: ForstBW, Fachbereich Tü 84 (Waldarbeit)

In den letzten Jahren lässt sich ein deutlicher Trend zu höheren Investitionen in die Wegeinfrastruktur im Staatswald Baden-Württemberg ablesen. Für 2001<sup>301</sup> scheinen die schweren Gewitter und Starkniederschläge durch Tief Willy erhebliche Schäden verursacht zu haben. Ähnliches gilt für viele weitere kleinere, teilweise lokal begrenzte, Wetterereignisse mit enormen Regenmengen. Beispielhaft sei hier die Wetterlage vom 18. bis zum 22.03.2002 genannt, die zu starken Regenmengenakkumulationen geführt hat (so z.B. in Freudenstadt mit 248 l/m<sup>2</sup> in nur 5 Tagen<sup>302</sup>).

<sup>301</sup>Axer T. et al. (2004)

<sup>302</sup>Axer T. et al. (2004)

### 8.2.4 Kriterien GeoDat /NavLog

Im Folgenden werden die Wegestandards beschrieben, auf deren Grundlage die Wegeklassifizierung in GeoDat/NavLog<sup>303</sup> erfolgt. Ein Wegeabschnitt ist danach LKW-befahrbar oder nicht LKW-befahrbar. In einer Grobklassifikation werden LKW-befahrbare Wege nach ihrer betrieblichen Lenkungsfunktion unterschieden.

#### LKW-befahrbare Wege

- Wege mit betrieblicher Lenkungsfunktion. Diese Wege sind bevorzugt zu nutzen.
  - **Wegeklasse 1:** Technisch gut ausgebaut, betrieblich als Holzabfuhrweg gewollt (Standard LKW-Weg)
  - **Wegeklasse 2:** Technisch nicht Wegeklasse 1, aber betrieblich zur Holzabfuhr bevorzugt zu nutzen (Sonstiger LKW-Weg)
- Wege ohne betriebliche Lenkungsfunktion. Diese Wege werden nur befahren, wenn das Ziel auf keinem anderen Weg erreicht werden kann.
  - **Wegeklasse 3:** Nicht bevorzugt zur Holzabfuhr zu nutzen (Sonstiger LKW-Weg)

#### Nicht LKW-befahrbare Wege

Ergänzend werden alle sonstigen Nicht-LKW-Wege (**Wegeklasse 4**) ohne weitere Attributierung erfasst. Diese Wege werden bei visuellen Darstellungen zur besseren Orientierung und zur Unterstützung der Navigationsanweisungen benötigt.

---

<sup>303</sup> NavLog, 2008

<b>Tabelle 72: Merkmale Standard und Sonstiger LKW-Weg nach GeoDat</b>		
<b>Merkmal</b>	<b>Wegeklasse 1 (Standard LKW-Weg)</b>	<b>Wegeklasse 2 (Sonstiger LKW-Weg)</b>
Tragfähigkeit	Der Weg ist ohne irreversible Verformung grundsätzlich voll beladen befahrbar (Ausnahme: Witterungsbedingte Durchnässung)	Der Weg ist ohne irreversible Verformung zeitweilig voll beladen befahrbar (Beispiel: Nur bei Trockenheit im Sommer oder bei tiefgehendem Bodenfrost)
Fahrbahnbreite	Mindestens 3,0 m (auf 3,0 m Breite muss die Tragfähigkeit gewährleistet sein)	
Kurvenradius	Mindestens 10,0 m (mit Fahrbahnverbreiterung) Mindestens 30,0 m (ohne Fahrbahnverbreiterung)	Die Kurvenradien unterschreiten die Mindestradien eines Standard LKW-Weges in allen oder einem Teil der Kurven
Steigung	Maximal 12 % (bei bindemittelfreier Bauweise)	Übersteigt die maximal zulässige Steigung eines Standard LKW-Weges auf einem Teil oder auf der gesamten Länge des Wegeabschnittes
Lichtraumprofil	Mindestens 4,0 m Breite, mindestens 4,2 m Höhe (an Polter- und Lagerplätzen ist ein entsprechend großzügigeres Lichtraumprofil zu schaffen)	
Wendemöglichkeit	Auch für unbeladene Gliederzüge vorhanden (Wendeplatte von mindestens 20 m Durchmesser oder Wendehammer mit mindestens 25 m Gesamttiefe (einschließlich vorgelagerter Wegebreite) und 5,0 m Breite, dessen Einmündung mit einem Radius von mindestens 5,0 m nach beiden Seiten gerundet ist)	Nicht spezifiziert
Brücke, Durchlass	Befahrung für voll beladene Fahrzeuge möglich	Nicht spezifiziert, jegliche Einschränkung im Vergleich zum Standard LKW-Weg wird angegeben
Unterführung	Mindestens 3,5 m Breite, mindestens 4,2 m Höhe	

Quelle: NavLog (2008)

Die exakte Klassifizierung des Weges erfolgt durch orts- und fachkundiges Personal. Die in Tabelle 72 aufgeführten Definitionen und Attribute dienen als Entscheidungshilfe für die Einstufung eines Wegeabschnittes. Hierbei sollen nicht die einzelnen Parameter mit hohem Aufwand exakt bestimmt und erfasst werden, vielmehr ist der Sachverstand der Fachleute zu nutzen. Wo das Holz bisher problemlos mit einem LKW transportiert wurde, handelt es sich um einen LKW-befahrbaren Weg.

### 8.2.5 Potentieller Einfluss höherer zulässiger Gesamtgewichte auf Wegebaustandards<sup>304</sup>

Die Untersuchung der Wegestandards, die bei einer Auflasterhöhung der Holzabfuhrfahrzeuge evtl. einer Anpassung bedürfen, umfasste die Querprofilausformung sowie den horizontalen und vertikalen Wegeverlauf. Dabei wurde angenommen, dass die Erhöhung der Auflast unter

<sup>304</sup> Bearbeitung: Professur für Forstlicher Verfahrenstechnik, Uni Freiburg

Verwendung bisher eingesetzter Abfuhrfahrzeuge erfolgt und somit keine Veränderung der Fahrzeugabmessungen (inkl. Ladung) zu berücksichtigen ist. Grundlage für die Beurteilung eines möglichen Anpassungsbedarfs der Wegestandards ist die potentielle Veränderung der Fahreigenschaften bzw. des Schwerpunktes der Holzabfuhrfahrzeuge bei Auflasterhöhung.

Nach Beurteilung des KIT–Mobima (Kapitel 5) ist nicht zu erwarten, dass sich Fahr- und Bremsverhalten der Fahrzeuge auf Waldwegen im Normalbetrieb durch ein höheres Gesamtgewicht wesentlich ändern, da die Fahrzeuge technisch für deutlich höhere als die zulässigen Gesamtgewichte (bis zu 53 t) ausgelegt sind und elektronische Assistenzsysteme wie ABS und ESP vorhanden sowie bei neueren Fahrzeugen auch gesetzlich vorgeschrieben sind. Allerdings könnte sich bei einer Querneigung von Wegen unter Umständen auf Grund des höheren Schwerpunktes der beladenen Fahrzeuge im Vergleich zum Ist-Zustand ein höheres Kippisiko ergeben, da hier keine elektronischen Systeme gegenarbeiten. Auch bei schnelleren Kurvenfahrten könnte der höhere Schwerpunkt die Kippgefahr erhöhen. Ein weiterer Aspekt ist das Bremsverhalten. Der Bremsweg hängt physikalisch von der Ausgangsgeschwindigkeit des Fahrzeugs und dem Reibungsbeiwert des Untergrundes (der Oberflächenbeschaffenheit des Fahrweges) ab. Die Länge des Bremsweges ist damit weitgehend unabhängig von der Masse des Fahrzeugs, solange die Bremsen ausreichend dimensioniert sind. Eine Erhöhung des Gesamtgewichtes des Fahrzeugs erfordert für die Verzögerung eine höhere Bremskraft und Bremsleistung. Zur Erhöhung der Fahrsicherheit sollten bei erhöhten Gesamtgewichten der Abfuhrfahrzeuge Wegebauten größere Haltesichtweiten durch eine gestrecktere horizontale Linienführung entgegenwirken. Bezüglich der vertikalen Linienführung besteht aus technischer Sicht hinsichtlich Brems- und Steigfähigkeit kein Änderungsbedarf des Standards Tabelle 73 gibt einen Überblick über gutachterliche Anpassungsempfehlungen der Wegestandards bei Auflasterhöhung.

<b>Tabelle 73: Vergleich bestehender Wegestandards (RLW und GeoDat) mit Anpassungsempfehlungen bei Auflasterhöhung</b>			
	<b>RLW</b>	<b>GeoDat (Standard LKW-Weg)</b>	<b>Empfohlene Anpassung der Wegestandards bei Auflasterhöhung</b>
<b>Querprofil</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fahrbahnbreite: 5,0 m Kronenbreite (3,5 m Fahrbahn, mind. 0,75 m Seitenstreifen beidseitig)</li> <li>Tragschichtstärke: 20 cm bei Ev2 = 80 MN/m<sup>2</sup></li> <li>Tragschicht auch im Bereich der Seitenstreifen</li> </ul> <p>Zusätzliche Ausweichen sind nur ausnahmsweise anzulegen (keine Angaben zum Abstand)</p>	Fahrbahnbreite: mind. 3,0 m	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fahrbahnbreite 4,5 m, Planumsbreite 6 m<sup>305 306</sup></li> <li>Tragschichtstärke 30 cm<sup>307</sup></li> <li>Wegeplanum zu mind. 75 % im Einschnittsbereich<sup>308</sup></li> </ul>
<b>Vertikale Linienführung/Längsprofil</b>	Generelle maximale Längsneigung von 8 %, in begründeten Ausnahmefällen max. 12 %	Maximale Längsneigung von 12 %	Maximale Längsneigung 8 % <sup>309</sup>
<b>Horizontale Linienführung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>20 m Mindestkurvenradius im Flachland</li> <li>12 m Mindestkurvenradius im Bergland</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mindestkurvenradius mit Fahrbahnverbreiterung: 10 m</li> <li>Mindestkurvenradius ohne Fahrbahnverbreiterung: 30 m</li> </ul>	Mindestkurvenradius 30 m <sup>310</sup>

Quelle: DWA (2009); NavLog (2008)

<sup>305</sup> Um ein Ausweichen von Gegenverkehr ohne Befahrung der stark geneigten Bankette zu ermöglichen, wird eine Verbreiterung der Fahrbahn auf 4,5 m empfohlen. Auf diese Weise kann das möglicherweise erhöhte Kipprisiko der Abfuhrfahrzeuge aufgrund ihres erhöhten Schwerpunktes gemindert werden.

<sup>306</sup> Alternativ zur durchgängigen Verbreiterung der Fahrbahn können Ausweichstellen angelegt werden.

<sup>307</sup> Aufgrund der höheren Achslasten ist eine Verstärkung der Tragschicht in Abhängigkeit von der Untergrundtragfähigkeit und der Anzahl der Achslastübergänge um bis zu 10 cm erforderlich (siehe Kapitel 8.6.4).

<sup>308</sup> Zur Verbesserung der Wegestabilität und der Tragfähigkeit sollte das Wegeplanum mit mind. 75 % seiner Breite in den Einschnittsbereich auf gewachsenem Boden positioniert werden. Dadurch wird eine insgesamt größere Standfestigkeit des Weges erzielt, die bei höherer Auflast der Holzabfuhrfahrzeuge vorteilhaft ist.

<sup>309</sup> Die in der RLW festgelegte Obergrenze der Längsneigung von 8 % sollte bei Auflasterhöhung grundsätzlich ohne Ausnahmen eingehalten werden, um die Fahrsicherheit unter ungünstigen Bedingungen (z. B. Nässe, Laub, Eis, Schnee) zu erhöhen.

<sup>310</sup> Zur Steigerung der Fahrsicherheit durch erhöhte Haltesichtweiten sollen die Kurvenradien mind. 30 m betragen.

### 8.3 Modul 2: Beschreibung des Status Quo der Waldwege in vier ausgewählten Modellregionen

Bearbeiter: Jörg Weißhaar, Dr. Frank Brodbeck, Dr. Udo Hans Sauter  
FVA Baden-Württemberg, Abt. Waldnutzung

#### 8.3.1 Material und Methode

##### Auswahl der Modellregionen

Von der Seite des Landesforstbetriebes ForstBW wurden acht für das Land repräsentative Regionen mit den unterschiedlichen geologischen Ausgangsformationen angeboten. Davon wurden, in Abstimmung mit der Arbeitsgemeinschaft Rohholzverbraucher e.V. (AGR), insgesamt vier Modellregionen in Baden-Württemberg ausgewählt. Die Auswahl richtete sich dabei maßgeblich nach Regionen mit einem hohen Staatswaldanteil und nach Revieren mit einem hohen Anteil an roten GeoDat-Wegen. Außerdem wurde versucht, die Geologie miteinzubeziehen, weshalb zwei Regionen mit sehr stabiler geologischer Grundlage und zwei Regionen mit eher instabilen geologischen Voraussetzungen ausgewählt wurden. Als Modellregionen mit tragfähigem Untergrund wurden deshalb der Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald (kristallines Grundgestein, Gneis und Granit) sowie der Landkreis Reutlingen (weißer Jura) einbezogen. Die Modellregionen mit schlecht tragfähigem Untergrund sind der Rems-Murr-Kreis (Mittel und Unterkeuper, bunte Mergel und Knollenmergel) sowie die am Oberrhein liegenden Flächen des Landkreises Emmendingen (Rheingraben, junge Talfüllung und würmeiszeitlicher Schotter). Für jede Modellregion wurden ca. 5 km Fahrwege (GeoDat rot und blau) für die Untersuchung ausgewählt. Die Benennung der Fahrwege als GeoDat Rot bzw. GeoDat Blau ist eine in der Praxis übliche Bezeichnung geworden. Laut Definition werden die Wege in folgende Wegekassen eingeteilt:

**Abbildung 135: Wegekassen nach GeoDat-Standard<sup>311</sup>**

	Standard LKW-Weg	Sonstiger LKW-Weg
<b>Weg mit betrieblicher Lenkungsfunktion</b>	<b>Wegeklasse 1</b> (technisch gut ausgebaut und betrieblich als Holzabfuhrweg gewollt) (22 km im Staatswald $\cong 0,13 \%$ )	<b>Wegeklasse 2</b> (technisch nicht 1, aber betrieblich zur Holzabfuhr bevorzugt zu nutzen) (4.816 km im Staatswald $\cong 29,2 \%$ )
<b>Weg ohne betriebliche Lenkungsfunktion</b>		<b>Wegeklasse 3</b> 11.678 km im Staatswald $\cong 70,7 \%$ )

Quelle: Hauck 2003

<sup>311</sup> Hauck, B. (2003)

Die Wege, die hier als Wegekategorie 2 bezeichnet sind, werden im Folgenden als GeoDat rote Wege bezeichnet, die mit Wegekategorie 1 bezeichneten als GeoDat blaue.

### **Messverfahren am Weg**

Die Wege wurden zunächst anhand der Karte und anhand von Gesprächen mit den zuständigen Revierleitern ausgewählt. Dann wurde der erste Messpunkt an einem definierten Nullpunkt (z.B. Wegekategorie oder Anschluss öffentliche Straße) gesetzt und aufgenommen. Während zu Beginn der Messungen (Region Emmendingen, Revier Weisweil, Jägerweg/ zweite Allee) die Messpunkte noch in 50 m Schritten erhoben wurden, wurden auf allen weiteren Wegen die Messstellenabstände auf 100 m erhöht. Dies sollte eine bessere Streckenleistung in der knappen Untersuchungszeit ermöglichen. Die Messpunkte wurden dann markiert und per GPS eingemessen. Da das GPS sich aber vor allem im Bestandesinneren als zu ungenau erwiesen hat, wurden die 100 m Abstände per Messrad ausgemessen. Die befestigte Wegebreite wurde mittels Maßband erfasst. Aus diesem Wert wurde die Wegemitte errechnet und je ein Punkt 1 m links und 1 m rechts von der Mitte (Fahrspur) markiert. An diesen Punkten wurde die Messung mit dem leichten Fallgewichtsgerät durchgeführt. Außerdem wurde mit Hilfe einer Wasserwaage mit drehbarer Skala die Querneigung erhoben. Die Steigung wurde mit Hilfe eines Suunto-Gefällsmessers erhoben. Die sonstigen erfassten Kriterien, wie z.B. der allgemeine Wegezustand oder der Zustand der Gräben und Dolen wurde mit fachlich geübtem Blick eingeschätzt.

### **Leichtes Fallgewichtsgerät Zorn ZFG 2000**

Zur Messung des  $E_{vd}$  Wertes und der daraus resultierenden Aussage zur Tragfähigkeit wurde das leichte Fallgewichtsgerät ZFG 2000 der Firma Zorn aus Stendal verwendet. Dieses Gerät wurde für die Messungen von der Professur für Forstliche Verfahrenstechnik der Universität Freiburg zur Verfügung gestellt. Es findet üblicherweise Verwendung bei der Bauüberwachung im Erdbau und beim Bau von Verkehrswegen. Dabei dient es zur schnellen Ermittlung des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd}$  in  $\text{MN/m}^2$  sowie der Tragfähigkeit und Verdichtung von Böden und ungebundenen Tragschichten. Das leichte Fallgewichtsgerät kann alternativ zum statischen Plattendruckgerät nach DIN 18 134 eingesetzt werden. Das Gerät wurde vor den Messungen noch einmal beim Hersteller kalibriert.

**Abbildung 136: Leichtes Fallgewichtsgerät ZFG 2000 im Einsatz**

Quelle FVA

Der Messvorgang mit diesem im Straßenbau weit verbreiteten Gerät ist vor allem unter beengten Bedingungen und unter dem Gesichtspunkt des Zeitaufwandes deutlich vorteilhafter als der statische Plattendruckversuch mit der Messvorrichtung z. B. am LKW. Die Messung beginnt damit, dass die Lastplatte (300 mm Durchmesser) am Messpunkt auf den Boden gelegt wird. Dabei ist darauf zu achten, dass diese plan aufliegt, so dass sich keine Hohlräume unter der Platte bilden. Danach wird der Computer per Kabel angeschlossen und die Führungsstange mit dem Fallgewicht (10 kg) aufgesetzt. Nach dem Lösen der Transportsicherung wird das Fallgewicht nach oben gezogen und in der Ausklinkvorrichtung arretiert. Die Führungsstange wird dann senkrecht ausgerichtet und das Fallgewicht ausgeklinkt. Dieser Vorgang wiederholt sich, bis drei Vorverdichtungsstöße ausgeführt sind. Anschließend wird der Computer eingeschaltet und durch nochmaliges Drücken der Starttaste in den Messmodus gebracht. Das Gewicht wird nun wieder in der vorher beschriebenen Weise arretiert und ausgeklinkt, wobei bei der Arretierung mit größter Sorgfalt und Vorsicht gearbeitet werden muss, da sonst durch den empfindlichen Sensor bereits eine Messung ausgelöst werden kann. Bei den nun gemessenen drei Gewichtsstößen werden von Computer sowohl die Fallgeschwindigkeit des Gewichtes als auch die Setzung in mm der gesamten Lastplatte erfasst. Diese Werte werden nun automatisch vom Messcomputer gemittelt und daraus der  $E_{vd}$ -Wert gerechnet. Der  $E_{v2}$  Wert von 80-90 MN/m<sup>2</sup>

wiederum ist dem Lehrbuch Walderschließung<sup>312</sup> entnommen. Dabei gelten laut Literatur als Grundlage für die Einteilung von Straßen und Wegen in verschiedene Verkehrs- oder Bauklassen die Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 75). Nach diesem Regelwerk sind die forstwirtschaftlichen Fahrwege i. d. R. der Bauklasse V zugeordnet; bei dieser Klasse geht man von einer Verkehrsbelastung von bis zu bis zu 100 LKW mit mehr als 5 t Nutzlast und Bussen in 24 Stunden aus. Die  $E_{v2}$  Werte, die je Bauklasse mindestens erreicht werden müssen, um die Funktionstüchtigkeit der Straße oder des Weges zu gewährleisten, wurden anhand umfangreicher Beobachtungen festgelegt. Für die Bauklasse V gilt eine Untergrenze von  $E_{v2}$  von 80-90 MN/m<sup>2</sup><sup>313</sup>. Derzeit gelten die Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 2012), bei der die Bauklassen durch sogenannte Belastungsklassen ersetzt wurden. Die Einordnung der Fahrwege im Wald bleibt aber gleich, außer dass man nun nicht mehr von der Bauklasse V sondern von der Belastungsklasse (Bk) Bk 0,3 spricht. Die Umrechnung des  $E_{vd}$  Wertes in den  $E_{v2}$  Wert kann mit einem Faktor von 2 überschlägig durchgeführt werden<sup>314</sup>. Daraus resultiert für die gemessenen Wege ein Zielwert ( $E_{vd}$ ) von 40 MN/m<sup>2</sup>.

### **Erfassung weiterer Kriterien am Weg**

Zusätzlich zu den Messungen in Bezug auf die Tragfähigkeit wurden weitere Kriterien am Weg bewertet. In Tabelle 74: KriterienkatalogTabelle 74 sind die erfassten Aufnahmekriterien mit den verwendeten Bewertungsstufen dargestellt. Dieser Kriterienkatalog wurde von der FVA Abt. Waldnutzung in Zusammenarbeit mit der Universität Freiburg, Professur für forstliche Verfahrenstechnik, ausgearbeitet. Die erhobenen Kriterien sind dabei in Anlehnung an den GeoDat-Standard ausgewählt worden.

Außerdem wurde bei den Außenaufnahmen das Wetter erfasst, da sich vor allem Frost auf die Bewertung der Tragfähigkeit von Fahrwegen im Wald auswirken kann.

---

<sup>312</sup> Dietz et al. (1984)

<sup>313</sup> Dietz et al. (1984)

<sup>314</sup> Mair P. (2005)

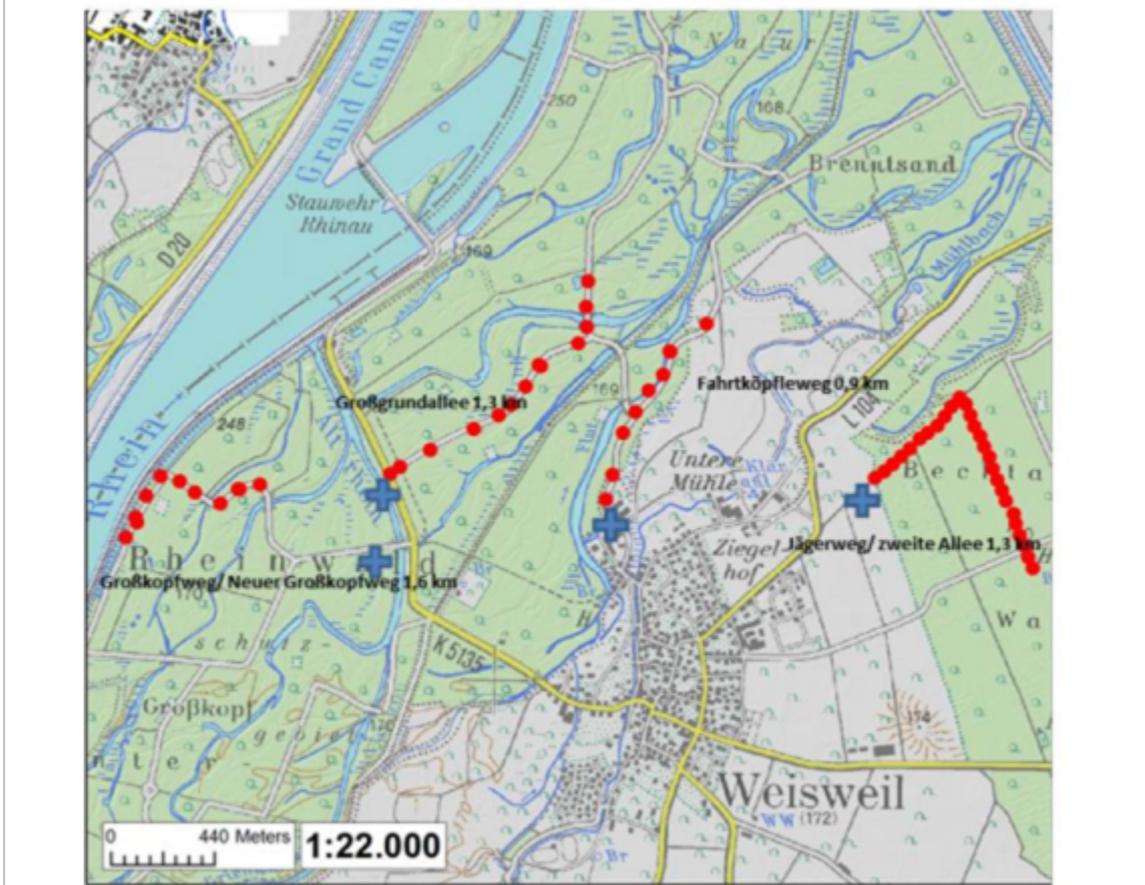
<b>Tabelle 74: Kriterienkatalog</b>	
<b>Aufnahmekriterien am Weg</b>	
Grunddaten	Forstamt Revier Wegename Exposition Witterung GPS Koordinaten
Messwerte	Evd Werte
Neigung Wegekörper	Längsneigung Querneigung
Wasserableitung	Grabenart Zustand Wassergraben Dolenart Dolendimension Zustand Dole
Wegebaustandard	Querprofilart des Weges Wasserablauf in der Fahrspur allgemeiner Zustand Weg befestigte Wegebreite Bewuchs auf Weg Lichtraumprofil
Sonstiges	Besonderheiten Bauwerke

Quelle: Kriterienkatalog FVA Abteilung Waldnutzung, Betriebsleitung Forst BW FachbereichTü 84 und Profess. für forstl. Verfahrenstechnik Universität Freiburg

## 8.4 Ergebnisse

### 8.4.1 Modellregion Landkreis Emmendingen, Revier Weisweil

Im Landkreis Emmendingen wurden im Revier Weisweil 5,1 km der roten GeoDat-Wege untersucht. Gemessen wurden hierbei der Jägerweg sowie dessen Fortführung, die zweite Allee, auf insgesamt 1,3 km, die Großgrundallee auf 1,3 km, der Großkopfweg auf 1,6 km und der Fahrtköpflweg auf 900 m Länge. Die Messungen in Weisweil am Jägerweg/ zweite Allee fanden im Januar 2015 statt. Deshalb war die Bodenfeuchte, aufgrund der starken Niederschläge und der Schneeschmelze, sehr hoch. An den Messpunkten (alle 50 m) wurde der E<sub>vd</sub>-Wert jeweils in der Fahrspur links und rechts (je 1 m Abstand von der Wegemitte) und in der Wegemitte gemessen. Die Modellregion im Landkreis Emmendingen ist eine von zweien mit schlecht tragfähigem Untergrund.

**Abbildung 137: Übersicht über die in Weisweil (uFB Emmendingen) erfassten Wege**

Quelle: FoGIS, bearbeitet durch FVA (2015)

### **Jägerweg/ zweite Allee**

Der Jägerweg wurde am 15.01.2015 sowie am 28. und 29.01.2015 untersucht und gemessen. Die Wetterlage am 15.01. (erste 5 Messstellen) war geprägt durch Trockenheit und für die Jahreszeit außergewöhnlich milde 12 °C. Am 28. und 29.01. dagegen waren die Temperaturen mit 2,5 °C bzw. 3 °C wesentlich niedriger, zudem herrschte dauerhaft ein leichter bis mäßiger Wind. In den Tagen vor diesen Messungen gab es mehrfach starke Niederschläge, vor allem nachts. Während der 29.01. komplett ohne Niederschläge während der Messungen verlief, waren am 28.01. immer wieder leichte Schauer zu verzeichnen. Der Jägerweg und die zweite Allee wurden zusammen auf 1,3 km untersucht, die Messpunkte lagen dabei bei einem Abstand von 50 m.

**Abbildung 138: Jägerweg in Weisweil**

Quelle: FVA

Die Messungen am Jägerweg ergaben einen durchschnittlichen  $E_{vd}$ -Wert von  $28,8 \text{ MN/m}^2$ , wobei der Minimalwert bei  $11,7 \text{ MN/m}^2$  lag. Das ursprüngliche Querprofil des Weges konnte vor Ort nicht ermittelt werden. Der Wegezustand wurde in 85 % der Fälle als gut und in 15 % als durchschnittlich angesprochen. Ein Wasserablauf in der Fahrspur und damit mögliche negative Auswirkungen auf den Wegekörper konnte nicht festgestellt werden. Als mögliche negative Folgen eines Wasserablaufes in der Fahrspur des Weges kommen in Betracht: Verlust von Wegebaumaterial, Erosionsrinnenbildung und Schlaglochbildung durch Auswaschung. Das Lichtraumprofil war an nur 4 % der Messpunkte frei, in 70 % ragten Bäume in das Lichtraumprofil ein und in 26 % der Fälle war dieses durch den Baumbestand vollständig geschlossen. Die durchschnittliche Wegebreite lag bei 2,66 m und der Minimalwert lag bei 2,5 m. Der Weg ist als Damweg in der Ebene angelegt und besitzt nur sehr kurze Abschnitte mit Wassergräben, welche aber im gesamten Bereich der Messstrecke mangelhaft (weil zu flach und teilweise verstopft) waren. Die Querneigung lag im Schnitt bei 4 % auf der linken und bei 4,9 % auf der rechten Wegseite. Die gemessenen  $E_{vd}$  Werte sind in Abbildung 139 dargestellt. Der Zielwert von  $40 \text{ MN/m}^2$  ergibt sich aus dem geforderten  $E_{v2}$  Wert von  $80 \text{ MN/m}^2$ .

Abbildung 139: Jägerweg/ Zweite Allee

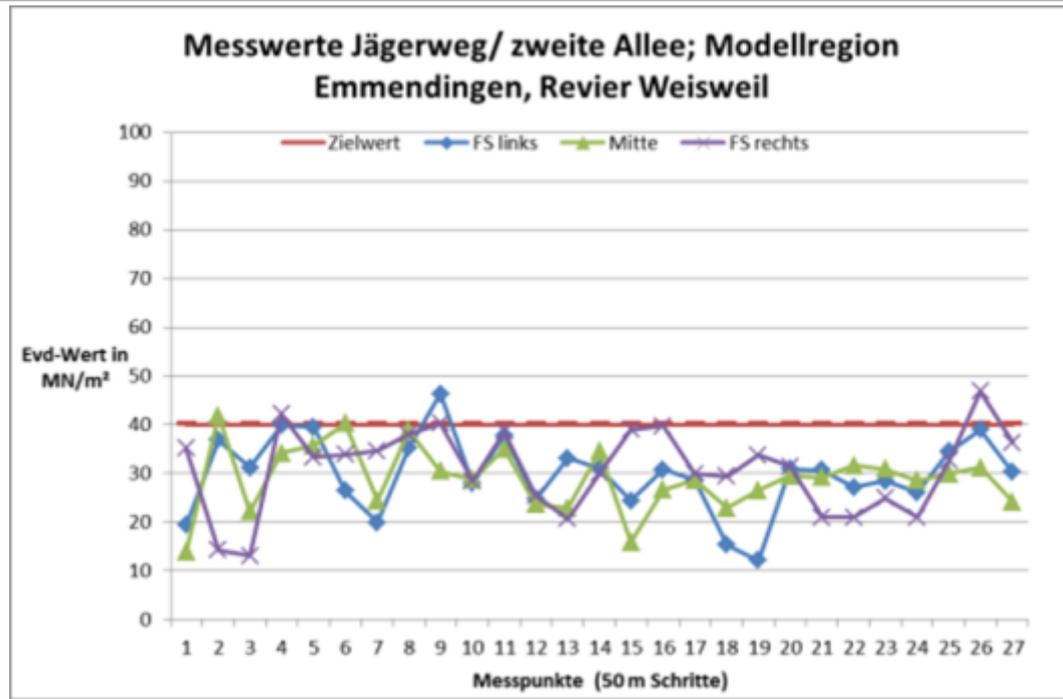
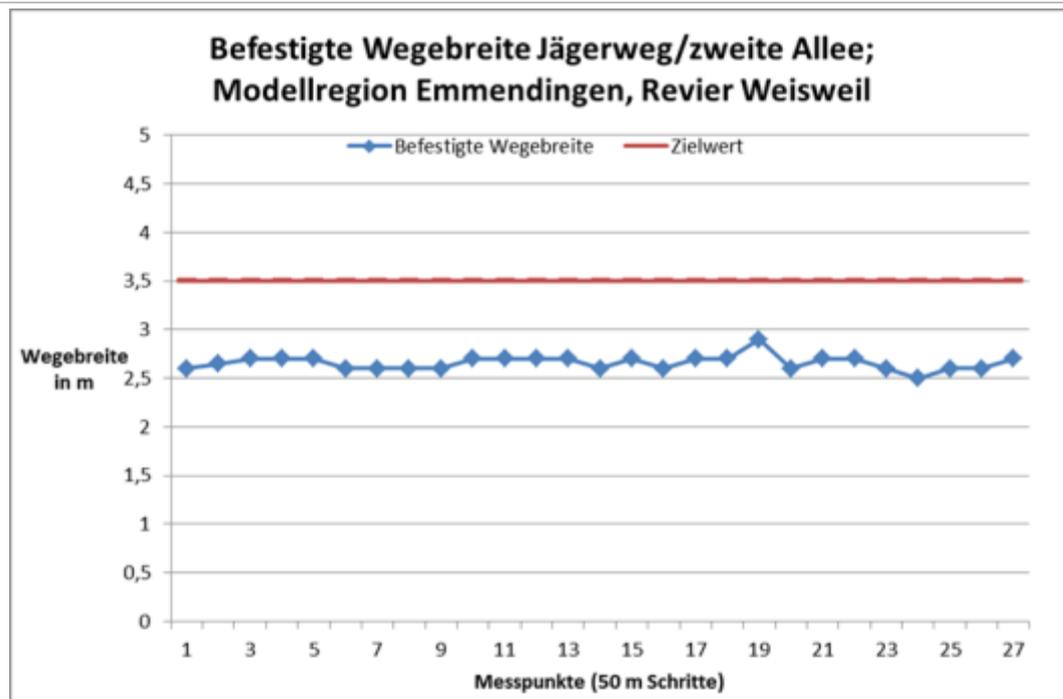


Abbildung 140: Jägerweg/ zweite Allee Wegebreite



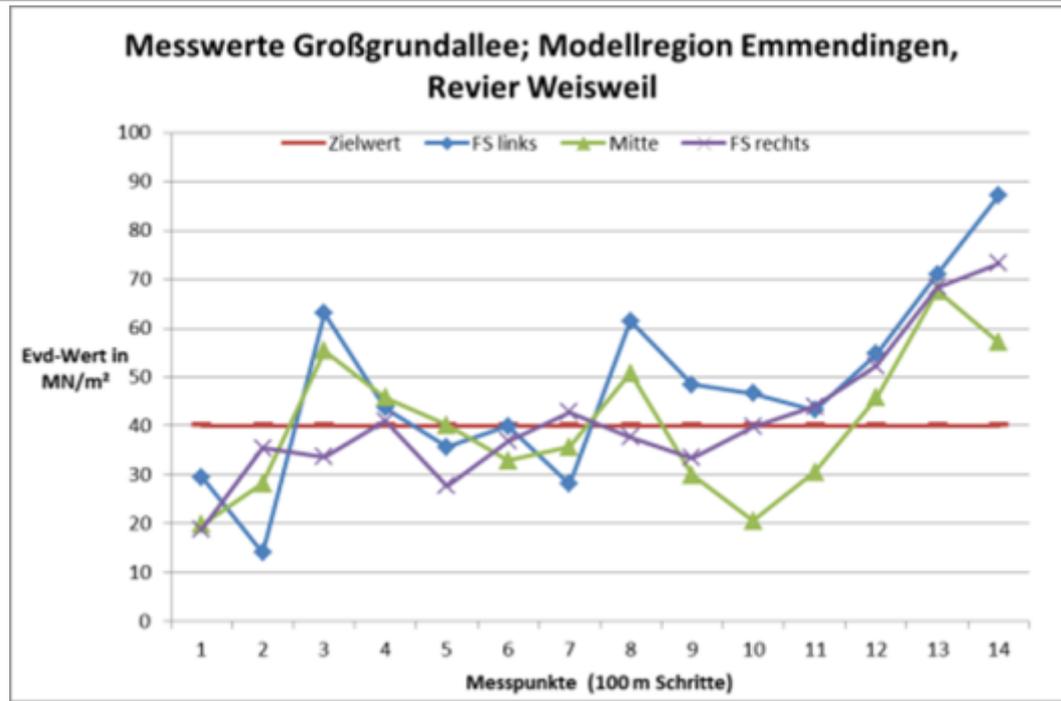
Als Fazit für den untersuchten Bereich des Jägerweges/ zweite Allee kann man also festhalten, dass die in den Richtlinien zur Walderschließung und auch in der RLW 2005 geforderten Zielwerte in Bezug auf die Wegebreite bei weitem nicht erreicht wurden. Mit einer Breite, die nur knapp über 2,50 m liegt, sind Schäden am Weg zu erwarten, denn die derzeitige LKW-Breite liegt bei 2,55 m. Es ist also davon auszugehen, dass die Transportfahrzeuge immer wieder auf dem unbefestigten Bankettbereich fahren werden. Dies wird zu Schäden und Verformungen

führen. Was den erhobenen  $E_{vd}$ -Wert angeht, so liegt der Weg nahezu durchweg unter dem geforderten Wert von  $40 \text{ MN/m}^2$ .

### **Großgrundallee**

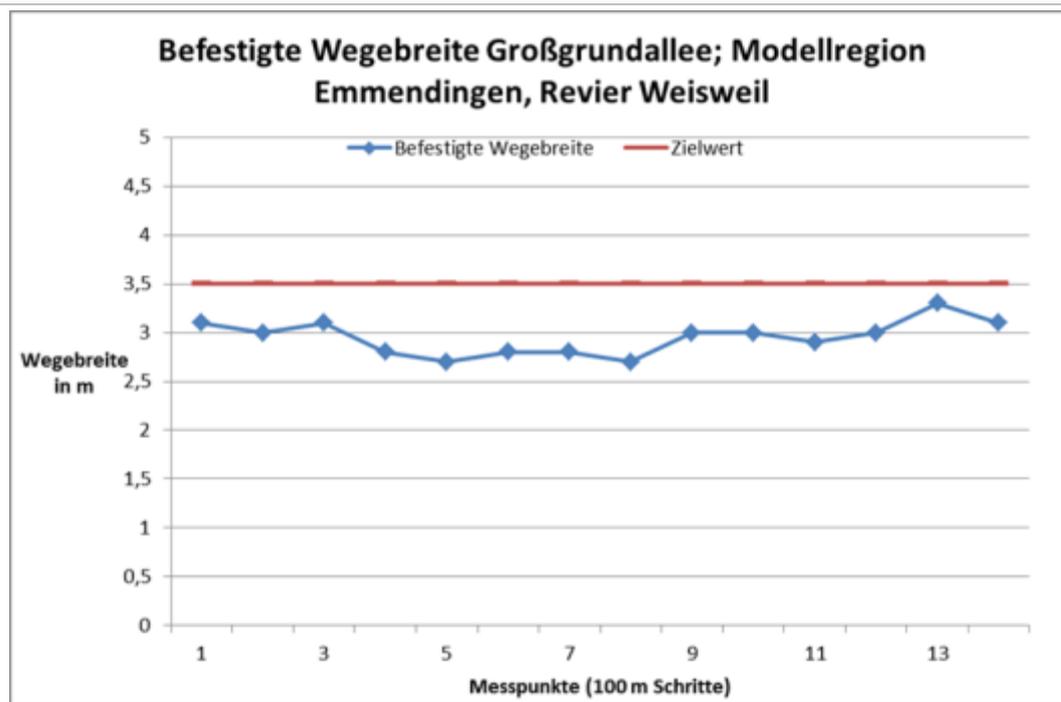
Die Messungen an der Großgrundallee wurden ebenfalls am 29.01.2015 begonnen, dabei wurden aber nur noch zwei Messpunkte untersucht. Der danach erfolgte Wintereinbruch machte das weitere Messen aufgrund des Bodenfrostes zunächst unmöglich. Erst am 11. und 12.03.2015 konnten die Messungen an diesem Weg abgeschlossen werden. Am 29.01. war es windig, mit am Mittag erreichten  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  sehr kalt, aber trocken. Am 11. und 12.03 war das Wetter sehr gut, denn es war warm, trocken, windstill und sonnig. Die Großgrundallee wurde auf einer Länge von 1,6 km untersucht. Die Messpunkte lagen dabei in einem Abstand von 100 m. Der durchschnittliche  $E_{vd}$ -Wert lag dabei bei  $43 \text{ MN/m}^2$ , der Minimalwert lag bei  $14,1 \text{ MN/m}^2$ . In 50 % der Fälle war eine klare Zuordnung des Querprofils zu einer Bauform nicht möglich, in 50 % der Fälle wurde die Form als Uhrglasprofil angesprochen. Der Zustand dieses Weges konnte nach optischer Einschätzung durchweg als gut bewertet werden. Wasserablauf in der Fahrspur, mit den bereits genannten möglichen Auswirkungen, fand auch entlang dieses Weges nicht statt. Das Lichtraumprofil war in 29 % als frei zu bezeichnen, während der Bestand in 71 % der aufgenommenen Punkte in den lichten Raum hineinragte. Die durchschnittliche Wegebreite lag bei 2,95 m, der Minimalwert lag bei 2,7 m. Innerhalb der gemessenen Strecke liegt eine Brücke. Diese hat vor Ort die Nummer 6.13, weist keinerlei Schäden auf und ist einspurig. Die Brücke hat eine Breite von 3,5 und eine Länge von ca. 5 m. Der Weg ist ebenfalls als Dammweg in nahezu ebener Lage anzusehen, deshalb ist keinerlei Wasserableitung vorhanden. Die maximale Steigung mit 2 % spielt in Bezug auf den Holztransport keine Rolle. Die Querneigung lag auf diesen Wegseiten bei durchschnittlich 3 %. Die gemessenen  $E_{vd}$ -Werte sowie der Zielwert sind in Abbildung 141 dargestellt.

**Abbildung 141: Großgrundallee**



Die gemessene Wegebreite sowie der Zielwert sind in Abbildung 142 dargestellt. Der Zielwert von 3,5 m ergibt sich aus der Richtlinie zur Walderschließung der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg vom Oktober 1984.

**Abbildung 142: Großgrundallee Wegebreite**



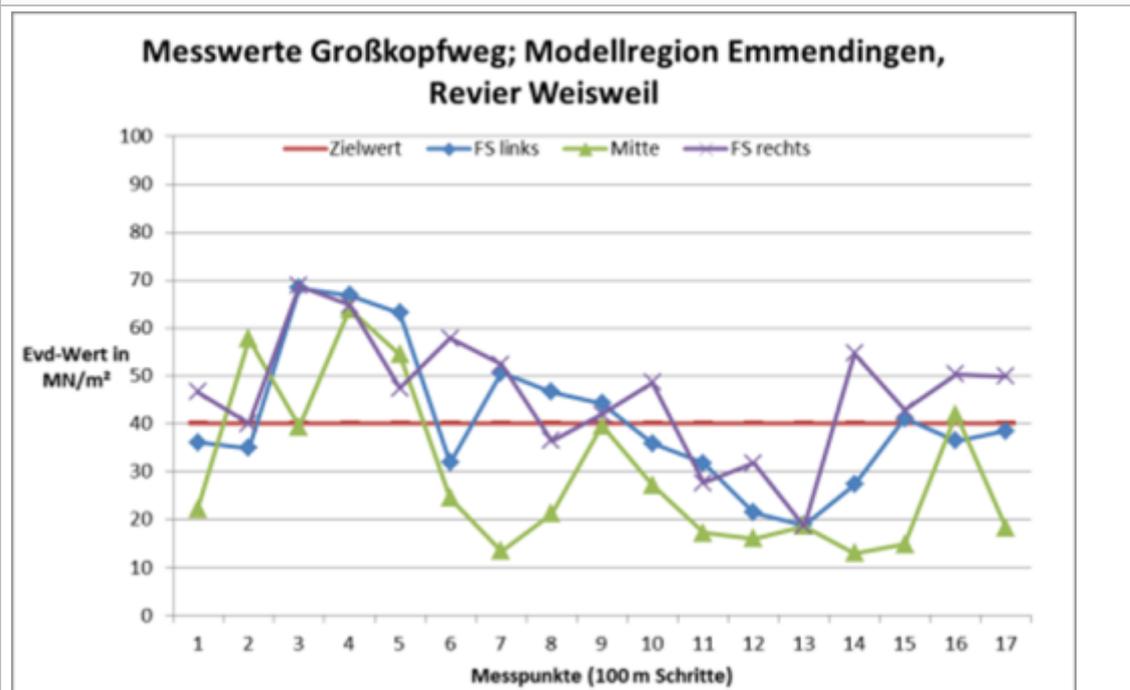
Die Großgrundallee ist in Bezug auf die Wegebreite zu schmal gebaut. Die Breite von zumeist 3 m oder geringer wird der Richtlinie des Landes nicht gerecht. Der Wert erreicht den von der RLW 2005 geforderten Wert in wenigen Fällen, unterschreitet die 3 m aber trotzdem häufig.

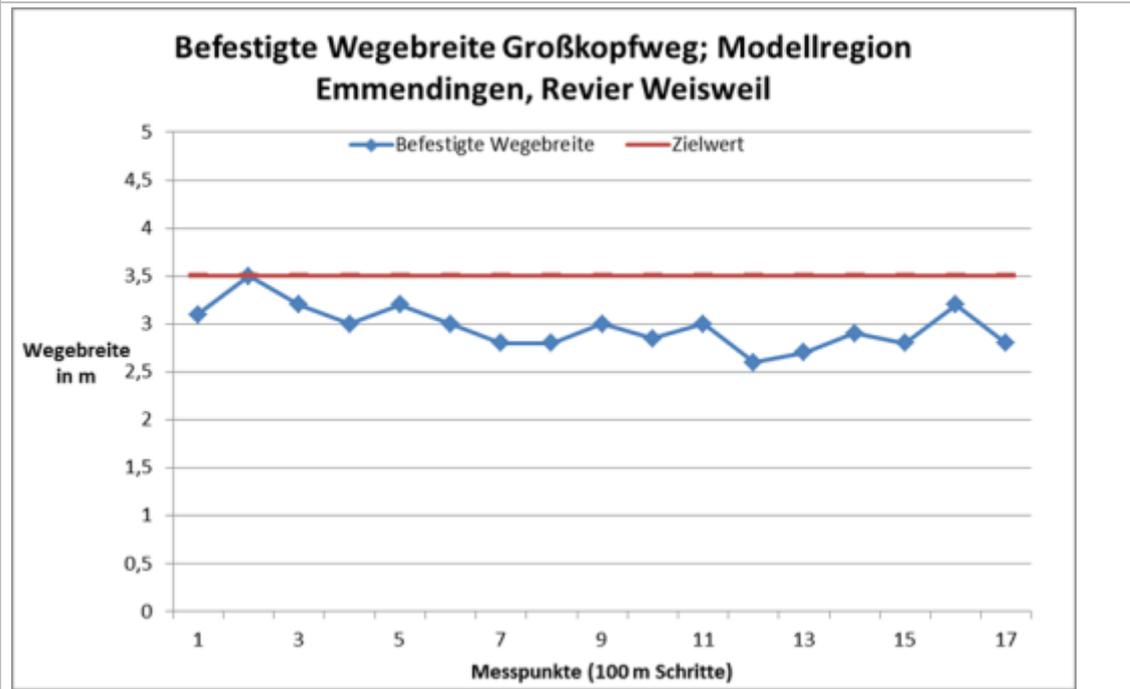
Die gemessenen  $E_{vd}$  Werte schwanken erheblich und wurden vor allem zum Ende der gemessenen Strecke deutlich besser.

### Großkopfweg/ Neuer Großkopfweg

Der Großkopfweg und der sich im weiteren Verlauf anschließende Neue Großkopfweg wurden am 11.03.2015 erfasst. Die Wetterlage war an diesem Tag sehr stabil und durchweg warm, trocken, sonnig und windstill. Der Großkopfweg befindet sich direkt in den Rheinwaldungen. Dieser wurde auf einer Gesamtlänge von 1,6 km untersucht. Die Messpunkte lagen in einem Abstand von 100 m. Ab dem Messpunkt Nr. 6 bei 500 lfm geht dieser Weg über in den neuen Großkopfweg. Der durchschnittliche  $E_{vd}$  Wert lag bei dieser Wegstrecke bei  $39 \text{ MN/m}^2$ , während der Minimalwert bei  $13 \text{ MN/m}^2$  lag. Ein Querprofil war vor Ort nicht eindeutig festzustellen. 82 % der Wegstrecke wurden als gut, 12 % als durchschnittlich und 6 % als schlecht eingestuft. Wasserablauf in der Spur fand auch hier nicht statt. Das Lichtraumprofil war mit je 47 % frei bzw. einragend, während lediglich 6 % als nicht ausreichend frei bezeichnet werden können. Die durchschnittliche Wegebreite lag bei 2,97 m, der Minimalwert lag bei diesem Weg bei 2,6 m. Auch hier lag keine Wasserableitung in Form von Gräben vor. Allerdings war eine Dole 5 m vor Messpunkt 4 (300 lfm) vorhanden. Diese Betondole war nicht mehr funktionstüchtig bzw. komplett verstopft. Die Dole dimension (Durchmesser) konnte nicht erhoben werden. Die maximale Steigung war marginal und spielt keine Rolle. Die Querneigung wies auf der linken Wegeseite einen Wert von 5,2 % und rechts von 2 % auf. Im gesamten untersuchten Wegezug befinden sich 3 Brücken. Die erfassten  $E_{vd}$  Werte sind in Abbildung 143 dargestellt.

Abbildung 143: Großkopfweg/ Neuer Großkopfweg



**Abbildung 144: Großkopfweg/ Neuer Großkopfweg Wegebreite**

Dieser Weg hat wie auch die zuvor beschriebenen Wege den Zielwert in Bezug auf die Wegebreite nicht erreicht. Die Breite schwankte um die 3 m. Die erfassten  $E_{vd}$  Werte schwankten bei diesem Weg wiederum erheblich. Vor allem im ersten Drittel waren die gemessenen Werte im Bereich des Zielwertes, während auf den letzten untersuchten 800 m die Werte doch oft zu gering waren.

### Fahrköpflweg

Die Messstrecke beim Fahrköpflweg wurde komplett am 12.03.2015 erhoben. Das Wetter war sehr gut und stabil. Dieser Weg wurde auf 900 m untersucht. Die Messpunkte lagen ebenfalls in einem Abstand von 100 m. Der dabei erfasste durchschnittliche  $E_{vd}$  Wert lag bei 59  $MN/m^2$ , der Minimalwert lag bei 33,4  $MN/m^2$ . Der vorgefundene Querschnitt konnte keiner üblichen Profilgestaltung zugeordnet werden. Der Wegezustand kann bei diesem Weg als durchweg gut angesehen werden. Wasserablauf in der Spur war nirgends zu verzeichnen, somit waren auch erosionsbedingte Schäden am Wegekörper nicht vorhanden. An 60 % der Messstellen war der lichte Raum frei und an 40 % ragten die Bäume in den Bereich hinein. Die durchschnittliche Wegebreite lag bei 3,24 m, der Minimalwert lag bei 3 m. Durch die Lage in der Ebene ist keine signifikante Steigung vorhanden, Wasserableitungsgräben waren ebenfalls nicht vorhanden. Die durchschnittliche Querneigung lag auf der linken Wegeseite bei 1,8 %, auf der rechten Seite bei 2,8 %.

Abbildung 145: Fahrköpflweg

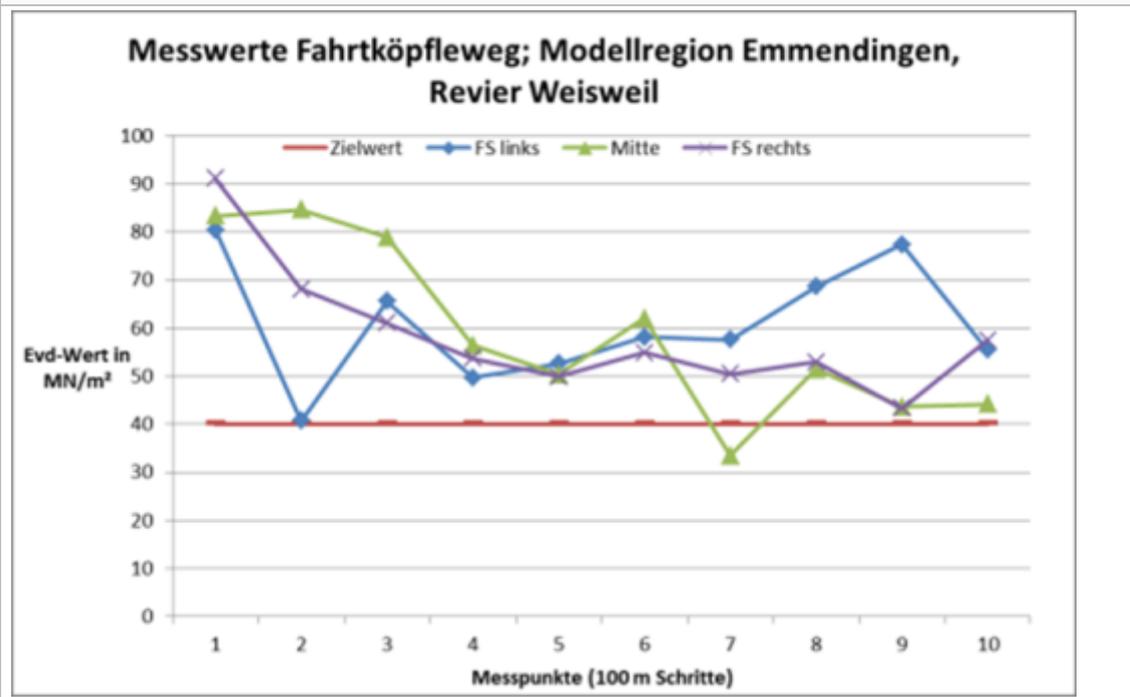
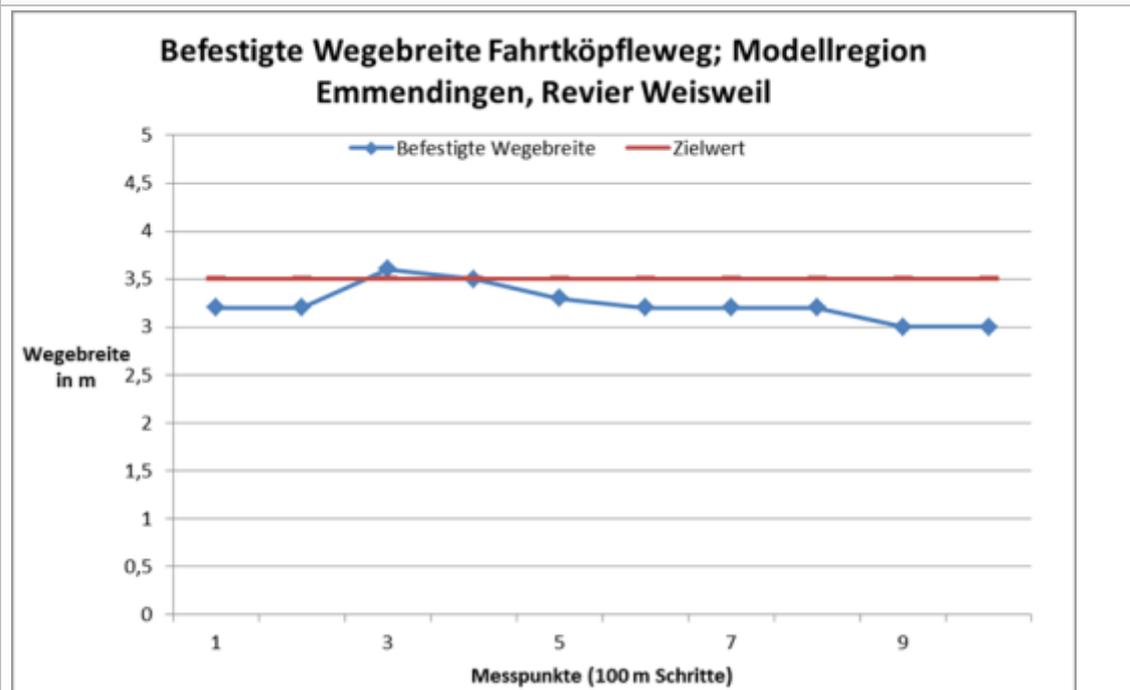


Abbildung 146: Fahrköpflweg Wegebrette



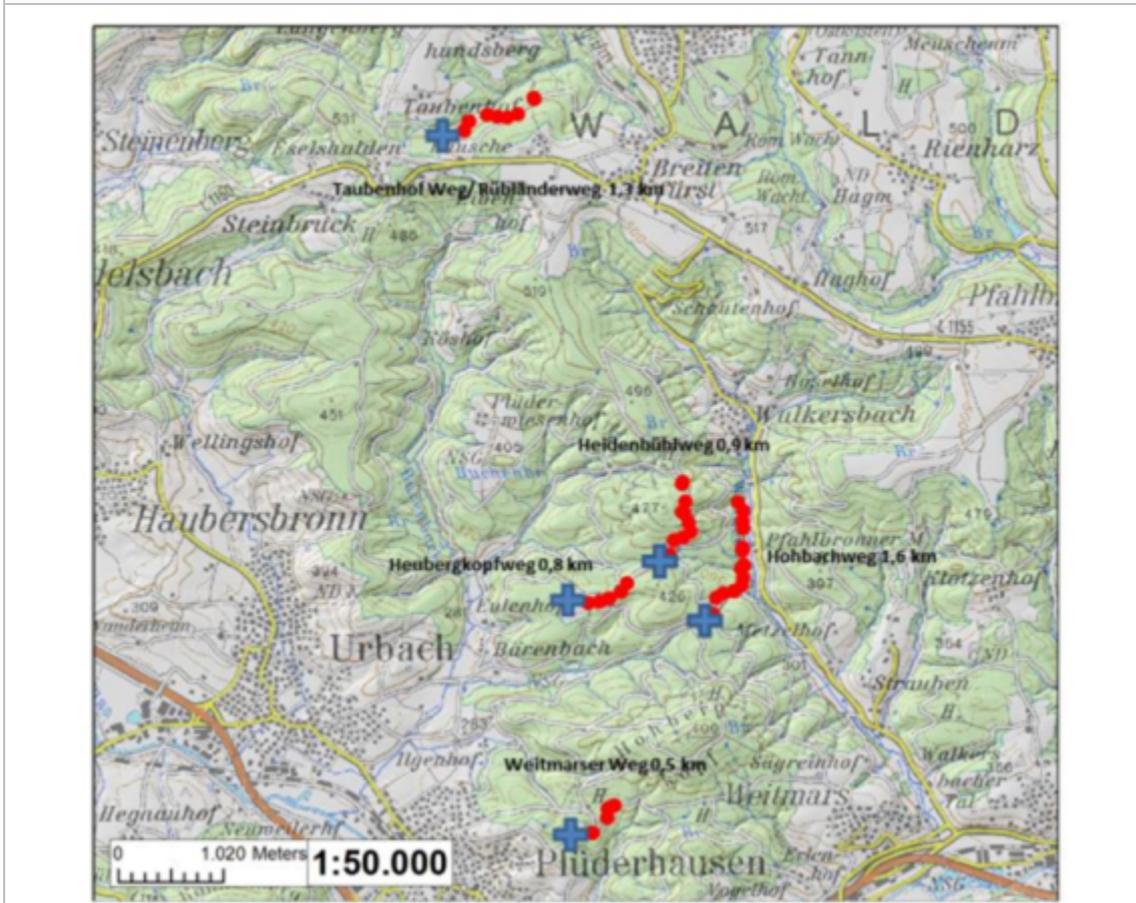
Dieser Weg ist von allen in dieser Modellregion untersuchten der erste, der sich richtlinienkonform darstellte. Die Wegebrette lag hier nirgends unter 3 m und der Zielwert von 3,5 m wurde sogar zweimal erreicht. In einigen Fällen wurde dieser Wert auch nur knapp unterschritten. Was die  $E_{vd}$  Werte angeht, so hat der Fahrköpflweg sowohl in der linken als auch der rechten Fahrspur in allen Fällen den Zielwert teilweise deutlich überschritten oder diesen zumindest

erreicht. Die Unterschreitung des Zielwertes in der Wegemitte spielt keine Rolle, denn hier findet keine dauerhafte und regelmäßige Befahrung statt.

#### 8.4.2 Modellregion Rems-Murr-Kreis, Reviere Plüderhausen und Steinberg

In der Modellregion Rems-Murr-Kreis wurden insgesamt 5 Wege untersucht, dabei wurden 5,1 km Strecke mit dem leichten Fallgewichtsgerät beprobt und anhand der vorgestellten Kriterien bewertet. Es handelte sich hier ebenfalls um rote GeoDat Fahrwege. Gemessen wurde dabei in den Revieren Plüderhausen und Steinberg. Der Rems-Murr-Kreis gehört dabei zu den Modellregionen mit einem schlecht tragfähigen Untergrund, welcher aus den geologischen Formationen Keuper und verschiedener Mergel stammt. Untersucht wurden der Hohbachweg auf 1,6 km, der Heidenbühlweg auf 900 m, der Weitmarsener Weg auf 500 m, der Heubergkopfweg auf 800 m, allesamt im Revier Plüderhausen gelegen und der Taubenhof Weg übergehend in den Rübländerweg im Revier Steinberg auf insgesamt 1,3 km.

**Abbildung 147: Übersicht über die in Plüderhausen / Steinberg (Rems-Murr-Kreis) erfassten Wege**



Quelle: FoGIS, bearbeitet durch FVA (2015)

#### Hohbachweg

Der Hohbachweg wurde am 17. und 18.03.2015 beprobt. Die Wetterlage war geprägt durch Trockenheit, Windstille und für den März sehr hohe Temperaturen. Die Messung und Untersu-

chung der Wege im Rems-Murr-Kreis wurde beim Hohbachweg im Revier Plüderhausen begonnen.

**Abbildung 148: Graben des Hohbachweges mit Hiebsresten verstopft**

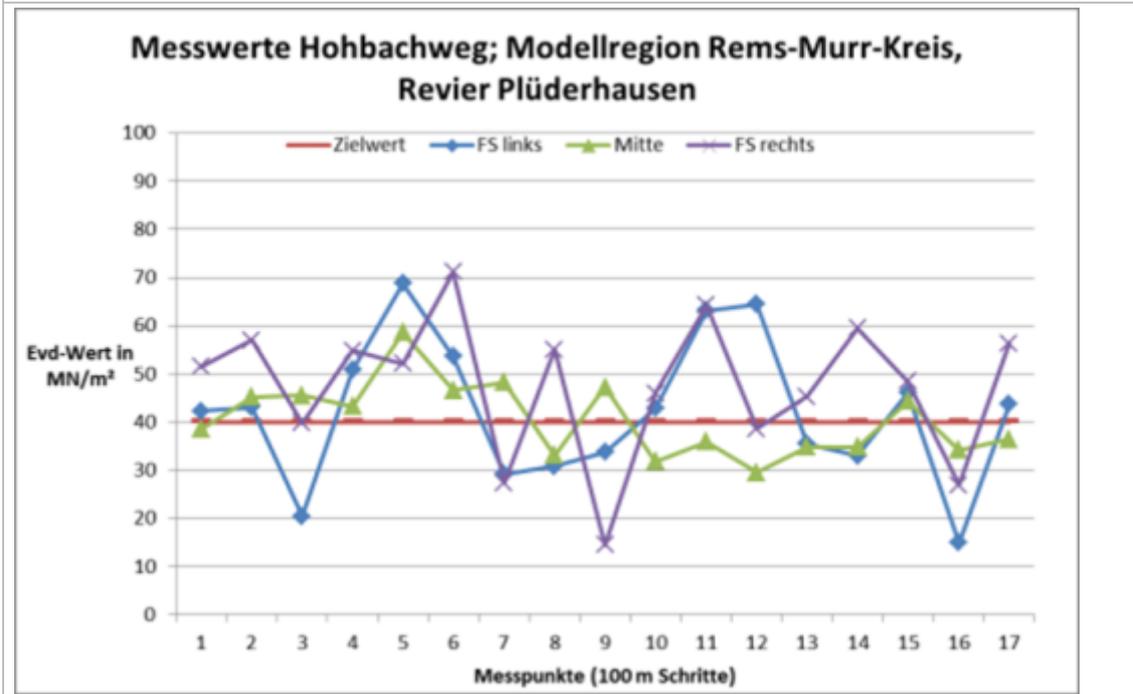


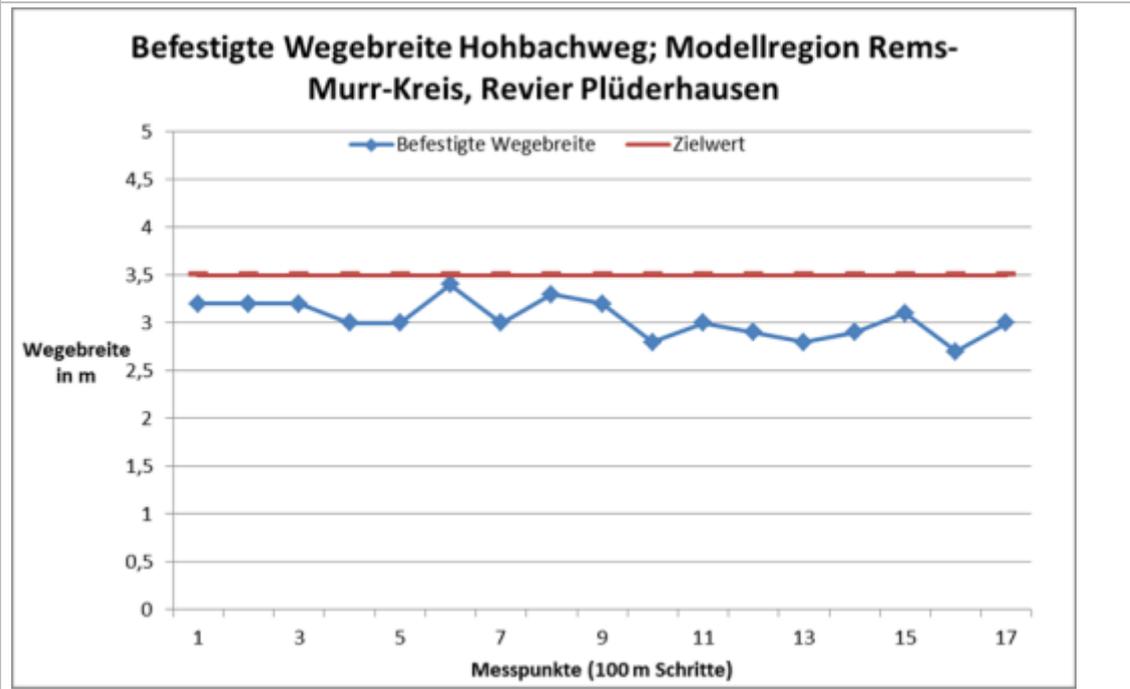
Quelle: FVA

Der auf den untersuchten 1,6 km ermittelte durchschnittliche  $E_{vd}$  Wert lag bei  $42,4 \text{ MN/m}^2$ , der Minimalwert bei nur  $14,5 \text{ MN/m}^2$ . Die Messpunkte lagen dabei in einem Abstand von 100 m. In 70 % der Fälle konnte das Querprofil eindeutig als Dachprofil angesprochen werden. Bei 30 % der Messpunkte war eine genaue Einordnung nicht möglich. Der allgemeine Wegezustand lag in 82 % der Bewertungen im guten Bereich, 12 % sind als durchschnittlich und 6 % als schlecht bewertet worden. An 82 % der Messpunkte ist das Lichtraumprofil frei. Bei 2 von 17 Messpunkten fand Wasserablauf innerhalb der Fahrspur statt, somit waren 88 % der Fahrspuren ohne Beeinträchtigung durch abfließendes Wasser. Die durchschnittliche Wegebreite lag bei ca. 3 m, der Minimalwert lag bei 2,7 m. Im gesamten untersuchten Wegebereich war kein Bauwerk vorhanden. Die durchschnittliche Steigung des Wegeabschnittes lag bei 3 %, während die maximale Steigung bei 8 % lag. Die Querneigung lag bei 5,5 % an der linken und 5,8 % an der rechten Wegeseite. 94 % der Gräben an diesem Weg waren als Trapezgräben ausgeführt, bei 6 % des Weges waren keine Gräben vorhanden. Die hier vorhandenen Gräben waren allerdings

zu 100 % mit Mängeln behaftet. Die Gräben waren meist mit Ästen bzw. Hiebsresten verstopft sowie in einigen Fällen durch den Maschineneinsatz verformt. Entlang der Messstrecke waren 8 Dolen verbaut. 7 davon waren Betonrohre mit 300 – 500 mm. Von diesen waren 4 mit richtlinienkonformen (RLW 2005) 400 mm Rohren bestückt. Eine Natursteindole war vorhanden, konnte aber in ihrer Dimension nicht bestimmt werden. Nur eine Dole war nicht funktionsfähig, alle anderen waren frei bzw. wiesen nur geringe Mängel auf. Die Dolenabstände variierten zwischen 67 m und 471 m. Der mittlere Dolenabstand lag bei 182 m. In Abbildung 149 sind die erhobenen  $E_{vd}$  Werte dargestellt.

**Abbildung 149: Hohbachweg**



**Abbildung 150: Hohbachweg Wegebreite**

Die Wegebreite entsprach auch hier nicht den Vorgaben. Auch hier hat man den Bau der Wege auf ein, was die Breite angeht, minimal für Holztransporte notwendiges Maß beschränkt. Die  $E_{vd}$  Werte schwanken hier wieder erheblich, so dass der Weg insgesamt den Zielwert von 40 MN/m<sup>2</sup> oft unterschreitet.

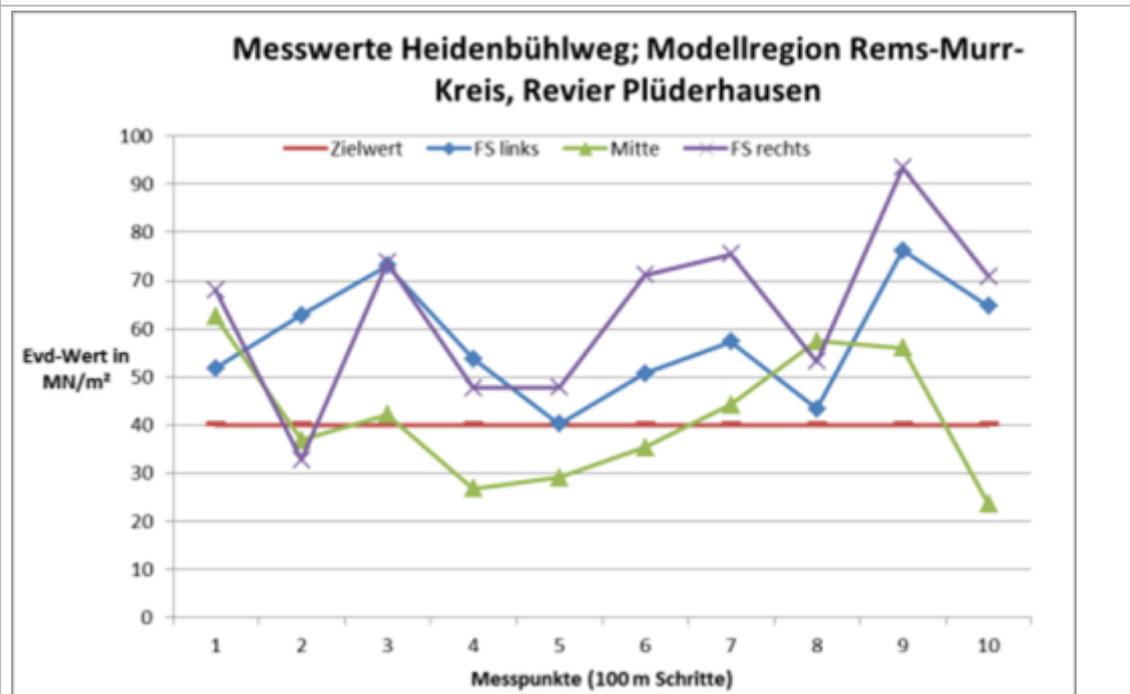
**Abbildung 151: Eingetiefte Fahrspur mit Wasserablauf bei Messpunkt 16, 1.500 lfm Hohbachweg**

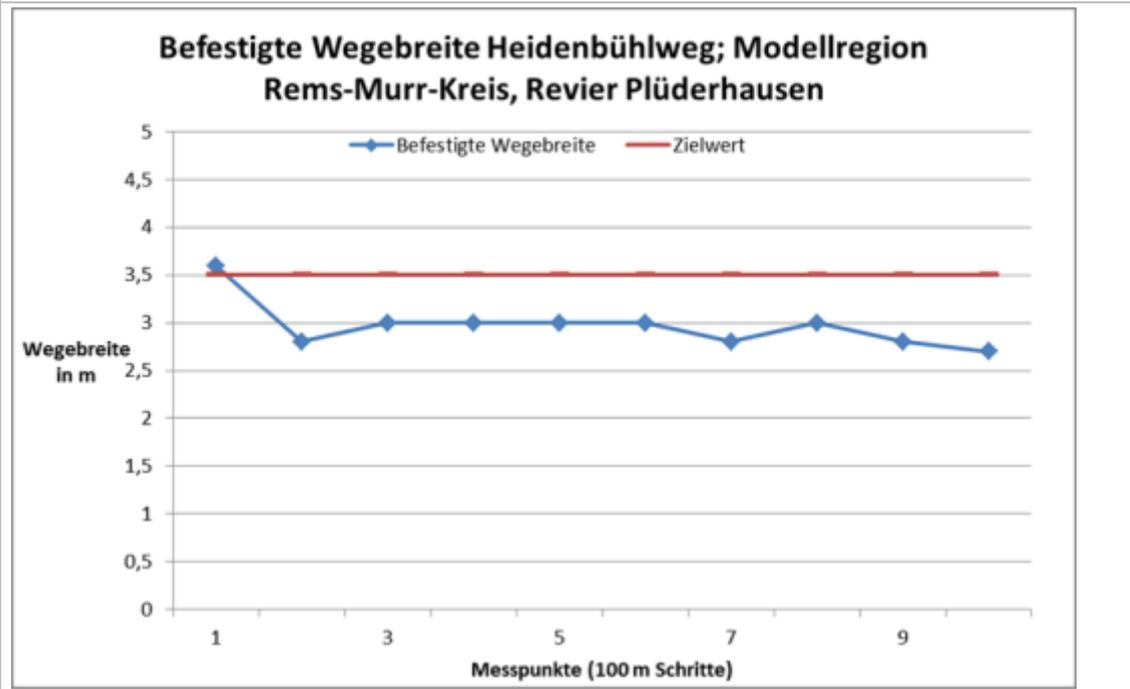
Quelle: FVA

## Heidenbühlweg

Der Heidebühlweg wurde am 18.03.2015 bei trockener, warmer und sonniger Wetterlage untersucht. Auch der Wind spielte zu dieser Zeit keine Rolle. Hier wurde eine Strecke von 900 m untersucht. Die Messpunkte lagen im Abstand von 100 m. Dieser Weg weist einen durchschnittlichen  $E_{vd}$  Wert von 54,1  $MN/m^2$  auf, der ermittelte Minimalwert lag bei 23,6  $MN/m^2$ . 60 % der erfassten Querschnitte konnten als Dachprofil angesprochen werden, bei 40 % der Messpunkte konnte kein eindeutiges Profil zugeordnet werden. Der Weg ist aber insgesamt in Bezug auf seinen allgemeinen Zustand als gut zu bewerten. Ein Wasserablauf in der Fahrspur war nicht gegeben. Der lichte Raum war zu 90 % frei, lediglich in 10 % der Fälle ragte der Bestand in das Profil ein. Die durchschnittliche Wegebreite lag bei diesem Weg bei 2,97 m, die geringste gemessene Wegebreite lag bei 2,7 m. Auf der untersuchten Strecke lag kein Brückenbauwerk. Die durchschnittliche Steigung lag bei 0,3 %, die erfasste maximale Steigung lag bei 4 %. Die Querneigung lag auf der linken Wegeseite bei 5,8 %, auf der rechten Seite bei 6,1 %. Bei 70 % der Messebenen lag ein Trapezgraben vor, bei den verbleibenden 30 % war kein Graben vorhanden. 10 % der Gräben waren frei, während 60 % der Gräben mit Mängeln behaftet waren. Bei der untersuchten Strecke war nur eine Natursteindole mit 250 x 500 mm vorhanden. Diese lag 37 m nach Messpunkt 2 (100 lfm). Die Dole war verstopft und somit nicht funktionsfähig. Die gemessenen  $E_{vd}$  Werte sind in Abbildung 152 dargestellt, die befestigte Wegebreite in Abbildung 155.

Abbildung 152: Heidenbühlweg



**Abbildung 153: Heidenbühlweg Wegebreite**

Als Fazit für den Heidebühlweg lässt sich festhalten, dass auch hier die Wegebreite deutlich vom Zielwert abweicht. Die  $E_{vd}$  Werte zeigen aber, dass dieser Weg im Verlauf der gemessenen Strecke einmal in der rechten Fahrspur den Zielwert unterschritten hat, ansonsten wurde dieser teilweise erheblich überschritten bzw. zumindest erreicht. Dieser einzelne Schwachpunkt kann dennoch der Ausgangspunkt für Schäden sein.

### Weitmarser Weg

Der Weitmarser Weg wurde auf einer Strecke von 500 m am 17.03.2015 erhoben. Die Messpunkte lagen in einem Abstand von 100 m. Das Wetter war durchweg stabil und trocken. Der durchschnittliche  $E_{vd}$  Wert lag bei diesem Weg bei  $73,9 \text{ MN/m}^2$ , der Minimalwert lag bei  $14 \text{ MN/m}^2$ . Das Querprofil war zum größten Teil (83 %) ein Uhrglasprofil, während bei einem Messpunkt keine klare Zuordnung möglich war. Der Weg wurde als durchgehend gut bewertet. Innerhalb des untersuchten Wegeabschnittes fand außerdem kein Wasserablauf in der Fahrspur statt. Zwei Drittel des Weges wiesen ein freies Lichtraumprofil auf, bei einem Drittel ragte der Bestand in diesen Bereich ein. Die durchschnittliche Wegebreite lag bei 2,98 m, die geringste gemessene Breite lag bei 2,8 m. Bauwerke spielten hier ebenfalls keine Rolle. Die durchschnittliche Steigung lag bei 3,7 %, die maximale Steigung bei 8 %. Die Querneigung lag auf der linken Wegeseite bei 5,5 %, während diese auf der rechten Seite bei 1,5 % lag. Die Gräben waren entlang der gemessenen Strecke komplett als Trapezgräben ausgeformt, dabei wiesen 50 % einen Mangel auf, 50 % waren frei und voll funktionstüchtig. Dolen waren innerhalb der untersuchten Wegstrecke nicht vorhanden. Die gemessenen  $E_{vd}$  Werte sind in Abbildung 154 dargestellt.

Abbildung 154: Weitmarser Weg

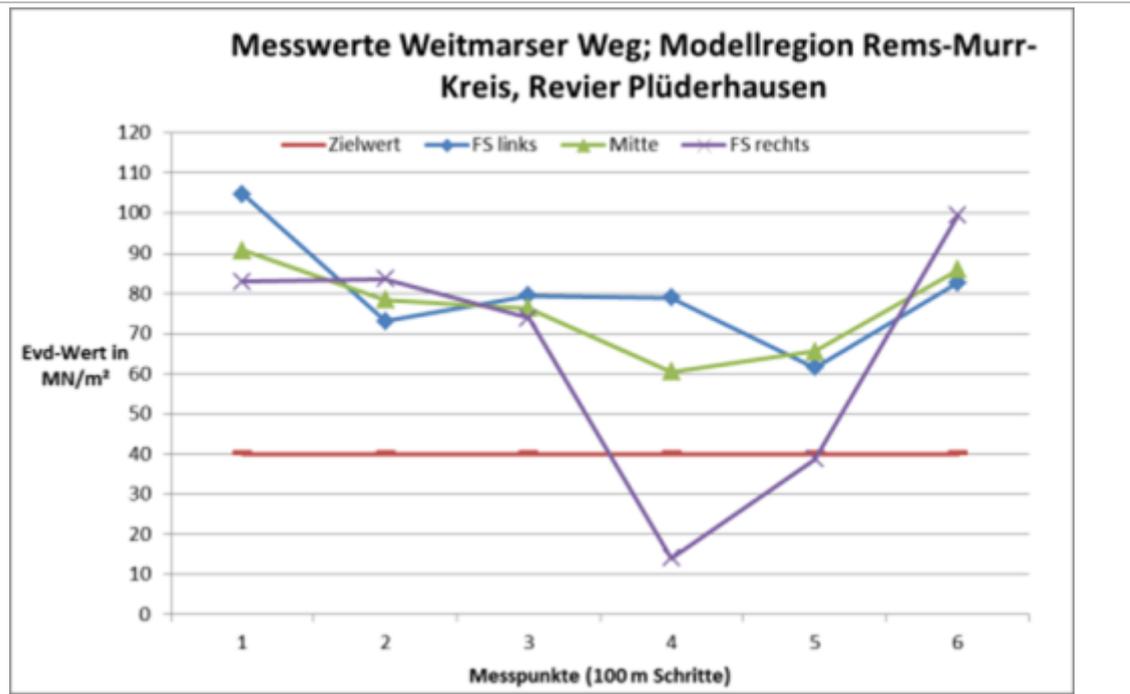
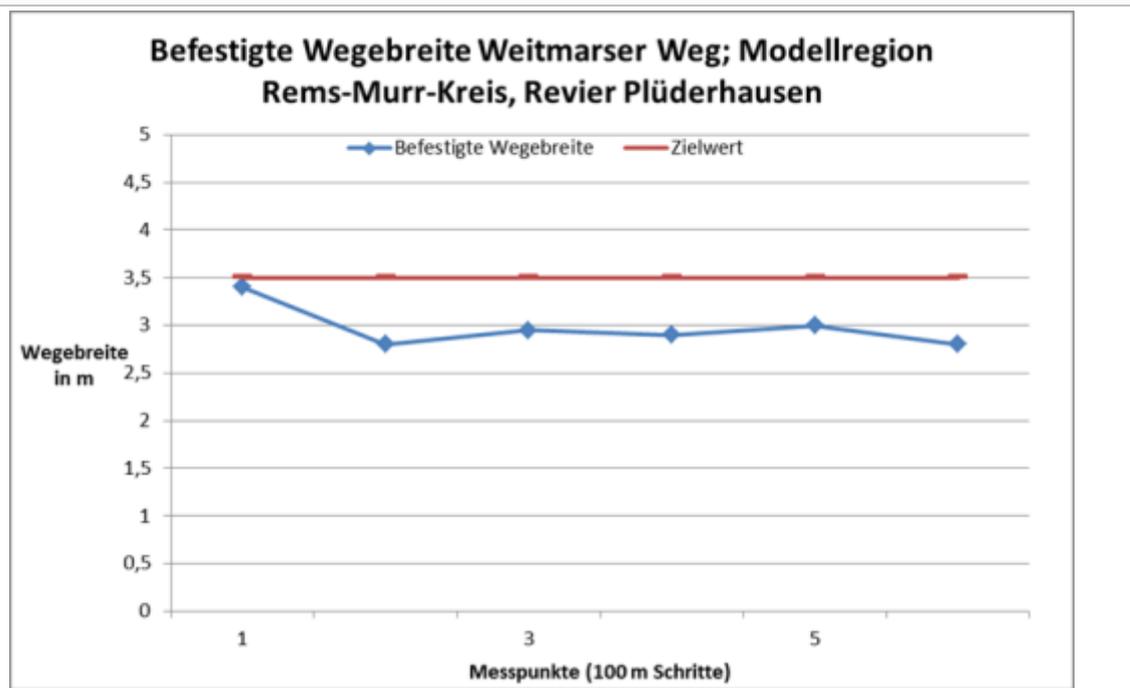


Abbildung 155: Weitmarser Weg Wegebreite

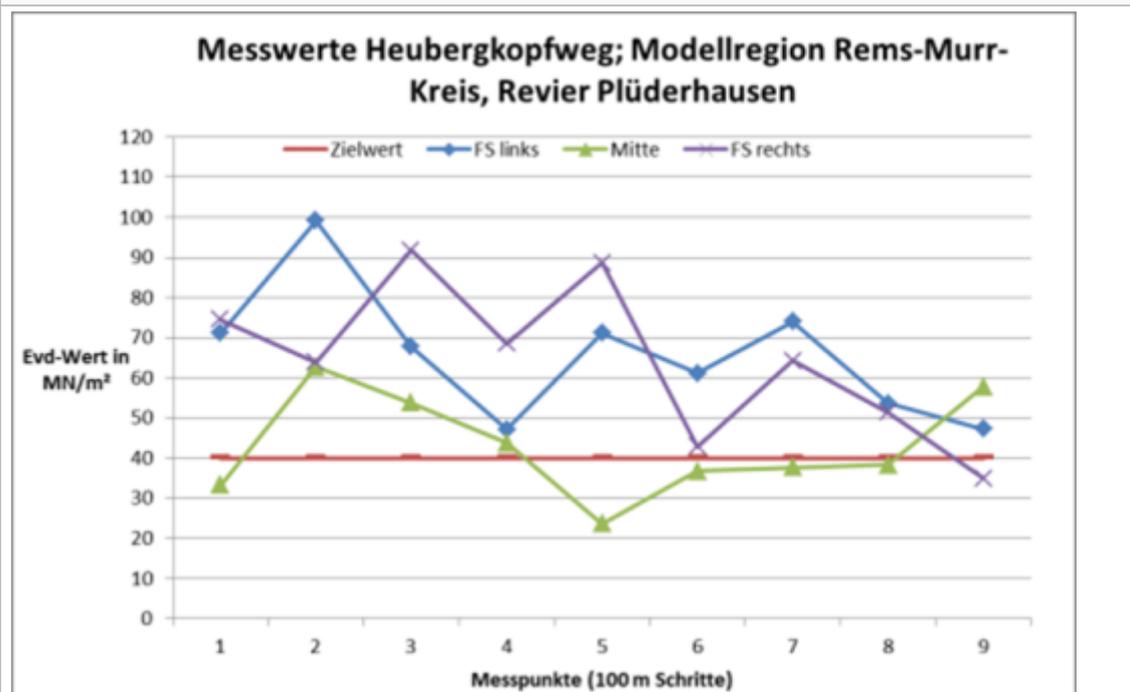


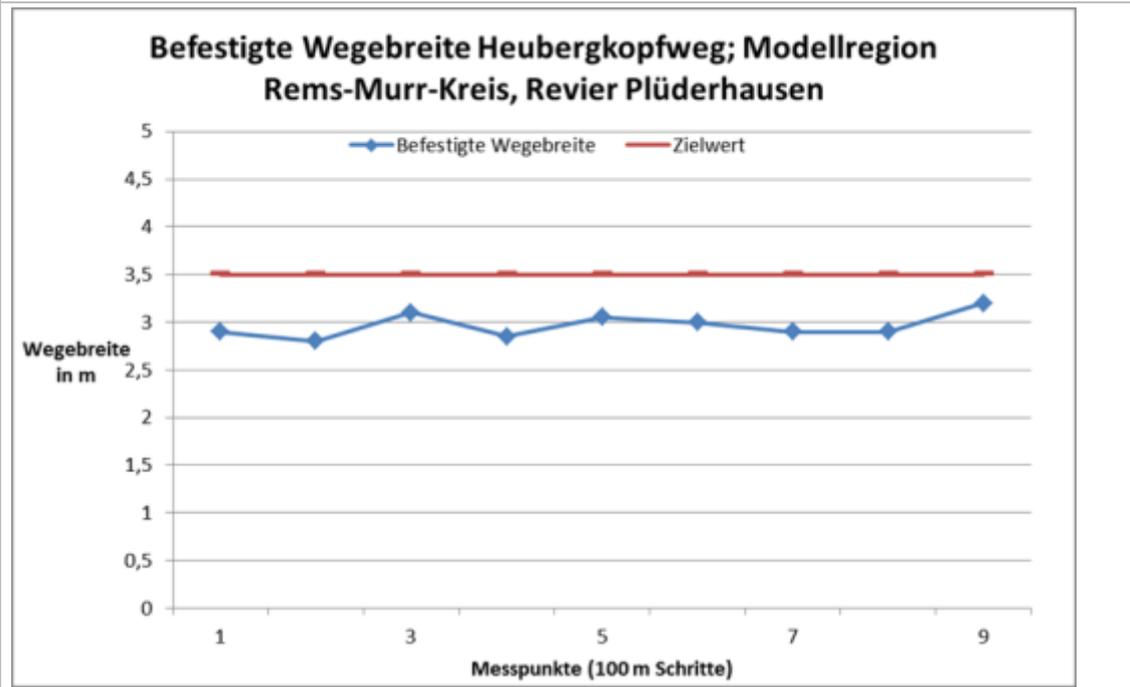
Die Wegebreite lag auch hier deutlich unter dem Zielwert aus der Richtlinie für die Walderschließung (Landesforstverwaltung Baden-Württemberg 1984). Der  $E_{vd}$  Wert lag außer in zwei Fällen deutlich über den geforderten Werten. In den beiden Fällen war jeweils die rechte Fahrspur betroffen, wobei ein Wert davon nur sehr gering unter dem Zielwert lag. Der andere Messwert bei Messpunkt 4 liegt allerdings deutlich zu niedrig.

## Heubergkopfweg

Der Heubergkopfweg wurde am 18.03.2015 auf einer Strecke von 800 m untersucht. Die Messpunkte lagen in einem Abstand von 100 m. Das Wetter war wie schon bei allen Untersuchungen im Rems-Murr-Kreis stabil (trocken, warm, sonnig, windstill). Bei der Messung des Heubergkopfweges ergab sich ein durchschnittlicher  $E_{vd}$  Wert von  $57,8 \text{ MN/m}^2$ , der Minimalwert lag bei  $23,7 \text{ MN/m}^2$ . Nur an einem Messpunkt konnte das Querprofil als Dachprofil zugeordnet werden (11,1 %), während der Großteil (88,9 %) als unklar eingestuft wurde. Der Weg war vom Allgemeinzustand her durchgehend gut und wies keinerlei Wasserablauf in der Fahrspur auf. Mit knapp 78 % war der Großteil des Lichtraumprofils frei, 22 % wurden durch einragende Bäume aus den wegnahen Beständen beeinträchtigt. Die durchschnittliche Wegebreite lag bei 2,97 m, die minimale Wegebreite lag bei 2,8 m. Im Bereich, der gemessen wurde, war kein Bauwerk am oder im Weg vorhanden. Die durchschnittliche Steigung von knapp über 7 % lag bei diesem Weg recht hoch. Die maximale Steigung lag bei 13 % und damit bereits über den nach Richtlinien geforderten Werten. Die Querneigung lag links bei 5,6 % und rechts bei 6,1 %. Der Weg war auf der kompletten erfassten Länge mit Trapezgräben ausgestattet, die in 44,4 % der Fälle frei und in 55,6 % der Fälle mit Mängeln behaftet waren. Hierbei spielten vor allem Verformungen sowie Materialeinträge in die Gräben eine Rolle. Zwei Dolen aus Beton waren innerhalb der untersuchten Strecke vorhanden. Beide Dolen waren voll funktionstüchtig, aber hatten einen Durchmesser von 300 mm, was nach der aktuell gültigen RLW (2005) zu gering ist. Der Abstand der Dolen betrug 460 m. Die gemessenen  $E_{vd}$  Werte sind in Abbildung 156 dargestellt.

Abbildung 156: Heubergkopfweg



**Abbildung 157: Heubergkopfweg Wegebreite**

Als Fazit lässt sich festhalten, dass der Weg zu schmal ist. Die gemessenen  $E_{vd}$  Werte liegen hier bis auf einen Messwert in der rechten Fahrspur über dem geforderten Wert. Die Messwerte aus der Wegemitte unterschreiten den Zielwert zwar des Öfteren, dies ist aber aufgrund der nicht vorhandenen Befahrung zu vernachlässigen.

#### **Taubenhof Weg/ Rübländerweg**

Der Taubenhof Weg und in seiner Folge der Rübländerweg wurden am 18. und 19.03.2015 untersucht und bewertet. Dabei wurde eine Strecke von 800 m begutachtet. Die Messpunkte lagen in einem Abstand von 100 m. Das Wetter war an diesen Tagen einheitlich gut und stabil. Dieser Weg wurde im Revier Steinenberg gemessen. Dabei wurde ein durchschnittlicher  $E_{vd}$  Wert von  $40,1 \text{ MN/m}^2$  gemessen, der minimale Wert lag bei  $16,6 \text{ MN/m}^2$ . 28,6 % der Querprofile sind Dachprofile, bei den verbleibenden 71,4 % war die Zuordnung unklar. Der allgemeine Zustand des Weges war in 85,7 % als gut zu bezeichnen, je 7 % als durchschnittlich bzw. schlecht. Wasserablauf in der Spur spielte auch hier keine Rolle. Das Lichtraumprofil war je zur Hälfte frei bzw. Bäume ragten ein. Die durchschnittliche Wegebreite lag bei 2,99 m, die minimale Wegebreite lag bei 2,8 m. Bauwerke waren bei diesem Weg, in Bezug auf die erfasste Strecke, nicht vorhanden. Die durchschnittliche Steigung lag bei 0 %, der Maximalwert lag bei 7 %. Die Querneigung des Weges lag links bei 6,8 % und rechts bei 5,7 %. In 93 % der Fälle war der Weg mit einem Trapezgraben ausgestattet. Diese Gräben waren allesamt in gutem Zustand, also frei und funktionstüchtig. Innerhalb der Messstrecke waren drei Dolen vorhanden. Zwei davon waren Betonrohre, in einem Fall war ein Metallrohr verbaut. Die Dolen waren frei und funktionstüchtig und wiesen Durchmesser von 200 mm bis 400 mm auf. Somit war lediglich die Metaldole mit 400 mm richtlinienkonform (RLW 2005). Der mittlere Dolenabstand lag bei 170 m und variierte von 166 m bis zu 344 m. Die gemessenen  $E_{vd}$  Werte sind in Abbildung 158 dargestellt.

Abbildung 158: Taubenhof Weg/ Rübländerweg

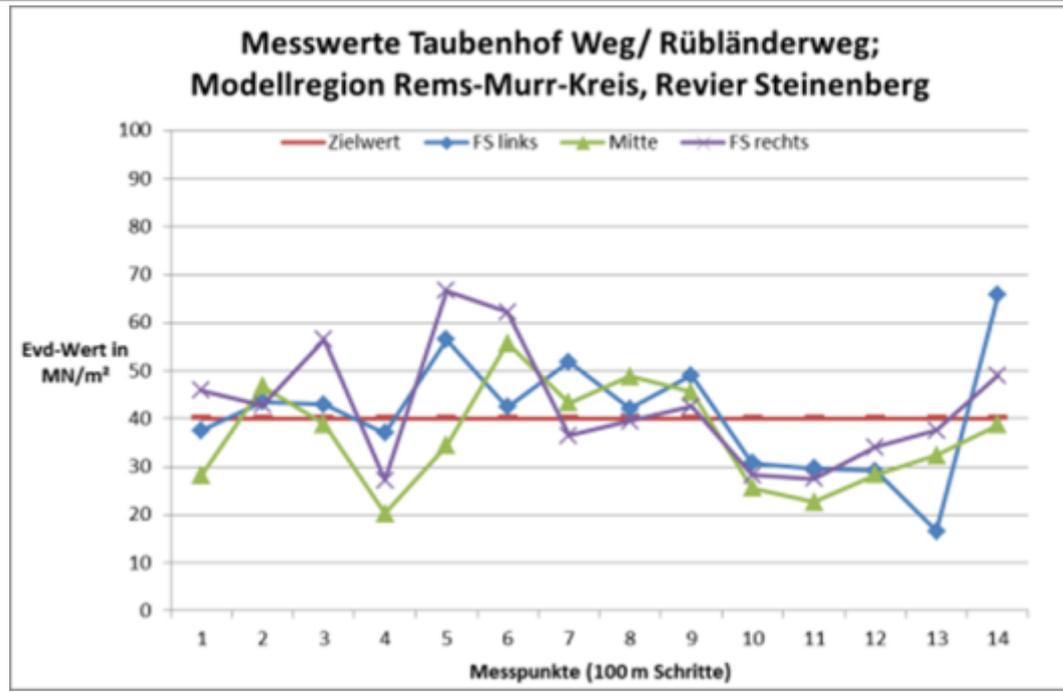
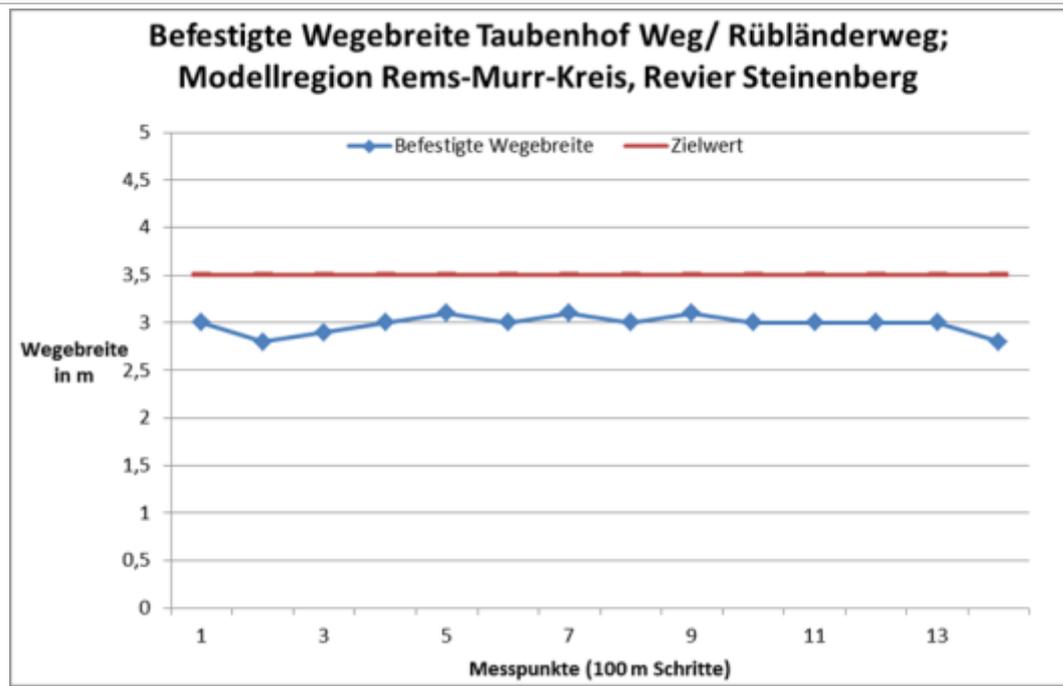


Abbildung 159: Taubenhofweg/ Rübländerweg Wegebreite

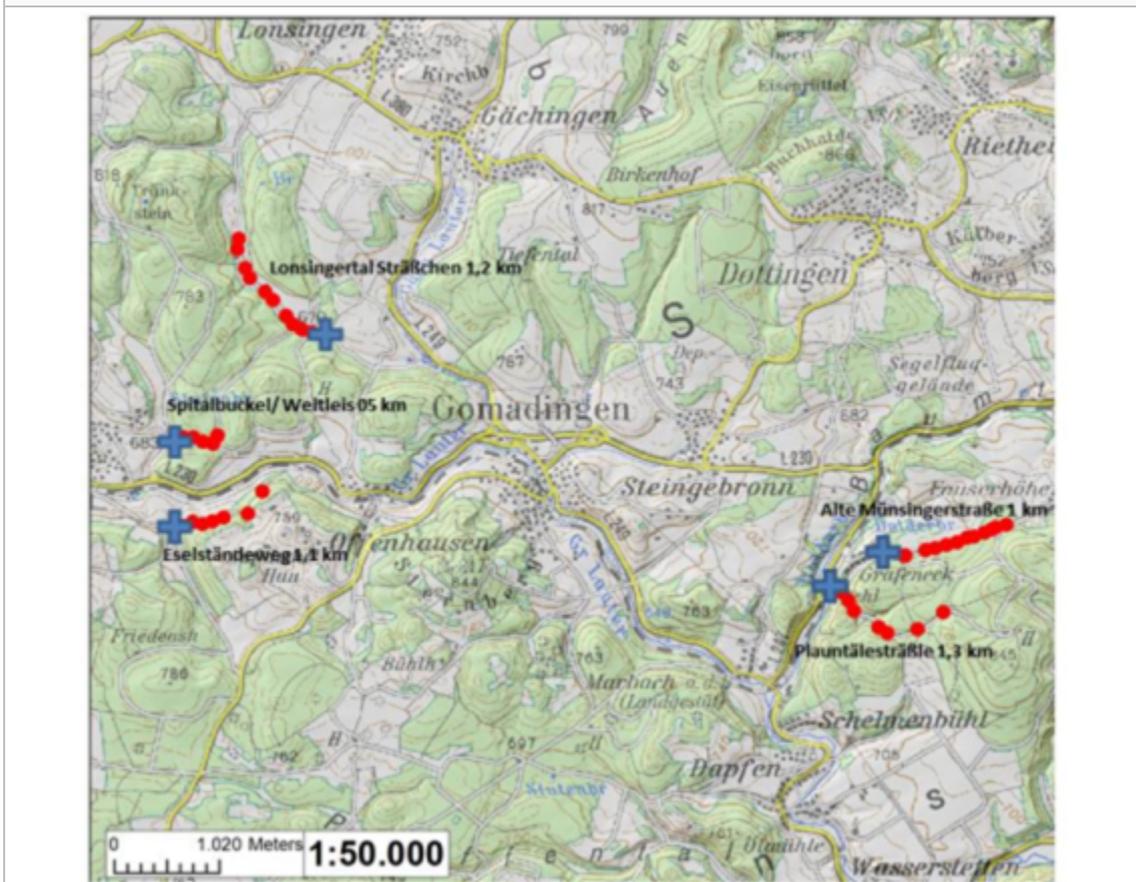


Die Wegebreite schwankte um 3 m und war somit deutlich zu gering. Die erfassten E<sub>vd</sub> Werte schwankten erheblich. Der Zielwert von 40 MN/m² wurde immer wieder unterschritten.

### 8.4.3 Modellregion Landkreis Reutlingen, Reviere Alb und Grafeneck

Im Landkreis Reutlingen wurden in den Revieren Alb und Grafeneck insgesamt 5,1 km Waldwege untersucht und per Fallgewichtsgerät gemessen. Es wurden folgende Wege gemessen: Plauntälesträßle (Revier Grafeneck) auf 1,3 km, Lonsingertalsträßchen (Revier Alb) auf 1,2 km, Eselständeweg (Revier Alb) auf 1,1 km, alte Münsingerstraße (Revier Grafeneck) auf 1 km und Spitalbuckel übergehend in die Weitleis (Revier Alb) auf 500 m. Die beiden Reviere im Landkreis Reutlingen sind geologisch dem weißen Jura zuzuordnen, damit ist diese Modellregion eine der beiden mit einem sehr tragfähigen Untergrund. Die Messung erfolgte an den GeoDat roten Fahrwegen.

**Abbildung 160: Übersicht über die in Gomadingen (Kreis Reutlingen) erfassten Wege**



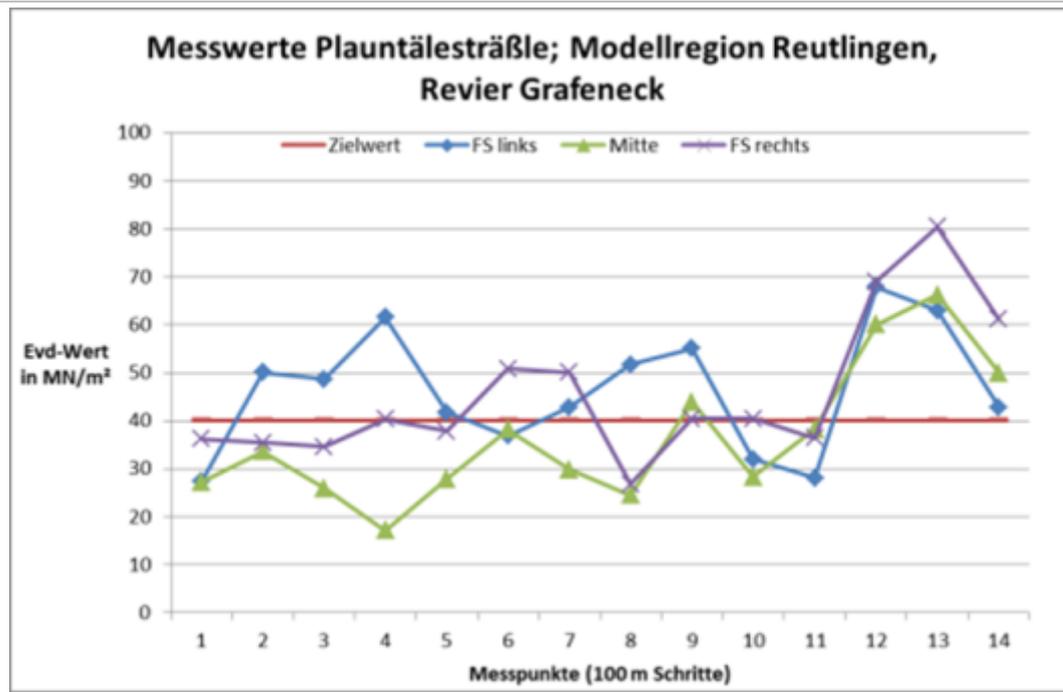
Quelle: FoGIS, bearbeitet durch FVA (2015)

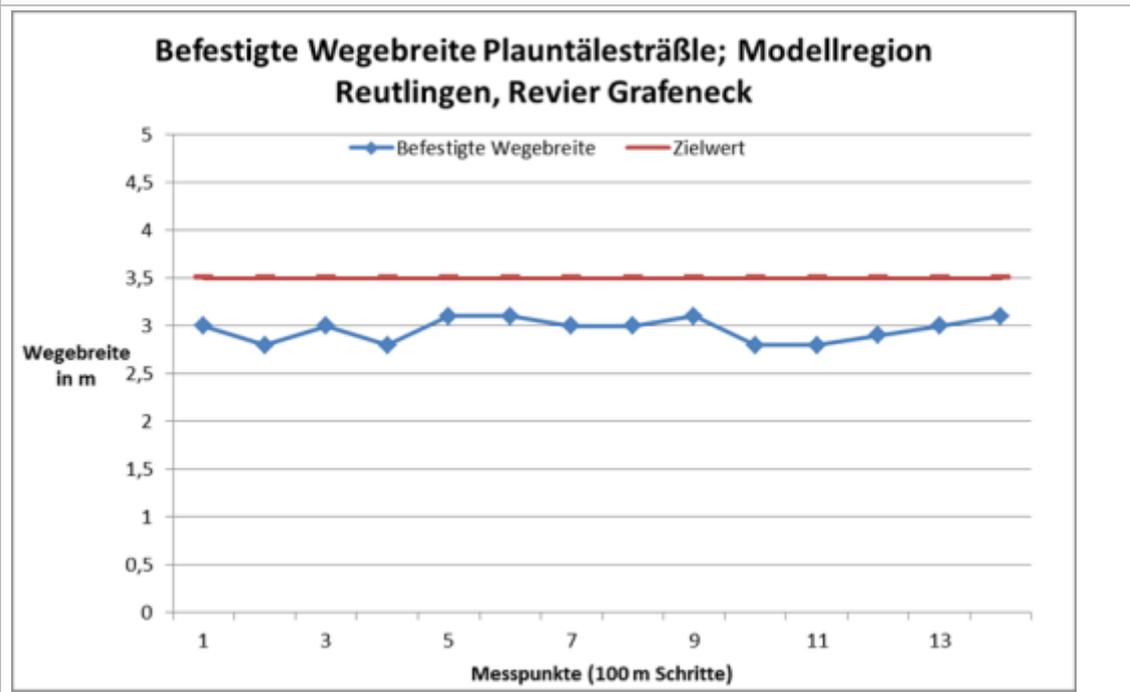
#### Plauntälesträßle

Die Messung der Wege begann im Landkreis Reutlingen am 31.03.2015 und erstreckte sich auf 1,3 km. Die Messpunkte lagen in einem Abstand von 100 m. Die Wetterlage war aufgrund eines Sturmtiefs sehr schlecht, deshalb musste aufgrund von Neuschnee die Messkampagne am Folgetag abgebrochen werden. Am 31.03. fielen starke Niederschläge, es war sehr kalt und starke Böen führten ebenfalls zum Abbruch des Außendienstes. Die Messungen ergaben hier einen durchschnittlichen  $E_{vd}$  Wert von  $42,9 \text{ MN/m}^2$ , der Minimalwert lag bei  $17,1 \text{ MN/m}^2$ . Das Querprofil des Weges wurde in ca. 86 % der Fälle als Dachprofil angesprochen, in 14 % der Fälle (bei 2 Messpunkten) als Uhrglasprofil. Der Weg hatte einen guten Allgemeinzustand (93 %), lediglich an einem Messpunkt wurde der Weg in die mittlere Kategorie eingestuft. Auch bei

diesem Weg spielte der Wasserablauf in der Spur keine Rolle. Bei 43 % der Messpunkte war das Lichtraumprofil frei, während bei 57 % der Baumbestand in den lichten Raum einragte. Die durchschnittliche Wegebreite lag bei 2,96 m und die geringste erfasste Wegebreite bei 2,8 m. Wegebauwerke waren auch hier keine vorhanden. Die durchschnittliche Steigung lag bei 7,7 %, die maximale Steigung hingegen bei 11 %. Die Querneigung lag links bei 5 % und rechts bei 6,3 %. In 86 % der Fälle war der Weg mit einem Spitzgraben versehen, bei den restlichen 14 % war kein Graben vorhanden. Etwas über die Hälfte dieser Gräben war frei und funktionstüchtig, der übrige Teil wies teilweise erhebliche Mängel auf, denn die Gräben waren oft zu. Die erfassten  $E_{vd}$  Werte sind in Abb. Abbildung 161 dargestellt.

**Abbildung 161: Plauntälestraße**



**Abbildung 162: Plauntälesträßle Wegebreite**

Die Wegebreite lag im Schnitt bei ca. 3 m und somit unter dem Zielwert. Außerdem unterschritten die  $E_{vd}$  Werte vielfach den Wert von  $40 \text{ MN/m}^2$  und schwankten insgesamt erheblich.

### Lonsingertal Sträßchen

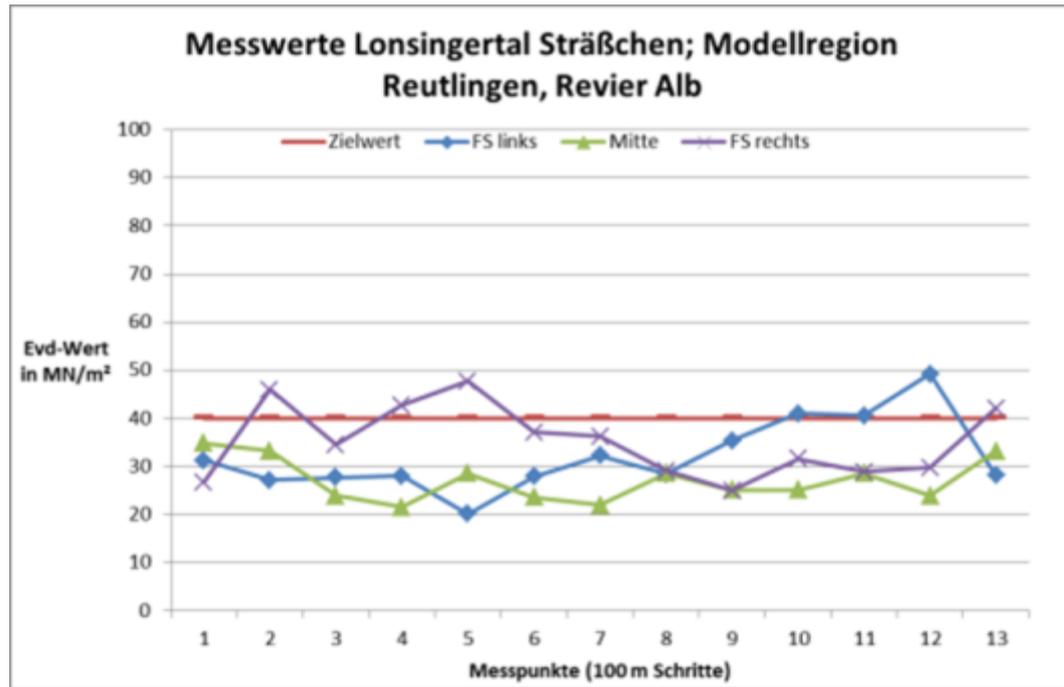
Dieser Weg wurde ebenfalls am 31.03.2015 gemessen. Der Weg wurde auf einer Strecke von 1,2 km untersucht, die Messpunkte lagen dabei im Abstand von 100 m. Die Wetterlage war durch das oben erwähnte Sturmtief entsprechend schlecht. Die Messungen am Lonsingertal Sträßchen ergaben einen durchschnittlichen  $E_{vd}$  Wert von  $31,5 \text{ MN/m}^2$  und einen Minimalwert von  $20,1 \text{ MN/m}^2$ . In 92 % der Fälle konnte der Querschnitt keinem gängigen Wegequerschnitt zugeordnet werden. Nur an einem Messpunkt wurde dieses dem Uhrglasprofil zugewiesen. Mit über 92 % der Messpunkte wurde der Weg als durchschnittlich eingestuft, der Rest wurde als gut bewertet. Ein Wasserablauf in der Fahrspur des Weges fand nicht statt, was aber nur mit der ebenen Lage des Weges erklärbar war. Der Weg war zum Zeitpunkt der Messung nämlich sehr nass und die zahlreich vorhandenen Schlaglöcher waren mit Wasser gefüllt. Das Lichtraumprofil war durchgehend frei, was sich dadurch erklärt, dass der Weg in einem kleinen Tal verläuft und rechts und links von Wiesen umgeben ist. Die erfasste durchschnittliche Wegebreite liegt bei 3,27 m, an der schmalsten Stelle wies der Weg eine Breite von 3 m auf. Im Bereich der gemessenen Strecke waren keinerlei Bauwerke im oder am Weg vorhanden. Die durchschnittliche Steigung lag bei nur 1,1 % und auch die maximale Steigung war mit 2 % gering. Die Querneigung lag links bei 4 % und rechts bei 1,6 %. Eine Wasserableitung in Form von Gräben oder Dolen war nicht vorhanden. Die gemessenen  $E_{vd}$  Werte sind in Abbildung 164 dargestellt.

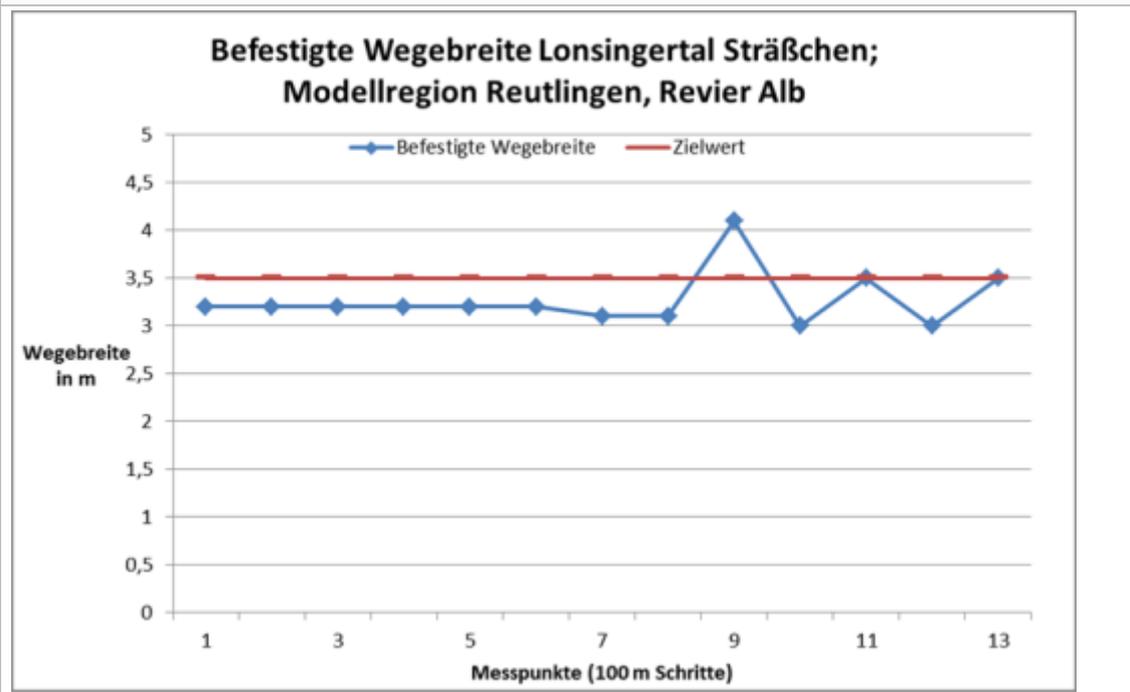
**Abbildung 163: Lonsingertalsträßchen bei hohen Niederschlägen**



Quelle: FVA

**Abbildung 164: Lonsingertal Sträßchen**



**Abbildung 165: Lonsingertal Sträßchen Wegebreite**

Die Wegebreite lag hier auf den meisten Messpunkten nur knapp unter dem geforderten Wert und erreichte bzw. überstieg diesen auch in drei Fällen. Die erfassten  $E_{vd}$ -Werte lagen beim Großteil der Messungen unter dem Zielwert. Der Weg war insgesamt eher in einem schlechten Zustand, was sich in einer Vielzahl von Schlaglöchern und Verformungen zeigte. Die geringe Steigung des Weges trägt außerdem dazu bei, dass Wasser nicht zügig abfließt. Durch das stehende Wasser wird die Bildung der Schlaglöcher begünstigt. Außerdem sieht die Richtlinie für Walderschließung Baden-Württemberg (1984) ein Mindest-Gefälle von 2 % vor.

### Eselständeweg

Dieser Weg wurde am 13.04.2015 vermessen, nachdem eine Wetterbesserung eingetreten war. Eine Strecke von 1,1 km wurde dabei untersucht, die Messpunkte lagen hier ebenfalls im Abstand von 100 m. Das Wetter war trocken, warm, sonnig, windstill und die Temperatur lag morgens bei 13 °C. Bei diesem Weg wurde ein durchschnittlicher  $E_{vd}$  Wert von 55,2 MN/m<sup>2</sup> gemessen, der Minimalwert lag bei 14,2 MN/m<sup>2</sup>. An keiner der 12 Messpunkte konnte das ursprünglich angelegte Querprofil zugeordnet werden. Der allgemeine Zustand des Weges wurde in 92 % der Fälle als gut und nur in 8 % als durchschnittlich bewertet. Ein Wasserablauf in der Spur spielte hier wiederum keine Rolle bzw. kam überhaupt nicht vor. Zwei Drittel des lichten Raumes waren frei, bei einem Drittel der Messpunkt ragte der Bestand in diesen Bereich hinein. Die durchschnittliche Wegebreite lag bei 2,68 m, die schmalste gemessene Stelle lag bei nur 2,3 m. Innerhalb dieses Wegezuges waren keine Bauwerke vorhanden. Die durchschnittliche Steigung lag bei 3,3 %, während die maximale Steigung bei 8 % lag. Die Querneigung lag links bei 4,6 % und rechts bei 2,7 %. Auch bei diesem Weg war keinerlei Wasserableitung vorhanden. Die erhobenen  $E_{vd}$  Werte sind in Abbildung 166 dargestellt.

Abbildung 166: Eselständeweg

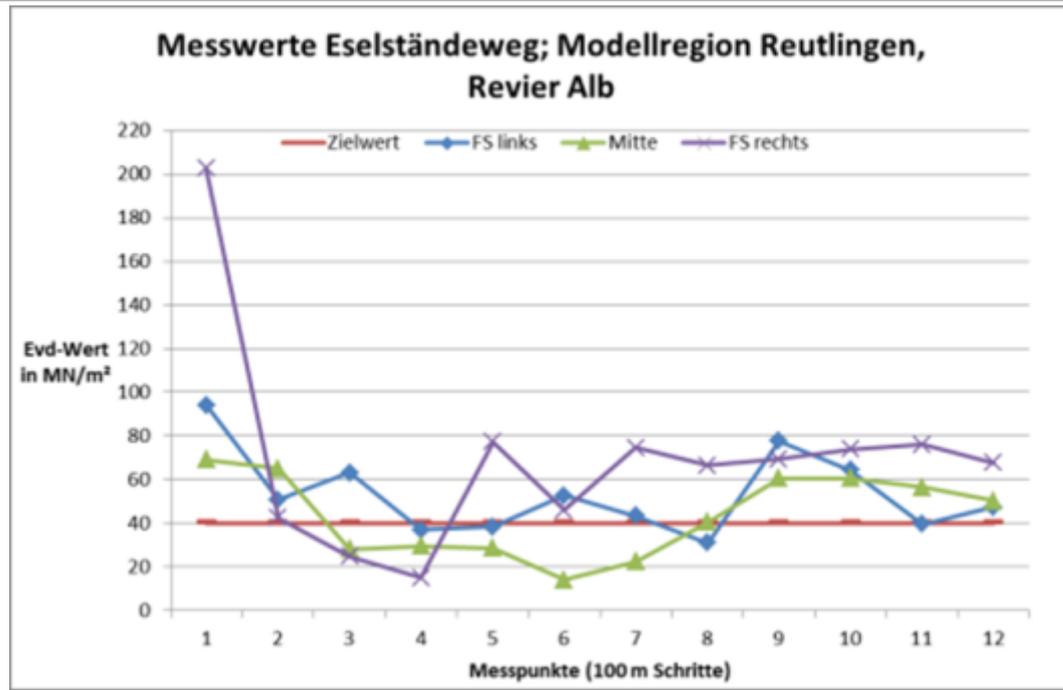
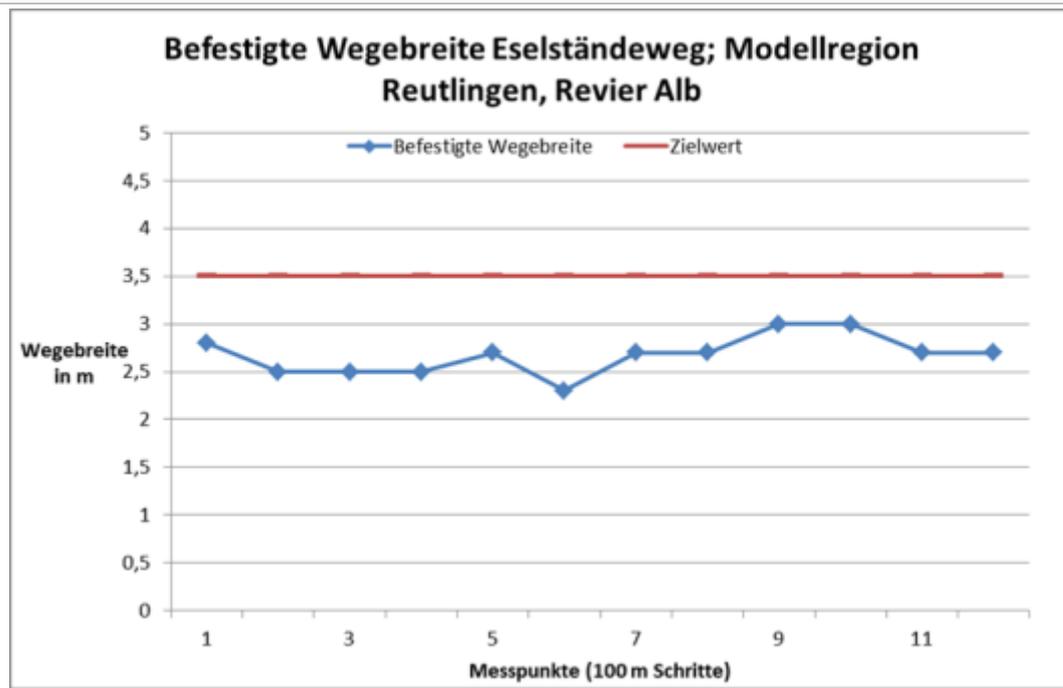


Abbildung 167: Eselständeweg Wegebreite



Die Wegebreite bei diesem Weg lag insgesamt zu niedrig und entspricht damit nicht den Vorgaben. Was die  $E_{vd}$  Werte angeht so zeigt sich auch bei diesem Weg ein recht stark schwankendes und uneinheitliches Bild. Der Zielwert von  $40 \text{ MN/m}^2$  wird häufig unterschritten.

### Alte Münsingerstraße

Die alte Münsingerstraße wurde am 13.04.2015 untersucht und stellte sich als Weg mit sehr gutem Ausbaustandard dar. Untersucht wurde 1 km, die Messpunkte lagen auch hier in einem Abstand von 100 m. Das Wetter war insgesamt stabil, es fielen keine Niederschläge.

**Abbildung 168: Alte Münsingerstraße**



Quelle: FVA

Der durchschnittliche  $E_{vd}$  Wert lag bei diesem Weg bei  $87,7 \text{ MN/m}^2$ , der kleinste gemessene Wert lag bei  $50,2 \text{ MN/m}^2$ . Beim Großteil der Messpunkte (82 %) konnte das Querprofil als Dachprofil identifiziert werden, lediglich an 2 Messpunkten (18 %) war die Querschnittsgestaltung unklar. Der Weg wurde durchgehend als gut eingestuft, ein Wasserablauf in der Fahrspur war nicht vorhanden. Die durchschnittliche Wegebreite lag bei 3,58 m, am Messpunkt mit der schmalsten Wegebreite waren immer noch 3,5 m vorhanden. Bauwerke entlang des Weges spielten ebenfalls keine Rolle. Die durchschnittliche Steigung lag bei 4,2 % die maximale bei 7 %. Die Querneigung lag links bei 6 % und rechts bei 4,7 %. Die Wasserableitung war entlang der gesamten untersuchten Strecke als beidseitiger Spitzgraben ausgeformt. In 54,5 % der Fälle wiesen die Gräben Mängel auf, die sich vor allem darin äußerten, dass diese meist zu flach waren. An einem Messpunkt (9,1 %) war der Graben komplett zu. Bei den restlichen 36,4 % waren die Gräben frei und voll funktionstüchtig. Dolen waren keine vorhanden. Der Weg stellte sich insgesamt als sehr homogen und vom Ausbaustandard her als sehr gut heraus. Die gemessenen  $E_{vd}$  Werte sind in Abbildung 169 dargestellt.

Abbildung 169: Alte Münsingerstraße

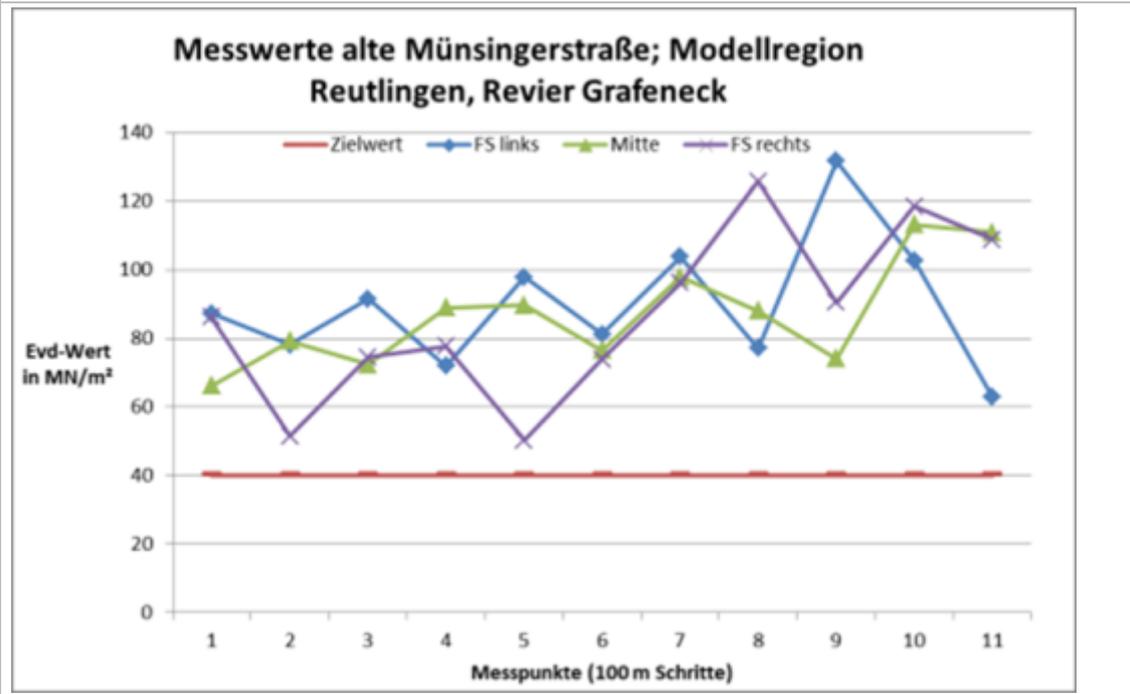
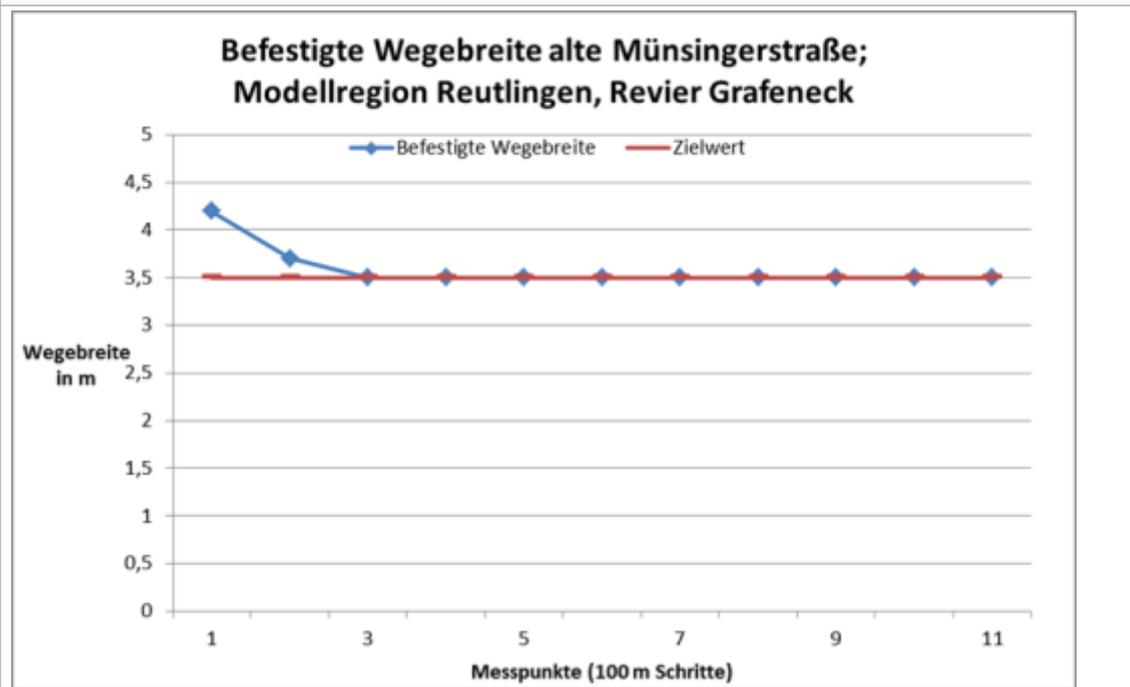


Abbildung 170: Alte Münsingerstraße Wegebreite

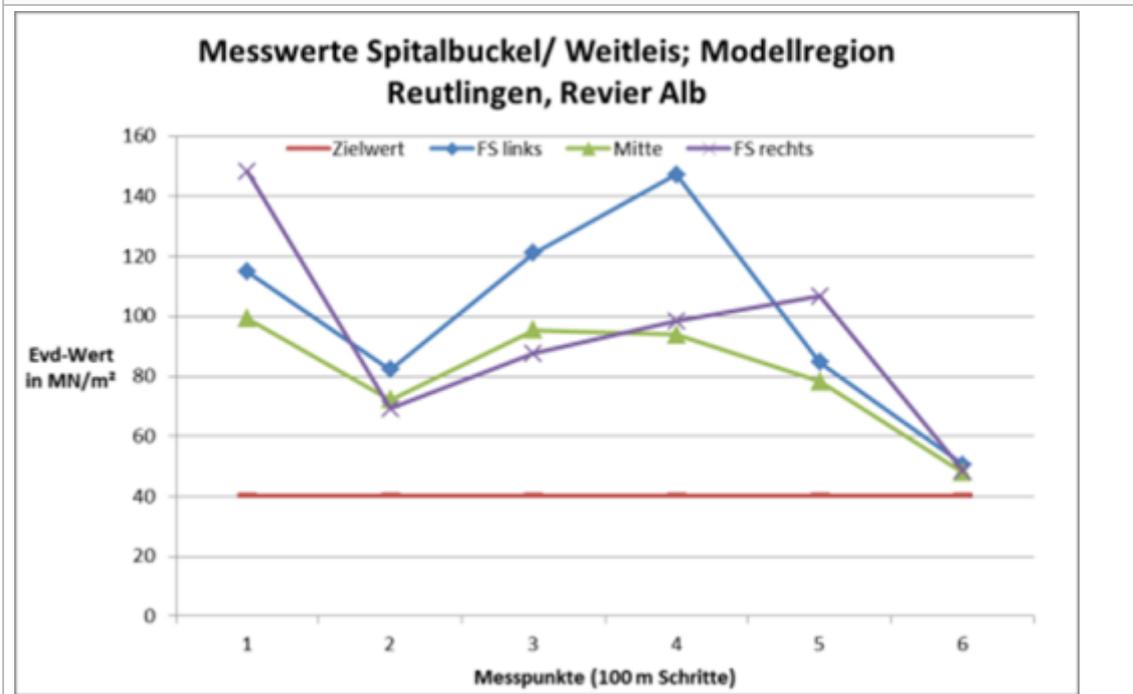


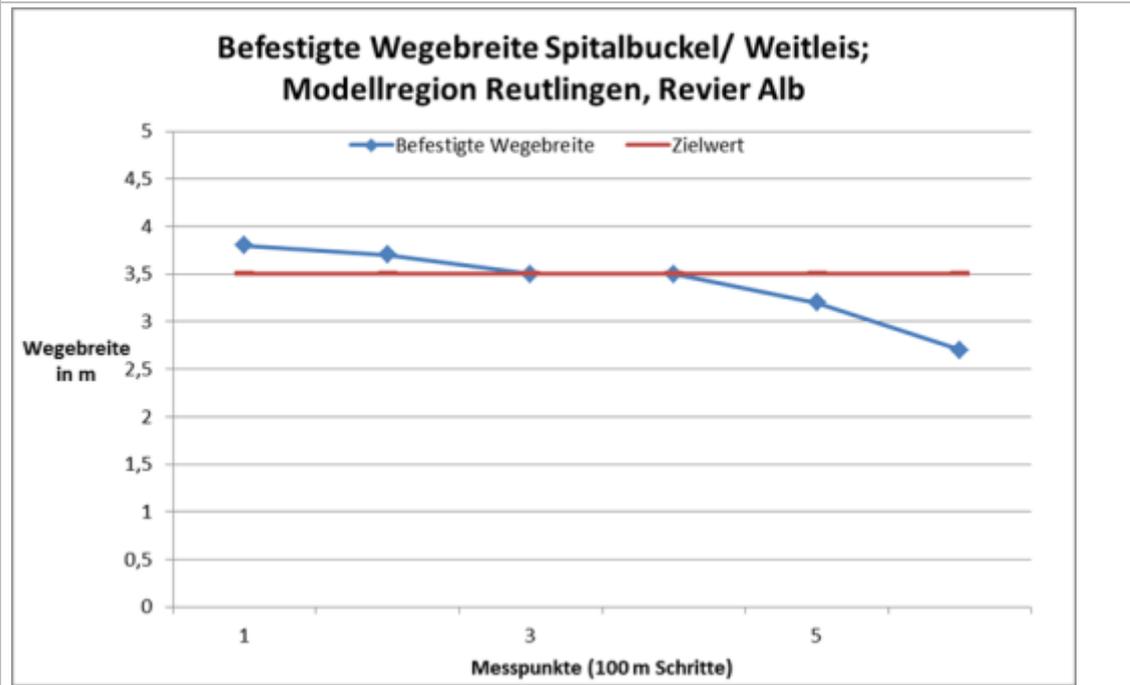
Der Weg übertraf die geforderte richtlinienkonforme Wegebreite von 3,5 m in zwei Messpunkten, auf der restlichen Wegstrecke lag der tatsächliche Wert genau beim Zielwert. Bei den erfassten  $E_{vd}$  Werten lag der Weg sowohl in beiden Fahrspuren als auch in der Wegemitte deutlich über dem Zielwert von  $40 \text{ MN/m}^2$ .

### Spitalbuckel/ Weitleis

Diese beiden ineinander übergehenden Wege wurden am 14.04. auf einer Strecke von 500 m näher untersucht. Die Messpunkte lagen im Abstand von 100 m. Das Wetter war warm, trocken, windstill, sonnig und die Temperatur lag morgens bei 7,5 °C. Der durchschnittlich ermittelte  $E_{vd}$  Wert lag bei 91,3 MN/m<sup>2</sup>, der schlechteste Wert lag bei 47,8 MN/m<sup>2</sup>. Zwei Drittel der Messpunkte konnten als Uhrglasprofil angesprochen werden, bei einem Drittel war eine Zuordnung zu einem Regelquerschnitt nicht möglich. Der Weg wurde in Bezug auf den allgemeinen Zustand als durchweg gut bewertet. Der Wasserablauf in der Spur war nicht zu bemängeln. In über 83 % der Fälle war der Lichte Raum frei, nur an einem Messpunkt ragten Äste in das Lichtraumprofil. Die erfasste durchschnittliche Wegebreite lag bei 3,4 m. Der Minimalwert bei der befestigten Wegebreite lag bei 2,7 m. Wegebauwerke waren auch bei diesem Weg nicht vorhanden. Die durchschnittliche Steigung lag bei 6,8 %, beim Maximalwert bei 14 % und somit über dem zulässigen Höchstwert. Die Querneigung lag links bei 5,2 % und rechts bei 4,9 %. Eine Wasserableitung in Form von Gräben oder Dolen war nicht ausgeführt. Die erhobenen  $E_{vd}$  Werte sind in Abbildung 171 dargestellt.

Abbildung 171: Spitalbuckel und Weitleis

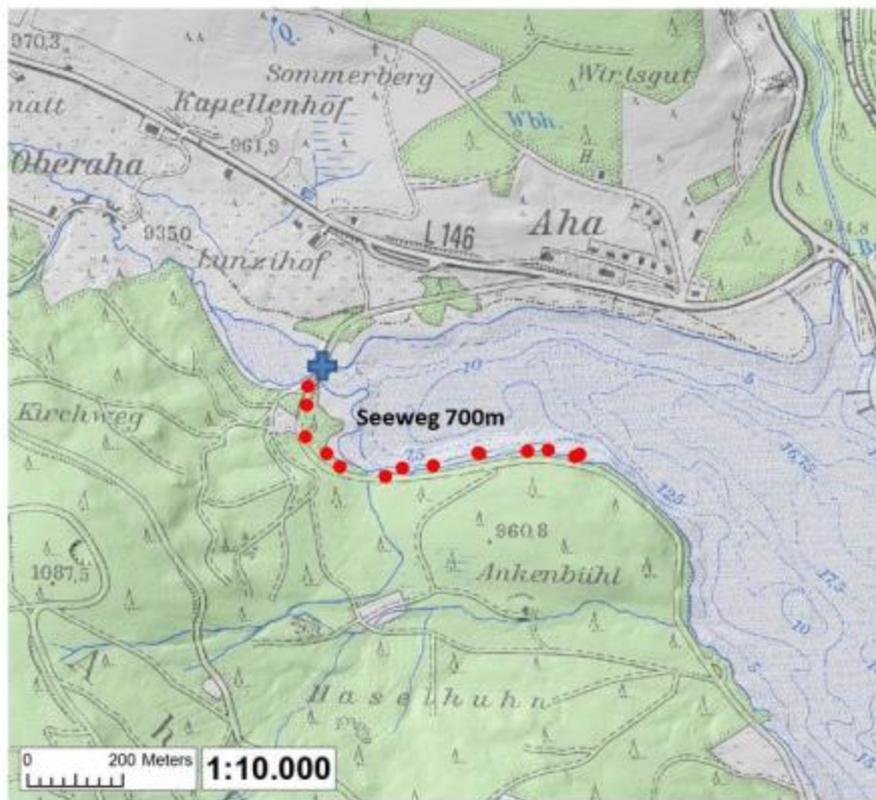


**Abbildung 172: Spitalbuckel/ Weitleis Wegebreite**

Dieser Wegezug war durch einen sehr guten Zustand gekennzeichnet. Die befestigte Breite lag zunächst über dem Zielwert, näherte sich dann an diesen an und erst im Bereich des Überganges in die Weitleis war die Wegebreite deutlich zu gering. Die gemessenen  $E_{vd}$  Werte lagen auf der gesamten erfassten Strecke deutlich über dem geforderten Wert ( $40 \text{ MN/m}^2$ ). Gegen Ende der Messstrecke war eine Abnahme des  $E_{vd}$  Wertes zu verzeichnen.

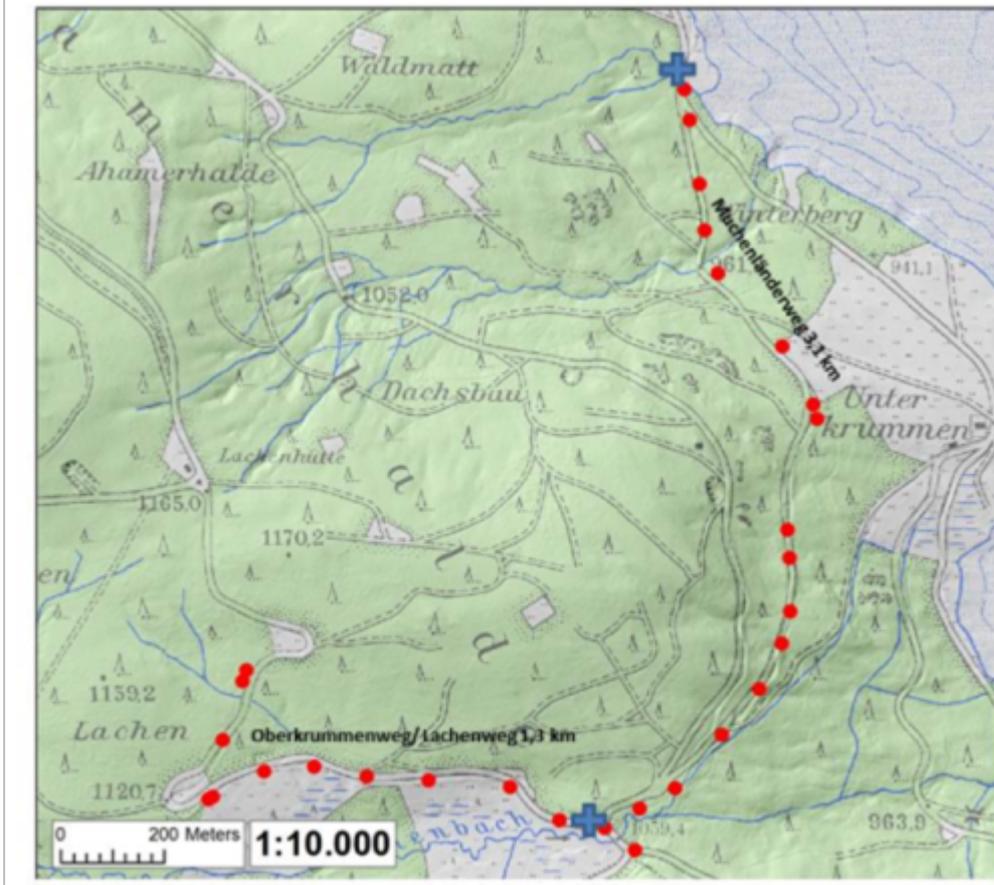
#### 8.4.4 Modellregion Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald, Reviere Äule und Schönenbach-Blasiwald

Diese Modellregion ist die zweite innerhalb der Untersuchung, die einen gut tragfähigen Untergrund besitzt. Die kristallinen Grundgesteine bieten eine gute Grundlage für einen tragfähigen Wegebau. Im Unterschied zu den drei anderen Modellregionen wurden hier im Rahmen des Projektes auch blaue GeoDat Fahrwege untersucht. Die Außenaufnahmen wurden in den Revieren Äule und Schönenbach-Blasiwald durchgeführt. Dabei wurden im Revier Äule gemessen: Der Seeweg (GeoDat blau) je 700 m einmal bei Frost (07.04.2015) und einmal im frostfreien Zustand (16.04.2015), der Muchenländerweg (GeoDat blau) auf 3,1 km und der Oberkrummenweg übergehend in den Lachenweg (beide GeoDat rot) auf 1,3 km. 2,3 km des Muchenländerwegs sind dabei im Revier Äule gemessen worden, die restlichen 800 m des Weges liegen damit bereits im Bereich des Reviers Schönenbach-Blasiwald. Der Seeweg wurde dabei einmal bei deutlichem Bodenfrost gemessen und ein weiteres Mal an denselben Messpunkten bei frostfreiem Boden. Beim Seeweg muss außerdem die starke Verdichtung hervorgehoben werden, die aus einer hohen Besucherfrequenz (auch mit Fahrzeugen) am See einerseits und vor allem durch die Baustelle am Unterkrummenhof andererseits resultiert. Der Baustellenverkehr war auch bei den dortigen Außenaufnahmen sehr stark, so wurden beispielsweise Baumaterialien mit Sattelschleppern angeliefert. Auch ein großer Mobilkran war dort im Einsatz und nutzte den Seeweg zur An- und Abfahrt.

**Abbildung 173: Seeweg (LKR Breisgau-Hochschwarzwald)**

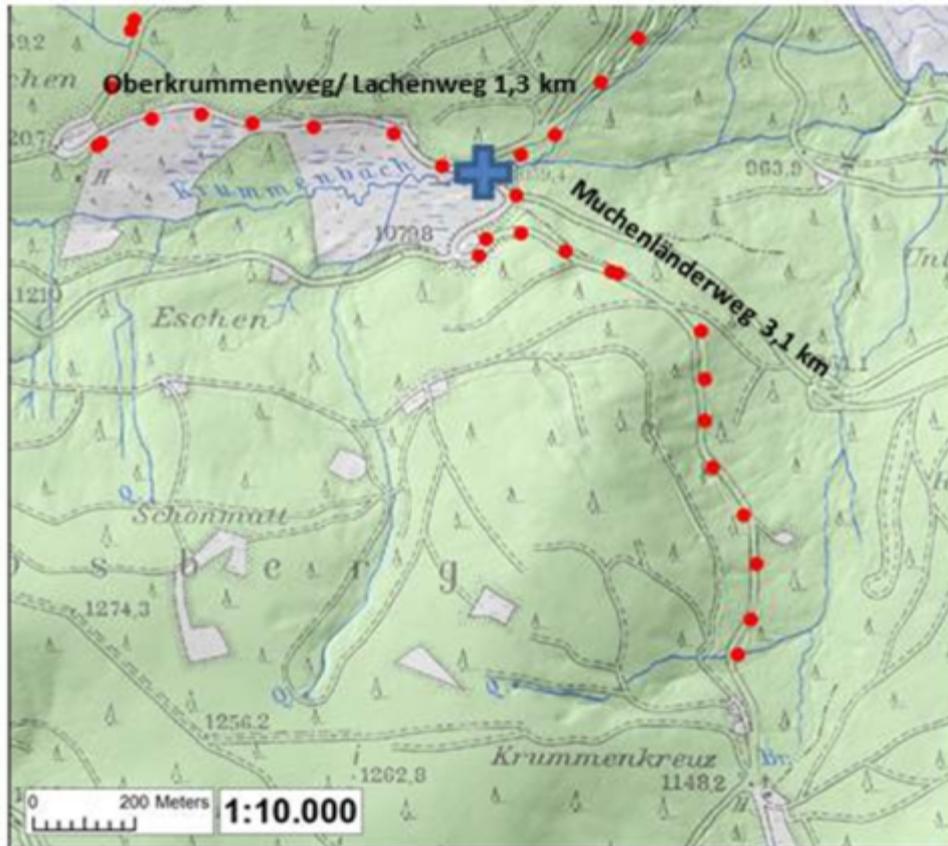
Quelle: FoGIS, bearbeitet durch FVA (2015)

**Abbildung 174: Übersicht über die im Breisgau-Hochschwarzwald erfassten Wege (Nordteil)**



Quelle: FoGIS, bearbeitet durch FVA (2015)

**Abbildung 175: Übersicht über die im LKR Breisgau-Hochschwarzwald erfassten Wege (Südteil)**



Quelle: FoGIS, bearbeitet durch FVA (2015)

### **Seeweg mit Bodenfrost**

Der Seeweg wurde am 07.04.2015 auf einer Strecke von 700 m gemessen. Die Messpunkte lagen in einem Abstand von 100 m. Es herrschte an diesem Tag strenger Bodenfrost. Es wurde aber gerade deshalb dort gemessen, um über die spätere Messung an denselben Messpunkten ohne Bodenfrost eine Aussage über die Auswirkung von Frost auf die Messwerte und die Tragfähigkeit des Weges zu gewinnen.

**Abbildung 176: Seeweg mit Bodenfrost**

Quelle: FVA

Bei der Messung des Seeweges wurde ein durchschnittlicher  $E_{vd}$  Wert von  $106,9 \text{ MN/m}^2$  ermittelt. Der geringste  $E_{vd}$  Wert lag bei  $50,4 \text{ MN/m}^2$ . In nahezu 90 % der Fälle konnte das Querprofil als Uhrglasprofil angesprochen werden. Der allgemeine Zustand des Weges stellte sich als gut dar, ein Wasserablauf in den Fahrspuren fand nicht statt. Das Lichtraumprofil war auf allen Messpunkten frei. Die durchschnittliche Wegebreite lag bei 4,3 m, der Minimalwert lag bei 4,1 m. Innerhalb dieses Weges war eine Brücke vorhanden. Die Brücke ist 4 m breit und 12 m lang. Die durchschnittliche Steigung lag bei 0,4 %, die maximale Steigung im Weg lag bei nur 1 %. Die Querneigung lag links bei 8 % und rechts bei 6 %. Innerhalb der Messstrecke wies der Weg 6 Dolen auf in einem durchschnittlichen Abstand von 185 m. Von diesen Dolen sind 85 % (oder 5 Stück) aus Beton, eine Dole war aus Naturstein gemauert. Alle 6 Dolen waren frei und voll funktionstüchtig. Die verwendeten Durchmesser schwankten erheblich zwischen Betonrohren mit 300 bis 600 mm, die Natursteindole wies eine Höhe von 900 mm und eine Breite von 800 mm auf. Die Wassergräben waren dabei als Spitzgraben ausgeformt und wiesen nur an einem Messpunkt einen Mangel (12,5 %) auf. Dieser Mangel äußerte sich in einer zu geringen Grabentiefe, so dass die Gefahr besteht, dass bei starken Niederschlägen das Wasser über den Weg abläuft bzw. dort stehen bleibt. Die gemessenen  $E_{vd}$  Werte sind in Abbildung 177 dargestellt.

Abbildung 177: Seeweg

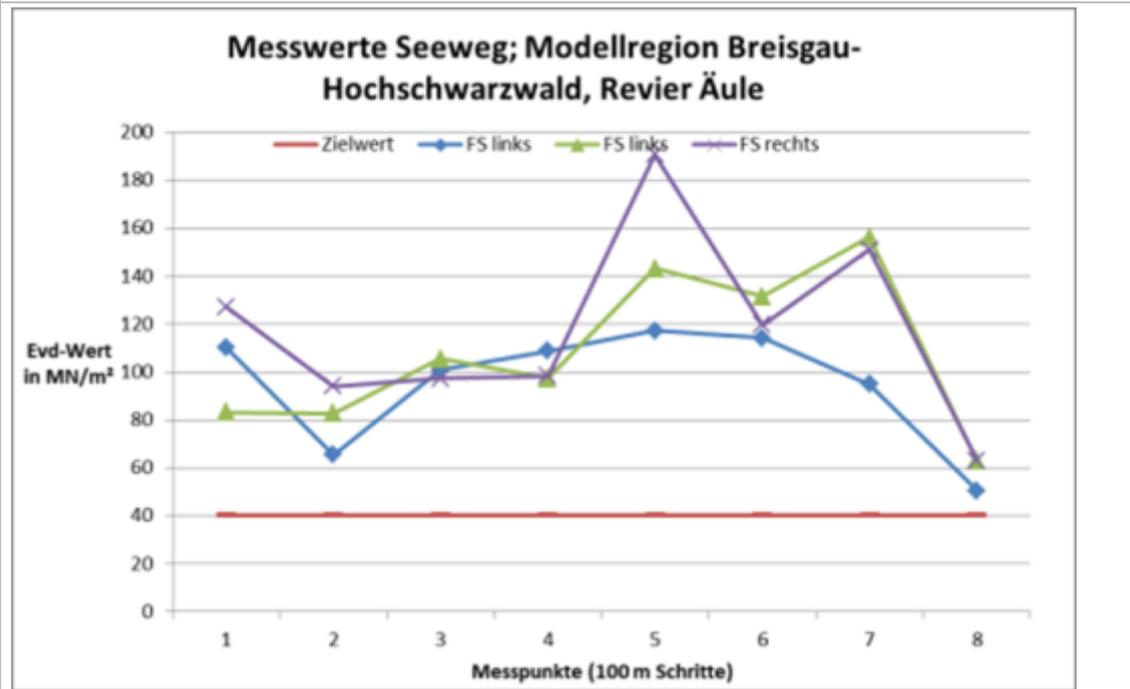
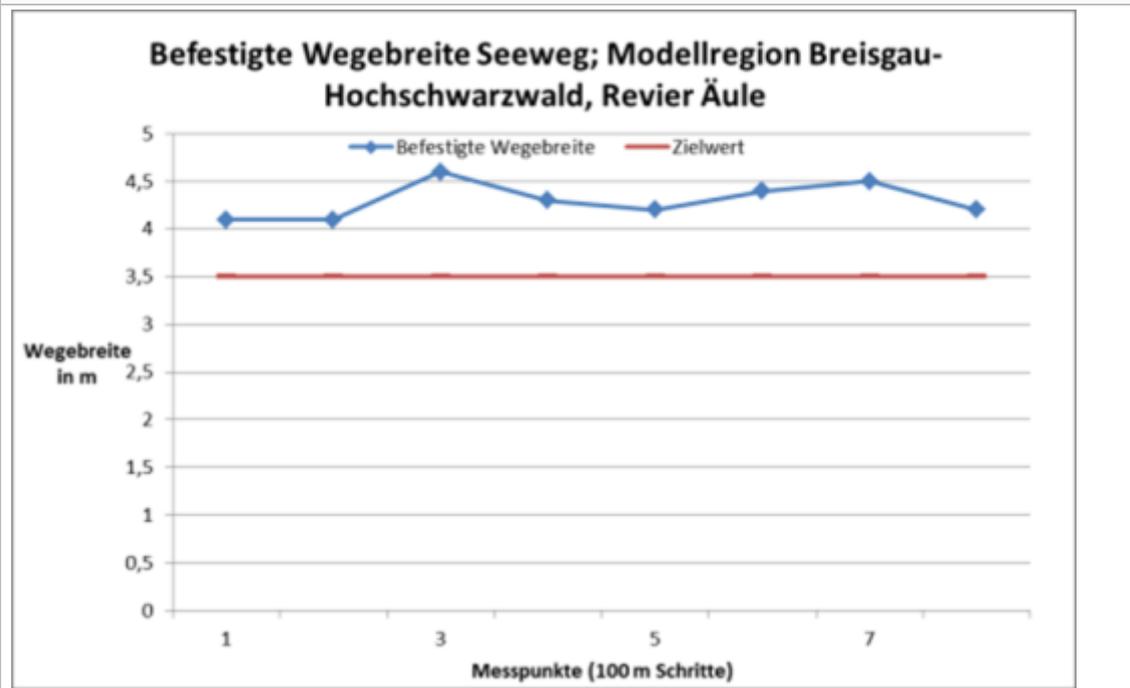


Abbildung 178: Seeweg Wegebreite



Die Wegebreite überstieg den in den Richtlinien geforderten Wert auf der gesamten Messtrecke erheblich. Auch die gemessenen  $E_{vd}$  Werte zeigen, dass der Weg weit über den Standards liegt. Die Auswirkung des Frosts auf diesen Wert ist dabei erheblich. Weiterhin muss festgehalten werden, dass der Weg auch einer in der Nähe befindliche Baustelle als Zuwegung gedient hat. Der Weg war entsprechend stark verdichtet. Die Steigung des Weges ist ebenfalls sehr gering, was wiederum stehendes Wasser und eine dadurch begünstigte Schlaglochbildung bedeuten kann.

### Seeweg frostfrei

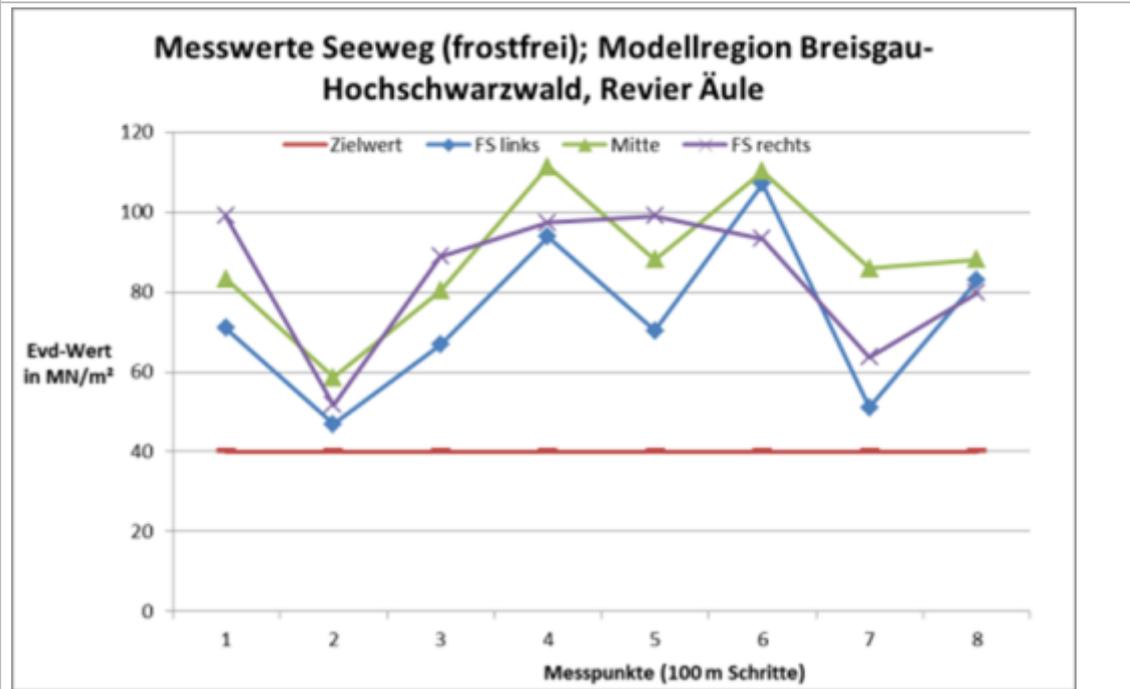
Dieser Weg wurde wiederum auf einer Strecke von 700 m am 16.04.2015 gemessen. Die Messpunkte lagen im Abstand von 100 m. Das Wetter war warm, trocken, bewölkt und windig, die Temperatur lag morgens bei 10 °C.

**Abbildung 179: Seeweg frostfrei**



Quelle: FVA

Bei der Messung am frostfreien Seeweg wichen die  $E_{vd}$  Werte doch deutlich von den bei Frost gemessenen Werten ab. Der durchschnittlich gemessene  $E_{vd}$  Wert lag nun bei  $82,1 \text{ MN/m}^2$  und somit  $24,8 \text{ MN/m}^2$  unter dem bei Frost gemessenen Wert. Der kleinste gemessene Wert lag bei  $47 \text{ MN/m}^2$  und damit  $3,4 \text{ MN/m}^2$  niedriger als bei Bodenfrost. Dieser geringe Unterschied beim Minimalwert ergibt sich daraus, dass durch starke Sonnenstrahlung auch bei Frost gemessene Messpunkte bereits oberflächlich angetaut waren. Für alle anderen Kriterien gelten die genannten Werte.

**Abbildung 180: Seeweg ohne Frost**

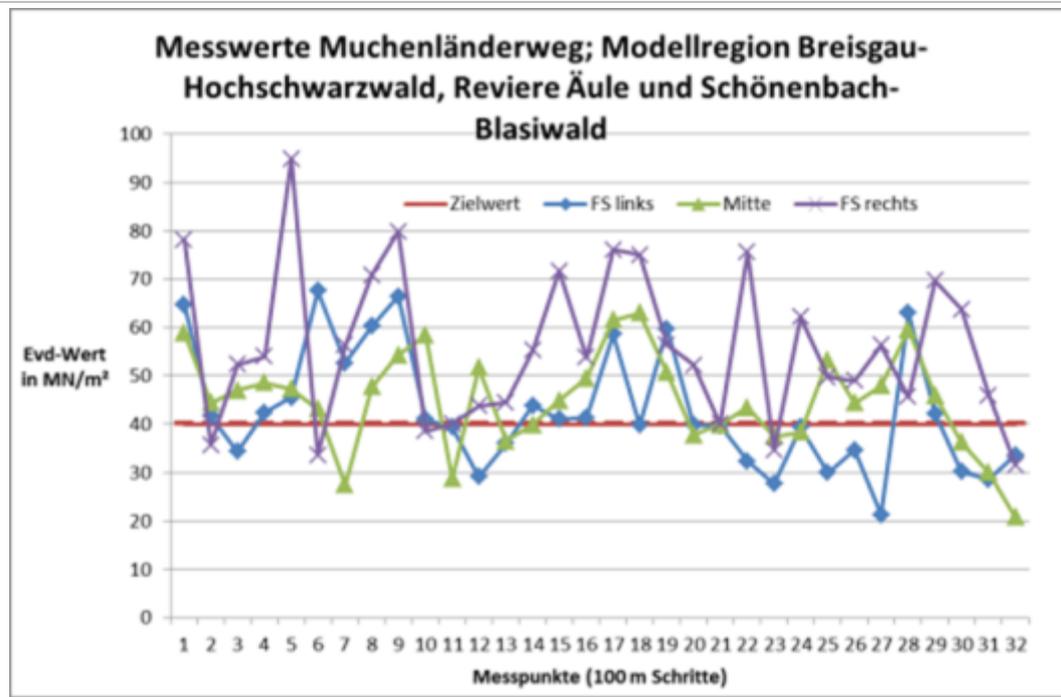
Die  $E_{vd}$  Werte lagen beim Seeweg auch im frostfreien Zustand deutlich über dem Zielwert.

### Muchenländerweg

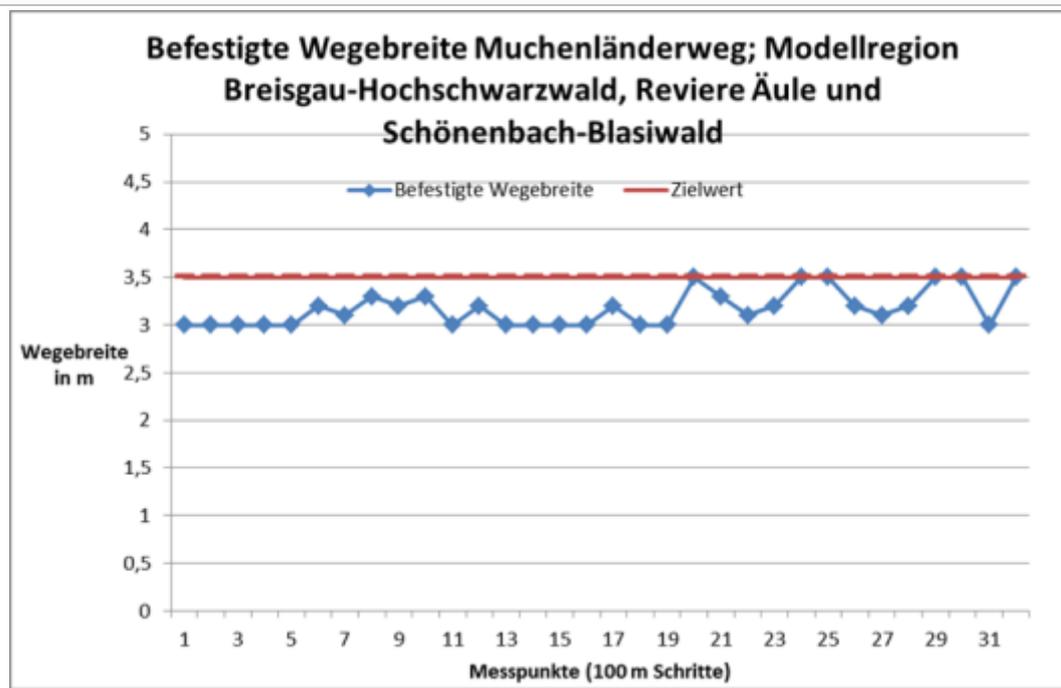
Dieser Weg wurde am 15.04.2015 auf einer Strecke von 3,1 km erfasst. Die Messpunkte lagen in einem Abstand von 100 m. Während es morgens mit 4,5 °C noch kalt war, stieg die Temperatur im Laufe des Tages auf 15 °C an. Ansonsten war es windstill, sonnig und trocken. Der durchschnittlich gemessene  $E_{vd}$  Wert lag bei 47,9 MN/m<sup>2</sup>, der Minimalwert bei 20,8 MN/m<sup>2</sup>. 60 % der Messpunkte wurden dem Uhrglasprofil zugeordnet, bei 40 % war eine klare Zuordnung nicht möglich. Der Allgemeinzustand des Weges war beim Großteil der erfassten Messpunkte als gut zu bewerten, lediglich in 2 Fällen wurde die Kategorie durchschnittlich, einmal die Kategorie schlecht vergeben. Wasserablauf in der Fahrspur spielte bei der erfassten Strecke ebenfalls keine Rolle. In dreiviertel der Fälle war das Lichtraumprofil frei, im verbliebenen Viertel der Messpunkte ragte der Bestand in das Profil zumindest ein. Die durchschnittliche Wegebreite lag bei 3,18 m, während die schmalste erfasste Wegebreite bei 3 m lag. Innerhalb des Weges befand sich eine Brücke. Diese weist eine Breite von 4 m und eine Länge von 5 m auf. Die Brücke ist einspurig und weist keinerlei offensichtliche Beschädigungen auf. Eine Brücken- oder Bauwerksnummer war nicht auffindbar. Die durchschnittliche Steigung lag bei 6,9 %, während die maximale Steigung bei 12 % lag. Die Querneigung lag links bei 8 % und rechts bei 6 %. Innerhalb der untersuchten Wegestrecke lagen 25 Dolen davon waren 16 % (4 Stück) Betondolen, in 84 % der Fälle lagen gesetzte Natursteindolen vor. Der durchschnittliche Dolenabstand lag bei 120 m, schwankt aber erheblich zwischen 10 und 500 m. Diese Spreitung ist aber durch die Vielzahl an kleinen den Weg querenden Fließgewässern bedingt. Von diesen Dolen waren 23 sehr gut gepflegt und voll funktionstüchtig (92 %), nur in einem Fall war ein kleiner Mangel im Anschlussgraben an die Dole vorhanden. Eine Dole war allerdings komplett verstopft, was sich in stehendem Wasser im Graben äußerte. Die Wasserableitung war in 94 % als Spitzgraben ausgeformt, an zwei Messpunkten waren keinerlei Gräben vorhanden. 70 % des Grabens waren frei, 20 % wiesen Mängel vor allem in der Form von Verformungen und Ver-

drückungen auf, während in 10 % der Fälle der Graben komplett zu und funktionslos war. In diesen Bereichen stand ebenfalls gestautes Wasser in den Gräben. Auch die teilweise zu flache Ausformung des Grabens wurde als Mangel an diesem Weg mehrfach erfasst. Die erfassten  $E_{vd}$  Werte sind in Abbildung 181 dargestellt.

**Abbildung 181: Muchenländerweg**



**Abbildung 182: Muchenländerweg Wegebreite**

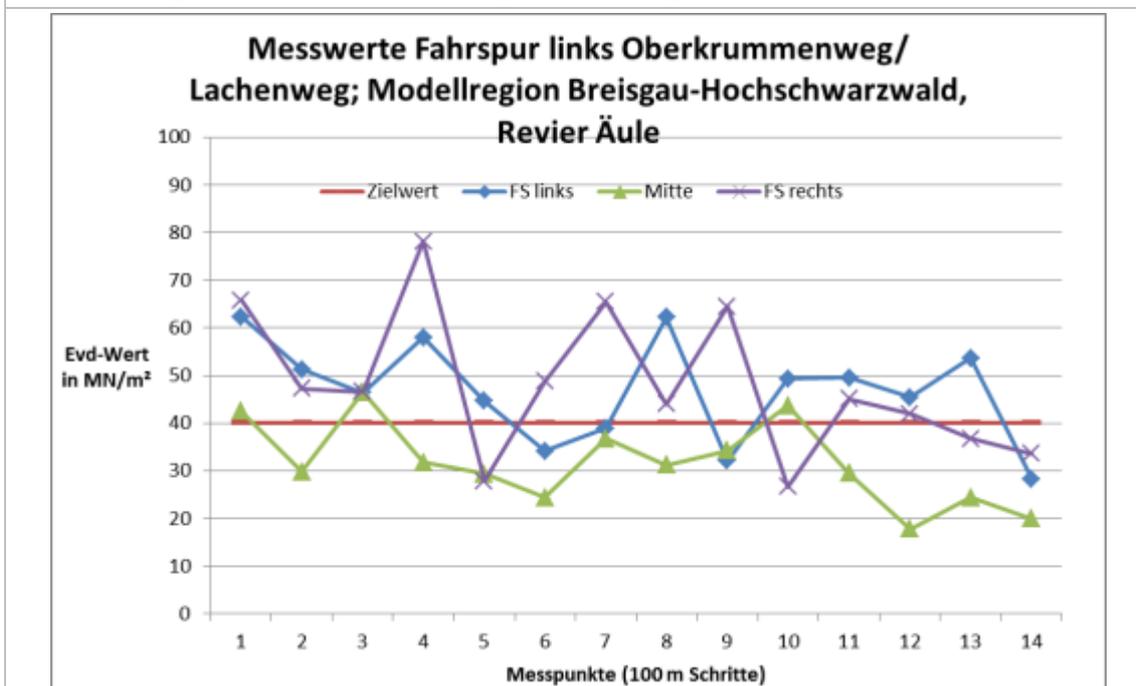


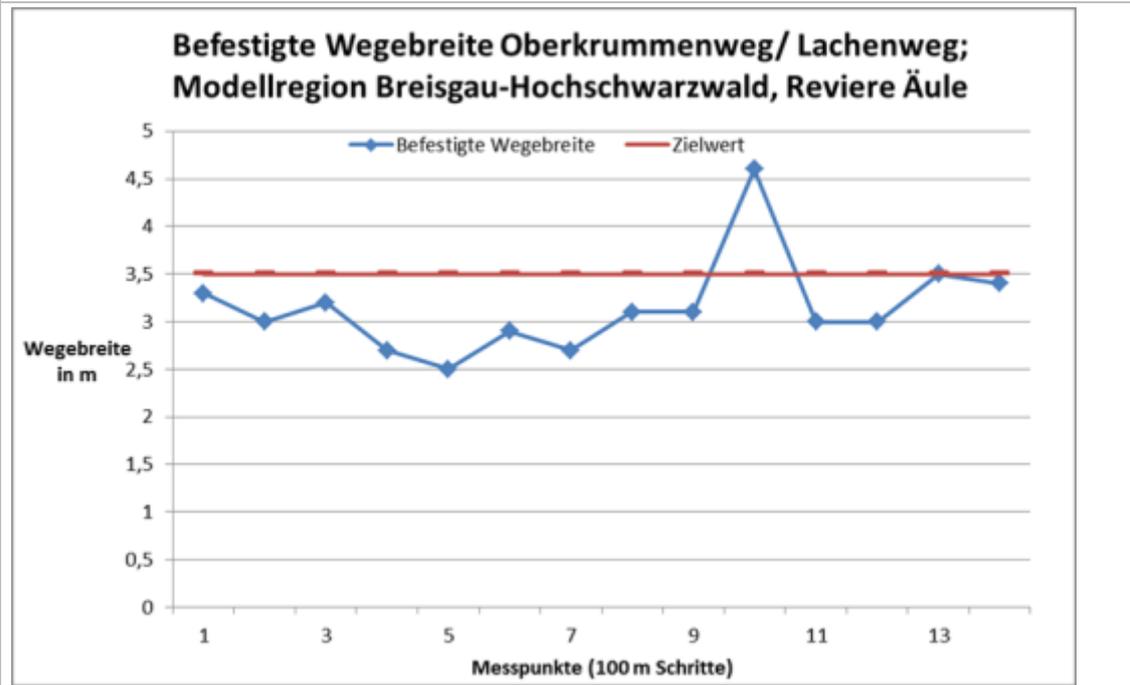
Die Wegebreite war auch bei diesem Weg etwas zu gering und schwankte zwischen 3,0 und 3,5 m. Die gemessenen  $E_{vd}$  Werte schwankten bei diesem Weg sehr stark. Vor allem die rechte Fahrspur hat doch sehr deutliche Schwachstellen. Der Weg stellt sich als heterogen dar.

### Oberkrummenweg/ Lachenweg

Der Oberkrummenweg und in seiner Fortsetzung der Lachenweg wurden am 16.04.2015 auf einer Strecke von 1,3 km untersucht. Die Messpunkte lagen in einem Abstand von 100 m. Die Temperatur lag morgens bei 10 °C außerdem war es bewölkt und windig. Niederschläge sind an diesem Tag in der Region nicht gefallen. Bei diesem Weg wurde ein durchschnittlicher  $E_{vd}$  Wert von 42,1 MN/m<sup>2</sup> gemessen, der kleinste erfasste Wert lag bei 17,8 MN/m<sup>2</sup>. In über 90 % der Fälle konnte kein übliches Querprofil zugeordnet werden, in einem Fall (7,1 %) wurde das Uhrglasprofil gewählt. Bei 93 % der Messpunkte wurde der Wegezustand als gut bewertet. Ein Wasserablauf in der Fahrspur mit den sich daraus ergebenden Konsequenzen in Bezug auf die Qualität des Weges, fand hier nicht statt. In 93 % der Fälle war das Lichtraumprofil frei und somit nicht beeinträchtigt. Die durchschnittliche Wegebreite lag bei 3,1 m, der Minimalwert lag bei 2,5 m. Innerhalb dieser beiden Wege lag kein Bauwerk. Die durchschnittliche Steigung lag bei 5,9 %, der Maximalwert bei 9 %. Die Querneigung lag links bei 8,4 % und rechts bei 7,6 %. Entlang der Messstrecke waren 8 Dolen verbaut, wovon 75 % als gemauerte Natursteindole ausgeführt waren, 25 % als Betonrohr. Alle Dolen waren frei und voll funktionstüchtig. Der durchschnittliche Dolenabstand lag bei 142 m, wobei der Abstand von 97 m bis hin zu 256 m stark schwankte. Die Abstände richteten sich dabei meist nach den Weg querenden kleinen Fließgewässern aus den steilen Hängen. Die Dolendurchmesser bzw. Maße schwanken erheblich und liegen im Schnitt bei 400 mm. Die Wasserableitung war in 79 % der erfassten Messpunkte als Spitzgraben ausgeführt, lediglich an drei Messpunkten (entspricht 21 %) war kein Graben angelegt. Die vorhandenen Gräben waren in der Mehrzahl frei und in gutem Zustand, an zwei Messpunkten war die Wasserableitung mit Mängeln behaftet. Die gemessenen  $E_{vd}$  Werte sind in Abbildung 183 dargestellt.

**Abbildung 183: Oberkrummenweg/ Lachenweg**



**Abbildung 184: Oberkrummenweg/ Lachenweg Wegebreite**

Die Wegebreite schwankte bei diesem Weg erheblich und lag in den meisten Fällen unter den geforderten 3,5 m (nach Richtlinie zur Walderschließung der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg von 1984). Die  $E_{vd}$  Werte schwankten erheblich und unterschritten oft den Zielwert von  $40 \text{ MN/m}^2$ .

#### 8.4.5 Fazit der Wegemessungen

Vier von 17 untersuchten Wegen in den Modellregionen zeigen in den untersuchten Abschnitten durchgehend die für Waldfahrwege geforderten  $E_{vd}$  Werte von  $40 \text{ MN/m}^2$  oder darüber. Diese Situation ist vor allem auf geologisch günstige Ausgangslagen zurückzuführen, so z.B. bei Wegen im Bereich der Modellregion Reutlingen mit weißem Jura als geologisches Ausgangsmaterial oder in der Region Breisgau-Hochschwarzwald mit kristallinen Grundgesteinen Gneis und Granit.

Bei der überwiegenden Zahl der untersuchten Fahrwege, das betrifft 13 von 17 Fahrwegen des Untersuchungskollektives, schwankt der  $E_{vd}$  Wert mit großer Spannweite um den Zielwert oder zeigt in Einzelfällen extreme Unterschreitungen des Zielwertes.

Die bei einzelnen Wegen erfasste maximale Steigung lag über den in der entsprechenden Richtlinie (Richtlinien zur Walderschließung 1984) geforderten Werten. Die Steigungen von teilweise 14 % sind als kritisch zu bewerten und verursachen entsprechend hohe Instandhaltungskosten.

Die Querneigung der Wege stellte bei den untersuchten Wegen in den Modellregionen kein Problem dar und entsprach im Wesentlichen den Standards. Damit ist die dem Querprofil zugeordnete Aufgabe, nämlich das Wasser auf dem kürzesten Weg in die Seitengräben abzuleiten, erfüllt. Weiterhin wird durch die Ausformung des Querprofils die Sicherheit des Verkehrs gewährleistet. Die Vorteile einer beidseitigen Querneigung liegen dabei auf der Hand: erhöhte Fahrsicherheit insbesondere für LKW, sichere Überfahrten bei Glätte, günstige Lastverteilung

am Hang, eine Sammlung des Oberflächenwassers nur von einer Fahrbahnhälfte sowie die technisch einwandfreie maschinelle Instandhaltung.

Die vor Ort vorhandenen Wasserleitungen in Form von Gräben und Dolen sind in ihrem Ausbaustandard und Zustand sehr unterschiedlich. Vor allem die oftmals vorhandenen Dolenabstände sind häufig als zu groß zu bewerten. Die Gräben sind sehr oft in einem guten Pflegezustand, weisen jedoch teilweise Mängel auf, sowohl was die Grabentiefe, als auch die Durchgängigkeit des Grabens angeht.

## 8.5 Modul 3: Restriktionen beim Waldwegebau

Bearbeiter: Jörg Weißhaar, Dr. Frank Brodbeck, Dr. Udo Hans Sauter  
FVA Baden-Württemberg, Abt. Waldnutzung

Beim Bau von Waldwegen gilt es eine Vielzahl von Restriktionen zu beachten. Relevant sein können hier folgende rechtlichen Grundlagen: Landeswaldgesetz, Bundesnaturschutzgesetz, Bodenschutzgesetz, Wassergesetz und das Baugesetzbuch. Weiterhin spielen Zertifizierungsorganisationen (FSC, PEFC) und deren Standards eine Rolle. Außerdem können Regelungen zu Recyclingmaterial, Fragen zur Raumordnung, Denkmalschutz oder Belange des Tourismus eine Rolle spielen.

### 8.5.1 Bundesnaturschutzgesetz und Natura 2000

Eingriffe in den Boden und den Wasserhaushalt – und damit auch der Wegebau – stehen stets im Verdacht, erhebliche Beeinträchtigungen auszulösen. Ist bei einem Wegebauprojekt ein Natura 2000-Gebiet betroffen, ist durch den Vorhabensträger im Einzelfall zu prüfen, ob das Projekt die Schutzgüter im Natura 2000-Gebiet beeinträchtigen könnte (Prüfpflicht). Dies gilt auch bei Wegebauplanungen außerhalb von Natura 2000-Gebieten, die in das Gebiet hineinwirken z. B. durch eine abgeschnittene Wasserführung. Rechtliche Grundlagen sind die § 33 und § 34 des Bundesnaturschutzgesetzes, die Art. 6 Abs. 3 der FFH Richtlinie umsetzen. Zunächst erfolgt eine formlose **Vorprüfung** des Einzelfalles. Kommt diese zu dem Ergebnis, dass Beeinträchtigungen von z. B. FFH-Artvorkommen oder FFH-Lebensraumtypen nicht auszuschließen sind, ist die deutlich aufwändigere **Umweltverträglichkeitsprüfung** erforderlich. In beiden Fällen ist die untere Naturschutzbehörde mit einzubeziehen.

Die Prüfung kann mit einer Freigabe des Projektes abschließen, es kann aber auch sein, dass das Projekt angepasst werden muss (z. B. geänderte Trassenführung), nur mit Ausgleichsmaßnahmen („Kohärenzmaßnahmen“) oder gar nicht zulässig ist.

Rund 20 % des Waldes in Baden-Württemberg liegen in Natura 2000 Gebieten (FFH- und Vogelschutzgebiete), somit wird deutlich, welche Bedeutung diesen Regelungen in Bezug auf den Wegebau zukommt.

#### Abbildung 185: § 33 BNatschG

##### § 33 Allgemeine Schutzvorschriften

(1) Alle Veränderungen und Störungen, die zu einer erheblichen Beeinträchtigung eines Natura 2000-Gebiets in seinen für die Erhaltungsziele oder den Schutzzweck maßgeblichen Bestandteilen führen können, sind unzulässig. Die für Naturschutz und Landschaftspflege zuständige Behörde kann unter den Voraussetzungen des § 34 Absatz 3 bis 5 Ausnahmen von dem Verbot des Satzes 1 sowie von Verboten im Sinne des § 32 Absatz 3 zulassen.

(2) Bei einem Gebiet im Sinne des Artikels 5 Absatz 1 der Richtlinie 92/43/EWG gilt während der Konzertierungsphase bis zur Beschlussfassung des Rates Absatz 1 Satz 1 im Hinblick auf die in ihm vorkommenden prioritären natürlichen Lebensraumtypen und prioritären Arten entsprechend. Die §§ 34 und 36 finden keine Anwendung.

Quelle: BNatschG

Danach sind Projekte vor ihrer Zulassung bzw. Durchführung auf ihre Verträglichkeit in Bezug auf die im Managementplan (MaP) formulierten Erhaltungs- und Entwicklungsziele des Natura-2000 Gebietes hin zu überprüfen. Hierbei muss eine Erheblichkeitsabschätzung in Bezug auf die Erhaltungsziele des betreffenden FFH-Gebietes stattfinden. Wird dabei eine erhebliche Beeinträchtigung festgestellt, ist der Eingriff unzulässig. Weiterhin beachtet werden muss, dass im FFH-Gebiet nur an den geologischen Standort angepasstes Material mit gleichem pH-Wert wie es an Ort und Stelle vorkommt, verbaut werden darf. Auch hier kommt die Praxis des Wegebauens an Grenzen.

### **8.5.2 Zertifizierungsstandards als Restriktion**

Der gesamte Staatswald in Baden-Württemberg ist seit dem 24.03.2000 nach den Standards von PEFC Deutschland e.V. und seit dem 16. Mai 2014 nach dem deutschen FSC-Standard zertifiziert. Im aktuellen Standard (Fassung V2.3 vom 01.07.2012) sind die Aussagen zum Wegebau im Prinzip Nr. 6 „Auswirkungen auf die Umwelt“ ab Nummer 6.5.1 erfasst.

#### **FSC Standard (6.5.3):**

Der Wegeneubau wird minimiert. Sofern ein leistungsfähigeres Erschließungssystem erforderlich ist, wird dem Wegeausbau der Vorzug gegenüber einem Wegeneubau gegeben.

Laut diesem Standard ist das Erschließungssystem unter Berücksichtigung der örtlichen Verhältnisse geländeangepasst so anzulegen, dass möglichst wenig Waldboden befahren wird. Weiterhin sollen der Wegebau und die Instandhaltung sich an den anerkannten Grundsätzen einer umweltverträglichen Walderschließung orientieren. Außerdem soll der Wegeneubau insgesamt minimiert werden. Im Falle, dass ein leistungsfähigeres Erschließungssystem erforderlich ist, ist der Wegeausbau gegenüber dem Wegeneubau vorzuziehen. Ortsnah gewonnenes Baumaterial für die Wegebefestigung ist zu bevorzugen. Quellgebiete bzw. Feuchtbiotope oder ähnliche Standorte sollen gemieden werden.

#### **PEFC Standard (3.5):**

Eine bedarfsgerechte Erschließung des Waldes ist erforderlich. Dabei wird besondere Rücksicht auf Belange der Umwelt genommen. Insbesondere werden schutzwürdige Biotope geschont. Bodenversiegelung mit Beton- und Schwarzdecken wird nur aus zwingenden Gründen vorgenommen.

(a) Ein Wald ist bedarfsgerecht erschlossen, wenn alle Bestände, deren Nutzung unter Würdigung wirtschaftlicher, ökologischer und sozialer Aspekte sinnvoll ist, mit den nach dem jeweiligen Stand der Bringungstechnik gängigen und örtlich verfügbaren Methoden durch die Holzbringung erreicht werden. In nicht oder nur extensiv genutzten Wäldern ist ein Grunderschließungsnetz erforderlich, das eine ausreichende Zugänglichkeit zum Katastrophenschutz und in Notfällen ermöglicht.

Auf die Neuanlage von Entwässerungseinrichtungen wird verzichtet.

- (a) Wegegräben sind keine Entwässerungseinrichtungen im Sinne dieser Regelung.
- (b) Bestehende Einrichtungen dürfen gepflegt werden. Für den Schutz wertvoller Moor- und Nassstandorte wird besonders Sorge getragen.
- (c) Die Anlage von Entwässerungseinrichtungen in Sonderfällen, wie Renaturierung ehemaliger Abbauflächen, ist zulässig.

Im Sinne einer zweckorientierten Wasserableitung bedeutet der PEFC Standard hier also keine Restriktion, da Wegegräben eben nicht als Entwässerungseinrichtung (im Sinne einer standörtlichen Veränderung) gelten.

### **8.5.3 Wassergesetz Baden-Württemberg**

Im Wassergesetz Baden-Württemberg sind Regelungen in Bezug auf den forstlichen Wegebau nicht explizit aufgeführt, trotzdem kann eine Anzahl von Paragraphen zum Tragen kommen, wenn es um den forstlichen Wegebau geht. Vor allem beim Neubau von Waldwegen bei dem in die Erdoberfläche eingegriffen wird sind Einflüsse z.B. auf die Wasserqualität denkbar.

#### §12

*(5) Bei der Planung und Ausführung von Baumaßnahmen und anderen Veränderungen der Erdoberfläche sind die Belange der Grundwasserneubildung, der Gewässerökologie und des Hochwasserschutzes zu berücksichtigen.*

Da der Bau eines Waldweges unmittelbar mit der Veränderung der Erdoberfläche in Verbindung steht, sind also in Gewässernähe die oben aufgeführten Belange zu beachten. Vor allem die Belange der Grundwasserneubildung spielen eine erhebliche Rolle, allein in Baden-Württemberg befinden sich derzeit 2.350 rechtskräftig festgesetzte Wasserschutzgebiete mit einer Gesamtfläche von 9.400 km<sup>2</sup>, davon viele im Wald.

#### § 28

*(1) Die Errichtung und der Betrieb von Bauten oder sonstigen Anlagen in, an, über und unter oberirdischen Gewässern und deren wesentliche Änderung, soweit diese nicht der Gewässerunterhaltung dienen, bedürfen der wasserrechtlichen Erlaubnis oder Bewilligung, wenn dadurch der Wasserabfluss, die Unterhaltung des Gewässers oder die ökologischen Funktionen des Gewässers beeinträchtigt oder die Schifffahrt oder die Fischerei gefährdet oder behindert werden können.*

Die Paragraphen 28 und 78 des Wassergesetzes Baden-Württemberg kommen nur zum Tragen, wenn entsprechend Baumaßnahmen wie z.B. Brücken oder große Durchlässe zur Überwindung von Oberflächengewässern nötig sind.

#### §78

*(1) Wer Bauten oder sonstige Anlagen errichtet, die nach dem Wasserhaushaltsgesetz oder diesem Gesetz einer Zulassung bedürfen, hat den ordnungsgemäßen Betrieb der Baustelle und die ordnungsgemäße Ausführung der Bauten und Anlagen sicherzustellen. Die Bauüberwachung kann auf Anordnung der Wasserbehörde durch anerkannte Sachverständige oder durch anerkannte sachverständige Stellen erfolgen. Diese haben die Wasserbehörden über Vorgänge zu unterrichten, die ein Eingreifen der Wasserbehörden erfordern können, und die Ergebnisse der Überwachung mitzuteilen. Der Vorhabenträger hat den Beginn der Ausführung und die Fertigstellung der Anlage der Wasserbehörde mitzuteilen.*

### **8.5.4 Denkmalschutzgesetz Baden-Württemberg**

In Bezug auf das Denkmalschutzgesetz ist der Einzelfall immer genau zu prüfen. So sind denkmalgeschützte Bereiche an oder im Verlauf von Waldwegen durchaus möglich, z.B. in Form von historisch bedeutsamen Stützmauern oder Brückenbauwerken. Bei Kenntnis solcher Bau-

werke oder Strukturen ist auf jeden Fall die Denkmalschutzbehörde in die Planungen miteinzubeziehen.

#### § 6 Erhaltungspflicht

*Eigentümer und Besitzer von Kulturdenkmalen haben diese im Rahmen des Zumutbaren zu erhalten und pfleglich zu behandeln. Das Land trägt hierzu durch Zuschüsse nach Maßgabe der zur Verfügung stehenden Haushaltsmittel bei.*

Seit Juni 2014 werden Informationen zu archäologischen Boden- und Kulturdenkmälern (z. B. Grabhügel, ehemalige Befestigungsanlagen wie Wälle und Gräben, ehemalige Köhlerplätze oder Glashütten) im Wald in die Waldfunktionenkartierung integriert.

#### **8.5.5 Waldwegebau in Natur- und Landschaftsschutzgebieten**

Entscheidend für die Bewertung, ob in diesen Waldgebieten Wege gebaut werden bzw. im unbedingt nötigen Umfang ausgebaut werden dürfen, sind die Schutzgebietsverordnungen, welche häufig Straßen- oder Wegebau verbieten. Hierbei ist jeder Einzelfall genau zu prüfen. Eine notwendige Befreiung oder Ausnahme von den Regelungen der Schutzgebietsverordnung muss entsprechend bei der Naturschutzbehörde beantragt werden. Die Zuständigkeiten liegen dabei im Falle der Naturschutzgebiete bei der höheren Naturschutzbehörde, bei Landschaftsschutzgebieten ist die am Landratsamt ansässige untere Naturschutzbehörde zuständig.

#### **8.5.6 Waldwegebau in Biotopen oder beim Vorkommen geschützter Arten**

Grundsätzlich soll beim Bau von Waldwegen eine Zerstörung oder erhebliche Beeinträchtigung von Biotopen oder wertvollen Landschaftsbestandteilen unterbleiben. Lässt sich dies nur mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand bewerkstelligen, kann bei Waldbiotopen die untere Forstbehörde, in allen anderen Fällen die untere Naturschutzbehörde, eine Ausnahme zulassen. So kann die untere Forstbehörde nach § 30 a LWaldG („Biotopschutzwald“) Ausnahmen vom Verbot des Wegebbaus im Waldbiotop zulassen, wenn überwiegende Gründe des Gemeinwohls diese erfordern, keine erhebliche oder nachhaltige Beeinträchtigung von Biotopschutzwald und der Lebensstätten gefährdeter Tier- und Pflanzenarten zu erwarten sind oder durch Ausgleichsmaßnahmen in angemessener Zeit ein gleichartiger Biotopschutzwald geschaffen wird.

### 8.5.7 Restriktionen nach dem Bodenschutzgesetz

Das Bundes-Bodenschutzgesetz beinhaltet eine Vielzahl von Regelungen die beim Wegebau zur Anwendung kommen könnten.

#### § 4, 6 und 7 des Bundes-Bodenschutzgesetzes

##### § 4 Pflichten zur Gefahrenabwehr

*(1) Jeder, der auf den Boden einwirkt, hat sich so zu verhalten, dass schädliche Bodenveränderungen nicht hervorgerufen werden.*

*(2) Der Grundstückseigentümer und der Inhaber der tatsächlichen Gewalt über ein Grundstück sind verpflichtet, Maßnahmen zur Abwehr der von ihrem Grundstück drohenden schädlichen Bodenveränderungen zu ergreifen.*

*(3) Der Verursacher einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast sowie dessen Gesamtrechtsnachfolger, der Grundstückseigentümer und der Inhaber der tatsächlichen Gewalt über ein Grundstück sind verpflichtet, den Boden und Altlasten sowie durch schädliche Bodenveränderungen oder Altlasten verursachte Verunreinigungen von Gewässern so zu sanieren, dass dauerhaft keine Gefahren, erheblichen Nachteile oder erheblichen Belästigungen für den Einzelnen oder die Allgemeinheit entstehen. Hierzu kommen bei Belastungen durch Schadstoffe neben Dekontaminations- auch Sicherungsmaßnahmen in Betracht, die eine Ausbreitung der Schadstoffe langfristig verhindern. Soweit dies nicht möglich oder unzumutbar ist, sind sonstige Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen durchzuführen. Zur Sanierung ist auch verpflichtet, wer aus handelsrechtlichem oder gesellschaftsrechtlichem Rechtsgrund für eine juristische Person einzustehen hat, der ein Grundstück, das mit einer schädlichen Bodenveränderung oder einer Altlast belastet ist, gehört, und wer das Eigentum an einem solchen Grundstück aufgibt.*

##### § 6 Auf- und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden

*Die Bundesregierung wird ermächtigt, nach Anhörung der beteiligten Kreise (§ 20) durch Rechtsverordnung mit Zustimmung des Bundesrates zur Erfüllung der sich aus diesem Gesetz ergebenden Anforderungen an das Auf- und Einbringen von Materialien hinsichtlich der Schadstoffgehalte und sonstiger Eigenschaften, insbesondere*

- 1. Verbote oder Beschränkungen nach Maßgabe von Merkmalen wie Art und Beschaffenheit der Materialien und des Bodens, Aufbringungsort und -zeit und natürliche Standortverhältnisse sowie*
- 2. Untersuchungen der Materialien oder des Bodens, Maßnahmen zur Vorbehandlung dieser Materialien oder geeignete andere Maßnahmen zu bestimmen.*

##### § 7 Vorsorgepflicht

*Der Grundstückseigentümer, der Inhaber der tatsächlichen Gewalt über ein Grundstück und derjenige, der Verrichtungen auf einem Grundstück durchführt oder durchführen lässt, die zu Veränderungen der Bodenbeschaffenheit führen können, sind verpflichtet, Vorsorge gegen das Entstehen schädlicher Bodenveränderungen zu treffen, die durch ihre Nutzung auf dem Grundstück oder in dessen Einwirkungsbereich hervorgerufen werden können. Vorsorgemaßnahmen sind geboten, wenn wegen der räumlichen, langfristigen oder komplexen Auswirkungen einer Nutzung auf die Bodenfunktionen die Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung besteht. Zur Erfüllung der Vorsorgepflicht sind Bodeneinwirkungen zu vermeiden oder zu vermindern, soweit dies auch im Hinblick auf den Zweck der Nutzung des Grundstücks verhältnismäßig ist.*

*Anordnungen zur Vorsorge gegen schädliche Bodenveränderungen dürfen nur getroffen werden, soweit Anforderungen in einer Rechtsverordnung nach § 8 Abs. 2 festgelegt sind. Die Erfüllung der Vorsorgepflicht bei der landwirtschaftlichen Bodennutzung richtet sich nach § 17 Abs. 1 und 2, für die forstwirtschaftliche Bodennutzung richtet sie sich nach dem Zweiten Kapitel des Bundeswaldgesetzes und den Forst- und Waldgesetzen der Länder. Die Vorsorge für das Grundwasser richtet sich nach wasserrechtlichen Vorschriften. Bei bestehenden Bodenbelastungen bestimmen sich die zu erfüllenden Pflichten nach § 4.*

Insgesamt lässt sich sagen, dass die Regelungen zum Schutz des Bodens eher von allgemeiner Art sind. Dabei sind vor allem schädliche Bodenveränderungen zu vermeiden, welche durch Baumaßnahmen entstehen können. Diese Art von Bodenschutz dürfte vor allem beim Wege-neubau eine Rolle spielen. Aber auch bei der Ertüchtigung vorhandener Wege wird der Bodenschutz mit hineinspielen, so z.B. bei der Herstellung der nach Richtlinie geforderten Wegebreite, welche mit Veränderungen des Bodens einhergeht.

#### **8.5.8 Restriktionen in Bezug auf die Verwendung von Recyclingmaterial**

Beim Einsatz von Recyclingmaterial gelten besondere Regeln. So darf der Einsatz dieses Materials zu keinen erheblichen Freisetzungen von Schadstoffen führen. Maßgeblich für den Einsatz solcher Baustoffe sind in Baden-Württemberg das Schreiben „*Vorläufige Hinweise zum Einsatz von Baustoffrecyclingmaterial*“ von 2004 des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (Vorschrift galt nur bis zum 31.12.2006), sowie die Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums für die Verwendung von als Abfall eingestuftem Bodenmaterial vom 14.3.2007.

## 8.6 Modul 4: Modellierung von Rohholzflüssen

Bearbeiter: PD Dr. Thomas Smaltschinski, Prof. Dr. Dirk Jaeger, Martin Opferkuch

Professur für Forstliche Verfahrenstechnik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Bei der Modellierung des Rohholzflusses wird die Belastung der Wege durch LKW beim Abtransport von Holz aus dem Wald durch eine Simulation berechnet. Dabei bilden die Holzpolter an den Abfuhrwegen die Startpunkte für den Abtransport bis zum öffentlichen Straßennetz. Das Volumen der Holzpolter wird durch die Fläche der Bestände und den geplanten Nutzungssatz ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ) der Forsteinrichtung bestimmt.

Zur Berechnung einer derartigen Simulation sind die Planungsdaten der Forsteinrichtung, die Geodaten der Bestände und das Wegenetz notwendig. Für die Entwicklung der Methode standen der Professur für Forstliche Verfahrenstechnik diese Daten aus dem Forstgebiet Waldkirch zur Verfügung. Für dieses Beispielsgebiet werden das Vorgehen zum Aufbau eines routingfähigen Netzwerkes und die Ableitung der Startpunkte aus den Geodaten der Bestandesflächen mit den geplanten Nutzungen entwickelt.

Das beschriebene Vorgehen ist als Grundlage zu verstehen, wie die Wegebelastung durch den Holztransport berechnet werden kann. Dabei besteht für weitere logistische Anwendungen die Notwendigkeit, Waldwege (NavLog) und öffentliches Straßennetz zu einem routingfähigen Ganzen zu kombinieren.

Bei Vorliegen der notwendigen Daten in digitaler Form stellt die Holzflussmodellierung ein wichtiges Werkzeug für die Planung der Wegeinstandhaltung dar. Wünschenswert ist dafür auch ein digitales Geländemodell (Höhenmodell), um in bergigem Gelände Neigungsprofile und Wasserabflussmengen berechnen zu können.

Leider war es nicht möglich, diese Methode an den in Kapitel 8.3 beschriebenen Modellregionen durchzuführen, da sich aus dem Informationssystem FOKUS nur analoge Daten extrahieren lassen.

Die Auswirkungen von Holztransporten auf Waldwege können proportional zu der abgefahrenen Holzmenge respektive den Lastüberfahrten gesehen werden. Für eine realitätsnahe Betrachtung wird in einem Waldgebiet die geplante Einschlagsmenge über Waldwege bis zu einem Anschlusspunkt an das öffentliche Straßennetz transportiert. Für die Untersuchung konnte die Professur für Forstliche Verfahrenstechnik den NavLog<sup>315</sup> Datensatz mit einem klassifizierten Waldwegenetz verwenden. Dieser ermöglicht die Navigation im Wald, wenn die Waldwegegeometrien mit den Geometrien des öffentlichen Straßennetzes verbunden werden. An dieser Stelle sei Frau Prof. Seeling und Herrn Hauck vom KWF für die großzügige und unbürokratische Bereitstellung der NavLog Daten gedankt.

Im Folgenden wird das Vorgehen der Anbindung von NavLog-Wege-Geometrien an die Geometrien des öffentlichen Straßennetzes dargestellt, um aus der Kombination beider Datensätze ein routingfähiges Netzwerk zu konstruieren. Danach wird an einem Beispiel gezeigt, wie die Nutzungsplanung der Forsteinrichtung in Holzmenge überführt wird und wie aus dem berechneten Abtransport die Wegebelastung beim Holztransport zu kalkulieren ist.

Aus dem Rohholzabfluss können Wege-Magistralen abgeleitet werden. Dies sind die Wegeabschnitte des forstlichen Wegenetzes, über die das Gros des Rohholzes abtransportiert wird. Bei

---

<sup>315</sup> NavLog (2015)

Auflasterhöhung verringert sich die Anzahl die Last- und Leerfahrten. Gleichzeitig ist die Belastung durch das höhere Gewicht der beladenen Fahrzeuge größer und die Tragschicht der Magistralen ist entsprechend der erwarteten Belastung vorrangig zu verstärken, während eine Vergrößerung der Tragschichtdimensionierung der anderen Wege weniger dringlich ist. Die Simulation der zu erwartenden Last- und Leerfahrten bei verschiedenen zulässigen Gesamtgewichten ergibt die Länge der Magistralen, die wiederum Eingangsgrößen zur Berechnung der Achslastübergänge darstellen. Aus den Achslastübergängen werden die Aufdimensionierung der Wege und die zu erwartenden Kosten hergeleitet.

### 8.6.1 Untersuchungsgebiet

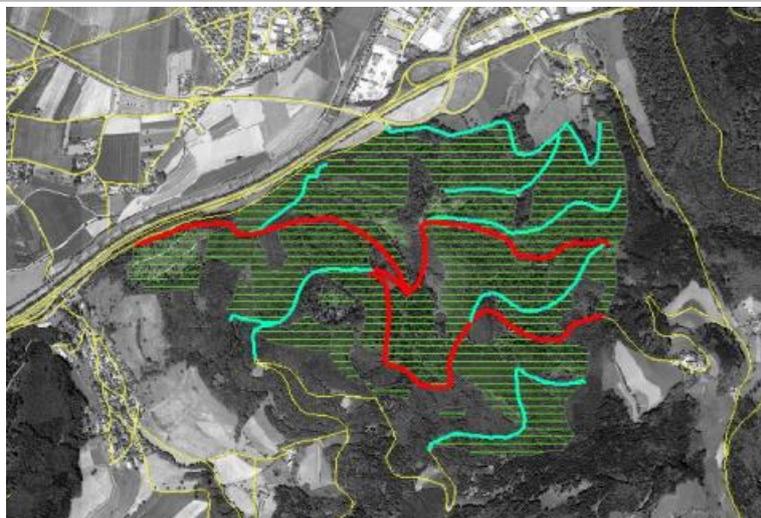
Als Untersuchungsgebiet wurde ein Distrikt des Forstbezirkes Waldkirch ausgewählt, für den die notwendige Datengrundlage vorhanden war. Diese bestand aus:

- Waldgrundkarte (Geodatenatz Polygon): Waldeinteilung mit Bestandesidentifikationen
- Nutzungsmengen (Tabelle): abgeleitet aus den Forsteinrichtungs-Daten (FE) und der Betriebsinventur Ba-Wü (m<sup>3</sup>/ha im Jahrzehnt)
- Waldwege (NavLog Geodatenatz Polyline): Waldwege nach GeoDat-Standard
- Öffentliches Straßennetz (Geodatenatz Polyline): navigationsfähiges Straßennetz mit Durchfahrtsrichtungen
- Luftbilder des Gebietes (Orthophotos)

Ein präzises digitales Geländemodell im Rasterformat (Höhenmodell) lag bedauerlicherweise nicht vor.

Das Untersuchungsgebiet Abbildung 186 liegt im Südwesten von Waldkirch in der Vorbergzone mit Anschluss zur montanen Zone (Kandel) mit einer Fläche von 107 ha.

**Abbildung 186: Untersuchungsgebiet. Wald (grün schraffiert), Waldwege (NavLog Kl. 2 Rot, Kl. 3 Türkis) öffentliches Straßennetz (Gelb)**



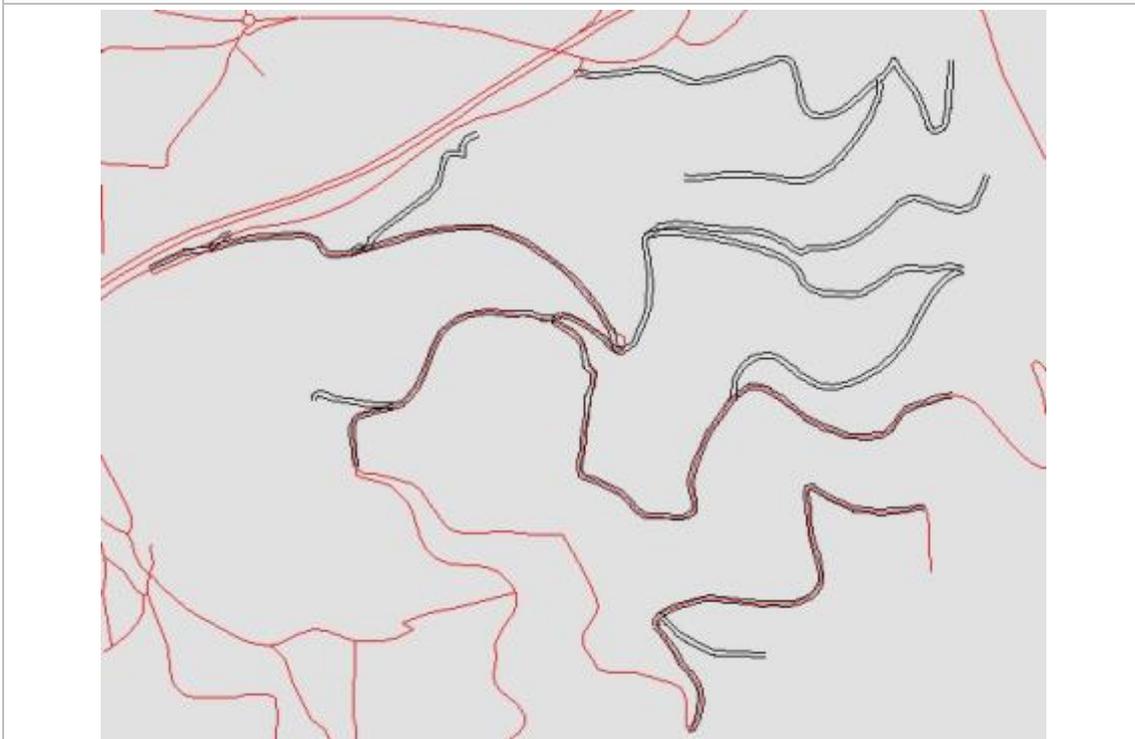
Quelle: Smaltschinski (2015)

Der geologische Untergrund ist Gneis, das Gelände ist mittel bis stark geneigt und die Wege haben unabhängig von ihrem Ausbauzustand aufgrund des Ausgangssubstrats eine hohe natürliche Tragfähigkeit. Der untersuchte Distrikt ist eingebettet in Wald anderer Eigentumsarten. Die Bestände setzen sich aus Fichte, Tanne und Buche zusammen. Die Bonität ( $dGz_{100}$ ) liegt zwischen 11 und 14  $m^3$ . Im Einrichtungszeitraum ist ein Nutzungsvolumen von 14.200  $m^3$  vorgesehen, was einem durchschnittlichen Nutzungssatz von 13  $m^3/ha/a$  entspricht. Unter Verwendung des GeoDat-Standards waren Waldwege der Klasse 2 mit 3.950 m und Waldwege der Klasse 3 mit 5.600 m vertreten. Dies ergibt eine Wegedichte von rund 33 m/ha (Klasse 2) und 52 m/ha (Klasse 3).

### 8.6.2 Verbindung NavLog mit öffentlichem Straßennetz

Für die Methodenentwicklung wurde nur der Teil des öffentlichen Straßennetzes verwendet, der in der Umgebung des Waldgebietes lag. Zum Routen muss das Straßen- und Wegenetz aus NavLog in einen gerichteten Graphen überführt werden, der eine eindeutige Kanten-Knoten-Topologie besitzt. Dabei müssen Wege (NavLog) und öffentliche Straßen, die sich kreuzen, an dieser Stelle geteilt und mit einem Knoten versehen werden. Die NavLog- und die Straßendaten sind in Abbildung 187 zusammengestellt (NavLog-Wege in Doppelstreifen, Straßen in Rot).

**Abbildung 187: NavLog-Wege (Doppellinie) und öffentl. Straßennetz (Rot)**



Quelle: Smaltschinski (2015)

Teilweise sind im Datensatz des öffentlichen Straßennetzes Waldwege enthalten, teils nicht. Die Anschlusspunkte des NavLog-Datensatzes zum Datensatz des öffentlichen Straßennetzes liegen im nördlichen Teil und an den Grenzen des Untersuchungsgebietes.

Als erstes wurden die Waldwege an das öffentliche Straßennetz über eine Schnappfunktion des GIS angeglichen. Dabei war nicht immer eindeutig zu entscheiden, welcher Datensatz „richtig“ war (Abbildung 188). Bezüglich der Waldwege wurden die Geometrien der NavLog

Wege statt der Daten des öffentlichen Straßennetzes verwendet und die Waldwege des öffentlichen Straßennetzes im Untersuchungsgebiet eliminiert.

Teilweise wurden die NavLog-Wege einzeln und direkt editiert, um insbesondere einen nahtlosen Schluss zu dem öffentlichen Straßennetz zu gewinnen.

Nach diesen Vorarbeiten wurden beide Datensätze in einen einzigen Geodatenatz in ein sogenanntes Coverage (ArcGis spezifischer Geodatenatz) umgewandelt. Beim Erstellen eines Coverage werden automatisch alle Schnittpunkte innerhalb und nach Vereinigung zwischen beiden Datensätzen berechnet.

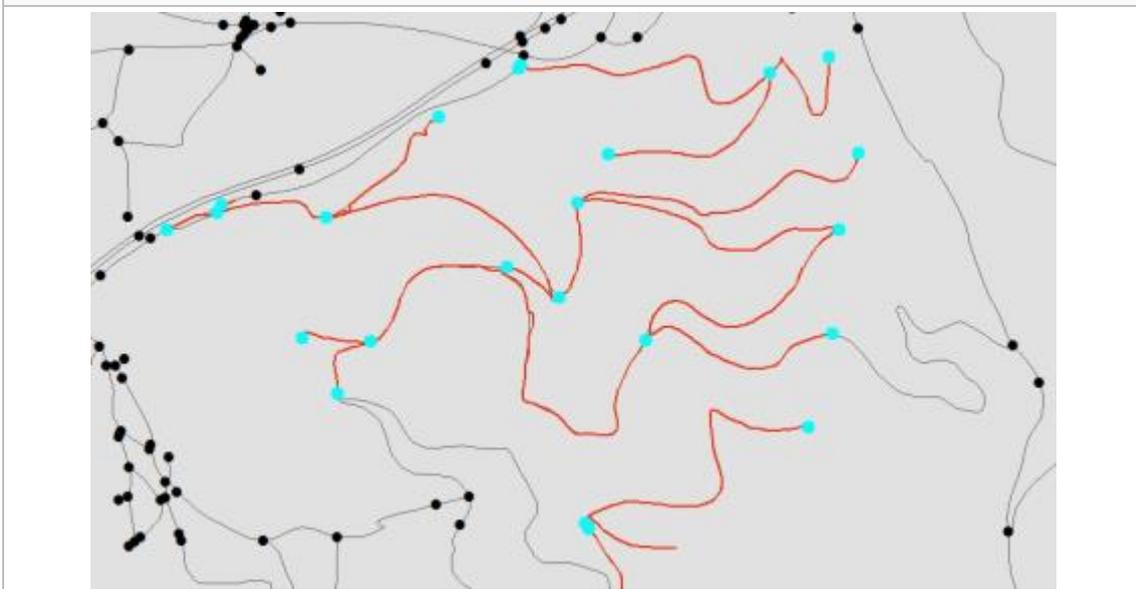
**Abbildung 188: Differenzen NavLog (Doppellinie) und Waldwege des öffentlichen Straßennetzes**



Quelle: Smaltschinski (2015)

Von diesen Schnittpunkten wurden die ausgewählt, die einen Schnittpunkt mit den NavLog-Geometrien hatten (Abbildung 189).

**Abbildung 189: Schnittpunkte NavLog-Daten und öffentliches Straßennetz (Türkis)**

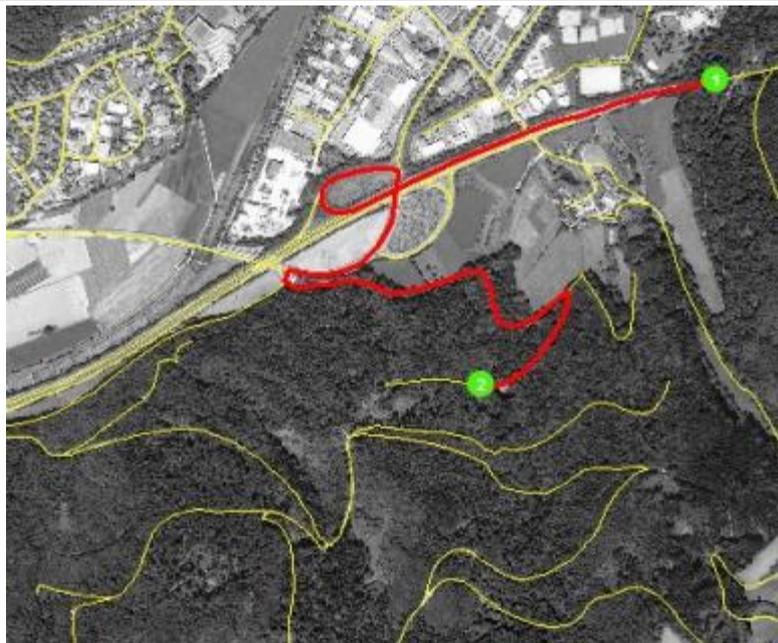


Quelle: Smaltschinski (2015)

In Abbildung 189 sind das öffentliche Straßennetz (schwarz) und die NavLog-Daten (rot) dargestellt. Die Schnittpunkte sind als schwarze Punkte und die über den NavLog-Datensatz ausgewählten Punkte in Türkis hervorgehoben. Nur an den ausgewählten Punkten wurden die ursprünglichen Datensätze (Polyline) explizit zerschnitten. Auf diese Weise konnte eine Kanten-Knoten-Topologie zwischen NavLog und öffentlichem Straßennetz hergestellt werden. Mit beiden Datensätzen wurde danach ein Netzwerk von ArcGis gebildet, welches routingfähig ist (Abbildung 190).

In Abbildung 190 ist dargestellt, wie ein LKW aus dem Schwarzwald kommend (Punkt 1) in das Untersuchungsgebiet zu Punkt 2 fährt. Damit waren die Voraussetzungen geschaffen, um die Belastung der Waldwege durch Holzabtransport zu berechnen.

**Abbildung 190: Routing von Punkt 1 und 2 auf dem erstellten Netzwerk**

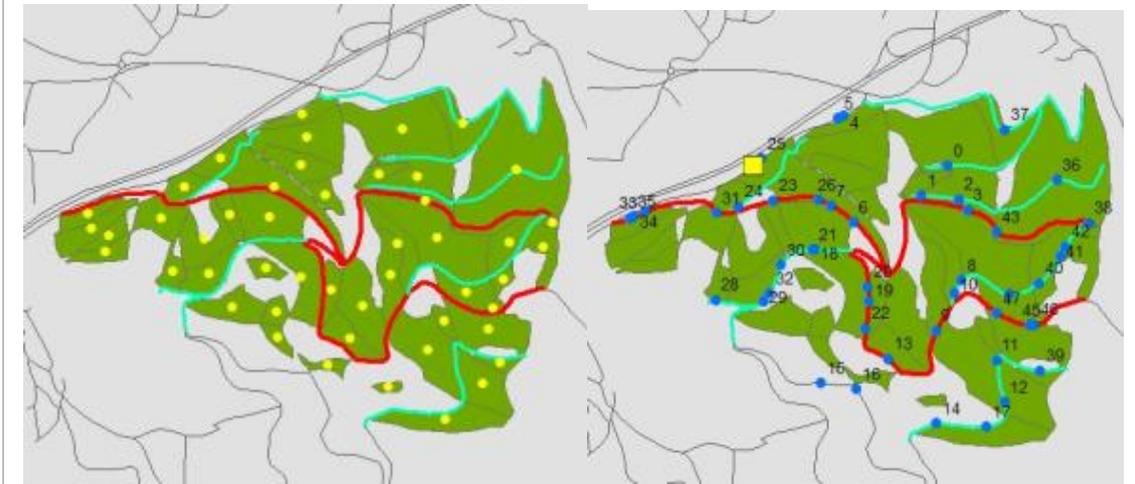


Quelle: Smaltschinski (2015)

### 8.6.3 Belastung der Waldwege durch Holztransport

Für die einzelnen Waldflächen wurden zunächst die Zentroide berechnet, die den Schwerpunkten der Polygone entsprechen (Abbildung 191 links).

**Abbildung 191: Zentroide der Bestände (links, gelb) und Holzpolter (rechts, blau)**



Quelle: Smaltschinski (2015)

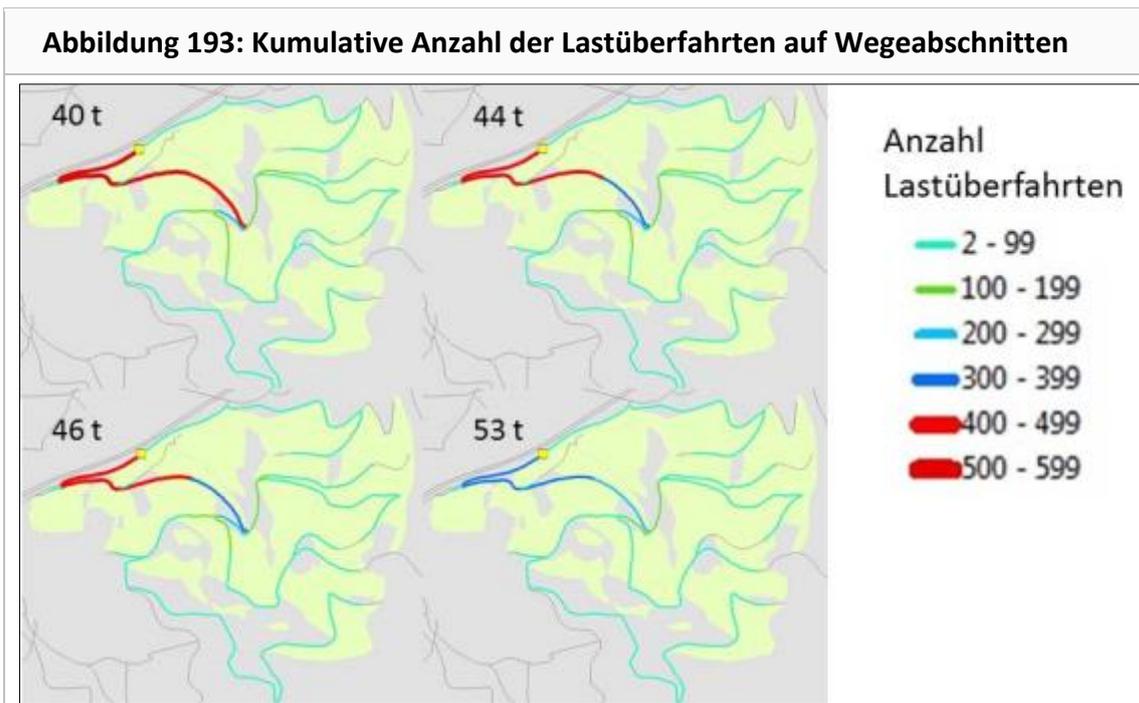
Diese Zentroide wurden dann an die nächste Wegegeometrie verschoben als Repräsentanten für Holzpolter (ein Polter je Bestand Abbildung 191 rechts). Diese Holzpolter sind die Startpunkte für das Routing zu einem Ziel. Der Zielpunkt ist in Abbildung 191 (rechts nordwestlich neben Bestand 25) als gelbes Quadrat markiert. Dieser Punkt wurde gewählt, weil er etwa gleichweit von den beiden Auffahrten zur Umgehungsstraße von Waldkirch entfernt lag. Für jedes Holzpolter konnte jetzt die kürzeste Route auf dem Waldwegenetz zu diesem Zielpunkt berechnet werden (Abbildung 192).

**Abbildung 192: Kürzeste Route (rot) von Holzpolter 45 zum Zielpunkt (gelbes Quadrat) auf dem öffentlichen Straßennetz**



Quelle: Smaltschinski (2015)

Dieser Vorgang wurde für alle 48 Bestände durchgeführt. Diese Datensätze enthielten die Identifikationen von Start und Zielpunkt in der Attributtabelle. Die Identifikation der Startpunkte entsprach einem Attribut in der Forsteinrichtungsdatenbank, aus der über eine Datenbankabfrage die geplante Nutzung ausgelesen wurde, die als Holzfluss auf der Route zum Zielpunkt gefahren werden soll. Die Belastung der einzelnen Wegeabschnitte des Untersuchungsgebiets lässt sich wie folgt berechnen: Zunächst wird eine Kopie aller befahrenen Wege oder Straßen erstellt. Diese Kopie wird an den Holzpoltern (0-47) und dem Zielpunkt in Abschnitte geteilt. Danach werden die transportierten Volumina aller berechneten Routen bis zum Zielpunkt auf die Straßenabschnitte, über die eine der 48 Routen führt, kumuliert und in der Attributtabelle dieses Geodatensatzes gespeichert. Insgesamt wurden 14.200 m<sup>3</sup> abgefahren. Als durchschnittliche Zuladung wurde 20,82 m<sup>3</sup> pro Fuhre angenommen. Das Ergebnis ist in Abbildung 193 dargestellt.



Quelle: Smaltschinski (2015)

Die Anzahl der Lastüberfahrten je Wegeabschnitt wurde für unterschiedliche zulässige Gesamtgewichte (zGG) der LKW berechnet: 40 t, 44 t, 46 t und 53 t. In Abbildung 193 oben links ist der Holzabfluss für LKW mit einem zGG von 40 t dargestellt. Die Häufigkeiten der Lastüberfahrten hat durchaus Ähnlichkeiten mit einem Flusssystem. Hinter jedem Zusammenfluss addieren sich die jeweiligen Lastüberfahrten. Auf Linienabschnitten ohne „Zufluss“ kann sich die Anzahl der Lastüberfahrten noch durch am Weg liegende Holzpolter erhöhen.

Bis zum Zielpunkt (gelbes Quadrat) steigt auf der westlichen Seite des Waldgebietes die Höchstzahl der Überfahrten auf 583 im Basisszenario 40 t. Eine sogenannte Wege-Magistrale wurde angenommen, wenn die Anzahl der Lastüberfahrten über 400 lag. Dies entspricht im Mittel einer Lastüberfahrt pro Woche. Bei einem zulässigen Gesamtgewicht von 40 t hat die Magistrale eine Länge von 1.102 m mit der bereits erwähnten maximalen Anzahl von 583 Lastüberfahrten.

Für ein zulässiges Gesamtgewicht von 44 t (Abbildung 193 oben rechts) verkürzt sich die Magistrale mit über 400 Lastüberfahrten auf 758 m und die maximale Anzahl der Lastüberfahrten sinkt auf 491. Bei einem Gesamtgewicht von 46 t (Abbildung 193 unten links) bleibt die Länge der Magistrale mit 758 m ebenso groß wie bei 44 t, hingegen sinkt die Anzahl der Lastüberfahrten auf 455. Schließlich liegt die maximale Anzahl von Lastüberfahrten bei einem zulässigen Gesamtgewicht von 53 t bei 361. Eine Magistrale kann somit nicht mehr durch eine Selektionsschranke von 400 Lastfahrten ermittelt werden.

Auf den Magistralen werden die Wege durch den Holztransport besonders belastet, wobei für jeden LKW die Leerfahrt zum Polter und die Lastfahrt vom Polter berücksichtigt werden müssen. Ab einer gewissen Häufigkeit von schweren Achslasten sind naturgebundene Wege stärker auszubauen und zu befestigen. Die Dimensionierung von Wegen mit geringerer Anzahl an Achslastübergängen kann zunächst unverändert bleiben. Die Kalkulationen im GIS dienen dazu, die wahrscheinlichen Lastübergänge zu berechnen.

Die Belastung der Wege wurde dabei in Leer- und Lastübergängen eines LKW angegeben. Diese Übergänge sind keine exakte technische Größe, sondern nur eine Eingangsvariable für die relevante technische Größe Achslastübergänge. Mit zunehmender Auflasterhöhung der LKW sinkt die Anzahl der Leer- und Lastfahrten linear, hingegen steigt die Belastung auf den einzelnen Achsen unterschiedlich und exponentiell.

#### **8.6.4 Potentielle Auswirkungen einer Auflasterhöhung auf den Wegeverschleiß und erforderliche Tragschichtverstärkung**

Zur Abschätzung der Auswirkungen einer Auflasterhöhung von Holzabfuhrfahrzeugen auf den Wegeverschleiß und eine evtl. erforderliche Verstärkung des Wegeaufbaus (insbesondere der Tragschicht) wurden die Auflasterzenarien mit den resultierenden Gesamtgewichten von 44 t, 46 t und 53 t unter Verwendung der Prinzipien des AASHTO Flexible Pavement Designs<sup>316 317</sup> mit dem Status quo-Szenarium (40 t) verglichen.<sup>318</sup>

Das AASHTO Flexible Pavement Design basiert auf umfangreichen Befahrungsvorversuchen, die zwischen 1958 und 1960 in Illinois (USA) von der American Association of State Highway Officials (AASHO, später umbenannt in AASHTO) durchgeführt wurden. Ziel war es, die Zusammenhänge zwischen Fahrbahnaufbau aus verschiedenen Materialien und unterschiedlicher

<sup>316</sup> AASHTO, 2008

<sup>317</sup> Dietz et al., 1984

<sup>318</sup> Yoder und Witczak, 1975

Dimensionierung, Verkehrsfrequenz (Achslastübergänge) und Fahrbahnschäden auf empirischer Grundlage zu modellieren.

Im Rahmen der hier beschriebenen Untersuchung wurden diesem Ansatz entsprechend die Achslasten der Auflast-Szenarien der beiden verwendeten Fahrzeugkonfigurationen (Kurzholzzug und Langholzfahrzeug) zur Vergleichbarkeit in Achslastäquivalente (Equivalent Single Axle Load, ESAL) umgerechnet. Diese Umrechnung basiert auf der Tatsache, dass jeder Achslastübergang einen gewissen Verschleiß der Fahrbahn verursacht, der aber je nach Achslast stark variiert. Zur Normierung der „verschleißwirksamen“ Achslastübergänge wurden die tatsächlichen Achslasten mit ihrem Verschleiß je Übergang auf die Anzahl von Normachsen (18.000 lbs bzw. 8164 kg Achslast entspricht ESAL) umgerechnet, die denselben Verschleiß je Übergang verursachen würden.

Da sich der Verschleiß bei Achslasterhöhung nicht proportional sondern überproportional erhöht, kommt es bei den Auflasterhöhungen von Einzelachsen trotz Verringerung der Fuhren (und damit der Achslastübergänge) aufgrund der höheren Ladungsgewichte zu einer Erhöhung der Gesamtachslastäquivalente, die während des Kalkulationszeitraums (30 Jahre) auf den Weg einwirken. Gleichzeitig ist der Verschleiß bei gleichen Achslasten bei einer Einzelachse deutlich höher als bei einer Tandemachse.

Bei dieser orientierenden Untersuchung wurden folgende Annahmen getroffen:

- Für Hauptwege werden 40.000 Achslastübergänge (ESAL) in einem Kalkulationszeitraum von 30 Jahren angenommen<sup>319</sup>.
- Bei der Berechnung der Achslastübergänge werden ausschließlich die Abfuhrfahrzeuge mit jeweils einer Leer- und einer Lastfahrt (ein Transportzyklus) berücksichtigt.
- Aufgrund des vernachlässigbaren Verschleißes, der von dem PKW-Verkehr bei Einhaltung der Geschwindigkeitsbegrenzung von 30 km/h ausgeht, bleibt der PKW-Verkehr bei dieser Analyse und den verschiedenen Auflastszenarien unberücksichtigt.
- Das transportierte Holzgewicht gliedert sich entsprechend der aktuellen Verteilung in Baden-Württemberg in 34 % Kurzholz und 66 % Langholz (vgl. Kapitel 1).
- Zur Herleitung der Achslastäquivalente wurden für die beiden Fahrzeugtypen Kurzholzzug und Langholzfahrzeug jeweils die vier Gesamtgewichts-Szenarien analysiert, die vom KIT für die Modellierung der Transportszenarien verwendet wurden (vgl. Kapitel 5).

Wie aus Tabelle 75 zu entnehmen ist, wurden für alle Szenarien die Achslastäquivalente für die unbeladenen und beladenen Fahrzeuge hergeleitet. Dabei wurden bei beiden Fahrzeugtypen die zweite und dritte Achse als Tandemachse berücksichtigt. Alle übrigen Achsen wurden als Einzelachsen einbezogen. Für jedes Auflastszenario der beiden Fahrzeugtypen wurden durch Addition der Achslastäquivalente aller Achsen im beladenen und unbeladenen Zustand die Achslastäquivalente je Transportzyklus (Leerfahrt plus Lastfahrt (ESAL Gesamt)) berechnet.

---

<sup>319</sup> Dietz et al., 1984

**Tabelle 75: Aufstellung der Achslastäquivalente für die untersuchten Gesamtgewichte der zwei Fahrzeugtypen (Kurzholzzug, Langholzfahrzeug) im unbeladenen und beladenen Zustand**

		Kurzholzzug				Langholzfahrzeug			
Zulässiges Gesamtgewicht (t)		40	44	46	53	40	44	46	53
ESAL	Unbeladen	1,334	1,334	1,334	1,334	1,072	1,072	1,072	1,072
	Beladen	4,424	6,373	9,573	14,660	4,640	7,200	8,530	14,600
	Gesamt	5,758	7,707	10,907	15,994	5,712	8,272	9,602	15,672

Quelle: Jaeger, 2015

Im Status quo-Szenarium (40 t zulässiges Gesamtgewicht) wurden diese Achslasten zusammen mit Beladungsgewichten (Kurzholzzug 21,515 t und Langholz 20,700 t) eingesetzt, um die Anzahl und die Verteilung der Transportzyklen entsprechend der o.a. landesüblichen Anteile von Kurzholz und Langholz bei der Grundannahme von 40.000 Achslastübergängen innerhalb des Berechnungszeitraums zu generieren. Für den Status quo ergaben sich auf diese Weise 2.315 Fahren Kurzholz und 4.670 Fahren Langholz, die in dem Kalkulationszeitraum über den Weg abgefahren werden. Das dabei transportierte Holzgewicht betrug 146.476 t und setzte sich aus 49.807 t Kurzholz und 96.669 t Langholz zusammen. Diese Holzgewichte wurden anschließend jeweils für die Berechnung der Achslastäquivalente der drei Auflastszenarien verwendet (Tabelle 76).

**Tabelle 76: Zusammenstellung der Ladungsgewichte, Fahrenanzahl und Achslastäquivalente für die untersuchten Szenarien mit den zugrundeliegenden angenommenen Gesamttransportgewichten**

Szenarien		Kurzholz	Langholz	Summe
	Gesamttransportgewicht [t]	49.807	96.669	146.476
40 t (Status quo)	Ladungsgewicht [t]	21,515	20,7	
	Anzahl Fahren [n]	2.315	4.670	6.985
	Summe ESAL (je Fahrzeugtyp)	13.330	26.675	40.005
44 t	Ladungsgewicht [t]	25,515	24,7	
	Anzahl Fahren [n]	1.952	3.914	5.866
	Summe ESAL (je Fahrzeugtyp)	15.044	32.377	47.421
46 t	Ladungsgewicht [t]	27,515	26,7	5.431
	Anzahl Fahren [n]	1.810	3.621	54.511
	Summe ESAL (je Fahrzeugtyp)	19.742	34.769	
53 t	Ladungsgewicht [t]	34,515	33,7	
	Anzahl Fahren [n]	1.443	2.869	4.312
	Summe ESAL (je Fahrzeugtyp)	23.079	44.963	68.042

Quelle: Jaeger, 2015

Aus Tabelle 76 wird deutlich, dass, wie bereits oben erwähnt, die Erhöhung der zulässigen Gesamtgewichte durch Erhöhung der Ladungsgewichte zwar zu einer Verringerung der Anzahl der Fuhren im Berechnungszeitraum führt, jedoch ergeben sich aufgrund der mit höheren Achslasten verbundenen überproportionalen Steigerung des Straßenverschleißes mit jeder Auflasterhöhung eine entsprechende deutlichere Erhöhung der Achslastäquivalente. So resultiert aus einer Erhöhung der Auflast von 40 t auf 44 t eine Steigerung der Achslastäquivalente und damit des Wegeverschleißes um 19 %. Bei weiterer Auflasterhöhung auf 46 t bzw. 53 t ergibt sich aber eine Steigerung der Achslastäquivalente von 36 % bzw. 70 % im Vergleich zum Status quo (40 t zulässiges Gesamtgewicht).

Auf Basis der berechneten Achslastäquivalente wurde in einem zweiten Schritt für jedes Szenarium der sog. Stärkeindex (Structural Number SN) rechnerisch unter Verwendung der Dimensionierungsformel<sup>320</sup>, Tabelle 77, und graphisch unter Verwendung der Dimensionierungsnomogramme<sup>321</sup> (Tabelle 78), ermittelt. Der Stärkeindex ist Grundlage zur Herleitung der erforderlichen Tragschichtstärken. Zu seiner Herleitung wurde ein Regionalfaktor von 1,5 (für Erschließungsgebiete zwischen 400 m und 800 m üNN) und ein CBR-Wert<sup>322</sup> von 1,5 zur Charakterisierung der Tragfähigkeit des Baugrundes angenommen. Für die Endbefahrbarkeit wurde ein Befahrbarkeitsindex von 2,0 angenommen (neue Fahrwege haben einen Index von 5,0). In Tabelle 77 und Tabelle 78 sind die unterschiedlichen Stärkeindizes für die untersuchten Szenarien dargestellt. Aus den jeweiligen Differenzen zwischen den Stärkeindizes der Szenarien und dem des Status quo-Szenarios kann auf die erforderliche Tragschichtverstärkung bei den drei Auflasterhöhungen geschlossen werden. Unter der Annahme, dass die bestehenden Wege (Status quo) ihre volle Tragfähigkeit besitzen, sind bei Verwendung eines hochwertigen korngestuften Materials (CBR 105 %) rechnerische Verstärkungen der Tragschicht je nach Auflast-szenarium und Herleitungsverfahren von 2 bis 6 cm erforderlich.

**Tabelle 77: Stärkeindex für die einzelnen Auflast-Szenarien und daraus abgeleitete Tragschichtverstärkungen im Vergleich zum Status quo unter Verwendung der Dimensionierungsformel nach Burlet (1982)**

Szenarien (zGG)	Achslast-äquivalente	Stärkeindex (SN)	$\Delta$ SN (i.V. zum Status quo)	Tragschichtverstärkung (cm)	Bedarf an Tragschichtmaterial (t je lfm)
40 t Status quo	40005	6,86			
44 t	47421	7,04	0,18	1,3	0,12
46 t	54511	7,18	0,32	2,3	0,21
53 t	68042	7,41	0,55	4,0	0,35

Quelle: Jaeger, 2015

<sup>320</sup> Burlet, 1982

<sup>321</sup> Yoder und Witczak (1975),

<sup>322</sup> Die California Bearing ratio (CBR) beschreibt den Eindringwiderstand eines genormten Druckstempels in den untersuchten Boden zu dem Eindringwiderstand des Stempels in einen genormten Boden (mechanisch verdichteter Schlagschotter) in % (Dietz et al., 1984).

**Tabelle 78: Stärkeindex für die einzelnen Auflast-Szenarien und daraus abgeleitete Tragschichtverstärkungen im Vergleich zum Status quo unter Verwendung des Dimensionierungsnomogramms nach Yoder and Witzcak (1975)**

Szenarien (zGG)	Achslast-äquivalente	Stärkeindex (SN)	$\Delta$ SN (i.V. zum Status quo)	Tragschichtverstärkung (cm)	Bedarf an Tragschichtmaterial (t je lfm)
40 t Status quo	40005	2,8			
44 t	47421	2,9	0,1	1,9	0,17
46 t	54511	3,0	0,2	3,7	0,33
53 t	68042	3,1	0,3	5,5	0,49

Quelle: Jaeger, 2015

Aus diesen rechnerisch erforderlichen Tragschichtverstärkungen in cm lassen sich unter der Annahme eines Bedarfs von 25 kg Schottermaterial je cm Schichtdicke (verdichteter Zustand) und  $m^2$  Wegefläche bei einer Wegebreite von 3,5 m ein rechnerischer Gesamtbedarf von ca. 0,12 bis 0,49 t Schottermaterial je Laufmeter Weg herleiten. Allerdings wird aus technischen Gründen zum Aufbau einer zusätzlichen Tragschichtlage auf einer bestehenden Tragschicht statt der berechneten Verstärkungsschichten eine Mindestschichtstärke von 10 cm empfohlen<sup>323</sup>. Es wird zum Teil sogar empfohlen, dass die Mindestdicke ungebundener Tragschichten 15 cm nicht unterschreiten sollten, da sie sonst nicht mehr als homogenes, selbständiges Befestigungselement wirken können<sup>324</sup>.

Bei einer Aufbringung von 10 cm Tragschichtmaterial und bei Materialkosten von 15 €/t Schottermaterial (frei Baustelle incl. Einbau) ergeben sich Kosten von 13,20 €/lfm. Der Einbau sollte im Rahmen einer Lockerung, Neuprofilierung und Verdichtung der Tragschicht erfolgen. Für diese Arbeiten sind zusätzlich mindestens 5 €/lfm einzurechnen. Somit ergeben sich unabhängig von den Auflastszenarien Gesamtkosten zur Tragschichtverstärkung von 18,20 €/lfm.

Die vorangestellten Kosten für die bauliche Verstärkung der Wegetragfähigkeiten aufgrund höherer Achslasten beruhen auf der Annahme, dass die bestehenden Wege für die derzeit zulässigen Gesamtgewichte der Holzabfuhrfahrzeuge ausreichend dimensioniert sind. Die Ergebnisse der in Kapitel 8.8.3 vorgestellten stichprobenartigen Überprüfungen der Wegetragfähigkeiten in vier ausgewählten Modellregionen in Baden-Württemberg zeigten jedoch, dass dies für viele Wege nicht der Fall ist. Daher erfolgt eine Kostenschätzung für die Wiederherstellung und Erhöhung der Wegetragfähigkeit entsprechend der oben berechneten Varianten für die zulässigen Gesamtgewichte (40 t, 44 t, 46 t und 53 t) für Wege mit einer auf die Hälfte der Standardtragfähigkeit reduzierten Tragfähigkeit ( $E_{vD}$  von 20 MN je  $m^2$ ).

Um unter Einbeziehung dieser reduzierten Tragfähigkeit die notwendige Tragschichtverstärkungen für die Varianten abschätzen zu können, wurde wiederum die Dimensionierungsmethode<sup>325</sup> angewendet. Dazu war eine Umrechnung der angenommenen reduzierten Tragfähigkeit  $E_{vD}$  in den korrespondierenden CBR Wert über den  $E_{v2}$  Wert notwendig. Entsprechend der

<sup>323</sup> Yoder und Witzcak 1975

<sup>324</sup> Gerlach, 1975

<sup>325</sup> Burlet, 1982

ZTV E-StB 09<sup>326</sup> wurde der  $E_{vD}$  Wert von 20 MPa in einen  $E_{v2}$  Wert von 40 MPa transformiert. Nach Dietz et al.<sup>327</sup> konnte anschließend aus dem  $E_{v2}$  Wert der korrespondierende CBR Wert von 12 abgeleitet werden. Unter Verwendung der Dimensionierungsformel<sup>328</sup> wurden die in Tabelle 79 aufgeführten Stärkeindizes berechnet, die mittels zusätzlicher Tragschichtstärken erreicht werden müssen, um den Achslastübergängen der vier untersuchten Varianten im Nutzungszeitraum der Wege standhalten zu können.

---

<sup>326</sup> ZTV E-StB 09, (2010)

<sup>327</sup> Dietz et al., (1984), S. 90

<sup>328</sup> Burlet, 1982

**Tabelle 79: Stärkeindex für die einzelnen Auflast-Szenarien unter Berücksichtigung einer mittleren Tragfähigkeit der bestehenden Wege von  $E_{vD}$  20 MN/m<sup>2</sup> und daraus abgeleiteter Tragschichtverstärkungen im Vergleich zur Wiederherstellung der Tragfähigkeit für 40 t zulässiges Gesamtgewicht (Status quo) unter Verwendung der Dimensionierungsformel nach Burlet (1982) bei CBR 12 und R 1,5**

Szenarien (zGG)	Achslast-äquivalente	Stärkeindex (SN)	$\Delta$ SN (i. V. zum Status quo)	Tragschichtverstärkung (cm)	Bedarf an Tragschichtmaterial (t je lfm)
40 t (Status quo)	40005	4,14		29,6	2,6
				<b>Im Vergleich zum Status quo</b>	
				<b>zusätzlich erforderliche Tragschichtverstärkung (cm)</b>	<b>zusätzlich erforderliches Tragschichtmaterial (t je lfm)</b>
44 t	47421	4,26	0,12	0,9	0,08
46 t	54511	4,36	0,22	1,6	0,14
53 t	68042	4,53	0,39	2,8	0,25

Quelle: Jaeger, 2015

Tabelle 79 zeigt zudem, dass eine Grundinstandsetzung der Wege mit einer Tragfähigkeit von  $E_{vD}$  20 zur Erreichung der vollen Tragfähigkeit für 40 t zulässiges Gesamtgewicht einem Wege-neubau gleich kommt, da diese einer Tragschichtverstärkung von rund 30 cm durch rund 2,6 t Wegebaumaterial je Laufmeter Weg bedarf. Werden wiederum Materialkosten von 15 €/t Schottermaterial (frei Baustelle incl. Einbau) kalkuliert, ergeben sich für die Wiederherstellung der vollen Tragfähigkeit der Wege Baukosten von ca. 39 €/lfm. Würde im Rahmen dieser Grundinstandsetzung die Wegetragfähigkeit auf die alternativ untersuchten zulässigen Gesamtgewichte von 44 t, 46 t und 53 t erhöht, ergäbe sich aufgrund der Einbringung von nur relativ wenig zusätzlichem Tragschichtmaterial eine geringfügige Steigerung der Instandsetzungskosten je lfm um 1,2 €, 2,1 € bzw. 3,8 €. Bei der bei vielen Forstwegen in Baden-Württemberg angezeigten Instandsetzungsnotwendigkeit sollte daher bei Durchführung der Instandsetzungsarbeiten aus wirtschaftlichen Gründen eine zusätzliche Verstärkung der Tragschicht auf höhere zulässige Gesamtgewichte der Holzabfuhrfahrzeuge erfolgen.

Diese Kostensätze sind jeweils auf den geologischen Untergrund und den aktuellen Zustand der Wege anzupassen. Aus dem in Kapitel 8.3 analysierten Beispielsgebiet wurde folgende Schätzung der Kosten für den Staatswald in Ba-Wü abgeleitet. Die Länge der Magistralen betrug dort 1.102 m bei einer Waldfläche von 107 ha. Dies ergab eine Magistraldichte in Gesamtlänge je Flächengröße von 1.102 m/107 ha oder 10,29 m/ha. Bei einer optimistischen und einer pessimistischen Annahme ergäben sich Kosten für eine Tragschichtverstärkung von 13,20 €/lfm beziehungsweise 18,20 €/lfm. Umgerechnet würde dies Kosten zwischen 136 €/ha und 187 €/ha bedeuten. Diese Kalkulation bezieht sich auf einen Planungszeitraum von 30 Jahren. Pro Jahr fielen demnach für eine Staatswaldfläche von rund 320.000 ha Kosten in Höhe von 1,45 Mio € beziehungsweise 2 Mio € an, um Magistralen für eine Auflastung zu präparieren.

## 8.7 Zusammenfassung

Um die möglichen Auswirkungen erhöhter zulässiger Gesamtgewichte auf die Walderschließungs-Infrastruktur abschätzen zu können, wurden im Teilarbeitspaket 3.3 Waldwege zunächst die in Baden-Württemberg gebräuchlichen bzw. aktuell gültigen Richtlinien und Regelwerke zum Waldwegebau zusammengestellt.

Die wichtigsten Regelungen zum Waldwegebau ergeben sich aus der Richtlinie für den ländlichen Wegebau (RLW). Darin werden Vorgaben zu den Kurvenradien, Längsneigung und Querneigung der Waldwege gemacht. Weitere Regelungen sind in der Richtlinie zur Walderschließung Baden-Württemberg (1984) formuliert.

Mindeststandards für die Tragfähigkeit der Waldwege ergeben sich aus den „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen für den Bau von Wegen und Plätzen außerhalb Flächen des Straßenverkehrs“ (ZTV 2013). Für forstliche Wege (Bauklasse V) gilt demnach ein Verformungsmaß von mind.  $80 \text{ MN/m}^2$  als Richtwert für die Oberflächenfestigkeit.

In vier Modellregionen (Landkreis Emmendingen, Rems-Murr-Kreis, Landkreis Reutlingen, Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald) wurde an jeweils rund 5 km Waldwegen der tatsächliche Wegezustand erfasst, um die Tragfähigkeit und Qualität der Infrastruktur vor Ort zu bestimmen und um mögliche Abweichungen von Vorgaben in der Praxis darzustellen.

Bei der überwiegenden Zahl der untersuchten Fahrwege, das betrifft 13 von 17 Fahrwege des Untersuchungskollektives, schwankt der  $E_{vd}$  Wert (dynamisches Verformungsmodul) mit großer Spannweite um den Zielwert oder zeigt in Einzelfällen starke Unterschreitungen des Zielwertes.

Um die geforderte Tragfähigkeit zu erreichen, wären zum Teil größere Ausbaumaßnahmen an den Waldwegen erforderlich. Dabei gilt es eine Vielzahl von möglichen Restriktionen zu beachten, die sich unter anderem aus folgenden Rechtsnormen ergeben können:

- Bundesnaturschutzgesetz und Natura 2000
- Zertifizierungsstandards nach FSC und PEFC
- Wassergesetz Baden-Württemberg
- Denkmalschutzgesetz Baden-Württemberg

Die Belastung der Wege durch den Holzabfluss kann berechnet werden, wenn folgende Daten als Geodatensätze vorliegen: Wegenetzwerk, Grundkarte der Bestände und die Nutzungsansätze der Forsteinrichtung für das nächste Jahrzehnt. Bei der Berechnung werden die Schwerpunkte der Einzelbestände auf die nächste Wegegeometrie verschoben. Diese Punkte dienen als Repräsentanten für die eigentlichen Bestände und pro Punkt ist das zu erwartende Nutzungsvolumen gespeichert. Auf dem öffentlichen Straßennetz wird ein Absprungpunkt festgelegt, zu dem das Holz abfließt. Dieser Vorgang wird für alle Bestände wiederholt. Danach werden die Volumina der Holzflüsse auf die einzelnen Abschnitte der Waldwege akkumuliert. Aus diesen akkumulierten Volumina kann dann je nach LKW-Typ und Zuladung die Anzahl der Fahren oder Achslastübergänge berechnet werden.

## 8.8 Literatur

- AASHTO Flexible Pavement Structural Design (2008). Online unter <http://www.pavementinteractive.org/article/1993-aashto-flexible-pavement-structural-design> zuletzt abgerufen am 29 Juni 2015
- Becker, G.; Barge, U.; Ressmann, J. (1995): Umweltverträglicher Waldwegebau in Nordrhein-Westfalen. Schlußbericht zum Gutachten. Institut für Forstbenutzung der Georg-August-Universität Göttingen. Göttingen.
- Bundesnaturschutzgesetz in der Fassung vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2542), zuletzt durch Artikel 4 Absatz 100 des Gesetzes vom 7. August 2013 (BGBl. I S. 3154) geändert worden.
- Burlet (1982): Dimensionierung und Verstärkung von Straßen mit geringem Verkehr und flexiblem Oberbau. In: Forstarchiv (53), S. 27-34
- Dietz P., Knigge W. und Löffler H. (1984): Walderschließung, Ein Lehrbuch für Studium und Praxis unter besonderer Berücksichtigung des Waldwegebaus; Reprint 2011 der Ausgabe von 1984, Verlag Kessel, Eifelweg 37 53424 Remagen-Oberwinter
- DWA (2005): DWA-Regelwerk, Arbeitsblatt DWA-A 904, Richtlinien für den ländlichen Wegebau (RLW), Oktober 2005; Hennef; DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- DWA (2009): Arbeitsblatt DWA-A 904. Richtlinien für den ländlichen Wegebau. Version vom April 2014. Hennef (DWA-Regelwerk: Arbeitsblatt, 904).
- DWA (2015): Arbeitsblatt DWA-A 904. Richtlinien für den ländlichen Wegebau. Entwurfsversion 2015. Hennef (DWA-Regelwerk: Arbeitsblatt, 904).
- FoGIS (2015): Forstliches geographisches Informationssystem.
- Gerlach (1975): Die technischen und wirtschaftlichen Anwendungsmöglichkeiten von Mineralgemischen aus gebrochenem Naturstein für Schottertragschichten im Straßenbau. Straße und Autobahn (2), S. 60.
- Hafner, F. (1971): Forstlicher Straßen- und Wegebau. Wien: Österreichischer Agrarverlag.
- Hauck, B. : KWF Bericht Nr. 04 / 2003; Konzept zur Entwicklung von bundeseinheitlichen Geographischen Standards für die Holzlogistik
- Kommentar zum Landeswaldgesetz Baden-Württemberg, 14. LFG. Stand November 2012
- Kuonen, Viktor: Wald- und Güterstraßen, Planung – Projektierung - Bau ; 1983, Eigenverlag des Verfassers, Lindenweg 9, CH-8122 Pfaffhausen
- Landeswaldgesetz (LWaldG) Baden-Württemberg in der Fassung vom 31. August 1995, letzte berücksichtigte Änderung: § 25 geändert durch Artikel 10 des Gesetzes vom 29. Juli 2014 (GBL. S.378, 380)
- Lehrgangsmappe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg, C.5.16 Lehrgang Wegeunterhaltung 2004 im Rahmen des Fortbildungsprogramms erstellt
- Mair, P. Der dynamische Plattendruckversuch mit dem leichten Fallgewichtsgesetz; Staatl. Fachschule für Agrarwirtschaft Landshut-Schönbrunn, Fachrichtung Garten- und Landschaftsbau; Skript 2005
- Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg (9.06.2004): Überwachung und Prüfung der Brücken, Durchlässe und Stützmauern sowie der sonstigen Ingenieurbauwerke an Waldwegen und Stauanlagen im Staatswald, Az. 54-8644.21

- Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (2004): „Vorläufige Hinweise zum Einsatz von Baustoffrecyclingmaterial“ (Vorschrift galt nur bis zum 31.12.2006)
- Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg (28.03.2007): Wegebenutzungs-Anweisung für die Waldwege im Staatswald; Az.: 54-8603.24
- Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg (29.11.2006): Handreichung zur Wegeunterhaltung und –instandsetzung; Az.: 54-8644.21
- Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Umwelt und Forsten (12.03.1996): Schreiben zur Wegeunterhaltung speziell zur Grabenreinigung, Az.: 56-8644.21
- Ministerium für Ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (15.06.1994): Erlass zur Wegeunterhaltung und Wasserableitung im Staatsforstbetrieb, Az.: 56-8644.21
- NavLog (2008): Formatbeschreibung zur Erstellung einer forstspezifischen Navigationsdatenbasis Pragmatische Shape<sup>Forst</sup> (Version 3.1)
- NavLog (2015): <http://www.navlog.de/>
- Oppermann, J. (1991): Wegeneu- und Ausbauten in den alten Bundesländern. In: AFZ (26), S. 1350–1353.
- Richtlinien für den Straßenoberbau: Standardausführungen – Ausgabe 1975. Herausgeber: Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau. Bonn.
- Richtlinien zur Walderschließung (1984), Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Umwelt und Forsten, Abt. Landesforstverwaltung, Marienstraße 41, 7000 Stuttgart 1.
- RP Tübingen (o.J.): Unveröffentlichtes Dokument des RP Tübingen, Fachbereich 84.
- Umweltministerium Baden-Württemberg (14.03.2007): Verwaltungsvorschrift “Verwertung von als Abfall eingestuftem Bodenmaterial”, Az. 25-8980.081
- Yoder, E. J., Witczak, M. W. (1975): Principles of pavement Design. John Wiley & Sons, 711 Seiten.
- ZTV E-StB 09, Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau; Ausgabe 2010; FGSV Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. Köln
- ZTV-Wegebau (2013), Zusätzliche technische Vertragsbedingungen für den Bau von Wegen und Plätzen außerhalb von Flächen des Straßenverkehrs. Aus der Arbeit des RWA "Wegebau". Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. -FLL
- ZTV LW 99/01 Fassung 2001, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Befestigung ländlicher Wege; mit Änderungen und Ergänzungen 2007; Ausgabe 1999/ Fassung 2001; FGSV Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. Köln, Arbeitsausschuss Ländliche Wege
- ZTV A-StB 12, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Aufgrabungen in Verkehrsflächen, Ausgabe 2012; FGSV Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. Köln, Kommission Kommunale Straßen

8.9 Anlagen

Anlage 1: Übersicht Waldwegedaten

Landkreis	Weg	unters Weglänge (km)	Geolog. Stabilität	Zuordnung Wegeprofil erkennbar	Zuordnung Wegeprofil nicht möglich	Entwässerungsmangel	keine Entwässerungsmängel	Lichtdurchlässigkeit (%)	Lichtdurchlässigkeit nicht frei	Wegebrette Durchschnit (m)	Wegebrette minimal (m)	Dichtemessung Wert Durchschnitt (MN/m²)	Dichtemessung Wert Minimal (MN/m²)	Gesamtzustand gut (%)	Gesamtzustand durchschlecht (%)	Gesamtzustand schlecht (%)	Querneigung /r (%)	Max Steigung (%)
<b>MUSTERWEG</b>	<b>Musterstraße</b>			<b>0%</b>	<b>100%</b>	<b>0%</b>	<b>100%</b>	<b>100</b>	<b>0%</b>	<b>&gt;3,5</b>		<b>&gt;40</b>		<b>100</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>&gt;2,0/&gt;2,0</b>	<b>&lt;=8</b>
Emmendingen	Weg 1	1,3	labil	100		100%	0%	4	96	2,66	2,5	28,8	11,7	85	15	0	4,0/4,9	
Emmendingen	Weg 2	1,6	labil	50	50	100%	0%	29	71	2,95	2,7	43	14,1	100	0	0	3,0/3,0	2
Emmendingen	Weg 3	1,6	labil	100		100%	0%	6	94	2,97	2,6	39	13	82	12,5	6,25	5,2/2	0
Emmendingen	Weg 4	0,9	labil	100		100%	0%	60	40	3,24	3	59	33,4	100	0	0	1,8/2,8	0
Rems-Murr Kreis	Weg 1	1,6	labil	70	30	100%	0%	82	18	3	2,7	42,4	14,5	82	12	6	5,5/5,8	8
Rems-Murr Kreis	Weg 2	0,9	labil	60	40	90%	10%	90	10	2,97	2,7	54,1	23,6	100	0	0	5,8/6,1	4
Rems-Murr Kreis	Weg 3	0,5	labil	83	17	50%	50%	66	34	2,98	2,8	73,9	14	100	0	0	5,5/1,5	8
Rems-Murr Kreis	Weg 4	0,8	labil	11,1	88,9	56%	44%	78	22	2,97	2,8	57,8	23,7	100	0	0	5,6/6,1	13
Rems-Murr Kreis	Weg 5	0,8	labil	28,6	71,4	7%	93%	50	50	2,99	2,8	40,1	16,6	85,7	7	7	6,8/5,7	7
Reutlingen	Weg 1	1,3	stabil	0	92	57%	43%	43	57	2,96	2,8	42,9	17,1	93	7	0	5/6,3	11
Reutlingen	Weg 2	1,2	stabil	8	92	100%	0%	100	0	3,27	3	31,5	20,01	8	92	0	4/1,6	2
Reutlingen	Weg 3	1,1	stabil	100		100%	0%	66	34	2,68	2,3	55,2	14,2	92	8	0	4,6/2,7	8
Reutlingen	Weg 4	1	stabil	82	18	64%	36%	100	0	3,58	3,5	87,7	50,2	100	0	0	6/4,7	7
Reutlingen	Weg 5	0,5	stabil	66	33	100%	0%	83	17	3,4	2,7	91,3	47,8	100	0	0	5,2/4,9	14
Brsg. Hochschwarzwald	Weg 1	0,7	stabil	90	10	13%	87%	100	0	4,3	4,1	82,1	47	100	0	0	8,0/6,0	1
Brsg. Hochschwarzwald	Weg 2	3,1	stabil	60	40	10%	90%	75	25	3,18	3	47,9	20,8	90,5	6,5	3	8,0/6,0	12
Brsg. Hochschwarzwald	Weg 3	1,3	stabil	10	90	21%	79%	93	7	3,1	2,5	42,1	17,8	93	7	0	8,4/7,6	9

**Anlage 2: Aufnahmeformular zur Bewertung von Waldwegen**

<b>Forstamt:</b>		<b>Datum:</b>	<b>Bogen-Nr.:</b>		
<b>Forstrevier:</b>		<b>Bearb.:</b>	<b>Foto-Nr.:</b>		
<b>Wegename:</b>			<b>Distr./Abt.:</b>		
<b>Nullpunkt:</b>					
<b>Witterung:</b>					
<b>GPS-Koordinaten:</b>					
	<b>Messpunkt Evd</b>		<b>Ifm</b>		
	FR li		Mitte	FR re	je 1m von Mitte
s1					
s2					
s3					
Evd					
<b>Wegeprofil</b>	Uhrglas	Dach	abweichend		
<b>Wegezustand</b>	gut	mittel	schlecht		
<b>Wasserablauf FS</b>	Ja	Nein			
<b>Lichtraumprofil</b>	frei	einragend	zu		
<b>bef. Wegebreite</b>	3m	3,5m	m		
<b>Bewuchs bef. Weg</b>	Ja	Nein	Anteil	m	
<b>Bauwerke</b>	Ja	Nein	Art:		
<b>Steigung</b>		%			
<b>Querneigung</b>	li	%	re	%	durchgängig
<b>Dolenart</b>	Beton	Kunststoff	abweichend		bruch
<b>Dolendimension</b>	300mm	400mm	mm		
<b>Dolenabstand</b>					
<b>vor/nach Messpunkt</b>	vor	m	nach	m	
<b>Zustand Dole</b>	frei	Mangel	zu		
<b>Grabenart</b>	Spitz	Trapez	abweichend		
<b>Zustand Graben</b>	frei	Mangel	verformt	zu	
<b>Exposition</b>	Nord	West	Ost	Süd	
<b>Besonderheiten</b>					

### Anlage 3: Muster Berechnungsschema (hier 40 t)

HoLoBaWü: Szenarien-Definition Variante "Standard" (40 to)				
Mengen, Massen, Strecken für Szenario "Standard"				
Holzeinschlag Baden-Württemberg	Mio. m <sup>3</sup>	10,70	Mio. m <sup>3</sup>	Erntefestmeter ohne Rinde
abzgl. Scheitholz (Hausbrand)	Mio. m <sup>3</sup>	3,10	Mio. m <sup>3</sup>	
Rinde (bei Holzvolumenberechnung Efm o.R.)				bei Lastberechnung Lkw berücksichtigt
	Mio. m <sup>3</sup>	7,60	Mio. m <sup>3</sup>	
Nadelholz %	73		27	Laubholz %
Mio. m <sup>3</sup>	5,55		2,05	Mio. m <sup>3</sup>

ab hier weiter Nadelholz:		
Daten	Werte	Einheiten
Langholzanteil %	65	%
=> transportierte Langholzmenge in Mio m <sup>3</sup>	3,61	Mio m <sup>3</sup>
Zuladung in m <sup>3</sup> ohne Berücksichtigung Rinde	24,1	m <sup>3</sup>
Zuladung in m <sup>3</sup> mit Berücksichtigung Rinde	21,7	m <sup>3</sup>
=> Anzahl LKW-Ladungen	166.286	Anzahl
Beschaffungsradius in Km (ein Weg)	60	Km
=> gefahrene Kilometer alle Straßen "leer"	3.990.861	Km
=> gefahrene Kilometer alle Straßen "beladen"	5.986.292	Km
gefahrene Kilometer gesamt	9.977.153	Km
LKW-Typ A) normal/flaches Gelände	70%	%
Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km	55	l/100km
Kraftstoffverbrauch beladen	2.304.722	l
Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km	30	l/100km
Kraftstoffverbrauch unbeladen	838.081	l
=> Kraftstoffverbrauch LKW-Typ A)	3.142.803	l
LKW-Typ B) "bergig"	30%	%
Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km	75	l/100km
Kraftstoffverbrauch beladen	1.346.916	l
Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km	35	l/100km
Kraftstoffverbrauch unbeladen	419.040	l
Kraftstoffverbrauch LKW-Typ B)	1.765.956	l
<b>Kraftstoffverbrauch "Langholz-LKW" Nadel</b>	<b>4.908.759</b>	<b>l</b>
Kurzholzanteil %	35	%
=> transportierte Kurzholzmenge in Mio m <sup>3</sup>	1,94	Mio m <sup>3</sup>
Zuladung in m <sup>3</sup> (ohne Berücksichtigung Rinde)	24,1	m <sup>3</sup>
Zuladung in m <sup>3</sup> mit Berücksichtigung Rinde	21,7	m <sup>3</sup>
=> Anzahl LKW-Ladungen	89.539	Anzahl
Beschaffungsradius in Km (ein Weg)	110	Km
=> gefahrene Kilometer alle Straßen "leer"	3.939.696	Km
=> gefahrene Kilometer alle Straßen "beladen"	5.909.545	Km
gefahrene Kilometer gesamt	9.849.241	Km
LKW-Typ A) normal/flaches Gelände	80%	%
Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km	55	l/100km
Kraftstoffverbrauch beladen	2.600.200	l
Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km	35	l/100km
Kraftstoffverbrauch unbeladen	1.103.115	l
=> Kraftstoffverbrauch LKW-Typ A)	3.703.315	l
LKW-Typ B) "bergig"	20%	%
Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km	75	l/100km
Kraftstoffverbrauch beladen	886.432	l
Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km	40	l/100km
Kraftstoffverbrauch unbeladen	315.176	l
=> Kraftstoffverbrauch LKW-Typ B)	1.201.607	l
<b>Kraftstoffverbrauch "Kurzholz-LKW" Nadel</b>	<b>4.904.922</b>	<b>l</b>

ab hier weiter Laubholz:			
Werte	Einheiten	Daten	
69	%	Langholzanteil %	
1,42	Mio m <sup>3</sup>	=> transportierte Langholzmenge in Mio m <sup>3</sup>	
17,2	m <sup>3</sup>	Zuladung in m <sup>3</sup> ohne Berücksichtigung Rinde	
15,5	m <sup>3</sup>	Zuladung in m <sup>3</sup> mit Berücksichtigung Rinde	
91.246	Anzahl	=> Anzahl LKW-Ladungen	
60	Km	Beschaffungsradius in Km (ein Weg)	
2.189.894	Km	=> gefahrene Kilometer alle Straßen "leer"	
3.284.842	Km	=> gefahrene Kilometer alle Straßen "beladen"	
5.474.736	Km	gefahrene Kilometer gesamt	
80%	%	LKW-Typ A) normales/flaches Gelände	
55	l/100km	Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km	
1.445.330	l	Kraftstoffverbrauch beladen	
35	l/100km	Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km	
613.170	l	Kraftstoffverbrauch unbeladen	
2.058.501	l	=> Kraftstoffverbrauch LKW-Typ A)	
20%	%	LKW-Typ B) "bergig"	
75	l/100km	Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km	
492.726	l	Kraftstoffverbrauch beladen	
40	l/100km	Kraftstoffverbrauch unbeladen / 100 Km	
175.192	l	Kraftstoffverbrauch unbeladen	
667.918	l	=> Kraftstoffverbrauch LKW-Typ B)	
2.726.419	l	=> Kraftstoffverbrauch LKW "Langholz-Zug"	
31	%	Kurzholzanteil %	
0,64	Mio m <sup>3</sup>	=> transportierte Kurzholzmenge in Mio m <sup>3</sup>	
17,2	m <sup>3</sup>	Zuladung in m <sup>3</sup> (ohne Berücksichtigung Rinde)	
15,5	m <sup>3</sup>	Zuladung in m <sup>3</sup> mit Berücksichtigung Rinde	
40.994	Anzahl	=> Anzahl LKW-Ladungen	
90	Km	Beschaffungsradius in Km (ein Weg)	
1.475.798	Km	=> gefahrene Kilometer alle Straßen "leer"	
2.213.698	Km	=> gefahrene Kilometer alle Straßen "beladen"	
3.689.496	Km	gefahrene Kilometer gesamt	
80%	%	LKW-Typ A) normal/flaches Gelände	
55	l/100km	Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km	
1.217.534	l	Kraftstoffverbrauch beladen	
35	l/100km	Kraftstoffverbrauch unbeladen 100 / Km	
516.529	l	Kraftstoffverbrauch unbeladen	
1.734.063	l	=> Kraftstoffverbrauch LKW-Typ A)	
20%	%	LKW-Typ B) "bergig"	
75	l/100km	Kraftstoffverbrauch beladen / 100 Km	
332.055	l	Kraftstoffverbrauch beladen	
40	l/100km	Kraftstoffverbrauch unbeladen 100 / Km	
118.064	l	Kraftstoffverbrauch unbeladen	
450.119	l	=> Kraftstoffverbrauch LKW-Typ B)	
2.184.182		<b>Kraftstoffverbrauch "Kurzholz-LKW"</b>	

## 9 Verzeichnisse

### 9.1 Abkürzungsverzeichnis

ABS	Anti-Blockier-System
ABS	Asphalt Binderschicht
ACC	Adaptive Cruise Control
ADS	Asphalt Deckschicht
AEBS	Advanced Emergency Braking System
ASR	Antriebs-Schlupf-Regelung
ATS	Asphalt Tragschicht
BAG	Bundesamt für Güterverkehr
BaySF	Bayerische Staatsforsten
B-Zahl	dimensionierungsrelevante Beanspruchung
CDC	Continuous Damping Control
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CTI	Central Tire Inflation
DIN	Deutsche Industrie-Norm
DTSV	durchschnittliches tägliches Schwerverkehrsaufkommen (Kap. 7)
DTV	Durchschnittlicher täglicher Verkehr einer Straße (Fahrzeuge pro 24 h)
<u>DTV<sub>SV</sub></u>	Durchschnittlicher täglicher Schwerverkehr (Kap. 6)
EBS	Elektronische Bremssteuerung
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
E <sub>t</sub>	Tank to Wheel Energieverbrauch
E <sub>w</sub>	Well to Wheel Energieverbrauch
FAS	Fahrsicherheitssysteme
Fm	Festmeter (Holz)
FoGIS	Forstliches Geographisches Informationssystem
ForstBW	Landesbetrieb Forst Baden-Württemberg
FSS	Frostschutzschicht
GeoDat	Geographischer Datenstandard für die Holzlogistik
G <sub>t</sub>	Tank to Wheel Emissionen
G <sub>w</sub>	Well to Wheel Emissionen
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IuK	Informations- und Kommunikationstechnologie
LDWS	Lane Departure Warning System
m. R.	mit Rinde
NKW	Nutzkraftwagen
o. R.	ohne Rinde

---

OEM	original equipment manufacturer (Endhersteller)
PFC	perfluorierte Kohlenwasserstoffe
RDO	Regelwerke zur Dimensionierung des Oberbaus
RLW	Richtlinie für den ländlichen Wegebau
RStO	Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen
SF <sub>6</sub>	Schwefelhexafluorid
STS	Schottertragschicht
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
SV	Schwerlastverkehr
t	Tonne
THG	Treibhausgas/-gase
tkm	Tonnenkilometer
VOS	Vehicle Operation System
WASP	Wood Application Service Providing
WBA	Wegebenutzungsanweisung
zGG	zulässiges Gesamt-Gewicht

## 9.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einfluss Gesamtgewicht.....	8
Abbildung 2: Entwicklung Treibhausgasemissionen.....	8
Abbildung 3: Globale Temperaturentwicklung.....	9
Abbildung 4: Die fünf waldreichsten Bundesländer im Vergleich .....	11
Abbildung 5: Schritte für die Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen einer Transportleistung.....	12
Abbildung 6: Beispiele für Last- und Leerfahrten als Teilstrecken .....	13
Abbildung 7: Berechnungsweisen nach DIN 16258:2012 (vereinfacht) .....	13
Abbildung 8: Berechnungen nach DIN 16258:2012.....	14
Abbildung 9: Lang- und Kurzholz-LKW.....	19
Abbildung 10: Berücksichtigung von Kraftstoffmischungen.....	26
Abbildung 11: Energieverbrauch im Szenarienvergleich .....	27
Abbildung 12: Tank-to-Wheel Energieverbrauch im relativen Vergleich .....	28
Abbildung 13: Vergleich der THG-Emissionen der Szenarien .....	29
Abbildung 14: Tank-to-Wheel THG-Emissionen im relativen Vergleich .....	29
Abbildung 15: Nutzung verschiedener Informations- und Wissensquellen .....	35
Abbildung 16: Übersicht Wettbewerbsfaktoren .....	37
Abbildung 17: Durchschnittliche Jahreskostenanteile pro LKW .....	38
Abbildung 18: Befragung Holzlogistik - Investitionsplanung .....	42
Abbildung 19: Befragung Holzlogistik - Investitionsplanung .....	44
Abbildung 20: Vergleich der Kostenstruktur eines LKW bei 40 t und 44 t zGG .....	46
Abbildung 21: Wettbewerbsfaktoren - Bedeutung und Beeinflussbarkeit .....	58
Abbildung 22: Größenverteilung nach Anzahl Lastkraftwagen je Unternehmen.....	75
Abbildung 23: Verteilung der Gesamtfahrzeuganzahl nach Unternehmensgrößenklassen (Anzahl der LKW je Unternehmen).....	75
Abbildung 24: Anzahl der Geschäftsfelder der erfassten Rundholztransportunternehmen.....	76
Abbildung 25: Durchschnittliche Fahrleistung pro Lkw und Jahr .....	77
Abbildung 26: Durchschnittliche Fahrleistung pro LKW und Jahr nach Verkehrsweg.....	78
Abbildung 27: Verteilung der verschiedenen gefahrenen Arten von Mischfracht (Deutschland) .....	79
Abbildung 28: Verwendungshäufigkeit verschiedener Abrechnungsmethoden.....	79
Abbildung 29: Verteilung der transportierten Rohholzmenge auf die Auftraggeber des Transportunternehmens .....	80
Abbildung 30: Maßnahmen der Auftraggeber gegen Rechtsverstöße wie Überladungen beim Holztransport.....	83
Abbildung 31: Prozentuale Verteilung der Fahrzeug- und Anhängerarten in Deutschland .....	84
Abbildung 32: Akkumulierter, prozentualer Anteil der Fahrzeuge in Deutschland und Baden-Württemberg, die technisch für ein bestimmtes zulässiges Gesamtgewicht ausgestattet sind.....	85
Abbildung 33 Akkumulierter, prozentualer Anteil der Fahrzeuge je Unternehmensgrößenklasse, die technisch für ein bestimmtes zulässiges Gesamtgewicht ausgestattet sind .....	85
Abbildung 34: Kran und Lenkung (Deutschland) .....	86
Abbildung 35: Prozentualer Anteil der Gewichtserhebungssysteme (Deutschland).....	87
Abbildung 36: Prozentuale Verbreitung der Nutzung von Assistenzsystemen (Deutschland)...	88

Abbildung 37: Prozentuale Verbreitung der Nutzung verschiedener Kraftstoffe (Deutschland)	88
Abbildung 38: Mitarbeiter, CE-Fahrer (Vollzeit) und CE-Fahrer (Teilzeit) in Deutschland	89
Abbildung 39: Mitarbeiter, CE-Fahrer (Vollzeit) und CE-Fahrer (Teilzeit) in Deutschland nach Betriebsgrößen	90
Abbildung 40: Anteil der Altersgruppen der beschäftigten Fahrer mit CE Führerschein (Deutschland)	91
Abbildung 41: Anteil der Altersgruppen der beschäftigten Fahrer mit CE Führerschein (Deutschland)	91
Abbildung 42: Investitionsplanung der nächsten zwei Jahre (Deutschland)	92
Abbildung 43: Mittelwert der Investitionssumme der nächsten zwei Jahre pro LKW und Unternehmensgrößenklasse (Deutschland)	93
Abbildung 44: Angabe der Gründe für Nichtinvestitionen in den nächsten zwei Jahren (Deutschland)	93
Abbildung 45: In den nächsten zwei Jahren geplante Investitionen nach Investitionsbereichen (Deutschland)	94
Abbildung 46: Frage nach Schwierigkeiten Fahrer oder Mitarbeiter zu gewinnen (Deutschland)	95
Abbildung 47: Frage nach der Gewinnung neuer Fahrer (Deutschland)	96
Abbildung 48: Einschätzung der Gründe für die Probleme bei der Gewinnung neuer Fahrer (Deutschland)	96
Abbildung 49: Fortführung bzw. Regelung der Betriebsnachfolge (Deutschland)	97
Abbildung 50: Risikobewertung zu verschiedenen Einflussfaktoren auf die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens in den nächsten fünf Jahren (Deutschland)	98
Abbildung 51: Verwendung von Dieseleitpreisklauseln (Deutschland)	99
Abbildung 52: Distribution ohne Kooperation (links) und mit Kooperation (rechts)	117
Abbildung 53: Leerfahrtreduktion von vier kooperierenden Werken in Baden-Württemberg	130
Abbildung 54: Rückfrachtrouten (links) und Dreiecksrouten (rechts)	131
Abbildung 55: Spezialhänger zum Transport von Industrieschwachholz (Kiefer)	132
Abbildung 56: Durchfahren enger Kurvenradien auf Naturwegen	133
Abbildung 57: Zugbeladung mit Kran	134
Abbildung 58 Vergleich Frachttarife/rm für LKW und Schlepper mit Spezialhänger	134
Abbildung 59: Lastkraftwagenzüge mit einem zGG über 35t	150
Abbildung 60: Höchstzulässige Abmessungen nach Richtlinie 96/53/EWG	151
Abbildung 61: Höchstzulässige Achslasten nach Richtlinie 96/53/EWG	151
Abbildung 62: Nutzlastdiagramm für einen Kurzholzzug	155
Abbildung 63: Aufstandsfläche beim Reifenkollektiv in Abhängigkeit des Reifeninnendrucks und der Auflast	156
Abbildung 64: Maximaler Kontaktflächendruck beim Reifenkollektiv in Abhängigkeit vom mittleren Kontaktflächendruck mit Ausgleich bei Verzicht auf eine zusätzliche Konstante	158
Abbildung 65: Leergewichte von Kurzholztransportern	164
Abbildung 66: Abhängigkeit der Amortisationszeit von der Gewichtsersparnis bei unterschiedlichen Aufpreisen	175
Abbildung 67: Abhängigkeit des Kapitalwertes von der Gewichtsersparnis bei unterschiedlichen Aufpreisen	176
Abbildung 68: Rentabilitätsschwelle für Kurzholz-FZG	176

Abbildung 69: Abhängigkeit der Amortisationszeit von der Gewichtsersparnis bei unterschiedlichen Aufpreisen.....	179
Abbildung 70: Abhängigkeit des Kapitalwertes von der Gewichtsersparnis bei unterschiedlichen Aufpreisen .....	180
Abbildung 71: Rentabilitätsschwelle für Langholz-FZG .....	181
Abbildung 72: Übersicht der wichtigsten Assistenz- und Sicherheitssystemen für LKW.....	186
Abbildung 73: Untersuchte Straßentypen und Schichtenaufbauten.....	204
Abbildung 74: Häufigkeitsverteilung der Achslasten der Hintergrundkollektive, aufgeteilt in Achslastklassen nach RDO .....	205
Abbildung 75: Straßenbelastung durch die Fahrzeugszenarien nach RStO.....	212
Abbildung 76: Einfluss der Einzelfahrzeuge und Steigerung der Gesamtgewichte auf unterschiedlichen Straßentypen nach RDO Asphalt.....	213
Abbildung 77: Einfluss der Reifenkonfiguration auf unterschiedliche Straßentypen nach erweiterter RDO-Methodik .....	214
Abbildung 78: Straßenbelastung durch den Sattelzug nach erweiterter RDO-Methodik .....	215
Abbildung 79: Straßenbelastung durch den Langholztransporter nach erweiterter RDO-Methodik.....	216
Abbildung 80: Straßenbelastung durch den Lastzug nach erweiterter RDO-Methodik .....	217
Abbildung 81: Straßenbelastung durch den Kurzholzzug nach erweiterter RDO-Methodik....	218
Abbildung 82: Einfluss des Holztransportanteils und Steigerung des Gesamtgewichts auf Autobahnen mit Fernverkehr nach RStO.....	219
Abbildung 83: Einfluss des Holztransportanteils und Steigerung des Gesamtgewichts auf Landstraßen im mittleren Verkehr nach RStO.....	220
Abbildung 84: Einfluss des Holztransportanteils und Steigerung des Gesamtgewichts auf Landstraßen im örtlichen Verkehr nach RStO .....	221
Abbildung 85: Einfluss des Holztransportanteils und Steigerung des Gesamtgewichts auf Autobahnen mit Fernverkehr nach RDO Asphalt .....	222
Abbildung 86: Einfluss des Holztransportanteils und Steigerung der Gesamtgewichte auf mittlere Landstraßen nach RDO Asphalt .....	223
Abbildung 87: Einfluss des Holztransportanteils und Steigerung der Gesamtgewichte auf kleinen Landstraßen nach RDO Asphalt .....	224
Abbildung 88: Einfluss des Holztransportanteils und Steigerung der Gesamtgewichte für Autobahnen mit Fernverkehr nach erweiterter RDO-Methodik.....	225
Abbildung 89: Einfluss des Holztransportanteils und Steigerung der Gesamtgewichte auf mittleren Landstraßen nach Erweiterter RDO-Methodik.....	226
Abbildung 90: Einfluss des Holztransportanteils und Steigerung der Gesamtgewichte auf kleinen Landstraßen nach erweiterter RDO-Methodik .....	227
Abbildung 91: Eingangsgrößen einer Verkehrslastsimulation.....	241
Abbildung 92: Beispielhafte Fahrzeugtypenverteilung .....	242
Abbildung 93: Achsabstände des Fahrzeugtyp 98.....	243
Abbildung 94: Achslastverteilungen des Fahrzeugtyps 98 .....	244
Abbildung 95: Gewichtsverteilungen des Fahrzeugtyps 98.....	244
Abbildung 96: Fundamentaldiagramm .....	245
Abbildung 97: Tagesganglinie Gesamtverkehr (PKW & LKW) .....	247
Abbildung 98: Tagesganglinie Schwerverkehr (LKW) .....	248

Abbildung 99: Fahrzeugabstände im fließenden Verkehr .....	249
Abbildung 100: Mögliche Spurbelegungen .....	251
Abbildung 101: Fahrzeugbänder einer Richtungsfahrbahn mit 3 Spuren .....	251
Abbildung 102: Mögliche Stellungen eines überholenden LKW.....	252
Abbildung 103: Dauerzählstellen im Landkreis Reutlingen .....	257
Abbildung 104: Dauerzählstellen im Landkreis Emmendingen .....	257
Abbildung 105: Dauerzählstellen im Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald .....	258
Abbildung 106: Dauerzählstellen im Landkreis Rems-Murr-Kreis .....	258
Abbildung 107: Achsabstände [m] und Achslasten [t].....	262
Abbildung 108: Vergleich zwischen Verkehrslastsimulationen ohne und.....	265
Abbildung 109: Charakteristische Werte - Rahmenbrücke .....	270
Abbildung 110: Charakteristische Werte - Plattenbrücke .....	271
Abbildung 111: Charakteristische Werte - Plattenbalkenbrücke .....	272
Abbildung 112: Charakteristische Werte - Plattenbalkenbrücke .....	273
Abbildung 113: Charakteristische Werte - Plattenbrücke .....	274
Abbildung 114: Charakteristische Werte - Plattenbalkenbrücke .....	275
Abbildung 115: Charakteristische Werte - Plattenbalkenbrücke .....	276
Abbildung 116: Charakteristische Werte - Plattenbalkenbrücke .....	277
Abbildung 117: Charakteristische Werte - Plattenbalkenbrücke .....	278
Abbildung 118: Charakteristische Werte - Plattenbrücke .....	279
Abbildung 119: Charakteristische Werte - Plattenbalkenbrücke, .....	280
Abbildung 120: Charakteristische Werte - Hohlkastenbrücke .....	281
Abbildung 121: Auslastung bei Verkehrsart "Kurzstreckenverkehr", .....	283
Abbildung 122: Auslastung bei Verkehrsart "Kurzstreckenverkehr", .....	283
Abbildung 123: Auslastung bei Verkehrsart "Mittelstreckenverkehr", .....	284
Abbildung 124: Auslastung bei Verkehrsart "Mittelstreckenverkehr", .....	284
Abbildung 125: Entwurfparameter Holzabfuhrwege (DWA 2009) .....	310
Abbildung 126: Fahrbahnverbreiterung in einem engen Boden (DWA 2009) .....	310
Abbildung 127: Ausweichen bei einstreifigen Wegen (DWA 2009) .....	311
Abbildung 128: Querprofil Holzabfuhrweg mit Uhrglas-/ Graderprofil nach RLW.....	312
Abbildung 129: Böschungsneigungen in Abhängigkeit vom Material .....	313
Abbildung 130: Grabenquerschnitte von Waldwegen. Oben: Trapezgraben. Mitte: Muldengraben. Unten Spitzgraben .....	314
Abbildung 131: Standardbauweisen für den ländlichen Wegebau nach RLW (Ausschnitt) .....	316
Abbildung 132: Regelquerschnitte Waldwege .....	320
Abbildung 133: Querprofile Holzabfuhrweg nach künftigem Standard .....	321
Abbildung 134: Investitionen in die Waldwege des Landes Baden-Württemberg 1994 bis 2014 .....	322
Abbildung 135: Wegekassen nach GeoDat-Standard .....	327
Abbildung 136: Leichtes Fallgewichtsgesetz ZFG 2000 im Einsatz .....	329
Abbildung 137: Übersicht über die in Weisweil (uFB Emmendingen) erfassten Wege .....	332
Abbildung 138: Jägerweg in Weisweil .....	333
Abbildung 139: Jägerweg/ Zweite Allee .....	334
Abbildung 140: Jägerweg/ zweite Allee Wegebau .....	334
Abbildung 141: Großgrundallee .....	336

Abbildung 142: Großgrundallee Wegebrette .....	336
Abbildung 143: Großkopfweg/ Neuer Großkopfweg .....	337
Abbildung 144: Großkopfweg/ Neuer Großkopfweg Wegebrette.....	338
Abbildung 145: Fahrtköpflweg .....	339
Abbildung 146: Fahrtköpflweg Wegebrette .....	339
Abbildung 147: Übersicht über die in Plüderhausen / Steinenberg (Rems-Murr- Kreis) erfassten Wege .....	340
Abbildung 148: Graben des Hohbachweges mit Hiebsresten verstopft.....	341
Abbildung 149: Hohbachweg .....	342
Abbildung 150: Hohbachweg Wegebrette.....	343
Abbildung 151: Eingetieftte Fahrspur mit Wasserablauf bei Messpunkt 16, .....	343
Abbildung 152: Heidenbühlweg .....	344
Abbildung 153: Heidenbühlweg Wegebrette .....	345
Abbildung 154: Weitmarser Weg .....	346
Abbildung 155: Weitmarser Weg Wegebrette .....	346
Abbildung 156: Heubergkopfweg.....	347
Abbildung 157: Heubergkopfweg Wegebrette .....	348
Abbildung 158: Taubenhof Weg/ Rübländerweg .....	349
Abbildung 159: Taubenhofweg/ Rübländerweg Wegebrette .....	349
Abbildung 160: Übersicht über die in Gomadingen (Kreis Reutlingen) .....	350
Abbildung 161: Plauntälesträßle .....	351
Abbildung 162: Plauntälesträßle Wegebrette .....	352
Abbildung 163: Lonsingertalsträßchen bei hohen Niederschlägen .....	353
Abbildung 164: Lonsingertal Sträßchen.....	353
Abbildung 165: Lonsingertal Sträßchen Wegebrette.....	354
Abbildung 166: Eselständeweg.....	355
Abbildung 167: Eselständeweg Wegebrette.....	355
Abbildung 168: Alte Münsingerstraße.....	356
Abbildung 169: Alte Münsingerstraße.....	357
Abbildung 170: Alte Münsingerstraße Wegebrette .....	357
Abbildung 171: Spitalbuckel und Weitleis .....	358
Abbildung 172: Spitalbuckel/ Weitleis Wegebrette.....	359
Abbildung 173: Seeweg (LKR Breisgau-Hochschwarzwald) .....	360
Abbildung 174: Übersicht über die im Breisgau-Hochschwarzwald.....	361
Abbildung 175: Übersicht über die im LKR Breisgau-Hochschwarzwald erfassten .....	362
Abbildung 176: Seeweg mit Bodenfrost .....	363
Abbildung 177: Seeweg .....	364
Abbildung 178: Seeweg Wegebrette .....	364
Abbildung 179: Seeweg frostfrei .....	365
Abbildung 180: Seeweg ohne Frost.....	366
Abbildung 181: Muchenländerweg .....	367
Abbildung 182: Muchenländerweg Wegebrette .....	367
Abbildung 183: Oberkrummenweg/ Lachenweg.....	368
Abbildung 184: Oberkrummenweg/ Lachenweg Wegebrette .....	369
Abbildung 185: § 33 BNatschG .....	371

---

Abbildung 186: Untersuchungsgebiet. Wald (grün schraffiert), Waldwege (NavLog Kl. 2 Rot, Kl. 3 Türkis) öffentliches Straßennetz (Gelb) .....	378
Abbildung 187: NavLog-Wege (Doppellinie) und öffentl. Straßennetz (Rot) .....	379
Abbildung 188: Differenzen NavLog (Doppellinie) und Waldwege des öffentlichen Straßennetzes.....	380
Abbildung 189: Schnittpunkte NavLog-Daten und öffentliches Straßennetz (Türkis).....	380
Abbildung 190: Routing von Punkt 1 und 2 auf dem erstellten Netzwerk .....	381
Abbildung 191: Zentroide der Bestände (links, gelb) und Holzpolter (rechts, blau) .....	382
Abbildung 192: Kürzeste Route (rot) von Holzpolter 45 zum Zielpunkt (gelbes Quadrat) auf dem öffentlichen Straßennetz.....	382
Abbildung 193: Kumulative Anzahl der Lastüberfahrten auf Wegeabschnitten .....	383

### 9.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Erforderliche Werte für die Berechnung von THG-Werten .....	15
Tabelle 2: Transportkraftstoffe: Dichte, Energiefaktor und THG-Emissionsfaktor .....	18
Tabelle 3: Berechnungsgrößen für den jährlichen Kraftstoffverbrauch der Rohholz-LKWs in Baden-Württemberg .....	20
Tabelle 4: Annahmen und Umrechnungsfaktoren als Grundlage für Kraftstoffverbrauchsberechnung .....	22
Tabelle 5: Beispielhafte Berechnung Kraftstoffverbrauch Nadel-Langholz LKW .....	24
Tabelle 6: Unterschiedlicher Kraftstoffverbrauch in Szenarien .....	25
Tabelle 7: Energieverbrauch und THG-Emissionen Rohholztransporte Baden-Württemberg (Standard-Szenario, 40 t) .....	26
Tabelle 8: Effekt einer Erhöhung des zGG auf die Transportkosten .....	46
Tabelle 9: Transportkostenbelastung Baden-Württemberg - Elsass .....	55
Tabelle 10: Struktur der Datensätze .....	71
Tabelle 11: Regionale Verteilung der Unternehmen im Rundholztransport (n = 139) ....	72
Tabelle 12: Vergleich der regionalen Verteilung der recherchierten Unternehmen der Adressdatenbanken zum regionalen Holzeinschlag .....	73
Tabelle 13: Vergleich Größenverteilung (Anzahl LKW je Unternehmen) .....	74
Tabelle 14: Geschäftsfelder der erfassten Unternehmen (Mehrfachantworten) .....	76
Tabelle 15: Durchschnittlicher Frachterlös pro Tonne im Geschäftsjahr 2013 nach Regionen in Deutschland .....	81
Tabelle 16: Durchschnittlicher Frachterlös pro Tonne im Geschäftsjahr 2013 nach Unternehmensgrößenklassen .....	81
Tabelle 17: Umsatz im Holztransportdienstleistungsbereich pro LKW in 2013 im Mittel unterteilt nach Betriebsgrößen in Euro (Deutschland, ohne Unternehmen der Holz- und verarbeitenden Industrien) .....	82
Tabelle 18: Technische Kennzahlen (Deutschland) .....	87
Tabelle 19: Daten der Referenzfahrzeuge .....	152
Tabelle 20: Daten der Referenz-Rundholztransportfahrzeuge .....	153
Tabelle 21: Fahrzeugkonfigurationen für die Achslastberechnung .....	153
Tabelle 22: Zusammenhang zwischen Reifenaufstandsfläche und Auflast .....	156
Tabelle 23: Aufstandsfläche der unterschiedlichen Reifen des Versuchsfahrzeugs im unbeladenen und beladenen Zustand .....	157
Tabelle 24: Durchschnitt des mittleren Kontaktflächendrucks [kPa] .....	158
Tabelle 25: Maximaler Kontaktflächendruck des Gesamtzuges [kPa] .....	159
Tabelle 26: Gewichtsreduktion am Kurzholzzug durch Aluminiumeinsatz bei Schemelkörper und Rungen .....	160
Tabelle 27: Gewichtsreduktion bei Felgen .....	160
Tabelle 28: Gewichtsreduktion bei Reifen .....	160
Tabelle 29: Einfluss des Motorhubraums .....	162
Tabelle 30: Auszug - Referenzfahrzeuge .....	165
Tabelle 31: Abhängigkeit des Kraftstoffverbrauchs von der Fahrzeugmasse .....	165
Tabelle 32: Fahranteile und Kraftstoffverbräuche .....	167
Tabelle 33: Basisdaten Kostenmodell .....	168
Tabelle 34: Reifenkonfiguration und Kosten .....	169
Tabelle 35: Anzahl der Touren bei 96.718 km/a .....	170
Tabelle 36: Fixkosten und variable Kosten pro Jahr .....	171
Tabelle 37: Gesamtkosten der Referenzfahrzeuge pro Jahr .....	171
Tabelle 38: Transportkosten für Referenzfahrten aus Sicht eines Transportunternehmens ...	173

Tabelle 39: Preisgestaltung Betriebsmodell MOBIMA .....	173
Tabelle 40: Preisgestaltung Betriebsmodell MOBIMA .....	174
Tabelle 41: Amortisationstabelle Kurzholz-FZG.....	174
Tabelle 42: Kapitalwerttabelle Kurzholz-FZG.....	175
Tabelle 43: Leichtbaumaßnahmen Langholz-FZG.....	177
Tabelle 44: Amortisationstabelle Langholz-FZG .....	177
Tabelle 45: Kapitalwerttabelle Langholz-FZG .....	179
Tabelle 46: Achslasten und Radaufstandsflächen des Gliederzuges .....	191
Tabelle 47: Achslasten und Radaufstandsflächen des Sattelzuges.....	192
Tabelle 48: Achslasten und Radaufstandsflächen des Kurzholztransporters .....	193
Tabelle 49: Achslasten und Radaufstandsflächen des Langholztransporters.....	194
Tabelle 50: Pavement wear ratios ausgewählter Reifenkonfigurationen .....	200
Tabelle 51: Untersuchte Fahrzeugszenarien .....	204
Tabelle 52: Zuordnung der Verkehrsarten und Straßentypen.....	206
Tabelle 53: Szenarien Verkehrszusammensetzung Landstraßen .....	207
Tabelle 54: Szenarien Verkehrszusammensetzung Autobahnen .....	207
Tabelle 55: Reduktion des Holzverkehrs durch höhere Gesamtgewichte.....	207
Tabelle 56: Übersicht der Simulationsmethoden .....	209
Tabelle 57: Straßenbelastung durch den Sattelzug nach RStO.....	209
Tabelle 58: Straßenbelastung durch den Langholztransporter nach RStO.....	210
Tabelle 59: Straßenbelastung durch den Lastzug nach RStO .....	210
Tabelle 60: Straßenbelastung durch den Kurzholzzug nach RStO .....	211
Tabelle 61: Einfluss der Einzelfahrzeuge und Steigerung der Gesamtgewichte auf unterschiedlichen Straßentypen nach RDO Asphalt.....	213
Tabelle 62: Auszug aus dem Verkehrsmonitoring 2013 (Dauerzählstellen).....	256
Tabelle 63: Summarische Verkehrszusammenstellung des DTSV [%] zur .....	259
Tabelle 64: Zuordnung der Fahrzeugkollektive zum DTSV .....	260
Tabelle 65: Zusammenstellung der jährlichen Transportbewegungen .....	263
Tabelle 66: Verkehrskategorien als Kombination von Fahrzeugkollektiv, .....	263
Tabelle 67: Reduktion der Fahrbewegungen von Holztransporten durch .....	264
Tabelle 68: Brückenkatalog .....	267
Tabelle 69: Maximale Zunahme der charakteristischen Brückenbeanspru- .....	286
Tabelle 70: Maßgebende Überschreitungen des mindestens notwendigen.....	286
Tabelle 71: Empfehlungen für Böschungswinkel in Abhängigkeit vom .....	312
Tabelle 72: Merkmale Standard und Sonstiger LKW-Weg nach GeoDat.....	324
Tabelle 73: Vergleich bestehender Wegestandards (RLW und GeoDat) mit.....	326
Tabelle 74: Kriterienkatalog .....	331
Tabelle 75: Aufstellung der Achslastäquivalente für die untersuchten Gesamtgewichte der zwei Fahrzeugtypen (Kurzholzzug, Langholzfahrzeug) im unbeladenen und beladenen Zustand ...	386
Tabelle 76: Zusammenstellung der Ladungsgewichte, Fuhrenanzahl und Achslastäquivalente für die untersuchten Szenarien mit den zugrundeliegenden angenommenen Gesamttransportgewichten.....	386
Tabelle 77: Stärkeindex für die einzelnen Auflast-Szenarien und daraus abgeleitete Tragschichtverstärkungen im Vergleich zum Status quo unter Verwendung der Dimensionierungsformel nach Burlet (1982) .....	387
Tabelle 78: Stärkeindex für die einzelnen Auflast-Szenarien und daraus abgeleitete Tragschichtverstärkungen im Vergleich zum Status quo unter Verwendung des Dimensionierungsnomogramms nach Yoder and Witczak (1975) .....	388
Tabelle 79: Stärkeindex für die einzelnen Auflast-Szenarien unter.....	390