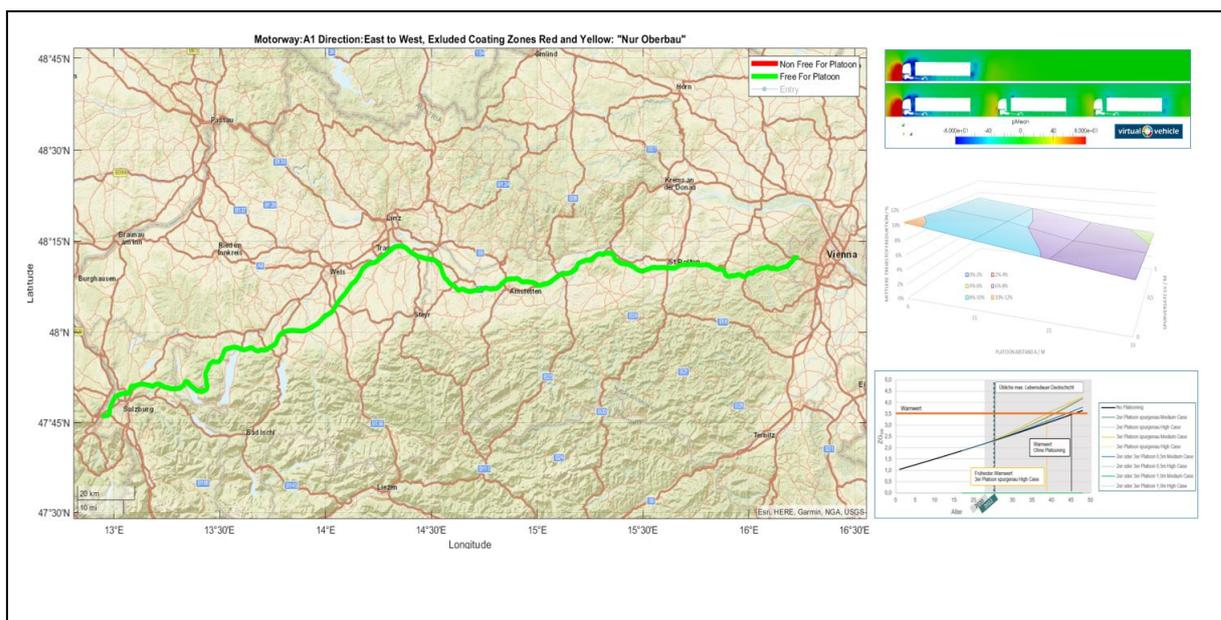


Spurvariations-Effekte bei LKW-Platoons auf Straßenoberbau und Energie-Effizienz (Spurvariation)

Ein Projekt finanziert im Rahmen der Verkehrsinfrastrukturforschung 2018 (VIF 2018)

Oktober 2020



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Klimaschutz
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
1030 Wien

 **Bundesministerium**
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG
Praterstern 3
1020 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-
Aktiengesellschaft
Rotenturmstraße 5-9
1010 Wien



Für den Inhalt verantwortlich:

FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH
Wehrgrabengasse 1-3, 4400 Steyr



UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES
UPPER AUSTRIA

ANDATA GmbH
Hallburgstraße 5, 5400 Hallein



ARNDT IDC GmbH & Co. KG
Lehargasse 7 | Stiege 2 | 13, 1060 Wien



Kompetenzzentrum – Das virtuelle Fahrzeug
Forschungsgesellschaft mbH
Inffeldgasse 21a. 8010 Graz



HiTec Marketing
Lothringerstraße 14/6, 1030 Wien



Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
1090 Wien



Spurvariations-Effekte bei LKW-Platoons auf Straßenoberbau und Energie-Effizienz (Spurvariation)

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF2018)

AutorInnen:

Dr. Walter AIGNER

DI Alexander KOSPACH

Dr. Wolfgang SCHILDORFER

DI Elvira THONHOFER

DI Sandra ULRICH

Auftraggeber:

Bundesministerium für Klimaschutz

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH

ANDATA GmbH

ARNDT IDC GmbH & Co. KG

Kompetenzzentrum – Das virtuelle Fahrzeug Forschungsgesellschaft mbH

HiTec Marketing

INHALTSVERZEICHNIS

Executive Summary	9
1. EINLEITUNG	13
1.1 Ausgangslage und Ziel.....	13
1.2 Methodisches Vorgehen.....	14
2. STAND DER TECHNIK	15
2.1 Verkehrsmanagement und LKW-Platoons	15
2.2 Stand der Technik: Oberbaubemessung und LKW-Platoons.....	22
3. THEORETISCHE ROBUSTHEITS- UND SENSITIVITÄTSANALYSE	34
4. WINDSCHATTENEFFEKTE	38
4.1. Simulationsergebnisse 3er Platoon.....	38
4.2. Simulationsergebnisse 2er Platoon.....	43
4.3. Zusammenfassung.....	44
5. AUSWIRKUNGEN AUF DEN STRASSEN OberBAU	45
5.1 Berücksichtigung von LKW-Platooning bei Neubau und Sanierung.....	46
5.2 Berücksichtigung von LKW-Platooning bei PMS und Lebenszyklusanalyse	52
5.3 Zusammenfassung.....	60
6. ZUSAMMENFÜHRUNG DER ERGEBNISSE UND EVALUIERUNG	63
7. HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN	73
LITERATURVERZEICHNIS	77

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Definitionen, Abkürzungen, Begriffserklärung.....	8
Tabelle 1: Vorgeschlagene Äquivalenzwerte für LKW-Platoons.....	49
Tabelle 2: Vorgeschlagene Fahrspurfaktoren für LKW-Platooning Spurversatz.....	50
Tabelle 3: Medium Case Berechnungsrahmenbedingungen.....	50
Tabelle 4: Berechnungsszenarien Bestandsabschnitte.....	55
Tabelle 5: Bestandsdaten A8	57
Tabelle 6: Parameter für Verhaltensfunktion Spurrinnen A8	58
Tabelle 7: CFD Ergebnisse zu Treibstoffverbrauchsreduktion in AP3.....	66
Tabelle 8: Deckschichteignung für Platooning.....	71

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Methodisches Vorgehen.....	15
Abbildung 2: Internationale LKW-Platooning Projekte(Quelle connecting-austria)..	17
Abbildung 3: Dynamic risk-rated-map in Connecting Austria (Quelle: connecting-austria)	19
Abbildung 4: Verschiedene Layouts zur Optimierung der lateralen Position von LKW in Platoons (Gungor und Al-Qadi 2020a).....	27
Abbildung 5: Schädigungscharakteristik von LKW auf den Oberbau inkl. Aufretenswahrscheinlichkeit (Blab et al. 2014).....	29
Abbildung 6: Automatisierte LKW und LKW-Platoon Layouts im Forschungsprojekt MANTRA.....	31
Abbildung 7: Mittlere zu erwartende Spurabweichung bei Solltrajektorie	35
Abbildung 8: Spurtreue im Vergleich Technik und menschlicher Fahrer	36
Abbildung 9: Treibstoffeinsparung über Fahrzeugabstand und Spurversatz	39
Abbildung 10: Längsschnitte des statischen Druckes für den Solo, 6 m und 11 m Fall.....	40
Abbildung 11: Mittlere Treibstoffeinsparung über Fahrzeugabstand und Spurversatz	41
Abbildung 12: Auswirkungen des Spurversatzes auf die mittlere Strömungsgeschwindigkeit und Druck.....	42
Abbildung 13: Kennfeld „Spurversatz“	43
Abbildung 14: Einsparungspotenzial 2er Platoon für A=22m	43
Abbildung 15: Methode AP4.....	46
Abbildung 16: Anpassung relevanter Parameter der Bemessungsformel der RVS 03.08.63	48
Abbildung 17: BNLW und Lastklassen in Abhängigkeit der Marktdurchdringung für die 4 Platooning Szenarien.....	51
Abbildung 18: Strukturelle Lebensdauer in Abhängigkeit der Marktdurchdringung für die 4 Platooning Szenarien.....	52
Abbildung 19: Ausgewählte Bestandsabschnitte.....	56
Abbildung 20: Verhaltensfunktion Spurrinnen A8	59
Abbildung 21: Messaufbau für die Validierungsmessungen.....	65
Abbildung 22: Minimal mögliche Spurtreue, die gem. AP2 mit LAS realisiert werden kann	67
Abbildung 23: Bemessungsergebnis JDTLV4000	68
Abbildung 24: Veränderung Straßenoberbau je nach Lebensdauer bei unterschiedlichen Platooning-Szenarien	69
Abbildung 25: A1 Westautobahn in Fahrtrichtung Ost -West. RRM, wie sie im Projekt Connecting Austria entwickelt wurde (Konfigurations-File A) .	72

Definitionen, Abkürzungen, Begriffserklärung

Abkürzungen, Begriffe	Beschreibung
ACC	Adaptive Cruise Control
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
AI	Artificial Intelligence
ASECAP	European Association of Operators of Toll Road Infrastructures
ASFINAG	Autobahn- und Schnellstraßenfinanzierungs AG
BMVIT	Bundesministerium für Verkehr, Infrastruktur und Technologie
BNLW	Bemessungsnormlastwechsel
BStMG	Bundesstraßen-Mautgesetz
BWiM	Bridge Weigh in Motion
CACC	Cooperative Adaptive Cruise Control
CAD	Connected and Automated Driving
CAV	Connected and Automated Vehicle
CCAV	Cooperative Connected Automated Vehicles
CEDR	Conference of European Directors
CFD	Computational Fluid Dynamcis
C-ITS	Cooperative Intelligent Transport Systems
EMS	Erhaltungsmanagementsystem
ERTRAC	European Road Transport Research Advisory Council
FAT	Forschungsvereinigung Automobiltechnik
FE	Finite Elemente
FEM	Finite Elemente Modell
GVO	Gebrauchsverhaltensorientierter Ansatz
ISAD	Infrastructure support levels for cooperative connected automated driving
JDTLV	Jährlich durchschnittliche tägliche Lastverkehrsstärke
JDTV	Jährlich durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke

Abkürzungen, Begriffe	Beschreibung
LK	Lastklasse
MEPDG	Mechanistic-Emiprical Pavement Design Guide
ODD	Operational Design Domain
OEM	Original Equipment Manufacturer
PMS	Pavement management system
RVS	Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen
SV	Schwerverkehr
SAE	Society of Automotive Engineers International
SMA	Splittmastixasphalt
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2V	Vehicle-to-Vehicle
VIF	Verkehrsinfrastrukturforschung F&E Dienstleistungen

Tabelle 1: Definitionen, Abkürzungen, Begriffserklärung

Executive Summary

Das Projekt „Spurvariations-Effekte bei LKW-Platoons auf Straßenoberbau und Energie-Effizienz“ (Spurvariation) aus der FTI-Initiative: Verkehrsinfrastrukturforschung VIF2018 (Ausschreibung 8, Herbst 2018) wurde durch die Projektpartner FH OÖ Forschungs und Entwicklungs GmbH – Logistikum Steyr (Projektleitung), ANDATA, ARNDT IDC GmbH & Co. KG, Vereinigung High Tech Marketing und VIRTUAL VEHICLE, Kompetenzzentrum - Das virtuelle Fahrzeug Forschungsgesellschaft mbH im Zeitraum von Juli 2019 bis Juni 2020 durchgeführt.

Aufbauend auf einer detaillierten Sensitivitätsanalyse von lane assist Systemen (Genauigkeit beim Spurhalten, Querregelung) wurde erarbeitet, wie der Gewinn des Windschattenfahrens durch den Versatz in der Querregelung kompensiert wird. Die Untersuchung von Auswirkungen auf den Straßenoberbau durch LKW-Platoons war der zweite Schwerpunkt des Projektes. Aus den Berechnungen im Projekt Spurvariation hinsichtlich der Berücksichtigung von LKW-Platoons bei Neubau und Sanierung als auch im Erhaltungsmanagement des Straßenoberbaus ist aus heutiger Sicht innerhalb der Rahmenbedingungen, wie sie für dieses Projekt definiert wurden, nicht davon auszugehen, dass sich große Auswirkungen auf die Bemessung ergeben.

Internationale Studien kommen zu dem Schluss, dass Platooning nicht notwendigerweise eine erhöhte Belastung für den Oberbau bedeuten muss, sondern gerade durch die Vernetzung der LKW und der damit verbundenen Möglichkeit gezielter Spurvariation sogar eine Chance für eine ebenso deutlich höhere Lebensdauer des Oberbaus erreicht werden kann. Demzufolge sind in einer theoretischen Betrachtung von 100 % LKW-Platoons mit kontrolliertem Spurversatz Einsparungen bis 50 % der Oberbauerhaltungskosten im Vergleichszeitraum möglich. (Gungor und Al-Qadi 2020a, 2020b). Auch in der Lebenszyklusbetrachtung sind mit den prognostizierten, langsam eingeführten Szenarien von LKW-Platoons, gerade auch auf Grund des immer noch großzügigen Abstands von 10-15 m, keine signifikanten Verkürzungen der strukturellen- oder der Gebrauchsdauer zu erwarten.

Auswirkungen auf den Straßenoberbau wurden beispielhaft in eine „dynamic risk-rated-map“ integriert, damit die Auswirkungen der Studie im gesamten Zusammenhang des Verkehrsmanagements der ASFINAG hinsichtlich LKW-Platoons dargestellt werden konnte.

Ein sehr großer Teil des ASFINAG Netzes ist für eine erste Zulassung von LKW-Platoons auch spurgenaue (im Sinne aktuell verfügbarer Technologien, Beladung und Abstandspraxis) befahrbar. Dieser Befund ist als relativ robust hinsichtlich höherer Marktdurchdringung (bei gleichbleibender Abstandspraxis und Beladungspraxis) einzuschätzen. Bei veränderten Bauarten und Beladungspraxis oder bei radikal genauem Spurfolgeverhalten sollte erneut evaluiert werden.

Die Forschungsfrage, ob infolge der – bisher nicht näher untersuchten – Belastung durch LKW-Platoons mit einer signifikant erhöhten Schadensauswirkung auf den Straßenoberbau zu rechnen ist, kann aus jetziger Sicht mit „Nein“ beantwortet werden. Dies auch für den Standardfall, dass kein elektronisch gesteuerter Spurversatz im LKW-Platoon gefahren wird.

Somit besteht auf Basis der verfügbaren Technologien auch kein betriebswirtschaftlicher trade-off zwischen mehr Windschatteneffekten und Beanspruchung am Straßenoberbau. Eine Kosten/Nutzenabschätzung aus Sicht der LKW-Platoon- und Infrastrukturbetreiber benötigt daher im Wesentlichen nur die bereits benannten Situationen, in denen fallweise ein Verbot von LKW-Platooning mittels Maßnahmen im Verkehrsmanagement zu überlegen ist (aktuell vermutlich zwei ausgewählte Brücken mit hohem Seitenwindaufkommen und zwei Unfallhäufungsstellen lt. Ergebnis ASFINAG-interne Analyse von Hintenaus, 2018 in Begleitung zu Connecting Austria).

Zusätzlich ist aus rechtlicher Sicht (StVO) und Sicht aktualisierter Informationen (LKW-Hersteller) die Durchdringungsrate von LKW-Platoons am Netz der ASFINAG / in Österreich gleich Null. Fahrzeughersteller haben hinsichtlich künftiger LKW-Assistenzsysteme und automatisierter Fahrfunktionen bei LKW derzeit andere strategische Prioritäten. Aus Vertriebsicht der LKW-Hersteller lässt sich die Vorteilhaftigkeit elektronisch gekoppelter Fahrzeuge für weite Bereiche europäischer LKW-Betriebspraxis in der Anfangsphase (mit nur wenigen koppelbaren Fahrzeugen) nur in begrenzten Ausnahmefällen darstellen und auch die juristischen Voraussetzungen für LKW-Platooning (z. B. Abstand zwischen den Fahrzeugen unter dem gesetzlichen Mindestabstand von 50 Metern auf Autobahnen in Österreich) sind nicht gegeben. Deswegen werden diese Systeme in Europa aktuell nicht angeboten oder forciert. Die Marktdurchdringungsraten werden sich in Mitteleuropa daher vorläufig langsam entwickeln. Mit steigendem Entwicklungsgrad von Vernetzungsmöglichkeiten (V2V, V2I, I2V) ergeben sich auch Chancen für eine gezielte Steuerung der Spurführung durch innovative Formen von Verkehrsmanagement durch die ASFINAG. Diese Chancen werden im EU Projekt ESRIUM weiter untersucht.

Simulationsergebnisse zeigen, dass hoch-automatisierte LKW, deren Spurführung durch das Verkehrsmanagement kontrolliert wird, sogar äußerst vorteilhaft für die Lebensdauer und Nutzung von flexiblen Straßenoberbauten (Asphalt) wären. Dem entgegen steht jedoch, dass ein unkontrollierter Einsatz von hoch-automatisierten LKW (auch mit veränderten Geometrien und Gewichtsklassen), die möglicherweise alle mehr oder weniger genau derselben zentrierten lateralen Spur folgen würden („zero-wander mode“), sich negativ auf die Lebensdauer von flexiblen Straßenoberbauten (Asphalt) auswirken könnte. Eine fortlaufende Analyse von oberbauoptimierten LKW-Platoon Layouts und der Möglichkeiten einer zentralen oder dezentralen Steuerung des Spurversatzes mittels C-ITS wird empfohlen, um das Potential eines positiven Einflusses auf die Lebensdauer des Straßenoberbaus auf lange Sicht zu realisieren.

Hinsichtlich der Vorbereitung und Umsetzung innovativer Formen von oberbauoptimierten LKW-Platoon Layouts und deren I2V-basierter Steuerung / Verhaltensempfehlung erfordern neue Optionen wesentlich erweiterte – digitale - Simulationsinstrumente, wie etwa Digital Twin und szenarienbasierte Modellrechnungen auf Basis einer dynamischen risk-rated map. Diese Erkenntnisse lassen sich auch für den Fall eines traditionellen LKW-Betriebs (manuell, assistiert aber ohne elektronische Achskopplung) für ein möglicherweise neues Zeitalter der Verkehrssteuerungspraxis in der ASFINAG gestalten.

Hauptrisiken im Kontext der evaluierten Projektergebnisse kommen, aus Beobachtungen der Autor*innen kaum aus der LKW-Platooning Technologie – sei es SAE L1, L2 oder höher; Hauptrisiken kommen aus einer Ausweitung des bekannten LKW-Platooning Konzepts hin zu anderen Fahrzeuggeometrien, höheren Gesamtgewichten und möglicherweise Geschwindigkeiten. Diesbezüglich werden daher internationale Begleitmaßnahmen empfohlen (u. a. ODDs mit OEMs; ERTRAC, CEDR CAD WG, ASECAP).

Im Projekt Spurvariation sind neue Fragen oder nachjustierte Fragestellungen entstanden, wie z. B.: Inwieweit können C-ITS Messages und innovative Formen eines LKW-spezifischen Verkehrsmanagements auf Basis der risk-rated-map genutzt werden, um Kosten für die ASFINAG zu reduzieren? Eine Ausweitung von Erfahrungen auf Vorgaben an Sondertransporte ist allenfalls zu prüfen.

Hinsichtlich der Übernahme von Platooning-Modi oder LKW Typen und Beladungen aus radikal anderen Kontexten ist deutlich Vorsicht angebracht. Skandinavische Kontexte der flächendeckenden Holzernte (Abholzung ganzer Wälder alle 80 Jahre) und der damit

einhergehenden einmaligen Belastung des Straßennetzes sind nicht auf Österreich übertragbar. Auch nordamerikanische Erfahrungen zur Verteilung von LKW über Spuren ist bei der aktuellen Erwartungspraxis und österreichischen Gesetzeslage nicht möglich.

Eine wesentliche Begleitmaßnahme auf europäischer Ebene besteht vermutlich in der Abwehr von LKW-Beladungspraxis und LKW-Modellen (z. B. 60t-LKW, „Gigaliner“), die international vordringen, aber aus Sicht des spezifischen Charakters des ASFINAG Netzes (alpine Kontexte, Brücken Tunnel, ...) hohe Beschädigungs- und Verschleißrisiken mit sich brächten.

1. EINLEITUNG

Am Beginn des Ergebnisberichtes zum Projekt Spurvariation werden Ausgangslage und Zielsetzung der Ausschreibung wiederholt und das methodische Vorgehen der Studie skizziert. In den folgenden Kapiteln werden dann der Stand der Technik (2), Ausführungen zur theoretischen Robustheits- und Sensitivitätsanalyse (3), Windschatteneffekte durch LKW-Platooning (4), Auswirkungen auf den Straßenoberbau durch LKW-Platooning (5), eine Zusammenführung aller Ergebnisse (6) und schließlich Handlungsempfehlungen beschrieben (7).

1.1 Ausgangslage und Ziel

In der VIF 2018 Ausschreibung (FFG, VIF2018, S. 15f) wurde folgende Ausgangslage / folgender aktuelle Entwicklungsstand beschrieben, der die Basis für die durchgeführte Studie darstellte.

„Truck Platooning ist das weitgehend automatisierte Folgen von LKW in kurzen Fahrabständen. Oftmals wird diese Technologie auch als „elektronische Deichsel“ bezeichnet. Truck Platooning stellt laut Fahrzeughersteller einen wesentlichen Business Case, insbesondere für die Logistikbranche, dar. Zahlreiche Vorteile (zB hinsichtlich Verkehrssicherheit, Kraftstoffeinsparung, Verfügbarkeit des Straßennetzes) werden erwartet. Während Platooning in den USA bereits in zahlreichen Bundesstaaten mit niedrigem Automatisierungsgrad Realität ist, befindet sich die Technologie in Europa noch in der Testphase. Die Auswirkungen von Platooning auf das Straßennetz, insbesondere Einflüsse auf die Nutzungsdauern des Straßenoberbaus, sind noch weitgehend unklar. Seitens ASFINAG wurde im September 2018 ein Positionspapier veröffentlicht, in dem der Stand des Wissens, aber auch offene Fragestellungen gesammelt wurden. Dieses Positionspapier steht für das ggst. Forschungsprojekt zur Verfügung. Die ggst. Thematik stellt eine dieser offenen Fragestellungen dar.

Definition eines Platoons als Grundlage für die Forschungsarbeit: Als Platoon wird ein Verband von 2 bis maximal 3 für den Straßenbetrieb zugelassene LKW im Abstand von mindestens 10 bis rund 15 m zugrunde gelegt. Die Fahrgeschwindigkeit wird mit maximal 80 km/h angenommen.“

Hinsichtlich Ziel des Forschungsvorhabens wurde folgendes festgelegt:

„Spurgenaues Fahren ist für Truck Platooning eine wesentliche Grundlage zur Optimierung des Windschattenfahrens. Diese konzentrierte Belastung birgt jedoch das Risiko erhöhter Spurrinnenbildung am Straßennetz der ASFINAG. Gegenstand der Studie soll sein, die Auswirkungen auf den Straßenoberbau im Detail zu erheben. Dabei sind auf Basis vorliegender Studien sowie im eigenen Ermessen Vorschläge für Belastungsfälle und -modelle zu erstellen und in Folge anzusetzen. Sämtliche Einflussfaktoren (Witterung, Verkehrsstärke etc.) sind zu berücksichtigen. Daraus abzuleiten sind Vorgaben zur Spurvariation im Platoon unter Berücksichtigung einer möglichst optimalen Aufrechterhaltung des Windschattens und somit des Cost Benefits für Truck Platooning. Ziel ist es, Situationen abzuleiten, in denen fallweise ein Verbot von Platooning mittels Maßnahmen im Verkehrsmanagement zu überlegen ist. Als Grundlage für die Arbeiten ist der internationale Stand zur ggst. Thematik zusammenzustellen (Literaturstudie, Übersicht usw.). Die Ergebnisse der theoretischen Betrachtungen sind mittels geeigneter Praxistests zu prüfen. Diese Tests haben mit mindestens zwei LKW in geeigneter Testumgebung zu erfolgen.“

1.2 Methodisches Vorgehen

Das Projekt Spurvariation wurde mit folgender methodischen, stufenweisen Herangehensweise abgearbeitet.

1. Die Basis bildete eine detaillierte Sensitivitätsanalyse von lane assist Systemen (Genauigkeit beim Spurhalten, Querregelung) im Arbeitspaket 2.
2. Darauf aufbauend wurde in Arbeitspaket 3 beim Virtual Vehicle Center mittels Strömungsanalyseberechnungen jener Versatz berechnet, bei dem der Gewinn des Windschattenfahrens durch den Versatz in der Querregelung kompensiert wird. Das unterste Limit zur Berechnung der Auswirkungen auf die Fahrbahnoberfläche ergab sich aus der Sensitivitätsanalyse (Varianz in der Querregelung zwischen zwei LKW). Die oberste Grenze wurde durch die Windschattensimulation festgelegt (bei welchem Versatz ergibt sich kein Energiegewinn durch den Windschatten).
3. Die Analyse der Auswirkungen auf den Straßenoberbau in Arbeitspaket 4 baut auf erprobten Lebenszyklusmodellen auf, in die zusätzliche Parameter für neue Einflussfaktoren durch LKW-Platooning festgelegt und integriert wurden. Neue Belastungsfälle innerhalb der Grenzwerte der Sensitivitätsanalyse und auf Basis der definierten LKW-Platoons wurden vorgeschlagen.

4. Die Wirkungsbetrachtung in Arbeitspaket 5 fasste die Ergebnisse der Arbeitspakete 2-4 zusammen und evaluierte die Gesamtauswirkung von LKW-Platooning auf den Straßenoberbau der ASFINAG.
5. Die Auswirkungen auf den Straßenoberbau wurden in die „dynamic risk-rated-map“ von Connecting Austria integriert, damit die Auswirkungen der Studie im gesamten Zusammenhang des Verkehrsmanagements der ASFINAG hinsichtlich LKW-Platoons dargestellt werden konnten.

Der Zusammenhang zwischen den Inhalten und Arbeitspaketen ist in nachfolgender Grafik zusammengefasst dargestellt.



Abbildung 1: Methodisches Vorgehen

2. STAND DER TECHNIK

Nachfolgend wird der Stand der Technik hinsichtlich Verkehrsmanagement und Straßenoberbau im Zusammenhang mit LKW-Platoons dargestellt.

2.1 Verkehrsmanagement und LKW-Platoons

In diesem Kapitel werden wesentliche Erkenntnisse aus internationalen Studien und Forschungsprojekten zu Verkehrsmanagement-Strategien in Zusammenhang mit LKW-Platooning zur nachhaltigen Nutzung des Straßenoberbaus zusammengestellt.

Zusammenfassung

Truck Platooning stand in den vergangenen 20 Jahren in einer Reihe von Forschungsprojekten im Fokus, erste Projekte waren z. B. in CHAUFFEUR und SARTRE der Europäischen Kommission oder KONVOI in Deutschland sowie das PATHs Truck Platooning Projekt in Kalifornien und das Energy ITS-Projekt in Japan (Bergenheim et al. 2012). Aktuelle Studien und Artikel zum Thema Platooning befassen sich fast ausschließlich mit der technischen Lösung zur Koppelung der Fahrzeuge und der notwendigen Sensorik und Vernetzung für sichere Längs- und Querführung oder mit den potentiellen Effizienzgewinnen hinsichtlich Treibstoffeinsparung. Auswirkungen von LKW-Platoons auf Anschlussstellen, Tunnel und Brücken werden ebenso untersucht. Dem Umstand der Auswirkungen auf die Beanspruchung des Straßenoberbaues wird derzeit jedoch noch eine relativ geringe Beachtung geschenkt. Insbesondere in den genannten ersten Projekten lag der Fokus auf der Lösung für eine elektronische Deichsel in Form von Connected adaptive cruise control (CACC), Lane keep assistant (LKA) und Emergency brake assistant (EBA), deswegen wird auf diese ersten Projekte nicht weiter eingegangen. Darüber hinaus arbeiten viele Start-ups und Original Equipment Manufacturers (OEMs) international an Lösungen. Aber auch dort liegt der Fokus auf einem marktauglichen Produkt und nicht dem Verkehrsmanagement. Nachfolgende Grafik (Abbildung 2) zeigt eine Übersicht der wichtigsten internationalen LKW-Platooning Projekte.

Auch bei aktuellen Projekten steht dabei im Vordergrund immer die technische Lösung der V2V Kommunikation und so wird diese oft auch nur auf abgeschlossenen Testgeländen geprüft. Eine aktive Steuerung zur sicheren und effektiven Einbindungen von LKW-Platoons in das Gesamtverkehrsgeschehen ist bisher noch wenig erforscht. Im österreichischen Projekt Connecting Austria werden grundsätzliche gesamtverkehrliche Analysen durchgeführt. Diese beziehen sich in erster Linie auf Infrastruktureinschränkungen und die zur Verfügungstellung von Daten an die LKW-Platoons, jedoch nicht auf die aktive Verkehrssteuerung. Es ist kein Projekt bekannt, das sich explizit mit aktiven Verkehrsmanagement-Strategien für sicheres und effektives Platooning auseinandersetzt.

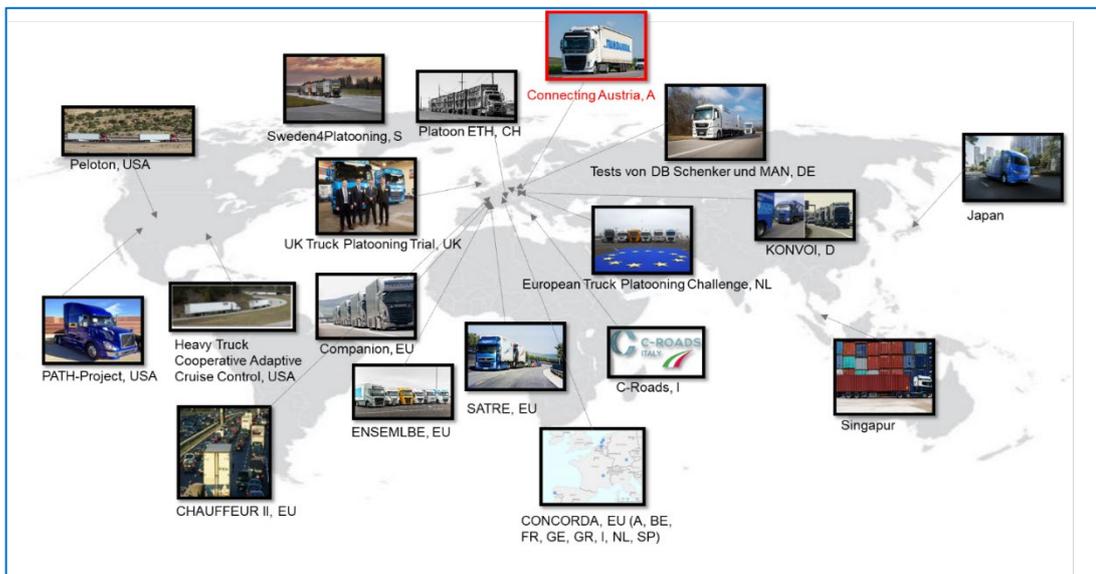


Abbildung 2: Internationale LKW-Platooning Projekte (Quelle connecting-austria)

Neben LKW-Platooning spezifischen Projekten unterstützt die Europäische Union bereits seit mehr als 10 Jahren die Entwicklung von automatisiertem Fahren und Connectivity in Form von Unterstützung durch digitale Infrastruktur (Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS)) in unterschiedlichsten Forschungs- und Entwicklungsprojekten.

Beim Platooning soll immer klar sein, auf welchen Teilen der Infrastruktur in LKW-Platoons gefahren werden darf, z. B. auf der Grundlage der Straßennetz-Eignung in Form einer risk-rated map (Schildorfer et al. 2019), High-Definition Karten und zuverlässigen Echtzeit-Verkehrsinformationen (Alkim et al. 2016). Langfristig denken einige der hier genannten Projekte an, dass das Verkehrsmanagement einen Anreiz für Truck Platooning geben sollte, z. B. durch die dynamische Zuordnung von Spuren für Platooning und auch, dass das Zertifizieren von Strecken für Truck Platooning für erhöhte Verkehrseffizienz und –sicherheit nützlich sein könnte. Konkrete Vorschläge für Verkehrsmanagement-Strategien konnten jedoch nicht gefunden werden.

European Truck Platooning Challenge (Alkim et al. 2016)

Die European Truck Platooning Challenge wurde während der niederländischen Ratspräsidentschaft als groß angelegtes, grenzübergreifendes Demonstrationsprojekt 2016 durchgeführt. Markenübergreifend fuhren semi-automatisierte LKW von verschiedenen europäischen Städten nach Rotterdam mit dem Ziel LKW-Platooning breitenwirksam zu demonstrieren und eine Implementierung zu forcieren. Da es sich um ein

Demonstrationsprojekt handelte wurde Verkehrsmanagement dahingehend genutzt um etwaige Hindernisse, wie Staus oder Unfälle, vorab bekannt zu machen und die LKW so von einem automatisierten in einen manuellen Modus umzustellen. Das Projekt war ein wesentlicher Meilenstein in der Demonstration von LKW-Platooning. Hinsichtlich der Verkehrsmanagement-Strategien wurde im Wesentlichen festgestellt, dass eine digitale aktive Kommunikation für die Meldung von Verkehrsstörungen und anderen Ereignissen zur sicheren Nutzung von Platooning wichtig ist.

Projekt Connecting Austria (Schildorfer et al. 2019)

Das österreichische Leitprojekt zu LKW-Platooning hat sich zum Ziel gesetzt die Verbindung von energieeffizientem und automatisiertem Güterverkehr von der Autobahn in die Stadt abzubilden. Hauptziel im Leitprojekt Connecting Austria ist die evidenz-basierte Generierung von Bewertungsgrundlagen für die Evaluierung der Wirkungen energieeffizienter teilautomatisierter LKW-Platoons als Voraussetzung für die Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit österreichischer Leitindustrien wie Logistik, Telematik-Infrastrukturlieferanten, Automobilzulieferer, Fahrzeugentwicklung und angeschlossene Forschung. Betrachtungen für das Verkehrsmanagement werden dabei am Rande auch behandelt. So wird unter anderem an der Frage gearbeitet, ob mit entsprechenden kooperativen Regelungsstrategien eine tatsächliche Verbesserung der Verkehrssicherheit erzielt und ob durch passende kooperative Fahrzeug- und Verkehrsregelungsstrategien positive verkehrliche Effekte (z. B. erhöhte Verkehrseffizienz, Verhinderung von Staus) erreicht werden können. Empfehlungen für Verkehrsmanagementstrategien können daraus noch nicht abgeleitet werden, aber ein Ergebnis in Connecting Austria ist die Erstellung einer „dynamic-risk-rated-map“ – welche die österreichischen Autobahnen und deren „Platoonfähigkeit“ je nach dynamischer Verkehrssituation und Straßenkonfigurationen zeigt.

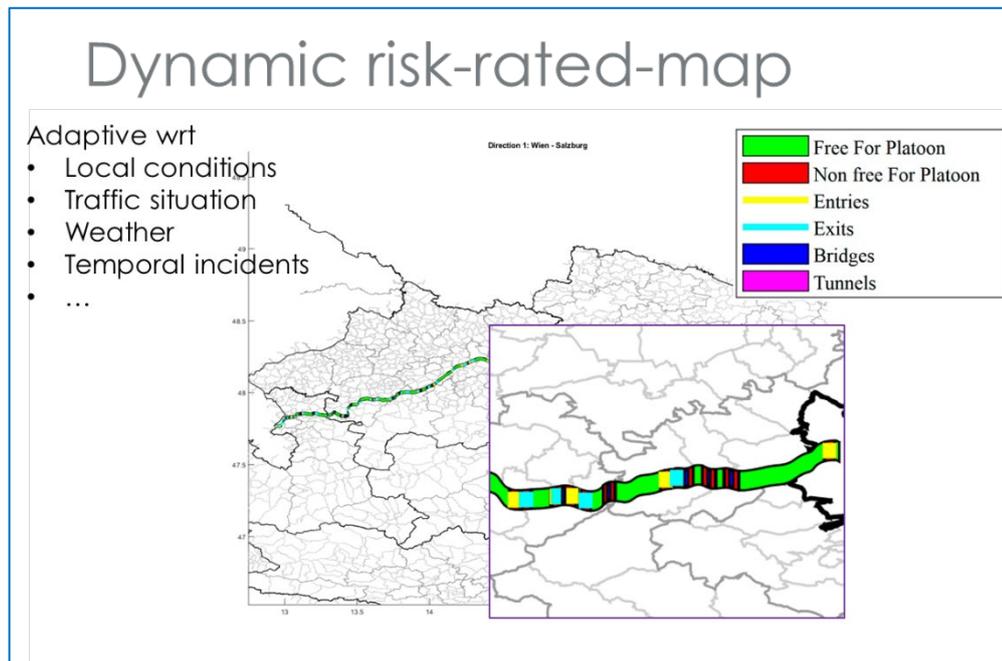


Abbildung 3: Dynamic risk-rated-map in Connecting Austria (Quelle: connecting-austria)

Projekt EDDI (Brandt et al. 2019)

Weltweit zum ersten Mal starteten im Juni 2018 im Rahmen des vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur geförderten Projekts „Elektronische Deichsel – Digitale Innovation“, kurz EDDI, LKW-Platoons in den Praxisbetrieb auf der Autobahn im Realverkehr. Im Rahmen des Verbundprojektes EDDI haben die Kooperationspartner MAN Truck & Bus, DB Schenker sowie die Hochschule Fresenius LKW-Platoons im Regelbetrieb auf ihre Praxistauglichkeit und Systemsicherheit sowohl im realen Straßenverkehr als auch in den Logistikabläufen von DB Schenker getestet. Das Ziel war darüber hinaus Implikationen für den zukünftigen Regeleinsatz von LKW-Platoons zu erkennen. Das Vorhaben wurde als erstes Pilotprojekt zu LKW-Platoons in Deutschland im Realbetrieb auf dem „Digitalen Testfeld Autobahn“ auf der A9 zwischen den beiden DB Schenker-Terminals in Nürnberg und München durchgeführt. Mit den Fahrten wurden reale Transporte aus dem Logistiksystem von DB Schenker abgebildet. Ebenfalls zum ersten Mal steuerten nicht Testpiloten, sondern Berufskraftfahrer die LKW.

Die LKW-Platoons waren über V2V Kommunikation durch ein von MAN selbst entwickeltes Protokoll, basierend auf WLAN11p (ITS G5) miteinander verbunden und übliche für Platooning erforderliche Systeme (abstandsgeregelte Tempomat ACC, Notbremssystem EBA, Lidar-

Sensor, Serienradar, Serienkamera) redundant ausgelegt. Eine V2I Kommunikation gab es nicht.

Der Abstand zwischen den Fahrzeugen betrug während der Platoonfahrt rund 15 Meter. An Autobahnkreuzen, vor Autobahnbaustellen, bei Steigungen und Gefälle von über 4 %, Unfallstellen und besonders dichtem Verkehr wurden die Platoons, die mit einer Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h unterwegs waren, aufgelöst. Analysiert wurde im Projekt am Rande auch die Auswirkung auf Verkehrssicherheit und Verkehrsfluss. Demzufolge kann Platooning einen positiven Einfluss auf die Verkehrskapazität haben. Die Verringerung des Platzbedarfs einer LKW-Kolonne von circa 90 auf rund 50 Meter – bei drei LKW sogar von 155 auf 80 Meter - und der durch die automatisierte Fahrt verbesserte Verkehrsfluss versprechen eine effizientere Nutzung der Infrastruktur. Das soll auch einen positiven Einfluss, durch besseren Verkehrsfluss auf die Verkehrssicherheit haben. Eine Beobachtung des Platooning war durch das Verkehrsmanagement über die Kamerasysteme auf dem „Digitalen Testfeld A9“ möglich, eine aktive Interaktion gab es darüber hinaus aber nicht, da die Rahmenbedingungen des Platooning bereits vorab fix über eine Ausnahmegenehmigung definiert wurden.

Projekt ENSEMBLE (Vissers et al. 2018)

Das ENSEMBLE Projekt ist ein großangelegtes EU finanziertes Horizon2020 Projekt mit dem Ziel multi-brand LKW-Platooning in verschiedenen Ländern Europas zu pilotieren. Das große Ziel war es Rahmenbedingungen für markenübergreifende ad-hoc Platoonbildung zu schaffen und diese in Piloten zu testen. Dafür würde auch eine Vernetzung mit dem Verkehrsmanagement sinnvoll erscheinen.

Multi-brand Platooning scheint durch das Projekt weiter in die Zukunft gerückt zu sein, da viele neue Herausforderungen zu Tage gebracht wurden. Dennoch konnten wichtige Standardisierungen im Projekt entwickelt werden. Der Fokus des Projektes liegt aber eindeutig auf der Logistikbranche und der strukturellen und organisatorischen Ermöglichung von LKW-Platooning für die Marktteilnehmer in der Logistikbranche. Interessant aus Sicht der Straßenbetreiber sind dennoch einige Ergebnisse, wie z. B. die Festlegung von s. g. Platooning Levels (A-C), die Aufschluss über den Automatisierungsgrad des Platoons geben und damit eine Ergänzung zu den SAE Automatisierungslevels darstellen sollen.

Ein Ziel des Projektes ist es darüber hinaus mit Straßenbetreibern road approval requirements, also LKW-Platooning Freigabeanforderungen, festzulegen und dabei Auswirkungen auf bzw. Wechselwirkungen mit Straßenoberbau, Straßengeometrie, V2I Kommunikation etc. zu

berücksichtigen. Die Ergebnisse dazu liegen zum Zeitpunkt der Finalisierung dieses Projektes leider noch nicht vor.

C-ITS & C-ROADS (AustriaTech 2020)

C-ITS ist ein Pfeiler für aktives Verkehrsmanagement um die direkte Kommunikation zwischen Verkehrsleitzentralen und Fahrzeugen zu ermöglichen. Verkehrssicherheit und Komfort können durch den Informationsaustausch zwischen Fahrzeugen und Verkehrsinfrastruktur, mittels sogenannter kooperativer Systeme (C-ITS), maßgeblich verbessert werden. C-ITS steht dabei für „Cooperative Intelligent Transport Systems“, deren zentraler Inhalt der Austausch von sicherheitsrelevanten Informationen zwischen Fahrzeugen und der Straße über drahtlose Kommunikationskanäle ist. Die eingesetzten Technologien umfassen zum größten Teil die drahtlose Kommunikation im Hochfrequenzbereich (5,9 GHz) und sind im Rahmen des ITS-G5-Standards vereinheitlicht. In einfachen Worten: Fahrzeuge und Straßen werden durch C-ITS dazu befähigt miteinander und untereinander zu kommunizieren.

C-Roads ist eine gemeinsame Plattform europäischer Staaten und Infrastrukturbetreiber zur Pilotierung und Einführung von C-ITS-Diensten. Dabei bündelt sie auf technischer und strategischer Ebene die Ansprüche und Interessen der öffentlichen Stakeholder. Ein zentrales Element ist die gemeinschaftliche Entwicklung von technischen Spezifikationen als Basis für den europaweit harmonisierten Betrieb von C-ITS-Diensten. In zwölf Piloten wird die technische Weiterentwicklung nach den jeweiligen Landesspezifikationen getestet. Der Zusammenschluss in der C-Roads Plattform sorgt dabei für den kontinuierlichen Austausch und garantiert ein europaweit abgestimmtes Vorgehen.

Die wesentliche Unterscheidung an zu übermittelnden Daten über C-ITS Dienste sind statische und dynamische Daten. Bei kooperativen Systemen und C-ITS-Diensten sind dynamische Daten aufgrund ihrer Sicherheitsrelevanz besonders wichtig. Hier werden in Echtzeit aktuelle Informationen zum Straßenstatus wie Unfallmeldungen oder Stauinformationen an die FahrerInnen übermittelt.

Diese Übermittlung dynamischer Daten könnte auch der Kanal für ein aktives Verkehrsmanagement im Zusammenhang mit LKW-Platooning sein. Straßenbetreiber könnten so statt Staumeldungen dynamisch-situationsangepasste Beschränkungen, Aufforderungen oder auch Spurvariationen für LKW-Platoons kommunizieren. LKW-Platoons sind kein explizites Thema in den so genannten „Day-1 Services“, die in den C-Roads

Pilotprojekten getestet werden. Der Schritt zu dynamischen LKW-Platooning Daten wäre aber naheliegend und könnten so über C-Roads länderübergreifend in Angriff genommen werden.

Projekt MANTRA (Ulrich et al. 2020)

Im Projekt MANTRA (Making full use of Automation for National Transport and Road Authorities – NRA Core Business) werden für CEDR (Conference of European Directors of Road) die Auswirkungen von Automatisierung auf die Kerngeschäftsfelder von Straßenbetreibern analysiert. In einem Arbeitspaket wurden die Auswirkungen auf die Infrastruktur anhand von Expertenworkshops gesammelt und bewertet. Das Thema LKW-Platooning war dabei ein wesentlicher Use Case, da hier insbesondere am hochrangigen Netz Auswirkungen erwartet werden. Es wurde als essentiell angesehen, dass eine Einführung von LKW-Platooning nur in Zusammenhang mit einem aktiven, also steuernden, Verkehrsmanagement geschehen soll. Aktiv meint in diesem Zusammenhang, dass angedacht werden soll über das Verkehrsmanagement Spurvariationen vorzugeben oder dynamisch Strecken für LKW-Platooning über Geofencing Mechanismen freizugeben, wo die Verkehrssituation und -bedingungen dies erlauben. Als weiterer, zukünftiger Schritt soll von einem aktiven Verkehrsmanagement zu einem kooperativen Verkehrsmanagement übergegangen werden. Damit ist gemeint, dass eine real-time wechselseitige Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Verkehrsmanagement möglich und nutzbar gemacht werden soll. So sollen durch das Verkehrsmanagement direkt spezifische Sicherheits- und Steuerungsmeldung an die Fahrzeuge weitergeben werden, aber auch die Fahrzeuge Daten über Verkehrsfluss und Verkehrsbedingungen an das Verkehrsmanagement kommunizieren. Die soll entweder über Flottenmanager, wie Logistikbetriebe, oder OEMs geschehen und kann sowohl über short-range (ITS G5) als auch long-range (5G) bewerkstelligt werden. Mit so einem kooperativen Verkehrsmanagement wäre auch die Vorgabe von Fahrspuren und Spurvariationen von Platoons denkbar.

2.2 Stand der Technik: Oberbaubemessung und LKW-Platoons

In diesem Kapitel werden wesentliche Erkenntnisse aus internationalen Studien und Forschungsprojekten zu erweiterten Belastungsfällen und -modellen für die Zustandsentwicklung des Straßenoberbaus bei besonderen Belastungen durch Platoons oder ähnlichen außergewöhnlichen LKW Lastfällen zusammengestellt.

Zusammenfassung

Schwerlastverkehr (Anzahl der Gesamtnormlastwechsel) ist der bestimmende Parameter in der modernen Straßendimensionierung und Ermittlung von Alterungskurven wesentlicher Zustandsmerkmale des Straßenoberbaus wie Spurrinnenbildung, Griffigkeit, Längsebenheit, etc. Unabhängig von zukünftigen use cases wie Platooning oder auch längeren und schwereren LKW (s. g. Gigalinern oder Road Trains) ist vor allem die zunehmende Schwerverkehrsbelastung auf dem hochrangigen Straßennetz eine Herausforderung. Diese führt auf manchen Streckenabschnitten bereits ohne solcher neuen use cases zu einem Erreichen der Leistungsgrenzen und reduziert damit die geplante Lebensdauer als auch den Level of Service für alle Nutzer*innen. Dies gilt vor allem für Fahrbahnaufbauten aus Asphalt, die im Zusammenhang mit LKW-Platooning kritisch zu betrachten sind. Für Betonstraßen könnten mögliche schnellere Kantenabbrüche und Fugenverschleiß durch spurgenaue fahrende LKW eine mögliche Verschlechterung darstellen, diese wird aber in bisherigen Studien unkritisch gesehen.

Spurrinnenbildung für Deckschichten (Decke, Binder) und Ermüdung der Tragschichten sind auf Asphaltstraßen bei entsprechendem Schwerverkehr die maßgeblichen Schadensmerkmale, die die Basis für modernes PMS der Erhaltungsplanung bilden. Durch eine Reduktion der Spurvariation (spurgenaues Fahren der LKW) und zusätzlich ein erhöhtes Aufwärmen des Asphalts durch kurze Fahrzeugabstände (Abwärme Motor) kann die Entwicklung dieses Zustandsmerkmals potentiell beschleunigt werden. Wesentlich in diesem Zusammenhang ist, in welchem Ausmaß sich durch Platooning-Technologie die Gesamtzahl der über einen bestimmten Fahrabschnitt gemessenen LKW verändert. Aktuelle Studien und Artikel zum Thema Platooning befassen sich jedoch fast ausschließlich mit der technischen Lösung zur Koppelung der Fahrzeuge und der notwendigen Sensorik und Vernetzung für sichere Längs- und Querführung oder mit den potentiellen Effizienzgewinnen hinsichtlich Treibstoffeinsparung. Auswirkungen von LKW-Platoons auf Anschlussstellen, Tunnel und Brücken werden ebenso untersucht. Dem Umstand der Auswirkungen auf die Beanspruchung des Straßenoberbaues wird derzeit jedoch noch eine relativ geringe Beachtung geschenkt. Zu Beginn dieses Projektes lagen keine Forschungsprojekte, die sich analytisch im Detail mit den Auswirkungen von LKW-Platoons auf die Straßenoberbaudimensionierung und die Lebensdauer von bestehenden Straßen im hochrangigen Netz auseinandersetzen vor. Im Laufe der Bearbeitungszeit wurden erste Ansätze veröffentlicht. Die wesentlichen Erkenntnisse daraus werden in diesem Kapitel zusammengefasst.

In einigen bereits genannten Projekten finden sich allgemeine Aussagen. Diese basieren aber lediglich auf Expertenbefragungen ohne analytische Betrachtungen. Die befragten Experten gehen dabei nicht davon aus, dass durch die bloße Einführung von Platooning, also eine Umverteilung des Schwerverkehrs, aber keine Erhöhung der Verkehrsstärke oder zulässigen Lasten, mit den aktuell diskutierten Rahmenbedingungen (10-15 m Abstand und 2-3 LKW im Platoon) negative Auswirkungen auf den Straßenoberbau zu erwarten sind (Jermann et al. 2017).

Kritischer ist ein potentieller weiterer Anstieg des Schwerlastverkehrs durch die potentiell mögliche effektivere Nutzung des Verkehrsraums durch Platooning. Das Schadenspotential von LKW auf den Oberbau sowie deren durchschnittliche Auftretenswahrscheinlichkeit im österreichischen hochrangigen Straßennetz wurden im Projekt OBESTO untersucht. Diese weicht deutlich von den bis dahin verwendeten Faktoren für die Zusammensetzung des Schwerverkehrskollektivs ab. Die in Österreich vorrangig anzuwendende Richtlinie zur Straßendimensionierung RVS 03.08.63 (FSV 2016) wurde aus diesem Grund in Folge des Projektes 2016 überarbeitet. Dabei wurde insbesondere der Äquivalenzfaktor für das Schwerverkehrskollektiv auf Basis der Auswertung von Mautdaten am ASFINAG Netz und Bridge Weigh in Motion (BWIM) Daten auf ausgewählten Brücken neu festgelegt und erhöht. Dazu wurde die Schädigungscharakteristik von verschiedenen LKW Typen berechnet und umfangreich bewertet.

Zusätzlich zu den Parametern der Platoons hinsichtlich Abstand und Anzahl der Fahrzeuge im Platoon sind für die Festlegung kritischer Belastungsfälle auch Marktdurchdringungsraten und zu erwartende Gesamtanzahl der Schwerfahrzeuge/Platoons relevant. Diese Thematik wird u. a. im EU-Projekt MANTRA neben anderen Anwendungsfällen auch für das Platooning analysiert. Demzufolge ist ebenso mit einem weiteren graduellen Anstieg des Schwerlastverkehrs zu rechnen, der entsprechend in die Wahl der Belastungsfälle Eingang finden sollte und auch wesentlich für die Empfehlungen zu Maßnahmen im Verkehrsmanagement für mögliche Einschränkungen/Verbote von Platoons ist.

China: Untersuchung der Auswirkungen von verschiedenen autonomen LKW Querregelungsmodi auf Asphaltstraßen (Chen et al. 2019)

An der Tongji University in Shanghai wurde die kanalisierte Einwirkung von LKW-Platoons, die spurgenaue fahren, und deren Auswirkung auf den Oberbau untersucht. Dies wurde nicht spezifisch für LKW in einem Platoon analysiert, sondern grundsätzlich für autonome LKW,

deren laterale Spurführung über eine V2I Vernetzung durch ein Verkehrsmanagement kontrolliert wird.

Darüber hinaus wurden 4 laterale Kontrollmodi für LKW-Platoons vorgeschlagen und mit einer „finite Elemente (FE) Simulation“ hinsichtlich Spurrinnenbildung und Ermüdung untersucht. Dazu wurde ein FE-Modell mit typischen Eigenschaften von flexiblen Asphaltüberbauten entwickelt und mit landestypischen Klimabedingungen für die verschiedenen Kontrollmodi untersucht. Folgende 4 laterale Kontrollmodi wurden untersucht:

1. Spurgenaues fahren („zero-wander mode“)
2. Uniform mode
3. Double peak Gaussian mode
4. Two-section uniform mode

Zusätzlich wurden Vergleiche zwischen der Spurtreue von automatisch gesteuerten LKW und der Spurtreue von manuell gelenkten LKW angestellt. Damit wurden dann verschiedene Auftretenswahrscheinlichkeiten von Platoons (Marktdurchdringungsraten) evaluiert.

Die Simulationsergebnisse haben gezeigt, dass autonome LKW, deren Spurführung durch das Verkehrsmanagement kontrolliert wird, sogar äußerst vorteilhaft für die Lebensdauer und Nutzung von Asphaltstraßen sind. Dem entgegen steht jedoch, dass ein unkontrollierter Einsatz von autonomen LKW, die erwartungsgemäß alle mehr oder weniger genau derselben zentrierten lateralen Spur folgen („zero-wander mode“), sich negativ auf die Lebensdauer von flexiblen Straßenoberbauten auswirken könnte. Bei einer Spurrinnen-Eingreiftiefe von 15mm (wie sie in China vorgegeben ist) wird der Zeitpunkt für eine notwendige Erhaltungsmaßnahme der Studie zu Folge beim zero-wander mode Szenario bereits 1,56 Jahre früher als bisher erreicht, und Ermüdungsschäden steigen um 146 %.

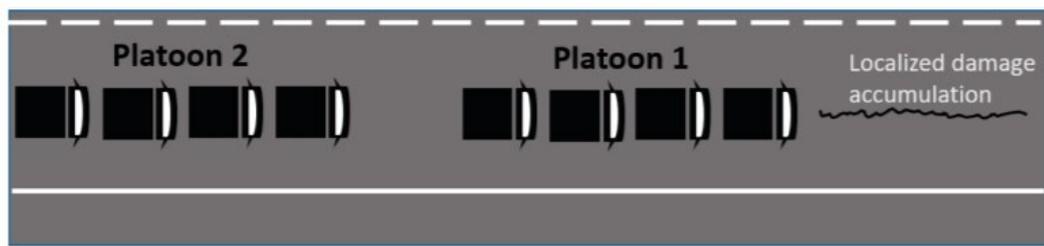
Von den analysierten lateralen Regelungsmodi ergab nur der zero-wander mode eine negative Auswirkung auf die Lebensdauer von Asphaltstraßen. Die anderen 3 Modi wirkten sich in unterschiedlichem Ausmaß positiv auf die Lebensdauer aus. Im Vergleich zur heutigen Situation stellt der two-section uniform distribution mode den effektivsten Kontrollmodus dar, bei dem Erhaltungszeitpunkte um bis zu 2,3 Jahre nach hinten rücken würden. Hinsichtlich der Ermüdung ergibt sich mit diesem Kontrollmodus eine gleichförmigere Verteilung über den Spurquerschnitt. Bei einem Grenzfall mit 100 % autonomen LKW könnten im two-section uniform distribution mode die Ermüdungsschäden um bis zu 35 % geringer werden.

Die Studie bezieht sich auf Asphaltstraßen, die den Bemessungsrichtlinien in China folgen. Es wurden ausschließlich die Auswirkungen der Spurführungskontrollmodi auf den Straßenoberbau berechnet. Der Effizienzverlust beim Treibstoffverbrauch gegenüber spurgenaue Platoons wurde nicht betrachtet. In dieser theoretischen Studie für chinesische Straßen wurde von sehr hohen Marktdurchdringungsraten von autonomen LKW ausgegangen, mit denen im realen Straßenverkehr in naher Zukunft in dieser kontrollierten Form nicht zu rechnen ist.

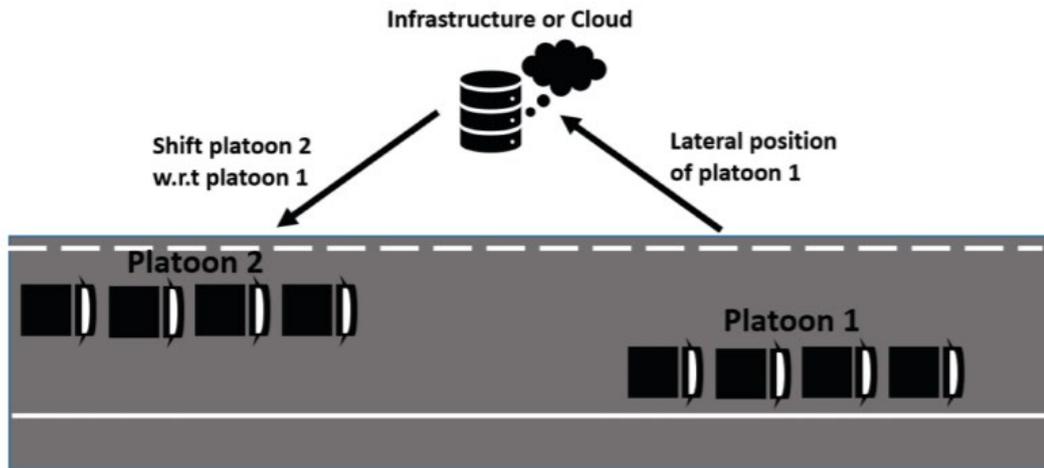
USA: Projekt OBLAT - Optimization of Lateral Position of Autonomous Trucks (Gungor und Al-Qadi 2020a) und WANDER2D – a flexible pavement design framework for autonomous and connected trucks (Gungor und Al-Qadi 2020b)

Die Universität Michigan hat ähnliche Untersuchungen wie die Tongji University durchgeführt und mehrere Studien zur Untersuchung von Effekten kontrollierter Spurvariation bei LKW-Platoons in den USA publiziert. Dazu wurden die Möglichkeiten und die Effekte von kontrollierter Spurvariation auf den Oberbau untersucht. Das Ziel der Untersuchung war es die kanalisierten Lastwechsel von Platoons aufzubrechen und gesteuert so zu variieren, dass sich kein negativer Effekt auf den Oberbau durch Platooning ergibt und des Weiteren das potentielle Problem sogar zu einer Chance für Kosteneinsparung werden kann. Die Steuerung sollte dabei über V2I Kommunikation direkt in die Fahrzeuge erfolgen.

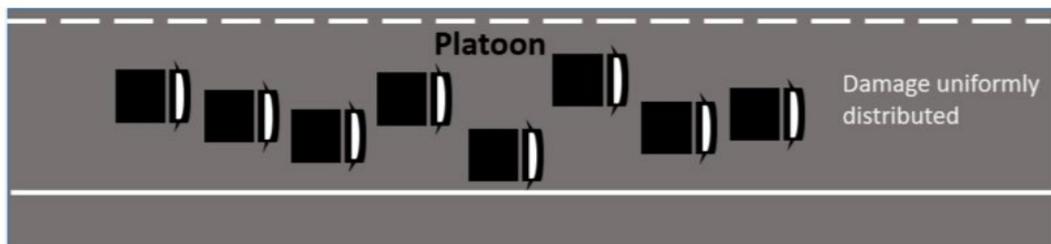
Das Ergebnis ist eine Kontrollstrategie für eine Flotte von LKW-Platoons die den Einfluss auf den Oberbau für diese Flotte minimiert und so die Erhaltungskosten reduziert. Die vorgeschlagene Strategie wurde in einer Case Study demonstriert und ergab sehr hohe Einsparungspotential für die Erhaltungskosten von bis zu 0,5 Millionen US\$/Meile oder bis zu 50 %, in Abhängigkeit von Oberbaustärke und Gesamtverkehrsbelastung. Die nachfolgende Grafik zeigt den Base Case von LKW-Platoons die sowohl innerhalb des Platoons als auch von einem Platoon zum nächsten Platoon spurgenaue fahren sowie die untersuchten Optimierungsszenarien.



(a) Default scenario: There is no lateral offset between the platoons



(b) Possible optimized scenario: Optimization of lateral position of platoons using V2I communication



(c) Further optimization of lateral position of platoons using V2V communication

Abbildung 4: Verschiedene Layouts zur Optimierung der lateralen Position von LKW in Platoons (Gungor und Al-Qadi 2020a)

Im Base Case (a) wurde einerseits der spurgenaue Effekt aber auch die Auswirkung der kürzeren Abstände von Achslastwechseln, die eine Relaxation des Asphalt zwischen den Belastungen verhindern und so die Lebensdauer des Asphalt reduzieren sollten, betrachtet.

Als Optimierung wurden zwei Varianten der Vernetzung zugrunde gelegt. In Abb. (b) wird von einer zentralisierten Steuerung der Platoons durch eine Verkehrsmanagementzentrale ausgegangen, die über V2I Vernetzung den Platoons eine laterale Spur zuweist. Abhängig

von der Fahrspurbreite werden dabei den Platoons unterschiedliche laterale Spuren zugewiesen um die Auswirkungen auf die Asphaltstraßen zu minimieren. Diese Variante stellte aus Sicht der Studienautoren die effektivste Verkehrsführung dar, da sowohl die Treibstoffeinsparung durch den Windschatteneffekt maximiert und gleichzeitig der Oberbau geschont werden. Jedoch sind damit umfassende Investitionen im Verkehrsmanagement erforderlich, die eine durchgängige V2I Kommunikation erst ermöglichen.

Im letzten Fall (c) wird von einer dezentralisierten Steuerung der Spurführung ausgegangen, die durch V2V Kommunikation zwischen den LKW gesteuert wird. In der Studie wurde dabei der Trade-off zwischen Treibstoffeffizienzverlusten (bei größeren Spurabweichungen) und Auswirkungen auf die Lebensdauer des Oberbaus berücksichtigt.

Während die Ergebnisse insbesondere für den zentralisierten Steuerungsfall sehr vielversprechend sind, schränken die Autoren dennoch ein, dass erweiterte Untersuchungen erforderlich sind um eine ganzheitliche Betrachtung zu ermöglichen.

Österreich: Projekt OBESTO (Blab et al. 2014)

Im Projekt OBESTO wurden das Schadenspotential von LKW auf den Oberbau sowie deren durchschnittliche Auftretenswahrscheinlichkeit im österreichischen hochrangigen Straßennetz im Detail untersucht. Dies bietet eine gute Basis für die folgenden Betrachtungen in diesem Projekt.

Im Projekt OBESTO wurde festgestellt, dass eine Aktualisierung des Schadenspotentials dringend erforderlich ist. Die bis dahin verwendeten Faktoren für die Zusammensetzung des Schwerverkehrskollektivs wichen deutlich von dem realen Schwerverkehr auf den österreichischen Straßen ab. Die in Österreich vorrangig anzuwendende Richtlinie zur Straßendimensionierung RVS 03.08.63 (FSV 2016) wurde aus diesem Grund in Folge des Projektes 2016 überarbeitet. Dabei wurde insbesondere der Äquivalenzfaktor für das Schwerverkehrskollektiv auf Basis der Auswertung von Mautdaten am ASFINAG-Netz und BWiM-Daten auf ausgewählten Brücken neu festgelegt und erhöht. Dazu wurde die Schädigungscharakteristik von verschiedenen LKW-Typen berechnet und umfangreich bewertet. Als Ergebnis wurde der Äquivalenzfaktor für das Schwerverkehrskollektiv in der Aktualisierung 2016 deutlich erhöht. Die nachfolgende Grafik zeigt die Schädigungscharakteristik von verschiedenen Fahrzeugklassen. (Blab et al. 2014)

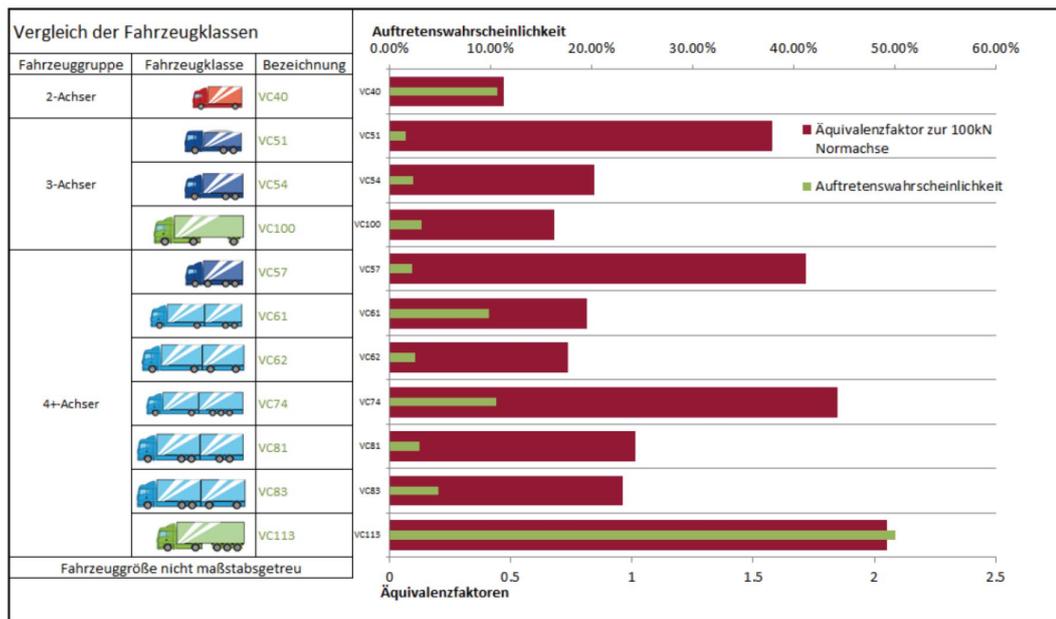


Abbildung 5: Schädigungscharakteristik von LKW auf den Oberbau inkl. Auftretenswahrscheinlichkeit (Blab et al. 2014)

Schweiz: Platooning Studie (Jermann et al. 2017)

In einer Machbarkeitsanalyse wurden Chancen und Risiken des Einsatzes von LKW-Platoons in der Schweiz analysiert. Dazu wurden Experteninterviews mit verschiedenen Stakeholdern durchgeführt und dabei unter anderem auch die zu erwartenden Auswirkungen auf den Straßenoberbau betrachtet. Es wurde zwischen statischen (bei stehendem Verkehr) und dynamischen (bei fahrendem Verkehr) Einwirkungen auf die Infrastruktur unterschieden. Bedenken wurden geäußert, dass Platooning bei Kunstbauten zu dynamischen Belastungen führen könnte, auf die bestehende Bauwerke nicht dimensioniert sind. Hinsichtlich des Straßenoberbaus wurde auf Basis der Experteninterviews jedoch davon ausgegangen, dass vom Platooning keine Einwirkungen (statisch und dynamisch) erwartet werden, welche kritisch werden könnten. Die Studienautoren kamen bereits bei einer Studie zu Gigalibern 2011 zu den Erkenntnissen, dass auf Hochleistungsstraßen die ständigen dynamischen Einwirkungen wie Erschütterung oder Lastzyklen keine neuen Lastfälle darstellen, sondern ggf. sogar geringere Belastungen für den Oberbau bedeuten können.

Niederlande: Studie zu Auswirkungen von LKW-Platoons auf niederländische Straßen (Bouchihati 2020)

In einer Diplomarbeit an der TU Delft wurde auf Basis einer Literaturrecherche, Experteninterviews und einer rechnerischen Analyse von 3 verschiedenen Platooning

Szenarien eine Aussage zu Auswirkungen von LKW-Platoons auf den Straßenoberbau niederländischer Straßen getroffen. Unterschieden wurden dabei folgende 3 Platooning Szenarien:

- Gemeinsame LKW-Platoon Steuerung durch einen Lead LKW ausschließlich in Längsrichtung
- Gemeinsame LKW-Platoon Steuerung durch einen Lead LKW in Längs- und Querrichtung
- Spurgenaues Fahren aller LKW-Platoons – der Lead LKW eines Platoons folgt derselben Spur wie der Platoon vor ihm (Szenario zu autonomen LKW-Platoons)

Das letzte Szenario wird in der Studie als das einzige Szenario identifiziert, aus dem sich tatsächlich negative Auswirkungen auf den Straßenoberbau im Straßennetz von Rijkswaterstaat ergeben. Für das Schadensbild Ermüdung wird von einer bis zu doppelt so hohen Belastung im Vergleich zur aktuellen Verkehrsbelastung ausgegangen, wobei sich das Schadensbild aus einer Kombination von Spurrinnenbildung und Ermüdung ergibt.

Auch in den Niederlanden wird die Oberbaubemessung anhand von aufnehmbaren Lastwechseln bis zur Ermüdung der Tragschicht berechnet und grundsätzlich für eine Lebensdauer von 20 Jahren ausgelegt. Der Studienautor hat seine Erkenntnisse einerseits auf dieses Schadensmodell bezogen, zusätzlich aber auch das Schadensmodell für Spurrinnenbildung und Ausmagerung untersucht. Ausmagerung ist demzufolge das erhaltungskritische Merkmal für Deckschichtsanierungen. Bei einem Platooning Anteil von > 50 % des gesamten Schwerverkehrs würde sich dies von Ausmagerung zur permanenten Verformung in Form von Spurrinnenbildung verlagern und bereits frühzeitigere Maßnahmen erforderlich machen, als in bisher gültigen Erhaltungsstrategien vorgesehen. Das Schadensmerkmal Ausmagerung ist in erster Linie abhängig von klimatischen Einflüssen und würde von Platooning weitestgehend unberührt bleiben. Eine frühzeitige (vor den bemessenen 20 Jahren) Ermüdung aufgrund von Platoons ist erst ab einem Einsatz von > 50 % autonomer Platoons, die alle in derselben Spur fahren zu erwarten. Die Erkenntnisse basieren auf groben Näherungsverfahren.

Projekt MANTRA (Ulrich et al. 2020)

Im bereits erwähnten Projekt MANTRA wurden in Expertenworkshops auch die Auswirkungen von LKW-Platoons bewertet. Dabei wurden zwei verschiedene LKW-Platoon Konstellationen analysiert – einmal ein Platoon aus zwei europaweit zugelassenen Sattelzügen mit je 16,50 m

und max. 44 Tonnen (multimodal, ansonsten 40 Tonnen) sowie ein mögliches „worst case“ Zukunftsszenario mit einem Platoon aus drei Gigalinern mit bis zu 80 Tonnen. Das zweite Szenario ist aus österreichischer Sicht mit den Straßengeometrien am hochrangigen Netz unrealistisch und wird hier nicht weiter erläutert.

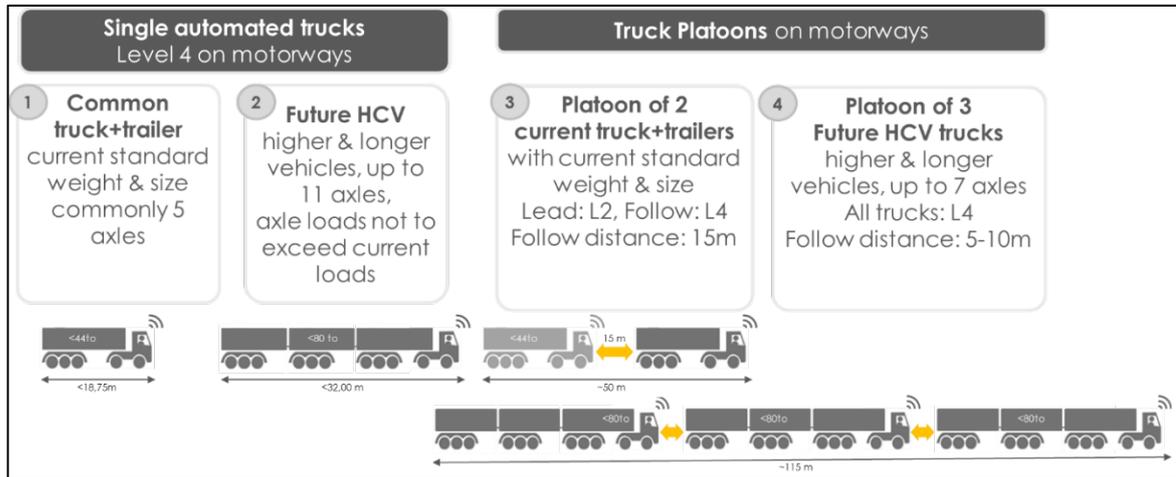


Abbildung 6: Automatisierte LKW und LKW-Platoon Layouts im Forschungsprojekt MANTRA

Hinsichtlich der Auswirkung auf den Oberbau kamen die Experten zu dem Schluss, dass bei einer entsprechenden Marktdurchdringung von LKW-Platoons auch bei gleichbleibenden Achslasten ohne Reglementierungen von Spurvariationen mit erhöhten Belastungen und verkürzten Erhaltungszyklen auf Asphaltstraßen zu rechnen ist. Dafür haben finnische Experten auf Basis der in Kapitel 0 genannten Studien auf die potentiell sogar positiven Effekte einer gezielten Spurvariation bei LKW-Platoons hingewiesen. Da jedes Land eigene, unterschiedliche Dimensionierungsstandards für Asphaltstraßen hat, wurde in die Road Map aufgenommen, dass jedes Land seine Dimensionierungsstandards hinsichtlich einer Eignung für LKW-Platoons prüfen soll.

Für Betonstraßen wurden mögliche schnellere Kantenabbrüche und Fugenverschleiß durch spurgenaue fahrende LKW als mögliche Verschlechterung identifiziert, jedoch nicht als kritisch betrachtet.

Studien zu Auswirkungen von „Gigalinern“ auf den Straßenoberbau

Im vorliegenden Projekt, wird gemäß der Forschungsanforderungen davon ausgegangen, dass bei derzeit geplanten Platoons lediglich LKW, die den derzeitigen Gewichtsbeschränkungen entsprechen, zum Einsatz kommen und Platooning strikt vom Thema „Gigalinern“ bzw. „60-Tonnen-LKW“ getrennt wird. Dies ist auch die Basis der

Herangehensweise in AP4 zur Betrachtung der Auswirkungen auf den Straßenoberbau. Da es im Wesentlichen keinen analytischen Stand der Technik zu LKW-Platooning gibt, wurden als Richtwert auch Studienergebnisse zu Gigalinern überblicksmäßig betrachtet. Mit 25,25 Metern sind "Gigaliner" um 6,5 Meter länger als herkömmliche LKW und dürfen in einigen Ländern auch Lasten von bis zu 60 Tonnen, also deutlich über der europäischen Grenze von 44 Tonnen (multimodal), transportieren.

Die Ergebnisse hinsichtlich zusätzlicher Schädigung des Oberbaus fallen in den verschiedenen europäischen Ländern sehr unterschiedlich aus. Dies deutet vor allem darauf hin, dass das Thema durchaus abhängig von der Durchsetzungsstärke der verschiedenen Interessensvertreter ist, als den tatsächlichen zu erwartenden Einfluss auf den Straßenoberbau zu bewerten. Das EU-Parlament hat sich im März 2015 gegen eine allgemeine Zulassung der Megatrucks innerhalb der Europäischen Union ausgesprochen. Die Entscheidung blieb damit Ländersache, grenzüberschreitende Transporte müssen mit den betroffenen Ländern ausverhandelt werden. Für den Zweck dieses Projekts wurden nur Studien der Europäischen Kommission und aus dem mitteleuropäischen Raum ausgewertet, da hier die Bauweisen und Dimensionierungsstandards des Straßenoberbaus ähnlich sind.

Eine Studie der Europäischen Kommission kam zu dem Ergebnis, dass der Asphalt sich unter Be- und Entlastung nicht nur spontan sondern zusätzlich zeitabhängig verformt. Daraus konnte abgeleitet werden, dass Lastpausen im Bereich zwischen 0,1 und 4 Sekunden die Verformung des Asphalts nicht unterschiedlich beeinträchtigen (Christidis und Leduc 2009).

In Österreich hat die ASFINAG eigene Bewertungen zu Gigalinern gemacht und sich bereits 2012 vehement gegen eine Erlaubnis für die längeren und schwereren LKW in Österreich ausgesprochen. Detaillierte Analysen zu Auswirkungen auf den Oberbau sind nicht bekannt.

Eine Schweizer Studie kam zu dem Ergebnis, dass die Zulassung von Gigalinern grundsätzlich zu begrüßen wäre. Auch betreffend Tragfähigkeit des Oberbaus wäre eine Zulassung von Gigalinern, insbesondere auf dem Hochleistungsstraßennetz möglich. Generell würde gelten, dass bei dicken, gut konstruierten Aufbauten durch Gigaliner Verschleißerscheinungen nur an der Oberfläche auftreten würden, da sie eine gleiche oder geringere Achslast aufweisen als herkömmliche schwere Nutzfahrzeuge. Wenn die Oberflächenschäden über längere Zeit nicht behoben würden, wären Strukturschäden möglich. Da die Dimensionierungsgröße für die Bestimmung der Zusammensetzung und Dicke des Aufbaues im Falle einer Zulassung von Gigalinern, insbesondere im Falle eines erhöhten maximalen Fahrzeuggesamtgewichts, nicht mehr stimmen würde, könnten diese Schäden häufiger auftreten- Somit würden bei keiner

Anpassung der Dimensionierungsgrößen aufgrund nicht berücksichtigter Belastungen häufiger Sanierungen notwendig sein, wobei dies insbesondere die Rückhaltesysteme und Brücken, weniger den Oberbau betrifft (ASTRA 2011).

Untersuchungen der Bundesanstalt für Straßenwesen für deutsche Autobahnen zeigen, dass Gigaliner die Straßen etwa gleich wie herkömmliche schwere Nutzfahrzeuge schädigen. Im Zentrum der untersuchten Varianten steht die Kombination eines konventionellen Sattelzugs mit 16,50 m Länge bzw. mit 13,60 m langem Sattelaufleger mit einem 7,80 m langen Anhänger zu einem Sattel-Gliederzug sowie die eines 12 m langen Lastkraftwagens mit einem Anhänger bestehend aus einem Dolly (Doppelachse mit Zugeinrichtung und Sattelkupplung) und einem darauf aufgesattelten Auflieger. Die Gesamtlänge dieser Kombinationen liegt dann bei 25,25 m, mit einem untersuchten zulässigen Gesamtgewicht von bis zu 60 t. Bei der Abschätzung der Auswirkungen von Lastzugkombinationen mit erhöhten Gesamtgewichten auf die Straßenschädigung wurden zunächst die Aspekte der Spurrinnenbildung analysiert. Hier konnte aufgrund von Laborversuchen darauf geschlossen werden, dass die Lastzugkombinationen mit ihrer dichten zeitlichen Achsfolge voraussichtlich keine erhöhten Schädigungen der Asphaltdeckschicht verursachen werden. Berücksichtigt man zusätzlich die Überlegung, dass sich die Anzahl der Achsen, die zur Beförderung einer Tonne nötig sind, durch den Einsatz von Lastzugkombinationen vergrößert und damit die Achslasten sinken, so kann die Problematik einer verstärkten Spurrinnenbildung durch die zeitlich verkürzte Achsübergangsfolge dieser Fahrzeuge ausgeschlossen werden. Rein rechnerisch ließ sich mit den Ergebnissen zur Straßenschädigung hinsichtlich der Ermüdung und unter Hinzuziehung der Zusammensetzung des gegenwärtigen Schwerverkehrs abschätzen, dass sich die Nutzungsdauern von Straßenaufbauten bei einem angenommenen mittelfristigen 30 %igen Ersatz im Vergleich zu den verkehrenden 40-Tonner durch Lastzugkombinationen in etwa um 5,25 % erhöhen könnten. Aus Feldversuchen zog man des Weiteren die Erkenntnis, dass ein größerer Achsabstand eine höhere Belagsabnutzung (z. B. Ermüdung) verursacht, während umgekehrt ein kleinerer Achsabstand zu einer kleineren Belagsabnutzung führt. (Bundesanstalt für Straßenwesen 2006; Irzik et al. 2016) In Deutschland dürfen Gigaliner seit 2016 in 14 der 16 Bundesländer fahren.

Insgesamt lassen die mittlerweile recht umfangreichen Studien verschiedener Länder zu Gigalinern hinsichtlich Achszahl, Achslastverteilung und Achsabständen durchaus auch Schlüsse auf die Auswirkungen von LKW-Platoons zu und bilden damit eine Basis für erste Abschätzungen in AP4.

3. THEORETISCHE ROBUSTHEITS- UND SENSITIVITÄTSANALYSE

Im Rahmen von AP02 - Theoretische Robustheits- und Sensitivitätsanalyse wurde mittels detaillierter Sensitivitätsanalyse das Potential und Einschränkungen der erreichbaren Spurgenaugigkeit von LKW Lane-Assist-Systemen (LAS) untersucht.

Die rechtlichen Richtlinien für vollautomatisiertes Fahren auf der Autobahn werden zurzeit noch ausgearbeitet, doch schon die heutige Straßenverkehrsordnung sieht vor, dass eine Minimal-Anforderung an ein Lane-Assist-System das Halten des Fahrzeuges innerhalb der Spurbegrenzung einer Fahrspur ist. Aber auch, wie sich das Fahrzeug innerhalb dieses Bereiches verhält, wird reglementiert werden. Andere Verkehrsteilnehmer sollen durch instabiles Schlingern nicht verunsichert werden bzw. über die Intentionen des vollautonomen Fahrzeuges getäuscht werden.

Stand der Technik ist, dass Lane-Assist-Systeme die zur Verfügung stehende Spurbreite maximal nutzen, da die Lokalisierung und Positionierung noch mit relativ großen Unsicherheiten beaufschlagt sind. Es ist jedoch davon auszugehen, dass Sensorik und Algorithmen in Zukunft nennenswerte Verbesserungen zeigen. LKW-Platooning hat möglicherweise den Nebeneffekt, dass vollautonom gesteuerte Fahrzeuge versuchen derselben Zieltrajektorie zu folgen, wie z. B. der Fahrspurmitte, und dies mit einer sehr hohen Präzision bewerkstelligen. Hingegen weisen von Menschen gelenkte Fahrzeuge bezüglich der Position auf der Fahrspur eine relativ große natürliche Streuung auf.

Falls alle LKW auf der Autobahn exakt die gleiche Trajektorie fahren, würde das für den Straßenbelag unter Umständen eine enorme zusätzliche Belastung darstellen und Spurrillenbildung fördern. Zurzeit sind vollautomatisierte LKW-Platoons in Österreich nicht erlaubt. Vorliegende Untersuchung versucht abzuschätzen, welche Effekte durch eine mögliche zukünftige Zulassung auf den Straßenaufbau wirken werden. Dazu ist es notwendig, nicht nur den Stand der Technik, sondern auch noch nicht serienreife und durch neue Entwicklungen mögliche Konzepte der vollautomatisierten Fahrzeugsteuerung abzuschätzen. Dies wird bewerkstelligt, indem sich die Untersuchung auf die Fragestellung der maximal realisierbaren Spurgenaugigkeit von autonom gesteuerten LKW fokussiert.

In einer Sensitivitätsanalyse werden die Auswirkungen von verschiedenen Regelungsstrategien und Parametrierungen auf die tatsächlich gefahrene (hier: simulierten) Fahrtrajektorie untersucht. Die Simulationen werden mit der Fahrdynamik-Simulation der

Software PC-Crash durchgeführt. Alle Aussagen gelten für eine konstante Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h.

Eine repräsentative Sammlung von unterschiedlichen Simulations-Szenen wurde erstellt in denen die LKW-Typen, Beladungszustände, Kurvenverläufe, Regelungskonzepte und Regler-Parameter gestreut werden. Für die Auswahl der Typen und Beladungszustände wurde auf vom BMVIT erhobene Verkehrsstatistiken an neuralgischen Verkehrsknotenpunkten in Österreich zurückgegriffen.

Die mittlere zu erwartende Spurabweichung ist in folgendem Plot dargestellt. Es ist die statistische Verteilung der seitlichen Abweichung des LKW-Schwerpunktes um die ideale Solltrajektorie aufgetragen. Unterschieden wird dabei in kurvige (Diagramm oben) und gerade (unten) Streckenabschnitte. Die Abweichung ist annähernd normalverteilt.

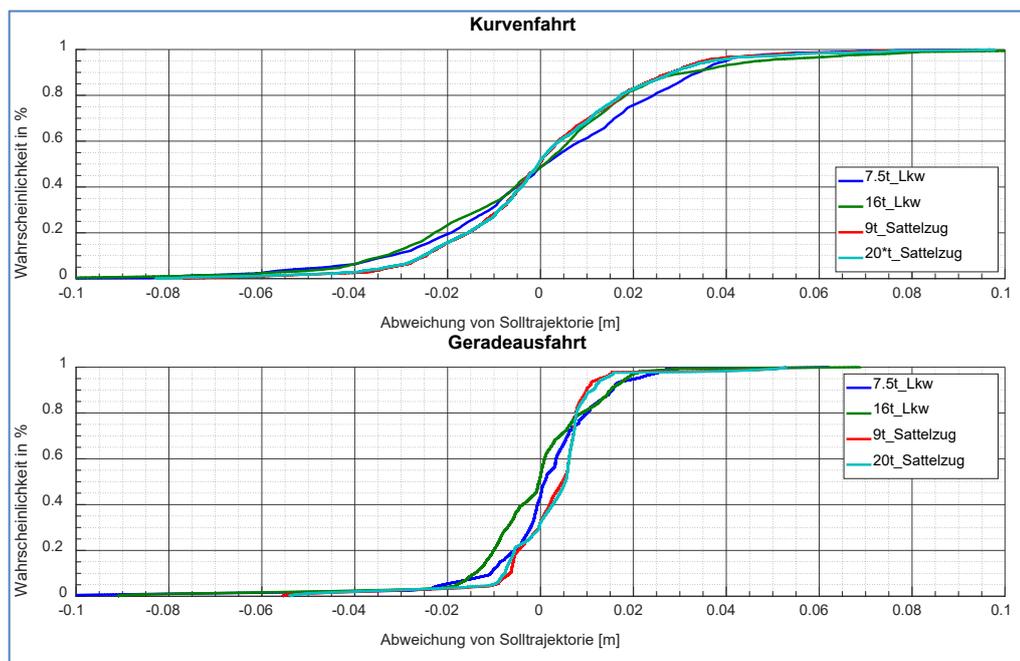


Abbildung 7: Mittlere zu erwartende Spurabweichung bei Solltrajektorie

Wie zu erwarten war, ist die Abweichung auf einem geraden Streckenabschnitt sehr viel kleiner als bei Kurvenfahrten. Verursacht wird die Abweichung durch die in der Simulation verwendeten Modelle der Aktuatorik und Regelalgorithmik. Ein LKW wird frei von äußeren Störungen und angenommener idealisierter Lokalisierung und Pfadplanung bei der Verwendung üblicher Regelungsalgorithmen nicht weiter als $\sim \pm 10$ cm von der idealen Solltrajektorie abweichen. Das heißt ein sehr präzises Fahren ist theoretisch möglich.

In der realen Anwendung vergrößert sich die Abweichung von der idealen Trajektorie noch aufgrund von Fehlern in Sensorik, Lokalisierung und Feinpositionierung. Aussagen über die mögliche zukünftige Genauigkeit der Lokalisierung, beispielsweise über Differential-GPS in Kombination mit SLAM (simultaneous localization and mapping), werden im Rahmen der Auswertung bewusst nicht gemacht. Stattdessen wird eine Intervallbasierte Aussage getroffen. Als Abschätzung für die erreichbare minimale Spurabweichung ist der in dieser Untersuchung ermittelte Wert anzunehmen. Für die tatsächliche Spurabweichung, die ein LAS mit Stand der Technik erreichen kann, wird mittels einem aus der Literatur entnommenen Wertes für die Spurerkennungsgenauigkeit eines visuellen Spurerkennungssystems eine realistische Abschätzung getroffen.

In Studien zur Nutzung der Fahrstreifenbreite von menschlich gelenkten LKW auf Autobahnen wird für die Spurtreue eine Streuung von ± 20 bis ± 60 cm von der Fahrstreifenmitte angegeben. Unter der Annahme, dass es beabsichtigt ist, mit einem LKW genau in der Mitte eines Autobahnfahrstreifens zu fahren, ergibt sich folgendes Diagramm:

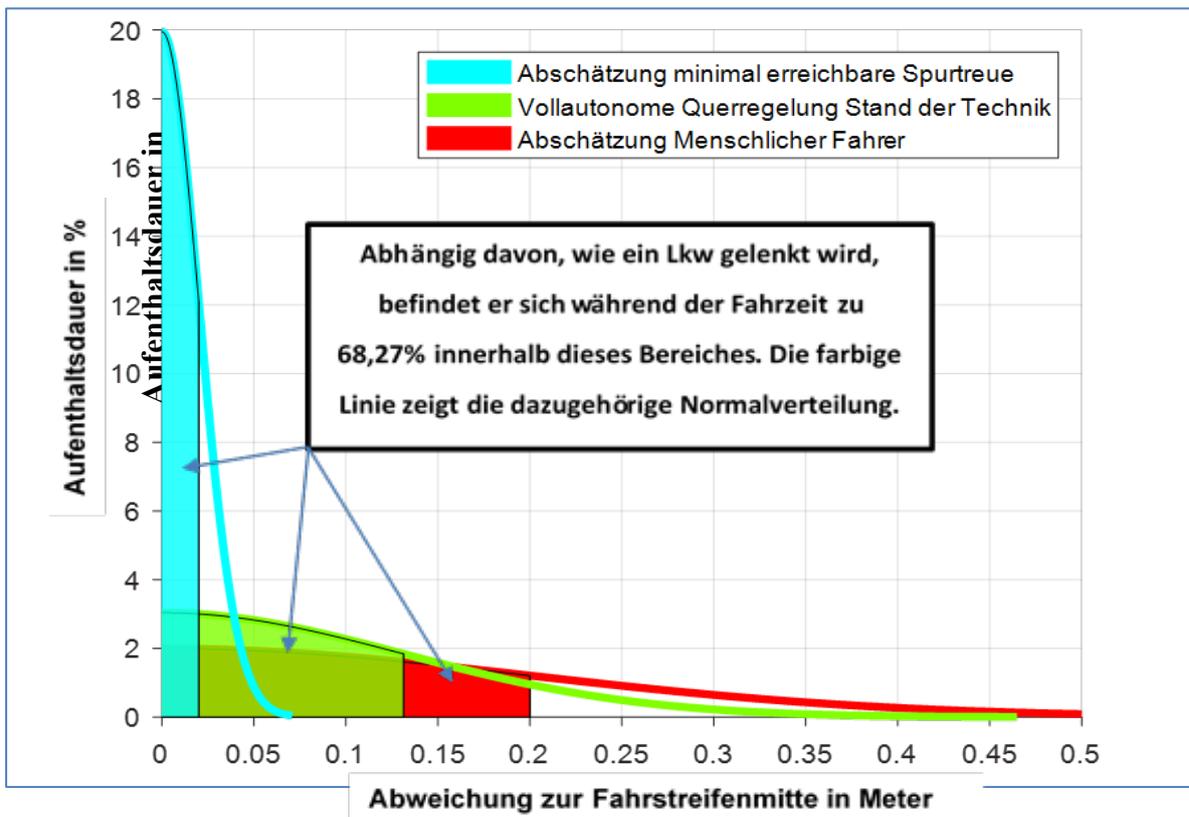


Abbildung 8: Spurtreue im Vergleich Technik und menschlicher Fahrer

Es kann daraus abgeleitet werden, dass sich vollautonom gelenkte LKW zukünftig im besten Fall mit idealer Sensorik, Lokalisierung und Positionier-Möglichkeit innerhalb eines Fahrschlauches mit der unteren Grenze von ± 2 cm und der oberen Grenze ± 13 cm um die ideale Solltrajektorie bewegen werden. Sollte für das LKW-Platooning die Regelstrategie ein exaktes Folgen des Vorderfahrzeuges vorsehen, um eine maximale Nutzung des Windschatteneffekts zu erzielen, bedeutet das eine höhere Belastung des Straßenoberbaus. Eine kleinere Fläche im Straßenquerschnitt wird mehr Überrollungen sehen, was Spurrinnenbildung fördern könnte.

Eine mögliche Vermeidung dieser zusätzlichen Belastung für die Straßeninfrastruktur könnte sein, gesetzlich einen minimalen Spurversatz von autonom hintereinanderfahrenden Fahrzeugen innerhalb eines Platoons vorzuschreiben. Denkbar ist auch, dass ein LKW-Platoon immer einen Versatz zur Trajektorie des Vorgänger-Platoons einhalten muss, aber innerhalb des Platoons exaktes Folgen erlaubt ist.

4. WINDSCHATTENEFFEKTE

In dem Arbeitspaket 3 wurde die Auswirkung des Spurversatzes auf den Windschatteneffekt simulatorisch untersucht. In einem ersten Schritt wurde eine Geometrie festgelegt und aufbereitet. Für die Simulationen zur Beurteilung des Spurversatzeinflusses auf den Windschatteneffekt wurde eine generische LKW-Geometrie verwendet (Devesa und Indinger 2011). Die generische LKW-Geometrie war ein Durchschnitt aus drei realen Fahrzeugen von namenhaften OEMs. Weiters wurde ein passendes Simulationssetup erstellt. Es wurde der Spurversatz eines 3er Platoons für sechs unterschiedliche LKW-Abstände zwischen 6m und 56m mit Spurversätzen von 0.5m bis 1m für die Fahrgeschwindigkeit 80km/h betrachtet. Weiters wurde eine 2er Platoon für den Fall 22m mit zwei unterschiedliche Spurversätzen untersucht. Für alle untersuchten Szenarien wurde der zweite LKW mit dem entsprechenden Spurversatz betrachtet.

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte auf Basis des simulatorisch bestimmten Luftwiderstandsbeiwertes. Dieser wurde zur Berechnung einer Verbrauchsreduktion reduziert. Unter Verwendung eines Formfaktors und den Simulationsergebnissen für die Reduktion des Luftwiderstandsbeiwertes kann auf eine relative Verbrauchsreduktion geschlossen werden.

4.1. Simulationsergebnisse 3er Platoon

Abbildung 9 zeigt grafisch den Verlauf der relativen Treibstoffeinsparung über den LKW-Abstand und den Spurversatz.

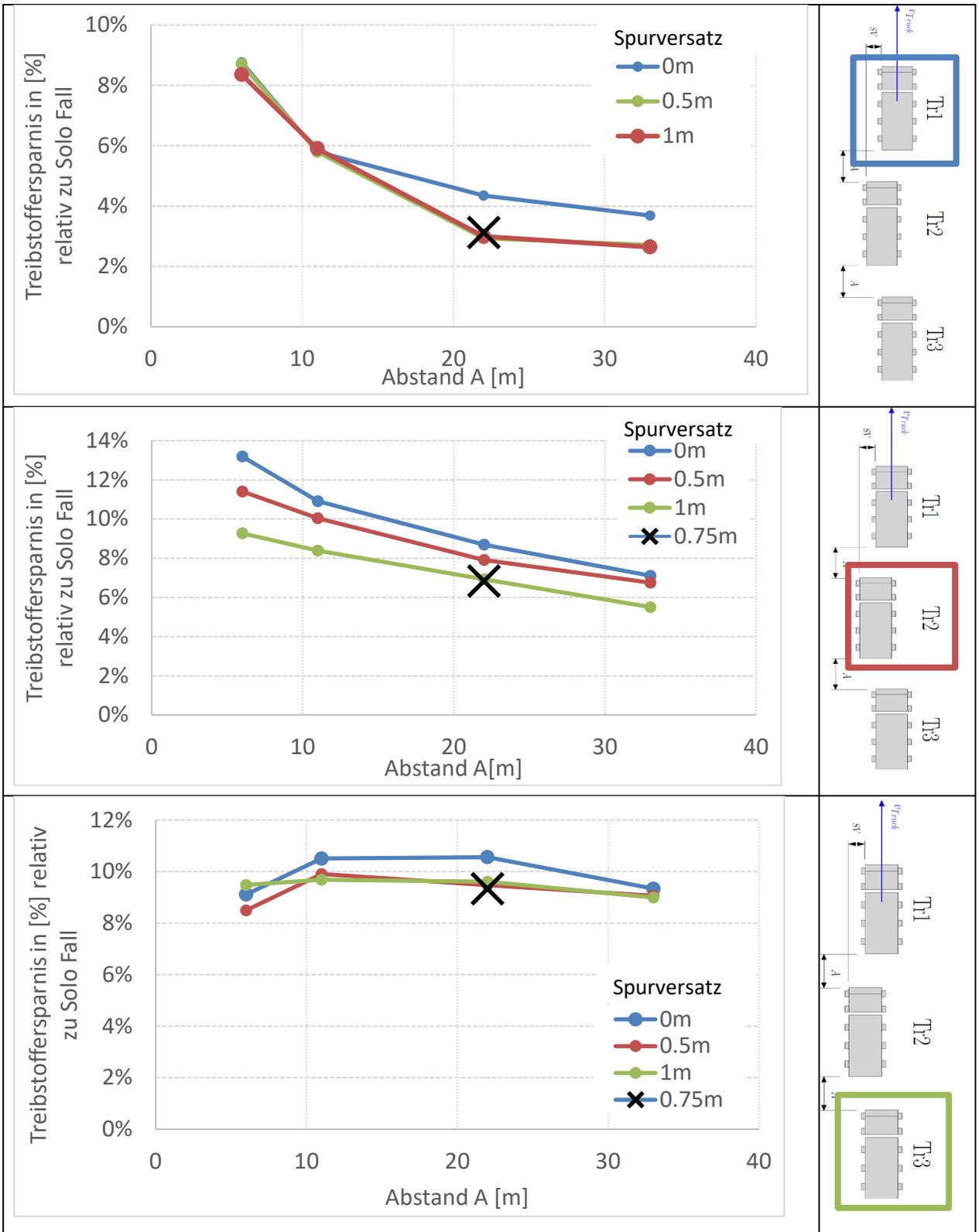


Abbildung 9: Treibstoffeinsparung über Fahrzeugabstand und Spurversatz

In der obersten Abbildung wird der Sachverhalt für den vordersten LKW dargestellt. Man erkennt, dass bei 0 m Spurversatz die Treibstoffeinsparung bei geringstem LKW-Abstand am höchsten ist. Da bei geringem Abstand der statische Druck, welcher sich vor dem hinterherfahrenden LKW anstaut, eine positive Wirkung auf den sonst sehr geringen Unterdruck auf der Hinterseite des vorderen LKW hat. Wodurch der negative Druckkraftanteil auf der Rückseite abnimmt und sich folglich der Strömungswiderstand verringert. Da das Gebiet mit angestautem Druck auf der LKW Vorderseite endlich groß ist, wie in Abbildung 10 gezeigt, nimmt dieser Effekt bei größeren LKW-Abständen ab, wodurch sich die Treibstoffeinsparung verringert.

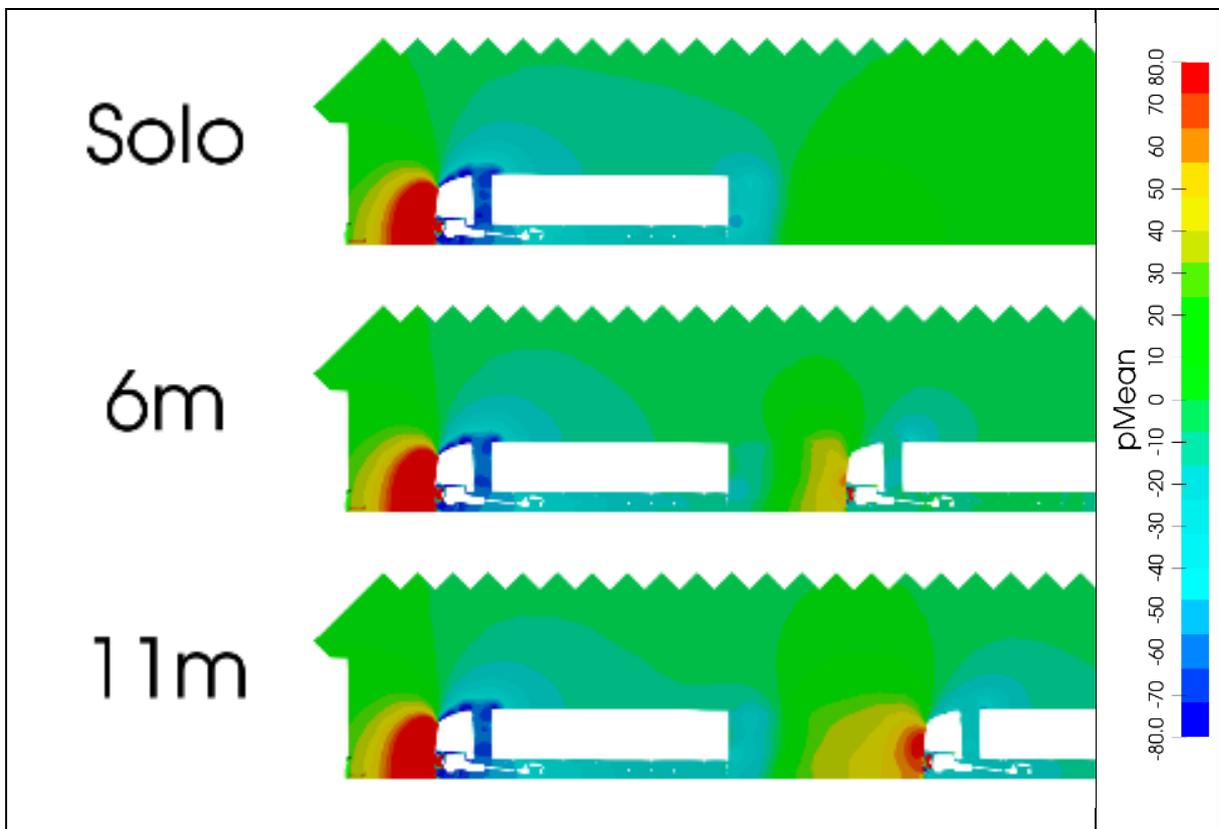


Abbildung 10: Längsschnitte des statischen Druckes für den Solo, 6 m und 11 m Fall

Beim Spurversatz zeigt sich, dass das Optimum der Treibstoffeinsparung bei 0 m Spurversatz liegt. Man erkennt, dass sich für den ersten LKW ein einheitliches Verhalten einstellt, unabhängig von der Spurversatzdistanz. Die mittlere Abbildung in Abbildung 9 zeigt die Verläufe für den mittleren LKW. Auch hier ist ersichtlich, dass das sich Optimum der Treibstoffeinsparung ebenfalls bei dem geringsten Spurversatz einstellt. Hier kommt zum Aufstauen an der Rückseite auch die dazugehörige Reduktion des statischen Druckes an der Vorderseite (Abbildung 10) hinzu, wodurch sich der Strömungswiderstand weiter reduziert. Die

unterste Grafik in Abbildung 9 visualisiert die Verläufe für den letzten LKW. Für Abstände ab 22m zwischen den Fahrzeugen zeigt sich immer der geringste Luftwiderstand für den letzten LKW, was darauf hindeutet, dass sich der Effekt der gegenseitigen Beeinflussung des Nach- und Vorlaufes stark verringert. Bei geringem Abstand profitiert, wie oben erwähnt der zweite LKW von dem nachfahrenden letzten LKW durch die gegenseitige Beeinflussung von Nach- und Vorlaufgebiet, was zu einer Verringerung der Treibstoffeinsparung für den letzten LKW führt. Ähnlich wie für den ersten LKW kommt es zu einer geringen Treibstoffeinsparung für Fahrten mit Spurversatz.

Bezüglich des gesamten LKW-Platoons ist die mittlere Treibstoffeinsparung der wichtigste Indikator. Dieser Verlauf wird in Abbildung 11 dargestellt und es zeigt sich, dass auch hier das größte Potenzial wieder bei den geringsten LKW-Abständen sowie geringsten Spurversatz liegt.

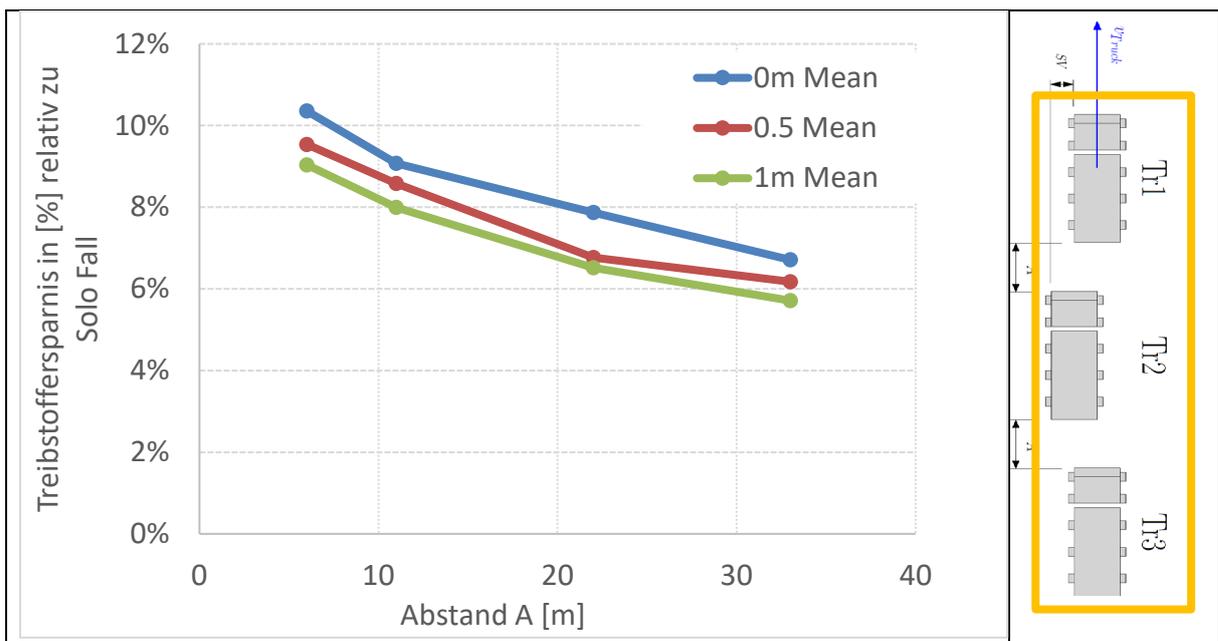


Abbildung 11: Mittlere Treibstoffeinsparung über Fahrzeugabstand und Spurversatz

Um die auftretenden Phänomene noch besser zu veranschaulichen, werden in Abbildung 12 am Beispiel des 33 m Falles die untersuchten Spurversätze an Hand von Schnittbildern (Höhenschnitte) gezeigt. Bei dem Fall ohne Spurversatz ergibt sich ein perfekt symmetrisches Geschwindigkeits- sowie Druckfeld. Diese Symmetrie hat auch eine symmetrische An- und Abströmung auf Vorder- und Hinterseite des LKW zu Folge, welches auf den Strömungswiderstand bezogen, das Optimum darstellt.

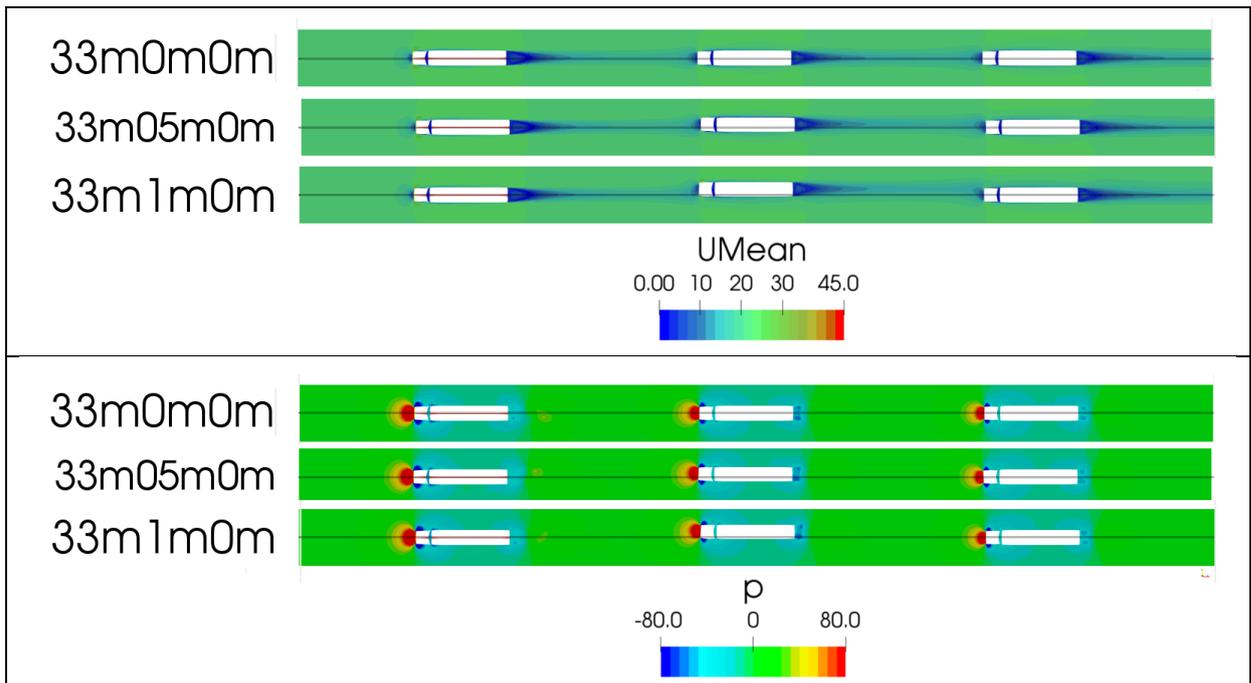


Abbildung 12: Auswirkungen des Spurversatzes auf die mittlere Strömungsgeschwindigkeit und Druck

Die gezeigten Ergebnisse der Treibstoffeinsparung werden in Abbildung 13 in Kennfeldform dargestellt. Der Vorteil einer solchen Darstellung liegt in der sehr anschaulichen Verdeutlichung der Sensibilität auf Einflussparameter (LKW-Abstand und Spurversatz).

Diese legen einen nahezu planaren Zusammenhang nahe, da das Optimum der Einsparung in der linken oberen Ecke mit geringen LKW-Abstand und kein Spurversatz anzufinden ist. Sowie die geringsten Einsparungen auf der gegenüberliegenden Ecke angesiedelt sind, mit größtem Abstand und maximal betrachtetem Spurversatz.

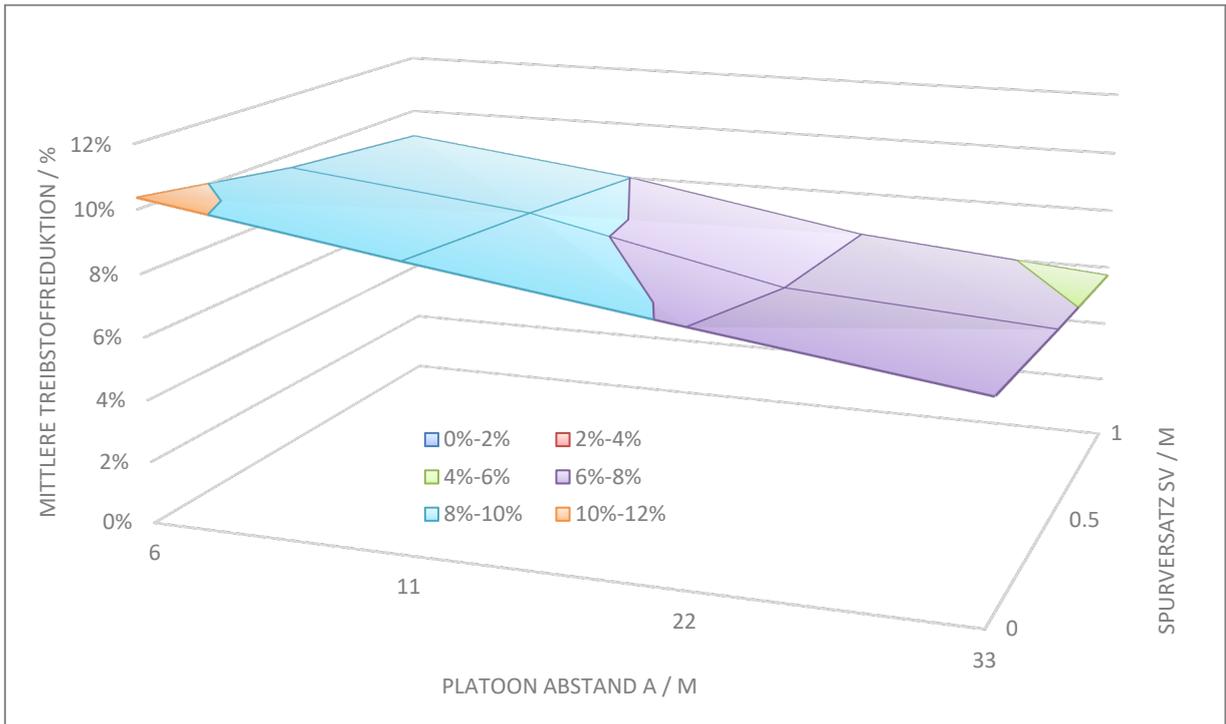


Abbildung 13: Kennfeld „Spurversatz“

4.2. Simulationsergebnisse 2er Platoon

Im Zuge des Projekts wurde auch ein Platoon bestehend aus zwei LKW untersucht. Dabei wurde dieselbe Geometrie wie bei den 3er Platoon Simulationen verwendet. Es wurde nur ein Szenario, mit einem Abstand von $A = 22 \text{ m}$ untersucht.

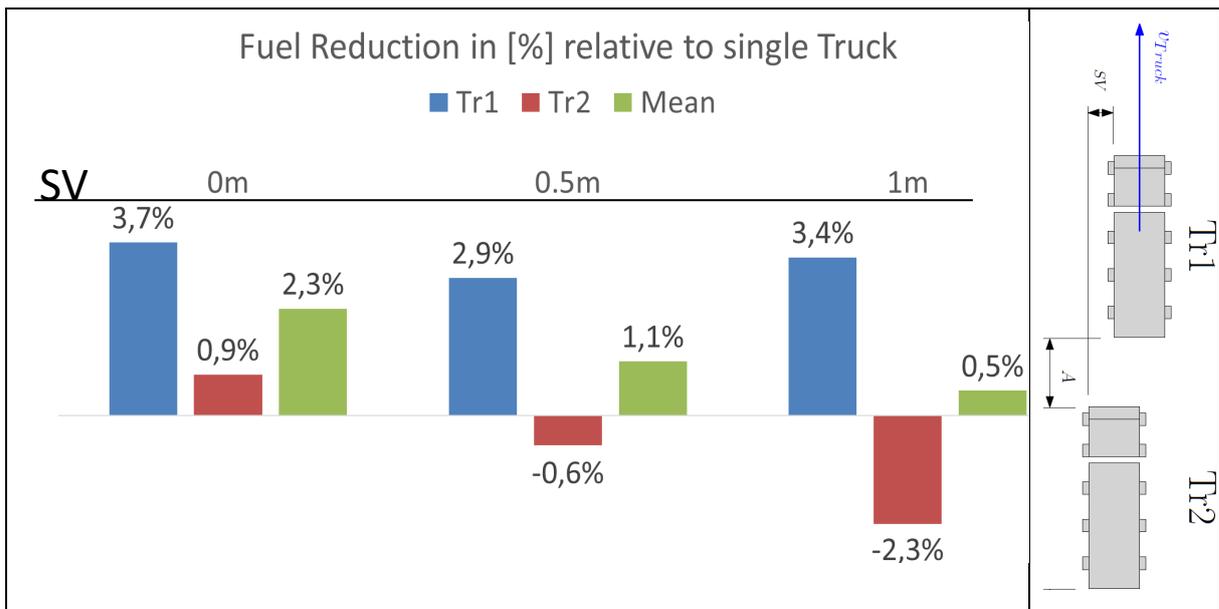


Abbildung 14: Einsparungspotenzial 2er Platoon für $A=22\text{m}$

Abbildung 14 vergleicht die CFD Ergebnisse des 2er Platoons für die Spurversatz-Abstände $SV = 0/0,5/1,0\text{ m}$. Für den Fall mit $SV = 0\text{ m}$ ergibt sich für den ersten LKW dieselbe Einsparung wie für denselben im 3er Platoon, da dieser nur im Nachlauf beeinflusst wird. Für den nachfolgenden LKW fällt der positive Einfluss auf das Nachlaufgebiet weg, wodurch die Treibstoffeinsparungen für diesen bei weitem geringer ausfällt. Bezüglich des Spurversatzes kann gezeigt werden, dass der Einfluss des Spurversatzes stärker ausfällt als bei den 3er Platoon Fällen. Während bei den 3er Platoon Fällen es für jede untersuchte Konfiguration zu einer Einsparung für alle LKW kommt, zeigt sich in Abbildung 14, dass schon ein Spurversatz von $SV = 0,5\text{ m}$ für den zweiten LKW eine Erhöhung im Treibstoffverbrauch ergibt. Im Platoon Mittel kann diese Erhöhung des Treibstoffverbrauchers kompensiert werden, sodass sich eine Treibstoff Einsparung für jeden Spurversatz ergibt.

4.3. Zusammenfassung

Zusammenfassend zeigten die CFD Ergebnisse, dass die Auswirkungen bzgl. Treibstoffeinsparung bei Spurversatzfahrten im 3er Platoon nur gering sind. Für den 2er Platoon ergibt sich durch die geänderten Strömungsverhältnisse ein stärkerer negativer Einfluss des Spurversatzes auf die Treibstoffeinsparung, jedoch kann für alle untersuchten Fälle im Platoonmittel ein Einsparungspotential aufgezeigt werden.

5. AUSWIRKUNGEN AUF DEN STRASSENBERBAU

In AP4 wird die folgende Kernfrage beantwortet: Ist infolge der Belastung durch LKW-Platoons mit einer signifikant erhöhten Schadensauswirkung zu rechnen und bei welchem Spurversatz ist bei größtmöglichem Effizienzgewinn durch Platooning, die Auswirkung in Form von Schadensbildern auf den Straßenoberbau möglichst gering.

Für die Analyse der Auswirkungen von LKW-Platooning auf den Straßenoberbau, insbesondere von Asphaltstraßen, wurde einerseits die Relevanz für die Bemessung von Neubau und Sanierungen analysiert und andererseits die zu erwartenden Auswirkungen im Erhaltungsmanagement der Bestandsstrecken. Dazu wurden sowohl die üblichen Ansätze auf der Belastungsseite (Bemessungsnormlastwechsel) als auch auf der Widerstandsseite (Materialeigenschaften hinsichtlich Verformungsbeständigkeit) beleuchtet und Ansätze für die Berücksichtigung von LKW-Platoons vorgeschlagen.

Die Bemessung und Berechnung von Zustandsentwicklungen der Zustandsgrößen des Oberbaus folgt seit langem einem einfachen Prinzip: die Einwirkung durch den Schwerverkehr muss kleiner sein als der Widerstand, den der Oberbau entgegensetzt. Die Einwirkung hängt naturgemäß von der Verkehrsbelastung ab, also der Art der auftretenden Fahrzeuge, deren Auftretenswahrscheinlichkeit und deren Achslasten. Zur Bestimmung des Widerstands wird die maßgebliche Belastung des Oberbaus bestimmt, die auf umfangreichen empirischen Daten, die zu den Oberbaudimensionierungsregeln der RVS 03.08.63 geführt haben, basiert. Für die Bemessung und Lebensdauer des Straßenoberbaus ist die Belastung, die sich aus dem Schwerverkehr ergibt der maßgebende Faktor und der PKW Verkehr kann vernachlässigt werden. Die maßgebende Größe für die Verkehrsbelastung sind dabei die s.g. Bemessungsnormlastwechsel (BNLW), die sich aus der Anzahl an Übergängen einer Normachse mit einer Achslast von 100 kN (entspricht 10 t) ergeben. Um die tatsächliche Verkehrsstärke zu ermitteln, werden die verschiedenen auftretenden Schwerverkehr (SV) Fahrzeugkategorien mit Äquivalenzfaktoren auf diese BNLW umgerechnet.

Manuell gefahrene LKW folgen keiner exakten Spur, sondern nutzen den verfügbaren Raum einer Fahrspur und pendeln in gewissem Grad darauf hin und her. Dieser Effekt wird als „lateral wander“ bezeichnet und in der Bemessung in Form eines Faktors zur Berücksichtigung der Fahrspurverteilung innerhalb des Fahrstreifens berücksichtigt. Dieser Faktor wurde genutzt, um den Spurversatz von LKW-Platoons abzubilden.

Für die Analyse der Auswirkungen von LKW-Platooning auf den Straßenoberbau wurden geeignete Äquivalenzfaktoren für diese neue Fahrzeugkategorie gesucht und Annahmen für die Fahrspurverteilung getroffen. Zusätzlich wurden Erkenntnisse aus kürzlich veröffentlichten internationalen Studien analysiert und hinsichtlich ihre Anwendbarkeit in Österreich bewertet.

Mit Hilfe dieser neuen Werte für die Bemessungsparameter wurden exemplarisch Oberbaubemessungen für typische Verkehrsbelastungen bei üblichen Neubau oder grundhaften Instandsetzungsmaßnahmen durchgeführt. Dazu wurde ein simplifiziertes Berechnungsmodell auf Basis der RVS 03.08.63 Methodik mit den neuen LKW-Platooning Werten erstellt, um für die Bemessung eine Orientierung hinsichtlich der Auswirkungen von LKW-Platoons zu bekommen.

Darüber hinaus wurden die neuen Platooning Werte auch auf die Zustandsentwicklungsmodelle für Spurrinnen gem. PMS Handbuch angewendet und so auch eine Methodik angeboten, um die Auswirkungen von LKW-Platoons auf die Bestandsstrecken zu analysieren. Die Methodik ist in nachfolgender Grafik zusammengefasst.

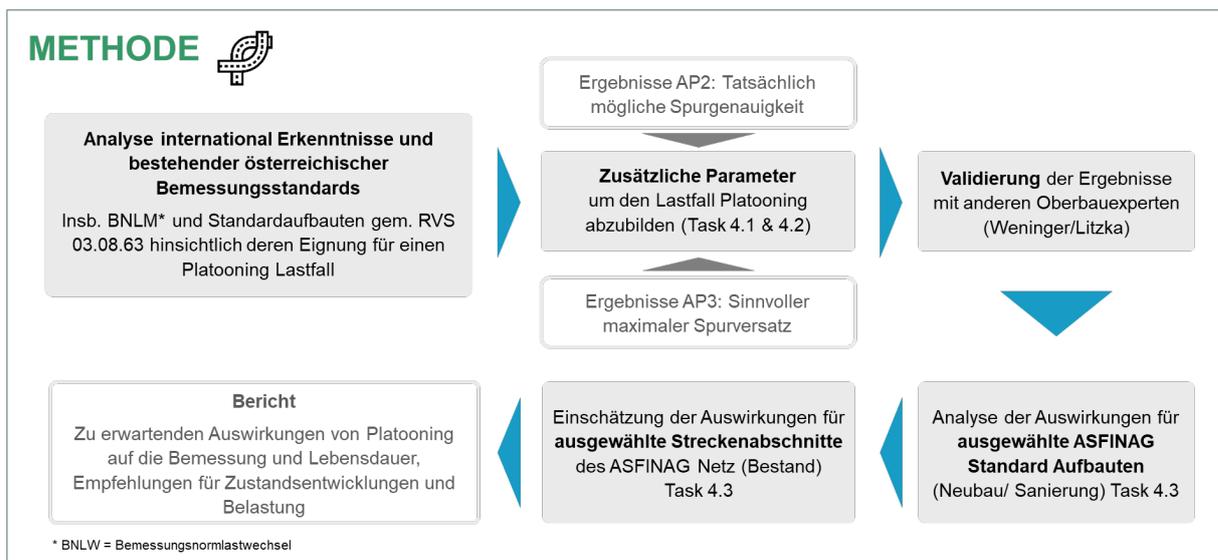


Abbildung 15: Methode AP4

5.1 Berücksichtigung von LKW-Platooning bei Neubau und Sanierung

Als maßgebende Beanspruchungen werden bei der Dimensionierung von Asphaltstraßen in der Regel die wechselnde Zugbeanspruchung an der Unterseite der Asphaltsschichte und die senkrechte Druckbeanspruchung am Unterbauplanum angesehen. Die zyklischen Zugbeanspruchungen infolge der Verkehrsbelastung führen zur Ermüdung des Baustoffes und

an der Unterseite der Asphaltkonstruktion entstehen Risse, die sich nach oben hin fortpflanzen („bottom-up cracking“). In der Folge verbinden sich die Einzelrisse zu Netzzissen, wodurch es zur rasch progressiven Herabsetzung der Tragfähigkeit der gesamten Konstruktion kommt – zur Ermüdung des Oberbaus. Das Schadensmerkmal Ermüdung, bedingt in erster Linie durch die Verkehrsbelastung, wird auch im Fall von LKW-Platooning als bemessungsrelevantes Schadensmerkmal für die strukturelle Oberbaudimensionierung herangezogen. Die Auswirkungen auf die Spurrinnenbildung betreffen die Gebrauchstauglichkeit (insbesondere die Verkehrssicherheit), jedoch weniger die Tragfähigkeit und sind daher relevanter in der Lebenszyklusbetrachtung. Um LKW-Platooning in der Oberbaubemessung zu berücksichtigen, ist es daher insbesondere erforderlich, die Verkehrsbelastung, also einen entsprechenden Äquivalenzfaktor für die Bemessungsnormlastwechsel zu finden.

Bei der Bemessung gemäß der großteils verwendeten RVS 03.08.63 kommt ein Bemessungskatalog zum Einsatz, der Standardoberbauten enthält und so für verschiedene Lastklassen unterschiedliche Bautypen anbietet.

Die Verkehrsbelastung wird in der zugrundeliegenden Bemessungsmethodik durch die Kenngröße BNLW ausgedrückt. Diese entspricht einer Anzahl an Übergängen einer Normachse mit einer Achslast von 100 kN (entspricht 10 t), der ein Oberbau während eines definierten Bemessungszeitraums ausgesetzt ist. Diese Anzahl an Normlastwechseln ist über so genannte Äquivalenzfaktoren mit der tatsächlichen Verkehrsstärke (ausgedrückt durch den JD_{TVi} einer Fahrzeugkategorie i bzw. den JD_{TLV}) verknüpft. Diese Faktoren geben an, wie viele Übergänge der Normlast bei einem Übergang eines Schwerfahrzeugs in Rechnung zu stellen sind und sind sowohl von der Gesamtgewichtsverteilung der Schwerfahrzeuge, als auch von deren Auftretenshäufigkeit im Straßennetz abhängig.

Der BNLW wird aus folgender Beziehung ermittelt:

$$\text{BNLW} = \text{NLW}_{\text{tägl}} * R * V * S * 365 * n * z$$

$\text{NLW}_{\text{tägl}}$ Anzahl der durchschnittlich täglichen Normlastwechsel für den gesamten Querschnitt zum Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe. Ergibt sich aus

$$\text{NLW}_{\text{tägl}} = \sum \text{JD}_{\text{TVi}} * \ddot{A}_i$$

JD_{TVi} Mittelwert über alle Tage des Jahres der Anzahl der einen Straßenquerschnitt in beiden Richtungen täglich passierenden Kraftfahrzeuge der Fahrzeugkategorie i

\ddot{A}_i Mittlerer Äquivalenzwert der jeweiligen Fahrzeugkategorie i

- R Richtungsfaktor für die Aufteilung des Lastverkehrs auf die Fahrtrichtungen (0,5 bei gleichmäßiger Aufteilung des Lastverkehrs auf beide Fahrtrichtungen)
- V Faktor zu Berücksichtigung der Verteilung des Lastverkehrs auf mehrere Richtungsfahrstreifen (1,0 bei einem bzw. zwei Richtungsfahrstreifen; 0,9 bei drei oder mehr Richtungsfahrstreifen)
- S Faktor zur Berücksichtigung der Fahrspurverteilung innerhalb des Fahrstreifens
- n Bemessungsperiode [Jahre] (ursprünglich 20 Jahre für bituminöse Befestigungen und 30 Jahre für Betondecken; Seit 2016 für Bundesstraßen A und S einheitlich 30 Jahre)
- z Zuwachsfaktor unter Berücksichtigung einer jährlichen Zuwachsrate p [%]

Für eine einfache, überschlägige Berücksichtigung von LKW-Platoons kann die verwendete Bemessungsformel genutzt und lediglich um neue Werte für betroffene Parameter ergänzt werden, wie dies in nachfolgender Abbildung zusammengefasst ist.

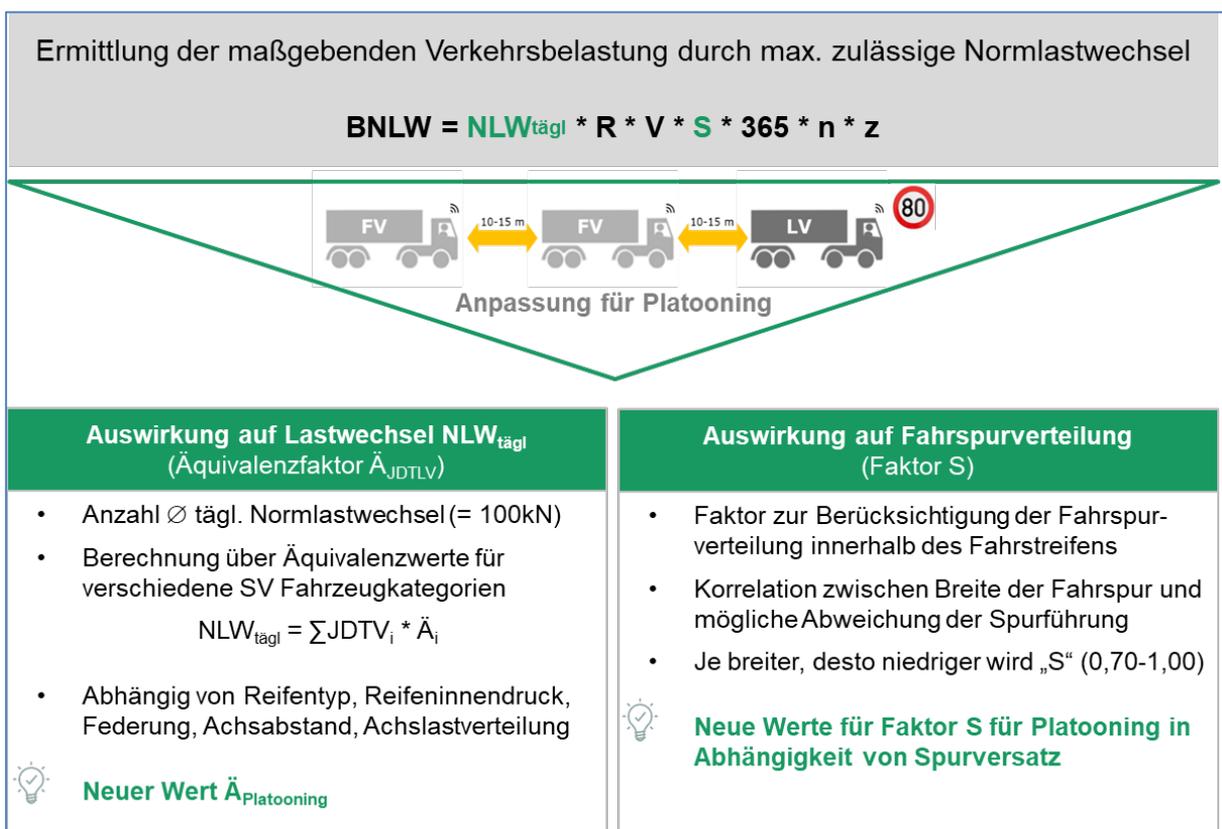


Abbildung 16: Anpassung relevanter Parameter der Bemessungsformel der RVS 03.08.63

Um LKW-Platoons in der Bemessung zu berücksichtigen wird ein neuer Äquivalenzfaktor vorgeschlagen. Auf Basis der generischen LKW Geometrie aus AP 3 wird von Platoons mit

einem gesetzlich geregelten Maximalgewicht von 44 Tonnen (intermodaler Transport) in Platoons aus 2 oder 3 LKW mit einem Abstand von 10-15 m ausgegangen. Für die Berechnung der Last wird dabei weiterhin jeder LKW eines Platoons als Fahrzeug gezählt und nicht der Platoon als eine einzelne Einheit. Die Begründung dafür liegt einerseits an den vorgegebenen Abständen zwischen den LKW, die mit 10-15 m als zu groß angesehen werden um eine echte Einheit zu bilden. Andererseits kann so auch die Variation der Spurgenauigkeit konsequent je LKW umgesetzt werden. Um das Schädigungspotential eines solchen Platoons mit den beschriebenen Annahmen einordnen zu können, wurden die umfangreichen Untersuchungen zu Schadenswirkungen verschiedener Fahrzeugklassen durch die Auswertung von BWiM Daten in Forschungsprojekten der letzten Jahre hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für LKW-Platoons analysiert.

Als Näherung für grobe Abschätzungen wird auf dieser Basis nur von geringfügig höherem Schädigungspotential ausgegangen, die in Form von Äquivalenzwerten in nachfolgender Tabelle für spurgenaue 2er und 3er Platoons mit 15 m Abstand dargestellt sind.

Fahrzeug	Ä _i	Erläuterung
Fahrzeugklasse VC113 	2,10	gem. Projekt Obesto gerundet
2er Platoon spurgenau	2,20	Geschätztes, geringfügig höheres Schädigungspotential +3% geg. Einzel VC113 gerundet
3er Platoon spurgenau	2,30	Geschätztes, geringfügig höheres Schädigungspotential +8% geg. Einzel VC113 gerundet
2er oder 3er Platoon mit Spurversatz	2,10	Schädigungspotential von VC113

Tabelle 2: Vorgeschlagene Äquivalenzwerte für LKW-Platoons

Bei einem Spurversatz von > 0,5 m wird mit dem Ä_i der Fahrzeugklasse VC113 gearbeitet, da keine erhöhte Schädigung erwartet wird. Dies gilt sowohl für einen 2er als auch einen 3er Platoon.

Der zweite besonders relevante Parameter ist der sogenannte Fahrspurfaktor S, der in Abhängigkeit von der Fahrspurbreite der Verteilung von LKW Fahrspuren und Trajektorien Rechnung trägt.

Die Fahrspurbreite auf störungsfreien ASFINAG-Netzabschnitten ist > 3,5 m. Baustellenbereiche sind von der Betrachtung explizit ausgenommen.

Um den Spurversatz von LKW-Platoons in einer Bemessung zu berücksichtigen, werden nachfolgend Vorschläge für den Fahrspurfaktor gemacht.

Spurversatz	Faktor S neu
Spurgenaues fahren	1,00
Abweichung des 2. LKW von 0,5 m	0,70
Abweichung des 2. LKW von 1,0 m	0,50

Tabelle 3: Vorgeschlagene Fahrspurfaktoren für LKW-Platooning Spurversatz

Mit den beschriebenen Werten für die Äquivalenzfaktoren und Spurversatzfaktoren wurden exemplarisch Oberbauten für verschiedene Verkehrsstärken dimensioniert und die Ergebnisse jeweils für die folgenden vier Platooning Szenarien mit Marktdurchdringungen von 0-100 % in einem Diagramm sowie tabellarisch in Abhängigkeit von der Auftretenswahrscheinlichkeit von LKW-Platoons dargestellt.

- 2er Platoon spurgenau
- 3er Platoon spurgenau
- 2er oder 3er Platoon mit Spurversatz 0,5 m
- 2er oder 3er Platoon mit Spurversatz 1,0 m

Es wird davon ausgegangen, dass es bei einem Spurversatz > 0,5 m keinen Unterschied macht ob die Platoons aus 2 oder 3 LKW bestehen.

Exemplarisch wurden für verschiedene Verkehrsstärken die Auswirkungen berechnet. Da davon ausgegangen wird, dass Platooning auf logistikrelevanten Streckenabschnitten zuerst eingeführt wird, wird als durchschnittlicher Bemessungsfall ein JDTLV 4000 des gesamten Schwerverkehrskollektivs angenommen. Hier wurden 2 Fahrstreifen mit einer Breite zumindest des 1. Fahrstreifens von 4,0m angenommen.

Medium Case	
Parameter	Wert
Verkehrsstärke JDTLV Kollektiv	4000
Verkehrsstärke je Richtungsfahrbahn getrennt	ja
Anzahl Fahrstreifen	2
Fahrstreifenbreite	4,00
Bemessungsperiode	30 Jahre
Jährl. Zuwachsrate	1,50%

Tabelle 4: Medium Case Berechnungsrahmenbedingungen

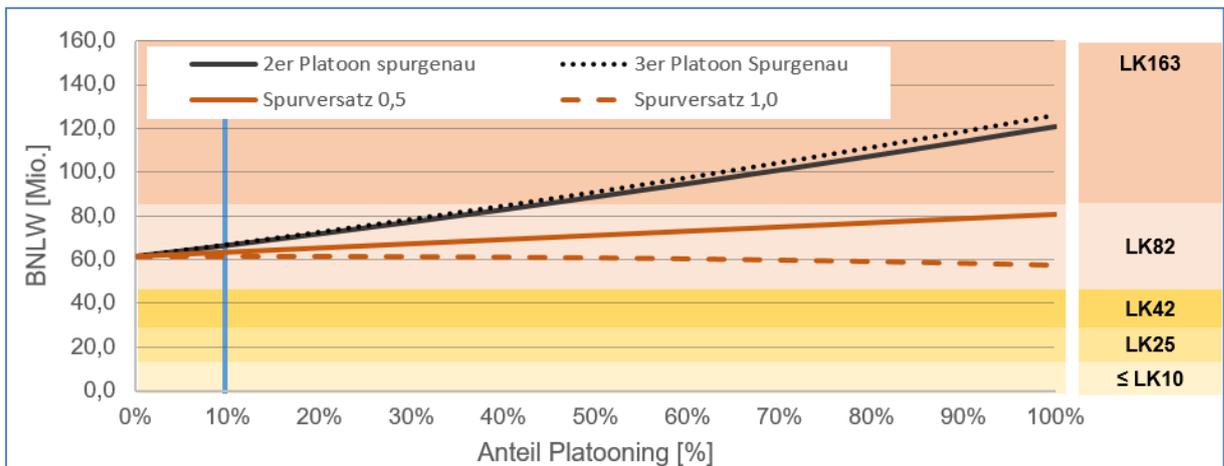


Abbildung 17: BNLW und Lastklassen in Abhängigkeit der Marktdurchdringung für die 4 Platooning Szenarien

Bei dieser Verkehrsstärke wird deutlich, dass bei einer schnellen Verbreitung von LKW-Platoons Maßnahmen erforderlich werden. Bei einer Marktdurchdringung von ca. 40 % würden spurgenaue Platoons bereits die aufnehmbaren Lastwechsel der LK82 überschreiten, was zu einer vorzeitigen Ermüdung des Oberbaus führen würde. Dem kann entweder durch einen verpflichtenden Spurversatz von $> 0,5$ m vorgebeugt werden oder durch ein Verkehrsmanagement, dass nur einen maximalen Anteil von 40 % LKW-Platoons zulässt.

Dreht man die Betrachtung um und ermittelt auf Basis der maximal aufnehmbaren Normlastwechsel die strukturelle Lebensdauer, ist auch in diesem Szenario bei den Auftretenswahrscheinlichkeiten keine Verkürzung der strukturellen Lebensdauer anzunehmen. Im Spurversatz ergibt sich auch bei 100 % LKW-Platoons noch keine Verkürzung. Bei spurgenaue Platoons besteht ab ca. 35 % (3er Platoon) bzw. 40 % (2er Platoon) Handlungsbedarf in Form von Beschränkungen, oder die strukturelle Lebensdauer beginnt auf bis zu 20 Jahre bei 100 % Marktdurchdringung zu sinken.

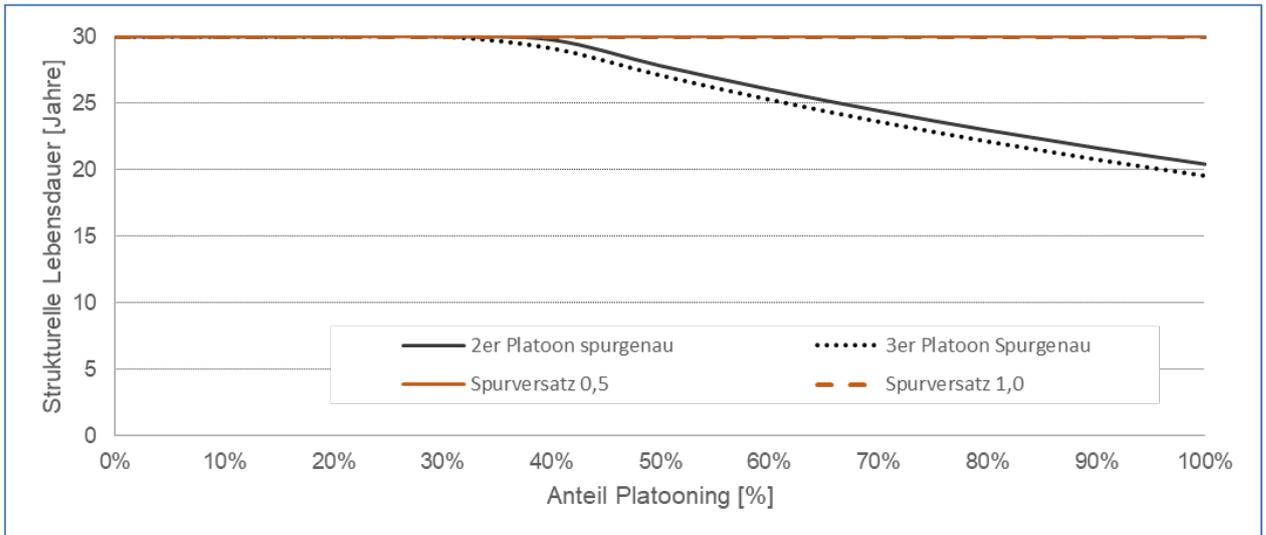


Abbildung 18: Strukturelle Lebensdauer in Abhängigkeit der Marktdurchdringung für die 4 Platooning Szenarien

Zusammenfassend zeigen diese exemplarischen Berechnungen, dass bei einem ausreichenden Puffer innerhalb der Lastklasse bei langsamer Marktdurchdringung keine Einschränkungen zu erwarten sind. Unterdimensionierungen und das Ausreizen der Toleranzbereiche ist hingegen nicht empfehlenswert.

5.2 Berücksichtigung von LKW-Platooning bei PMS und Lebenszyklusanalyse

Die Prognose des Straßenzustandes für die unterschiedlichen RVS-relevanten Zustandsmerkmale - Spurrinnen, Längsebenheit, Griffigkeit, Risse und Oberflächenschäden - wird auf Basis des PMS für das ganze ASFINAG Netz standardisiert durchgeführt um unter Verwendung von budgetären Grenzwerten die optimalen Erhaltungsmaßnahmen auf jedem untersuchten Streckenabschnitt abzuschätzen.

Internationale Studien legen nun nahe, dass sich durch LKW-Platooning negative Effekte auf das Zustandsmerkmal Spurrinnenbildung ergeben könnten bzw. Ermüdung bereits vor dem Ende der Bemessungsdauer eintreten kann. Dies betrifft spurgenaues LKW-Platooning. (Gungor und Al-Qadi 2020a; Chen et al. 2019; Bouchihati 2020)

Aktuelle Studien kommen jedoch auch zu dem Schluss, dass Platooning nicht nur eine erhöhte Belastung für den Oberbau bedeuten muss, sondern durch die Vernetzung der LKW auch eine Chance darstellt. Demzufolge kann durch die Möglichkeit von kontrollierter Spurvariation der kanalisierte Lastwechsel von spurgenaunen Platoons aufgebrochen und gesteuert so variiert werden, dass sich kein negativer Effekt auf den Oberbau durch Platooning ergibt und des

Weiteren das potentielle Problem sogar zu einer Chance für Kosteneinsparung werden kann (Gungor und Al-Qadi 2020b, 2020a). In diesen Studien werden mit FEM theoretische Berechnungen angestellt, die zu überraschend hohen Einsparungspotentialen von bis zu 50 %, in Abhängigkeit von Oberbaustärke und Gesamtverkehrsbelastung, kommen.

Diese Ergebnisse sind äußerst interessant, gehen jedoch von weit in der Zukunft liegenden Rahmenbedingungen aus, bei denen der gesamte Schwerverkehr in optimal gesteuertem Spurversatz fährt. Diese Ansätze sind auch für Österreich interessant und verfolgenswert, entsprechen aber nicht dem praktischen Ansatz dieses Projektes, in dem Aussagen für die nächsten Jahre getroffen werden sollen.

Gemeinsam mit der ASFINAG wurden repräsentative Streckenabschnitte ausgesucht, die hinsichtlich ihrer Eignung für Platooning bewertet bzw. hinsichtlich Auswirkungen auf ihre Lebenszyklusentwicklung abgeschätzt wurden.

Zur Einschätzung des Zustands und der Eignung eines Streckenabschnitts für Platooning sind eine Reihe von Werten relevant. Neben der Verformungsbeständigkeit des Oberbaus, die sich vorrangig durch die Verformungsbeständigkeit der Deck- und Binderschicht ergibt, ist die strukturelle Widerstandsfähigkeit der Tragschichten gegen Ermüdung wichtig, um eine Aussage über die weitere Belastbarkeit treffen zu können. Dafür sind vor allem Alter und Auslastung der Bemessung (über- oder unterdimensioniert) relevant. Zusätzlich muss die bereits vorhandene Spurrinnentiefe in die Bewertung miteinbezogen werden. Dazu sollten also die folgenden Daten und Parameter für eine Einschätzung zur Platooningfähigkeit auf Basis des aktuellen Straßenzustands (Daten aus dem PMS der ASFINAG) analysiert werden:

- Aufbau, Bautype und Alter
- Belastung (Verkehr und Verkehrsbelastungskoeffizient)
- Zustandsmerkmal Spurrinnen (Vorhandene Spurrinnentiefe)
- Verformungsbeständigkeit der verbauten Deck- und Binderschicht

Für die Prognose wurde auf die deterministisch-empirischen Zustandsprognosemodelle für das Zustandsmerkmal Spurrinnen zurückgegriffen, das auf den empirischen Daten, die in den Zustandserfassungen am ASFINAG-Netz erfasst und dokumentiert wurden basiert. Das Prognosemodell der Spurrinnen befindet sich derzeit gerade in Überarbeitung und konnte für das Projekt leider noch nicht zur Verfügung gestellt werden. Deswegen wurden die Berechnungen auf Basis des Prognosemodells von 2016 (Weninger-Vycudil et al. 2016) durchgeführt.

Die Verhaltensfunktion Spurrinnen wird über das Alter der Decke und die kumulierten Normlastwechsel definiert. Das folgende deterministisch-empirisches Zustandsprognosemodell kommt aktuell zur Anwendung: (Weninger-Vycudil et al. 2016)

$$ZG_{SR,t} = K_{FSR} \cdot \left(a \cdot \text{Alter}_{\text{Decke},t} + \frac{b \cdot \text{NLW}_{\text{kum},t}}{100000} \right)$$

$ZG_{SR,t}$ Zustandsgröße Spurrinnen zum Zeitpunkt t [mm]
 $\text{Alter}_{\text{Decke},t}$ Alter der Decke zum Zeitpunkt t
 K_{FSR} Kalibrierfaktor Spurrinnen
 $\text{NLW}_{\text{kum},t}$ kumulierte Lastwechsel zum Zeitpunkt t in Mio.
 a, b Modellparameter

Analog zur Oberbaubemessung finden kumulierte Normlastwechsel Eingang in die Verhaltensfunktionen. Um LKW-Platoons in der Verhaltensfunktion zu berücksichtigen werden daher die vorgeschlagenen Äquivalenzfaktoren für LKW-Platoons sowie die Spurvariationsfaktoren auch in der Verhaltensfunktion angewendet und so die erwarteten Normlastwechsel für unterschiedliche Platooning Szenarien berücksichtigt. Wie auch in der Oberbaubemessung stellt die größte Unbekannte, die jedoch einen wesentlichen Einfluss hat, die Marktdurchdringung der LKW-Platoons dar.

Während in der Oberbaubemessung eine durchschnittliche Marktdurchdringung über die gesamte Bemessungsdauer zur Anwendung gekommen ist, werden für die Verhaltensfunktionen folgende unterschiedliche Marktdurchdringungsszenarien berechnet.

- Base Case: No Platooning
- Medium Case: Einführung Platooning ab dem Jahr 2022 mit einem Marktanteil von 5 % und einer folgenden weiteren jährlichen Verlagerung von 3 % hin zu Platooning.
- High Case: Einführung Platooning ab dem Jahr 2022 mit einem Marktanteil von 10 % und einer folgenden weiteren jährlichen Verlagerung von 5 % hin zu Platooning

In der folgenden Tabelle sind die Szenarien, die für die ausgewählten Bestandsabschnitte berechnet werden, noch einmal als Matrix dargestellt.

Platooning Szenario		Medium Case	High Case
Kein Platooning		-	-
2er Platoon spurgenau		Platooning Start: 2022 Startjahr: 5% Steigerung/Jahr: +3% (max. 80%)	Platooning Start: 2022 Startjahr: 10% Steigerung/Jahr: +5% (max. 80%)
3er Platoon spurgenau			
2er oder 3er Platoon mit Spurversatz 0,5m			
2er oder 3er Platoon mit Spurversatz 1,0m			

Tabelle 5: Berechnungsszenarien Bestandsabschnitte

Wichtig dabei ist, dass in diesem Projekt von einer reinen Verlagerung des Gesamtschwerverkehrsaufkommens von einzelnen LKW hin zu LKW-Platoons bei gleichbleibender Gesamtverkehrsbelastung ausgegangen wird. Sollten die dadurch freiwerdenden Kapazitäten jedoch von zusätzlichem Schwerverkehr aufgefüllt werden kann sich ein ganz anderes Bild ergeben.

Gemeinsam mit der ASFINAG wurden vier Streckenabschnitte ausgewählt, die wie beschrieben hinsichtlich ihrer Eignung für Platooning analysiert werden.

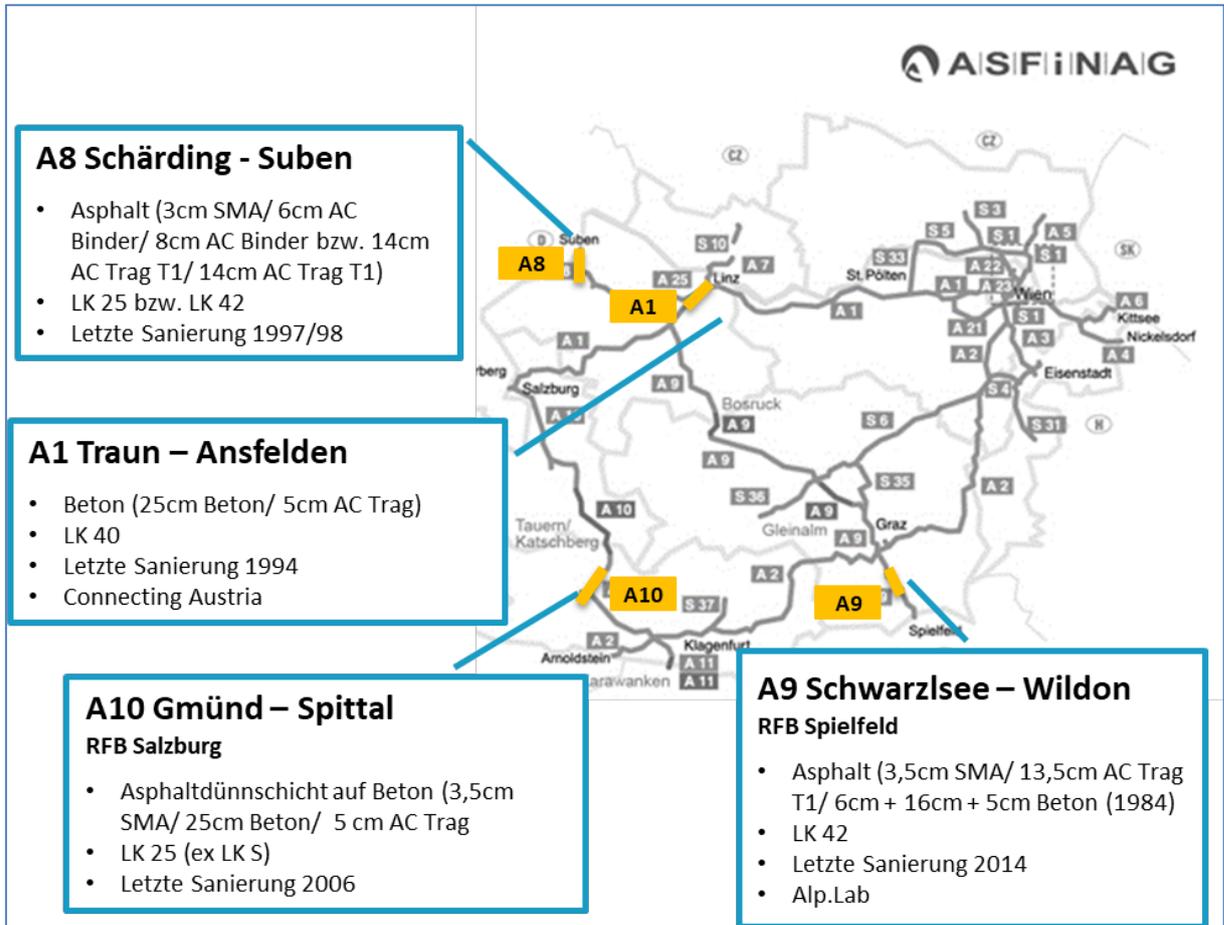


Abbildung 19: Ausgewählte Bestandsabschnitte

Exemplarisch werden nachfolgend die Ergebnisse anhand des Abschnittes A8 Schärding – Suben dargestellt. Der Autobahnabschnitt zwischen Schärding und Suben auf der A8 stellt einen bereits recht alten Asphaltbautyp dar. In nachfolgender Tabelle sind die aktuellen Zustandsdaten zusammengefasst:

Daten		A8
Ort	Fahrtrichtung	Suben
	von - bis	Ort - Suben
	von - bis [km]	km 69,1 - km 74,9
Aufbau	Gebundener Aufbau	3 cm SMA S1, 1997 6 cm AC Binder, 1997 8 cm AC Binder, 1997 14 cm AC Trag T1, 1985
	Bautype PMS	BT14_V (AS_V) Bautype 1-4 Verstaerkung
	Gesamtdicke gebundener Schichten [cm]	31
Alter	Letzte Sanierung [Jahr]	1997
	Rechnerisches Oberbaujahr	1992
Belastung	JDTLV 2017 (max. Wert in Abschnitt) [-]	4513
	Österreichische Tragfähigkeitszahl	19,52
	Verkehrsbelastungskoeffizient [-]	3
Zustand Spurrinnen ES	Zustandsgröße (ZG) Spurrinnen max. [mm]	12,6
	Zustandswert (ZW) Spurrinnen max. [-]	3,2
	Zustandsgröße (ZG) Spurrinnen □ [mm]	5,0
	Zustandswert (ZW) Spurrinnen □ [-]	1,9
	Erhebungsjahr Spurrinnen	2014
Verformungsbeständigkeit Deckschicht		gut

Tabelle 6: Bestandsdaten A8

Mit einem Verkehrsbelastungskoeffizienten von 3,0 ist die Strecke deutlich überdimensioniert und strukturell nach 23 Jahren noch gut belastungsfähig. Der maximale Zustandswert für Spurrinnen ist mit 3,2 zwar noch in Ordnung, liegt jedoch bereits nahe am Warnwert, was bei diesem Alter nicht überraschend ist. Dieser Wert 3,2 stellt aber eine punktuelle Schwäche in einem Abschnitt dar. Aus diesem Grund wird für die weitere Betrachtung der durchschnittliche Wert von 1,9, der noch in einem durchaus guten Bereich ist genutzt. Für die Verhaltensfunktion des Zustandsmerkmals Spurrinnen für die verschiedenen Platooning Szenarien und Marktdurchdringung ergeben sich folgende Werte für die Berechnung:

Parameter	Werte	
JDTLV Kollektiv	4513	Erhebungsjahr 2017
		$\ddot{A}_i =$ abh. von Szenario
Verkehrsstärke je Richtungsfahrbahn getrennt	ja	$R = 1,00$
Anzahl Fahrstreifen	2	$V = 1,00$
Fahrstreifenbreite	3,75	$S =$ abh. von Szenario
Jährl. Zuwachsrate	1,49 %	$z_t = 1,49 \%$
Kalibrierfaktor	SMA	$KF_{SR} = 0,30$
Letzte Messung	2014	$Alter_{Decke, Messung} = 17$
Modellparameter a	BT14_V (AS_V)	$a = 0,7183$
Modellparameter b	BT14_V (AS_V)	$b = 0,0159$

Tabelle 7: Parameter für Verhaltensfunktion Spurrinnen A8

Unter Verwendung des errechneten Kalibrierfaktors von 0,30 und der angenommenen Äquivalenzfaktoren sowie Spurvariationsfaktoren für die verschiedenen Platooning Szenarien zeigt sich im nachfolgenden Diagramm, dass im belastungsintensivsten Fall der spurgenaue 3er Platoons mit hoher Marktdurchdringung (High Case) der Warnwert zwar 7 Jahre früher als in einem Verlauf ohne Platooning erreicht wird, dies jedoch erst nach 38 Jahren (im Jahr 2042) geschieht. Ein Spurversatz von 1,0 m ist in diesem Streckenabschnitt aufgrund der durchschnittlichen Fahrstreifenbreite von 3,75m nicht möglich und wird daher nicht dargestellt. Die Lebensdauer der Deckschichten wird jedoch bekannterweise durch alle Zustandsmerkmale gemeinsam bestimmt und variiert stark in Abhängigkeit von Belastung und Widerstandsfähigkeit. Deswegen ist es auch schwierig eine durchschnittliche Lebensdauer einer Deckschicht anzugeben. Die im Diagramm angegeben 25 Jahre stellen bereits eine sehr lange Lebensdauer für eine bituminöse Deckschicht dar. Im Falle des Streckenabschnitts auf der A8 kann zusammenfassend gesagt werden, dass eine Sanierung und der Austausch der Deckschicht nicht erst durch das Zustandsmerkmal Spurrinnen ausgelöst, sondern bereits lange vor Erreichen eines Spurrinnen-Warnwertes in wenigen Jahren erforderlich sein wird.

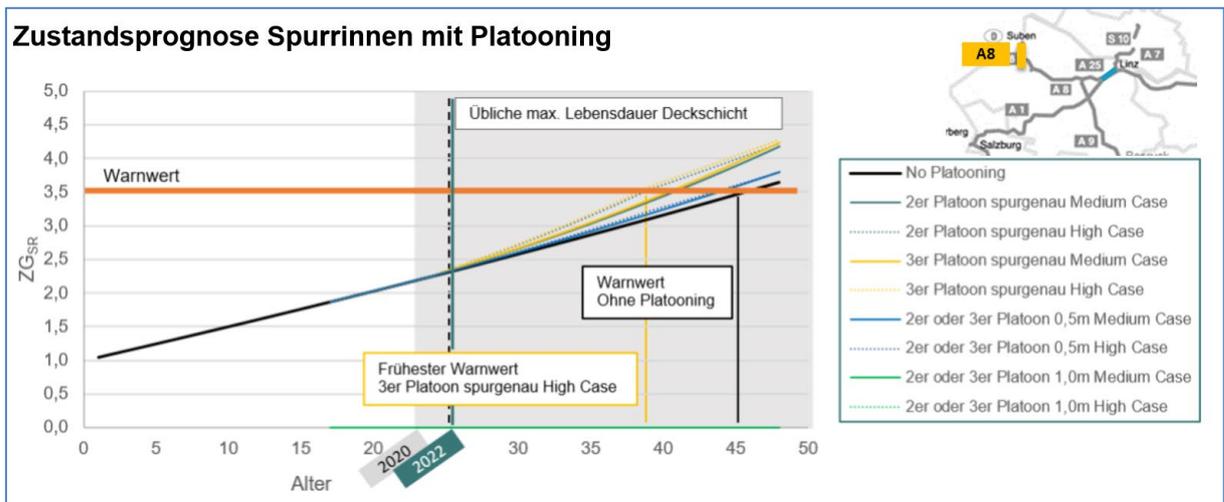


Abbildung 20: Verhaltensfunktion Spurrinnen A8

Die hier betrachteten LKW-Platoons mit geplanten Fahrzeugabständen von 10 bis 15 m sind nicht sehr weit von den Abständen in LKW-Kolonnen im frei fahrenden Verkehrsablauf entfernt. Deshalb ist mit den zu erwartenden Marktdurchdringungsraten in naher Zukunft nicht davon auszugehen, dass sich die Auswirkungen bei gleichbleibenden Gesamtverkehrslasten signifikant verändern.

Dies gilt allerdings nur solange, als durch die Anwendung des Platoonings nicht in der Folge die Gesamtanzahl des Schwerverkehrs auch erhöht wird, d.h. die Bemessungsverkehrsbelastung (Anzahl der Gesamtnormlastwechsel) erhöht wird. Im PMS wird daher vor allem empfohlen die Zustandsmessungsergebnisse für Spurrinnen kritisch hinsichtlich verstärkter Wirkungen zu beobachten, um auf mögliche Abweichungen zu den üblichen Zustandsentwicklungen (Abweichungen von den Verhaltensfunktionen) zu reagieren. Es ist unbestritten, dass spurgenaue LKW-Platoons die Spurrinnenbildung begünstigen. Wie die Analysen der Bestandsstreckenabschnitte jedoch gezeigt haben, ist die Spurrinnenbildung erst ab einem hohen SV Anteil ein maßgebliches Zustandsmerkmal, während ansonsten Deckschichtsanierungen eher durch andere Zustandsmerkmale, wie z. B. Griffigkeit, ausgelöst werden. Auf solchen Streckenabschnitten mit hohem SV-Anteil, sind meist aber verformungsbeständige Aufbauten aus Beton verbaut.

Mit einem kontinuierlichen Monitoring, wie es durch das PMS am ASFINAG-Netz umgesetzt wird, ist bereits der wichtigste Schritt getan. Überschreitungen von Warnwerten beim Zustandsmerkmal Spurrinnen sollten unmittelbar entweder zu einer Sanierung oder zu Beschränkungen für Platoons führen.

Ebenso ist es essentiell gerade auch mit der allgemeinen zunehmenden Schwerverkehrsbelastung auf dem hochrangigen Straßennetz, den Verkehrsbelastungskoeffizient zu monitoren und auf Strecken mit LKW-Platooning ein besonderes Augenmerk darauf zu legen, um bereits vor dem Erreichen des Dimensionierungswertes entweder Maßnahmen durch das Verkehrsmanagement zu setzen oder die Erhaltungsplanung entsprechend darauf vorzubereiten.

Durch die Vernetzung der LKW-Platoons und den damit verbundenen Möglichkeiten eines kontrollierten Spurversatzes entsteht die Möglichkeit die Verkehrsbelastung auf den gesamten verfügbaren Querschnitt zu verteilen und so die Widerstandsseite optimal zu nutzen. Gerade aus Sicht des PMS ergeben sich daraus Möglichkeiten für effektive Einsparungen, die künftig weiter untersucht werden sollten.

5.3 Zusammenfassung

Aus den ersten groben Berechnungen hinsichtlich der Berücksichtigung von LKW-Platoons bei Neubau und Sanierung als auch im Erhaltungsmanagement des Straßenoberbaus ist aus heutiger Sicht innerhalb der Rahmenbedingungen wie sie für dieses Projekt definiert wurden, nicht davon auszugehen, dass sich große Auswirkungen auf die Bemessung ergeben. Dennoch ergeben sich einige Empfehlungen zu Maßnahmen und neuen Prozessen rund um die Oberbaudimensionierung bei Neubau und Sanierung.

Während zu Projektbeginn noch keine publizierten Forschungsergebnisse zu genau dieser Forschungsfrage vorlagen, zeigt der hier umfassend zusammengefasste Stand der Technik, dass diese Frage mittlerweile auch international betrachtet wird. Die Ergebnisse sind dabei abhängig von den gewählten Rahmenbedingungen breit gestreut. Geringe Bedenken hinsichtlich des Oberbaus bestehen bei einer kurzfristig absehbaren sehr geringen Marktdurchdringung ohne Erhöhung der Gesamtverkehrsstärke und Belastung (Jermann et al. 2017; Ulrich et al. 2020; Bouchihati 2020). Andere Studien, die ein sehr fortschrittliches Szenario abbilden, in dem das gesamte Schwerverkehrskollektiv durch autonome, vernetzte Platoons ersetzt wird gehen bei spurgenaumem Fahren von deutlich früherem Erreichen der Warnwerte für Spurrinnen und deutlich früherer Ermüdung aus. (Chen et al. 2019; Gungor und Al-Qadi 2020a, 2020b) Dieselben Studien kommen jedoch auch zu dem Schluss, dass Platooning nicht nur eine erhöhte Belastung für den Oberbau bedeuten muss, sondern gerade durch die Vernetzung der LKW und der damit verbundenen Möglichkeit gezielter Spurvariation sogar eine Chance für eine ebenso deutlich höhere Lebensdauer des Oberbaus. Wichtig dabei ist, dass es sich um theoretische Betrachtungen handelt, die von 100% LKW-Platoons mit

kontrolliertem Spurversatz ausgehen und nur in so einem Zukunftsszenario Einsparungen bis 50 % der Oberbauerhaltungskosten bei gezieltem Spurversatz im Vergleichszeitraum möglich sind (Gungor und Al-Qadi 2020a, 2020b). Während ein gezielter Spurversatz möglicherweise vielversprechend sein könnte, müssten derartige Studien einem Praxistest für österreichische Autobahnen unterzogen werden.

Vernachlässigbare Auswirkungen auf die Oberbaudimensionierung bei Sanierung, Neu- und Ausbau

Um LKW-Platoons in der Bemessung des Oberbaus bei Neubau- und Sanierungsprojekten im ASFINAG Netz zu berücksichtigen wurde ein simplifiziertes Berechnungsmodell auf Basis der Methodik der RVS03.08.63 erstellt. Dafür wurden neue Äquivalenzfaktoren eingeführt um die hier behandelten LKW-Platoons (2-3 LKW im Abstand von 10-15 m mit variierendem Spurversatz) abzubilden und Parameter um den Spurversatz entsprechend zu berücksichtigen. Die exemplarischen Berechnungen zeigen, dass bei der zu erwartenden Marktdurchdringung von 10 % in den kommenden Jahren nur geringfügig, höhere Belastungen auftreten, die jedoch keine Auswirkung auf die Dimensionierung haben. Ein Spurversatz von 0,50m wäre grundsätzlich zu begrüßen und ist auch gem. der Ergebnisse in AP3 aus Treibstoffeinsparungssicht effektiv. Größere Spurversätze wären auf Grund der verfügbaren Fahrstreifenbreiten tatsächlich ohnehin nur in einem geringen Teil des ASFINAG Netzes realisierbar. Für Sanierung und Ausbau von LKW-intensiven Strecken wird dennoch auch die rechnerische Dimensionierung gem. RVS 03.08.68 empfohlen, um dabei das Schwerverkehrskollektiv besser abzubilden und auch innovative, verformungsbeständige Mischgüter zum Einsatz zu bringen. Eine grundsätzliche Empfehlung für schwerverkehrsintensive Strecken, um der Spurrinnenbildung vorzubeugen, ist der Einbau von verformungsbeständigen Deck- und Binderschichten oder Betonfahrbahnen.

Erhaltungsmanagement durch Monitoring und Beschränkungen mittels Verkehrsmanagements

Auch in der Lebenszyklusbetrachtung sind mit den prognostizierten langsam eingeführten Szenarien von LKW-Platoons, gerade auch auf Grund des immer noch großzügigen Abstands von 10-15 m, keine signifikanten Verkürzungen der Strukturellen- oder der Gebrauchsdauer zu erwarten. Im PMS sollten Streckenabschnitte auf denen LKW-Platooning zum Einsatz kommt, sofort bei Erreichen des Warnwertes für Spurrinnen saniert und verformungsbeständige Deckschichten eingebaut werden. Ansonsten sollten

Beschränkungen solcher Abschnitte durch das Verkehrsmanagement vorbereitet werden. Dasselbe gilt für Abschnitte die bereits aufgrund eines Verkehrsbelastungskoeffizienten unter 1 als unterdimensioniert zu betrachten sind.

Conclusio

Grundsätzlich ist zu beachten, dass im vorliegenden Bericht lediglich eine modellhafte Sensitivitätsanalyse dargestellt werden kann, da die Rahmenbedingungen einer Markteinführung von LKW-Platooning noch unklar sind. Alle in dem Projekt durchgeführten Validierungsfahrten wurden auf geschlossenem Testgelände (Zalazone, Ungarn) durchgeführt. Fahrten im Platoon auf öffentlicher Straße waren nicht möglich, da die StVO einen Mindestabstand von 50 Metern zwischen LKW vorgibt. Bei einer Einführung von LKW-Platooning muss insbesondere die Entwicklung des Gesamtschwerverkehrskollektivs genau beobachtet werden. In diesem Projekt wird von einer reinen Verlagerung des Gesamtschwerverkehrsaufkommens von einzelnen LKW hin zu LKW-Platoons bei gleichbleibender Gesamtverkehrsbelastung ausgegangen. Sollten die dadurch freiwerdenden Kapazitäten jedoch von zusätzlichem Schwerverkehr gefüllt werden kann sich ein ganz anderes Bild ergeben.

Aus jetziger Sicht ist jedoch davon auszugehen, dass nicht mit signifikant erhöhten Schadensauswirkungen durch LKW-Platoons zu rechnen ist, aber der allgemeine Anstieg des Schwerverkehrs stärkere Auswirkungen haben könnte, als die bloße Einführung von Platooning. Da sich die Marktdurchdringung graduell entwickeln wird und gleichzeitig der Entwicklungsgrad von Vernetzungsmöglichkeiten (V2V als auch V2I) steigt, ergeben sich Möglichkeiten für zentralisierte (V2I durch Verkehrsmanagement), als auch dezentralisiert (V2V Spurversatzregelung zwischen Fahrzeugen) Spurversatzsteuerungen, die eine potentielle zukünftige Schonung des Straßenoberbaus möglich machen können. Eine unkontrollierte Implementierung von Platooning durchaus zu stärkeren Schäden führen kann. Eine fortlaufende Analyse von Oberbauoptimierten LKW-Platoon Layouts und der Möglichkeiten einer zentralisierten Steuerung des Spurversatzes mittels V2I Vernetzung wird empfohlen um das Potential eines positiven Einflusses auf die Lebensdauer des Straßenoberbaus auf lange Sicht zu realisieren.

6. ZUSAMMENFÜHRUNG DER ERGEBNISSE UND EVALUIERUNG

Annahmen und Problemskizzen zur Evaluierung wurden nach den Testfahrten noch im September 2019 in Wien in einem Expert*innenworkshop zum Thema verschiedene Platooning Betriebsmodi und Wissen zu Wirkungen auf Straßenbetreiber vertieft und verbreitert. (Workshop im Rahmen der CEDR CAD WG in Wien, FFG, 10. September 2019 mit mehreren Experten der ASFINAG und europäischen Straßenbetreibern und finnischen Experten für die Interaktion zwischen Schwerverkehr und Straßenbau). Dabei wurde deutlich, dass sich Anwendungskontexte und Sensitivität für hohe Belastungen in verschiedenen europäischen Regionen stark unterscheiden. So etwa die skandinavische Praxis ganze Wälder alle 80 oder auch 180 Jahre zu schlägern und die Erntetransporte und Folgeschäden im Straßenbau auch planerisch mitzuberücksichtigen. Im realen Diskurs (außerhalb der österreichischen Projekte zu LKW-Platooning) wurden verschiedene Platooning Modi auch stark abweichend von der Definition in diesem Projekt Spurvariation oder im Projekt Connecting Austria verwendet. So wird in mehreren skandinavischen Ländern und manchen Teilen der Niederlande der österreichische Normalfall (Fahrzeuge mit 40 Tonnen) als statistischer Sonderfall gewertet: Niederlande: „Wir wissen, dass die Fahrzeuge wesentlich schwerer sind, schneller und mit kürzeren Abständen fahren, aber wir sanktionieren dies nicht. Die Auswirkungen von elektronisch gekoppelten Modi werden daher im Vergleich zur bestehenden Praxis in den Niederlanden relativ klein eingeschätzt“ (Statement eines niederländischen Experten während des Platooning Workshops am 10. September 2019; Wien; CEDR CAD WG plus ASFINAG plus finnischem Schwerverkehrsexperten).

Die Forschungsfrage, ob infolge der bisher nicht näher untersuchten Belastung durch LKW-Platoons mit einer signifikant erhöhten Schadensauswirkung auf den Straßenoberbau zu rechnen ist, kann aus jetziger Sicht mit „Nein“ beantwortet werden. Dies auch für den Standardfall, dass kein elektronisch gesteuerter Spurversatz im LKW-Platoon gefahren wird.

Somit besteht auf Basis der verfügbaren Technologien auch kein betriebswirtschaftlicher trade-off zwischen mehr Windschatteneffekten und Beanspruchung am Straßenoberbau. Eine Kosten/Nutzenabschätzung aus Sicht der LKW-Platoon- und Infrastrukturbetreiber benötigt daher im Wesentlichen nur die bereits benannten Situationen, in denen fallweise ein Verbot von Platooning mittels Maßnahmen im Verkehrsmanagement zu überlegen ist (aktuell vermutlich zwei ausgewählte Brücken mit hohem Seitenwindaufkommen und zwei

Unfallhäufungsstellen lt. Ergebnis ASFINAG interne Analyse von Hintenaus, 2018 in Begleitung zu Connecting Austria).

Zusätzlich ist aus rechtlicher Sicht (StVO) und Sicht aktualisierter Informationen (LKW-Hersteller) die Durchdringungsrate von LKW- Platoons am Netz der ASFINAG / in Österreich gleich Null. Fahrzeughersteller haben hinsichtlich künftiger LKW-Assistenzsysteme und automatisierter Fahrfunktionen bei LKW derzeit andere strategische Prioritäten. Aus Vertriebsicht der LKW-Hersteller lässt sich die Vorteilhaftigkeit elektronisch gekoppelter Fahrzeuge für weite Bereiche europäischer LKW-Betriebspraxis in der Anfangsphase mit nur wenigen koppelbaren Fahrzeugen nur in begrenzten Ausnahmefällen darstellen und auch die juristischen Voraussetzungen für LKW-Platooning (z. B. Abstand zwischen den Fahrzeugen unter dem gesetzlichen Mindestabstand von 50 Meter auf Autobahnen in Österreich) sind nicht gegeben. Deswegen werden diese Systeme in Europa aktuell nicht angeboten oder forciert. Die Marktdurchdringungsraten werden sich in Mitteleuropa daher vorläufig langsam entwickeln und mit steigendem Entwicklungsgrad von Vernetzungsmöglichkeiten (V2V, V2I, I2V) ergeben sich auch Chancen für eine gezielte Steuerung der Spurführung durch innovative Formen von Verkehrsmanagement durch die ASFINAG. Diese Chancen werden im EU Projekt ESRIUM weiter untersucht.

Simulationsergebnisse zeigen eindeutig, dass hoch-automatisierte LKW, deren Spurführung durch das Verkehrsmanagement kontrolliert wird, sogar äußerst vorteilhaft für die Lebensdauer und Nutzung von Asphaltstraßen wären. Dem entgegen steht jedoch, dass ein unkontrollierter Einsatz von hoch-automatisierten LKW (auch mit veränderten Geometrien und Gewichtsklassen), die möglicherweise alle mehr oder weniger genau derselben zentrierten lateralen Spur folgen würden („zero-wander mode“), sich negativ auf die Lebensdauer von flexiblen Straßenoberbauten auswirken könnte. Eine fortlaufende Analyse von oberbauoptimierten LKW-Platoon-Layouts und der Möglichkeiten einer zentralisierten Steuerung des Spurversatzes mittels C-ITS wird empfohlen, um das Potential eines positiven Einflusses auf die Lebensdauer des Straßenoberbaus auf lange Sicht zu realisieren.

Hinsichtlich der Vorbereitung und Umsetzung innovativer Formen von oberbauoptimierten LKW-Platoon Layouts und deren I2V-basierter Steuerung / Verhaltensempfehlung erfordern neue Optionen wesentlich erweiterte digitale Simulationsinstrumente wie etwa Digital Twin und szenarienbasierte Modellrechnungen auf Basis einer dynamischen risk-rated map. Diese Erkenntnisse lassen sich auch für den Fall eines traditionellen LKW-Betriebs (manuell,

assistiert aber ohne elektronische Achskopplung) für ein möglicherweise neues Zeitalter der Verkehrssteuerungspraxis in der ASFINAG gestalten.

Hauptrisiken im Kontext der evaluierten Projektergebnisse kommen aus Beobachtungen der Autor*innen kaum aus der Platooning Technologie – sei es SAE L1, L2 oder höher; Hauptrisiken kommen aus einer Ausweitung des bekannten LKW-Platooning-Konzepts hin zu anderen Fahrzeuggeometrien, höheren Gesamtgewichten und möglicherweise Geschwindigkeiten. Vor allem höhere Achslasten und supersingle-Reifen (höhere Flächenpressung) können zu einem Problem werden. Diesbezüglich werden daher internationale Begleitmaßnahmen (u. a. ODDs mit OEMs; ERTRAC, CEDR CAD WG, ASECAP) empfohlen.

In AP3 wurde die mögliche Treibstoffeinsparung in Abhängigkeit vom Spurversatz und des Folgeabstands der LKW-Platoons simuliert.

Für die Simulationsvalidierung wurden Messungen mit einem 3er-Platoon (Volvo FH 540) an der Teststrecke in Zalazone, Ungarn durchgeführt. Dabei wurden drei LKW mit einem hochgenauen RTK - GPS und einer Sensorik zur Erfassung der Motordaten ausgerüstet, siehe *Abbildung 21*

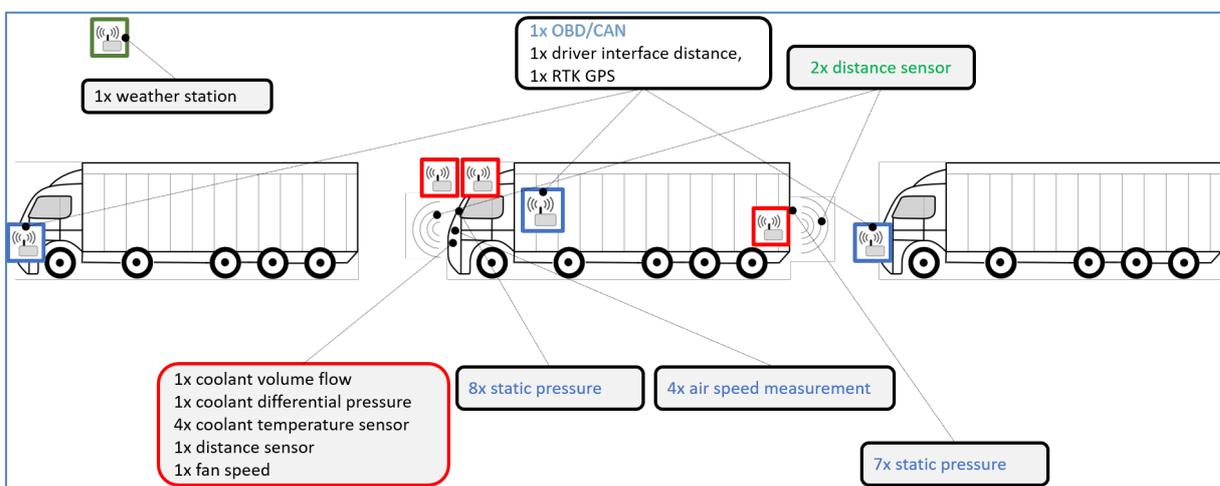


Abbildung 21: Messaufbau für die Validierungsmessungen

Die Fahrgeschwindigkeit betrug 80 km/h, der Abstand zwischen den LKW 7 m und 22 m und der Spurversatz 1 m. Parallel dazu wurde eine CFD-Simulation mit einer realen Geometrie sowie einer generischen Geometrie durchgeführt.

Beim ersten LKW des Platoons beträgt die Treibstoffersparnis bei einem Spurversatz von einem Meter und einem Abstand von 6 m rund 4 %. Eine Treibstoffersparnis ist dann für einen

Abstand von 22 m nicht mehr nachweisbar. Die Übereinstimmung zwischen Messung und CFD-Simulation der realen Geometrie ist dabei exzellent.

Die Treibstoffersparnis konnte für den zweiten und dritten LKW nicht mehr zuverlässig gemessen werden, da die Variation des Treibstoffverbrauchs aufgrund der Beschleunigungs- und Bremsvorgänge die die aerodynamischen Effekte überlagerte.

Mit den Simulationsergebnissen wurde eine Kraftstoffverbrauchsmatrix für die Abstände zwischen 6,7 m und 56 m berechnet, siehe Abbildung 13: Kennfeld „Spurversatz“. Die Ergebnisse sind nachfolgend nochmal tabellarisch und als Diagramm dargestellt.

Der größte Effizienzgewinn ergibt sich erwartungsgemäß beim geringsten Abstand von 6,7 m und keinem Spurversatz mit 10,35 %. Je größer die Abstände und der Spurversatz, desto geringer die Treibstoffersparnis. Der Effizienzverlust ist jedoch relativ gering. Bei einem Abstand von einer halben Sekunde, also 11,1 m, beträgt die Einsparung im spurgenaue Fall immer noch 9,07 % und ist bei einem Spurversatz von 0,5 m nur um 0,49 % geringer. Bei größeren Abständen wird auch der Effizienzverlust beim Spurversatz etwas größer. Der Unterschied zwischen dem spurgenaue Fall und einem Spurversatz von 0,5m bei einem Abstand von 1 Sekunde (22,2 m) beträgt jedoch immer noch nur 0,9 %.

	Bezeichnung	Testparameter			Treibstoffverbrauchsreduktion			
		Geschwindigkeit	Abstand	Versatz	LKW 1	LKW 2	LKW 3	Durchschnitt
		m/s	m	s	%	%	%	%
3er Platoon	SV100_vol12tr3dist6m0m0m_inc10tr3_Uin22	22,2	6,7	0,00	8,76%	13,19%	9,11%	10,35%
	SV101_vol12tr3dist6m05m0m_inc10tr3_Uin22	22,2	6,7	0,50	8,71%	11,41%	8,50%	9,54%
	SV102_vol12tr3dist6m1m0m_inc10tr3_Uin22	22,2	6,7	1,00	8,35%	9,27%	9,49%	9,04%
	SV110_vol12tr3dist11m0m0m_inc10tr3_Uin22	22,2	11,1	0,00	5,80%	10,90%	10,51%	9,07%
	SV111_vol12tr3dist11m05m0m_inc10tr3_Uin22	22,2	11,1	0,50	5,79%	10,04%	9,91%	8,58%
	SV112_vol12tr3dist11m1m0m_inc10tr3_Uin22	22,2	11,1	1,00	5,91%	8,38%	9,68%	7,99%
	SV150_vol12tr3dist15m0m0m_inc10tr3_Uin22	22,2	15,0	0,00	4,92%	10,59%	11,02%	8,85%
	SV120_vol12tr3dist22m0m0m_inc10tr3_Uin22	22,2	22,2	0,00	4,35%	8,70%	10,56%	7,87%
	SV121_vol12tr3dist22m05m0m_inc10tr3_Uin22	22,2	22,2	0,50	2,93%	7,90%	9,47%	6,77%
	SV123_vol12tr3dist22m075m0m_inc10tr3_Uin22	22,2	22,2	0,75	3,13%	6,83%	9,34%	6,43%
	SV122_vol12tr3dist22m1m0m_inc10tr3_Uin22	22,2	22,2	1,00	3,00%	6,93%	9,61%	6,51%
	SV130_vol12tr3dist33m0m0m_inc10tr3_Uin22	22,2	33,3	0,00	3,69%	7,11%	9,34%	6,71%
	SV131_vol12tr3dist33m05m0m_inc10tr3_Uin22	22,2	33,3	0,50	2,71%	6,75%	9,06%	6,18%
	SV132_vol12tr3dist33m1m0m_inc10tr3_Uin22	22,2	33,3	1,00	2,64%	5,51%	8,99%	5,71%
SV140_vol12tr3dist56m0m0m_inc10tr3_Uin22	22,2	55,6	0,00	2,63%	6,54%	8,28%	5,82%	
2er Platoon	SV160_vol12tr2dist22m0m0m_inc10tr2_Uin22	22,2	22,0	0,00	3,66%	9,91%		6,79%
	SV161_vol12tr2dist22m05m0m_inc10tr2_Uin22	22,2	22,0	0,50	2,92%	8,91%		5,91%
	SV162_vol12tr2dist22m1m0m_inc10tr2_Uin22	22,2	22,0	1,00	3,35%	7,78%		5,57%

Tabelle 8: CFD Ergebnisse zu Treibstoffverbrauchsreduktion in AP3

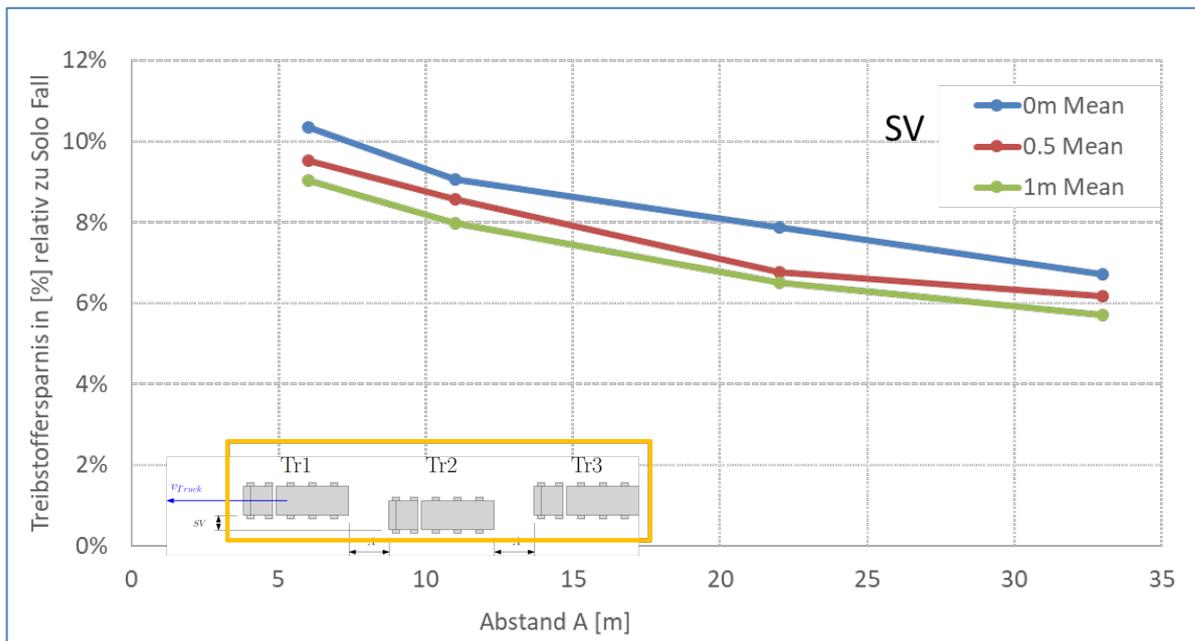


Abbildung 22: Minimal mögliche Spurtreue, die gem. AP2 mit LAS realisiert werden kann

Für die Betrachtung der Auswirkungen auf den Oberbau werden dieselben Spurversatz Szenarien wie in AP3 betrachtet. Als Abstand der LKW wird entsprechend der Ausschreibung von einem Abstand zwischen 10 und 15 m ausgegangen. Aus den CFD Simulationsergebnissen ergibt sich bereits, dass auch bei einem Spurversatz immer noch große Effizienzgewinne möglich sind und auf diese Art eine infrastrukturschonendere Umsetzung durchaus sinnvoll sein kann.

Als maßgebende Beanspruchungen werden bei der Dimensionierung von Asphaltstraßen in der Regel die wechselnde Zugbeanspruchung an der Unterseite der Asphaltsschichte und die senkrechte Druckbeanspruchung am Unterbauplanum angesehen. Die zyklischen Zugbeanspruchungen infolge der Verkehrsbelastung führen zur Ermüdung des Baustoffes und an der Unterseite der Asphaltkonstruktion entstehen Risse, die sich nach oben hin fortpflanzen. Zur Bewertung der Auswirkungen auf den Oberbau wurde analog zu AP 3 von LKW gem. der FAT Geometrie im Platoon mit einer Beladung gemäß aktueller gesetzlicher Grenzwerte gearbeitet. Wenn man den Parameter Fahrzeugtyp auf diese Art fixiert, hängen die Auswirkungen von LKW-Platoons auf den Oberbau insbesondere von der Marktdurchdringung der LKW-Platoons ab. In AP4 wurden dazu Marktdurchdringungen von 0-100 % analysiert. Als realistische Annahmen sehen andere Forschungsprojekte für die nächsten Jahre eine Marktdurchdringung von ~10 % an.

Um die Belastung des Oberbaus zu ermitteln wurden in AP 4 in die Bemessungsmethodik gem. RVS 03.08.63 (FSV 2018) zusätzliche Werte für die Berücksichtigung der LKW-Platooning Szenarien eingeführt. Anhand dieser Bemessungsmethodik wurden verschiedene Verkehrslastfälle und Marktdurchdringungen von LKW-Platoons berechnet. Diese generische Betrachtung ermöglicht eine Einordnung der zu erwartenden Auswirkungen unabhängig von den unterschiedlichen Bautypen und variierendem Alter des Oberbaus im ASFINAG Netz.

Im folgenden Diagramm wird für einen JDTLV (Jährlich durchschnittliche tägliche Lastverkehrsstärke) 4000 auf einem 2-streifigen Abschnitt mit je 4,00 m das Bemessungsergebnis für die folgenden 4 Platooning Szenarien in Abhängigkeit der Marktdurchdringung von LKW-Platoons dargestellt.

- 2er Platoon spurgenaue
- 3er Platoon spurgenaue
- 2er oder 3er Platoon mit Spurversatz 0,5 m
- 2er oder 3er Platoon mit Spurversatz 1,0 m

Ein JDTLV 4000 liegt deutlich über dem Durchschnitt des gesamten ASFINAG Netzes von 2650 und wird damit als ein mäßiges Szenario für einen logistikrelevanten Streckenabschnitt (z. B. A8) dar.

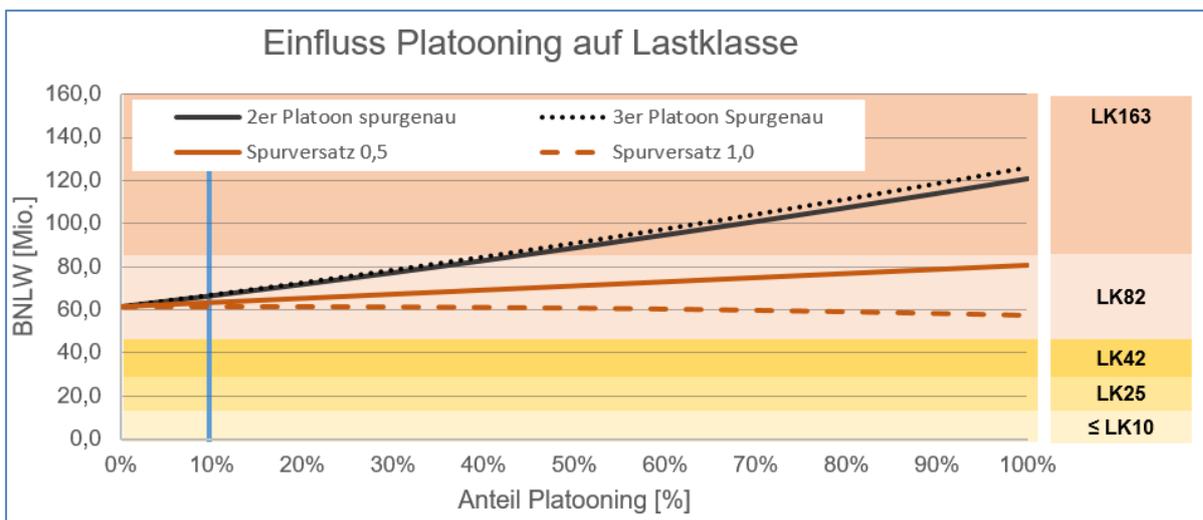


Abbildung 23: Bemessungsergebnis JDTLV4000

Dabei zeigt sich, dass die Lastklasse selbst bei 100 % Marktdurchdringung von LKW-Platoons mit Spurversatz ausreichend ist. Auch bei einem spurgenaue Szenario ist die gewählte

Lastklasse bis zu einem Marktanteil von 40 % ausreichend. Die erwartete Marktdurchdringung von 10 % stellt bei dieser Gesamtverkehrsbelastung daher kein Problem dar.

Nachfolgendes Diagramm zeigt für dasselbe Bemessungsbeispiel wie sich die strukturelle Lebensdauer des Oberbaus verändert.

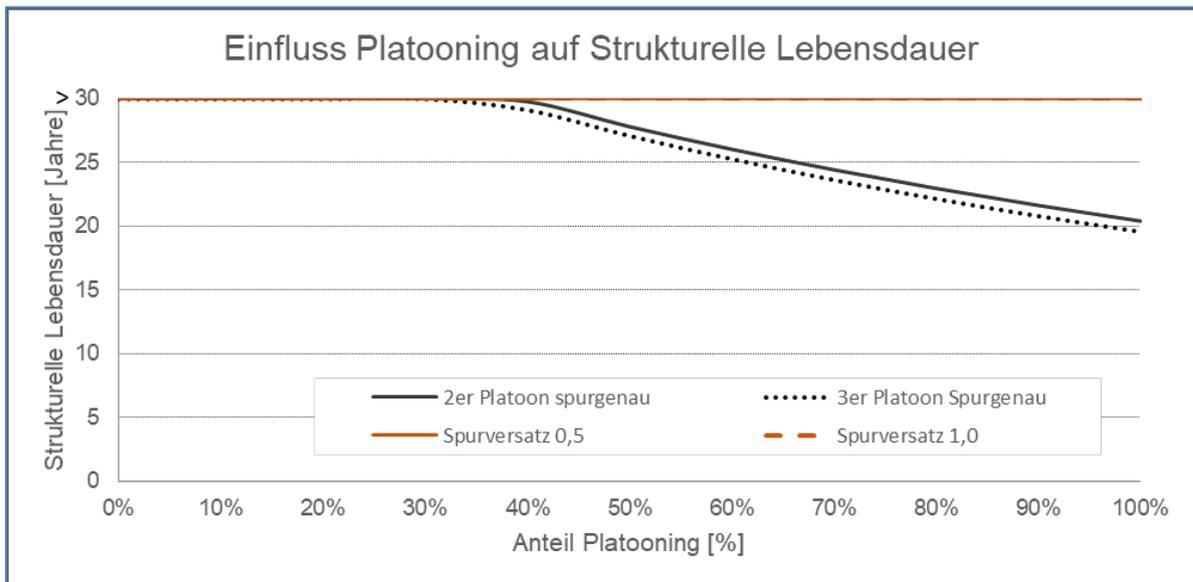


Abbildung 24: Veränderung Straßenoberbau je nach Lebensdauer bei unterschiedlichen Platooning-Szenarien

Da das Bemessungsergebnis im mittleren Bereich der Lastklasse LK82 zu liegen kommt, besteht eine ausreichende Reserve, dadurch ergibt sich bis zu einem LKW-Platooning Anteil von 40% auch im spurgenaun Szenario von mehr als 30 Jahren kein signifikantes Risiko.

In diesem Szenario könnte eine Maßnahme im Verkehrsmanagement lauten spurgenaun LKW-Platoons bis zu einem Anteil von 40 % zu erlauben und darüber hinaus einen verpflichtenden Spurversatz vorzuschreiben. Dies gilt jedoch nur sofern der Gesamtschwerverkehr nicht überdurchschnittlich ansteigt.

Im Projekt Connecting Austria (Schildorfer et al. 2019), in dem Projektbeteiligte dieses Projektes auch maßgeblich involviert sind, wird als ein Ergebnis eine so genannte Risk Rated Map (RRM) für LKW-Platooning erstellt, die eine Unterscheidung von „Platooning“ und „No Platooning“ Zonen in Abhängigkeit von Straßengeometrie, Bauwerken, Auf- und Abfahrten, etc. ermöglicht. Diese Zonen werden generisch durch ein Konfigurationsfile beschrieben. Eine Kette von Operatoren berechnet dann die genaue Lage der jeweiligen Zonen entlang der gewünschten Autobahnen.

Eine Konfigurations-Datei kann folgende generische No-Platooning-Zonen Definitionen enthalten:

- Auffahrten und Abfahrten
- Brücken
- Tunnels

Zu jedem Zonen-Typ sind Mindestlänge der Gefahrenzone und ev. zusätzliche Toleranzzonen und weitere Details spezifizierbar.

Die Integration eines eigenen Layers für die Eignung des Straßenoberbaus stellt einen logischen nächsten Schritt dar. Dies für das gesamte Netz konsequent und umfassend umzusetzen ist jedoch nicht so einfach möglich.

Die erste Herausforderung liegt in der Verfügbarkeit und Qualität der Daten. Während die Zustandserfassungsdaten kontinuierlich den Intervallen entsprechend gepflegt werden, gibt es bei den Daten zur konkret umgesetzten Oberbauplanung hinsichtlich der Schichtdicken, Mischgüter und Zeitpunkte immer wieder Lücken. Eine Einschätzung der Oberbaueignung kann sich grundsätzlich auf folgende Eigenschaften stützen:

- Verformungsbeständigkeit der verbauten Deck- und Binderschicht
- Verkehrsbelastungskoeffizient > 1,0
- Vorhandene Spurrinnentiefe < 15 mm

Während für ausgewählte Abschnitte eine detaillierte Analyse durchgeführt wurde, kann für das gesamte Netz nur eine vereinfachte Einschätzung anhand der Verformungsbeständigkeit der Deckschicht für das gesamte Netz gemacht werden. Insgesamt ist nicht davon auszugehen, dass sich durch die initiale Einführung von LKW-Platoons wesentliche Einschränkungen durch den Oberbau ergeben, aus diesem Grund wurde die Einordnung für eine erste Einführung von LKW-Platoons sehr offen gewählt. Die im ASFINAG-Netz vorhanden Deckschichten (PMS Consult 2019) wurden je nach Verformungsbeständigkeit der Deckschicht nach einem Ampelsystem in 3 Kategorien eingeteilt.

Kürzel	Beschreibung	Einordnung
AC_deck_A1	Asphaltbeton	
AC_deck_A2	Asphaltbeton mit pmB	
AC_deck_A3	Dünnschichtdecke	
AC_deck_A4	Dünnschichtdecke	
BBTM	Lärmindernde Dünnschichtdecke	

Kürzel	Beschreibung	Einordnung
BETON	Beton	
GR	Gripbelag	
MA	Gußasphalt	
PA	Drainasphalt (P1 und P2)	
SMA_S1	Splittmastixasphalt (gröbere Sieblinie)	
SMA_S2	Splittmastixasphalt (feinere Sieblinie)	
SMA_S3	Splittmastixasphalt lärmindernd	

Tabelle 9: Deckschichteignung für Platooning

Die geografische Lage der Zonen ist bestimmt durch die Verortung in den verfügbaren GIS Daten. Der neue Layer „Oberbelag“ wird als generischer Typ implementiert und unterscheidet sich grundsätzlich von den anderen Typen. In diesem Fall liegen die Zonen bereits als Liste vor, wobei die Lage der Zonen über die Kilometrierung der Autobahn definiert ist. Zur exakten Abbildung der Zonen in den GIS Daten ist es daher notwendig, ein Mapping zwischen GIS Koordinaten (GPS-Koordinaten) und den Kilometrierungssteinen zu erstellen. Im Verlauf des Projektes konnten diese Daten von der ASFINAG leider nicht zur Verfügung gestellt werden.

Für die prototypische Implementierung wurde daher ein manuelles Mapping erstellt, welches unter Nutzung von GIS Daten und Satellitenbildern erstellt wurde. Es ist zu erwarten, dass dadurch die errechnete Lage der Zonen nicht exakt mit jenen bezogen auf Autobahn-Kilometer übereinstimmt.

Zusätzlich ist die RRM für eine ROT-GRÜN Darstellung entwickelt, d.h. die Möglichkeit einer beschränkten Platooning-Zone (Gelb) wird aktuell noch nicht unterstützt. Die RRM kann allerdings in zwei Varianten konfiguriert werden, um die Ergebnisse vergleichbar und analysierbar zu machen:

- Gelb wird als Rot interpretiert
- Gelb wird als Grün interpretiert

Es wurden beispielhaft für die A1 folgende Zonen-Bilder erstellt, in denen die RRM, wie sie im Rahmen von Connecting Austria ursprünglich entwickelt wurde, dargestellt ist (Abbildung 25). Da die A1 mit ihrer Betonfahrbahn durchgehend für Platooning geeignet ist, ergeben sich durch den Oberbau keine Änderungen hinsichtlich der Platooning Eignung.

Die RRM ist ein interaktives Tool, welches Nutzer*innen Zoom- und Verschiebe-Funktionalität bietet und die detaillierte Analyse der Unterschiede problemlos möglich macht. Zusätzlich steht als Output das Listenformat zur Verfügung, welches alle Platooning- und No-Platooning-Zonen

in tabellarischer Form enthält. Eine direkte Ausgabe der gesamten verbleibenden Platooning-Zonen-Kilometer ist ebenfalls möglich.



Abbildung 25 A1 Westautobahn in Fahrtrichtung Ost -West. RRM, wie sie im Projekt Connecting Austria entwickelt wurde (Konfigurations-File A)

7. HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Im Rahmen des Projektes Spurvariation wurden neun Handlungsempfehlungen für die ASFINAG erarbeitet. Die hier erörterten Handlungsempfehlungen sind als Denkanstöße gedacht – wiewohl die Autor*innen in Anspruch nehmen, einen validen europaweiten Überblick zu den laufenden und abgeschlossenen LKW-Platooning Projekten zu haben.

1. Vorbereitung und Tests von C-ITS Message-basiertem Verkehrsmanagement bei LKW im Kontext aktueller ASFINAG Aktivitäten

Kompetenzaufbau und Wissensaufbau zu innovativen Formen von infrastrukturzentriertem Verkehrsmanagement können für die wirksame Nutzung neuer Chancen zukünftiger LKW-Platooning Layouts zur Kostenreduktion in der ASFINAG von hohem Nutzen sein. Darüber hinaus lassen sich – für derzeit noch nicht absehbare spurgenaue Folgeverhalten – die potentiellen Auswirkungen durch innovative Formen von infrastrukturzentriertem Verkehrsmanagement abmildern. Ein Ausgangspunkt können aktuelle Überlegungen zu einem C-ITS-basierten LKW-Informationssystem an ausgewählten Tunnelleinfahrten sein. Bei proaktiven Designüberlegungen können möglicherweise bereits Vorarbeiten für künftig erweiterte sensitive Autobahnbereiche getroffen werden. Die Berechnung von Emissionseinsparungen durch dynamisches Verkehrsmanagement wird derzeit im Projekt Connecting Austria durchgeführt. Diese Ergebnisse sollten bei einem C-ITS Message-basierten Verkehrsmanagementkonzept berücksichtigt werden, um so den Umwelt-Impact von innovativer Verkehrssteuerung zu zeigen.

2. Anpassung an echtes Fahrverhalten im LKW-Verkehr auf dem ASFINAG Netz

Potentiale und Erkenntnisse aus dem Projekt Spurvariation lassen sich mit großer Wahrscheinlichkeit auch auf die aktuelle Fahrrealität bei LKW am ASFINAG-Streckennetz in Ostösterreich anwenden. Dies birgt jedoch inherent mehrere Risiken zur Unzeit in „undiskutierbare Themen“ vorzustoßen. Anders ausgedrückt, kommt aus dem Innovationsfeld elektronische Achskopplung und LKW-Platooning mittelfristig keine erhöhte Belastung auf den Straßenoberbau und die Straßenerhaltung zu. In diesen Bereichen ist die aktuelle Belastung aus dem tatsächlichen manuellen LKW Folgeverhalten seit vielen Jahren bekannt. Es ergibt sich der vermutlich nicht ungewöhnliche Fall, dass aus einer spezifischen simulationsbasierten Analyse von neuen Technologien auch bestätigende Rückschlüsse auf die bisherigen Aktivitäten der ASFINAG abgeleitet werden können.

3. Neue Fragen – Simulation der Möglichkeiten z. B. in Digitalem Twin

Im Projekt Spurvariation sind neue Fragen oder nachjustierte Fragestellung entstanden, wie z. B.: Inwieweit können C-ITS Messages und innovative Formen eines LKW-spezifischen Verkehrsmanagements auf Basis der risk-rated-map genutzt werden, um Kosten für die ASFINAG zu reduzieren? Eine Ausweitung von Erfahrungen auf Vorgaben an Sondertransporte ist allenfalls zu prüfen.

Hinsichtlich der Vorbereitung und Umsetzung innovativer Formen von oberbauoptimierten LKW-Platoon Layouts und deren I2V-basierter Steuerung / Verhaltensempfehlung erfordern neue Optionen im Verkehrsmanagement wesentlich erweiterte digitale Simulationsinstrumente wie etwa „Digital Twins“ und szenarienbasierte Modellrechnungen auf Basis einer dynamischen risk-rated map. Diese Erkenntnisse lassen sich auch für den Fall eines traditionellen LKW Betriebs (manuell, assistiert aber ohne elektronische Achskopplung) für ein möglicherweise neues Zeitalter der Verkehrssteuerungspraxis in der ASFINAG gestalten. Bei Vorliegen validierter eigener Erkenntnisse empfehlen sich Maßnahmen zur Erweiterung des Problembewusstseins bei Fahrer*innenschulung und bei Forschungsabteilungen von LKW Herstellern.

4. Neue Risiken für den Straßenoberbau – Risikoreduktion im Rahmen von proaktiven Maßnahmen in CEDR, ERTRAC, ASECAP, und bilateral mit LKW Herstellern, etc.

Hauptrisiken für den Straßenoberbau im Kontext der evaluierten Projektergebnisse kommen, aus Beobachtungen der Autor*innen kaum aus der LKW-Platooning Technologie – sei es SAE L1, L2 oder höher; Hauptrisiken kommen aus einer Ausweitung des bekannten Platooning Konzepts hin zu anderen Fahrzeuggeometrien, höheren Gesamtgewichten und möglicherweise Geschwindigkeiten. Diesbezüglich werden daher internationale Begleitmaßnahmen empfohlen.

5. Kooperation mit OEMs zum Zweck der Risikoreduktion

Im Rahmen künftiger dynamischer ODDs wäre es vermutlich empfehlenswert das Thema teil-automatisierter LKW hinsichtlich einer Awareness des Bruttogewichts und der einzelnen Achslasten gemeinsam mit Fahrzeugherstellern anzudenken. Dies gilt unter besonderer Berücksichtigung von Brücken, Viadukten etc. Potentiell wären für manche Fahrzeuge unterschiedliche Autobahnabschnitte je nach Beladungszustand befahrbar. Inwieweit dies in

einem dynamischen Feld verschiedener Service Operator praktikabel sein wird, fällt unter die Kategorie: “study and learn”.

Jedoch ist Kooperation auch eine Form symbolisch mit einer sich dynamisch verändernden Zukunft umzugehen. Einige Vorstände bei Fahrzeugherstellern haben u. a. im Rahmen der Autonomous 2019 in Wien zugegeben, dass sie den Eindruck hätten, sie kooperieren mit chinesischen und japanischen Vorständen, weil sie allesamt kein valides Bild hinsichtlich zukünftiger SAE L3, L4 hätten. Diese Unsicherheit würde zwar durch Kooperation nicht verringert, aber viele hätten ein besseres Gefühl. Kooperationsbemühungen zu ODDs bei neuen Formen von LKW-Platoons sollten daher nicht von der reduktionistischen Erwartung ausgehen, alle Partner hätten ein valides Bild von zukünftigen Betriebsmodi und deren Konsequenzen.

6. Adaptierung neuer Möglichkeiten der risk-rated-map und innovativer Formen von infrastrukturbasiertem Verkehrsmanagement für LKW-Platoons in verschiedenen Fachabteilungen.

Typischerweise erfordert die Nutzenstiftung durch Informationsbereitstellung ein valides Verständnis der verschiedenen Entscheidungskontexte von einzelnen Stakeholder*innen. Stakeholder*innen die künftig Verkehrsmanagement-Entscheidungen auf Basis digitaler Informationen fällen sollen – auch und besonders, wenn Expert*innen häufig nicht überall und immer persönlich zur Verfügung stehen.

Verkehrsmanagement in diesem Zusammenhang kann möglicherweise neue Rollen und Anwendungsfälle wie „predictive maintenance“, „greening Europe“, Erhaltung des Wirtschaftsstandorts, Erhaltung der Leistungsfähigkeit verstopfter Logistik Hubs, Starkwetterereignisse, demographische Veränderung bei Fahrer*innen oder hochintensive Nutzung digitaler Medien während Fahrpausen etc. ergeben, welche dann innovatives Verkehrsmanagement erfordern.

7. Kompetenzaufbau und Pflege digitaler Know How Träger*innen im Unternehmen

Die im vorigen Absatz beschriebenen Veränderungen und Herausforderungen bedürfen einem stetigen Kompetenzaufbau und der Pflege von digitalen Know-How Träger*innen im Unternehmen.

8. Learning by doing beinhaltet auch Lernen aus Fehlern.

Wenn Straßenbetreiber ihren Mitarbeiter*innen im Kontext der Digitalisierung kein Recht auf Lernen aus Fehlern zugestehen, werden qualifizierte Mitarbeiter*innen zu digitalen Unternehmen mit rascheren Lernpfaden (Big Tech) abwandern. Folglich sind Innovationsprojekte innerhalb der ASFINAG zu unterstützen, um diese Abwanderung zu vermeiden.

9. Aufbau und laufende Nachjustierung einer dynamischen Vision und mentalen Karte zum Gesamtbild der Digitalisierung in der ASFINAG und im Kontext von Güterverkehrsmanagement in Europa.

Die individuellen Erfahrungen aus Projekten konvergieren nicht automatisch zu einem Gesamtbild. Besonders effizienzbasiertes Denken in einzelnen historisch gewachsenen Silos wird von innovativeren Stakeholdern auch im Straßenverkehr künftig durch effektivitätsbasierte Überlegungen an Innovationsgehalt und Ergebnis übertroffen werden.

LITERATURVERZEICHNIS

Aigner, Walter; Kulmala, Risto; Ulrich, Sandra (2019): Vehicle fleet penetrations and ODD coverage of NRA-relevant automation functions up to 2040. MANTRA: Making full use of Automation for National Transport and Road Authorities – NRA Core Business, Deliverable 2.1.

AIT (Hg.) (2019): TECHNOLOGY HIGHLIGHT RoadSTAR. Datenerfassung durch mobiles Labor, zuletzt geprüft am 02.10.2019.

Alkim, Tom; van Vliet, Arjan; Aarts, Loes; Eckhardt, Jacqueline (2016): European Truck Platooning Challenge 2016 Lessons learnt. Hg. v. Dutch Ministry of Infrastructure and the Environment, zuletzt geprüft am 15.08.2019.

ASFINAG (Hg.) (2015): Planungshandbuch Straße - Bau. PLaPB Straße Technisches Planungshandbuch der ASFINAG, zuletzt geprüft am 16.09.2019.

ASFINAG (Hg.) (2017): Serviceheft 2017, zuletzt geprüft am 02.10.2019.

ASFINAG (Hg.) (2019): Verkehrsstatistiken 2019. Verkehrszählstellen. Online verfügbar unter <https://www.asfinag.at/verkehr/verkehrszaehlung/module-verkehrszaehlung/downloads-archiv-statistik/>.

ASTRA (2011): Gigaliner, Verkehrstechnische Beurteilung, zuletzt geprüft am 27.06.2020.

AustriaTech (2020): C-ROADS - THE PLATFORM OF HARMONISED C-ITS DEPLOYMENT IN EUROPE. Online verfügbar unter <https://www.c-roads.eu/platform.html>, zuletzt geprüft am 12.04.2020.

Bergenheim, Carl; Shladover, Steven; Coelingh, Eric (2012): Overview of platooning systems. Proceedings of the 19th ITS World Congress, Oct 22-26, Vienna, Austria 2012.

Bernasch, Jost: ALP.Lab - Austrian Light Vehicle Providing Region for Automated Driving. Online verfügbar unter <https://www.alp-lab.at/>, zuletzt geprüft am 27.06.2020.

Blab, Roland; Eberhardsteiner, Lukas; Haselbauer, Katrin; Marchart, Bettina; Hessmann, Torsten (2014): OBESTO. Implementierung des GVO und LCCA-Ansatzes in die österreichische Bemessungsmethode für Straßenoberbauten. Bericht für die ASFINAG, FFG Projektnummer 2824558, zuletzt geprüft am 18.09.2019.

Bleißmann, Werner; Böhm, Stefan; Rosauer, Verena; Schäfer, Volker (Hg.) (2019): ZTV BEA-StB. Handbuch und Kommentar für die bauliche Erhaltung von Verkehrsflächen in Asphaltbauweise. Kirschbaum Verlag GmbH. 2. Auflage. Bonn: Kirschbaum Verlag.

BMVIT (2002): Bundesgesetz über die Mauteinhebung auf Bundesstraßen. BStMG, vom 2019, zuletzt geprüft am 18.09.2019.

BMVIT (Hg.) (2014): Transeuropäische Verkehrsnetze (TEN -V), zuletzt geprüft am 02.10.2019.

BMVIT (2019a): Bundesgesetz vom 23. Juni 1967 über das Kraftfahrwesen. KFG. 1967, zuletzt geprüft am 18.09.2019.

BMVIT (Hg.) (2019b): Statistik Straße und Verkehr, zuletzt geprüft am 17.09.2019.

Bouchihati, Mohamed el (2020): The impact of truck platooning on the pavement structure of Dutch Motorways. TU Delft, zuletzt geprüft am 30.06.2020.

Brandt, Andrea; Jentsch, Gregor; Pradka, Alexander (2019): EDDI - Electronic Drawbar - Digital Innovation. Project report - presentation of the results, zuletzt geprüft am 20.06.2019.

Bundesanstalt für Straßenwesen (Hg.) (2006): OPUS 4: Auswirkungen von neuen Fahrzeugkonzepten auf die Infrastruktur des Bundesfernstraßennetzes, zuletzt geprüft am 29.06.2020.

Chen, Feng; Song, Mingtao; Ma, Xiaoxiang; Zhu, Xingyi (2019): Assess the impacts of different autonomous trucks' lateral control modes on asphalt pavement performance. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 103, S. 17–29. DOI: 10.1016/j.trc.2019.04.001.

Christidis, Panayotis; Leduc, Guillaume (2009): Longer and Heavier Vehicles for freight transport. Luxembourg: OPOCE (EUR. Scientific and technical research series, 23933).

Devesa, Antoine; Indinger, Thomas (2011): Verbrauchsreduktion an Nutzfahrzeugkombinationen durch aerodynamische Maßnahmen. FAT-Schriftenreihe 237, zuletzt geprüft am 24.06.2020.

European Parliament (1996): Directive 96/53/EC of 25 July 1996 laying down for certain road vehicles circulating within the Community the maximum authorized dimensions in national and international traffic and the maximum authorized weights in international traffic. Directive 96/53/EC, zuletzt geprüft am 17.08.2019.

European Parliament (2015): Directive 2015/719 of the European Parliament and of the council of 29 April 2015 amending Council Directive 96/53/EC laying down for certain road vehicles circulating within the Community the maximum authorised dimensions in national and international traffic and the maximum authorised weights in international traffic. EU Directive 2015/719, zuletzt geprüft am 17.08.2019.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2001): Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen. RPE-Stra 01. Köln (FGSV, FGSV-488).

FSV (2016): RVS 03.08.63- Oberbaubemessung. FSV (03.08.63).

FSV (2018): RVS 03.08.68 - Rechnerische Dimensionierung von Asphaltstraßen. Mechanistic Asphalt Pavement Design. in German. FSV (03.08.68).

Gungor, Osman Erman; Al-Qadi, Imad L. (2020a): All for one: Centralized optimization of truck platoons to improve roadway infrastructure sustainability. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 114, S. 84–98. DOI: 10.1016/j.trc.2020.02.002.

Gungor, Osman Erman; Al-Qadi, Imad L. (2020b): Wander 2D: a flexible pavement design framework for autonomous and connected trucks. In: *International Journal of Pavement Engineering*, S. 1–16. DOI: 10.1080/10298436.2020.1735636.

Hess, Rainer; Schweibenz, Bernd; Stöckner, Markus; Zander, Ulf (2018): Infrastrukturmanagement Straße. Erhaltung Maßnahmenkoordination Wirtschaftlichkeit Vermögensbewertung. Bonn: Kirschbaum Verlag.

Irzik, Marco; Kranz, Thomas; et al. (2016): Feldversuch mit Lang-LKW . Hg. v. Bundesanstalt für Straßenwesen, zuletzt geprüft am 15.08.2019.

Jermann, Jörg; Oehry, Bernhard; Bosch, Ralf; Schmid, Thomas; Gasser, Yves; van Driel, Cornelia; Kryeziu, Gzim (2017): Chancen und Risiken des Einsatzes von Abstandshaltesystemen sowie des Platoonings von Strassenfahrzeugen - Machbarkeitsanalyse. Basel, zuletzt geprüft am 08.03.2019.

Li, Qiang; Xiao, Danny X.; Wang, Kelvin C. P.; Hall, Kevin D.; Qiu, Yanjun (2011): Mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG): a bird's-eye view. In: *J. Mod. Transport.* 19 (2), S. 114–133. DOI: 10.1007/BF03325749.

Litzka, Johann; Blab, Roland; Molzer, Christian (1996): Modifikation der Österreichischen Bemessungsmethode zur Dimensionierung des Straßenoberbaues. In: *Schriftenreihe Straßenforschung des Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten* (465).

PMS Consult (2019): PMS Daten für die ausgewählten Streckenabschnitte. Bautyp, Schichtenzusammensetzung, Zustand, Verkehrsstärke Stand 2019.

Schildorfer, Wolfgang; Kuhn, Andreas; Aigner, Walter (2019): Connecting Austria - First results of C-ITS focused level 1 truck platooning deployment. Presentation at 13th ITS European Congress, Brainport Eindhoven, The Netherlands, 3.-6.6.2019.

Ulrich, Sandra; Kulmala, Risto; Appel, Kristian; Aigner, Walter; Penttinen, Merja (2020): Consequences of automation functions to infrastructure. MANTRA: Making full use of Automation for National Transport and Road Authorities – NRA Core Business, Deliverable 4.2.

Velske, Siegfried; Eymann, Peter; Mentlein, Horst (2013): Strassenbau, Strassenbautechnik. 7., neu bearb. Aufl. Köln: Werner (Werner-Ingenieur-Texte WIT).

Verkehrsinfrastrukturforschung F&E Dienstleistungen (Vif 2018) Im Rahmen Von Mobilität Der Zukunft Ausschreibungsleitfaden, FFG, 2018.

Vissers, John; Banspach, Jochen; Liga, Valerio (2018): ENSEMBLE D2.2 - Use Cases and platooning levels. Online verfügbar unter https://platooningensemble.eu/storage/uploads/documents/2019/02/11/ENSEMBLE-D2.2---Use-Cases-and-platooning-levels_disclaimer.pdf, zuletzt geprüft am 25.06.2020.

Weninger-Vycudil, Alfred; Brozek, Barbara; Litzka, Johann; Petschacher, Martin; Maerschalk, Günther (2014): Erhaltungsziel Integraler Substanzwert im Anlagenmanagement der ASFINAG, zuletzt geprüft am 03.09.2019.

Weninger-Vycudil, Alfred; Brozek, Barbara; Simanek, Petra; Litzka, Johann (2016): Handbuch Pavement Management in Österreich 2016.