Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Monitoring von Bremsereignissen schwerer Fahrzeuge zur Bestimmung der Bremskräfte auf Strassenbrücken

Monitoraggio degli eventi di frenata dei veicoli pesanti per determinare le forze di frenata sui ponti stradali

Monitoring of braking events of heavy vehicles to determine braking forces on road bridges

Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
Abteilung Ingenieur-Strukturen
Matteo Breveglieri
Glauco Feltrin

Forschungsprojekt BGT_20_02D_01 auf Antrag der Arbeitsguppe Brücken, Geotechnik und Tunnel (BGT)

Juni 2025 **1795**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.
Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.
Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.
Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.
Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)

Monitoring von Bremsereignissen schwerer Fahrzeuge zur Bestimmung der Bremskräfte auf Strassenbrücken

Monitoraggio degli eventi di frenata dei veicoli pesanti per determinare le forze di frenata sui ponti stradali

Monitoring of braking events of heavy vehicles to determine braking forces on road bridges

Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
Abteilung Ingenieur-Strukturen
Matteo Breveglieri
Glauco Feltrin

Forschungsprojekt BGT_20_02D_01 auf Antrag der Arbeitsguppe Brücken, Geotechnik und Tunnel (BGT)

Juni 2025 **1795**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung
Matteo Breveglieri, Empa

Mitglieder
Glauco Feltrin, Empa

Begleitkommission

Präsidentin
Anita Lutz

Mitglieder
Eleni Chatzi
Armand Fürst
Andreas Kübli
Dimitrios Papastergiou
Benedikt Weber
Hansruedi Zubler

Antragsteller
Arbeitsgruppe Brücken, Geotechnik und Tunnel (BGT)

Bezugsquelle
Das Dokument kann kostenlos von http://www.mobilityplatform.ch heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum **4**
Zusammenfassung **7**
Riassunto **9**
Summary **11**

1 Einführung **13**
1.1 Problemstellung 13
1.2 Stand der Forschung 16
1.3 Ziel 18
1.4 Gliederung des Berichts 18

2 Monitoring der Bremsereignisse **21**
2.1 Instrumentierung 21
2.2 Datenerfassung 21
2.2.1 Erfassung der Standort des Fahrzeugs 22
2.2.2 Erfassung der Bremsereignisse 22
2.2.3 Erfassung der Drehrate 24
2.2.4 Weitere Daten 24
2.3 Validierung der Messungen mit dem Telefon 25
2.3.1 Fahrversuche mit Personenwagen 26
2.3.2 Versuche mit einem Schwingungserreger 29
2.3.3 Fahrversuche mit Lastkraftwagen 30
2.3.4 Messgenauigkeit der Geolokalisierung 34
2.4 Pilotversuch 36
2.4.1 Montage des Telefons 36
2.4.2 Zuverlässigkeit der Datenerfassung 38
2.5 Monitoringkampagne 39
2.5.1 Instrumentierte Fahrzeug-Flotte 39
2.5.2 Erfahrungen mit dem Telefon-Management 41

3 Datenanalyse **43**
3.1 Aufbereitung der Rohdaten 43
3.1.1 Fusion der Rohdaten 43
3.1.2 Korrektur der Fahrrichtung 43
3.2 Bestimmung der gefahrenen Distanz per Strassenklasse 46
3.2.1 Daten aus OpenStreetMap 46
3.2.2 Strassenkategorien und Strassenklassen 46
3.2.3 Bestimmung der Strassenkategorie 47
3.2.4 Bestimmung der gefahrenen Distanz pro Strassenklasse 49
3.3 Charakterisierung der Bremsereignisse 52
3.3.1 Analyse der Verzögerungsprofile 52
3.3.2 Bestimmung der kinematischen Kennwerte 55
3.3.3 Strassen- und Umgebungskennwerte 57
3.3.4 Berechnung der Bremsraten 60

4 Resultate der Monitoringkampagne **63**
4.1 Überblick 63
4.1.1 Fahrstrecken 63
4.1.2 Bremsereignisse 66
4.2 Verzögerungsprofile 68
4.2.1 Kennwerte der Verzögerungsprofile 68
4.2.2 Einfluss der Fahrzeugkategorie 70
4.2.3 Einfluss der Strassenklasse 71

4.2.4 Einfluss der Unterabschnitte des Autobahnnetzes 73
4.3 Bremsrate 73
4.3.1 Berechnung der Bremsrate 73
4.3.2 Bremsrate nach Strassenklassen 74
4.3.3 Bremsraten auf dem Autobahnnetz 76
4.3.4 Bremsrate der Autobahnen A1 und A2 79
4.3.5 Bremsrate auf Autobahnanschlüssen 84
4.3.6 Bremsrate und Bremswahrscheinlichkeit 88

5 Bremskraft auf Brücken 93
5.1 Stochastisches Modell zur Berechnung der Bremskräfte 93
5.1.1 Überblick des Modells 93
5.1.2 Anpassungen des Modells 94
5.1.3 Berechnung des charakteristischen Werts der Bremskraft. 96
5.2 Resultate 100
5.2.1 Referenzwerte der Bremsrate 100
5.2.2 Simulationsparameter 101
5.2.3 Resultate 102
5.2.4 Vergleich der Resultate zum Vorgängerprojekt AGB 2017/004 107

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen 111
6.1 Bewertung der Resultate 111
6.2 Klassifizierung der Brücken für die praktische Anwendung 114
6.3 Vergleich zu den Normen SIA 261 und SIA 269/1 115
6.4 Einwirkungsmodell für bestehende Brücken 118
6.5 Bewertung des Verkehrs mit Platoons 120

Anhänge 123
Literaturverzeichnis 155
Verdankung 157
Projektabschluss 159

Zusammenfassung

Problemstellung und Ziel
Bei der Einführung der aktuell gültigen Normengeneration erfuhr die Bremskraft auf Brücken eine starke Zunahme im Vergleich zu den vorhergehenden Generationen der Tragwerksnormen. Je nach Länge der Brücke beträgt die Bremskraft nach der Norm SIA 261 (Einwirkungen auf Tragwerke) das Zwei- bis Dreifache der Bremskraft der früheren Norm SIA 160. Die etwa 10 Jahre später eingeführten Normen für bestehende Tragwerke (SIA 269) entschärfte diese Situation, indem eine Bremskraft gewählt wurde, der etwa dem Durchschnitt aus der neuen und alten Regelung entsprach. Dadurch wurde die Zunahme im Vergleich zur Norm SIA 160 auf höchstens das Zweifache begrenzt. Bei der Überprüfung bestehender Brücken steigen dadurch die Anforderungen für den Lastfall Bremskräfte teils deutlich an. Da etwa 90% der bestehenden Brücken des schweizerischen Autobahnnetzes mit der Bremskraft nach den Norm SIA 160 ausgelegt worden waren, kann diese Zunahme dazu führen, dass für eine bedeutende Anzahl Brücken der Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis nicht mehr erfüllt werden kann.

Da die Regelung zu den Bremskräften in den Tragwerksnormen auf einem stark vereinfachten deterministischen Modell basiert, das nicht mit den Konzepten der Zuverlässigkeitstheorie verträglich ist, auf denen die modernen Tragwerksnormen aufgebaut sind, ist die Versagenswahrscheinlichkeit einer Brücke während ihrer Nutzungsdauer für den Lastfall Bremskraft unbekannt. Um diese Situation zu verbessern, wurde das Forschungsprojekt AGB 2011/003 „Aktualisierte Bremskräfte zur Überprüfung von Strassenbrücken“ initiiert. In diesem Projekt wurde erstmals versucht, ähnlich wie zur Bestimmung der vertikalen Verkehrslasten, die Bremskräfte auf Brücken mit einem Modell zu ermitteln, das der stochastischen Natur des Problems gerecht wird. Das Modell simuliert eine Vielzahl von Bremsereignissen, um eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Bremskraft zu berechnen. Als Eingangsgrössen fliessen Messdaten zum Verkehr auf Schweizer Autobahnen und zu Bremsereignissen ein. Die Ergebnisse zeigten, dass die Norm SIA 261 für lange Brücken konservativ ist und die Norm SIA 269/1 generell eine zu kleine Bremskraft vorsieht.

Die Qualität der Ergebnisse des stochastischen Modells hängt neben den Modellannahmen von der Qualität der Eingangsgrössen ab. Die Daten des Verkehrs waren sehr umfangreich und hatten eine insgesamt gute Qualität. Weniger befriedigend im Forschungsprojekt AGB 2011/003 waren hingegen die Daten, die zur Bestimmung der Häufigkeit von Bremsereignissen (Bremsrate) verwendet wurden, da sie für andere Zwecke als die Bestimmung von Bremskräften erhoben worden waren. Im Rahmen des Forschungsprojekts AGB 2017/004 "Auswirkungen des Platoonings mit Lastfahrzeugen auf Schweizer Brücken", in dem die gleichen Daten zur Bestimmung Bremsrate verwendet wurden, wurde festgestellt, dass die Bremskräfte unter Berücksichtigung von Platooning deutlich ansteigen. Neben weiteren dominierenden Faktoren könnten die Kräfte reduziert werden, wenn nachgewiesen werden könnte, dass die Bremsrate reduziert werden kann.

Das Ziel des vorliegenden Projektes war es, ein breite, einheitliche Datenbasis von Bremsereignissen auf dem Schweizer Strassennetz zu erfassen, welche eingesetzt werden kann, um die Berechnung der Bremskräfte auf Brücken auf einer konsistenten und qualitativ hochwertigen empirischen Datenbasis zu stellen.

Methode
Die Daten zu den Bremsereignissen wurden mit einem Monitoringkampagne während 10 Monaten erfasst, indem eine Flotte von 22 Lastwagen instrumentiert wurde. Die Flotte bestand aus 4 Fahrzeugkategorien: Motorwagen, Cityliner, Motorwagen mit Anhänger und Sattelzügen. Als Messinstrumente wurden Smartphones eingesetzt, da sie eine kostengünstige Lösung erlaubten und ihre Sensoren für ausreichend genaue Daten sorgten. Für die Geräte wurden spezifische Datenerfassungsprogramme entwickelt und getestet. Die Datenerfassung beschränkte sich dabei auf das Wesentliche

(Bremsverzögerung und Position des Fahrzeugs). Es wurden nur Bremsereignisse ab einer bestimmten Schwelle erfasst. Die Messdaten wurden anschliessend unter Einbeziehung von OpenStreetMap-Daten ausgewertet.

1. um die Bremsrate für verschiedene Strassenklassen (Autobahnen, Hauptverkehrsstrassen und Nebenstrassen) und Strassenabschnitte (z.B. Ein- und Ausfahrten bei Autobahnen) zu bestimmen,
2. die Verzögerungsprofile der Bremsereignisse durch Kennwerte zu charakterisieren, um ein potenziell unterschiedliches Bremsverhalten je nach Fahrzeugtyp, Strassenklasse, Strassenabschnitt usw. festzustellen,
3. eine Datenbank von Verzögerungsprofilen aufzubauen, um die Datenbasis des stochastischen Modells zu verbessern.

Danach wurden mit den aus den erfassten Daten erarbeiteten Bremsraten und der neuen Datenbank der Verzögerungsprofile die charakteristischen Werte der Bremskraft für spezifische Streckenabschnitte von Autobahnen sowie Ein- und Ausfahrten usw. für verschiedene Wiederkehrperioden bestimmt. Schliesslich wurde anhand dieser Ergebnisse ein einfaches Einwirkungsmodell erarbeitet, das zur Überprüfung bestehender Brücken eingesetzt werden kann.

Resultate
Während der Monitoringkampagne wurden über 53'000 Bremsereignisse mit einem Spitzenwert der Verzögerung von über 2.0 ms^{-2} erfasst. Etwas mehr als 5’600 Ereignisse fanden auf dem Autobahnnetz statt. Die Auswertung zeigte:

1. Der Fahrzeugtyp hat keinen Einfluss auf die Kennwerte der Bremsverzögerungen und einen nur kleinen Einfluss auf die Bremsrate.
2. Die Strassenklasse beeinflusst die Kennwerte der Bremsverzögerungen und die Bremsrate. Auf dem Autobahnnetz wird signifikant weniger häufig stark gebremst als auf Haupt- und Nebenstrassen. Die durchschnittliche Bremsrate auf der Autobahn ist um etwa eine Grössenordnung kleiner als jene, die im Projekt AGB 2011/003 bestimmt wurde.
3. Innerhalb des Autobahnnetzes sind stark unterschiedliche Bremsraten anzutreffen. Die höchsten Bremsraten treten auf Ein- und Ausfahrten auf. Die Bremsereignisse finden dabei gehäuft vor scharfen Kurven, Verzweigungen, seitlichen Einmündungen und am Ende der Ausfahrten auf. Die Bremsrate an diesen Stellen kann über das Hundertfache der durchschnittlichen Bremsrate auf einer Autobahn sein. Die Variation der Bremsrate auf der Autobahn selber ist um eine Grössenordnung kleiner. Hohe Bremsraten treten vor allem auf Abschnitten in dicht besiedelten Gebieten wie z.B. um Städte auf. Auf der Autobahn sind im Bereich von Einfahrten in der Regel leicht erhöhte Bremsraten zu beobachten, die in der Regel nicht auf eine Häufung von Ereignissen zurückzuführen sind.

Die mit den neuen Daten berechneten charakteristischen Werte der Bremskraft sind im Vergleich zu den Projekten AGB 2011/003 und AGB 2017/004 generell kleiner. Ausser auf der A2 und bei langen Brücken ist die Regelung der Norm 269/1 für bestehende Brücken generell konservativ. Auf Abschnitten der Autobahn mit durchschnittlicher Bremsrate sind grosse Reserven vorhanden. Auf Brücken der A2 in Abschnitten mit erhöhter Bremsrate weist die Norm 269/1 hingegen zu kleine Bremskräfte auf. Die Regelung der Norm SIA 261 für neue Brücken ist auch bei erhöhten Bremsraten vor allem bei langen Brücken konservativ.

Empfehlungen
Auf Abschnitten der Autobahn mit durchschnittlichen Bremsraten ist es angemessen, das in diesem Projekt vorgeschlagene Einwirkungsmodell an Stelle des Modells der Norm 269/1 für bestehende Brücken einzusetzen, um allenfalls unnötige Ertüchtigungsmassnahmen zu vermeiden.

Riassunto

Problema e obiettivo
Con l'introduzione dell'attuale generazione normativa, la forza di frenata sui ponti ha registrato un forte aumento rispetto alle edizioni precedenti. A seconda della lunghezza del ponte, la forza di frenata prescritta dalla norma SIA 261 (Azioni sulle strutture) risulta essere circa doppia o tripla rispetto a quella prevista dalla precedente norma SIA 160. Circa dieci anni dopo, le norme per le strutture esistenti (SIA 269) hanno ridotto questo incremento, adottando una forza di frenata intermedia tra quella della nuova e quella della vecchia norma. In questo modo, l'aumento rispetto alla norma SIA 160 è stato limitato a un massimo del doppio. Nella verifica dei ponti esistenti, ciò comporta comunque un incremento parziale, talvolta significativo, delle esigenze relative al caso di carico "forze di frenata". Considerato che circa il 90% dei ponti esistenti della rete autostradale svizzera è stato progettato sulla base della forza di frenata prevista dalla norma SIA 160, questo incremento può comportare che un numero significativo di ponti non soddisfi più pienamente i requisiti di sicurezza strutturale e di funzionalità.

Poiché la regolamentazione delle forze di frenata nelle norme strutturali si basa su un modello deterministico fortemente semplificato, che non è compatibile con i concetti della teoria dell'affidabilità su cui si fondano le moderne norme strutturali, la probabilità di collasso di un ponte durante il suo ciclo di vita utile, relativamente al caso di carico "forza di frenata", rimane sconosciuta. Per mitigare la lacuna normativa, nel progetto di ricerca AGB 2011/003 "Aggiornamento delle forze di frenata per la verifica dei ponti stradali", si è cercato per la prima volta di determinare le forze di frenata sui ponti utilizzando un modello che rispecchiasse la natura stocastica del problema, simile a quello utilizzato per determinare i carichi verticali del traffico stradale. Il modello sviluppato simula un gran numero di eventi di frenata per calcolare una distribuzione di probabilità delle forze di frenata. I dati del traffico rilevati sulle autostrade svizzere e gli eventi di frenata sono utilizzati come variabili di input. I risultati hanno dimostrato che la norma SIA 261 è conservativa per i ponti lunghi e che la norma SIA 269/1 prevede generalmente una forza di frenata troppo bassa.

La qualità dei risultati del modello stocastico dipende dalle ipotesi iniziali del modello e dalla qualità delle variabili in ingresso. I dati sul traffico erano complessivamente completi e di buona qualità. Tuttavia, i dati utilizzati per determinare la frequenza degli eventi di frenata erano meno soddisfacenti, in quanto erano stati raccolti per scopi diversi dalla determinazione delle forze di frenata. Nell'ambito del progetto di ricerca AGB 2017/004 "Impatto del platooning di veicoli pesanti sui ponti svizzeri", sono stati utilizzati gli stessi dati per stimare la frequenza degli eventi di frenata (tasso di frenata). È emerso che le forze di frenata aumentano sensibilmente quando si considera il platooning tra veicoli pesanti. Tuttavia, è stato sottolineato che oltre ad altri fattori determinanti, le forze potrebbero essere ridotte qualora si riuscisse a dimostrare una diminuzione della frequenza delle frenate.

L'obiettivo di questo progetto è quello di raccogliere un ampio e uniforme database di eventi di frenata sulla rete stradale svizzera, che possa essere utilizzato per fornire una base di dati empirici coerente e di alta qualità per il calcolo delle forze di frenata sui ponti.

Metodo
I dati sugli eventi di frenata sono stati raccolti monitorando una flotta di 22 veicoli pesanti per un periodo di 10 mesi. La flotta era composta da quattro tipi di veicoli: autocarri, cityliner, autocarri con rimorchio e autoarticolati. Per la misurazione sono stati utilizzati degli smartphone, che hanno consentito lo sviluppo di una soluzione economica e con sensori in grado di fornire dati sufficientemente precisi per lo scopo della ricerca. Nel corso del progetto sono state sviluppate e testate applicazioni specifiche per l'acquisizione dei dati tramite smartphone. L'acquisizione dei dati relativi all'accelerazione era limitata all'evento di frenata, mentre la posizione del veicolo è stata monitorata durante l'intero percorso.

Sono stati registrati esclusivamente gli eventi di frenata che superavano una soglia predefinita. I dati raccolti sono stati poi analizzati insieme ai dati di OpenStreetMap,

1. *P*er determinare il tasso di frenata per diverse classi di strade (autostrade, strade principali e strade secondarie) e sezioni stradali (ad esempio, entr*ate e uscite dall'autostrada),*
2. caratterizzare i profili di decelerazione degli eventi di frenata mediante valori caratteristici, al fine di determinare un comportamento di frenata potenzialmente diverso a seconda del tipo di veicolo, della classe stradale, del tratto stradale, ecc,
3. costruire un database di profili di decelerazione per migliorare le basi del modello stocastico.

Quindi, utilizzando le frequenze degli eventi di frenata calcolate dai dati registrati e il nuovo database dei profili di decelerazione, sono stati determinati i valori caratteristici delle forze di frenata per specifiche sezioni autostradali, ingressi e uscite, ecc., per vari periodi di ritorno. Infine, questi risultati sono stati utilizzati per sviluppare un semplice modello di calcolo che può essere impiegato per la verifica dei ponti esistenti.

Risultati
Durante la campagna di monitoraggio, sono stati registrati oltre 53’000 eventi di frenata con un valore di accelerazione massimo di oltre 2,0 $ms^{-2.}$ Poco più di 5'600 eventi hanno avuto luogo sulla rete autostradale. La valutazione ha mostrato che

1. Il tipo di veicolo non influenza i valori caratteristici della decelerazione di frenata e ha solo un'influenza marginale sul tasso di frenata.
2. La classe stradale influenza i valori di decelerazione e il tasso di frenata. Le frenate sono significativamente meno frequenti sulla rete autostradale rispetto alle strade principali e secondarie. Il tasso di frenata medio in autostrada è di circa un ordine di grandezza inferiore a quello determinato nel progetto AGB 2011/003.
3. I tassi di frenata variano notevolmente all'interno della rete autostradale. I tassi di frenata più elevati si verificano agli ingressi e alle uscite. Gli eventi di frenata si verificano più frequentemente prima delle curve strette, degli svincoli, dei raccordi laterali e alla fine delle uscite. Il tasso di frenata in questi punti può essere più di cento volte superiore al tasso di frenata medio autostradale. La variazione del tasso di frenata in autostrada è di un ordine di grandezza inferiore. I tassi di frenata elevati si osservano soprattutto nelle sezioni autostradali che attraversano aree densamente popolate, ad esempio nelle immediate vicinanze dei centri urbani. Sui tratti autostradali in prossimità degli ingressi si osservano generalmente tassi di frenata leggermente più elevati, senza che ciò sia imputabile a un'accumulazione di eventi di frenata ravvicinati.

I valori caratteristici della forza di frenata calcolati con i nuovi dati sono generalmente inferiori rispetto ai progetti AGB 2011/003 e AGB 2017/004. Ad eccezione dell'autostrada A2 e dei ponti lunghi, la norma 269/1 per i ponti esistenti risulta generalmente conservativa. Nei tratti autostradali con tassi di frenata medi sono disponibili ampie riserve di capacità. Sui ponti dell'autostrada A2, nelle sezioni caratterizzate da tassi di frenata più elevati, tuttavia, la norma 269/1 sottostima le forze di frenata. Al contrario, la norma SIA 261 per i ponti di nuova costruzione si conferma conservativa anche in presenza di tassi di frenata elevati, in particolare per i ponti di grande luce.

Raccomandazioni
Sui tratti autostradali con tassi di frenata medi, si raccomanda di utilizzare il modello di calcolo proposto in questo progetto in alternativa a quello previsto dalla norma 269/1 per i ponti esistenti, al fine di evitare interventi di adeguamento strutturale non necessari.

Summary

Problem and objective
With the introduction of the current generation of standards, the braking force on bridges increased significantly compared to previous generations of structural codes. Depending on the length of the bridge, the braking force specified by the SIA 261 standard (actions on structures) is two to three times greater than that defined in the earlier SIA 160 standard. The standards introduced around ten years later for existing structures (SIA 269) mitigated this situation by adopting a braking force that roughly corresponded to the average between the new and old regulations. As a result, the increase compared to SIA 160 was limited to a maximum of twofold. When assessing existing bridges, this leads to a partial, and in some cases significant, increase in the requirements for the braking force load case. Since approximately 90% of the existing bridges in the Swiss motorway network were designed based on the braking force defined in SIA 160, this increase may result in a considerable number of bridges no longer being able to meet the structural safety and serviceability requirements.

As the regulations for braking forces in the structural standards are based on a highly simplified deterministic model, which is not compatible with the reliability theory principles that are the basis of modern design codes, the probability of failure of a bridge during its service life due to braking forces remains unknown. To address this issue, the project AGB 2011/003 "Updated braking forces for the assessment of road bridges" was initiated. In this project for the first time, an attempt was made to determine the braking forces on bridges using a model that takes into account the stochastic nature of the problem. The model is similar to the one used to determine vertical traffic loads. The model simulates a large number of braking events to estimate a probability distribution for the braking force. Measured data on traffic on Swiss motorways and braking events are used as input variables. The results showed that the SIA 261 standard is conservative for long bridges, while the SIA 269/1 standard provides a low value of braking force.
The quality of a stochastic model's results depends on the model assumptions and the quality of the input variables. The traffic data in the research project AGB 2011/003 was very extensive and of good quality. However, the data used to determine the frequency of braking events was of lower quality as it had been collected for purposes other than determining braking forces. As part of the research project AGB 2017/004 "Impact of platooning of heavy vehicles on Swiss bridges", which was based on the same data to determine the frequency of braking events (braking rate), it was found that braking forces increase significantly when platooning is taken into account. It was also pointed out that these forces could be reduced by other dominant factors if it could be shown that the frequency of braking could be reduced.

This project aims to build a broad and uniform database of braking events on the Swiss road network, which can be used to provide a consistent and high-quality empirical basis for the calculation of braking forces on bridges.

Method
The data on braking events was collected by monitoring a fleet of 22 trucks over 10 months. The fleet consisted of 4 vehicle types: Motor trucks, Cityliners, trailer trucks, and articulated trucks. Smartphones, being cost-effective and sufficiently accurate, were used as measuring instruments; their sensors provided sufficiently accurate data. Specific applications for data acquisition were developed and tested for the devices. The data acquisition was limited to essentials (braking deceleration and position of the vehicle). Only braking events above a certain threshold were recorded. The measurement data was then analysed by also including data from OpenStreetMap,

1. to determine the braking rate for different road classes (motorways, main roads, and secondary roads) and road sections (e.g. motorway entrances and exits),

2. characterize the deceleration profiles of braking events using characteristic values to determine potentially different braking behaviour depending on vehicle type, road class, road section, etc,
3. to build a database of braking (deceleration) profiles to enhance the stochastic model

Then, using the braking rates calculated from the recorded data and the new database of deceleration profiles, the characteristic values of braking force were determined for specific sections of the motorway, entrances, exits, etc., for various return periods. Finally, these results were used to develop a practical model for estimating the effects of braking forces.

Results
During the monitoring campaign, over 53'000 braking events were recorded with a peak acceleration value of over 2.0 ms^{-2}. Just over 5'600 events took place on the motorway network. The evaluation showed that*:*

1. The vehicle type has no influence on the characteristic values of the braking decelerations and only a small influence on the braking rate.
2. The road class influences the braking deceleration parameters and the braking rate. Braking is significantly less frequent on the motorway network than on main and secondary roads. The average braking rate on the motorway is about one order of magnitude lower than that determined in the AGB 2011/003 project.
3. Braking rates vary greatly within the motorway network. The highest braking rates occur at entrances and exits. The braking events occur more frequently before sharp bends, junctions, side junctions, and near the ends of exit ramps. The braking rate at these points can exceed the average motorway braking rate by a factor of over 100. The variation in braking rate on the motorway itself is an order of magnitude smaller. High braking rates occur mainly in sections of densely populated areas such as around towns. In the motorway sections of entry ramps, slightly higher braking rates are generally observed, which are generally not caused by repeated braking within closely spaced time intervals (i.e., clustering).

The characteristic values of the braking force calculated with the new data are generally lower compared to the projects AGB 2011/003 and AGB 2017/004. Except on the A2 and for long bridges, the regulation of standard 269/1 for existing bridges is generally conservative. Large reserves are available on sections of the motorway with average braking rates. On A2 bridges in sections with higher braking rates, however, the 269/1 standard underestimates the braking forces. The regulation of the SIA 261 standard for new bridges is conservative even with high braking rates, especially for long bridges.

Recommendations
On sections of the motorway with average braking rates, the use of the impact model proposed in this project is recommended over the standard 269/1 model for existing bridges and thus avoid unnecessary strengthening measures.

1 Einführung

1.1 Problemstellung

Moderne Tragwerksnormen wie z.B. die SIA-Normen und die Eurocodes [1][2] fussen auf Konzepten der Zuverlässigkeitstheorie. Die Widerstände und die Auswirkungen der Einwirkungen an tragenden Bauwerksteilen werden als Zufallsvariablen betrachtet. Die Verteilungen dieser Zufallsvariablen werden in der Regel aus Messreihen bestimmt. Die Regeln und Bemessungsverfahren der Tragwerksnormen sorgen dann dafür, dass während der Nutzungsdauer eines Bauwerks eine allgemein akzeptierte Versagenswahrscheinlichkeit für Teile des Tragwerks oder das Gesamttragwerk nicht überschritten werden sollte.

Während in diesen Tragwerksnormen die Modelle der vertikalen Verkehrslasten auf Brücken unter Berücksichtigung einer bestimmten Wiederkehrperiode mit Hilfe von Messdaten geeicht wurden [9][10], basiert das Modell der Bremskräfte auf einen stark vereinfachten deterministisches Modell [11]. Dadurch ist die Wiederkehrperiode der Bremskraft unbekannt und voraussichtlich nicht konsistent mit den entsprechenden Modellen der vertikalen Verkehrslasten und der übrigen Einwirkungen. Ohne nachprüfbaren Bezug zur Wiederkehrperiode könnte die in den Tragwerksnormen festgelegte Bremskraft daher zu gross sein hinsichtlich der akzeptierten Versagenswahrscheinlichkeit. Daraus resultieren eine bei Neubauten unwirtschaftliche Auslegung von Pfeilern, Lagern, Fahrbahnübergängen und Widerlagern sowie bei bestehenden Bauwerken unnötige Verstärkungsmassnahmen. Die Bremskraft könnte jedoch auch zu klein sein, sodass die tatsächliche Versagenswahrscheinlichkeit von kritischen Bauteilen zur Aufnahme von Bremskräften grösser als die akzeptierte Versagenswahrscheinlichkeit ist.

Zudem erfuhren die Bremskräfte in den verschiedenen Generationen der Tragwerksnormen des SIA eine starke Zunahme. Die Norm SIA 160 (Einwirkungen auf Tragwerke) aus dem Jahr 1956 [3] sah noch keine Bremskräfte auf Brücken vor. Diese wurden bei der Revision der SIA 160 im Jahr 1970 [4] erstmals eingeführt und variierten mit der Brückenlänge. Begriff Brückenlänge nicht notwendigerweise deren totale Länge zu verstehen ist, sondern die Distanz zwischen zwei benachbarten Fahrbahnübergängen, die es einem Brückenteil erlaubt, sich in Längsrichtung unabhängig von den anderen Brückenteilen zu bewegen. Der charakteristische Wert der Bremskraft nahm bei den kürzeren Brücken bis zu 100 m Länge linear zwischen 100 kN und 300 kN zu (Abb. 1).

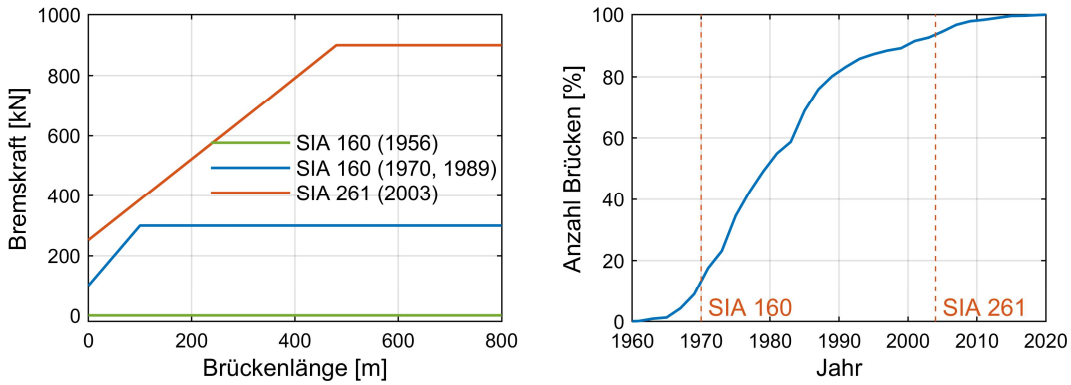


***Abb. 1** Charakteristischer Wert der Bremskraft in Funktion der Brückenlänge (links), Kumulative Verteilung der Anzahl Brücken des Nationalstrassennetzes nach Jahr der Inbetriebnahme (rechts).*

Für alle längeren Brücken betrug die Bremskraft 300 kN. Dieses Modell blieb bei der Revision der Norm im Jahr 1989 [5] unverändert. Mit der Einführung der neuen Generation der Tragwerksnormen im Jahr 2003 [1] nahmen die Bremskräfte generell zu, wobei diese

Zunahme insbesondere für Brücken länger als 150 m bedeutend war. Der grösste Wert der Bremskraft wurde im Vergleich zur vorhergehenden Norm auf 900 kN verdreifacht.

Durch diese teils massive Zunahme der Bremskraft und die Tatsache, dass rund 90% der Brücken des Nationalstrassennetzes mit dem Modell der SIA 160 bemessen worden waren, stellt sich die Frage, ob bei den bestehenden Brücken die akzeptierte Versagenswahrscheinlichkeit beim Gefährdungsbild Bremskraft noch eingehalten werden kann. Die Erhaltungsnorm SIA 269/1 [6][7] reduzierte für die Überprüfung bestehender Bauwerke den grössten Wert der Bremskraft auf 600 kN, doch für die längeren Brücken blieb weiterhin eine Verdoppelung der Bremskraft.

Diese Fragestellung gab den Anstoss für das Vorgängerprojekt AGB 2011/003 „Aktualisierte Bremskräfte zur Überprüfung von Strassenbrücken“[12], das erstmals versuchte, ähnlich wie die Modelle zur Bestimmung der vertikalen Verkehrslasten auf Brücken [1][2], die stochastische Natur der Bremskräfte zu berücksichtigen. Grössen wie die Zusammensetzung des Verkehrs, die Abfolge der Fahrzeuge, das Gewicht, die Abmessungen und die Geschwindigkeit der Fahrzeuge, der Abstand der Fahrzeuge untereinander, die Reaktionszeit des jeweiligen Fahrzeugführers und die Bremsverzögerung jedes an einem Bremsereignisses beteiligten Fahrzeugs und nicht zuletzt die Häufigkeit von starken Bremsereignissen (Bremsrate) finden Eingang in das Modell. Dies erlaubt, Bremskräfte zu bestimmen, die auf realitätsnahen Verkehrsszenarien basieren, sodass die Resultate weit weniger durch arbiträre Annahmen beeinflusst werden als bei den bisher angewendeten deterministischen Modellen. Da das stochastische Modell die Bremskräfte auch mit Wiederkehrperioden assoziiert, sind die damit bestimmten Bremskräften konzeptionell im Einklang mit den zuverlässigkeitstheoretischen Grundlagen der modernen Tragwerksnormen. Im Anschluss an dieses Projekt wurden zwei weitere Projekte durchgeführt. In Forschungsprojekt AGB 2017/002 „Validierung des Modells zur Berechnung der dynamischen Einwirkung der Bremskraft auf Strassenbrücken" wurde erstmals durch Versuche das dynamische Verhalten einer schwimmend gelagerten Brücke bei Bremsereignissen untersucht, mit dem Hauptziel, das lineare dynamische Brückenmodell zu validieren. Anschliessend wurden im Forschungsprojekt AGB 2017/004 „Impact of platooning of heavy vehicles on Swiss bridges" die Auswirkungen des Platooning mit Lastfahrzeugen untersucht.

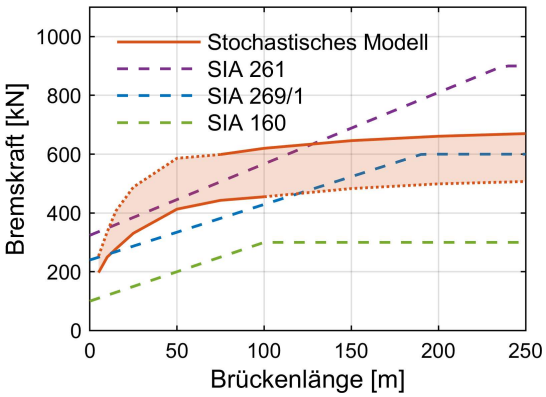


***Abb. 2** Charakteristischer Wert der Bremskraft des stochastischen Modells im Vergleich zu den SIA-Normen.*

Abb. 2 vergleicht den mit dem stochastischen Modell berechneten charakteristischen Wert der Bremskraft (Wiederkehrperiode 1’000 Jahre) mit den Modellen der Norm SIA 261 [1], 269/1[7] und SIA 160 (1970) [4]. Die untere Kurve bezieht sich auf Brücken mit fester Lagerung und die obere Kurve auf Brücken mit schwimmender Lagerung und einer Eigenfrequenz in Längsrichtung von 0.5 Hz. Das stochastische Modell bestätigt, dass das Modell der SIA 160 (1970) deutlich zu kleine Bremskräfte vorsieht. Das Modell der Norm SIA 261 überschätzt die Bremskraft bei längeren Brücken. Bei kurzen Brückenlängen zwischen 10 und 80 m übertrifft zwar die Bremskraft des stochastischen Modells bei 0.5 Hz die Bremskraft der Norm, doch sind schwimmende Lagerungen bei diesen

Brückenlängen eher die Ausnahme. Das Modell der Norm SIA 269/1 weist hingegen über den gesamten Längenbereich zu kleine Bremskräfte auf.

Eine Validierung dieser Resultate durch Experimente, wie in der Wissenschaft üblich, ist für Bremskräfte äusserst aufwendig. Starke Bremsereignisse sind seltene Ereignisse. Gemäss der Auswertung des Vorgängerprojekts AGB 2011/003 [12] führt auf Autobahnen ein Fahrzeug ein starkes Bremsereignis (max. Bremsverzögerung grösser als 4.0 ms^{-2}) alle 1250 km aus. Bei einem durchschnittlichen Tagesverkehr von 60'000 Fahrzeugen in beiden Richtungen (z.B. am Monte Ceneri) und einer Brückenlänge von 100 m entspricht dies etwa 200 Bremsereignissen im Jahr. Um eine statistisch zuverlässige Extrapolation der Messdaten auf eine für Brücken relevante Wiederkehrperiode (100 Jahre) durchführen zu können, müsste man eine Messreihe über mindestens 20 Jahren haben. Zudem ist es nicht einfach, Längskräfte auf Brücken zu messen. Um das Lagerungskonzept der Brücke nicht wesentlich zu verändern, scheidet eine direkte Messung der Kräfte mit Kraftmessdosen praktisch aus. Bei Brücken mit fester Lagerung könnte man über die Dehnungen der Lager auf die Längskräfte schliessen. Bei schwimmend gelagerten Brücken müsste man über die Längsverschiebungen die Längskräfte bestimmen. Beide Verfahren sind indirekt und erfordern deshalb eine Kalibrierung mit Bremsversuchen, wobei die Genauigkeit einer Kraftmessdose bei weitem nicht erreicht werden kann. Aus Zeit- und Kostengründen scheidet eine experimentelle Validierung der Bremskräfte zurzeit daher aus.

Solange eine direkte experimentelle Validierung ausserhalb des mit vertretbaren Mitteln machbaren bleibt, muss man sich auf eine rechnerische Voraussage mit möglichst "realitätsnahen" Modellen stützen. Die Qualität der Ergebnisse eines stochastischen Modells hängt einerseits von den Modellannahmen und andererseits von der Qualität der erfassten Eingangsdaten ab. Der Einfluss der Modellananahmen auf die Resultate lässt sich durch Sensitivitätsstudien untersuchen, indem unterschiedliche Modellannahmen durchgespielt werden. Dieses Vorgehen erlaubt, die Streubreite der Resultate abzuschätzen. Doch auch diese Sensitivitätsstudien müssen mit erfassten Eingangsdaten durchgeführt werden. Deshalb ist für eine zuverlässige rechnerische Ermittlung der Bremskräfte die Qualität der Eingangsdaten von grösster Bedeutung.

Im Vorgängerprojekt AGB 2011/003 wurden die Eingangsdaten durch Analyse umfangreicher Datenbestände verschiedener Herkunft erarbeitet:

1. Zur Charakterisierung des Verkehrs wurden Messdaten der automatischen Strassenverkehrszählung (SASVZ) und der Weigh-In-Motion-Stationen (WIM) des ASTRA an zwei Standorten ausgewertet.
2. Die Bremsrate auf Autobahnen, Hauptverkehrsstrassen und Nebenstrassen wurde hauptsächlich anhand von Daten eines niederländischen Feldversuchs (AOS Field Operational Test [13]) mit instrumentierten Fahrzeugen bestimmt.
3. Daten eines Feldversuchs mit instrumentierten Personenwagen in den USA (100-Car Naturalistic Driving Study, NDS [14]) sind zur Charakterisierung des zeitlichen Verlaufs der Bremsverzögerung bei Bremsereignissen (Verzögerungsprofile) verwendet worden.

Die Daten des Verkehrs auf Schweizer Autobahnen waren sehr umfangreich und hatten auch eine gute Qualität. Neuerdings sind im Rahmen des Projekts AGB 2017/004 [15] zwar erhebliche Inkonsistenzen bei der Klassifizierung von Lastwagen zwischen den SASVZ- und den WIM-Daten vom gleichen Standort aufgetaucht, die vermutlich von systematischen Mess- und Klassifizierungsfehlern herrühren, doch insgesamt bleibt die Qualität der Daten gut.

Weniger befriedigend sind hingegen die Daten, die zur Bestimmung der Bremsrate verwendet wurden (AOS Field Operational Test [13]). Diese Daten wurden für einen anderen Zweck erhoben (Testen von elektronischen Unfallverhütungssystemen) und erfüllten nur bedingt die Anforderungen zur Charakterisierung von starken

Bremsereignissen. Erfasst wurden alle 2 Minuten nur die positiven und negativen Spitzenwerte der Beschleunigung in Fahrrichtung der Fahrzeuge. Auch bei hohen Spitzenwerten (z.B. grösser als 4 ms^{-2}) war es nicht erkennbar, ob der Spitzenwert durch eine länger anhaltende Bremsung bei fliessendem Verkehr, durch eine kurze Geschwindigkeitskorrektur bei stockendem Verkehr oder sogar durch das Überfahren einer Belagsunebenheit hervorgerufen wurde. Auch die Position des Fahrzeugs wurde via GPS nur alle 2 Minuten erhoben. Da die beiden Messsysteme nicht synchronisiert waren, war die zuverlässige Geolokalisierung eines mutmasslichen Bremsereignisses äusserst schwierig. Jedes potenzielle Bremsereignis musste anhand des Kartenmaterials analysiert werden und dann aufgrund des Strassennetzes entschieden werden, ob das Bremsereignis auf der freien Strecke, vor einer scharfen Kurve, vor einer Kreuzung, an einer Ein- oder Ausfahrt usw. aufgetreten war. Die damit ermittelten Bremsraten an Autobahnen und Regionalstrassen stimmten zwar grössenordnungsmässig mit den wenigen damals publizierten Werten aus der Literatur überein [14][16]. Der grosse Entscheidungsspielraum bei der Beurteilung der Bremsereignisse begünstigte jedoch systematische Fehler und erhöhte die Unsicherheit der Ergebnisse. Da der charakteristische Wert der Bremskraft sehr sensitiv auf eine Änderung der Bremsrate reagiert, sollte diese möglichst genau bestimmt werden. Eine Reduktion der Bremsrate um z.B. den Faktor 10 wirkt sich auf den charakteristischen Wert der Bremskraft wie eine Reduktion der Wiederkehrperiode um den gleichen Faktor aus.

Auch die Daten der Verzögerungsprofile bei einem Bremsereignis waren für die Bestimmung von Bremskräften nicht ideal, da in Personenwagen andere Bremssysteme eingesetzt werden als in Lastwagen. Dieser Unterschied hat einen Einfluss auf die Verzögerungsprofile und dadurch letztlich auf die vom Fahrzeug auf die Brücke übertragenen Kräfte, da diese aus dem Produkt der Masse des Fahrzeugs mit dem Verzögerungsprofil gebildet werden. Für Lastwagen wurden daher nur die Verzögerungsprofile der Personenwagen berücksichtigt, die kompatibel mit Bremssystemen von Lastwagen waren. Dies führte dazu, dass der bereits beschränkte Datenumfang (828 Datensätze) wesentlich reduziert werden musste. Um aus den Daten eine möglichst grosse Zahl von Verzögerungsprofilen zu generieren, wurden Datensätzen mit mehreren voneinander zeitlich getrennten Bremsereignissen zerstückelt und daraus Verzögerungsprofile erstellt. Für Personenwagen konnten so 1600 und für Lastwagen 920 Verzögerungsprofile erstellt werden. Davon wiesen nur gerade 110 Verzögerungsprofile für Lastwagen einen Spitzenwert grösser als 4 ms^{-2} aus. Wenn man bedenkt, dass zur Berechnung des charakteristischen Werts der Bremskraft etwa 20'000 simulierte Bremsereignisse mit im Schnitt 10 involvierten Fahrzeugen erforderlich ist, dann erkennt man, wie klein diese Datenbasis ist. Um diese Lücke zu füllen, mussten im Projekt AGB 2011/003 bei Verzögerungsprofilen mit einem Spitzenwert grösser als 6 ms^{-2} häufig stark vereinfachte, synthetische Verzögerungsprofile eingesetzt werden. Diese traten bei den Bremsszenarien, die mit den charakteristischen Werten der Bremskraft assoziiert waren, daher besonders häufig auf.

1.2 Stand der Forschung

Seit dem Abschluss des Forschungsprojekt AGB 2011/003 „Aktualisierte Bremskräfte zur Überprüfung von Strassenbrücken“ [12] hat sich die Datenlage etwas verbessert. Die Europäische Union hat über mehrere Jahre ein umfangreiches Forschungsprojekt mit instrumentierten Motorfahrzeugen gefördert, UDRIVE (eUropean naturalistic Driving and Riding for Infrastructure and Vehicle safety and Environment), das im Juni 2017 abgeschlossen wurde [17]. Im Rahmen dieses Projekts sind Messdaten von rund 50'000 Fahrstunden mit Personenwagen, Lastwagen und Motorrädern erfasst worden [18]. Die Untersuchung fokussierte sich auf Themen wie Interaktionen mit ungeschützten Verkehrsteilnehmern, Ablenkung und Unaufmerksamkeit des Fahrers, Potenzial des Ökofahrens sowie Risikofaktoren, Unfallursachen und alltägliches Fahren.

Gemäss der öffentlich zugänglichen Literatur des Projekts sind Bremsereignisse erfasst worden. Im Rahmen des Themas Risikofaktoren, Unfallursachen und alltägliches Fahren

sind z.B. länderspezifische Unterschiede über das Bremsverhalten bei Kreiseln, Kreuzungen, Kurven, gerade Strecken usw. untersucht worden [19]. In einer Publikation wurde mit den UDRIVE-Daten das Bremsverhalten von 24 Lastwagen-Fahrern eines niederländischen Logistikunternehmens untersucht [20]. Bei starken Bremsereignissen (der Schwellenwert betrug 3.0 ms^{-2}) wurden Innerorts bedeutende Unterschiede zwischen den Fahrern festgestellt (0 bis 6 Ereignisse pro 100 km). 70% der Ereignisse traten innerorts auf. Auf Überlandstrassen wurden 22% und auf Autostrassen und Autobahnen 8% der Ereignisse erfasst. Für dieses Projekt besonders interessant ist die Auswertung der Bremsrate pro Strassenkategorie (Strassen innerorts und ausserorts sowie Autobahnen). Auf Autobahnen wurde im Mittel ein Ereignis alle 5556 km festgestellt. Dieses Mass der Bremsrate wird im Folgenden mit dem Begriff Ereignisdistanz bezeichnet. Auf Ausserortsstrassen reduzierte sich dieser Wert auf 208 km. Auf Strassen innerorts wurde schliesslich im Mittel ein Ereignis alle 53 km erfasst.

Tab. 1 fasst die in der Literatur verfügbaren Studien zusammen. Die ersten beiden Studien liefern eine grobe Schätzung der Ereignisdistanzen. Die Daten wurden in den Vereinigten Staaten für Personenwagen und Nutzfahrzeuge erhoben. In einer ähnlichen Studie von Hickman und Hanowski [21] wurde das Auftreten von Bremsereignissen mit einem Ereignis alle 8'000 km angegeben, wobei eine hohe Verzögerungsschwelle von 5 ms^{-2} gewählt wurde. Ein Vergleich der Ergebnisse ist schwierig, da unterschiedliche Schwellenwerte und Versuchsbedingungen verwendet wurden.

Tab. 1 *Ereignisdistanzen Bremsereignisse aus Literatur.*

Fahrzeuge	**Zurückgelegte Distanz**	**Schwellenwert (Bremsereignisse)**	**Ereignisdistanz [km]**
100-Car Naturalistic Driving Study [14]			
Leichte Fahrzeuge	3.3 x 10^6 km	4 ms^{-2} (233)	14'085
Driver Distraction In Commercial Vehicle Operations [16]			
Nutzfahrzeuge	5 x 10^6 km	2 ms^{-2} (3'237)	1538
Hazardous Road Location (HRL) identification project [23]			
Leichte Fahrzeuge	3.2 x 10^3 km	4 ms^{-2} (31)	Ausserorts: 179 Autobahn: 1429
AOS [13]			
Lastwagen	3.3 x 10^6 km	4 ms^{-2} (31'834)	Ausserorts: 833 Autobahn: 1250
UDRIVE [17][18][19][20]			
Lastwagen	[--]	3 ms^{-2} (2031)	Innerorts: 53 Ausserorts: 208 Autobahn: 5556

Insgesamt verbessert sich dank den internationalen Feldversuchen mit instrumentierten Fahrzeugen die Datenbasis zusehends. Die grossen Unterschiede zwischen den Auswertungen mit den Daten aus den Projekten AOS und UDRIVE hinsichtlich der Bremsrate zeigt jedoch, dass die Datenbasis für unsere Fragestellung immer noch sehr dünn ist und die Unsicherheit bezüglich der Bremsrate entsprechend gross ist. Zudem können Ergebnisse, die in Ländern wie USA, Kanada oder Australien erarbeitet wurden, nicht ohne weiteres auf Schweizer Verhältnisse übertragen werden. Die Autobahnen in der kleinräumigen Schweiz haben eine hohe Dichte an Ein- und Ausfahrten, Kurven, Tunneln und Raststätten, sodass starke Bremsereignisse eher häufiger auftreten dürften als in grossräumigen Ländern wie USA, Kanada und Australien. Daten aus europäischen Feldversuchen sind eher mit Schweizer Verhältnissen kompatibel, doch zeigt der Vergleich der Auswertung mit den Daten aus den AOS und UDRIVE Projekten, beide auf dem europäischen Strassennetz erfasst, dass die Bandbreite der Bremsrate sehr gross ist.

1.3 Ziel

Das erste Ziel des Projektes ist es, ein breite, einheitliche Datenbasis von Bremsereignissen auf dem Schweizer Strassennetz zu erfassen, welche eingesetzt werden kann, um die Berechnung der Bremskräfte auf Brücken auf einer konsistenten und qualitativ hochwertigen empirischen Datenbasis zu stellen. Die Daten sollen mit einem Monitoring von Bremsereignissen erfasst werden, indem eine Flotte von Lastwagen mit Messinstrumenten bestückt werden. Die Instrumentierung der Fahrzeuge beschränkt sich auf das Wesentliche (Bremsverzögerung und Position des Fahrzeugs) und muss kostengünstig sein, um eine möglichst grosse Zahl von Fahrzeugen für das Monitoring einsetzen zu können. Eine grosszügige Instrumentierung wie im Projekt UDRIVE würde jeglichen Kostenrahmen von AGT-Forschungsprojekten bei weitem sprengen.

Das zweite Ziel des Projekts besteht darin, die erfassten Daten auszuwerten, um

1. die Bremsrate für verschiedene Strassenklassen (Autobahnen, Hauptverkehrsstrassen und Nebenstrassen) und Strassenabschnitte (z.B. Ein- und Ausfahrten bei Autobahnen) zu bestimmen,
2. die Verzögerungsprofile der Bremsereignisse durch Kennwerte zu charakterisieren, um ein potenziell unterschiedliches Bremsverhalten je nach Fahrzeugtyp, Strassenklasse, Strassenabschnitt usw. festzustellen,
3. eine Datenbank von Verzögerungsprofilen aufzubauen, um die Variabilität des stochastischen Modells zu verbessern.

Das dritte Hauptziel des Projekts ist es, mit den aus den erfassten Daten erarbeiteten Bremsraten und der erweiterten Datenbank der Verzögerungsprofile die charakteristischen Werte der Bremskräfte aus den Projekten AGB 2011/003 und AGB 2017/004 zu überprüfen. Darüber hinaus sollen auch die charakteristischen Werte der Bremskräfte für spezifische Streckenabschnitte von Autobahnen wie gerade Strecke, Ein- und Ausfahrten usw. bestimmt werden.

Die erwarteten Resultate sind:

1. Breite und detaillierte Informationen zu starken Bremsereignissen auf dem Schweizer Strassennetz.
2. Spezifische Bremsraten für verschiedene Strassenkategorien und Strassenabschnitte.
3. Grosse Datenbank von Verzögerungsprofilen für Lastwagen.
4. Überprüfung der in Projekten AGB 2011/003 und AGB 2017/004 erarbeiteten charakteristischen Werte der Bremskraft.
5. Präzisierung der charakteristischen Werte der Bremskraft für spezifische Autobahnabschnitte (freie Strecke, Ein- und Ausfahrten von Autobahnen)

1.4 Gliederung des Berichts

Neben dieser kurzen Einführung ist der Bericht folgendermassen gegliedert:

Kapitel 2 beschreibt die Instrumentierung der Fahrzeuge, die Datenerfassung, die Validierung des Messverfahrens, die Erfahrungen aus dem Pilotversuch und die Auslegung der Monitoringkampagne.

Kapitel 3 befasst sich mit der Analyse der erfassten Daten und beschreibt die Aufbereitung der Rohdaten, die Verfahren zur Bestimmung der gefahrenen Distanz auf den verschiedenen Strassenklassen, die Charakterisierung der Verzögerungsprofile mit Kennwerten, die Charakterisierung der Bremsereignisse und das Verfahren zur Berechnung der Bremsraten.

Kapitel 4 stellt die Resultate der Datenanalyse vor und beschreibt die Einflüsse der Fahrzeugkategorie, der Strassenklasse und spezifischer Strassenabschnitte auf die Kennwerte der Verzögerungsprofile. Darüber hinaus werden die Bremsrate für verschiedene Strassenklassen und spezifische Strassenabschnitte des Autobahnnetzes vorgestellt.

Kapitel 5 beschreibt kurz das stochastische Simulationsmodell sowie das Verfahren zur Berechnung des charakteristischen Werts der Bremskraft für verschiedene Bremsraten und Wiederkehrperioden. Danach werden die Resultate der Simulationen zur Bestimmung des charakteristischen Werts der Bremskraft vorgestellt.

In Kapitel 6 werden die wichtigsten Ergebnisse aus Kapitel 4 und 5 im Hinblick auf ihre praktische Umsetzung analysiert und die Bestimmungen der Normen SIA 261 und 269/1 bewertet. Anschliessend wird für bestehende Brücken ein einfaches Einwirkungsmodell erarbeitet.

Die Anhänge I und II behandeln zwei Fragenstellungen, die auf Wunsch der Arbeitsgruppe BGT ins Forschungsprojekt aufgenommen wurden. Der Anhang I untersucht, unter welchen Umständen relevante dynamische Amplifikationen bei Brücken auftreten können und wie sich plastische Verformungen darauf auswirken. Der Anhang II behandelt die Frage, ob mit dem in diesem Projekt entwickelten Monitoringsystem dynamische Vertikalbeschleunigungen eines Fahrzeugs erfasst werden können und daraus zuverlässige Informationen über vertikale dynamische Radkräfte ermittelt werden können.

2 Monitoring der Bremsereignisse

2.1 Instrumentierung

Um die Kosten der Instrumentierung drastisch zu senken, sind zur Datenerfassung kommerzielle Telefone (Smartphones) eingesetzt worden. Moderne Telefone der Mittelklasse verfügen über einen dreiachsigen Beschleunigungssensor, ein dreiachsiges Gyroskop, und einen GPS-Empfänger. Sie verfügen zudem über einen leistungsfähigen Prozessor und gute Speicherkapazitäten. Dies erlaubt, die erfassten Messdaten in Echtzeit zu verarbeiten und grosse Mengen von Daten temporär auf dem Telefon abzuspeichern. Schliesslich können über das Funkmodul des Telefons und dem Mobilfunknetz die erfassten Daten auf einen Datenserver übertragen werden.

Selbstverständlich weisen die Sensoren, die in einem Telefon eingebaut sind, nicht die gleichen Qualitätsmerkmale wie hochpräzise, professionelle Messgeräte auf. Diese verfügen über eine höhere Datenqualität in einem breiteren Parameterbereich (z.B. Frequenzbereich) und eine stabilere und präzisere Datenerfassungsrate auf als die Sensoren eines Telefons. Es ist daher unrealistisch, von einem Telefon die gleiche Stabilität und Datenqualität zu erwarten, da Telefone und Sensoren primär nicht für Messzwecke konzipiert sind und potenzielle Störungen durch gleichzeitig ablaufende Prozesse die Datenerfassung und die Langzeitstabilität der Anwendung beeinflussen können. Die Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass das Telefon ausreichend genaue Daten liefern kann. Darüber hinaus konnte eine ausreichend zuverlässige Datenerfassungsstrategie für den Langzeiteinsatz entwickelt werden.

In diesem Kapitel werden die Vorversuche zur Bewertung der Datenqualität, Zuverlässigkeit und Robustheit des Datenerfassungssystems vorgestellt. Besonderes Interesse galt dem Verständnis potenzieller Fehlerquellen und der Definition der erforderlichen Genauigkeit des Telefons im Vergleich zu einem hochwertigen Messsystem. Darüber hinaus müssen bei der Installation des Telefons praktische Überlegungen angestellt werden, wie z.B. die Bestimmung der optimalen Position des Telefons im LKW, die Bewertung der möglichen Auswirkungen der Position auf die Genauigkeit der Daten, die Auswahl der erforderlichen Abtastrate und der relevanten Messgrössen, sowie die Struktur und Organisation der gesammelten Daten.

2.2 Datenerfassung

Die Datenerfassung wurde mit Telefonen durchgeführt, die mit dem Betriebssystem Android ausgerüstet waren. Die Entscheidung, in der Android-Plattform-Umgebung zu arbeiten, wurde aufgrund der weiten Verbreitung dieses Betriebssystems getroffen, die eine grosse Auswahl von Telefonen erlaubte. Die Datenerhebung erfolgte durch die Entwicklung von drei verschiedenen Applikationen (Apps), von denen jede für einen bestimmten Zweck eingesetzt wurde. Die Entscheidung, nicht nur eine, sondern drei verschiedene Applikationen zu entwickeln, wurde getroffen, um die Stabilität und Zuverlässigkeit der Datenerfassung zu erhöhen.

Die erste Applikation erfasste die Daten vom GPS-Empfänger, um die Standorte des LKWs auf seiner täglichen Route zu verfolgen und den Standort der Bremsereignisse zu bestimmen. Die zweite Applikation zeichnete die Bremsverzögerung (Beschleunigungssensor) und Drehrate (Gyroskop) nur während eines Bremsereignisses auf. Dies bedeutet, dass die Datenerfassung automatisch aktiviert wurde, sobald ein Bremsereignis erkannt wurde, und dann kontinuierlich Daten aufzeichnete, bis das Bremsereignis beendet war. Die dritte Applikation wurde erstellt, um Drehraten kontinuierlich über die Zeit aufzuzeichnen, um die Fahrtrichtung des Fahrzeugs zu korrigieren.

Die ursprüngliche Programmierung der Applikationen erfolgte auf einer Android-Plattform 11, wobei für die Vorversuche XIAOMI Telefone (Redmi Plus 5, veröffentlicht in Q4/17 und Redmi Note 5, veröffentlicht in Q1/18) verwendet wurden. Die finalen Versionen wurden auf Telefonen von Samsung (XCover Pro, Q1/2020) und HTC (Desire 22 Pro, Q2/2022) mit Android 13 SDK 31 implementiert. Es ist zu beachten, dass die Stabilität der Anwendungen durch die verschiedenen Android-Versionen und Hersteller beeinflusst wird. Jeder Hersteller setzt seine eigene Version des Open-Source-Betriebssystems Android ein. Dies hatte keinen direkten Einfluss auf die Qualität der Messungen. Dennoch gab es Unterschiede im Verhalten der verschiedenen Apps, wie zum Beispiel kleine Änderungen in der Abtastrate und Probleme in Bezug auf die Langzeitstabilität der Apps. Um mögliche Programmabstürze und Interaktionen zu vermeiden, wurden alle Programme im Hintergrund ausgeführt. Darüber hinaus wurde jede Anwendung so programmiert, dass sie nicht in den Energiesparmodus wechselte. Im Folgenden werden die vier Applikationen und die entsprechenden Messgrössen vorgestellt.

2.2.1 Erfassung der Standort des Fahrzeugs

Der Standort des Fahrzeugs wurde über den GPS-Empfänger im Telefon erfasst. Die Datenerfassungsrate betrug im Mittel etwa 1 Hz. Bei jeder Erfassung wurde ein Zeitstempel, der Längengrad, der Breitengrad und die Höhe über Meer der Fahrzeugposition, ein Mass der Ungenauigkeit der Position sowie die Geschwindigkeit und Fahrrichtung des Fahrzeugs aufgezeichnet. Diese Messgrössen mit Einheiten sind in Tab. 2 wiedergegeben. Geschwindigkeit und Fahrtrichtungen werden direkt vom GPS-Empfänger bereitgestellt und basieren auf den Positionsänderungen im Laufe der Zeit. Die horizontale Ungenauigkeit, die vom Android-System bereitgestellt wird, beschreibt die Unsicherheit der Positionsbestimmung und entspricht dem Radius eines Kreises um die jeweilige Position des Fahrzeugs. Dies bedeutet, dass die tatsächliche Position des Fahrzeugs mit einer Wahrscheinlichkeit von 68% innerhalb dieses Kreises liegt. Diese Informationen basieren auf dem Referenzsystem von Android [36] .

***Tab. 2** Grössen der Positionserfassung.*

Messgrösse	**Einheit**
Zeitstempel	Millisekunden ab 1. Januar 1970, 0:00 Uhr
Längengrad	Grad (WGS 84, Dezimalschreibweise, -180° – 180°)
Breitengrad	Grad (WGS 84, Dezimalschreibweise, -90° – 90°)
Höhe über Meer	Meter
Horizontale Ungenauigkeit	Meter
Geschwindigkeit	Meter/Sekunde
Fahrrichtung	Grad (0° – 360°), 0° Richtung Osten
Ungenauigkeit	Meter

2.2.2 Erfassung der Bremsereignisse

Die Applikation ist so programmiert, dass nur Bremsereignisse aufgezeichnet werden, die eine vordefinierte Intensitätsschwelle (Triggerschwelle) überschreiten. Die Erfassung wird ausgelöst, sobald die Beschleunigung in Fahrrichtung die Triggerschwelle überschreitet (Abb. 3 links). Um das gesamte Bremsereignis zu erfassen, wird die Datenerfassung auch auf Messwerte vor und nach dem Überschreiten der Schwelle ausgeweitet. Um Fehlauslösungen, die durch kurzzeitige Überschreitungen der Schwelle infolge von Motorvibrationen, Schaltvorgängen, Stössen bei der Überfahrt von Hindernissen usw. hervorgerufen werden könnten, möglichst zu unterbinden, wurde zur Auslösung der Messung die Beschleunigung in Fahrrichtung zuerst mit einem digitalen Tiefpassfilter gefiltert. Die obere Eckfrequenz des Filters betrug 2 Hz. Die gefilterte Beschleunigung wurde nur für die Auslösung der Messung verwendet. Aufgezeichnet wurde immer die

ungefilterte Beschleunigung. Die Triggerschwelle für eine an- und absteigende Flanke betrug 2 ms^{-2}. Tab. 3 fasst die aufgezeichneten Grössen bei einem Bremsereignis zusammen. Neben den Beschleunigungen und Drehraten wurden auch 2 Zeitstempel erfasst.

***Tab. 3** Grössen bei einem Bremsereignis.*

Messgrösse	**Einheit**
Zeitstempel	Millisekunden ab 1. Januar 1970, 0:00 Uhr
Sensorzeit	Picosekunden
Beschleunigung in X-Richtung	ms^{-2}
Beschleunigung in Y-Richtung	ms^{-2}
Beschleunigung in Z-Richtung	ms^{-2}
Drehrate in X-Richtung	Grad/Sekunde (°/s)
Drehrate in Y-Richtung	Grad/Sekunde (°/s)
Drehrate in Z-Richtung	Grad/Sekunde (°/s)

Abb. 3 rechts zeigt die Standardausrichtung der Achsen, wobei die Y-Achse immer in Fahrtrichtung ausgerichtet ist. Die entlang der Y-Achse gemessene Beschleunigung triggerte auch die Messung beim Überschreiten des Schwellenwerts. Der Zeitstempel wird wiederum von der internen Uhr des Telefons geliefert und dient der Synchronisation mit den Daten der anderen Applikationen. Eine weitere Markierung der Zeit, die Sensorzeit, entsprich der Zeit der internen Uhr des Beschleunigungssensors und wurde erfasst, um Zeitsprünge bei der periodischen Synchronisation der Uhrzeit des Telefons mit der Internetzeit zu vermeiden, die zu einer zeitlichen Verzerrung der Bremsverzögerung führen würden. Die Sensorzeit wurde für die Datenverarbeitung der Bremsereignisse verwendet, da sie bei allen getesteten Geräten genauer als die Zeitstempel waren. Die verwendete Abtastrate betrug 50 Hz. Die untersuchten Telefone und ihre jeweiligen Sensoren und Hersteller sind in Tab. 4 aufgeführt.

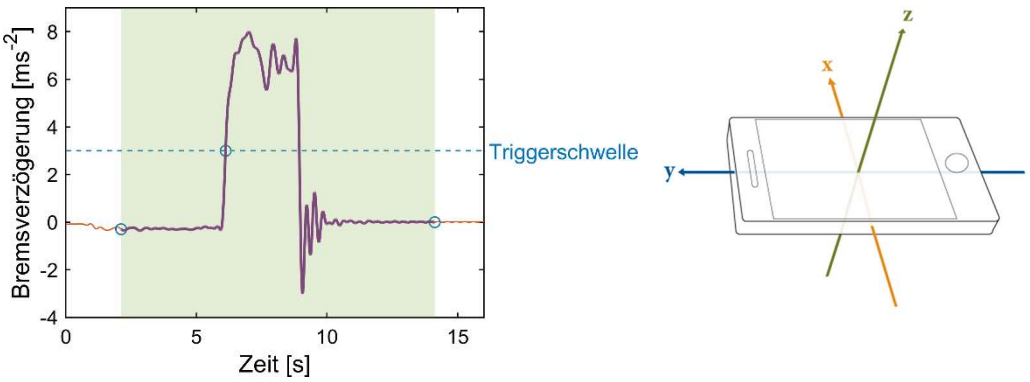


***Abb. 3** Erfassung eines Bremsereignisses (links), Standardausrichtung der Achsen eines Telefons (rechts).*

Beim Starten der Applikation wird für die drei Richtungen ein Nullabgleich durchgeführt. Dazu werden über eine Zeitspanne von 5 Sekunden die Beschleunigungen der 3 Achsen erfasst, deren Mittelwerte gebildet und abgespeichert. Die Mittelwerte werden dann jeweils von den erfassten Beschleunigungen subtrahiert. Dadurch werden in der senkrechten Richtung die Erdbeschleunigung und in den horizontalen Richtungen etwaige Ungenauigkeiten des Sensors kompensiert. Beim Nullabgleich wird vorausgesetzt, dass das Fahrzeug sich auf einer horizontalen Ebene befindet und damit die x-Achse in vertikaler Richtung zeigt. Diese Annahme kann jedoch nicht unabhängig geprüft werden. Fehler in der Bremsverzögerung, die durch diese Annahme entstehen könnten, werden bei der Datenanalyse (siehe Kapitel 0) korrigiert.

***Tab. 4** Beschleunigungssensoren der Telefone.*

Telefon	Modell (Hersteller)
XIAMOMI Redmi Plus 5	BMI120 (Bosch)
XIAMOMI Redmi Note 5	ICM20607 (TDK)
Samsung XCover Pro	ICM42605M (TDK)
HTC (Desire 22 ProQ2/2022)	ICM4x6xx-Serie (TDK)

2.2.3 Erfassung der Drehrate

Die Drehrate (Winkeländerungsgeschwindigkeit) wird kontinuierlich in 3 zueinander senkrechten Achsen erfasst. Da die Drehrate vornehmlich zur Korrektur der Fahrrichtung aus der Positionsmessung eingesetzt wurde und diese eine Abtastrate von 1 Hz aufweist, wurde zur Begrenzung der Datenmenge eine Abtastrate von 10 Hz gewählt.

Aufgezeichnet werden ein Zeitstempel, die Sensorzeit und die Drehrate in drei zueinander senkrechten Richtungen. Der Zeitstempel wird wiederum von der internen Uhr des Telefons geliefert und dient der Synchronisation mit den Daten der anderen Applikationen. Die Sensorzeit entspricht der Zeit der internen Uhr des Gyroskops und wurde ebenfalls erfasst, um Zeitsprünge bei der periodischen Synchronisation der Uhrzeit des Telefons mit der Internetzeit zu vermeiden. Tab. 5 fasst die aufgezeichneten Grössen bei der Erfassung der Drehrate zusammen.

***Tab. 5** Grössen bei der Erfassung der Drehrate.*

Messgrösse	Einheit
Zeitstempel Drehrate	Millisekunden ab 1. Januar 1970, 0:00 Uhr
Sensorzeit	Picosekunden
Drehrate in X-Richtung	Grad/Sekunde (°/s)
Drehrate in Y-Richtung	Grad/Sekunde (°/s)
Drehrate in Z-Richtung	Grad/Sekunde (°/s)

2.2.4 Weitere Daten

Neben den mit dem Telefon gemessenen Daten wurden noch weitere Daten erfasst. Das Gesamtgewicht des Fahrzeugs liess sich leider ohne unzumutbaren Aufwand des Logistikunternehmens Planzer AG nicht erfassen. Die Daten der Leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgabe (LSVA) [37], die von der Schweizer Zollverwaltung zur Verfügung gestellt wurden, konnten hingegen beigezogen werden. Die Daten der LSVA erfassen die gefahrenen Kilometer und das zulässige Gesamtgewicht (nicht das effektive Gewicht) eines Fahrzeugs. Damit konnte festgestellt werden, ob ein Fahrzeug mit oder ohne Anhänger unterwegs war. Diese Information konnte benutzt werden, um zu beurteilen, ob das Vorhandensein eines Anhängers einen Einfluss auf die Bremsverzögerung hatte. Die LSVA-Daten sind nur für Lastzüge relevant, da es vorkommen kann, dass ein Lastzug an einem Logistikstandort abgekoppelt und einige Stunden später wieder angekoppelt wird. Die LSVA-Daten für einfache Motorwagen und Sattelschlepper waren nicht relevant, da erstere ohne Anhänger und letztere in äusserst seltenen Fällen ohne Sattelanhänger betrieben werden.

Abb. 4 zeigt beispielhaft die typische Anwendung der LSVA-Daten. Die blaue Linie zeigt die Fahrstrecke eines Lastzuges in der Konfiguration mit Anhänger (40 t) und die orange Linie die Fahrstrecke in der Konfiguration ohne Anhänger (26 t). Die gelben Markierungen zeigen die Standorte das Ab- und Ankuppeln des Anhängers. In der rechten Abbildung sind die mit und ohne Anhänger zurückgelegten Strecken dargestellt. Von den insgesamt 332 km wurden 69 km ohne Anhänger zurückgelegt.

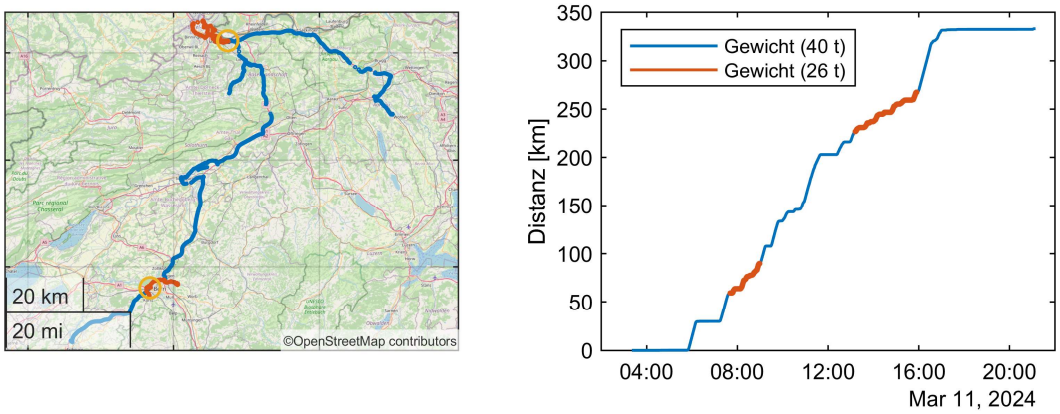


Abb. 4 *Grafische Darstellung der Nutzung der LSVA-Daten, gefahrene Strecke (links), gefahrene Fahrstrecke mit und ohne Anhänger.*

Zudem wurden auch Wetterdaten wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Niederschlagsmenge erfasst. Die Wetterdaten wurden mit Hilfe der Free Weather API des Portals https://open-meteo.com/ [38] extrahiert. Diese Daten wurden nur für die Bremsereignisse erhoben. Als Mass für die Nässe der Strasse wurde die kumulierte Niederschlagsmenge in den 3 Stunden vor dem Bremsereignis berücksichtigt. Anhand dieser Wetterdaten kann festgestellt werden, ob sich die Häufigkeit und Intensität der Bremsereignisse bei nasser Fahrbahn oder niedrigen Temperaturen ändert.

2.3 Validierung der Messungen mit dem Telefon

Es wurden mehrere Tests durchgeführt, um die Qualität der vom Telefon gelieferten Daten zu bewerten. Die Untersuchung beschränkte sich auf die Überprüfung der Qualität der Beschleunigungen und der Daten des GPS-Empfängers. Es wurden keine spezifischen Tests zur Bewertung der Qualität der Drehraten durchgeführt, da diese für das Projekt von untergeordneter Bedeutung waren und ausschliesslich für die lokale Korrektur der Fahrtrichtung bei sehr kleinen Geschwindigkeiten verwendet wurden.

Die Validierungstests bestanden darin, die Messung des Telefons mit einer präzisen Referenzmessung zu vergleichen, die mit einem hochwertigen Messsystem durchgeführt wurde. Zur Messung der Bremsverzögerung wurden kapazitive Beschleunigungssensoren PCB 3701G3FA3G verwendet, die auch konstante Beschleunigungen erfassen können. Sie haben einen Messbereich von ±30 ms^{-2} und eine Auflösung von ca. 300 μms^{-2} rms und arbeiten im Frequenzbereich 0 bis 100 Hz. Die Ungenauigkeit der Sensoren ist kleiner als 5% des Amplitudenwerts. Bei jedem Test wurde die Beschleunigung in Fahrtrichtung und die vertikale Beschleunigung senkrecht zur Fahrtrichtung gemessen. Jedes Sensorpaar wurde auf einem quadratischen Hohlprofil befestigt, das auf eine Stahlplatte montiert war, an der auch die Telefone fixiert wurden konnten (Abb. 5). Die Daten wurden mit einem HBM QuantumX MX840B R Universalmessverstärker und einem HBM CX22B R-W Datenrekorder aufgezeichnet.

Die GPS-Daten wurden mit einem Navilock NL-8002U USB 2.0 Multi-GNSS-Empfänger gemessen, der direkt an den Datenrekorder angeschlossen war. Die gelieferten GPS-Daten waren die Fahrzeuggeschwindigkeit, die Fahrzeugkoordinaten (WGS84) und die GPS-Zeit. Die Geräte wurden von einer 12V-Batterie mit Strom versorgt. Die Datenaufzeichnungsgeräte und die Batterie wurden in einer Kunststoffbox untergebracht, die auf dem Boden der getesteten Fahrzeuge platziert wurde. Die Datenerfassungsgeräte wurden mit der HBM-Messsoftware Catman konfiguriert, die auf einem Laptop installiert war, der über eine USB-Schnittstelle mit dem Datenrekorder verbunden war.

Die Daten wurden mit einer Abtastrate von 200 Hz aufgezeichnet. Die Datenerfassung konnte kontinuierlich über einen längeren Zeitraum oder durch einen Trigger ausgelöst werden. Als Trigger wurde das Signal eines Beschleunigungssensors verwendet, der die

Beschleunigung in Fahrtrichtung aufzeichnete. Dieses Signal wurde mit einem Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 2 Hz gefiltert, um die hochfrequenten Vibrationen des Motors und des Fahrwerks zu eliminieren. Dadurch wurde verhindert, dass kurzzeitige Vibrationen, z.B. infolge Unebenheiten auf der Fahrbahn, eine Messung auslösen. Die Triggerschwelle für eine ansteigende Flanke betrug 2 ms^2, die Triggervorlaufzeit (Dauer der aufgezeichneten Daten vor Aktivierung des Triggers) 8 s und die Gesamtaufzeichnungsdauer pro Triggerereignis 20 s. Die vom GPS-Referenzsystem aufgezeichneten Daten hatten eine Aktualisierungsrate von 1 Hz. Die Daten wurden während der Tests im Datenrekorder gespeichert.

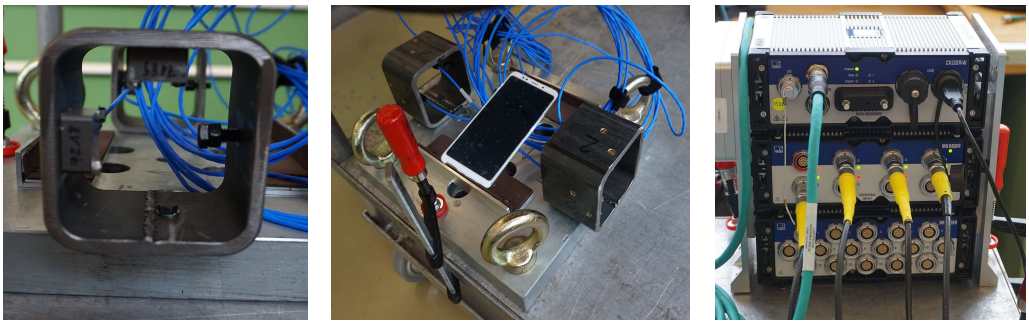


Abb. 5 *Referenz-Messsystem: Beschleunigungssensoren auf Hohlprofil (links), Metallplatte mit Hohlprofil (Mitte), Datenerfassungssystem aus Universalmessverstärker und Datenrekorder (rechts).*

2.3.1 Fahrversuche mit Personenwagen

Die ersten Tests wurden in einem Personenkraftwagen durchgeführt. Dies ermöglichte eine erste Einschätzung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Telefone. In dieser ersten Testreihe wurden die beiden Telefone Xiaomi Redmi 5 Plus und Redmi Note 5, im Folgenden als "Telefon W" und "Telefon B" bezeichnet, mit dem Referenzsystem verglichen. Die schwere Platte mit den Telefonen und den Beschleunigungssensoren wurden auf dem Boden vor dem Beifahrersitz gelegt. Um den GPS-Empfang zu optimieren, wurde die GPS-Antenne des Referenzsystems auf dem Dach ausserhalb des Fahrzeugs positioniert. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 6 dargestellt.

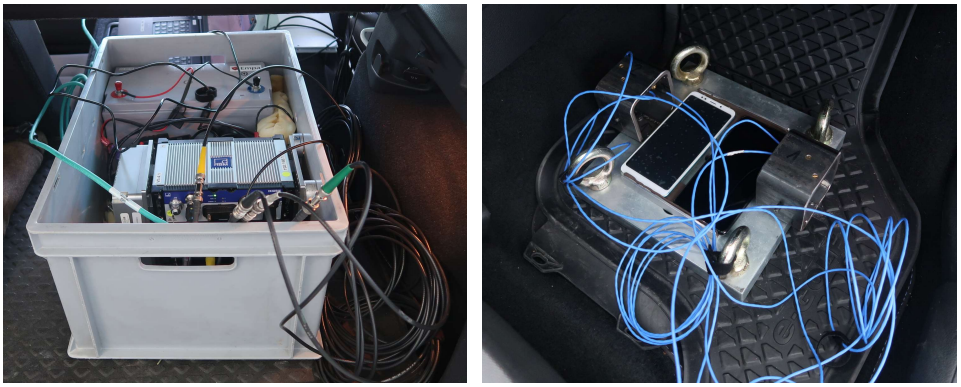


Abb. 6 *Tests mit Personenwagen: Datenerfassungssystem und Batterie (links), Telefone auf der Stahlplatte mit den beiden Beschleunigungssensoren (rechts).*

Ein typischer Test bestand aus einer etwa einstündigen Fahrt mit Bremsungen mit unterschiedlichen Bremsintensitäten aus verschiedenen Geschwindigkeiten heraus. Abb. 7 zeigt einen Vergleich der Messungen von drei Bremsereignissen mit unterschiedlichen Spitzenwerten der Verzögerung. Die dargestellten Signale wurden mit einem Tiefpassfilter bei einer Frequenz von 4 Hz gefiltert. Beim ersten Bremsereignis handelt es sich um eine schwache Bremsung mit kleiner maximalen Bremsverzögerung (2.5 ms^{-2}), die knapp über der festgelegten Auslöseschwelle liegt und mehr als 5 Sekunden dauert. Das zweite

Bremsereignis mit etwa 4 ms^{-2} maximaler Bremsverzögerung ist durch eine konstante Verzögerung (Plateau) gekennzeichnet und dauert etwa 6 Sekunden. Die letzte Abbildung zeigt eine starke Bremsung mit einer hohen maximalen Bremsverzögerung aus einer niedrigen Geschwindigkeit heraus. Dieser Bremsereignis hat eine Dauer von etwa 2 Sekunden und eine maximale Verzögerung von ca. 10 ms^{-2}. Eine Verzögerung von über 10 ms^{-2} stellt eine obere Grenze dar, da im Vergleich zu Personenkraftwagen die Bremsverzögerung von Lastkraftwagen im Allgemeinen geringer ist.

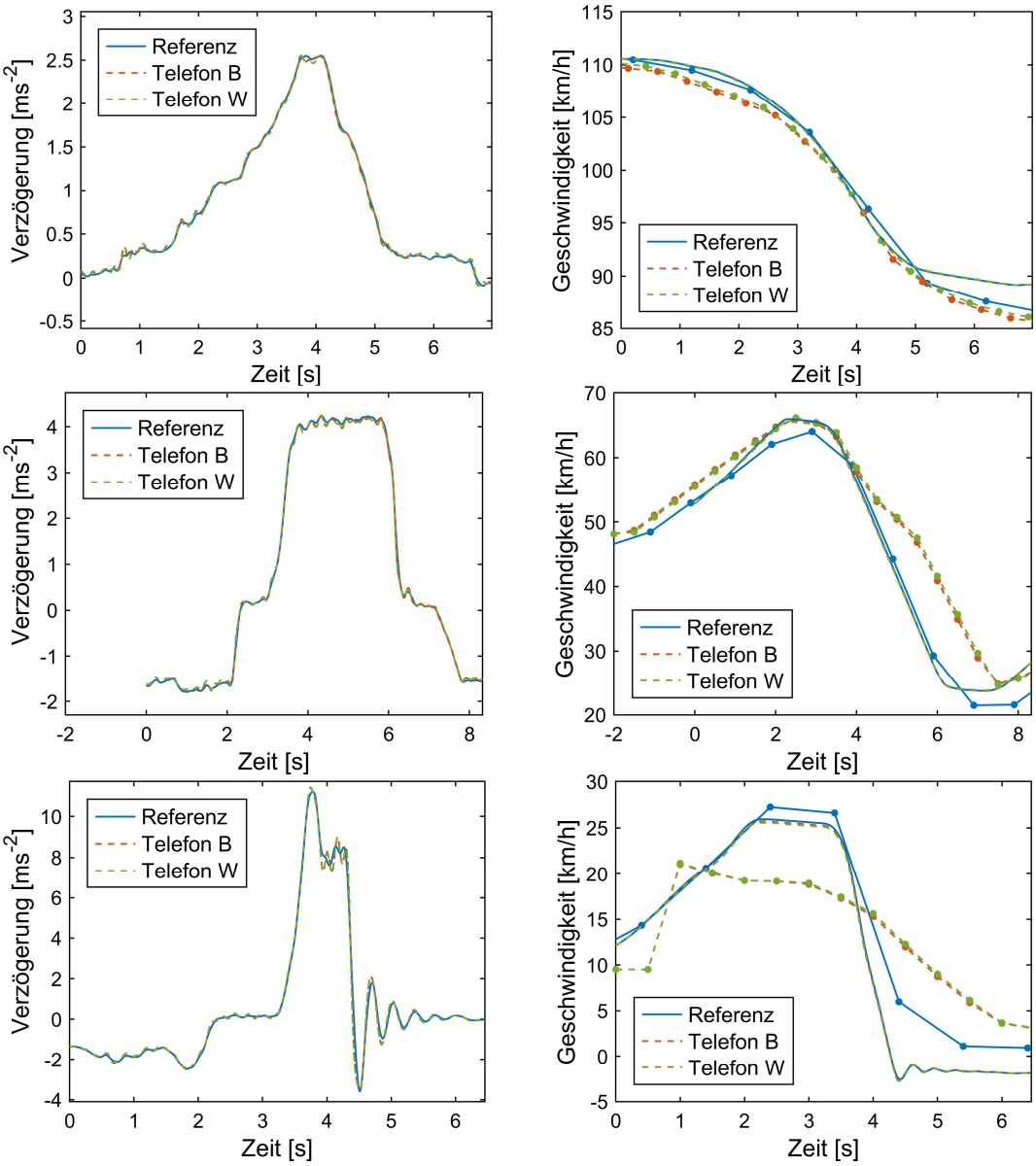


***Abb. 7** Beispiele von aufgezeichneten Bremsereignissen.*

Bei den gezeigten Beispielen waren die Telefone in der Lage, sowohl die Beschleunigungsspitzen als auch eine annähernd konstante Verzögerung, die für eine starke Bremsung charakteristisch ist, präzise zu erfassen. Die rechte Hälfte der Abbildung zeigt die Geschwindigkeit während des Bremsereignisses. Die Kurven ohne Markierungen wurden durch Integration der Verzögerungsprofile berechnet. Da die Verzögerungsprofile sich nur durch die höheren Frequenzanteile unterscheiden, ist kein signifikanter Unterschied zwischen den Geschwindigkeiten zu erkennen.

Die GPS-Geschwindigkeiten sind als Kurven mit Markierungen dargestellt. Wenn sich das Fahrzeug schnell bewegt und die Geschwindigkeitsänderung (moderate bis starke Verzögerung) über mehrere Sekunden erfolgt, ist der Unterschied zwischen den

Geschwindigkeiten klein und die vom GPS-Sensor auf den Telefonen gelieferten Werte stimmen gut mit denen der GPS-Antenne des Referenzsystems überein. Kleine Abweichungen, wie in der mittleren Abbildung dargestellt, sind wahrscheinlich auf zeitliche Verzögerungen im Erfassungssystem des Telefons zurückzuführen.

Wenn sich das Fahrzeug jedoch langsam bewegt und die Qualität des GPS-Signals durch die Gebäude oder geografische Hindernisse schlechter ist oder die Bremsverzögerung sehr kurz und stark ist, nimmt die Genauigkeit des GPS-Sensors der Telefone ab (drittes Bremsereignis). In diesem Beispiel weicht die Geschwindigkeit des Referenzsystems ebenfalls stärker von der Geschwindigkeit aus dem Verzögerungsprofil ab. Die grössten Abweichungen treten in der Endphase des Bremsereignisses auf.

Die Begrenzung der Abtastrate des GPS-Signals auf 1 Hz trägt generell zu den Unterschieden zwischen der GPS-Geschwindigkeit und den Geschwindigkeiten aus der Verzögerung bei. Die dargestellten Bremsereignisse zeigen jedoch, dass die Geschwindigkeit aus den Verzögerungen konsistent mit der Geschwindigkeit des Referenzsystems ist, sodass die mit einem Telefon gemessenen Verzögerungen insgesamt brauchbare Ergebnisse liefern.

Bei der Analyse des Frequenzgehaltes der Verzögerungen des ersten und dritten der oben dargestellten Bremsereignisse wird deutlich, dass bis zu einer Frequenz von etwa 4 Hz kaum relevante Unterschiede zwischen den Telefonen und dem Referenzsystem festzustellen sind (Abb. 8). Zwischen 4 und 10 Hz sind kleinere Unterschiede vorhanden, doch bleiben diese insgesamt beschränkt. Da die Frequenzanteile in diesem Frequenzbereich sehr klein sind (Amplitude 10^{-4} bis 10^{-2}) im Vergleich zu den Frequenzanteilen, die kleiner als 4 Hz sind, sind diese Unterschiede vernachlässigbar. Auch bei sehr kurzen und starken Bremsereignissen (drittes Bremsereignis in Abb. 8), deren Frequenzanteile oberhalb 4 Hz deutlich stärker ausgebildet sind als im ersten Bremsereignis (Amplitude 10^{2}), dürften sich kaum relevante Fehler einschleichen.

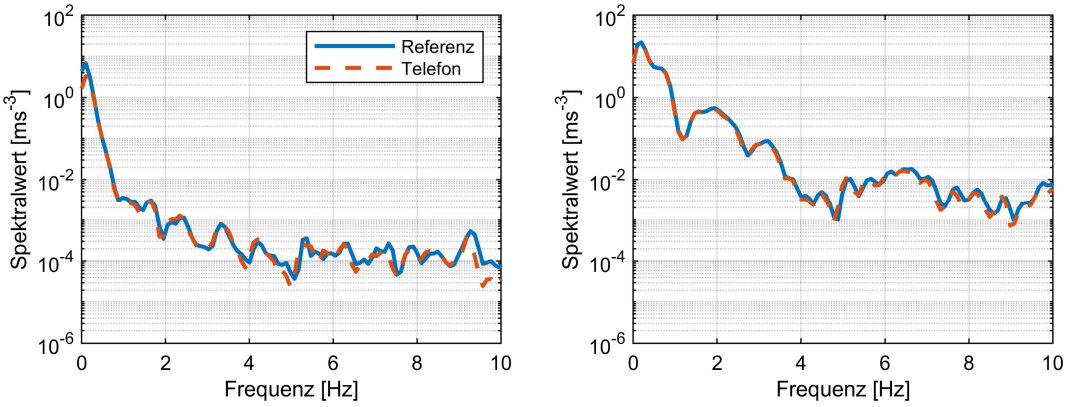


Abb. 8 *Vergleich des Frequenzinhalts der Verzögerungsprofile für das erste und dritte Bremsereignis* in Abb. 7.

Abb. 9 zeigt einen Vergleich der Fahrzeuggeschwindigkeiten zwischen einem Telefon und dem GPS-Referenzsystem. Es herrscht eine gute Übereinstimmung über die gesamte Wegstrecke. Allerdings sind selbst bei hohen Geschwindigkeiten Unterschiede zu beobachten, wenn kürzere Entfernungen analysiert werden. Die Genauigkeit der Geolokalisierung und der Geschwindigkeit wird weiter diskutiert, da sie durch die Positionierung des Telefons im Fahrzeug beeinflusst wird. Eine hohe Genauigkeit und zeitliche Auflösung sind jedoch nicht erforderlich, da die in Kapitel 0 dargestellte Datenverarbeitung durch mässige Ungenauigkeiten nicht beeinträchtigt wird.

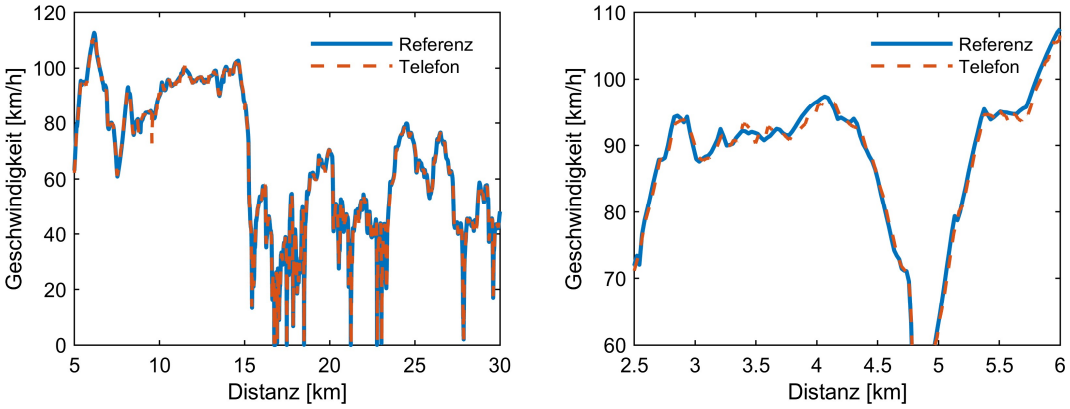


***Abb. 9** Vergleich der Geschwindigkeit über die gesamte Fahrstrecke (links) und auf einer Teilstrecke (rechts).*

2.3.2 Versuche mit einem Schwingungserreger

Die Untersuchungen umfassten Experimente mit einem Schwingerreger, um einen systematischen Vergleich der Qualität der Beschleunigungsdaten zwischen den Telefonen und dem genauen Referenzmesssystem zu ermöglichen. Das Ziel dieser Experimente war es, die Datenqualität der Beschleunigungen im relevanten Frequenzspektrum zu untersuchen, während gleichzeitig andere Anwendungen, wie z.B. die GPS-Applikation, ausgeführt wurden. Das Referenzmesssystem bestand aus zwei kapazitiven Beschleunigungssensoren PCB 3701G3FA3G, die mit einem OROS OR36 Datenerfassungsgerät verbunden waren, das auch zur Steuerung des Schwingungserregers verwendet wurde. Die Telefone wurden mit Abtastraten von 50 Hz und 125 Hz getestet, während das Referenzmesssystem mit einer wesentlich höheren Abtastrate von 500 Hz betrieben wurde.

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse des Versuchs mit dem Telefon Samsung XCover Pro präsentiert. Abb. 10 zeigt den Vergleich der Beschleunigung, wobei die Frequenz des Erregers während der Tests in Schritten von 0.5-Hz zwischen 1 und 11.5 Hz variierte. Bei jeder Frequenz betrug die Dauer der Anregung 15 Sekunden, um den stationären Zustand zu erreichen. Die Abtastrate des Telefons betrug 50 Hz.

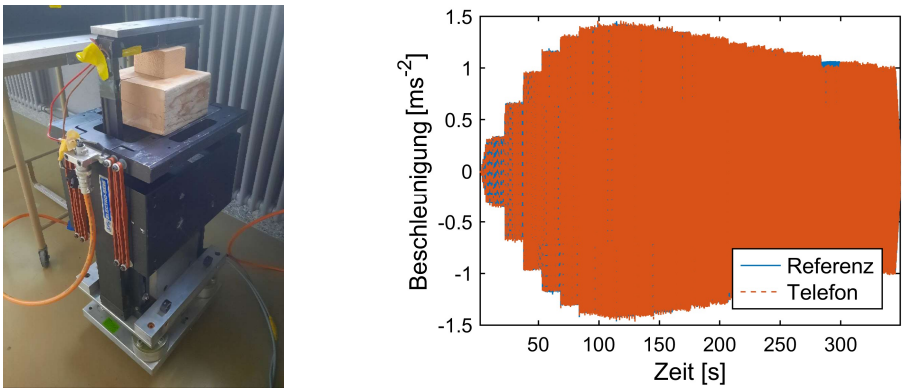


***Abb. 10** Dynamischer Test: Schwingungserreger (links), Beschleunigung über die Zeit (rechts).*

Die zusammengefassten Testergebnisse sind in Abb. 11 dargestellt, in der der Mittelwert der maximalen Beschleunigung im stationären Zustand als Funktion der Frequenz aufgetragen ist. Im Diagramm rechts ist zu erkennen, dass das Telefon im Bereich der beiden Referenz-Beschleunigungssensoren (Ref 1 und Ref 2) liegt und sich oberhalb von 5 Hz zunehmend zu unterscheiden beginnt. Das rechte Diagramm zeigt das Amplitudenverhältnis vom Telefon zu den Referenzsensoren in Prozent. Die Ergebnisse zeigen, dass im untersuchten Frequenzbereich der Mittelwert des Amplitudenverhältnisses

im Bereich von ca. 5 % Abweichung bleibt und diese mit höheren Frequenzen zunimmt. Diese Abweichung entspricht etwa der Differenz zwischen den beiden Referenzsensoren.

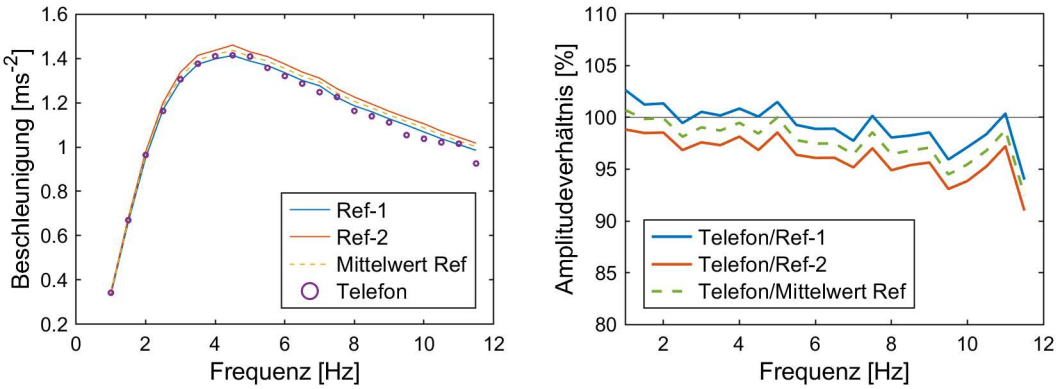


***Abb. 11** Vergleich der Amplitude (links) und des Amplitudenverhältnisses des Telefons zu den Referenzsensoren in Prozent (rechts).*

Die Applikation zur Beschleunigungsmessung wurde auch mit gleichzeitig laufender GPS-Applikation getestet. Es wurden keine signifikanten Wechselwirkungen zwischen den Applikationen festgestellt, die die Messungen beeinflusst hätten. Die Ergebnisse zeigen, dass Telefone eine ausreichende Genauigkeit bei niedrigen Frequenzen, wie sie bei Bremsereignissen auftreten, liefern können. Ähnliche Schlussfolgerungen gelten auch für die anderen Telefone. Unterschiede zwischen den Sensoren der Telefone werden ab rund 5 Hz deutlich. Das Telefon Xiaomi Redmi Note 5 (Telefon S) verliert deutlich stärker an Genauigkeit und weist bei 10 Hz ein mittleres Amplitudenverhältnis von 85% im Vergleich zu den Referenzsensoren auf.

2.3.3 Fahrversuche mit Lastkraftwagen

Nach der Validierung der Messgenauigkeit der Telefone durch die Versuche an Leichtfahrzeugen und im Labor war es von entscheidender Bedeutung, die Datenqualität der Telefone mit Lastkraftwagen (LKW) unter realen Bedingungen zu bewerten. Das Ziel dieser Versuchsphase war es, den optimalen Einbauort des Telefons im LKW zu finden. Dabei sollte die Qualität der Daten der Versuche mit dem PKW möglichst beibehalten, die Funktionsfähigkeit des Telefons nicht beeinträchtigt, die Störungen für den Fahrer und der Installationsaufwand für das Logistikunternehmen akzeptabel gehalten werden.

Die ersten beiden Tests dienten der Abklärung des Standorts des Telefons. Sie wurden mit einer Zugmaschine der Firma Planzer AG (Dietikon, CH) durchgeführt. Die Tests bestanden aus Fahrten mit absichtlichen Bremsungen, wobei der Fahrer angewiesen wurde, die Bremskraft zu variieren. Als Referenzmesssystem wurde das Messsystem der Versuche mit dem PKW verwendet (Abschnitt 2.3). Beim ersten Test wurden drei Paare von PCB-Beschleunigungsmessern zur Messung der vertikalen und horizontalen Beschleunigung installiert. Zwei Paare wurden am Fahrgestell angebracht: das eine in der Nähe der Hinterachse und das andere in der Nähe der Vorderachse. Das dritte Paar wurde auf der Stahlplatte am Boden der Fahrzeugkabine installiert (Abb. 12). Das Telefon wurde auf dem Armaturenbrett positioniert, da an dieser Stelle bereits eine an die Stromquelle angeschlossene Telefonhalterung vorhanden war. Der GPS-Empfänger, wurde auf dem Dach der Kabine angebracht, um einen guten GPS-Signalempfang zu gewährleisten.

Während der Tests, die eine Strecke von 49 km auf Haupt- und Nebenstrassen umfasste, wurden insgesamt 43 Bremsereignisse aufgezeichnet. Die Messungen am Fahrgestell wurden als Referenz verwendet. Es wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den horizontalen Beschleunigungen der beiden auf dem Fahrgestell montierten Sensoren festgestellt. In Bezug auf die vertikale Beschleunigung waren die Unterschiede vernachlässigbar, was darauf hindeutet, dass die Kippbewegung um die Längsachse des Fahrgestells nicht signifikant war [24].

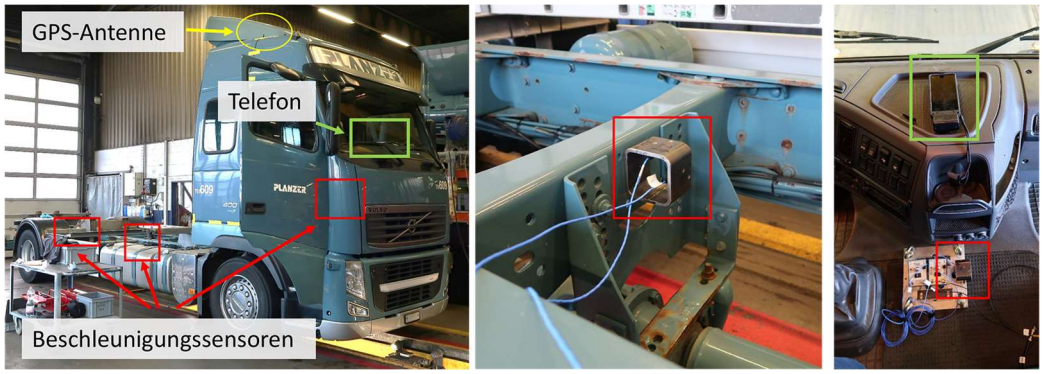


***Abb. 12** Erster Versuch mit LKW: Versuchsaufbau.*

Die Auswertung der Tests zeigten, dass die horizontalen Beschleunigungen in der Fahrerkabine generell grösser waren als jene, die am Fahrgestell erfasst wurden. Die vom Telefon auf dem Armaturenbrett gemessene horizontale Beschleunigung war darüber hinaus deutlich grösser als die, die am Boden der Kabine gemessen wurde. Dies ist dadurch erklärt, dass die Kabine nicht starr mit dem Fahrgestell des Fahrzeugs verbunden ist, sondern über ein Federungssystem, das in erster Linie für den Fahrkomfort ausgelegt ist, verbunden ist. Daher führt die Kabine eine Kippbewegung um einen Drehpunkt aus, der sich unterhalb des Kabinenbodens befand.

Die Messdaten eines Bremsereignisses sind in der Abb. 13 dargestellt. In der Abbildung wird die am Fahrgestell gemessene Verzögerung (Mittelwert der beiden Sensoren) mit der Verzögerung des am Armaturenbrett montierten Telefons und mit der gemessenen Verzögerung am Boden der Kabine verglichen. Um hochfrequentes Rauschen zu eliminieren, wurden alle Signale mittels eines Tiefpassfilters mit einer oberen Eckfrequenz von 4 Hz gefiltert. In beiden Fällen ist die Abweichung am Armaturenbrett bedeutsam. Aufgrund der Installationsposition des Telefons auf dem Armaturenbrett etwa 60 cm über dem Kabinenboden, ist die Verstärkung Federung der Kabine grösser als auf dem Kabinenboden.

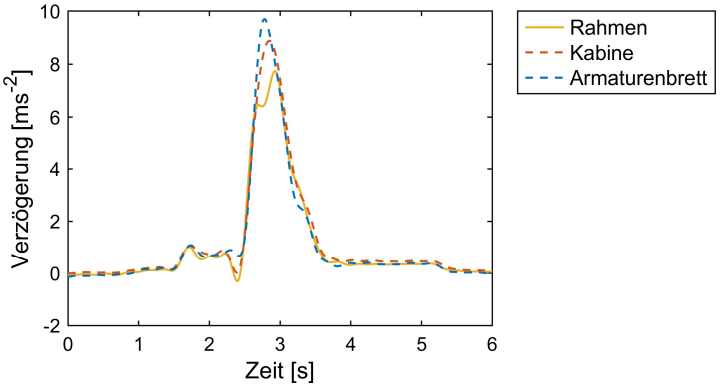


***Abb. 13** Vergleich der Verzögerungen.*

Ein Vergleich der Spitzenwerte der horizontalen Beschleunigung über alle Bremsereignisse (Abb. 14) zeigt, dass der Fehler am Armaturenbrett gegenüber dem Fahrgestell bei Bremsereignissen über 7 ms^{-2} mehr als 2 ms^{-2} betragen kann. Bei Bremsereignissen zwischen 2 und 3.5 ms^{-2} beträgt der Fehler im Mittel etwa 0.5 ms^{-2} (relativer Fehler etwa +20%). Die am Kabinenboden erfassten Daten weisen einen relativen Fehler von etwa 12% mit einer durchschnittlichen absoluten Differenz von 0.3 ms^{-2} auf.

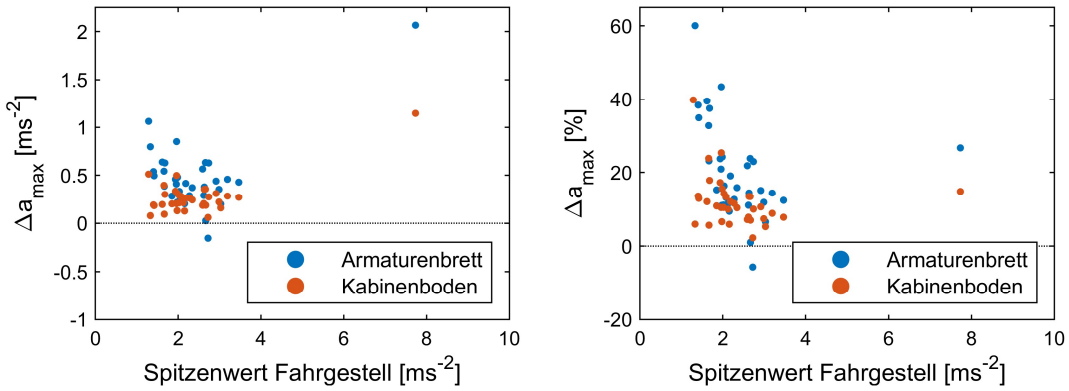


Abb. 14 *Vergleich der Spitzenwerte aller Bremsereignisse. Absolute Abweichung (links) und relative Abweichung in % (rechts) des Spitzenwerts des Referenzsystems am Fahrgestell.*

Eine weiterführende Datenanalyse zeigte, dass durch die Verwendung einer Übertragungsfunktion zwischen den Messungen am Armaturenbrett und am Fahrgestell der Messfehler reduziert werden kann. Um zu beweisen, dass die Verwendung einer Übertragungsfunktion ausreichend genaue Daten liefern kann, wurde beschlossen, ein zweiter Test mit einer modifizierten Konfiguration durchzuführen. Um die Montagezeit des Referenzmesssystems zu verkürzen, wurde nur ein Paar Beschleunigungssensoren zwischen den Achsen der Zugmaschine am Fahrgestell installiert. Ein zweites Paar wurde im Seitenfach der Kabine auf der massiven Stahlplatte angebracht (Abb. 15). Das Telefon, das an eine Stromquelle angeschlossen war, wurde ebenfalls auf der Stahlplatte im Seitenfach montiert. Die Seitenfächer befanden sich unterhalb des Bodens der Kabine, sodass sie vom Federungssystems der Kabine weniger stark beeinflusst wurden. Diese Position wurde aufgrund ihrer einfachen und schnellen Installation sowie der minimalen Störung des Fahrers ausgewählt. Bei dieser Konfiguration kann das Aufladen des Telefons durch ein Verlängerungskabel von der Fahrerkabine aus erfolgen, was für das Logistikunternehmen nur einen minimalen zusätzlichen Aufwand bedeutet hätte. Ausserdem würde das Telefon so relativ gut vor der Witterung und Temperaturschwankungen geschützt (keine direkte Sonneneinstrahlung wie auf dem Armaturenbrett).

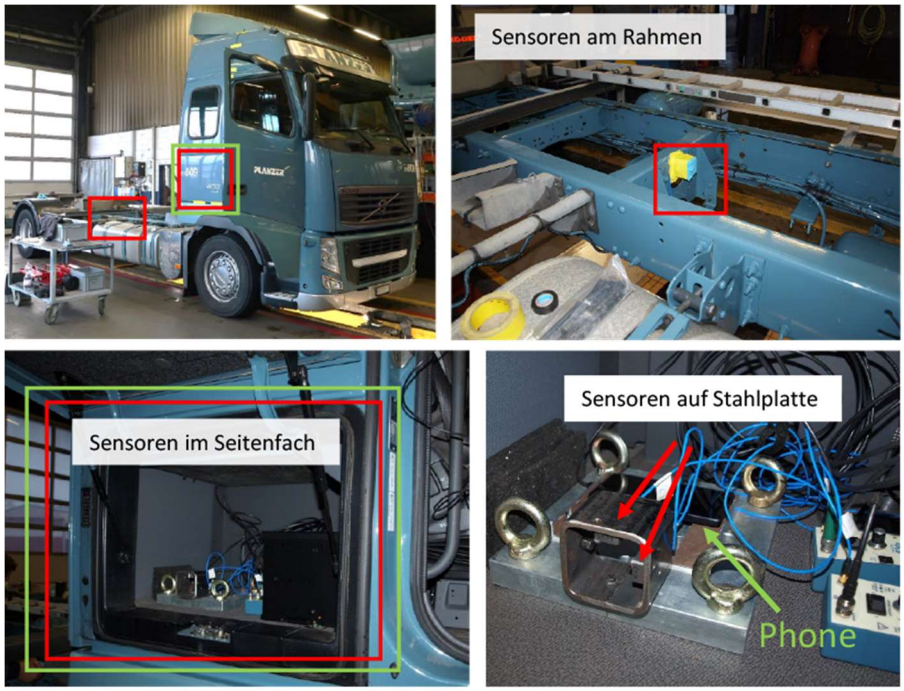


Abb. 15 *Zweiter Versuch mit LKW: Versuchsaufbau.*

Der Test bestand aus einer 29 km langen Fahrt mit absichtlichen Bremsungen. Insgesamt wurden 32 Bremsereignisse aufgezeichnet. Die Versuchsergebnisse zeigten, wie nach dem ersten Versuch zu vermuten war, einen Unterschied zwischen dem Fahrgestell und dem Seitenfach. Um den Fehler zu minimieren, wurde aus den Messdaten eine Übertragungsfunktion bestimmt. Sie erlaubte, eine bessere Übereinstimmung zwischen dem Seitenfach und dem Fahrgestell zu erzielten, wie die folgenden Ergebnisse zeigen.

Abb. 16 vergleicht am Beispiel eines Bremsereignisses die gemessenen Bremsverzögerungen. In der Abbildung oben links sind die Verzögerungen am Fahrgestell (Referenz) und am Seitenfach mit dem Telefon dargestellt. Auch wenn dieser Unterschied im Vergleich zum ersten Test mit dem Telefon auf dem Armaturenbrett deutlich geringer ausfällt, so ist er immer noch bedeutend. In Abb. 16 oben rechts sind die Verzögerungen des Sensors des Referenzsystems und des Telefons, beide im Seitenfach installiert, dargestellt. Das Ergebnis bestätigt die sehr gute Übereinstimmung aus den Versuchen mit dem PKW.

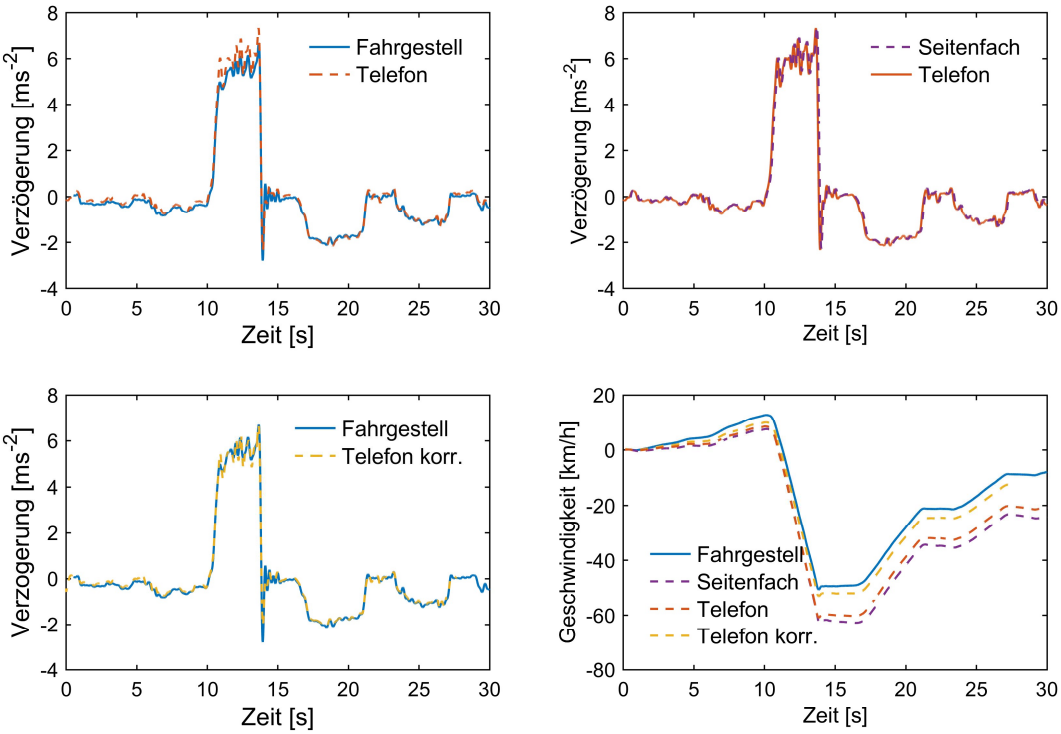


Abb. 16 *Vergleich der Verzögerungen und Geschwindigkeiten.*

Die Wirksamkeit der Korrektur der Telefonmessung mit einer Übertragungsfunktion ist in der Abb. 16 unten links dargestellt. Die Abweichungen zur Referenzmessung werden deutlich reduziert. Die Geschwindigkeiten, die in Abb. 16 unten rechts dargestellt sind, wurden durch Integration der Verzögerungsprofile berechnet. Im Seitenfach wiesen die Messungen trotz des anfänglichen Nullabgleichs oft leicht versetzte Verzögerungen auf. Dieser Versatz ist sehr klein und wirkt sich nur geringfügig auf die Verzögerungsprofile aus. Er hat aber erhebliche Auswirkungen auf die Geschwindigkeiten, da der konstante Versatz eine linear mit der Zeit zu- oder abnehmende systematische Verzerrung generiert (Abb. 16). Dieser Versatz kann durch die Installationsposition und -ausrichtung (nicht horizontale Platzierung) des Telefons signifikant beeinflusst werden.

Abb. 17 stellt die Differenz der Spitzenwerte der Verzögerungsprofile zwischen Seitenfach und Fahrgestell dar. Die Differenz nimmt mit zunehmendem Spitzenwert (Fahrgestell) zu (Diagramm links). Während bei Spitzenwerten um 2 ms^{-2} die Differenz bis zu ca. 0.4 ms^{-2} beträgt, vergrössert sich diese bei Spitzenwerten um 7 ms^{-2} bis zu 0.9 ms^{-2}. Die prozentuale Differenz nimmt hingegen mit zunehmendem Spitzenwert ab (Diagramm rechts). Bei einem

Spitzenwert um 2 ms^{-2} kann die Differenz erheblich sein, und bis zu 40% erreichen. Spitzenwerte um 7 ms^{-2} weisen hingegen Differenzen auf, die unter 12% betragen.

Durch die Anwendung der Übertragungsfunktion kann der Fehler zwischen Seitenfach und Fahrgestell auf weniger als ±0.35 ms^{-2} reduziert werden. Die prozentuale Differenz reduziert sich auf unter 10%. Wenn nur Spitzenwerte von mehr als 4 ms^{-2} berücksichtigt werden, kann die Differenz auf unter 5% gedrückt werden. Ein Fehler um 5% bei starken Bremsereignissen wäre für die Zwecke der Studie noch akzeptabel, da der Spitzenwert nur einer unter mehreren Kennwerten ist, die die Bremskraft auf Brücken beeinflussen. Andere Faktoren wie initialer Ruck, Bremsdauer, durchschnittliche Verzögerung usw. beeinflussen ebenfalls die Bremskraft. Darüber hinaus erlaubt die Übertragungsfunktion Fehler, die mit der nicht optimalen Positionierung des Telefons verbunden sind, erheblich zu reduzieren.

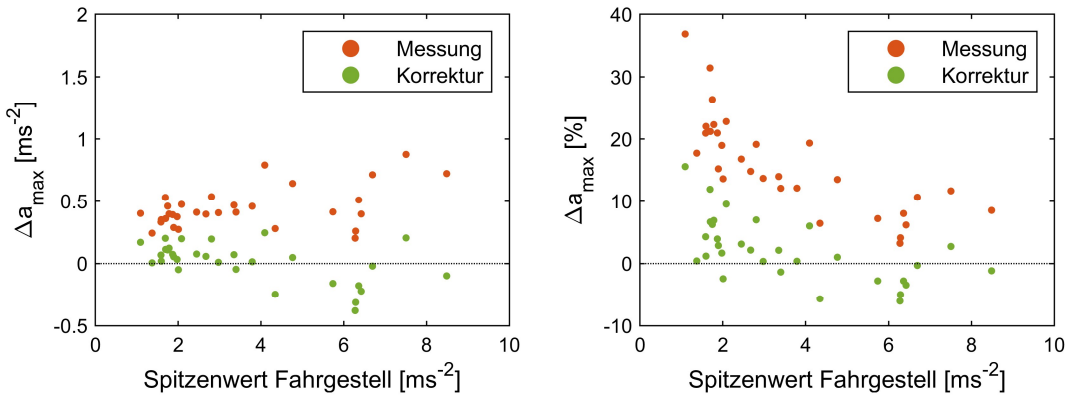


***Abb. 17** Vergleich der Spitzenwerte aller Bremsereignisse. Absolute Abweichung (links) und relative Abweichung in % (rechts) des Spitzenwerts des Referenzsystems am Fahrgestell.*

2.3.4 Messgenauigkeit der Geolokalisierung

Ob die erfassten GPS-Daten eine für die Projektziele ausreichende Genauigkeit aufweisen, hängt von der Benutzung der Daten ab. Eine ausreichend genaue Geolokalisierung ist wichtig bei der Identifizierung der Strassenklasse, auf dem sich ein Fahrzeug befindet. Die korrekte Identifizierung der Strassenklasse fliesst in der Berechnung der zurückgelegten Strecken und schliesslich in der Häufigkeit und Intensität der Bremsereignisse für die verschiedenen Strassenklassen ein (Kapitel 0 und 3.3). Zusätzlich werden die GPS-Geschwindigkeitsdaten auch für die Nachbearbeitung der Verzögerungsprofile verwendet, die mit dem Telefon gemessen werden (Kapitel 3.3).

Alle Fahrversuche zeigten, dass die GPS-Antenne des Referenzsystems generell bessere Ergebnisse liefert als ein Telefon. Dabei ist zu beachten, dass die Genauigkeit anhand der Geodaten von OpenStreetMap (siehe Abschnitt 3.2.1) beurteilt wurde. Da OpenStreetMap-Geodaten später jedoch benutzt werden, um die Standorte von Bremsvorgängen zu charakterisieren und die gefahrenen Kilometer pro Strassenklasse zu bestimmen, ist diese Definition der Ungenauigkeit berechtigt.

Die Einbauposition hat einen bedeutenden Einfluss auf die Datenqualität. Die auf dem Armaturenbrett erfassten Positions- und Geschwindigkeitsdaten weisen im Vergleich zur GPS-Referenzsystem eine gute Qualität auf. Durch die Installation des Telefons im Seitenfach, nimmt die Ungenauigkeit im Vergleich zur Montage auf dem Armaturenbrett zu, da das Satellitensignal durch das Fahrzeug teilweise abgeschirmt wird.

Abb. 18 zeigt die Analyse der GPS-Telefondaten und ihre Abhängigkeit vom Einbauort. Die dargestellten Daten stammen von der gleichen Teststrecke, um Einflüsse der Umgebung (z.B. Bebauung) zu eliminieren. Der Wert für die Ungenauigkeit wird direkt vom GPS-Sensor durch das Android-System ermittelt [36] . Die blau dargestellten Daten stammen aus dem ersten Test, bei dem das Telefon auf dem Armaturenbrett montiert war. Die rot

dargestellten Daten stammen vom zweiten Test, bei dem das Telefon im Seitenfach montiert war. Die Abbildung zeigt, dass sich die Ungenauigkeit etwa verdoppelt, wenn das Telefon im Seitenfach installiert ist. Die Differenz der Ungenauigkeit ist während der gesamten Messung etwa konstant.

Abb. 19 zeigt die Trajektorien des Fahrzeugs in einem kurzen Abschnitt einer Testfahrt. Die schwarzen und ockerfarbigen Punkte stellen die Messungen mit der GPS-Referenzsystem dar. Die blauen Linien stellen die Messungen des Telefons am Armaturenbrett und die roten Linien die des Telefons im Seitenfach dar. Bei der zweiten Testfahrt wurde die Strecke viermal wiederholt. Vergleicht man diese Trajektorien mit dem im Bild dargestellten Referenzquadrate oben links (das schwarze Quadrat misst 5x5 m² und das cyanfarbene 10x10 m²), so wird deutlich, dass der Unterschied zwischen der GPS-Referenzsystem und dem Telefon im Bereich von 5 bis 10 Metern liegt. Betrachtet man die ockerfarbigen Punkte und die roten Linien, so erkennt man, dass die Reproduzierbarkeit der Trajektorien bei der GPS-Referenzsystem auf etwa 5 m und beim Telefon auf bis 10 m genau sind. Die blaue Linie (in Übereinstimmung mit den schwarzen Punkten), die vom Armaturenbrett kommt, sollte genauer sein, aber eine ähnliche Ungenauigkeit wie bei den Messungen im Seitenfach ist zu beobachten. In der Abbildung ist zu erkennen, dass auch die Trajektorien der GPS-Referenzsystem aus der Strasse herausragen.

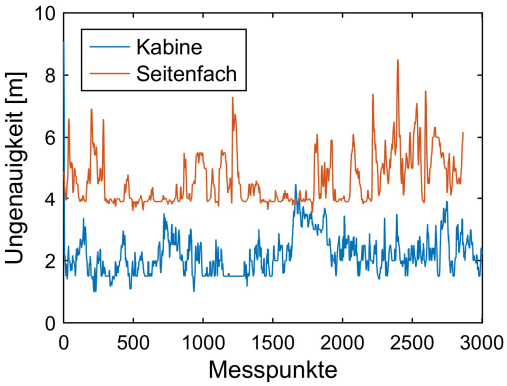


Abb. 18 *GPS-Genauigkeit: Tests mit dem Telefon in der Kabine und im Seitefach.*

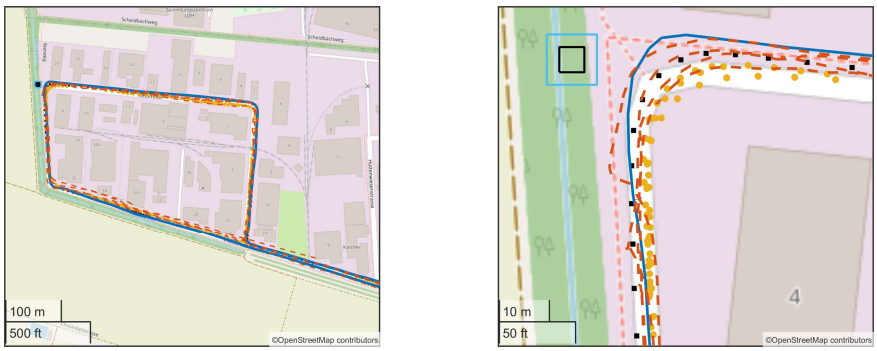


Abb. 19 *Trajektorien des Fahrzeugs mit der GPS-Referenzsystem und dem Telefon gemessen.*

Abb. 20 zeigt die Geschwindigkeitsprofile von drei Bremsereignissen, die von der GPS-Referenzsystem des Referenzsystems und vom Telefon im Seitenfach gemessen wurden. Die Geschwindigkeitsmessungen des Telefons weisen im Vergleich zu denen der GPS-Referenzsystem eine insgesamt recht gute Genauigkeit auf. Die gute Genauigkeit ist jedoch auf Fahrzeuge Geschwindigkeitsbereiche von über 20 km/h beschränkt. Bei niedrigeren Geschwindigkeiten nimmt die Genauigkeit der Messungen des Telefons ab.

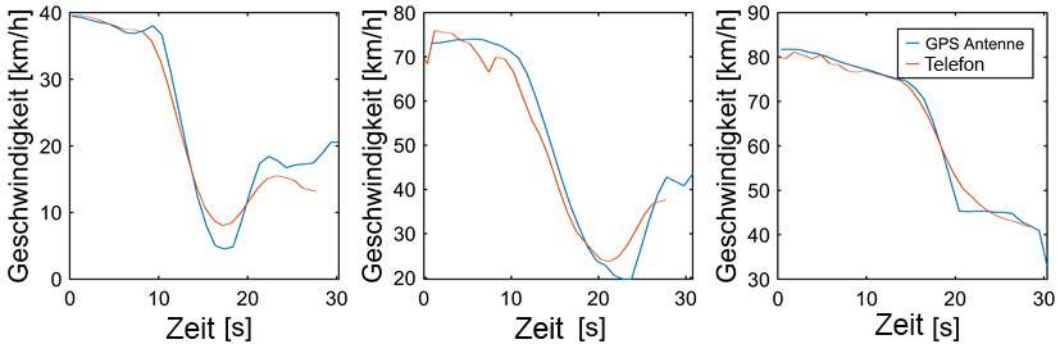


Abb. 20 *Vergleich der Geschwindigkeit zwischen Telefon und GPS-Empfänger.*

Aus praktischen Gründen wurde schliesslich das Telefon, wie in Abschnitt 2.4.1 beschrieben, direkt am Fahrgestell montiert. Die Auswertung (ermittelt aus den Daten der GPS-Sensoren, da keine weiteren Fahrversuche mit dem GPS-Referenzsystem durchgeführt werden konnten) hat gezeigt, dass dadurch die Ungenauigkeit der Geolokalisierung etwas zunimmt. Diese Ungenauigkeit kann in Einzelfällen zur Bestimmung einer falschen Strassenklasse führen. Der für die Berechnung der Aufteilung der zurückgelegten Strecken verwendete Algorithmus (Abschnitt 0) schränkt jedoch die Entstehung relevanter systematischer Fehler stark ein, so dass die etwas geringere Genauigkeit immer noch ausreicht, um die Fahrstrecken zuverlässig auf die Strassenklassen aufzuteilen.

Bei der Charakterisierung der Bremsereignissen ist eine fehlerhafte Bestimmung der Strassenklasse sehr unwahrscheinlich, da der Algorithmus nicht nur eine einzige Geolokalisierung verwendet, sondern eine Fahrstrecke von in der Regel mehreren hundert Metern. Systematische Fehler über eine solche Distanz im Vergleich zu den Geodaten der frei nutzbaren Karten können bei einer Abtastrate von 1 Hz auch in einer stark besiedelten Umgebung kaum auftreten.

Bezüglich der Geschwindigkeit unterschieden sich die Telefondaten trotz der verschiedenen Testkonfigurationen nicht wesentlich von denen der GPS-Antenne. Bei allen getesteten Konfigurationen wurde festgestellt, dass die Genauigkeit im Vergleich zum Referenzsignal nur bei niedrigen Geschwindigkeiten (unter 20 km/h) deutlich abnimmt. Ähnlich wie bei den GPS-Koordinaten kann die Genauigkeit der Geschwindigkeit in der endgültigen Konfiguration (Telefon auf dem Fahrgestell) weiter abgenommen haben. Wie in Kapitel 3 gezeigt wird, sind die Messungen mit dem Telefon ausreichend genau, um die Fahrzeuggeschwindigkeit zu Beginn des Bremsereignisses zu bestimmen und sie als Grundlage für die Verzögerungsprofile zu verwenden.

2.4 Pilotversuch

2.4.1 Montage des Telefons

Vor Beginn der Testkampagne, wurde ein Pilotversuch durchgeführt. Dieser hatte zum Ziel, die Leistung des Telefons über einen längeren Zeitraum zu bewerten, potenzielle Probleme zu identifizieren und sowohl die Datensammlung als auch die Analyseprozesse zu optimieren. Insbesondere sollte die Genauigkeit der Geolokalisierung mit GPS-Daten und die Zuverlässigkeit und Stabilität der Datenerfassungs-Apps untersucht werden.

Zu diesem Zweck wurde ein 5-achsiger Sattelzug ausgerüstet. Aus der Diskussion mit dem Logistikunternehmen wurde beschlossen, das Telefon am Fahrgestell zu installieren. Die Montage im Seitenfach wurde schliesslich verworfen, weil

1. diese Montage von den Fahrzeugführern kritisiert wurde, da sie dort ihre persönlichen Gegenstände (Koffer, Verpflegung usw.) deponieren und das Telefon diese Nutzung zu stark eingeschränkt hätte,

2. die Verwendung des Seitenfaches durch die Fahrzeugführer das Risiko einer versehentlichen Störung des Telefons erhöht hätte,
3. die Montage im Seitenfach eine Kalibrierung der Telefondaten (Fahrt mit Bremsereignissen) für jedes Fahrzeug erforderte, um die Übertragungsfunktion zu bestimmen.

Die Montage am Fahrgestell wies die oben aufgeführten Nachteile nicht auf, erforderte jedoch einen Witterungsschutz des Telefons durch ein wasserdichtes Gehäuse. Im Gehäuse wurde das Telefon in einem Aluminiumrahmen montiert, der mit Schrauben fest mit dem Gehäuse verbunden war. Das innere des Gehäuses wurde dann mit Schaumstoff gefüllt. Das Gehäuse wurde mit 4 Permanentmagnetfüssen ausgestattet, um eine rasche Montage am Fahrgestell zu ermöglichen. Um eventuelle Ungenauigkeiten der Telefondaten aufgrund der Montage im Gehäuse zu untersuchen, ist eine Testfahrt mit einem PKW durchgeführt worden. Das Gehäuse wurde mit den Magneten auf der schweren Stahlplatte befestigt. Der Vergleich mit dem Referenzsystem zeigte keine Zunahme der Ungenauigkeit im Vergleich zu den bisherigen Testfahrten.

Abb. 21 zeigt das Testfahrzeug, bei dem das Gehäuse mit dem Telefon mit Magneten und Kabelbindern am Fahrgestell der Sattelzugmaschine befestigt war (rotes Rechteck). Das Telefon wurde direkt an die Batterie des Fahrzeugs angeschlossen, um kontinuierlich mit Strom versorgt zu werden. Zur Vermeidung eines Abdriftens (kumulative Anhäufung kleiner, systematischer Fehler bei Messungen der Beschleunigung und Drehrate) während der Messung und um die Möglichkeit fehlender Datenmessungen aufgrund von Anwendungsabstürzen zu reduzieren, wurden alle Applikationen zu Beginn jeder Arbeitswoche neu gestartet und genullt.

Zusätzlich zu den selbst entwickelten Applikationen wurden zwei Applikationen von Drittherstellern verwendet.

1. AndFTP [39] wurde verwendet, um die täglichen Sicherungskopien der Daten vom Telefon auf einen externen Webhosting-Datenserver durchzuführen, wobei die Daten eines Telefons einem Ordner zugeteilt wurden. Das tägliche Datenvolumen betrug typischerweise ca. 100 MB pro Tag und Telefon. Die Daten wurden schliesslich vom externen Datenserver auf einen Empa-Server gespiegelt und weiterverarbeitet.

2. TeamViewer [40] wurde eingesetzt, um die Fernwartung des Telefons zu erleichtern und eventuelle Betriebssystem- und Anwendungsprobleme, wie z.B. das Einfrieren von Anwendungen, zu beheben.

Während der Validierungstests wurden verschiedene Telefone getestet. Die ersten Telefone der Marke Xiaomi lieferten trotz ihres Alters ausgezeichnete Ergebnisse in Bezug auf Datenqualität und Anwendungsstabilität. Allerdings unterstützte Anfang 2023 TeamViewer, die Software, die zur Fernverwaltung eingesetzt werden sollte, keine Xiaomi-Telefone. Angesichts der grossen Bedeutung der Fernverwaltung schieden die Xiaomi-Telefonen deshalb aus. Als Alternative schlug die Firma Planzer die Installation des Telefons Samsung X Galaxy Cover Pro vor, das sie firmenintern den Fahrern zu Verfügung stellt.

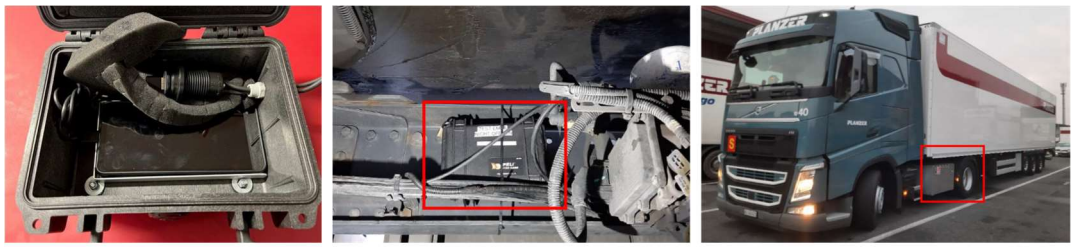


Abb. 21 *Versuchsaufbau Pilottest: Schutzbox mit Telefon (links), Schutzbox am Fahrgestell der Sattelzugmaschine montiert (Mitte), Versuchsfahrzeug (rechts).*

2.4.2 Zuverlässigkeit der Datenerfassung

Der Pilotversuch dauerte drei Monate, in denen Daten über eine zurückgelegte Strecke von 21'317 Kilometern gesammelt wurden. Die während der 56 Überwachungstage befahrenen Routen sind in Abb. 22 (links) dargestellt. Eine Analyse der gefahrenen Kilometer nach Strassenklassen (Kapitel 0) zeigt, dass 16.938 km auf Autobahnen/Autostrassen (Klasse 1), 3.456 km auf Hauptstrassen (Klasse 2), 905 km auf Nebenstrassen (Klasse 3) und 18 km auf sonstigen Strassen (Klasse 4) zurückgelegt wurden. In Prozent ausgedrückt sind dies 79 %, 16 %, 4 % und 1 % der desamthaft zurückgelegten Fahrstrecke. Die meisten Kilometer wurden auf Autobahnen gefahren.

Abb. 22 (rechts) zeigt eine Fahrstrecke von 618 km, die während eines Tages zurückgelegt wurde. Die Fahrstrecke auf der Autobahn ist violett, auf Hauptstrassen cyan und auf Nebenstrassen rot dargestellt. Farbige Punkte kennzeichnen die Orte der Bremsereignisse, wobei derselbe Farbcode wie bei den Strassen verwendet wurde. Ein genauerer Blick auf die Grafik zeigt, dass die meisten Bremsereignisse auf Neben- und Hauptstrassen auftreten (44 von 50). Die Durchschnittsgeschwindigkeit auf einer Strecke von 478 km auf der Strassenklasse 1 (Autobahn) betrug 73,3 km/h, und es wurden 6 Bremsereignisse aufgezeichnet (1 Ereignis alle 80 km). Im Vergleich dazu war die Strecke der Strassenklasse 2 (Hauptstrasse) nur 105 km lang, aber die Anzahl der Bremsereignisse war höher: 29 (1 Ereignis alle 4 km).

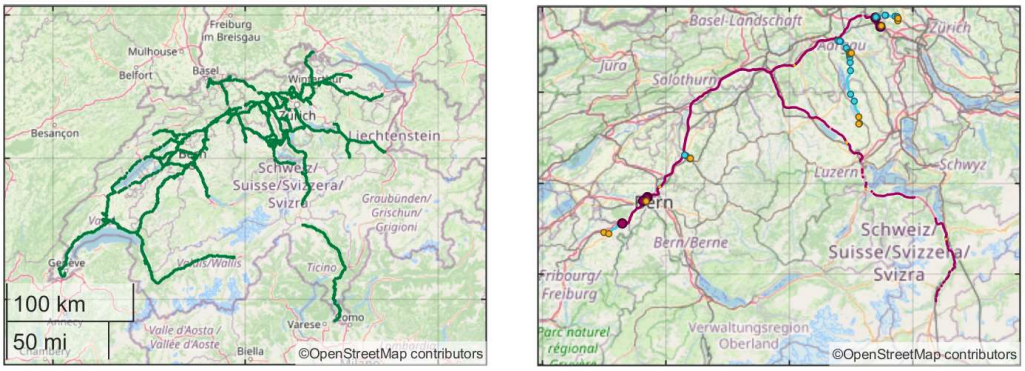


***Abb. 22** Fahrstrecke des LKW während des Pilotversuchs (links), Fahrstrecke an einem Tag (rechts), unterschiedliche Farben geben die Strassenklasse an.*

Obwohl die endgültige Konfiguration mit dem Telefon am Fahrgestell nicht mit Validierungstests überprüft worden war, zeigte die erste Grobanalyse, dass die Fahrzeuglokalisierung zwar im Vergleich zur Montage im Seitenfach etwas ungenauer war, doch weiterhin unproblematisch blieb. Grössere Lokalisierungsfehler traten insbesondere in Gebieten mit hoher Bebauungsdichte oder in engen Gebirgstälern auf, doch sind diese nicht ausschliesslich auf die Verwendung von Telefonen zurückzuführen, sondern auch für genauere GPS-Empfänger typisch. Auch die Integration der Verzögerungsprofile führte zu Geschwindigkeitsprofilen, die recht gut mit den GPS-Geschwindigkeitsmessungen übereinstimmten. Nur bei niedrigeren Geschwindigkeiten oder schwachen Bremsereignissen war mit grösseren Unterschieden zu rechnen. Insgesamt zeigte die erste Grobanalyse der erfassten Daten, dass ihre Genauigkeit für die Erreichung der Projektziele ausreichend war.

Neben der Bewertung der Genauigkeit des Messsystems, war ein weiterer kritischer Aspekt die Langzeitzuverlässigkeit des Messsystems. Es war wichtig sicherzustellen, dass das System in der Lage ist, die Funktionalität der Datenerfassungs-Apps im Laufe der Zeit aufrechtzuerhalten. Dazu gehören nicht nur die Datenerfassung, sondern auch die Fernverwaltung, die für manuelle Neustarts von Anwendungen und eventuelle Installationen neuer Anwendungsversionen verwendet wurde.

Während des Pilotversuchs wurden Probleme bei der Verwendung des Samsung X Cover Pro identifiziert, die auf die herstellerspezifische Version von Android zurückzuführen

waren. Das Samsung-Betriebssystem versuchte sehr aggressiv die Leistung und Batterielebensdauer zu verbessern, sodass Hintergrundanwendungen nach einigen Tagen Laufzeit abgeschaltet wurden. Trotz entsprechenden Einstellungen am Telefon und in den Datenerfassungsanwendungen, solche Abschaltungen zu verhindern, führten mehrere Testreihen zu keinen befriedigenden Ergebnissen. Neuere Versionen des Betriebssystems (Versionen 12 und 13) wiesen keine Verbesserung auf. Darüber hinaus neigten die getesteten Samsung-Telefone dazu, von der festgelegten Datenerfassungsrate abzuweichen, was zu kleinen Lücken in den Beschleunigungsdaten führte.

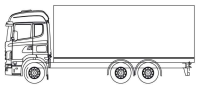
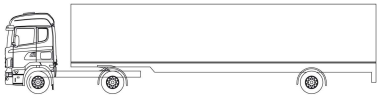
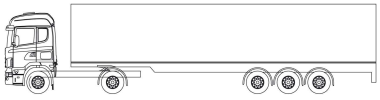
Recherchen ergaben, dass der Hersteller HTC eine Android-Version einsetzt, die eine weniger aggressive Energiemanagementstrategie betreibt. Daher wurde ein Telefon HTC Desire 22 Pro im Labor und mit Fahrversuchen getestet. Das HTC-Telefon war stabiler als das Samsung-Telefon, obwohl manchmal nach einer Laufzeit von 3-4 Tagen einige Probleme mit der GPS-Anwendung auftraten. Im Gegensatz zum Samsung-Telefon traten beim HTC-Telefon keine signifikanten Probleme mit der Datenerfassungsrate auf. Daher wurde das HTC Desire 22 Pro letztendlich für die Monitoringkampagne ausgewählt.

2.5 Monitoringkampagne

2.5.1 Instrumentierte Fahrzeug-Flotte

Die Monitoringkampagne mit der Fahrzeug-Flotte erstreckte sich über 10 Monate (Juni 2023 bis März 2024). Es wurden 22 Lastwagen der Firma Planzer AG mit Telefonen ausgerüstet, die direkt am Fahrgestell montiert wurden. Die Auswahl der Lastwagen erfolgte durch die Planzer AG auf der Basis von Empfehlungen der Empa mit dem Ziel, die Lastwagentypen hinsichtlich Grösse, Gewicht und Streckenführung zu differenzieren. Gleichzeitig wurde betont, dass der Fokus des Projekts auf der schwersten Fahrzeugkategorie liegen sollte, da schwere Fahrzeuge höhere Bremskräfte erzeugen. Lastkraftwagen, die lange Strecken auf Autobahnen zurücklegen, wurden aufgrund des grösseren Interesses an Autobahnbrücken als vorrangig eingestuft. Die Lastwagen sollten auch die Hauptstrecken des Schweizer Schwerlastverkehrs, die Nord-Süd- und die Ost-West-Route, abdecken.

***Tab. 6** Fahrzeugkategorien.*

Kategorie	Darstellung Fahrzeug
Kategorie 1: Motorwagen 2 Achsen, Max. Gewicht 18 t Anzahl Fahrzeuge: 4	
Kategorie 2: Cityliner 2 + 1 Achsen, Max. Gewicht 28 t Anzahl Fahrzeuge: 2	
Kategorie 3a: Anhängerzug 3+2 Achsen, Max. Gewicht 40 /26+18 t Anzahl Fahrzeuge: 5	
Kategorie 3b: Anhängerzug 2+2 Achsen, Max. Gewicht 36 (18+18) t Anzahl Fahrzeuge: 2	
Kategorie 4: Sattelschlepper 2+3 Achsen, Max. Gewicht 40 t Anzahl Fahrzeuge: 9	

Die Flotte umfasste verschiedene Fahrzeuge, die jeweils bestimmte Merkmale aufwiesen und in 4 Kategorien aufteilt wurden. Die Kategorie 1 (4 Fahrzeuge), gekennzeichnet als Motorwagen (M), waren Lastkraftwagen mit 2 Achsen und einem zulässigen

Höchstgewicht von 18 Tonnen. Kategorie 2 (2 Fahrzeuge) umfasste Sattelauflieger "Cityliner" mit einer 2-achsigen Sattelzugmaschine und einem 1-achsigen Auflieger, mit einem zulässigen Höchstgewicht von 36 Tonnen. Kategorie 3 (7 Fahrzeuge) umfasste Anhängerzüge (Motorwagen mit Anhänger) aus zwei Unterkategorien. Unter der Kategorie 3a (5 Fahrzeuge) fielen Anhängerzüge, bestehend aus einem 3-achsigen Motorwagen und einem 2-achsigen Anhänger, mit einem zulässigen Höchstgewicht von 40 Tonnen. Bei der Kategorie 3b (2 Fahrzeuge) handelte es sich um etwas kleinere Anhängerzüge mit zulässigem Höchstgewicht von 36 Tonnen, wobei die Motorwagen 2-achsig waren. Zur Kategorie 4 (9 Fahrzeuge) gehörten die Sattelzüge, die üblicherweise aus einer 2-achsigen Sattelzugmaschine und einem 3-achsigen Sattelauflieger bestanden. Ihr zulässiges Höchstgewicht betrug 40 Tonnen. Die Fahrzeugkategorien und ihre Merkmale sind in Tab. 7 zusammengefasst. Abb. 23 zeigt Fotos der eingesetzten Fahrzeuge.

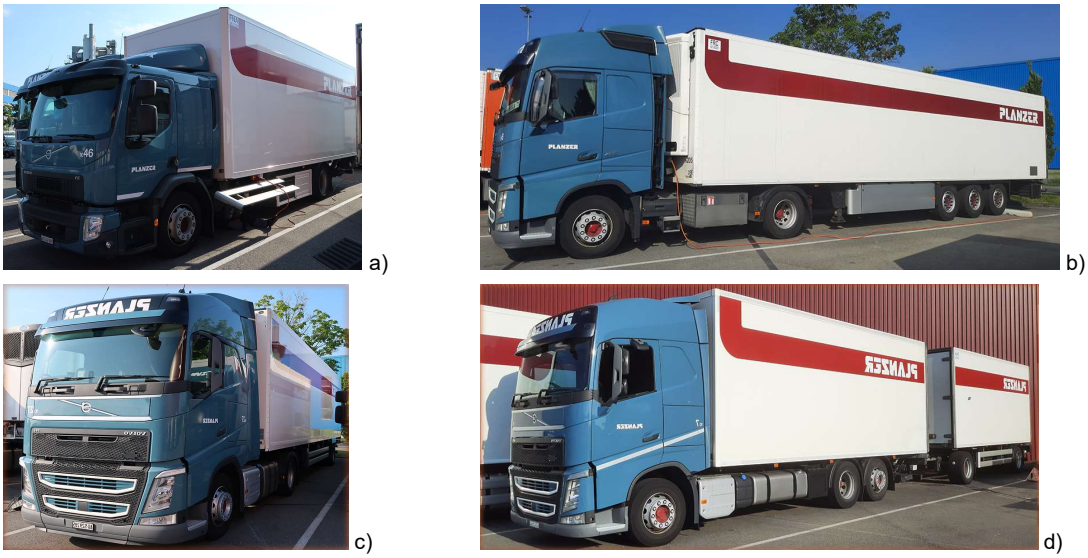


Abb. 23 *Verwendete Fahrzeugkategorien: a) Motorwagen, b) Sattelzug, c) Sattelauflieger "Cityliner", Anhängerzug d).*

Die Fahrzeuge, die an der Studie teilnahmen, sind in Tab. 7 dargestellt. Die ersten beiden Spalten zeigen das Label zur Identifizierung des installierten Telefons und die Telefon-ID. Die verbleibenden Spalten enthalten Informationen zum Lastwagentyp und zur entsprechenden Kategorie.

Tab. 7 *Instrumentierte Fahrzeuge.*

Name	Zugeinheit	gezogene Einheit	Achsen	Kategorie
H_1	Sattelzugmaschine	Auflieger	2+3	4
H_2	Sattelzugmaschine	Auflieger	2+3	4
H_3	Sattelzugmaschine	Auflieger	2+3	4
H_4	Motorwagen	Anhänger	3+2	3a
H_5	Motorwagen	Anhänger	3+2	3a
H_6	Sattelzugmaschine	Auflieger	2+3	4
H_7	Sattelzugmaschine	Auflieger	2+3	4
H_8	Sattelzugmaschine	Auflieger	2+3	4
H_9	Motorwagen	Anhänger	3+	3a
H_10	Motorwagen	-	2	1
H_11	Motorwagen	Anhänger	2+2	3b
H_12	Motorwagen	Anhänger	2+2	3b
H_13	Sattelzugmaschine	Auflieger	2+1	2
H_14	Sattelzugmaschine	Auflieger	2+1	2
H_15	Motorwagen	-	2	1
H_16	Sattelzugmaschine	Auflieger	2+3	4

H_17	Sattelzugmaschine	Auflieger	2+3	4
H_18	Motorwagen	Anhänger	3+2	3a
H_19	Motorwagen	-	2	1
H_20	Motorwagen	-	2	1
H_21	Sattelzugmaschine	Auflieger	2+3	4
R_22	Motorwagen	Anhänger	3+2	3a

2.5.2 Erfahrungen mit dem Telefon-Management

Die Überwachungskampagne erstreckte sich über 10 Monate, einschliesslich Phasen mit hohen und niedrigen Temperaturen. Vor Beginn des Flottentests bestand Unsicherheit über die möglichen Auswirkungen von Temperaturschwankungen auf die Telefonfunktionalität. Während des Sommers überstiegen die Betriebstemperaturen der Telefon-Batterie 45°C, was dazu führte, dass einige Telefons abrupt heruntergefahren wurden, ohne automatisch neu zu starten. Nach ca. 3 Monaten (Ende August) funktionierten sieben Telefone nicht mehr. Diese Telefone wurden am 26 August neu gestartet. Ein zweiter Neustart wurde im Januar 2024 durchgeführt, um 13 Telefone neu zu starten, die aufgrund intensiver Nutzung und als Vorsichtsmassnahme gegen die Winterkälte heruntergefahren worden waren.

Der Zugang zum Telefon wurde weiter durch Abstürze oder Einfrieren der TeamViewer-Anwendung erschwert, die eine Fernsteuerung des Telefons unmöglich machte. Während des gesamten Monitoring Kampagne wurde der Status der Google-Dienste, insbesondere der Geolokalisierung, auf dem Telefon verwendet, um festzustellen, ob das Telefon ausgeschaltet oder ob die TeamViewer-Anwendung abgestürzt war. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass auch die Datenübertragung vom Telefon zum Server erhebliche Speicher- und Rechenressourcen erforderte, was zu einem Wärmestau führte und eine Anpassung der Datenübertragungsstrategie erforderte. Angesichts dieser Herausforderungen wurde beschlossen, die Anwendungen wöchentlich am Sonntagabend zu überprüfen und neu zu starten. Aufgrund einer schlechten Netzwerkverbindung war manchmal der Zugriff auf ein Telefon nicht möglich.

3 Datenanalyse

3.1 Aufbereitung der Rohdaten

Auf dem Empa-Server wurden die Monitoring-Daten in einer Baumstruktur von Ordnern neu organisiert. Pro Fahrzeug wurde auf der obersten Ebene ein Ordner vorgesehen. Darin wurde ein Ordner für jede Kalenderwoche erstellt, der seinerseits Ordner für jeden Wochentag enthielt. Diese einfache Datenstruktur erleichterte die Analyse und Verifizierung der Daten. Die Rohdaten im CSV-Format (Comma Separated Values) wurden in den Tagesordner gespeichert. Die Länge der Dateien variierte je nach Art und Dauer der Messung. Die Neuordnung der Ordnerhierarchie erfolgt durch Extrahieren von Informationen aus dem CSV-Dateinamen, der eine Telefon-ID, einen Zeitstempel und die Art der gemessenen Informationen enthält.

3.1.1 Fusion der Rohdaten

Die Rohdaten der Messungen werden für jedes Fahrzeug auf Tagesbasis bearbeitet. Als erster Schritt werden die Dateien, welche die jeweiligen Rohdaten der Fahrstrecke (GPS-Daten) und der Drehraten enthalten, zusammengeführt und gemäss dem Zeitstempel geordnet. Da die Drehraten mit einer Abtastrate von 5 Hz erfasst wurden, werden zuerst durch numerische Zeitintegration die aufsummierten Winkeländerungen berechnet. Die Zeitsynchronisation wird mit den jeweiligen Zeitstempeln durchgeführt, wobei die Winkeländerungen auf die Zeitstempel der Daten der Fahrzeuglokalisierung interpoliert werden, die eine Abtastrate von 1 Hz aufweisen. Die Änderung der Fahrrichtung des Fahrzeugs wird schliesslich durch numerische Differentiation bestimmt.

Als nächster Schritt werden die Rohdaten mit der zurückgelegten Distanz des Fahrzeugs erweitert. Diese wird anhand der Koordinaten (Breiten- und Längengrad) und der Höhe über Meer berechnet. Darüber hinaus wird eine weitere Kolonne mit dem Mittelwert der Verzögerung eingeführt, der aus den Geschwindigkeitsänderungen berechnet wird. Darüber hinaus werden auch Zeitabschnitte mit fehlenden Daten identifiziert und markiert. GPS-Datenlücken entstehen bei Tunneln oder bei Problemen mit der Datenerfassung.

Bei der Fusion der Datensätze der GPS und Drehraten werden auch die Daten der Bremsereignisse berücksichtigt. In einer neuen Kolonne werden die Zeitabschnitte markiert, in denen Bremsereignisse stattgefunden haben. Die Markierung erfolgt durch eine Zahl, die der zeitlichen Abfolge der Bremsereignisse entspricht. Die Markierung dient dazu, eine erste Zuordnung des Bremsereignisses zur geodätischen Position des Fahrzeugs zu erstellen. Auf dieser Stufe wird noch nicht unterschieden, ob es sich um ein echtes Bremsereignis oder eine starke Beschleunigung des Fahrzeugs handelt. In einer weiteren Kolonne wird markiert, ob sich das Fahrzeug im Stillstand befindet. Als Kriterium für den Stillstand wird eine Geschwindigkeit kleiner als 5 km/h und eine Winkeländerung kleiner als 0.5° gewählt. Darüber hinaus muss das Stillstands-Kriterium ununterbrochen über mindestens 5 Sekunden erfüllt sein.

3.1.2 Korrektur der Fahrrichtung

Die Fahrrichtung des Fahrzeugs wird zur Bestimmung der Strassenkategorie verwendet (siehe Kapitel 3.2.3). Um Fehler zu vermeiden, sollte die Fahrrichtung mit einer Genauigkeit von etwa ±10° vorliegen. Die Rohdaten der Fahrrichtung werden vom Telefon geliefert. Bei höheren Geschwindigkeiten des Fahrzeugs ist die Genauigkeit der Fahrrichtung gut. Nehmen die Geschwindigkeiten des Fahrzeugs ab, so nimmt auch die Genauigkeit der Fahrrichtung ab, da der Fehler der Geolokalisierung durch den GPS-Empfänger immer grösser im Vergleich zur zurückgelegten Strecke des Fahrzeugs wird. Bei langsamer Fahrt oder Stillstand des Fahrzeugs ist die Fahrrichtung stark durch die Fehler der Geolokalisierung beeinflusst, was zu einer charakteristischen zufälligen

Bewegung führt. Die Folge sind plötzliche und abrupte Richtungsänderungen, obwohl der relative Abstand zwischen den Fahrzeugpositionen gering ist. Im Laufe der Zeit können sich diese Ungenauigkeiten kumulieren. Daher ist es wichtig, in solchen Fällen nicht nur die Richtung, sondern auch die Ungenauigkeiten in Bezug auf die geographische Breite und Länge sowie der Geschwindigkeit zu korrigieren.

Ein typisches Beispiel ist in Abb. 24 dargestellt. Abb. 24a zeigt die gemessene Fahrrichtung und Geschwindigkeit während eines Zeitintervalls von 60 Sekunden. Der mit grüner Farbe schattierte Bereich hebt die Zeitspanne hervor, in dem das Fahrzeug eine Geschwindigkeit kleiner als 12 km/h aufweist. Innerhalb dieser Zeitpanne ist die Fahrrichtung abrupten Änderungen unterworfen. In den restlichen Zeitabschnitten verläuft die Fahrrichtung hingegen kontinuierlich.

Aufgrund des Strassenverlaufs der in Abb. 24b dargestellt ist, sind diese plötzlichen Änderungen der Fahrrichtung nicht nachvollziehbar. In Abb. 24b entsprechen die roten Punkte den Positionen des Fahrzeugs während den 60 Sekunden. Die grünen Punkte stellen die Positionen des Fahrzeugs in der Zeitspanne mit Geschwindigkeiten kleiner als 12 km/h dar. Starke Richtungsänderungen, die von der Strassenführung erforderlich wären, sind nicht zu erwarten.

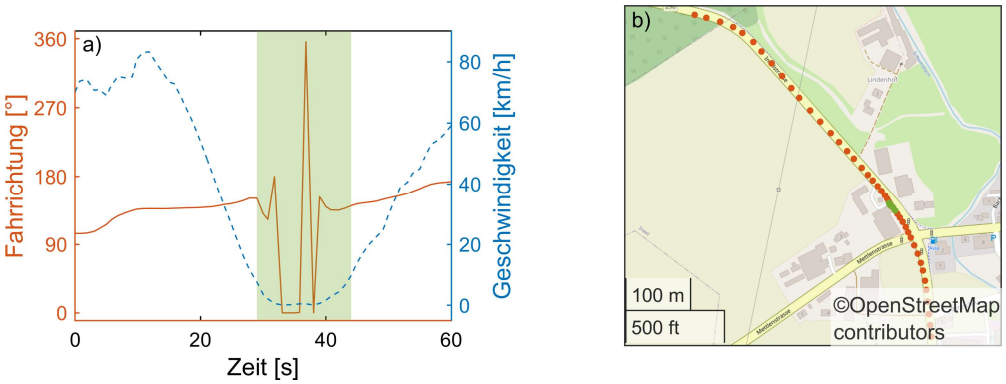


Abb. 24 *a) Gemessene Fahrrichtung und Geschwindigkeit. b) Fahrstrecke.*

Betrachtet man aus den Drehraten berechneten Winkeländerungen in Abb. 25, so treten ebenfalls keine abrupte Winkeländerungen auf. Die im grün schattierten Bereich auftretende Winkeländerungen sind sehr nahe bei null. Nennenswerte Winkeländerungen treten zu Beginn und am Ende der dargestellten Zeitspanne auf. Entsprechende Änderungen der Fahrrichtung sind auch Abb. 24a ersichtlich. Diese sind mit dem Strassenverlauf kompatibel (Kurve oben links und unten rechts).

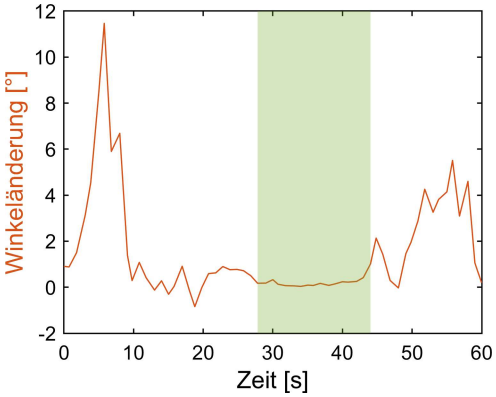


Abb. 25 *Winkeländerung.*

Betrachtet man die Position des Fahrzeugs in der Zeitspanne mit Geschwindigkeiten kleiner als 12 km/h etwas genauer an (Abb. 26a), so führt die Ungenauigkeit der Geolokalisierung zu einer typischen schlingenartigen Zufallsbewegung auf kleinstem

Raum. Diese Zufallsbewegung ruft die plötzlichen starken Richtungsänderungen hervor, die in Abb. 24a dargestellt sind.
Die Korrektur der Fahrrichtung erfolgt, indem die Zufallsbewegung entfernt wird. Der Algorithmus führt folgende Schritte aus: Es wird ein Fahrtabschnitt herausgeschnitten, der die Punkte innerhalb der Zeitspanne mit Geschwindigkeiten kleiner als 12 km/h enthält.

1. Die Geokoordinaten des Fahrtabschnitts werden in ein lokales kartesisches Koordinatensystem transformiert.
2. Die Zufallsbewegung wird vom Fahrtabschnitt abgegrenzt, indem die Zeitstempel der äussersten plötzlichen starken Richtungsänderungen verwendet werden. Die starke Richtungsänderung wird durch eine Schwelle definiert. Wird die Schwelle nicht mindestens zweimal überschritten, so tritt keine Zufallsbewegung auf und es erfolgt keine Korrektur der Fahrtrichtung.
3. Mit allen Punkten der Zufallsbewegung wird ein rechteckiger Bereich definiert, der die gesamte Zufallsbewegung enthält (Abb. 26a). Neben der Zufallsbewegung kann der rechteckige Bereich auch Punkte enthalten, die nicht zur Zufallsbewegung gehören.
4. Vom Fahrtabschnitt werden alle Punkte entfernt, die sich innerhalb des rechteckigen Bereichs befinden.
5. Die Koordinaten (x,y) der verbleibenden Punkte des Fahrtabschnitts werden in Funktion der Zeit mittels Spline-Polynomen approximiert.
6. Die Koordinaten (x,y) der vom Fahrtabschnitt entfernten Punkte werden mit den Approximationen neu berechnet, indem die Zeit dieser Punkte verwendet wird. Anschliessend werden sie dem Fahrtabschnitt wieder zugefügt.
7. Die Schritte 3 bis 7 werden wiederholt bis keine Korrektur mehr erforderlich ist.

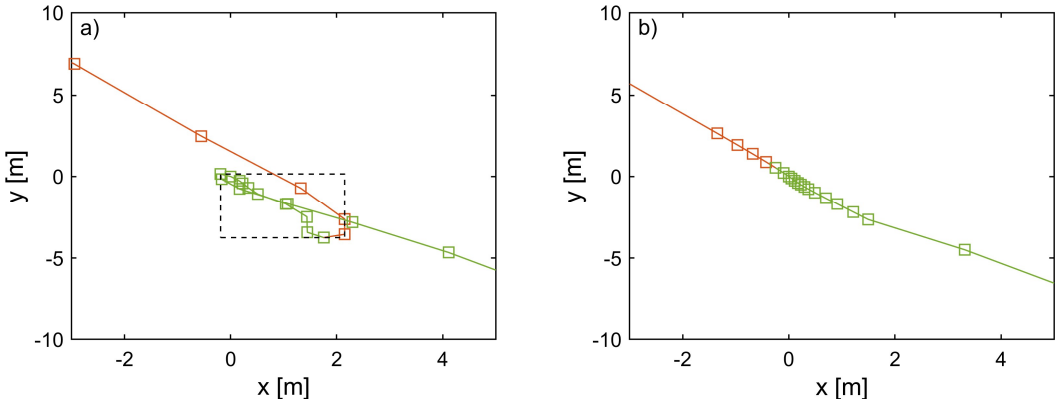


Abb. 26 *a) Gemessene und b) korrigierte Positionen des Fahrzeugs.*

Das Ergebnis ist in Abb. 26b ersichtlich. Die Zufallsbewegung ist entfernt worden und die berechneten Punkte der korrigierten Fahrt entsprechen dem Strassenverlauf. Die korrigierte Fahrrichtung ist in Abb. 27 ersichtlich. Im Gegensatz zur gemessenen Fahrrichtung verläuft sie ohne starke Ausschläge. Ausserhalb der Zeitspanne mit geringer Geschwindigkeit können kleine Abweichungen zur gemessenen Fahrrichtung auftreten, da die Fahrtrichtung, die aus den gemessenen Koordinaten berechnet wird, nicht genau mit der gemessenen Fahrrichtung übereinstimmt.

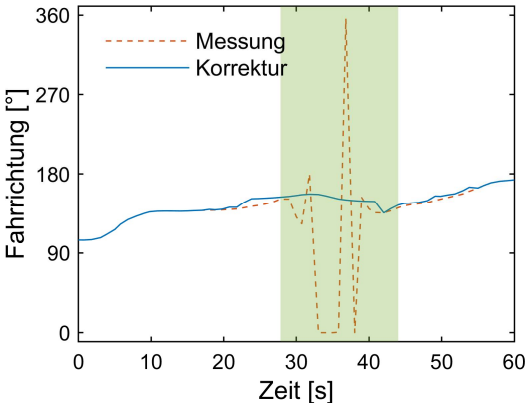


***Abb. 27** Korrigierte Fahrrichtung.*

Die Korrektur der Fahrrichtung basierend allein auf den GPS-Daten funktionierte zuverlässig und mit ausreichender Genauigkeit, sodass auf die Verwendung der Drehraten verzichtet werden konnte.

3.2 Bestimmung der gefahrenen Distanz per Strassenklasse

3.2.1 Daten aus OpenStreetMap

OpenStreetMap (OSM) ist eine freie Datenbank, die Geodaten sammelt, strukturiert und für jedermann frei nutzbar bereitstellt (Open Data). Diese Daten stehen unter einer freien Lizenz, der Open Database License. Die Geodaten werden von Freiwilligen mit einem GPS-Empfänger gesammelt oder stammen von hochauflösenden Luftbildern sowie (regional begrenzt) auch von Kartenmaterialien. Die letzteren weisen eine höhere Präzision auf als GPS-Daten, die systembedingten Ungenauigkeiten unterliegen.

Die OSM-Daten bestehen vorwiegend aus geometrischen Objekten wie Punkt, Linie, Linienzug, Polygon (geschlossener Linienzug) und Fläche. Eine Strasse wird durch eine Anzahl von Linien, Linienzügen und Polygone (z.B. Kreisel) beschrieben. Flächen werden durch Polygone definiert. Die Geometrie der Linien, Linienzügen, Polygonen und Flächen wird durch die Koordinaten ihrer Punkte definiert.

Jedem Objekt werden auch Attribute (tags) zugewiesen. Mit diesen wird spezifiziert, ob z.B. eine Linie eine Strasse, einen Feldweg, eine Bahnstrecke, einen Zaun oder einen Fluss darstellt. Jedes Attribut besteht aus einem Schlüssel (key) und einem Wert (value). Beispielsweise wird zur Bezeichnung aller Arten von Strassen und Wegen der Schlüssel *highway* verwendet. Der Wert gibt an, ob eine Linie eine Autobahn (*highway=motorway*) oder ein Feldweg (*highway=track*) darstellt. Die wichtigsten Attribute sind dabei jeweils die Objektkategorie (zum Beispiel wird eine Quartierstrasse als *highway=residential* angegeben) und (sofern gegeben) der Name (*name=Schillerstrassee*), der für die Suchfunktion wichtig ist. Mit dem Attribut *landuse* wird z.B. die Nutzung der Fläche beschrieben. Ein Industriegebiet weist den Wert *landuse=industrial* auf.

3.2.2 Strassenkategorien und Strassenklassen

Die Zuordnung zwischen Schlüsselwert, Strassenkategorie und Strassenklasse ist in Tab. 8 zusammengestellt. In der Tabelle sind nur die Schlüsselwerte von Strassenkategorien aufgeführt, die von einem schweren Fahrzeug befahren werden können. Alle anderen Strassenabschnitte mit einem Schlüsselwert *highway*, wie z.B. *pedestrian* für Fusswege oder *track* für nicht bepflasterte Wege werden ignoriert, da angenommen wird, dass diese Strassenabschnitte von einem Versuchsfahrzeug nicht befahren werden. Neben den Schlüsselwerten *motorway, trunk, primary* und *secondary* treten auch die Werte *motorway_link, trunk_link* usw. auf, um Autobahnschlüsse, Autostrassenanschlüsse usw. zu bezeichnen.

***Tab. 8** OpenStreetMap–Werte, Strassenkategorien und Strassenklassen.*

Wert	Strassenkategorie	Strassenklasse
Motorway(_link)	Autobahn	1
Trunk(_link)	Autostrasse	1
Primary(_link)	Interregionale Hauptstrassen	2
Secondary(_link)	Regionale Hauptstrassen	2
Tertiary	Nebenstrassen	3
Residential	Quartierstrassen	3
Unclassified	Untergeordnete Strassen	4
Service	Zufahrtsstrassen zu oder innerhalb eines Industrie- oder Gewerbe-areals, Parkplatzes, Autobahnrast-stätte usw.	4
Living_street	Verkehrsberuhigte Strasse (z.B. Wohnstrasse)	4

Abb. 28 zeigt die grafische Darstellung dessen, was für die Werte motorway (Autobahn) und motorway_link (Autobahnanschluss) nach OSM vorgesehen ist. Der analoge Unterschied besteht zwischen *trunk* und *trunk_link*. Diese Aufteilungen in der Strassenhierarchie sind für die Berechnung der Bremsrate von Bedeutung, da, wie in Kapitel 4 erörtert wird, deutlich unterschiedliche Werte auftreten können.



***Abb. 28** Unterschied zwischen Strassenkategorie Autobahn (motorway) (links) und Autobahnverbindung (motorway_link) (rechts) in der OSM-Datenbank (im Blau).*

3.2.3 Bestimmung der Strassenkategorie

Ausgangspunkt zur Bestimmung der Strassenkategorie ist die momentane Position des Fahrzeugs, die aus den geodätischen Koordinaten bestimmt wird. Mit der Position wird eine Anfrage an einen OSM-Server gesendet, die alle Strassensegmente (Linien, Linienzüge und Polygone mit dem Wert für den Schlüssel *highway* gemäss Tab. 8) in der nahen Umgebung der Position verlangt. Als Umgebung wird ein Quadrat definiert, dessen Mittelpunkt die Position des Fahrzeugs ist (Abb. 29). Wäre die Position des Fahrzeugs exakt, so liesse sich die Strassenkategorie eindeutig mit dem Strassensegment bestimmen, der die kürzeste Distanz zur Position des Fahrzeugs hätte. Als Distanz wird die Länge der Strecke definiert, die von der Fahrzeugposition lotrecht auf den Strassensegment steht, wobei sich der Fusspunkt innerhalb des Strassensegments befinden muss.

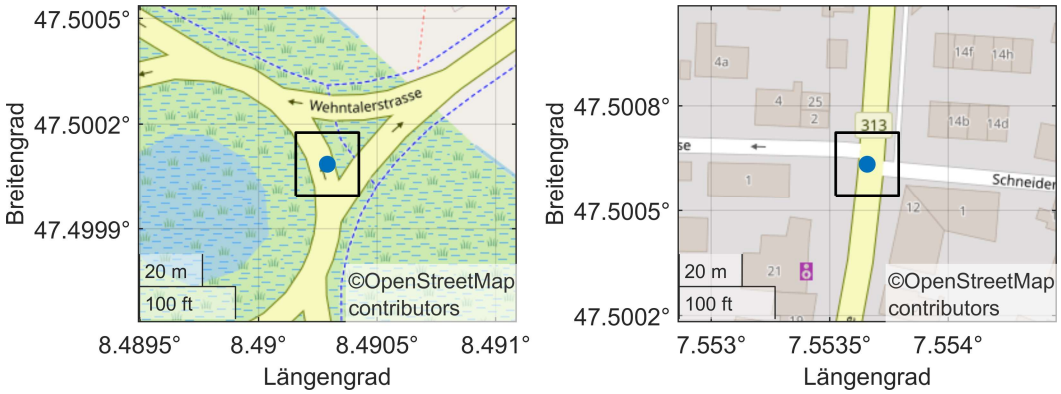


***Abb. 29** Umgebung einer Fahrzeugposition zur Bestimmung der Strassenkategorie.*

Aufgrund der Ungenauigkeit der Position des Fahrzeugs können jedoch beim Anwenden nur eines Distanzkriteriums Fehler auftreten. Neben der Position wird daher auch die Fahrrichtung und die Geschwindigkeit des Fahrzeugs verwendet. Die Fahrrichtung schränkt die Wahl auf jene Strassensegmente ein, die eine Richtung haben, die nicht zu stark von der Fahrrichtung abweicht. Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs erlaubt, Strassensegmente mit Strassenkategorien auszuschliessen, für die das Fahrzeug eine zu hohe Geschwindigkeit aufweisen würde (z.B. mehr als 60 km/h auf einer Quartierstrasse).

Diese beiden Situationen sind beispielhaft in Abb. 30 dargestellt. Das linke Bild zeigt die momentane Position eines Fahrzeugs (blauer Punkt), das in Richtung Westen auf der Autobahn A1 fährt. Die Position ist zufällig unterhalb der Überführung Hardstrasse (Nebenstrasse). Die Distanz der Fahrzeugposition zur Mittelachse der Hardstrasse (hellblauer Punkt) ist kleiner als zur Mittelachse der A1 (grüner Punkt). Die Fahrrichtung (blauer Pfeil) weicht jedoch um ca. 90° von der Richtung der Hardstrasse (ausgezogener hellblauer Pfeil) ab. Die Abweichung zur Richtung der A1 beträgt hingegen wenige Grad. Die beiden Velowege links und rechts der Hardstrasse werden aussortiert, da sie durch schwere Fahrzeuge nicht befahrbar sind. Auch die Gegenrichtung der A1 wird aussortiert, weil einerseits die Distanz grösser als zur A1 Richtung Westen ist und die Richtung um ca. 180° von der Fahrrichtung abweicht (Einbahnstrasse). Da die Hardstrasse in beiden Richtungen befahrbar ist, muss auch die entgegengesetzte Richtung berücksichtigt werden.

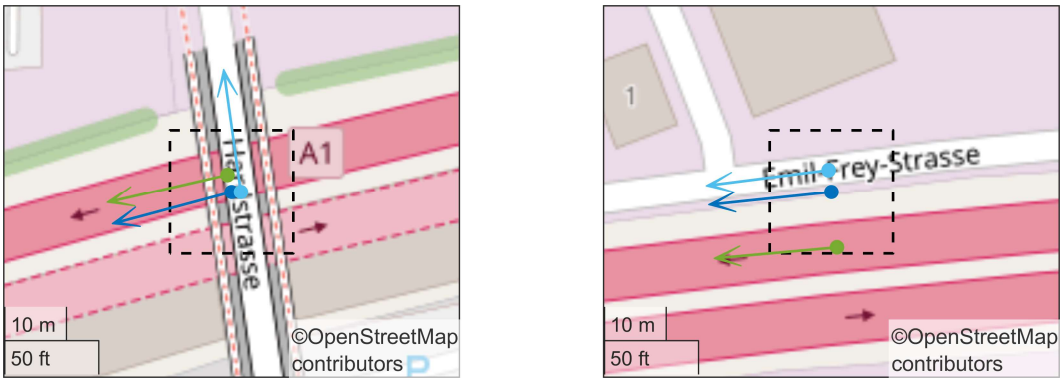


***Abb. 30** Umgebung einer Fahrzeugposition zur Bestimmung der Strassenkategorie.*

Das rechte Bild zeigt ebenfalls die momentane Position eines Fahrzeugs (blauer Punkt), das in Richtung Westen auf der Autobahn A1 fährt. Die Position ist viel näher zu einer Nebenstrasse (Emil-Frey-Strasse), die parallel zur Autobahn führt. Da die Richtung der Autobahn fast gleich zur Richtung der Nebenstrasse ist, würde ohne Berücksichtigung der Geschwindigkeit des Fahrzeugs, die Nebenstrasse als Strassenkategorie gewählt. Da die Geschwindigkeit des Fahrzeugs jedoch 87 km/h beträgt, ist es unwahrscheinlich, dass ein schweres Fahrzeug mit einer derart hohen Geschwindigkeit auf einer Nebenstrasse fährt. Die Autobahn ist daher die wahrscheinlichere Lösung.

Die einzelnen Parameter (Position, Fahrrichtung und Geschwindigkeit) zur Bestimmung der Strassenklasse werden durch eine Zielfunktion berücksichtigt. Sie setzt sich aus der Summe der Distanz der Fahrzeugposition zum Strassensegment, dem Betrag der Winkeldifferenz zwischen Fahrrichtung und Richtung des Strassensegments sowie dem Betrag der Differenz zwischen der Fahrzeuggeschwindigkeit und einer Referenzgeschwindigkeit, die von der Strassenklasse abhängt, zusammen. Die Summanden, die die Fahrrichtung und Geschwindigkeit berücksichtigen, werden zudem mit einem Gewicht skaliert.

$$h = d(P,Q) + \lambda_w w(P,Q) + \lambda_\upsilon \left|\upsilon - \overline{\upsilon}_k\right| \quad (1)$$

Für jedes Strassensegment innerhalb der Kontrollfläche wird mit der Zielfunktion ein Wert berechnet. Das Strassensegment mit dem kleinsten Wert der Zielfunktion wird zur Klassifizierung verwendet.

3.2.4 Bestimmung der gefahrenen Distanz pro Strassenklasse

Da die Bremsrate für jede Strassenklasse als Anzahl Bremsereignisse pro zurückgelegte Distanz definiert ist, muss zu jeder Fahrt für jede Strassenklasse die zurückgelegte Distanz bestimmt werden. Ein einfaches Berechnungsverfahren würde darin bestehen, zu jeder Geoposition des Fahrzeugs die Strassenklasse zu bestimmen und daraus die zurückgelegte Distanz pro Strassenklasse zu berechnen. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass die Distanzen sehr genau bestimmt werden können, birgt jedoch den gewichtigen Nachteil, dass die Rechenzeit sehr gross wäre. Zu jeder Koordinate muss eine Anfrage an die OpenStreetMap-Datenbank durchgeführt werden, die im Mittel etwa 0.5 Sekunden erfordert. Da eine Tagesfahrt ohne weiteres 30'000 Punkte enthält, würde die Auswertung rund 4 Stunden erfordern. Solche Rechenzeiten wären nicht tragbar.

Die Rechenzeit kann reduziert werden, indem nicht alle Wegpunkte ausgewertet werden. Dieses Vorgehen ist berechtigt, da zu erwarten ist, dass ein Fahrzeug während einer Zeitdauer, die deutlich länger als eine Sekunde ist, sich auf der gleichen Strassenklasse befindet. Indem nur alle 30 Sekunden die Strassenklasse bestimmt wird (Abtastperiode), erreicht man bereits eine Reduktion der Rechenzeit um ca. den Faktor 30. Die Genauigkeit der zurückgelegten Distanz pro Strassenklasse wird dabei jedoch ungenauer, da der Zeitpunkt des Wechsels der Strassenklasse nicht mehr genau bestimmt werden kann. Um die Genauigkeit beizubehalten, müsste man, sobald ein Wechsel der Strassenklasse festgestellt wird, in den letzten 29 Wegpunkten suchen, um den Strassenwechsel zu bestimmen. Diese Suche verlängert selbstverständlich wieder die Rechenzeit.

Die Verwendung einer konstanten Periode zur Bestimmung der Strassenklasse ist jedoch nicht effizient, denn die Verweildauer eines Fahrzeugs in einer Strassenklasse dürfte von dieser abhängig sein. Es ist z.B. zu erwarten, dass im Mittel ein Fahrzeug deutlich länger auf einer Autobahn verweilt als auf einer Quartierstrasse. Befindet sich ein Fahrzeug auf einer Autobahn, so ist es zweckmässig, die Abtastperiode (z.B. auf 5 Minuten) zu erhöhen.

Je länger die Abtastperiode gewählt wird, desto weiter zurück muss man suchen, um den genauen Zeitpunkt des Strassenwechsels zu bestimmen, was sich nachteilig auf die Rechenzeit auswirkt. Es ist daher sinnvoller, die Abtastperiode nicht allzu gross zu wählen und im Gegenzug weitere Fahrtinformationen beizuziehen, um mit geringem Rechenaufwand zu prüfen, ob ein Wechsel der Strassenklasse wahrscheinlich ist. Mit der Geschwindigkeit und Fahrtrichtung des Fahrzeugs kann eine solche Prüfung vorgenommen werden. Wird z.B. an einem Fahrzeug, das sich auf einer Autobahn befindet, eine deutliche Geschwindigkeitseinbusse oder grössere Änderung der Fahrrichtung festgestellt, so könnte dies auf eine Änderung der Strassenklasse hindeuten. An diesem Wegpunkt wird die Strassenklasse bestimmt. Wird hingegen keine Geschwindigkeitseinbusse oder grössere Änderung der Fahrrichtung festgestellt, so geht man gemäss der Abtastperiode zum nächsten Wegpunkt. Auf diese Weise kann die Dichte

der Wegpunkte, an denen die Strassenklasse bestimmt wird, situationsbedingt variiert werden.

Stellt man an einem Wegpunkt einen Wechsel der Strassenklasse fest, so muss der Wegpunkt, an dem der Wechsel stattgefunden hat, bestimmt werden. Eine Kontrolle aller Wegpunkte bis zum letzten Kontrollpunkt wäre höchst ineffizient, da nur an einem sehr kleinen Bruchteil der potenziellen Wegpunkte ein Wechsel stattfindet. Eine effizientere Suche kann durch eine binäre Suche [41] durchgeführt werden. Eine Suche mit n Wegpunkten kann mit $\log_2 n$ anstatt n Auswertungen durchgeführt werden. Bei 30 Wegpunkten sind etwa 5, bei 100 Wegpunkten sind etwa 7 und bei 1'000 Wegpunkten sind etwa 10 Auswertungen erforderlich, um den Wegpunkt mit dem Wechsel der Strassenklasse zu finden.

Die Bestimmung des Wegpunkts beim Wechsel der Strassenklasse wird daher folgendermassen durchgeführt:

1. Es werden die Wegpunkte ausgewählt, die zwischen dem letzten (P_m) und dem vorletzten (P_{m-1}) Wegpunkt mit bekannter Strassenklasse liegen ([P_{m-1} … P_m]).

2. Aus diesen Wegpunkten wird ein Wegpunkt P_k ausgewählt. Für diesen Wegpunkt wird die Strassenklasse bestimmt. Stimmt die Strassenklasse dieses Wegpunkts mit der Strassenklasse des letzten Wegpunkts P_m überein, so muss der Wechsel vor dem Wegpunkt P_k stattgefunden haben und es werden die Wegpunkte ausgewählt, die sich vor diesem befinden ([P_{m-1} … P_{k-1}]). Stimmt hingegen die Strassenklasse des Wegpunkts P_k mit der Strassenklasse des Wegpunkts P_{m-1} überein, so muss der Wechsel nach dem Wegpunkt P_k stattfinden und für die weitere Berechnung werden die Wegpunkte nach dem Wegpunkt P_k, [P_{k+1} … P_m], ausgewählt.

3. Schritt 2 wird an den ausgewählten Wegpunkten wiederholt, bis ein einziger Wegpunkt verbleibt oder die Distanz zwischen den letzten zwei Wegpunkten kleiner ist als eine vorgegebene Schwelle. An diesem Wegpunkt findet der Wechsel der Strassenklasse statt.

Der Algorithmus ist beispielhaft in Abb. 31 dargestellt. In der Figur links stellt das blaue Quadrat die Position des letzten Klassenwechsels dar. Das grüne Quadrat stellt die Position des Kontrollpunktes dar, bei dem der Algorithmus einen möglichen Klassenwechsel vermutet. Da tatsächlich ein Klassenwechsel stattfindet (Klasse 2 zu Klasse 1) wird der Bisektionsalgorithmus eingesetzt, um die Position des Klassenwechsels zu bestimmen. Beim Wegpunkt 1, der etwa in der Mitte der Wegstrecke zwischen dem blauen und dem grünen Quadrat ist, wird die Strassenklasse geprüft. Es wird festgestellt, dass die Strassenklasse nicht geändert hat. Der zweite Wegpunkt (2) befindet sich daher in Fahrtrichtung zwischen Wegpunkt 1 und dem Kontrollpunkt. Da auch hier kein Strassenwechsel stattfindet, geht der Algorithmus weiter in Fahrtrichtung vorwärts zu Wegpunkt 3, das zwischen Wegpunkt 2 und dem Kontrollpunkt liegt.

Erst beim Wegpunkt 4 wird ein Klassenwechsel festgestellt (Figur rechts), sodass der Algorithmus in Fahrtrichtung rückwärts zu Wegpunkt 5 geht. Die nächsten Schritte sind dann vorwärts (Wegpunkt 6) und rückwärts (Wegpunkt 7) bis er rückwärtsgehend bei Wegpunkt 8 stoppt. Bei jedem Schritt nähert sich der Algorithmus der Position des Klassenwechsels. Die Distanzen zwischen den Schritten werden immer kleiner. Beim letzten Schritt ist der Wegpunkt 8 nur noch ca. 5 m Meter vom Wegpunkt 7 entfernt. Beide Positionen könnten als Wegpunkte für einen Klassenwechsel gewählt werden. In diesem Fall ist Wegpunkt 7 die Position des Klassenwechsels, da er sich auf der neuen Strassenklasse befindet.

Bei diesem Beispiel gelangt der Algorithmus in 8 Schritten zum Ziel. Dies entsprich etwa 5 Sekunden Rechenzeit. 323 Wegpunkte befinden sich zwischen der Position des letzten Klassenwechsels und dem Kontrollpunkt. Eine Bestimmung der Wegklasse von allen diesen Punkten hätte eine etwa 40-mal längere Rechenzeit in Anspruch genommen.

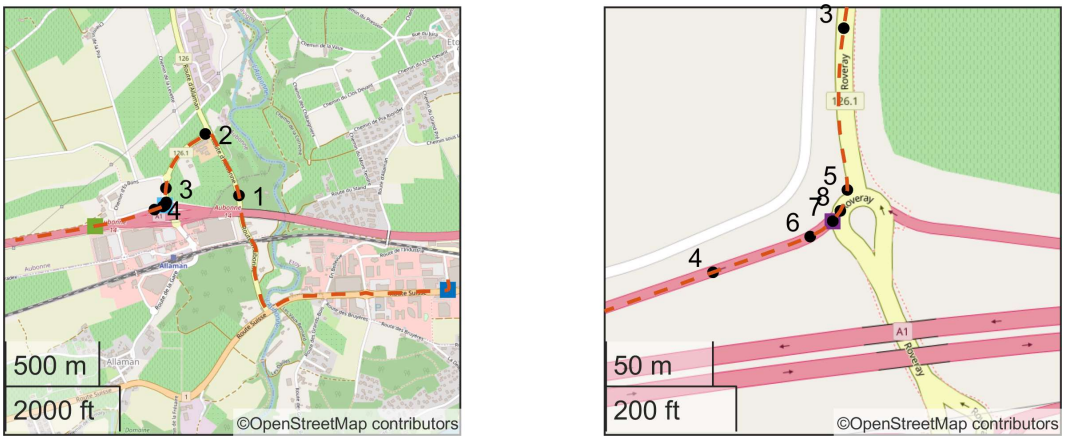


***Abb. 31** Bestimmung des Wegpunkts beim Wechsel der Strassenklasse.*

Der Algorithmus zur Bestimmung der gefahrenen Strecke pro Strassenklasse verwendet den oben beschriebenen Algorithmus zur Bestimmung der Wegpunkte mit einem Wechsel der Strassenklasse und ist in folgenden Schritten gegliedert. Wegpunkte, an denen die Strassenklasse bestimmt wird, werden dabei als Kontrollpunkte bezeichnet.

1. Die Strassenklasse des ersten Wegpunkts wird bestimmt. Falls dieser Kontrollpunkt in einer Ruhephase des Fahrzeugs liegt, dann wird dies festgehalten.
2. Eine neuer Wegpunkt wird gemäss der aktuellen Abtastperiode bestimmt. Falls der letzte Wegpunkt erreicht wird, wird dieser Wegpunkt gewählt.
3. Falls der neue Wegpunkt in einer Ruhephase liegt und der letzte Kontrollpunkt ebenfalls in einer Ruhephase liegt, wird zu Schritt 2 gesprungen und die Ausführung wird fortgesetzt. Andernfalls wird mit der Geschwindigkeit und der Richtungsänderung am aktuellen Wegpunkt geprüft, ob das Fahrzeug möglicherweise die Strassenklasse gewechselt hat.
4. Falls die Prüfung negativ ausfällt, wird zu Schritt 2 gesprungen und die Ausführung wird fortgesetzt. Bei einem positiven Ergebnis wird die Strassenklasse des aktuellen Wegpunkts bestimmt.
5. Falls die Strassenklasse des aktuellen Kontrollpunkts mit der Strassenklasse des letzten Kontrollpunkts übereinstimmt, so werden die Wegpunkte dazwischen mit der aktuellen Strassenklasse markiert. Danach wird zu Schritt 2 gesprungen und die Ausführung wird fortgesetzt. Falls die Strassenklasse des aktuellen Kontrollpunkts nicht mit der Strassenklasse des letzten Kontrollpunkts übereinstimmt, so wird durch binäre Suche der Wegpunkt mit dem Wechsel der Strassenklasse gesucht.
6. Die Wegpunkte zwischen dem letzten Kontrollpunkt und dem Wegpunkt vor dem Wechsel der Strassenklasse wird mit der aktuellen Strassenklasse markiert. Die Wegpunkte nach dem Wegpunkt mit dem Wechsel bis zum aktuellen Kontrollpunkt werden mit der neuen Strassenklasse markiert. Danach wird zu Schritt 2 gesprungen und die Ausführung wird fortgesetzt.

Das Ergebnis des Algorithmus ist beispielhaft in Abb. 32 dargestellt. In der oberen Figur ist die Fahrstrecke des Fahrzeugs rot gestrichelt dargestellt (Fahrtrichtung von Ost nach West). Die 5 Wechsel der Strassenklasse sind durch blaue Quadrate markiert. Die Wechsel sind in den unteren 5 Figuren im grösseren Massstab detaillierter dargestellt. Der erste Wechsel ist von einer Quartierstrasse (Klasse 3) auf eine Hauptstrasse (Klasse 2). Beim folgenden Wechsel fährt das Fahrzeug auf eine Autobahneinfahrt und wechselt daher von der Klasse 2 auf die Klasse 1. Beim dritten Wechsel verlässt das Fahrzeug wieder die Autobahn (Klasse 1), um auf eine regionale Hauptstrasse (Klasse 2) zu wechseln. Diese wird verlassen, um in eine Nebenstrasse einzubiegen (Klasse 3). Der letzte Wechsel findet statt, wenn das Fahrzeug schliesslich in eine Zufahrtsstrasse (Klasse 4) hineinfährt. Die Wechsel der Strassenklassen werden insgesamt mit einer Genauigkeit besser als etwa

10 m ermittelt. Diese Genauigkeit ist ausreichend, um die Distanzen pro Strassenklasse zu bestimmen.

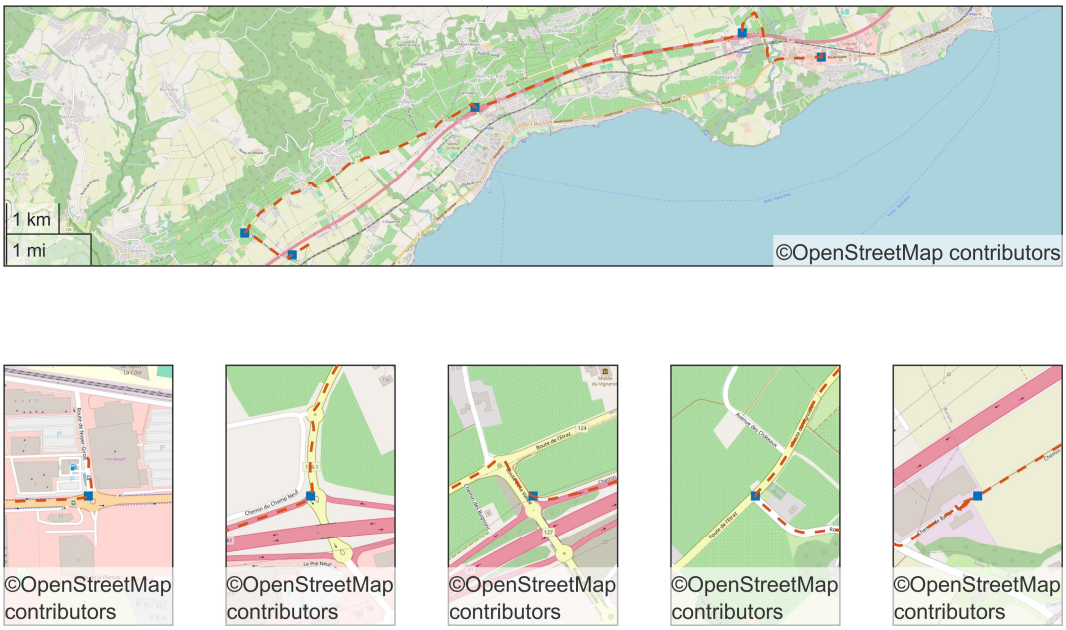


***Abb. 32** Wechsel der Strassenklassen längs eines Wegstücks.*

3.3 Charakterisierung der Bremsereignisse

Die Daten der Bremsereignisse werden zur Integration mit den GPS-Daten und zur Ermittlung relevanter Parameter, die die Kinematik eines Bremsereignisses beschreiben (z. B. Stärke und Dauer des Bremsereignisses), weiterverarbeitet, um diese möglichst gut charakterisieren zu können (Abschnitte 3.3.1 und 3.3.2). Zusätzlich werden Parameter ermittelt, die die Eigenschaften der Strasse (Strassenkategorie, Kreuzung, Kurve etc.) und der Umgebung (innerorts/ausserorts) beschreiben (Abschnitt 3.3.3).

3.3.1 Analyse der Verzögerungsprofile

Die Analyse der Verzögerungsprofile muss folgende Punkte beachten:

1. Jede Applikation besitzt eine unterschiedliche Verzögerung im Zeitstempel. Diese kann einige zehntel Sekunden betragen. Eine Zeitsynchronisation, die auf einer einfachen Synchronisation allein mit den Zeitstempeln beruht, ist daher fehlerhaft.
2. Der Nullabgleich des Telefons zu Beginn einer Datenerfassungsperiode ist mit Unsicherheiten behaftet, da der Standort des parkierten Fahrzeugs ein Gefälle aufweisen kann, was zu einer kleinen konstanten Beschleunigung in den horizontalen Komponenten führt. Darüber hinaus kann das Federungssystem zu einer kleinen Neigung des Fahrzeugs führen.
3. Bremsereignisse können auch auf einer Strasse mit einem Gefälle auftreten. Das gemessene Verzögerungsprofil erhält dadurch einen systematischen Fehler, der zu einer Vergrösserung (Abstieg) oder Verkleinerung (Anstieg) des kinematischen Verzögerungsprofils führen kann.
4. Der Beschleunigungssensor, der zur Erfassung der Bremsverzögerungen eingesetzt wird, hat eine sehr kleine Drift. Da der Nullabgleich des Sensors nur wöchentlich erfolgt, kann sich die Drift in den Messungen als systematischen Fehler niederschlagen.

Aufgrund dieser Fehlerquellen müssen die gemessenen Verzögerungsprofile korrigiert werden. Der Ansatz besteht darin, die Diskrepanz zwischen der Geschwindigkeit aus den

Fahrtdaten (GPS-Geschwindigkeit) und der Geschwindigkeit, die durch Integration der Verzögerungsprofils entlang der Fahrrichtung (Y-Achse) berechnet wird, zu minimieren. Die Verknüpfung der erweiterten Fahrtdaten mit den Verzögerungsprofilen der Bremsereignisse wurde mit den Zeitstempeln durchgeführt. Da die Zeitintegration des Verzögerungsprofils nur Änderungen der Geschwindigkeit liefert, wird nur die Änderung der GPS-Geschwindigkeit relativ zum Start des Bremsereignisses berücksichtigt. Die Daten der Drehraten wurden nicht verwendet, da sie keine nützlichen Informationen lieferten. Bremsereignisse, bei denen der Schwellenwert mehrmals überschritten wurde, wurden als unabhängige Bremsereignisse behandelt.

Es wurden 2 Korrekturen vorgenommen:

1. Am Verzögerungsprofil wird eine Zeitverschiebung und eine Verschiebung der Nulllinie (Versatz) der Verzögerung aufgebracht. Das optimale Wertepaar ist dadurch gekennzeichnet, dass es die Kreuzkorrelation zwischen den Geschwindigkeiten minimiert. Die GPS-Geschwindigkeiten werden durch lineare Interpolation auf die Zeitstempel der Verzögerungsprofile hochgerechnet. Der maximale Versatz ist auf ±0.5 ms^{-2} und die Zeitverschiebung auf ±1 s begrenzt.

2. Nach dieser Korrektur des Verzögerungsprofils werden mögliche Segmente in den Fahrtdaten gesucht, die einer sehr kleinen (stehendes Fahrzeug) oder einer konstanten Geschwindigkeit entsprechen. Diese zweite Korrektur erfolgt nach dem Prinzip, dass in beiden Fällen die Verzögerung etwa Null ist. Die Korrektur des Verzögerungsprofils erfolgt über den Mittelwert dieser Segmente. Diese zweite Korrektur führt in der Regel zu einem kleinen Versatz des Verzögerungsprofils, das jedoch einen erheblichen Einfluss auf die integrierte Geschwindigkeit haben kann.

Beide Korrekturverfahren werden nacheinander durchgeführt und in einem abschliessenden Schritt wird bewertet, welches Verfahren - nur die erste Korrektur oder beide zusammen - besser mit der GPS-Geschwindigkeit übereinstimmt. Es wurde festgestellt, dass die Überprüfung der Nullbeschleunigung nicht immer die besten Ergebnisse liefert.

Die Anwendung dieser beiden Korrekturen verbessert deutlich die Übereinstimmung zwischen der GPS-Geschwindigkeit und der aus dem Verzögerungsprofil berechneten Geschwindigkeit. In den Fällen, in denen Segmente mit einem stehenden Fahrzeug identifiziert werden können, werden diese zur Kalibrierung der Geschwindigkeit verwendet.

Die oben beschriebenen Verfahren sind beispielhaft in Abb. 33 erläutert. Im linken Diagramm sind die Verzögerungsprofile dargestellt. Das gemessene Verzögerungsprofil ist als blaue Kurve, das nach der 1. Korrektur berechnete ist als rote Kurve und das nach der 2. Korrektur berechnete ist als gelbe Kurve dargestellt. Im rechten Diagramm sind die zugeordnete Geschwindigkeitsprofile dargestellt. Das gemessene Verzögerungsprofil wird durch die 1. Korrektur zeitlich um etwa 0.5 Sekunden nach rechts verschoben. Zusätzlich wird die Verzögerung um einen Versatz von 0.012 ms^{-2} reduziert. Die 2. Korrektur führt hingegen zu einem sehr kleinen Versatz. Die beiden Korrekturen führen zu einer deutlich besseren Übereinstimmung zwischen der GPS-Geschwindigkeit (schwarz) und den aus den korrigierten Verzögerungsprofilen berechneten Geschwindigkeiten. Das Beispiel zeigt deutlich, dass bereits ein geringer Versatz des Verzögerungsprofils einen erheblichen Einfluss auf die Geschwindigkeit haben kann. Die Genauigkeit der aus der Verzögerung berechneten Geschwindigkeit ist wichtig, da im stochastischen Modell die Bremsereignisse aufgrund der Geschwindigkeitsdifferenz ausgewählt werden.

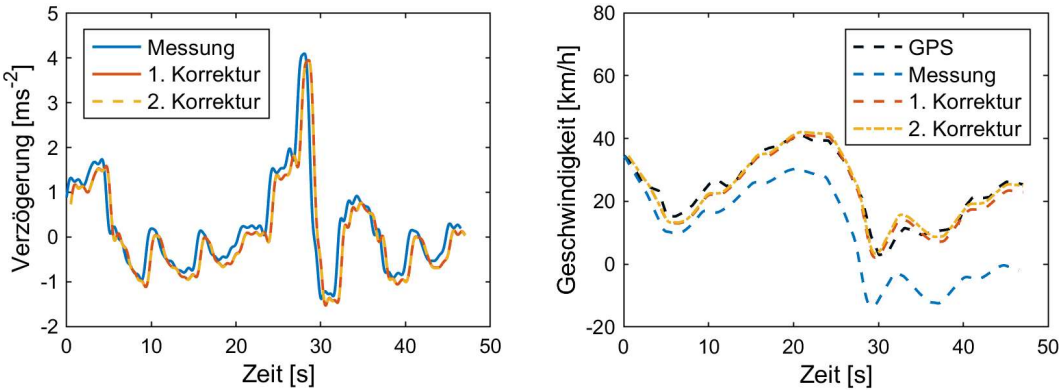


Abb. 33 *Vergleich zwischen der gemessenen Verzögerung und der Verzögerung nach den beiden Korrekturen (links). Auswirkung der Korrekturen auf die Geschwindigkeit (rechts).*

In Abb. 34 ist ein Bremsereignis mit einem Verzögerungsprofil zu sehen, das nur um einen Versatz korrigiert wurde Die Geschwindigkeit aus dem gemessenen Verzögerungsprofil weicht mit zunehmender Zeit immer stärker von der GPS-Geschwindigkeit ab. Die Korrektur mit dem Versatz reduziert diesen Fehler massiv.

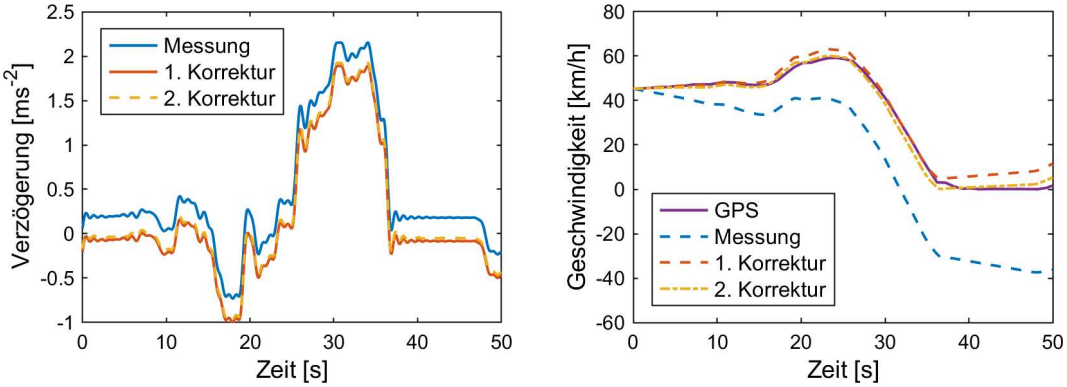


Abb. 34 *Vergleich zwischen der gemessenen Verzögerung und der Verzögerung nach der Korrektur mit dem Versatz (links). Auswirkung der Korrekturen auf die Geschwindigkeit (rechts).*

Das beschriebene Korrekturverfahren funktioniert nur unter der Bedingung, dass die GPS-Geschwindigkeit nicht grob fehlerhaft ist. Grobe Fehler der GPS-Geschwindigkeit treten häufig auf, wenn ein Bremsereignis in der Nähe eines Tunnels stattfindet. In diesen seltenen Fällen ist keine Korrektur möglich und die gemessenen Verzögerungsprofile bleiben unverändert. Darüber hinaus bleibt die Geschwindigkeit zu Beginn des Bremsereignisses unbekannt. Die Geschwindigkeitsänderungen können hingegen berechnet werden.

Die Korrektur der Verzögerungsprofile hat nur einen geringen Einfluss auf die Spitzenwerte der resultierenden Verzögerungsprofile. Abb. 35 zeigt einen Vergleich zwischen der kumulativen Verteilung der Spitzenwerte der gemessenen und korrigierten Verzögerungsprofile. Letztere sind, wie zu erwarten war, nach links in Richtung kleinerer Spitzenwerte verschoben. Die Korrekturen führen im Mittel zu einer Reduzierung des Spitzenwerts von 2.03 ms^{-2} auf 1.95 ms^{-2}. Für den zur Bestimmung der Bremsrate verwendete Schwellenwert von 3.00 ms^{-2} beträgt die Reduktion 0.11ms^{-2} (nicht korrigierter Spitzenwert 3.11 ms^{-2}.

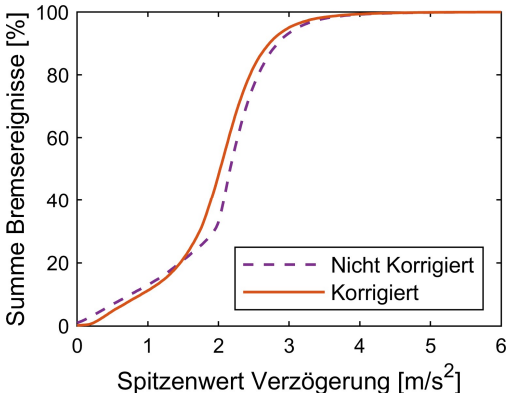


***Abb. 35** Verteilung der Spitzenwerte der Verzögerungsprofile vor und nach der Korrektur.*

Abb. 36 zeigt die Verteilung des Versatzes des Verzögerungsprofils, der durch die beiden Korrekturen verursacht wird. In der linken Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass die Verteilung der 1. Korrektur leicht asymmetrisch in negativer Richtung ist. Ausserdem wird die 2. Korrektur in den meisten Fällen nicht angewendet. Die rechte Abbildung zeigt ein Diagramm, das den Spitzenwert mit dem Versatz korreliert. Es zeigt, dass die grössten Korrekturen bei Spitzenwerten unter 3 ms^{-2} auftreten. Dies liegt daran, dass Bremsereignisse im Bereich zwischen 2 und 3 ms^{-2} moderat sind und deshalb nicht immer die typischen Merkmale eines klar abgegrenzten Bremsvorgangs aufweisen. Die Abbildung zeigt auch, dass die durchschnittliche Korrektur klein ist (grüne Linie bei -0.08 ms^{-2}). Die roten Linien stellen die 5% und 95 % Quantilen dar. Daraus resultiert, dass 87 % der Korrekturen kleiner als 0.5 ms^{-2} sind.

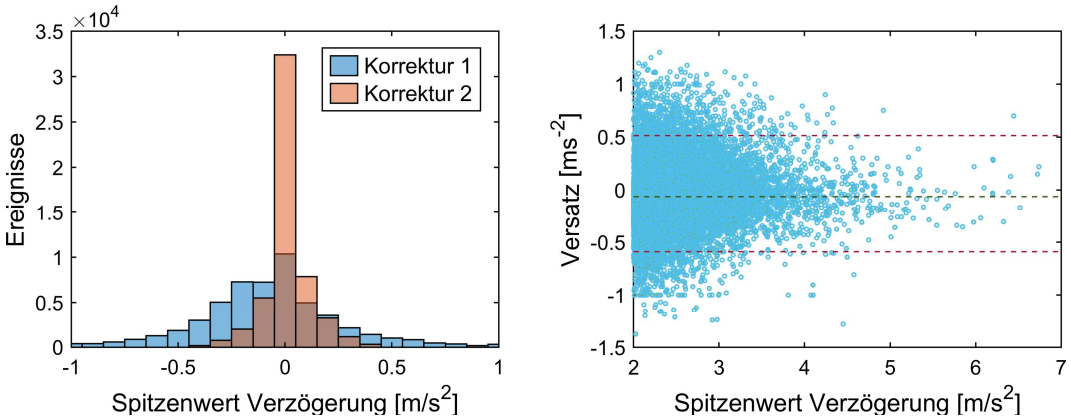


***Abb. 36** Versatz aufgrund der Korrekturen (links). Korrelation zwischen Spitzenwert der Verzögerung und Versatz (rechts).*

3.3.2 Bestimmung der kinematischen Kennwerte

Um die erfassten Bremsereignisse statistisch zu untersuchen, müssen die korrigierten Verzögerungsprofile mit Kennwerten charakterisiert werden. Ein wichtiger Kennwert ist sicherlich der Spitzenwert der Verzögerung, doch er allein beschreibt nur in ungenügendem Masse die Wirkung eines Bremsereignis auf einer Brücke. Die Dauer der Einwirkung und der Gradient des Kraftanstiegs sind z.B. für die dynamischen Auswirkungen ebenfalls von Bedeutung. Daher ist es nötig, zusätzliche Kennwerte zu bestimmen. Insgesamt wurden für jedes Bremsereignis 8 Kennwerte bestimmt, die in Tab. 9 zusammengestellt sind. Die einzelnen Kennwerte werden unten näher erläutert.

Tab. 9 *Kinematische Kennwerte der Verzögerungsprofile.*

Parameter	Einheit	Bemerkung
Spitzenwert Verzögerung	ms^{-2}	
Plateauwert Verzögerung	ms^{-2}	
Dauer der Verzögerung	s	Dauer des vereinfachten Profils
Ruck aufwärts	ms^{-3}	Ruck des vereinfachten Profils
Ruck abwärts	ms^{-3}	Ruck des vereinfachten Profils
Geschwindigkeitsänderung	km/h	Geschwindigkeitsänderung des vereinfachten Profils

Das Verzögerungsprofil eines Bremsereignisses kann vereinfacht durch ein trilineares Profil dargestellt werden. Es besteht aus einer Phase zunehmender Verzögerung, einer Phase konstanter Verzögerung und einer Phase abnehmender Verzögerung [24]. Die Änderung der Verzögerung über die Zeit wird als Ruck bezeichnet. Um das trilineare Profil aufzubauen, werden die Phasen des zunehmenden und abnehmenden Rucks identifiziert. Die Anfangs- und Endpunkte des trilinearen Profils werden auf der Basis der Fläche (Geschwindigkeitsänderung) unterhalb des Verzögerungsprofils bestimmt. Abb. 37 zeigt die entsprechenden Kennwerte.

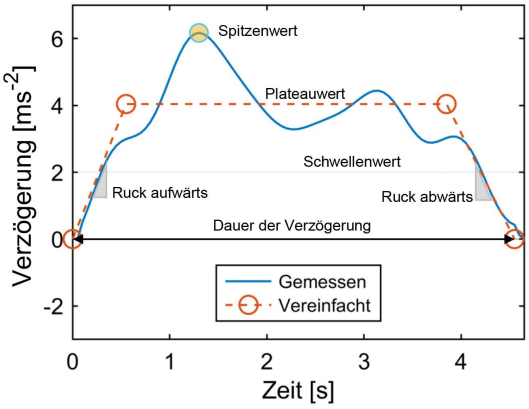


Abb. 37 *Grafische Darstellung der Verzögerungskennwerte.*

Die Vereinfachung des Verzögerungsprofils durch das trilineare Profil erleichtert die statistische Analyse und Diskussion. Aus dem trilinearen Profil werden neben dem Plateauwert der Ruck aufwärts, der Ruck abwärts, die Dauer der Verzögerung, die Geschwindigkeitsänderung und die Zeit bis zum Spitzenwert bestimmt.

Innerhalb eines Verzögerungsprofils wurden die Bremsereignisse anhand der höchsten und niedrigsten Geschwindigkeiten des Geschwindigkeitsprofils identifiziert. Dabei wird stets mit der höchsten Geschwindigkeit begonnen, um Anfang und Ende des Bremsereignisses zu bestimmen. Abb. 38 (links) zeigt das Verzögerungsprofil zusammen mit dem zugehörigen Geschwindigkeitsprofil von zwei Bremsereignissen. Die Geschwindigkeit ist durch die rote Kurve und die Verzögerung durch die blaue Kurve dargestellt. Die gestrichelten grauen Linien markieren den Anfangs- bzw. Endpunkt des Bremsereignisses.

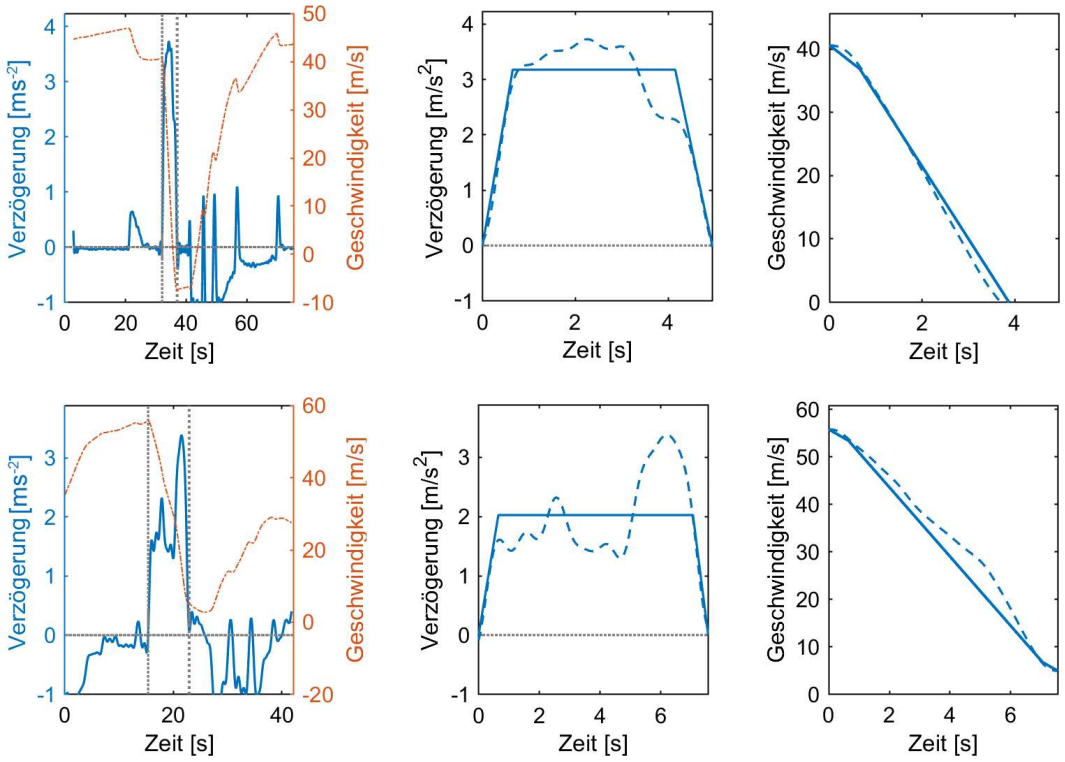


Abb. 38 *Bestimmung der Verzögerungskennwerte: Zeitabschnitt, in dem das Bremsereignis ausgelöst wird (links), Vergleich zwischen gemessenem und vereinfachtem Verzögerungsprofil (Mitte), Vergleich zwischen gemessener und vereinfachter Geschwindigkeit (rechts).*

Der Wert des Plateaus des trilinearen Profils wird durch Integration des trilinearen Profils über die Zeit bestimmt, sodass er gleich der Fläche unter dem Verzögerungsprofil ist. Die graphische Darstellung der beiden Verzögerungsprofile befindet sich in der mittleren Spalte der Abb. 38. Es wird deutlich, dass die Form des Profils nur einen geringen Einfluss auf die Geschwindigkeitsänderung hat. Aufgrund der Flächengleichheit stimmen die Geschwindigkeitsänderungen überein.

Intensive Bremsereignisse werden in der Regel durch das trilineare Profil gut erfasst, da sie durch eine klar lokalisierte Verzögerung gekennzeichnet sind (Diagramme oben). Weniger starke Ereignisse sind oft durch eine grosse Variation der Verzögerung über die Zeit und durch mehrere Spitzen gekennzeichnet (Diagramme unten). In diesem Fall gleicht das trilineare Profil die Spitzen deutlich aus.

3.3.3 Strassen- und Umgebungskennwerte

Zur Charakterisierung der Bremsereignisse sind neben den kinematischen Kennwerten auch Informationen zum Strassennetz und zur Umgebung am Ort des Bremsereignisses wichtig. Diese Informationen können Hinweise zur Ursache des Bremsereignisses liefern. Findet z.B. ein Bremsereignis vor einer Strassenkreuzung oder einer engen Kurve auf, so ist es wahrscheinlich, dass sie die primäre Ursache des Bremsereignisses sind. Analog kann vermutet werden, dass wenn auf einer Autobahn ein Bremsereignis vor einer Einfahrt oder Ausfahrt stattfindet, die besondere Situation der sich vermischenden oder trennenden Verkehrsflüsse an diesen Orten das Bremsereignis hervorgerufen haben. Da auf einer Strasse, die eine Ortschaft durchquert, mit komplexeren Verkehrssituationen zu rechnen ist als auf einer Landstrasse, kann eine Klassifizierung der Umgebung eines Bremsereignisses ebenfalls nützliche Informationen liefern.

Die Strassen und Umgebungskennwerte werden mit Hilfe der Daten von OpenStreetMap bestimmt. Für jedes Bremsereignis wird zuerst der Bereich mit der grössten

Bremsintensität bestimmt. Um den Wegpunkt im Zentrum dieses Bereichs wird eine quadratische Kontrollfläche mit einer Seitenlänge von 200 m bestimmt. In dieser Fläche werden alle Daten zu Strassen, Gebäuden, Einrichtungen, Nutzflächen und natürliche Flächen gesammelt. Mit diesen Daten werden die Kennwerte bestimmt, die in Tab. 10 aufgeführt sind.

***Tab. 10** Strassen- und Umgebungskennwerte.*

Kennwert	**Bemerkung**
Ort des Bremsereignisses	Längen- und Breitengrad
Strassenklasse	Siehe *Tab. 8*
Strassenkategorie	Siehe *Tab. 8*
Anzahl Gebäude	
Fläche Gebäude	Verhältnis zu Kontrollfläche
Fläche Wohngebiet	Verhältnis zu Kontrollfläche
Fläche Gewerbezone	Verhältnis zu Kontrollfläche
Grünfläche (inkl. Landwirtschaft)	Verhältnis zu Kontrollfläche (Wiese, Plantage, Wald)
Länge Strassennetz	Verhältnis Länge des Strassennetzes innerhalb der Kontrollfläche zur Seitenlänge der Kontrollfläche
Strassennetztopologie	Anzahl Knotenpunkte des Strassennetzes
Distanz zum nächsten Strassenknotenpunkt	In Fahrrichtung vom Zentrum des Bremsereignisses aus
Freiheitsgrad des nächsten Strassenknotenpunkts	Anzahl in die Kreuzung Fahrrichtungen
Kreisel als nächster Strassenknotenpunkt	In Fahrrichtung vom Zentrum des Bremsereignisses aus
Grösste Richtungsänderung in Fahrrichtung	Winkel in Fahrrichtung vom Zentrum des Bremsereignisses aus zwischen zwei Geolokalisierungen
Distanz zu grösster Richtungsänderung	Distanz in Fahrrichtung vom Zentrum des Bremsereignisses aus
Totale Richtungsänderung in Fahrrichtung	Winkel in Fahrrichtung vom Zentrum des Bremsereignisses aus bis zum Ende der Fahrstrecke

Um die letzten 7 Kennwerte (ab Strassennetztopologie) zu bestimmen, werden die in der Kontrollfläche aufgefundenen Strassensegmente zu einem Strassennetz verbunden, der durch einen gerichteten Graphen dargestellt wird. Die Endknoten der Strassensegmente und die inneren Knoten mit Verbindungen zu anderen Strassensegmenten bilden dabei die Knoten des Graphen. Die Strassensegmentabschnitte zwischen diesen Knoten bilden die Kanten des Graphen. Um zwischen Einbahnstrassen und in beiden Richtungen befahrbaren Strassen unterscheiden zu können, sind die Kanten des Graphen in Fahrrichtung gerichtet. Bei einer Einbahnstrasse ist ein Strassensegmentabschnitt jeweils mit nur einer Kante mit dem Knoten des Graphen verbunden (entweder in den Knoten hinein oder aus dem Knoten heraus). Bei in beiden Richtungen befahrbaren Strassensegmentabschnitten sind immer zwei Kanten mit dem Knoten verbunden, nämlich eine in den Knoten hinein und eine aus dem Knoten heraus.

Mit den Graphen des Strassennetzes und den gemessenen Koordinaten der Endpunkte und des Zentrums des Bremsereignisses wird dann die Route des Fahrzeugs aus Strassensegmenten der OSM-Datenbank gebildet. Daraus lassen sich die Informationen zum nächstgelegenen Strassenknotenpunkt und zur Richtungsänderung bestimmen.

Abb. 39 zeigt beispielhaft zwei Bremsereignisse. Die Route aus OSM-Strassensegmenten ist als rote Linie dargestellt. Die blauen Punkte stellen die mit dem Telefon erfasste Fahrstrecke dar. Der grosse blaue Punkt bezeichnet das Zentrum des Bremsereignisses.



Abb. 39 *Kartenausschnitt in der Umgebung zweier Bremsereignisse.*

Tab. 11 listet die Kennwerte zweier Bremsereignisse auf, die in Abb. 40 dargestellt werden. Die Fahrstrecke des Bremsereignisses ist durch eine rote Linie dargestellt. Der blaue Kreis bezeichnet das Zentrum des Bremsereignisses. Der Umfang der quadratischen Kontrollfläche ist mit einer gestrichelten Linie gekennzeichnet.

Aus den Kennwerten des linken Bremsereignisses wird deutlich, dass es in einem bebauten Gebiet und insbesondere in einer Gewerbezone stattgefunden hat. Auch die Länge des Strassennetzes unterstreicht dieses Ergebnis. Die ab dem Ort des grössten Verzögerungswerts auftretende Strassenknotenpunkt ist die Verbindung der Bahnhofstrasse mit dem Gartenweg. Die Distanz dorthin beträgt 15 m. Weiter vorne befindet sich noch ein Kreisel. In diesem Fall ist nicht ohne weiteres feststellbar, ob die Ursache des Bremsereignisses durch die Kreuzung Bahnhofstrasse/Gartenweg oder den Kreisel hervorgerufen wurde. Die Kennwerte der Richtungsänderung sind alle 0, da die Aufzeichnung des Bremsereignisses kurz nach dem Zentrum des Bremsereignisses endet.

Tab. 11 *Strassen- und Umgebungskennwerte der* Bremsereignisse in Abb. 40.

Kennwert	**Bremsereignis links**	**Bremsereignis rechts**
Ort des Bremsereignisses	(47.370887,8.231408)	(46.936734,7.136344)
Strassenklasse	2	1
Strassenkategorie	Secondary	Motorway_link
Anzahl Gebäude	27	0
Fläche Gebäude	18.7%	0%
Fläche Wohngebiet	0%	0%
Fläche Gewerbezone	51.6%	0%
Grünfläche (inkl. Landwirtschaft)	5.8%	30.3%
Länge Strassennetz	6.42	3.61
Strassennetztopologie	3	4
Distanz zu nächstem Strassenknotenpunkt	15 m	13 m
Freiheitsgrad des nächsten Strassenknotenpunkts	3	4
Kreisel als nächster Strassenknotenpunkt	Nein	Ja
Grösste Richtungsänderung in Fahrrichtung	0°	43.2°
Distanz zu grösster Richtungsänderung	0 m	13 m
Totale Richtungsänderung in Fahrrichtung	0°	79.9°



***Abb. 40** Kartenausschnitte der Umgebung zweier Bremsereignisse.*

Die Kennwerte bestätigen, dass das Bremsereignis rechts in einem gänzlich unbebauten Umfeld stattgefunden hat. Die Distanz zum nächsten Strassenknotenpunkt beträgt 13 m, wobei in diesem Fall der Strassenknotenpunkt ein Kreisel ist. Die Ursache des Bremsereignisses ist hier eindeutig auf den Kreisel zurückzuführen. Die in Tab. 11 festgehaltenen Richtungsänderungen des Fahrzeugs sind aus der Fahrstrecke des Fahrzeugs gut nachvollziehbar. Diese Informationen sind bei diesem Bremsereignis unbedeutend, da die Richtungsänderung durch den Kreisel gegeben ist. Bremsereignisse vor Kurven lassen sich hingegen durch die Informationen zur Richtungsänderung feststellen.

3.3.4 Berechnung der Bremsraten

Eines der Ziele dieses Projekts ist es, nicht nur Durchschnittswerte der Bremsrate für die verschiedenen Strassenklassen zu bestimmen, sondern insbesondere für das Autobahnnetz die Bremsrate an bestimmten charakteristischen Strassenabschnitten zu bestimmen, die sich durch ihre Eigenschaften oder Funktion unterscheiden. Solche Strassenabschnitte (Unterabschnitte) sind z.B. Ein- und Ausfahrten von Autobahnen oder die Autobahnabschnitte davor. Um diesen Detaillierungsgrad zu erreichen muss, da die Bremsrate sich aus dem Quotienten aus der Anzahl der Bremsereignisse und der gefahrenen Strecke bildet, beide Grössen mit einer hohen örtlichen Auflösung bestimmt werden. Ein naheliegendes Mass der örtlichen Auflösung stellen die Strassensegmente der OSM-Datenbank dar, da ein Strassennetz sich aus einer Vielzahl von Strassensegmenten bildet. Da die Strassensegmente sehr unterschiedliche Längen aufweisen, ist die Auflösung heterogen. Die Grundidee besteht darin, für jedes Strassensegment zu zählen, wie viele Durchfahrten der Fahrzeuge und wie viele Bremsereignisse in einem Strassensegment stattgefunden haben.

Um diese beiden Grössen zu berechnen, wurde zuerst das gesamte Autobahnnetz der Schweiz von der OSM-Datenbank heruntergeladen (17'016 Strassensegmente) und dann als gerichteten Graphen dargestellt. Zur Berechnung der Anzahl Durchfahrten eines Strassensegments wurde von jedem Fahrzeug jede Tagesstrecke nach Autobahnabschnitten abgesucht. Diese wurden bereits bei der Berechnung der zurückgelegten Fahrstrecke nach Strassenklassen (siehe Kapitel 3.2.4) gekennzeichnet. Mit den Anfangs- und Endpunkten der Autobahnabschnitte wurde dann die Route im Autobahnnetz bestimmt, indem der kürzeste Weg zwischen den Punkten ermittelt wurde Da eine Route aus Strassensegmenten besteht, konnte der Durchfahrtenzähler jedes Strassensegments der Route mit einer Zahl zwischen 0 und 1 inkrementiert werden, je nachdem, ob das Strassensegment vollständig (1) oder teilweise (<1) befahren wurde. Eine teilweise Befahrung eines Strassensegments tritt dann auf, wenn innerhalb des Strassensegments ein zweites Strassensegment anknüpft (Verzweigungspunkt), das vom Fahrzeug befahren wurde, sodass im ersten Strassensegment nur die Strecke bis zum Verzweigungspunkt benutzt wurde.

Die Zählung der Bremsereignisse pro Strassensegment basiert auf dem in Kapitel 3.3.3 beschriebenen Verfahren. Im Rahmen der Charakterisierung der Bremsereignisse wird mit dem lokalen Strassennetz ebenfalls ein gerichteter Graph erstellt, der dazu dient, die Route des Fahrzeugs auf dem lokalen Strassennetz zu finden. Die gemessene Position des Fahrzeugs, welche die höchste Bremsverzögerung aufweist, wird senkrecht auf die Route projiziert. Das Strassensegment mit dem Projektionspunkt bestimmt die Strassenklasse, auf dem das Bremsereignis stattfand. Zudem wird der Zähler der Bremsereignisse des Strassensegments um 1 inkrementiert.

Mit den Zählern der Durchfahrten und Bremsereignissen pro Strassensegment lassen sich die Bremsraten von typischen Strassenabschnitten (z.B. Autobahnausfahrten) oder an bestimmten Orten des Strassennetzes berechnen. Für Autobahnausfahrten werden dazu die Zähler aller Strassensegmente, die als Autobahnausfahrten markiert sind verwendet. Die Zähler der Bremsereignisse werden direkt aufsummiert, während die Zähler der Durchfahrten zuerst mit der Länge des jeweiligen Strassensegments multipliziert und dann aufsummiert wird. Daraus wird dann die Bremsrate gebildet.

Die Bremsrate vor einem spezifischen Autobahnkreuz wird bestimmt, indem zuerst die Strassensegmente vor dem Autobahnkreuz bis zu einer vorgegebenen Distanz ermittelt werden. Dies erfolgt indem auf dem Autobahnnetz die kürzeste Route zwischen zwei Punkten bestimmt wird, wobei die zwei Punkte den Strassenabschnitt festlegen. Alternativ kann auch von einem Punkt vor dem Autobahnkreuz rekursiv der Strassenabschnitt abgefahren werden, bis eine bestimmte Strecke zurückgelegt worden ist. Auch in diesem Fall werden die Zähler der Strassensegmente verwendet, um die Bremsrate zu bestimmen.

Dieses Verfahren wurde nur für die Berechnung der Bremsraten innerhalb des Autobahnnetzes eingesetzt. Wie bereits erwähnt besteht das Netz bereits aus 17'016 Strassensegmenten. Die Berechnung des gerichteten Graphen, der aus 16'996 Knoten (End- und Verknüpfungspunkte) und 18'984 Kanten (Strassensegmente) besteht, benötigte etwa 20 Minuten Rechenzeit. Die Berechnung einer Route zwischen zwei Punkten benötigt im Schnitt ca. 3 Sekunden. Die Auswertung des gesamten Datensatzes erforderte rund 4 Stunden Rechenzeit.

Das nächstmächtigere Strassennetz gebildet aus dem Autobahnnetz und den überregionalen Hauptverbindungsstrassen (Wert *primary* des Schlüsselworts *highway* gemäss OSM) besteht aus 47'482 Strassensegmenten und der gerichtete Graph besitzt 46'563 Knoten und 73'672 Kanten. Die Berechnung des Graphen erfordert bereits ca. 1 Stunde. Die Berechnung einer Route zwischen zwei Punkten benötigt im Schnitt ca. 6 Sekunden. Dieses Strassennetz wurde in den seltenen Fällen eingesetzt, in denen die Anfangs- und Endpunkte eines Autobahnabschnitts kurz durch eine Hauptstrasse unterbrochen wird.

4 Resultate der Monitoringkampagne

4.1 Überblick

4.1.1 Fahrstrecken

Während der Monitoring-Kampagne wurde eine Gesamtfahrstrecke von 806'248 km vollständig erfasst, d.h. auf dieser Strecke funktionierten alle Applikationen korrekt. Die tatsächlich gefahrene Gesamtstrecke ist grösser, allerdings wurden Strecken mit unvollständigen Daten, wie z.B. mit fehlenden GPS-Daten, in der Auswertung nicht berücksichtigt. Die Daten des Pilotversuchs sind auch berücksichtigt worden. Abb. 41 gibt einen Überblick über die befahrenen Streckenabschnitte (blau). Es ist ersichtlich, dass die LKW einen grossen Teil des Schweizer Autobahn- und Hauptstrassennetzes befahren haben.

Die Klassifizierung nach der Strassenhierarchie wird in Abb. 42 links durch ein Histogramm dargestellt, das die gefahrenen Kilometer für jedes Fahrzeug und jede Strassenklasse zeigt: Autobahn (blau), Hauptstrassen (rot) und Nebenstrassen (gelb). Die Fahrzeuge sind nach Kategorien gruppiert.

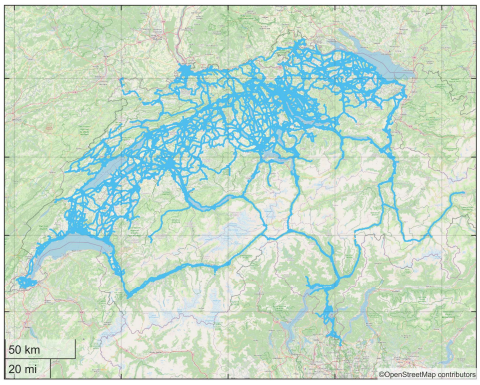


Abb. 41 *Karte der gefahrenen Streckenabschnitte.*

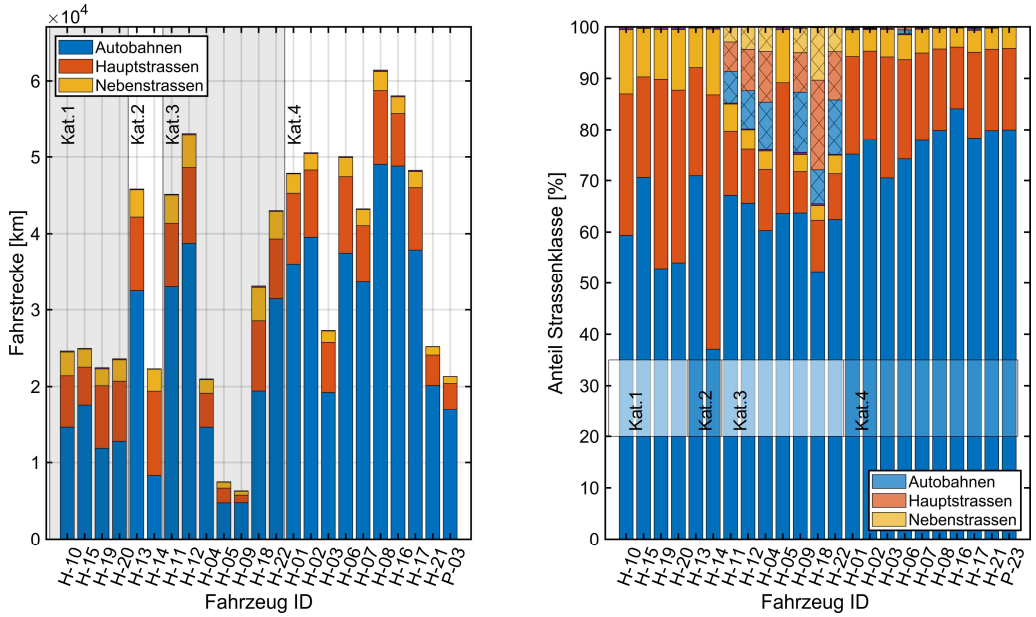


Abb. 42 *Gefahrene Gesamtdistanz pro Fahrzeug auf jeder Strassenklasse (links), in Prozent pro Strassenklasse (rechts).*

Abb. 42 rechts zeigt die prozentualen Anteile der Strassenklassen. Der überwiegende Teil der Fahrstrecke wurde auf Autobahnen zurückgelegt, was der Zielsetzung des Projektes entgegenkommt. Der Anteil der Autobahnen/Autostrassen an der gesamten Fahrstrecke beträgt 72%, der der Hauptstrassen 21% und der der Nebenstrassen 7%. Die schweren Fahrzeuge der Kategorie 4 (Sattelzug) haben im Mittel mit ca. 75% den grössten Autobahnanteil. Bei den Fahrzeugen mit kleiner Nutzlast verringert sich der Anteil der auf Autobahnen zurückgelegten Fahrstrecke. So sinkt z. B. bei Fahrzeugen der Kategorie 1 der Anteil auf Autobahnen auf 59 %. Innerhalb der gleichen Fahrzeugkategorie weichen die Anteile nicht stark voneinander ab. Einzig die beiden Fahrzeuge der Kategorie 2 zeigen stark unterschiedliche Anteile. Für die Kategorie 3 (Anhängerzüge) bezeichnet die Rasterung den Anteil der ohne Anhänger zurückgelegten Fahrstrecke. Rund 80% der erfassten Fahrstrecken wurden mit Anhänger zurückgelegt.

Tab. 12 fasst die Fahrleistung nach Fahrzeugkategorien und Strassenklasse zusammen. Aus der Tabelle geht hervor, dass die Fahrzeugkategorien 3 und 4 mit 209.168 km (26%) und 433.282 km (54%) den höchsten Prozentsatz der Gesamtstrecke ausmachen. Ebenso war es eine Priorität, Informationen über die schwersten Fahrzeugkategorien zu sammeln, da diese in erster Linie die Grösse der Bremskräfte bestimmen.

***Tab. 12** Zusammenfassung der Fahrstrecke pro Fahrzeugkategorie und Strassenklasse in Kilometer.*

Fahrzeug-kategorie	Strassenklasse						Fahrstrecke pro Fahrzeug [A]
	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Gesamt	[%]	
1	56'765	27'956	10'412	514	95'647	12	23'912
2	40'766	20'796	6'418	173	68'153	8	34'076
3	146'735	42'667	19'012	754	209'168	26	29'881
Mit Anhänger					162'850		
Ohne Anhänger					46'318		
4	338'687	74'141	1'9420	1'034	433'282	54	43'328
Gesamt	582'953	165'560	55'262	2'475	806'248		35'054
[%]	72%	21%	7%	<0.5%			

[A] Mittelwert

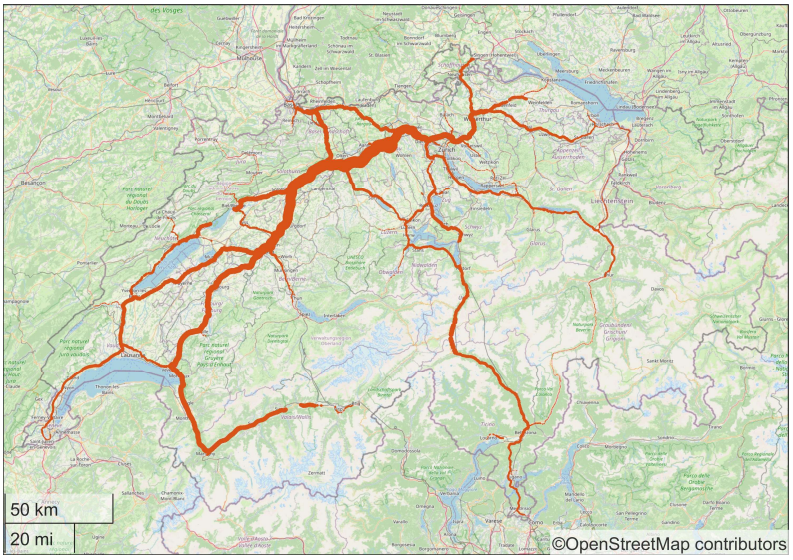


***Abb. 43** Häufigkeit der Befahrung des Autobahnnetzes.*

Das Autobahnnetz wurde von den Fahrzeugen selbstverständlich unterschiedlich stark befahren. Abb. 43 gibt einen Überblick über die Häufigkeit, mit der einzelne Abschnitte des

Autobahnnetzes befahren wurden. Dargestellt sind die Anzahl Durchfahrten über ein Strassensegment als Linienstärke. Sehr stark befahren wurde die A1 zwischen Lenzburg und Bern. Da die Fahrzeuge ihre Basis in Villmergen (AG) haben, stellt die Autobahneinfahrt bei Lenzburg der Zugang zum Autobahnnetz dar. Stark befahren wurde auch die A1 zwischen Lenzburg und Winterthur, die A12 und die A9 zwischen Vevey und Sion. Die A2 wurde, ausgenommen die Teilstrecke zwischen Härkingen und Basel, weniger stark befahren.

Tab. 13 stellt die gefahrenen Distanzen und die gemittelte Anzahl Durchfahrten (Fahrfrequenz) der bezeichneten Autobahnabschnitte quantitativ dar. Der Durchschnittswert wird berechnet aus der gefahrenen Distanz geteilt durch die Streckenlänge und gibt an, wie oft die Streckenlänge zurückgelegt wurde. Die Anzahl der maximalen Durchfahrten gibt an, wie oft das Streckensegment mit der grössten Anzahl Durchfahrten befahren wurde. Im Mittel wurde das schweizerische Autobahnnetz (Anschlüsse ausgenommen) ca. 153-mal vollständig durchfahren.

***Tab. 13** Gefahrene Distanzen und Durchfahrten.*

Name	Streckenlänge	Gefahrene Distanz	Anzahl Durchfahrten Mittelwert	Anzahl Durchfahrten Maximum
	[km]	[km]	[km]	[km]
A1	834.1	307137.4	368.2	1656.0
A2	555.6	68531.2	123.3	1370.0
A3	370.1	49720.3	134.4	801.0
A4	323.1	48670.7	150.6	1655.4
A5	178.2	21175.3	118.8	769.0
A6	151.8	16873.2	111.2	1375.7
A7	68.0	4539.2	66.8	145.0
A8	123.1	24892.0	202.2	1655.0
A9	347.5	64261.6	185.0	1408.0
A11	8.7	189.4	21.9	41.0
A12	154.1	53887.6	349.7	535.0
A13	463.5	38917.9	84.0	1200.0
A14	51.7	2544.4	49.3	85.0
A15	72.9	2645.7	36.3	1099.5
A16	166.9	7582.1	45.4	835.0
A17	2.5	153.1	62.0	299.0
A18	24.3	1544.6	63.4	169.0
A20	43.2	4095.7	94.8	1055.0
A21	9.8	1353.8	138.2	261.0
A22	23.0	1305.7	56.7	787.0
A23	21.5	3415.7	158.6	1389.0
A24	3.4	63.9	19.0	25.0
A50	6.8	0.0	0.0	0.0
A51	19.6	174.9	8.9	17.0
Alle	3611	554'377	153.5	1656.0

Ein Vergleich von Abb. 43 mit Abb. 44, welche die Güterströme des Jahres 2015 graphisch darstellt, zeigt, dass die Anzahl Durchfahrten qualitativ recht gut mit den Güterströmen übereinstimmen. Auch bei den Güterströmen dominiert die A 1, die A2 südlich von Härkingen ist schwächer als die A1. Abweichungen zwischen Güterströmen und Durchfahrten treten auch auf, da verschiedene Grössen verglichen werden. Insgesamt kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Daten aus der Monitoring-Kampagne den Schwerverkehr auf dem Schweizer Nationalstrassennetzes gut repräsentieren.

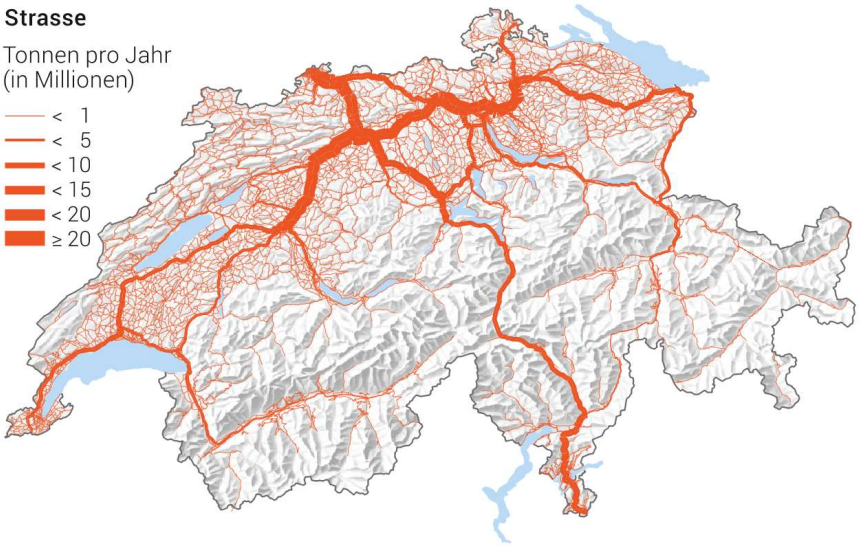


Abb. 44 *Verkehrsströme des Güterverkehrs 2015, Quellen BFS – GEOSTAT; ARE – Verkehrsmodellierung (VM –UVEK), INFOPLAN, © BSF 2017.*

Für die weitere Analyse ist es wichtig, die für das Projekt relevanteste Strassenklasse 1 (Autobahnnetz) feiner in sogenannte Unterabschnitte zu unterteilen. Basierend auf die Kategorisierung der OSM-Datenbank wurde sie in Autobahnen (*motorway*) und Autostrassen (*trunk*) mit ihren jeweiligen Anschlüssen (*motorway_link* und *trunk_link*) unterteilt. Im Folgenden werden unter Autobahn oder Autostrasse jene Abschnitte bezeichnet, die nicht Anschlüsse sind. Das heisst, eine Autobahn besteht aus den längeren Abschnitten zwischen Ein- und Ausfahrten ("freie Strecke") und den kurzen Abschnitten im Bereich von Ein- und Ausfahrten bei einem Autobahnkreuz.

Anschlüsse bestehen aus Ein- und Ausfahrten und Verbindungen. Unter Verbindungen werden jene Anschlüsse bezeichnet, die einen direkten Anschluss zwischen Autobahnen/Autostrassen erlauben. Diese feine Unterteilung ist geboten, da erwartet wird, dass sich die Bremsraten zwischen den verschiedenen Unterabschnitten unterscheiden. Während Autobahnen in der Regel grosse Kurvenradien aufweisen und mit konstanter Geschwindigkeit befahren werden, erhöhen die deutlich engeren Kurvenradien und die Geschwindigkeitsregulierung bei Anschlüssen die Wahrscheinlichkeit von Bremsereignissen (Abb. 29). Die Feinaufteilung der Anschlüsse konnte nicht direkt aus den Werten der Schlüsselwörter der OSM-Daten ermittelt werden und mussten eigens berechnet werden, indem aus den Endknoten des Autobahnnetzes die Ein- und Ausfahrten ermittelt wurden. Der verbleibende Anteil der Anschlüsse wurde als Verbindung eingestuft.

4.1.2 Bremsereignisse

Von den gemessenen Bremsereignissen wiesen 53'449 einen Spitzenwert des Verzögerungsprofils auf, der mindestens 2 ms^{-2} betrug. In der Klasse 1 wurden insgesamt 5699 Ereignisse registriert. Der grösste gemessene Spitzenwert betrug 6.52 ms^{-2}. In der Klasse 2 wurden 29’381 Ereignisse registriert. Die maximale gemessene Verzögerung betrug 8.08 ms^{-2}. In der Klasse 3 wurden 17’618 Ereignisse registriert. Die maximale Verzögerung lag bei 6.38 ms^{-2}.

In Tab. 14 wurden die Verzögerungen nach Strassen- und Fahrzeugkategorie sortiert. Die Gesamtzahl der Ereignisse auf Autobahnen beträgt 1'864. Die meisten Ereignisse betreffen Fahrzeuge der Kategorie 4 mit 1'153 Ereignissen, gefolgt von Kategorie 3 mit 389 Ereignissen. Fahrzeuge der Kategorien 1 und 2 verzeichnen 233 bzw. 89 Ereignisse. Die Autobahnanschlüsse weisen mit insgesamt 2'971 Ereignissen die höchste Anzahl der vier Strassenkategorien auf. Auch hier dominieren Fahrzeuge der Kategorie 4 mit 1'483 Ereignissen, gefolgt von Kategorie 3 mit 807 Ereignissen. Die Kategorien 1 und 2 weisen 527 bzw. 154 Ereignisse auf. Autostrassen und deren Anschlüsse weisen etwa die gleiche Anzahl Ereignisse auf. Die Tabelle zeigt, dass die meisten Bremsereignisse auf den

Anschlüssen und bei Fahrzeugen der Kategorie 4 auftreten. Betrachtet man die prozentualen Anteile der Ereignisse pro Fahrzeugkategorie, so zeigt sich, dass sie den prozentualen Anteilen der gefahrenen Strecke ähneln, was auf eine Korrelation zwischen der gefahrenen Strecke und der Anzahl der Bremsereignissen hinweist.

Tab. 14 *Erfasste Bremsereignisse pro Strassen- und Fahrzeugkategorie.*

Strassenkategorie	Fahrzeugkategorie	Anzahl [--]	Relative Anzahl [%]
Autobahn		1'864	
	Motorwagen	233	4.8
	Cityliner	89	20.9
	Anhängerzug	389	61.9
	Sattelzug	1'153	12.5
Autobahnanschlüsse		2'971	
	Motorwagen	527	17.7
	Cityliner	154	8.3
	Anhängerzug	807	43.3
	Sattelzug	1'483	79.6
Autostrasse		459	
	Motorwagen	107	23.3
	Cityliner	41	8.9
	Anhängerzug	137	29.8
	Sattelzug	174	37.9
Autostrassenanschlüsse		404	
	Motorwagen	112	27.7
	Cityliner	29	7.2
	Anhängerzug	94	23.3
	Sattelzug	169	41.8

Um im Autobahnnetz die Bremsereignisse darzustellen, wurde über die Schweiz ein Kreuzgitter mit einer Seitenlänge von einem km gelegt und die Ereignisse innerhalb jeder Gitterfläche gezählt. Abb. 45 zeigt das Ergebnis. Eine grosse Anzahl Ereignisse tritt hauptsächlich auf der Autobahn A1 zwischen Zürich und Bern auf, wo in mehreren Gitterflächen etwa 30 Ereignisse aufgezeichnet wurden. Vergleicht man die Karte mit den Bremsereignissen (Abb. 45) mit der Karte der Befahrung auf dem Schweizer Autobahnnetz (Abb. 43), so erkennt man, dass die meisten Bremsereignissen auf den am stärksten befahrenen Strecken der A1 stattfinden.

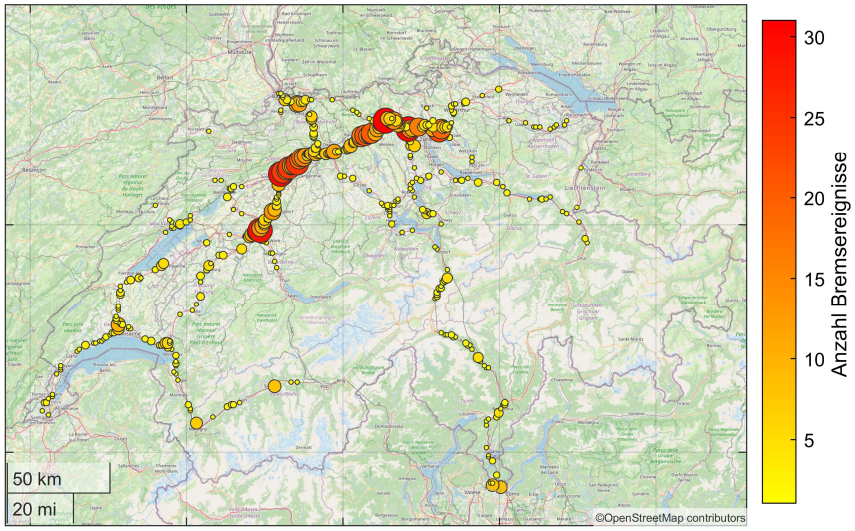


Abb. 45 *Anzahl Bremsereignisse auf dem Autobahnnetz (1-km Gitter).*

4.2 Verzögerungsprofile

4.2.1 Kennwerte der Verzögerungsprofile

Abb. 46 zeigt die Häufigkeitsdichteverteilungen verschiedener Kennwerte der Verzögerungsprofile. Wie bereits erwähnt, ist der Spitzenwert der Verzögerung (a_{max}) nicht der einzige relevante Kennwert. Weitere wichtige Kennwerte sind der Plateauwert (a_{avg}), die Dauer (T), die Startgeschwindigkeit (v_{start}), die Geschwindigkeitsänderung (Δv) sowie der Ruck bei Bremsbeginn (j_{start}) und Bremsende (j_{end}). In den Diagrammen sind jeweils der Mode (häufigster Wert), der Mittelwert und die 99% Quantile festgehalten.

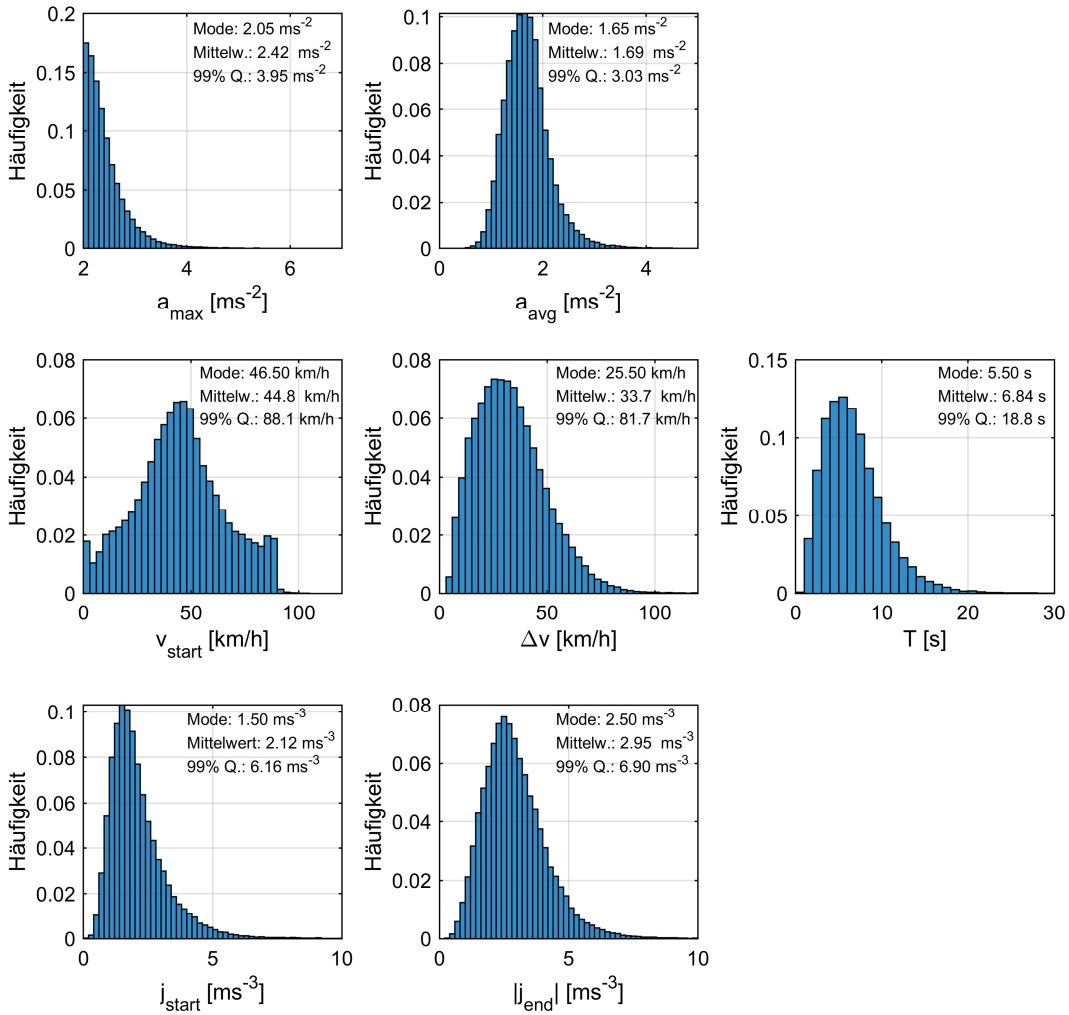


***Abb. 46** Häufigkeit der Kennwerte der Verzögerungsprofile (alle Strassenkategorien)*

Für den Spitzenwert der Verzögerung ist nur der Teil der Verteilung vorhanden, der den Schwellenwert von 2 ms^{-2} überschreitet. Diese Einschränkung gilt für den Plateauwert nicht, da der Plateauwert allgemein kleiner als der Schwellenwert ist. Das Maximum der Häufigkeitsdichte (Mode) ist auch kleiner als 2 m/s^{-2}. Aus den Verteilungen ist auch zu erkennen, dass Ereignisse mit einem Spitzenwert über 5 m/s^{-2} und einem Plateauwert über 4 m/s^{-2} sehr selten auftreten. Die häufigste Dauer der Bremsereignisse beträgt etwa 5.5 s. 16 % der Bremsereignisse weisen eine Dauer von mehr als 10 Sekunden auf. Die Geschwindigkeit zu Beginn des Bremsereignisses hat die grösste Häufigkeit bei 40-50 km/h. Sie weist zwei weitere, deutlich kleinere lokale Maxima auf: eines bei ca. 0-10 km/h und eines bei ca. 85 km/h. Dies weist auf Bremsereignisse bei unterschiedlichen Verkehrsszenarien wie Hauptstrassenverkehr (mittlere Geschwindigkeiten), Autobahnverkehr (höhere Geschwindigkeiten) und Manöver (niedrigere Geschwindigkeiten) hin. Der abrupte Abfall der Häufigkeit bei ca. 90 km/h ist darauf

zurückzuführen, dass die Fahrzeuge kaum mit Geschwindigkeiten unterwegs waren, die 90 km/h überschritten. Die Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen zeigt, dass die häufigste Änderung bei ca. 30 km/h auftritt. Die Verteilungen der beiden Rucke zeigen, dass der Ruck am Ende des Bremsereignisses tendenziell höhere Werte annimmt als der Ruck zu Beginn (wenn die Bremsen betätigt werden).

In Abb. 47 sind die Korrelationen zwischen den Kennwerten dargestellt. Die Korrelationen der Kennwerte sind, mit einer Ausnahme, im Allgemeinen schwach oder nicht vorhanden:

– Eine deutliche Korrelation besteht zwischen der Geschwindigkeitsänderung und der Dauer des Bremsereignisses. Längere Verzögerungen führen zu höheren Geschwindigkeitsänderungen.

– Es besteht eine schwache positive Korrelation zwischen dem Spitzenwert und dem Plateau der Verzögerung. Höhere Spitzenwerte gehen tendenziell mit höheren Plateauwerten einher.

– Eine schwache Korrelation besteht zwischen Spitzenwert und Anfangsruck, wobei höhere Spitzenwerte häufig mit höheren Anfangsrucken einhergehen. Ebenso gehen höhere Plateauwerte häufig mit höheren Anfangsrucken einher.

– Es besteht eine schwache negative Korrelation zwischen dem Plateauwert und der Dauer. Längere Verzögerungen korrelieren tendenziell mit niedrigeren Plateauwerten.

– Es besteht keine Korrelation zwischen dem Spitzenwert/Plateauwert der Verzögerung und der Geschwindigkeitsänderung.

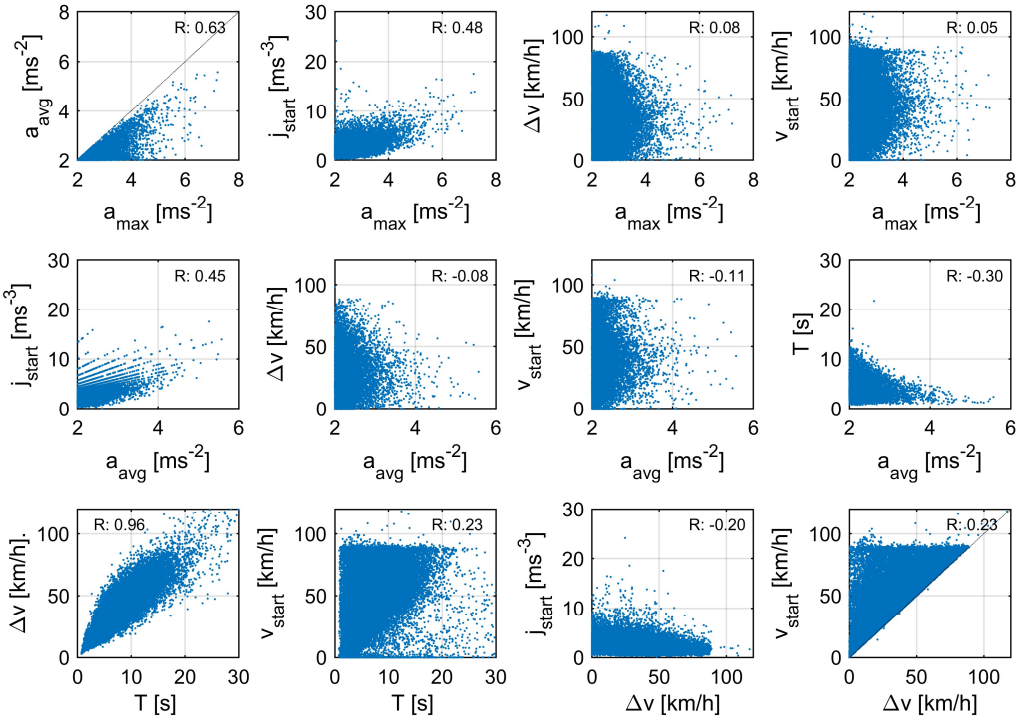


Abb. 47 *Korrelationsdiagramme der wichtigsten Verzögerungskennwerte.*

Die beobachteten Korrelationen sind durch die kinematischen Rahmenbedingungen eines Bremsereignisses nachvollziehbar. Die Dauer eines Bremsereignisses nimmt tendenziell mit der Geschwindigkeitsänderung zu, da die maximale Verzögerung durch das Bremssystem begrenzt ist. Die Dauer eines Bremsereignisses nimmt auch mit abnehmendem Plateauwert zu, da schwache Bremsungen länger dauern. Dass der Plateauwert positiv mit dem Spitzenwert korreliert ist, entspricht ebenfalls der Erwartung, da aus der Definition des Plateauwerts folgt, dass hohe Spitzenwerte den Plateauwert vergrössern. Ein hoher Anfangsruck zeugt von einer kräftigen Einleitung eines

Bremsereignisses, sodass tendenziell höhere Spitzenwerte und Plateauwerte daraus resultieren.
Dass die allermeisten Korrelationen schwach, sind ist darauf zurückzuführen, dass die Bremsereignisse aus verschiedenen Verkehrssituationen und Bedürfnissen heraus entstanden sind. Die fehlende Korrelation zwischen dem Spitzenwert/Plateauwert der Verzögerung und der Geschwindigkeitsänderung verdeutlicht diesen Sachverhalt. Aus den Daten geht ebenfalls hervor, dass harte Vollbremsungen bei grosser Geschwindigkeit äusserst selten sind. Diese Bremsereignisse sind durch hohe Spitzenwerte, Plateauwerte und Anfangsrucke sowie grosse Geschwindigkeitsänderungen charakterisiert. Grosse Anfangsrucke treten jedoch nur bei kleinen bis mittleren Geschwindigkeitsänderungen auf.

Die Wetterdaten, insbesondere die Niederschlagsdaten, wurden zu Beginn des Projektes als weiterer Parameter für die Interpretation der Verzögerungsprofile angesehen, da das Bremsen auf nasser Fahrbahn zu einem tendenziell niedrigeren Plateauwert der Bremsverzögerung führt. Im Laufe des Projekts wurde jedoch festgestellt, dass Szenarien, in denen die Bremskapazität des Systems nicht vollständig ausgenutzt werden kann, einen vernachlässigbaren Einfluss auf das obere Ende der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Bremskräfte. Daher wurde entschieden, die Wetterdaten nicht weiter zu berücksichtigen und sich stattdessen auf die Untersuchung der unterschiedlichen Bremsraten in Abhängigkeit von Strassenabschnitten, Ein- und Ausfahrten und Autobahnverbindungen zu konzentrieren.

4.2.2 Einfluss der Fahrzeugkategorie

Eine wichtige Frage ist, ob die Fahrzeugkategorie oder die Strassenklasse die Kennwerte der Verzögerungsprofile beeinflussen. In diesem Unterkapitel wird der Einfluss der Fahrzeugkategorie untersucht. In Abb. 48 sind daher die Verteilungen der Kennwerte für die vier verschiedenen Fahrzeugkategorien sowie die Verteilung für alle Fahrzeuge („Alle“) dargestellt. Die Abbildung zeigt keine signifikanten Unterschiede der Kennwerte zwischen den Fahrzeugten. Bei der Geschwindigkeitsänderung ist für die Kategorie 1 eine leichte Verschiebung der Verteilung zu höheren Werten zu erkennen, wie sie auch in der Abbildung der Geschwindigkeitsverteilung zu Beginn der Bremsung zu sehen ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese Fahrzeuge (Motorwagen) häufiger auf Haupt- und Nebenstrassen unterwegs sind als die Fahrzeuge der anderen Fahrzeugkategorien. Betrachtet man die Anfangsgeschwindigkeit der Kategorie 4 (Sattelzüge), die zu mehr als 70 % auf Autobahnen unterwegs ist, so sind höhere Geschwindigkeiten um 80 km/h zu erkennen. Auch die Dauerkurve ist für die Kategorie 4 etwas nach grösseren Werten hin verschoben. Beim Ruck ist zu erkennen, dass der Kategorie 1 in der Nähe des Maximums der Verteilung etwas niedrigere Werte aufweist und die Verteilung leicht nach rechts verschoben ist.

Da rund 90% der analysierten Bremsereignisse auf den Strassenklassen 2 und 3 stattfanden, dominieren diese die Verteilung der Kennwerte. Abb. 49 zeigt die Verteilungen der Kennwerte beschränkt auf die Bremsereignisse auf dem Autobahnnetz. Aufgrund der kleineren Anzahl Bremsvorgängen sind die Verteilungen für einige der dargestellten Kennwerte weniger glatt. Die unruhigsten Verteilungen stammen von der Kategorie 2, die die kleinste Anzahl Bremsereignisse aufweist. Aus der Abbildung geht hervor, dass es ebenfalls keine signifikanten Unterschiede im Bremsverhalten zwischen den Fahrzeugkategorien gibt. Daraus kann geschlossen werden, dass die Unterschiede im Bremsverhalten nicht durch die Fahrzeugkategorien beeinflusst werden. Dieses Ergebnis gilt für alle Strassen und insbesondere auch für Autobahnen.

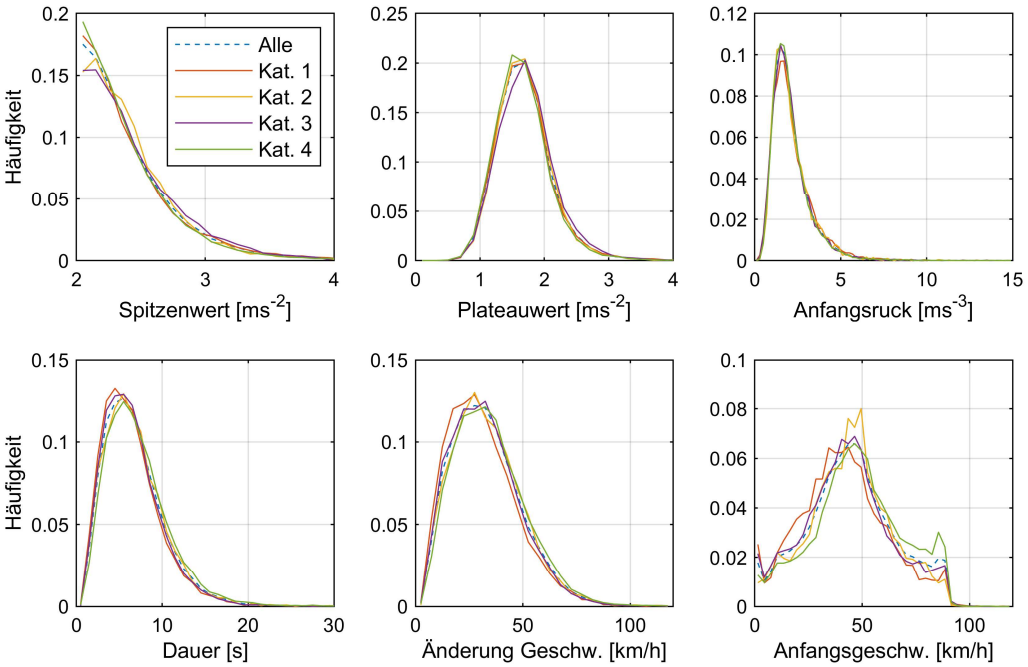


***Abb. 48** Einfluss der Fahrzeugkategorie auf die Verteilung der Verzögerungskennwerte.*

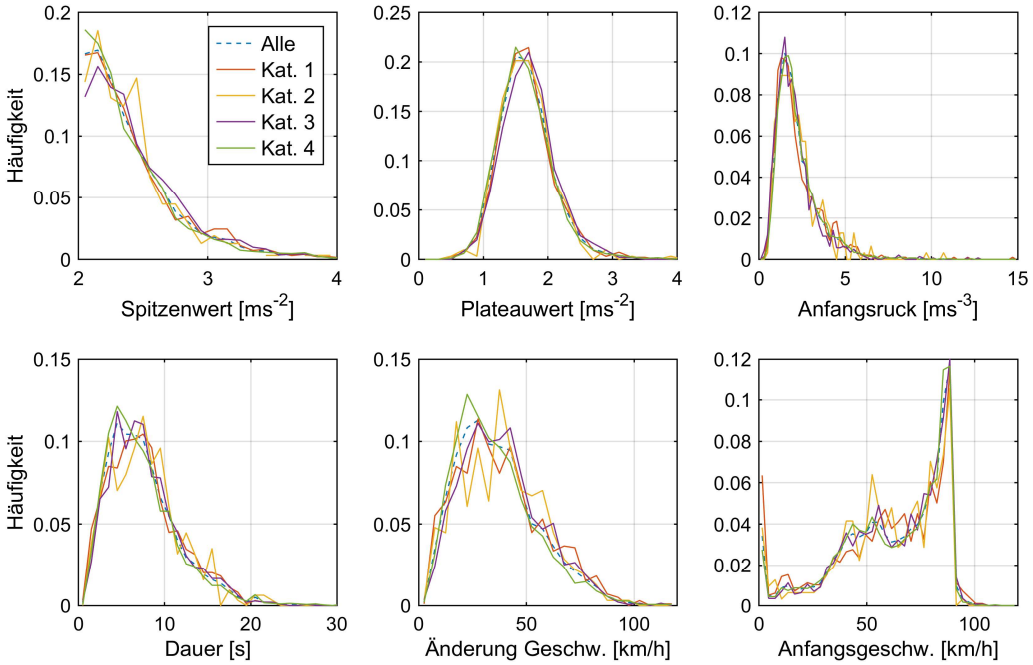


***Abb. 49** Einfluss der Fahrzeugkategorie auf die Verzögerungskennwerte der Strassenklasse 1 (Autobahnnetz).*

4.2.3 Einfluss der Strassenklasse

Der Einfluss der Strassenklassen auf die Verzögerungskennwerte ist in Abb. 50 aufgezeigt. Beim Spitzenwert, Plateauwert und Anfangsruck sind die Unterschiede klein. Deutliche Unterschiede treten hingegen bei der Geschwindigkeitsänderung, der Anfangsgeschwindigkeit und der Dauer eines Bremsereignisses auf.

Mit absteigende Klassennummer verschiebt sich die Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeitsänderungen in Richtung grösserer Werte. Die Klassen 3 und 2 haben qualitativ ähnliche Verteilungen mit dem Median bei einer Geschwindigkeitsänderung von 22 km/h bzw. 32 km/h. Ab dieser Geschwindigkeitsänderung treten Ereignisse der Klasse 2 häufiger auf als jene der Klasse 3. Auf Strassen der Klasse 1 (Autobahnen) kann man

hingegen erst ab einer Geschwindigkeitsänderung von 65 km/h eine grössere Häufigkeit im Vergleich zur Klasse 2 feststellen.

Bei der Anfangsgeschwindigkeit ist zwischen den Klassen 3 und 2 eine analoge Verschiebung der Verteilungen zu grösseren Werten zu erkennen. Die häufigsten Ereignisse treten bei einer Anfangsgeschwindigkeit von 35 km/h bzw. 50 km/h auf. Die Klasse 1 hat hingegen eine qualitativ andere Verteilung als die Klassen 2 und 3. Ereignisse mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 89 km/h sind in der Klasse 1 am häufigsten. Ein lokales Maximum der Verteilung ist auch bei 55 km/h zu erkennen.

Die Dauer eines Bremsereignisses hat qualitativ ähnliche Verteilungen wie die Geschwindigkeitsänderung. Ereignisse in der Klasse 3 dauern tendenziell weniger lang als in den Klassen 2 und 3. Ereignisse mit einer Dauer von über 12 s treten am häufigsten auf Autobahnen auf.

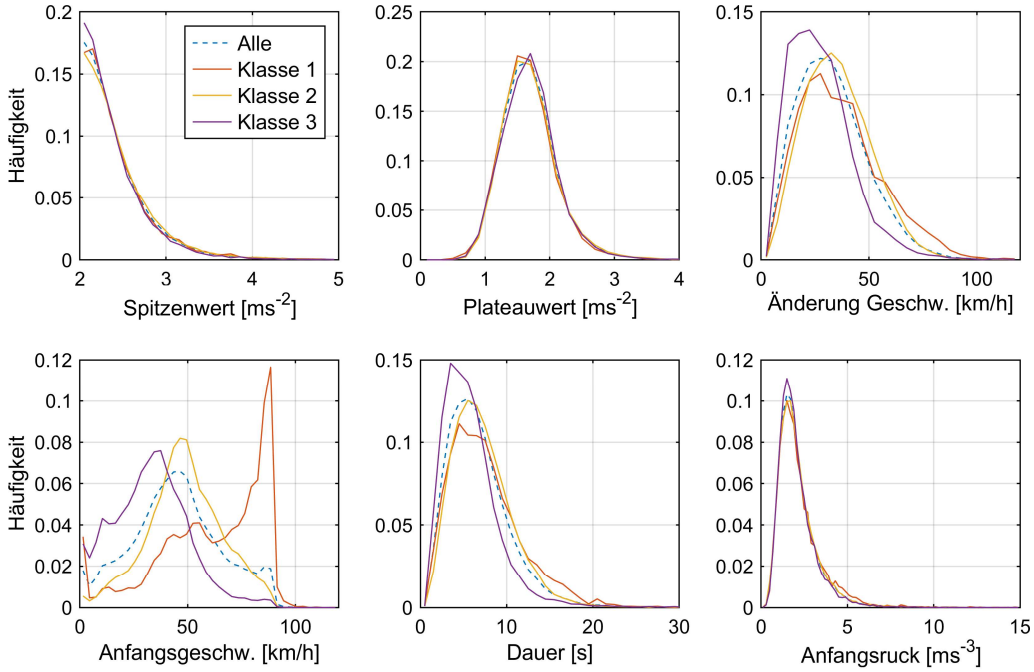


***Abb. 50** Einfluss der Strassenklasse auf die Verzögerungskennwerte.*

Das beobachtete Muster dürfte damit zusammenhängen, dass auf Strassen mit höherer Geschwindigkeitsbeschränkung auch häufiger höhere Anfangsgeschwindigkeiten und Geschwindigkeitsänderungen auftreten. Dass in der Klasse 1 ein Drittel der Ereignisse eine Anfangsgeschwindigkeit von mindestens 79 km/h aufweisen, weist darauf hin, dass diese bei voller Fahrt stattfanden. In den Klasse 2 und 3 sind Ereignisse bei voller Fahrt deutlich seltener: 4% in der Klasse 2 (ab 80 km/h) und 14% in der Klasse 3 (ab 50 km/h). Die höhere Quote in der Klasse 3 dürften von den Nebenstrassen ausserorts stammen, die eine Geschwindigkeitsbeschränkung von 60 oder 80 km/h aufweisen.

Dass die Verteilungen des Spitzenwerts, des Plateauwerts und des Anfangsrucks sich nur wenig voneinander unterscheiden ist schwieriger zu interpretieren. Eine naheliegende Interpretation ist, dass in den weitaus meisten Fällen die Bremsereignisse noch unter kontrollierten Bedingungen stattfanden, sodass das Bremsverhalten der Fahrer ausschlaggebend war.

4.2.4 Einfluss der Unterabschnitte des Autobahnnetzes

Das Autobahnnetz wurde wie bereits erwähnt in Autobahn, Autobahnanschluss, Autostrasse und Autostrassenanschluss unterteilt. Abb. 51 zeigt die Verteilungen der vier Unterabschnitte (Autobahn, Autostrasse, Autobahnanschlüsse, Autostrassenanschlüsse) der Klasse 1. Auch hier sind die Verteilungen des Spitzenwerts, Plateauwerts und Anfangsrucks sehr ähnlich. Beim Anfangsruck sind für Autobahnen jedoch eine deutliche Abweichung in Richtung höherer Werte zu erkennen. Offenbar wird auf Autobahnen etwas heftiger gebremst als auf den anderen Unterabschnitten.

Autobahnen unterscheiden sich auch bei der Geschwindigkeitsänderung und der Dauer deutlich von den anderen Unterabschnitten. Die Geschwindigkeitsänderungen sind kleiner und die Dauer ist kürzer. Offenbar dominieren auf Autobahnen Geschwindigkeitskorrekturen, die durch den Verkehrsfluss induziert werden. Bei den Anschlüssen treten häufiger grössere Geschwindigkeitsänderungen auf, da insbesondere bei Ausfahrten z.B. vor engen Kurven oder Einmündungen in eine Hauptverbindungsstrasse grössere Geschwindigkeitsänderungen erforderlich sind. Am häufigsten treten grosse Geschwindigkeitsänderungen jedoch bei Autostrassen auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Autostrassen auch direkt in eine Hauptverbindungsstrasse münden können.

Dass Autobahnen und Autobahnanschlüsse eine ähnliche Verteilung der Anfangsgeschwindigkeit haben, ist gut nachvollziehbar, da z.B. bei Ausfahrten das Abbremsen des Fahrzeugs erst nach dem Verlassen der Autobahn stattfindet. Die Verteilung der Autobahnanschlüsse hat bei 50 km/h ein lokales Maximum, das Autobahnen nicht aufweisen.

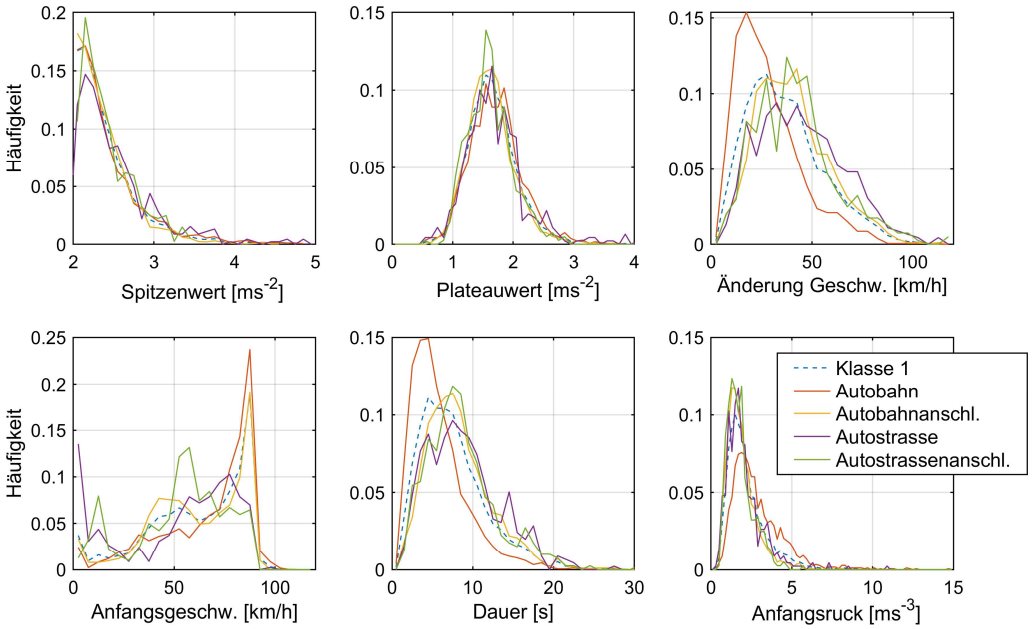


***Abb. 51** Einfluss der Unterabschnitte auf die Verzögerungskennwerte der Strassenklasse 1 (Autobahnnetz).*

4.3 Bremsrate

4.3.1 Berechnung der Bremsrate

In der Literatur wird zur Beschreibung der Häufigkeit eines Bremsereignisses, die Bremsrate verwendet. Diese Rate, symbolisch mit R bezeichnet, beschreibt wie häufig ein Fahrzeug pro zurückgelegte Distanz im Mittel ein Bremsereignis vollführt, bei der das Verzögerungsprofil einen bestimmten Schwellenwert überschreitet. Aus den Versuchsdaten wird R bestimmt durch:

$$R = \frac{n_B}{VDT} \quad (2)$$

Wobei n_B die Anzahl der aufgezeichneten Bremsereignisse und VDT die zurückgelegte Strecke des Fahrzeugs in Meter ist. Die Einheit der Bremsrate R ist daher veh/m.

Die Ereignisdistanz ist der Umkehrwert der Bremsrate (1/R) und besagt, welche Fahrstrecke ein Fahrzeug zurücklegt, damit im Mittel ein Bremsereignis auftritt, bei dem das Verzögerungsprofil einen Schwellenwert überschreitet. In der Regel wird er in km ausgedrückt. In der Folge werden wir den Umkehrwert der Bremsrate als Ereignisdistanz bezeichnen. Er bietet ein anschaulicheres Mass der Häufigkeit von Bremsereignissen als die Bremsrate.

4.3.2 Bremsrate nach Strassenklassen

In Tab. 15 sind die Ergebnisse der Bremsrate und die Ereignisdistanz für die einzelnen Strassenklassen zusammengestellt. Drei verschiedene Schwellenwerte (2, 3 und 4 ms^{-2}) sind aufgeführt, um den signifikanten Einfluss des Schwellenwertes auf die Bremsrate zu dokumentieren. Die Bremsrate für die Strassenklasse 1 ist deutlich niedriger als für die Klassen 2 und 3, was darauf hinweist, dass Bremsvorgänge auf dem Autobahnnetz deutlich seltener auftreten als auf Haupt- und Nebenstrassen. Die Bremsraten für die Strassenklassen 2 und 3 unterscheiden sich nur geringfügig.

***Tab. 15** Bremsrate nach Strassenklasse.*

Strassenklasse	**Schwellenwert**					
	2 ms^{-2}		**3 ms^{-2}**		**4 ms^{-2}**	
	1/R [km]	R [1/veh-m]	1/R [km]	R [1/veh-m]	1/R [km]	R [1/veh-m]
Klasse 1	101.4	$9.86 \cdot 10^{-4}$	1165	$8.58 \cdot 10^{-7}$	8097	$1.24 \cdot 10^{-7}$
Klasse 2	6	$1.67 \cdot 10^{-4}$	65	$1.54 \cdot 10^{-5}$	539	$1.86 \cdot 10^{-6}$
Klasse 3	3	$3.33 \cdot 10^{-4}$	48	$2.08 \cdot 10^{-5}$	476	$2.10 \cdot 10^{-6}$

Abb. 52 zeigt die Änderung der Bremsrate bei unterschiedlichen Schwellenwerten. Die verschiedenen Kurven, die auf einer semilogarithmischen Skala dargestellt sind, zeigen einen linearen Trend (exponentielle Abnahme) mit steigenden Schwellenwerten. Diese Kurven bleiben bis zu Schwellenwerten von etwa 4 ms^{-2} annähernd parallel. Bei höheren Schwellenwerten nimmt die exponentielle Abnahme auf dem Autobahnnetz ab, sodass ihre Kurve sich etwas an die Kurven der beiden anderen Strassenklassen annähert.

Die aus der Literatur entnommenen Bremsraten und die im Vorgängerprojekt AGB 2011/003 berechnete Bremsrate für das Autobahnnetz sind zum Vergleich in Abb. 52 ebenfalls enthalten. In den Studien, in denen eine Strassenhierarchie eingeführt wurde, wird die Bremsrate für das Autobahnnetz durch ausgefüllte Markierungen dargestellt. Bei einem Schwellenwert von 3 ms^{-2} beträgt die Bremsrate auf Autobahnen der UDRIVE-Studie etwa ein Viertel der in diesem Projekt berechneten Bremsrate. Im Gegensatz dazu übertrifft die in der AOS-Studie ermittelte Bremsrate (bei einem Schwellenwert von 4 ms^{-2}, ebenfalls gefülltes Symbol) die in diesem Projekt ermittelte Bremsrate um den Faktor 7. Die Bremsrate der AOS-Studie entspricht dabei etwa derjenigen, die in diesem Projekt für alle Strassen zusammen festgestellt wurde.

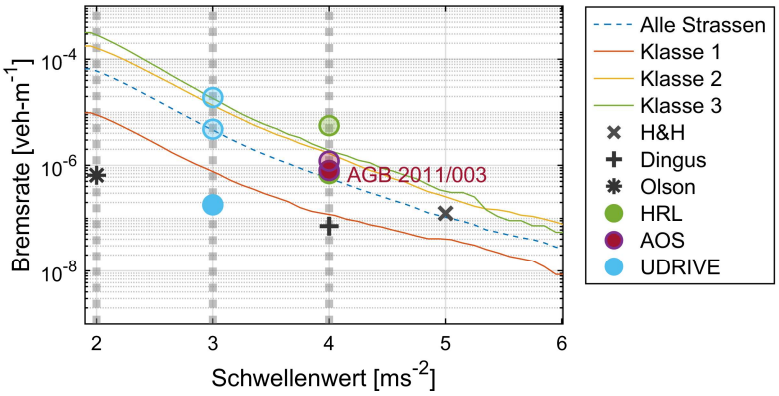


***Abb. 52** Bremsrate in Funktion des Schwellenwert.*

Abb. 53 zeigt den Verlauf der Bremsrate in Funktion des Schwellenwert für verschiedene Fahrzeugkategorien. Das linke Diagramm berücksichtigt alle Strassen und die rechte nur die Strassenklasse 1. Die Grafiken zeigen, dass die Fahrzeugkategorie einen Einfluss auf die Bremsrate aufweist. Alle Kurven verlaufen über einen weiten Bereich parallel zueinander. Die Bandbreite der Abweichungen bleibt bis zu einem Schwellenwert von 4 ms^{-2} im Wesentlichen konstant. Die Kategorie 1 (Motorwagen) weist die höchste Bremsrate auf, gefolgt von der Kategorie 3 (Anhängerzüge). Ab einem Schwellenwert von 4 ms^{-2} weicht die Kategorie 1 vom generellen Trend ab. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass aufgrund der deutlich kleineren zurückgelegten Distanz dieser Kategorie im Vergleich zu die Kategorien 3 und 4 zu wenige starke Bremsereignisse erfasst wurden. Dies gilt sehr deutlich auch für die Kategorie 2 (Cityliner), der ab einem Schwellenwert von 5 ms^{-2} eine nahezu konstante Bremsrate aufweist.

In der rechten Abbildung ist zu erkennen, dass auch für Autobahnnetz die Kategorie 1 die höchste Bremsrate aufweist. Die abrupte Abweichung vom generellen Trend kurz vor dem Schwellenwert 5 ms^{-2} bestätigt die Vermutung, dass zu wenige starke Bremsereignisse erfasst wurden. Darüber hinaus erkennt man, dass die Kurven für die Kategorien 3 und 4 fast gleich und nahezu identisch mit der Kurve aller Fahrzeuge sind. Da diese beiden Kategorien rund 80% der gesamten Fahrstrecke auf dem Autobahnnetz zurücklegten, ist diese Übereinstimmung gut nachvollziehbar. Der gut erkennbare Unterschied zwischen den Kategorien 3 und 4 in der linken Abbildung, wenn alle Strassenklassen berücksichtigt werden, weist darauf hin, dass die Bremsrate vor allem auf den Strassenklassen 2 und 3 deutlich voneinander abweichen.

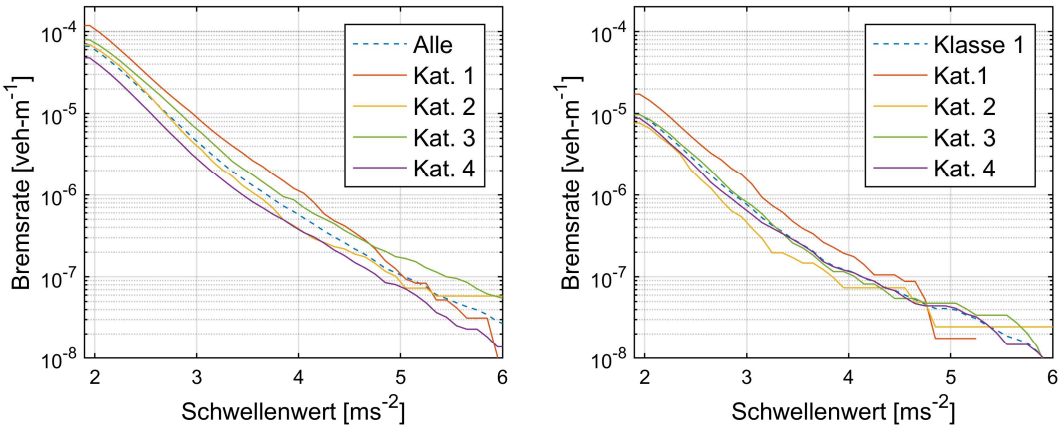


***Abb. 53** Einfluss der Fahrzeugkategorien auf die Bremsrate: Alle Strassenklassen (links), Strassenklasse 1 (rechts).*

4.3.3 Bremsraten auf dem Autobahnnetz

In der Strassenklasse 1 (Autobahnnetz) werden die Bremsraten genauer untersucht. Bereits die Anzahl der Bremsereignisse in Tab. 14 deutet auf bedeutende Unterschiede zwischen den einzelnen Unterabschnitte des Autobahnnetzes. Dieses besteht aus Autobahnen und Autostrassen sowie Anschlüssen, die sich weiter in Autobahn- und Autostrassenanschlüsse unterteilen. Tab. 16 fasst die Bremsraten für verschiedene Unterabschnitte zusammen.

***Tab. 16** Bremsrate für Unterabschnitte des Autobahnnetzes.*

	Schwellenwert 2 ms^{-2}			**Schwellenwert 3 ms^{-2}**		
	Ereignisse	1/R	R	Ereignisse	1/R	R
		[km]	[veh m^{-1}]		[km]	[veh m^{-1}]
Autobahnnetz	5691	101.4	$9.86 \cdot 10^{-6}$	495	1165	$8.58 \cdot 10^{-7}$
Autobahn	1859	286.6	$3.49 \cdot 10^{-6}$	208	2562	$3.90 \cdot 10^{-7}$
Autostrasse	458	47.0	$2.13 \cdot 10^{-5}$	63	341.4	$2.93 \cdot 10^{-6}$
Anschlüsse	3374	6.7	$1.50 \cdot 10^{-4}$	224	100.6	$9.94 \cdot 10^{-6}$
Anschlüsse Autobahn	2969	7.3	$1.36 \cdot 110^{-4}$	191	114.1	$8.76 \cdot 10^{-6}$
Anschlüsse Autostrasse	405	1.8	$5.55 \cdot 10^{-4}$	33	22.1	$4.52 \cdot 10^{-5}$

Tab. 16 zeigt, dass die Bremsraten stark voneinander abweichen. Die Diskussion wird auf die Ergebnisse mit einem Schwellenwert von 3 ms^{-2} eingeschränkt, da sie für die Berechnung der Bremskräfte von grösserer Bedeutung sind. Die Autobahn weist die kleinste Bremsrate auf. Ein Bremsereignis tritt im mittel alle 2562 km auf. Auf Autostrassen wird um ca. 7.5-mal öfter gebremst als auf Autobahnen. Die Bremsrate auf Autostrassen ist näher bei den Anschlüssen des Autobahnnetzes und ist sogar etwas grösser als die der Strassenklassen 2 und 3. In Autobahnanschlüssen wird ca. 22-mal öfter gebremst als auf der Autobahn. Eine extrem hohe Bremsrate weisen Autostrassenanschlüsse auf. Diese bemerkenswerten Unterschiede der Bremsrate weisen darauf hin, dass die Bremskräfte vom Standort abhängen.

Die Bremsraten in Funktion des Schwellenwerts für die in Tab. 16 aufgeführten Unterabschnitte des Autobahnnetzes sind in Abb. 54 dargestellt. In der semilogarithmischen Darstellung verläuft die Bremsrate für Autobahnen vorerst nahezu linear (exponentielle Abnahme) um ab 3.5 ms^{-2} etwas abzuflachen. Die Bremsrate für Autostrassen, die aufgrund der kleineren Datenmenge etwas unruhiger verläuft, ist höher und nahezu parallel zu jener für Autobahnen. Bei Autobahnanschlüssen verläuft die Bremsrate etwas steiler als jene für Autobahnen, sodass sie bei hohen Schwellenwerten näher an die Bremsrate der Autobahnen rückt, sodass sie bei 5 ms^{-2} "nur" noch 2.7-mal grösser als jene für Autobahnen ist. Die Bremsrate für Autobahnanschlüsse verläuft zuerst parallel zu jene der Autobahnanschlüsse, um dann ab ca. 3 ms^{-2} sich dieser zu nähern. Ab einem Schwellenwert von 4.1 ms^{-2} bricht die Kurve der Bremsrate ab, da keine Bremsereignisse mit einem grösseren Spitzenwert der Verzögerungsprofile erfasst wurden. Da bereits bei 3.8 ms^{-2} die Bremsrate sprunghaft abfällt, ist dies eine Folge der kleinen Datenbasis (405 Ereignisse). Auch bei den Autobahnanschlüssen fällt bei 4.7 ms^{-2} die Bremsrate sprunghaft ab. Aufgrund der deutlich grösseren Datenbasis (2969 Ereignisse) dürfte der Abfall eher damit zusammenhängen, dass Bremsereignisse mit einem grossen Spitzenwert des Verzögerungsprofils viel seltener sind.

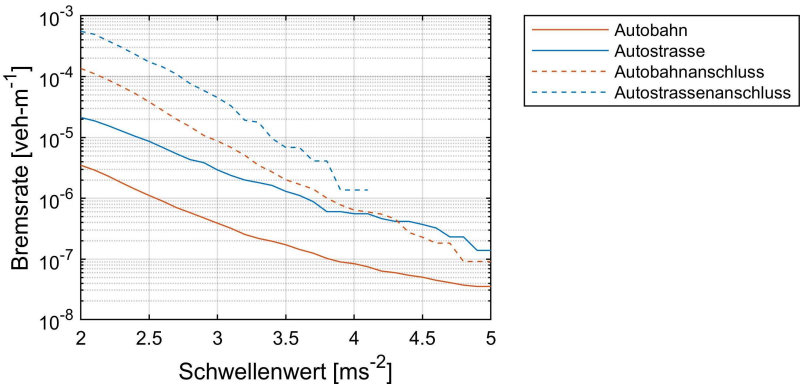


***Abb. 54** Bremsraten für Unterabschnitte des Autobahnnetzes.*

Tab. 17 zeigt die Bremsrate der verschiedenen Anschlüsse. Auch für die Anschlüsse wird deutlich, dass stark abweichende Bremsraten auftreten. Auf der Autobahn weisen die Ausfahrten die höchste Bremsrate auf. Diese ist etwa 3-mal grösser als bei Einfahrten und etwa 6-mal grösser als bei Verbindungen. In Ausfahrten treten daher etwa 54-mal mehr Bremsereignisse auf als auf der Autobahn auf. Die kleinste Bremsrate bei Autobahnanschlüssen weisen die Verbindungen zwischen zwei Autobahnen auf. Autostrassenanschlüsse weisen ein den Autobahnanschlüssen analoges Muster auf. Die Bremsraten sind jedoch deutlich grösser.

Die Bremsraten für Autobahnanschlüsse in Funktion des Schwellenwerts sind in Abb. 55 dargestellt. Die Bremsraten für Einfahrten und Verbindungen sind nahezu gleich über den gesamten Wertebereich des Schwellenwerts. Tiefer startend konvergieren sie mit zunehmendem Schwellenwert zur mittleren Bremsrate für Autobahnanschlüsse. Auch die Bremsrate für Ausfahrten konvergiert, ausgehend von grösseren Bremsraten, mit zunehmendem Schwellenwert zur mittleren Bremsrate für Autobahnanschlüsse. Ab etwa 4.0 ms^{-2} unterscheiden sich die Bremsraten der verschiedenen Autobahnanschlüsse kaum mehr voneinander. Dieses Muster kann man so deuten, dass bei Ausfahrten mehr geplante Bremsereignisse mit kleinem Spitzenwert auftreten, da die Fahrzeuggeschwindigkeit vom Übergang von der Autobahn auf eine regionale Verbindungsstrasse reduziert werden muss. Ungeplante Bremsereignisse mit hohem Spitzenwert hängen weniger vom Strassennetz, sondern mehr von der Verkehrssituation ab, sodass die Unterschiede zwischen den verschiedenen Anschlüssen abnehmen.

***Tab. 17** Bremsrate für Anschlüsse.*

	Schwellenwert 2 ms^{-2}			**Schwellenwert 3 ms^{-2}**		
	Ereignisse	1/R [km]	R [veh m^{-1}]	Ereignisse	1/R [km]	R [veh m^{-1}]
Anschlüsse Autobahn	2969	7.3	$1.36 \cdot 10^{-4}$	191	114.1	$8.76 \cdot 10^{-6}$
Einfahrten	378	17.3	$5.47 \cdot 10^{-5}$	37	177.0	$4.96 \cdot 10^{-6}$
Ausfahrten	2114	3.3	$2.85 \cdot 10^{-4}$	118	58.3	$1.66 \cdot 10^{-5}$
Verbindungen	477	17.5	$3.37 \cdot 10^{-5}$	36	232.4	$2.87 \cdot 10^{-6}$
Anschlüsse Autostrasse	405	1.8	$5.55 \cdot 10^{-4}$	33	22.1	$4.52 \cdot 10^{-5}$
Einfahrten	51	1.7	$5.96 \cdot 10^{-4}$	8	10.7	$9.35 \cdot 10^{-5}$
Ausfahrten	192	0.5	$1.82 \cdot 10^{-3}$	15	7.0	$1.42 \cdot 10^{-4}$
Verbindungen	165	3.3	$3.04 \cdot 10^{-4}$	10	54.3	$1.84 \cdot 10^{-5}$

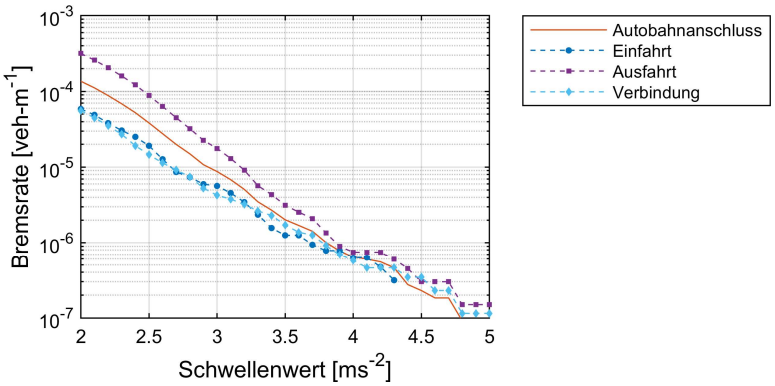


***Abb. 55** Bremsraten für Autobahnanschlüsse.*

Während der Monitoringkampagne traten Bremsereignisse auch auf Brücken auf. Da die OSM-Datenbank auch Informationen beinhaltet, ob ein Strassenabschnitt sich auf einer Brücke oder in einem Tunnel befindet, können die Bremsereignisse auch nach diesen beiden Merkmalen untersucht werden. Tab. 18 listet die Bremsraten auf Brücken auf Autobahnen/Autostrassen und deren Anschlüsse auf. Ein Vergleich dieser Bremsraten mit den Bremsraten der entsprechenden Strassenabschnitte der Tab. 16 und Tab. 17 ist insofern interessant, da man die Voraussetzung überprüfen kann, ob die Bremsraten der Unterabschnitte auch für ihre Brücken gelten. Insgesamt sind die Bremsraten der Brücken etwas grösser als die der jeweiligen Strassenabschnitte. Diese Differenz könnte man so deuten, dass Brücken dort stehen, wo öfter gebremst wird. Sie könnte jedoch auch eine Folge der Unsicherheit infolge der geringen Anzahl Ereignisse sein.

Die Anzahl Bremsereignisse auf einer Strecke lassen sich (im Mittel) als Poisson-Prozess mit konstanter Bremsrate modellieren. Die Poisson-Verteilung beschreibt dann die Wahrscheinlichkeit, mit der eine bestimmte Anzahl Bremsereignisse auftreten. Berechnet man den Mittelwert und die Standardabweichung für die auf der Autobahn auf Brücken zurückgelegte Strecke (33'742 km) mit der Bremsrate der Autobahn, so erhält man 118±11 (Schwellenwert 2 ms^{-2}) bzw. 13±3.6 (Schwellenwert 3 ms^{-2}) Bremsereignisse auf Brücken. Die gemessenen Bremsereignisse auf Brücken entsprechen der 97.0%- bzw. der 82.4%-Quantile, sodass es in beiden Fällen keinen unmittelbaren Grund gibt, anzunehmen, dass auf Brücken häufiger gebremst wird als auf der gesamten Autobahnstrecke.

Für Ausfahrten ergibt die analoge Analyse 124±11 bzw. 7±3 Bremsereignisse. Die Quantile der gemessenen Bremsereignisse ist grösser als 99.9%, sodass die Bremsrate auf Brücken sich eindeutig von der Bremsrate auf Ausfahrten unterscheidet. Dieses Ergebnis gilt auch für Einfahrten, aber nicht für Verbindungen. In Kapitel 4.3.5 wird diese Frage nochmals aufgenommen und weiter untersucht.

***Tab. 18** Bremsrate für Brücken.*

	Schwellenwert 2 ms^{-2}			**Schwellenwert 3 ms^{-2}**		
	Ereignisse	1/R	R	Ereignisse	1/R	R
		[km]	[veh m^{-1}]		[km]	[veh m^{-1}]
Autobahn	138	244.5	4.09·10-6	16	2108	4.74·10-7
Einfahrten	32	9.1	1.10·10-4	2	146.1	6.85·10-6
Ausfahrten	187	2.2	4.63·10-4	20	20.2	4.95·10-5
Verbindungen	9	24.0	1.90·10-5	1	126.1	2.11·10-6
Autostrasse	32	26.7	3.74·10-5	2	427.5	2.34·10-6
Anschlüsse	41	1.9	5.16·10-4	1	79.5	1.26·10-5

Abb. 56 stellt die Bremsraten für Brücken auf Autobahnen und Autobahnanschlüssen in Funktion des Schwellenwerts. Die etwas grössere Bremsrate für Autobahnbrücken im Vergleich zu den Autobahnen ist auf dem gesamten Werteberich des Schwellenwerts vorhanden. Die Divergenz der Bremsraten ab ca. 3.5 ms^{-2} dürfte eher auf den zunehmenden Mangel an Bremsereignissen zurückzuführen sein. Ähnlich unzuverlässig dürften die Bremsraten für Einfahrten und Verbindungen bereits bei kleineren Schwellenwerten sein. Oberhalb eines Schwellenwerts von ca. 3 ms^{-2} sind kaum zuverlässige Aussagen möglich. Brücken auf Ausfahrten haben durchgehend eine deutlich grössere Bremsrate bis zu einem Schwellenwert von ca. 3.5 ms^{-2} als Ausfahrten. Bis zunehmendem Schwellenwert stellt man auch eine gewisse Divergenz fest. Ab einem Schwellenwert von ca. 3.7 ms^{-2} ist keine brauchbare Aussage mehr möglich.

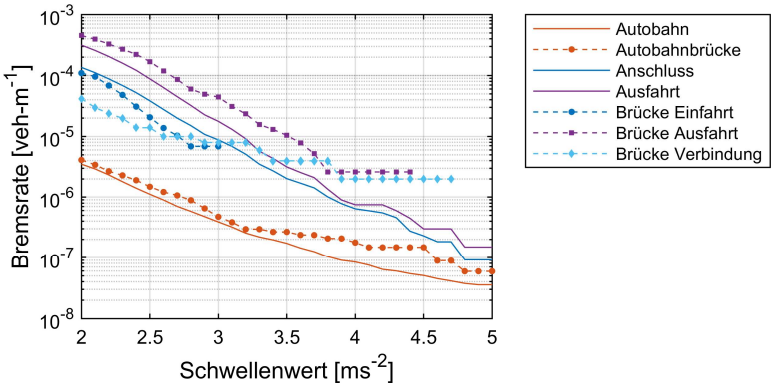


***Abb. 56** Bremsraten für Brücken auf Autobahn und Autobahnanschlüsse.*

4.3.4 Bremsrate der Autobahnen A1 und A2

In den Vorgängerprojekten AGB 2011/003 und AGB 2017/001 wurden Bremskräfte für zwei Standorte, Denges-Morges an der A1 und Monte Ceneri an der A2, berechnet, die den Binnenschwerverkehr (A1) bzw. dem internationalen Schwerverkehr (A2) repräsentierten. Daher werden die Bremsraten für diese beiden Autobahnen genauer untersucht. Abb. 45 zeigt, dass die Anzahl Bremsereignisse sehr ungleichmässig verteilt sind. Diese Unterschiede sind einerseits in den starken örtlichen Unterschieden der Befahrung durch die Versuchsfahrzeuge begründet (Abb. 43). Sie könnten jedoch auch durch unterschiedliche Bremsrate begründet sein. Daher ist es auch von Interesse, spezifische Strassenabschnitte auf diesen beiden Autobahnen zu untersuchen.

Tab. 19 zeigt die Bremsrate der wichtigsten Autobahnen (ohne Berücksichtigung der Bremsereignisse der Anschlüsse). Um den Vergleich nicht zu verfälschen, sind die Abschnitte, die als Autostrassen gekennzeichnet sind, nicht berücksichtigt worden. Die Autobahnen A1 und A2 weisen ähnliche Bremsraten auf. Deutlich grössere Bremsraten haben die A3 und A4. Signifikant kleinere Bremsraten weisen die A9 und A12 auf. Die kleine Bremsrate der A13 ist darauf zurückzuführen, dass der Teil als Autostrasse nicht berücksichtigt wird.

***Tab. 19** Bremsrate der wichtigsten Autobahnen.*

	Schwellenwert 2 ms^{-2}			**Schwellenwert 3 ms^{-2}**		
	Ereignisse	1/R	R	Ereignisse	1/R	R
		[km]	[veh m^{-1}]		[km]	[veh m^{-1}]
A1	1292	234.8	4.26·10-6	137	2214	4.52·10-7
A2	230	290.2	3.45·10-6	33	2022	4.94·10-7
A3	312	159.1	6.28·10-6	35	1418	7.05·10-7
A4	247	133.8	7.47·10-6	32	1032	9.68·10-7

A5	48	376.6	2.66·10-6	8	2259	4.43·10-7
A6	74	170.3	5.87·10-6	7	1800	5.55·10-7
A9	76	749.1	1.33·10-6	9	6325	1.58·10-7
A12	52	1036	9.65·10-7	5	10777	9.28·10-8
A13	6	624.3	1.60·10-6	0	—	—

Unterteilt man die Autobahn A1 in 4 Abschnitte, die durch Genf Perly, Bern Betlehem, Zürich Limmattaler-Kreuz, Winterthur Ohringen und Sankt Margrethen begrenzt werden, so erhält man die Bremsraten, die in Tab. 20 zusammengefasst sind. Es sind jeweils die Bremsraten in beiden Fahrrichtungen aufgetragen. Die Unterschiede sind bedeutend. Die grössten Bremsraten treten im Abschnitt zwischen Zürich und Winterthur auf. Sie betragen etwa das 1.7–fache bzw. das 2.6–fache des Mittelwerts der A1. Der Abschnitt Bern-Zürich entspricht etwa dem Mittelwert, während die anderen Abschnitte eine Bremsrate aufweisen, die deutlich über dem Mittelwert liegt. Innerhalb eines Abschnittes können die Verhältnisse zwischen den Fahrrichtungen einen Faktor 2 überschreiten (z.B. Zürich - Winterthur).

Die Abschnitte der Autobahn A2 sind bezüglich der Bremsrate etwas weniger heterogen als die A1 (Tab. 21). Einzig die zwei Richtungen des Abschnitts Härkingen – Basel weisen eine etwa 2-fach grössere Bremsrate auf. Etwas überraschend weisen die bergabwärts führenden Spuren am Gotthard keine durchwegs höhere Bremsraten als die bergaufwärts führenden Spuren auf. Bei einem Schwellenwert von 2 ms^{-2} weist der Abschnitt Gotthard – Chiasso bergabwärts eine signifikant höhere Bremsrate auf. Bei einem Schwellenwert von 3 ms^{-2} ist hingegen die bergabwärts führende Spur, welche die grössere Bremsrate aufweist. Im Abschnitt Gotthard – Luzern sind kaum Unterschiede vorhanden.

***Tab. 20** Bremsrate der Abschnitte der A1.*

	Schwellenwert 2 ms^{-2}			**Schwellenwert 3 ms^{-2}**		
	Ereignisse	1/R	R	Ereignisse	1/R	R
		[km]	[veh m^{-1}]		[km]	[veh m^{-1}]
Genf — Bern	40	504.8	1.98·10-6	5	4038	2.48·10-7
Bern — Genf	54	441.5	2.27·10-6	6	3973	2.52·10-7
Bern — Zürich	600	172.4	5.80·10-6	56	1847	5.41·10-7
Zürich — Bern	401	299.3	3.34·10-6	48	2500	4.00·10-7
Zürich — Winterthur	63	181.1	5.52·10-6	9	1267	7.89·10-7
Winterthur — Zürich	135	80.6	1.24·10-5	13	837.4	1.19·10-6
Winterthur — St. Margrethen	7	852.7	1.17·10-6	2	2984	3.35·10-7
St. Margrethen — Winterthur	7	900.9	1.11·10-6	0	—	—

***Tab. 21** Bremsrate der Abschnitte der A2.*

	Schwellenwert 2 ms^{-2}			**Schwellenwert 3 ms^{-2}**		
	Ereignisse	1/R	R	Ereignisse	1/R	R
		[km]	[veh m^{-1}]		[km]	[veh m^{-1}]
Chiasso — Gotthard	21	373.9	2.67·10-6	4	1962.8	5.09·10-7
Gotthard — Chiasso	32	252.9	3.95·10-6	2	4046.0	2.47·10-7
Gotthard — Luzern	28	513.3	1.95·10-6	6	2395.4	4.17·10-7

Luzern — Gotthard	31	463.7	2.16·10-6	7	2053.3	4.87·10-7
Luzern — Wiggertal	6	598.4	1.67·10-6	2	1795.3	5.57·10-7
Wiggertal — Luzern	5	725.7	1.38·10-6	2	1814.3	5.51·10-7
Wiggertal — Härkingen	28	321.6	3.11·10-6	3	3001.3	3.33·10-7
Härkingen — Wiggertal	15	584.9	1.71·10-6	2	4386.7	2.28·10-7
Härkingen — Basel	49	174.9	5.72·10-6	7	1224.2	8.17·10-7
Basel — Härkingen	44	136.5	7.32·10-6	6	1001.2	9.99·10-7

Die Tabellen 21 und 22 zeigen, dass zwischen den Teilstrecken der Autobahnen A1 und A2 signifikante Unterschiede der Bremsraten auftreten. Betrachtet man die Bremsrate innerhalb einer Teilstrecke, so sind auch da deutliche Unterschiede zu erkennen. Abb. 57 zeigt die Teilstrecke der A1 zwischen Bern und Zürich. Links sind die Bremsraten für den Schwellenwert von 2 ms^{-2} der Fahrrichtung Bern-Zürich aufgetragen und rechts jene der Fahrrichtung Zürich-Bern. Man erkennt sehr deutlich die grosse Variation der Bremsraten. Es hat längere Strecken, in denen die Bremsrate verschwindend klein ist, wie z.B. in beiden Richtungen zwischen Kirchberg und Derendingen. Andere längere Strecken haben eine etwa konstant mässige Bremsrate über mehr als 20 km (z.B. Zwischen Derendingen und Oensingen oder Aarau und Wettingen). Schliesslich gibt es noch kurze Strecken mit einer sehr hohen Bremsrate. Dazu zählen in Fahrrichtung Bern-Zürich die Strecke vor der Verzweigung Wankdorf, dem Autobahnanschluss Burgdorf und dem Limmattalerkreuz. In Gegenrichtung sind vor der Verzweigung Birrfeld kurz nach dem Bareggtunnel und wiederum vor dem Autobahnanschluss Burgdorf hohe Bremsraten zu erkennen.

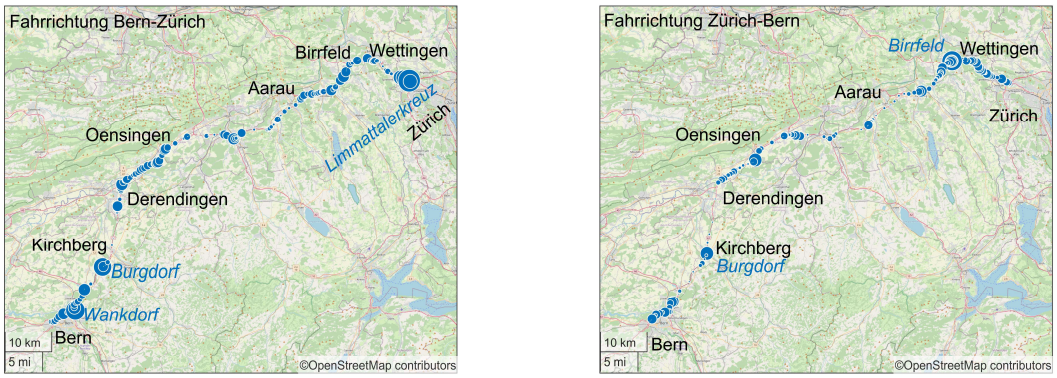


***Abb. 57** Verteilung der Bremsrate (Schwellenwert 2 ms^{-2}) auf der Teilstrecke der A1 zwischen Bern-Bethlehem und Limmattalerkreuz.*

Ein Standort mit einer sehr hohen Bremsrate bei einem Schwellenwert von 2 ms^{-2} ist nicht auch gleich ein Standort mit einer sehr hohen Bremsrate bei einem Schwellenwert von 3 ms^{-2}, wie Abb. 58 zeigt. In Fahrrichtung Bern-Zürich sticht der Standort bei Oensingen hervor, der bei einem Schwellenwert von 2 ms^{-2} kaum auffällt. Umgekehrt zeigt das Limmattalerkreuz bei einem Schwellenwert von 3 ms^{-2} einen erhöhte aber keinen hohe Bremsrate auf. Vor der Verzweigung Birrfeld treten hohe Bremsraten für beide Schwellenwerte auf. Generell sind die Bremsraten bei einem Schwellenwert von 3 ms^{-2} stärker auf kürzere Teilstrecken lokalisiert als bei einem Schwellenwert von 2 ms^{-2}.

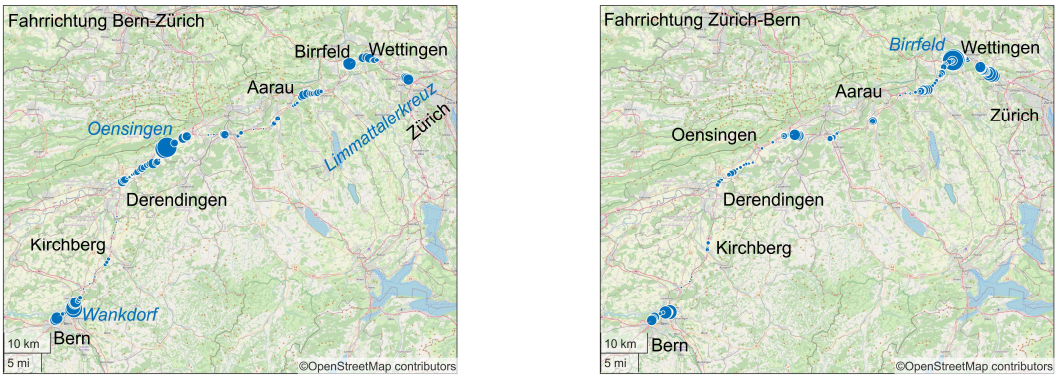


Abb. 58 *Verteilung der Bremsrate (Schwellenwert 3 ms^{-2}) auf der Teilstrecke der A1 zwischen Bern-Bethlehem und Limmattalerkreuz.*

Die Position der Bremsereignisse der beiden Standorte der A1 vor der Verzweigung Birrfeld (links) und vor dem Limmattalerkreuz (rechts) sind in Abb. 59 dargestellt. Mit blau sind die Bremsereignisse mit einem Spitzenwert kleiner als 3 ms^{-2} und mit hellblau sind jene mit einem Spitzenwert grösser als 3 ms^{-2} markiert. Vor der Verzweigung Birrfeld treten auf einer Distanz von 2.4 km 35 Bremsereignisse auf, wobei 6 davon einen Spitzenwert grösser als 3 ms^{-2} aufweisen (Maximum: 4.68 ms^{-2}). Vor dem Limmattalerkreuz treten auf einer Distanz von 2.1 km 42 Bremsereignisse auf. Zwei davon haben einen Spitzenwert grösser als 3 ms^{-2} (Maximum: 3.48 ms^{-2}). Auch auf dieser Skala sind die Bremsereignisse nicht gleichmässig verteilt. Es treten auch 5 Bremsereignisse auf Brücken auf. 2 auf der Brücke über die Reuss und 3 auf der Brücke über die Limmat.

Die Ereignisdistanzen betragen vor der Verzweigung Birrfeld 58.5 km (Schwellenwert 2 ms^{-2}) bzw. 336 km (Schwellenwert 3 ms^{-2}) und vor dem Limmattalerkreuz 22.2 km (Schwellenwert 2 ms^{-2}) bzw. 466 km (Schwellenwert 3 ms^{-2}). Am Limmattalerkreuz betragen die Bremsraten etwa das 14-fache (Schwellenwert 2 ms^{-2}) bzw. das 7-fache (Schwellenwert 3 ms^{-2}) der jeweiligen Mittelwerte der A1.



Abb. 59 *Verteilung der Bremsereignisse auf der A1 vor der Verzweigung Birrfeld und vor dem Limmattalerkreuz.*

Abb. 60 gibt einen Überblick über die Charakteristik der einzelnen Bremsereignisse vor der Verzweigung Birrfeld und vor dem Limmattalerkreuz. In den Diagrammen sind die 4 wichtigsten Kennwerte eines Bremsereignisses als Kreis dargestellt. Die Position der Kreise wird durch die Geschwindigkeitsänderung (horizontale Achse) und die Anfangsgeschwindigkeit (vertikale Achse) bestimmt. Der Durchmesser der Kreise repräsentiert den Spitzenwert und die Farbe den Plateauwert. Längs der durchgezogen roten Linie rechts unten in den Diagrammen ist die Geschwindigkeitsänderung und die Anfangsgeschwindigkeit gleich, sodass das Fahrzeug bis zum Stillstand abgebremst wurde. Längs der gestrichelten roten Linie weisen die Fahrzeuge eine Endgeschwindigkeit von 20 km/h auf.

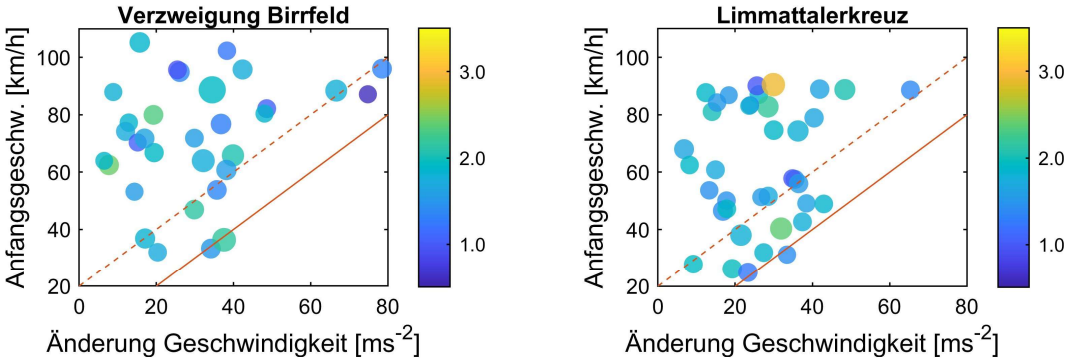


Abb. 60 *Merkmale der Bremsereignisse auf der A1 vor der Verzweigung Birrfeld und vor dem Limmattalerkreuz.*

Vor der Verzweigung Birrfeld sind die Bremsereignisse zufällig verteilt. Es hat Bremsereignisse bei hoher Anfangsgeschwindigkeit mit kleiner und grosser Geschwindigkeitsänderung. Dabei wird sowohl schwach wie auch stark gebremst. Die Bremsereignisse mit den grössten Spitzenwerten sind oft mit den grösseren Geschwindigkeitsänderungen verbunden. Insgesamt entsteht der Eindruck, dass die Bremsereignisse aus verschieden Gründen ausgeführt wurden. Einige Bremsereignisse mit hoher Anfangsgeschwindigkeit (5 Ereignisse mit über 90 km/h) dürften der Geschwindigkeitsregulierung auf der mit 5.5% Neigung hinabführenden Autobahn dienen, um nicht übermässig die Geschwindigkeitsbegrenzung für LKW zu missachten. Die drei Bremsereignisse rechts oben bremsen das Fahrzeug moderat von über 80 km/h auf etwa 20 km/h hinunter. Zwei Ereignisse führen aus kleinen Geschwindigkeiten zum Stillstand des Fahrzeugs und dürften auf eine Stausituation hinweisen.

Ein etwas anderes Bild vermitteln die Bremsereignisse vor dem Limmattalerkreuz. Bremsereignisse mit einer Anfangsgeschwindigkeit über 90 km/h sind nicht vorhanden. Es treten auch deutlich mehr Bremsereignisse auf, die eine Endgeschwindigkeit unter 20 km/h aufweisen (11 Ereignisse). Die Bremsereignisse sind zudem grob in zwei Gruppen aufgeteilt. Die erste Gruppe enthält Bremsereignisse mit einer Anfangsgeschwindigkeit unter 70 km/h, während die zweite Gruppe Bremsereignisse mit einer höheren Anfangsgeschwindigkeit umfasst. Das Muster lässt sich so interpretieren, dass die Fahrzeuge ihre Geschwindigkeit auf die Verkehrssituation am Limmattalerkreuz anpassen, die infolge des grossen Verkehrsaufkommens und der Baustelle vor dem Gubristtunnel oft durch stockenden Verkehr oder Stau gekennzeichnet ist. Bei der ersten Gruppe fliesst der Verkehr bereits deutlich verlangsamt, während in der zweiten Gruppe der Verkehr noch weitgehend unbehindert fliesst. In der Tat finden die Bremsereignisse der ersten Gruppe mehrheitlich in den letzten 500 m vor dem Limmattalerkreuz statt, während die der zweiten Gruppe weiter weg stattfinden.

Weitere Beispiele mit sehr hohen Bremsraten auf der A1 sind in Abb. 61 dargestellt. Links ist die Strecke der Ein- und Ausfahrten bei Wallisellen/Dübendorf und rechts die Strecke nach der Verzweigung Zürich Ost abgebildet. Bei Wallisellen/Dübendorf in Richtung Westen treten auf einer Distanz von 2.4 km 29 Bremsereignisse auf, wobei 2 davon einen Spitzenwert grösser als 3 ms^{-2} aufweisen (Maximum: 3.26 ms^{-2}). Die Ereignisdistanzen betragen 17.8 km (Schwellenwert 2 ms^{-2}) bzw. 258 km (Schwellenwert 3 ms^{-2}). Nach der Verzweigung Zürich Ost treten auf einer Distanz von 1.7 km 12 Bremsereignisse auf. Fünf davon haben einen Spitzenwert grösser als 3 ms^{-2} (Maximum: 4.71 ms^{-2}). Die Ereignisdistanzen betragen 31.7 km für den Schwellenwert 2 ms^{-2} bzw. nur 76.1 km für den Schwellenwert 3 ms^{-2}, was dem 28-fachen des Mittelwerts der A1 entspricht. Diese Ereignisdistanz nähert sich dem Mittelwert der Ereignisdistanz von Autobahnausfahrten. Vier Bremsereignisse finden auf einer Brücke statt, wobei zwei davon einen Spitzenwert der Verzögerung von über 4 ms^{-2} aufweisen.

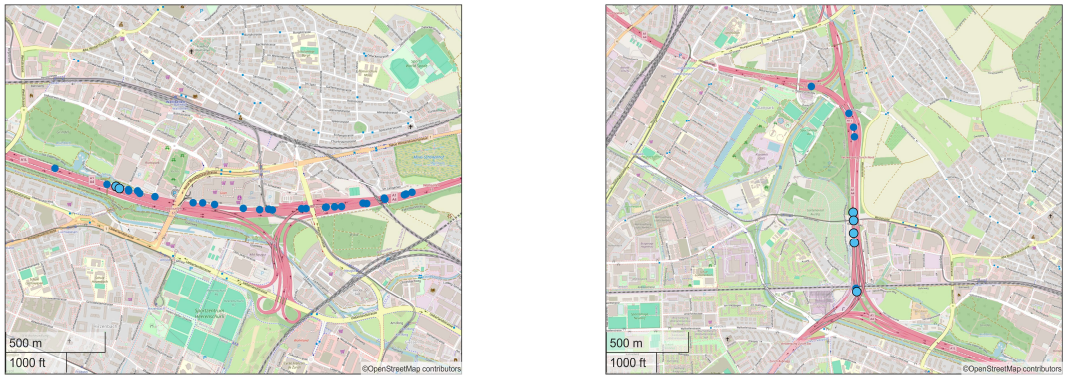


Abb. 61 *Verteilung der Bremsereignisse auf der A1 bei Wallisellen und nach der Verzweigung Zürich Ost.*

Die Bremsereignisse bei Wallisellen treten oft bei Anfangsgeschwindigkeiten unter 40 km/h auf (17 von 29, Abb. 62). Sie rühren von der sehr oft auftretenden Stausituation auf diesem Streckenabschnitt her. Ähnlich wie beim Limmattalerkreuz sind deutlich zwei Gruppen von Bremsereignissen zu erkennen, die aufgrund der ähnlichen Verkehrsbedingungen eine analoge Interpretation zulassen. Die Bremsereignisse mit hohen Anfangsgeschwindigkeiten sind Anpassungen der Geschwindigkeit mit mehrheitlich kleinen Spitzen- und Plateauwerten.

Im Streckenabschnitt Zürich Ost treten vor allem Bremsereignisse mit einer hohen Anfangsgeschwindigkeit auf. Die Spitzenwerte der Verzögerungsprofile sind generell grösser als bei den bisher besprochenen Autobahnabschnitten. Man erkennt eine Häufung von Bremsereignissen mit einer Anfangsgeschwindigkeit von ca. 80 km/h und einer Geschwindigkeitsänderung von 30 km/h. Darunter ist das Bremsereignis mit dem höchsten Spitzenwert. Dieser Häufung im Diagramm entspricht jedoch keiner Häufung in der Geolokalisierung, sodass sie nicht durch lokale Strasseneigenschaften induziert wurden.

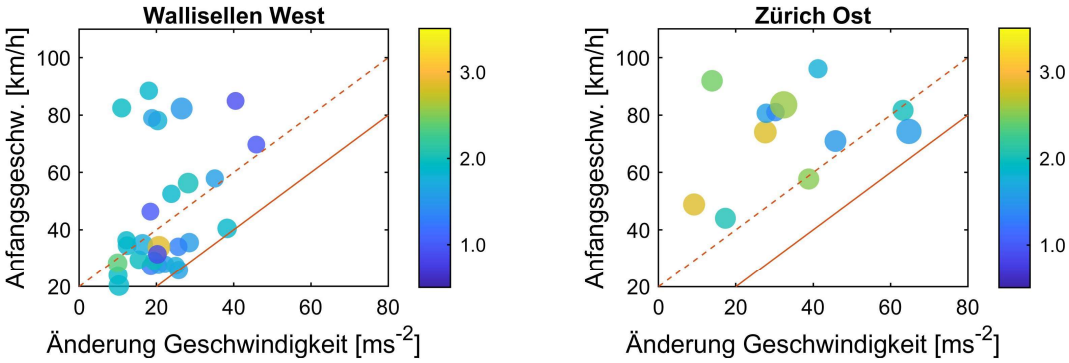


Abb. 62 *Merkmale der Bremsereignisse auf der A1 bei Wallisellen und nach der Verzweigung Zürich Ost.*

4.3.5 Bremsrate auf Autobahnanschlüssen

Die Auswertungen im Kapitel 4.3.3 zeigten, dass Autobahnanschlüsse im Mittel eine etwa 22-fach grössere Bremsrate aufweisen als die Autobahn. Betrachtet man allein Ausfahrten, so verdoppelt sich die Bremsrate auf etwa das 44-fache einer Autobahn. In diesem Kapitel sollen daher die Bremsereignisse zweier Ausfahrten etwa genauer untersucht werden. Es handelt sich um die zwei Autobahnausfahrten Kölliken Nord und Spreitenbach. Kölliken Nord ist eine Ausfahrt zu einer Autobahnraststätte und weist die grösste Dichte von Bremsereignissen (Quotient aus Anzahl Bremsereignisse und Länge der Ausfahrt) bei einem Schwellenwert von 2 ms^{-2} auf. Die Ausfahrt Spreitenbach weist die grösste Anzahl und grösste Dichte von Bremsereignissen bei einem Schwellenwert von 3 ms^{-2} auf.

Abb. 63 zeigt die Verteilung der Bremsereignisse auf den beiden Ausfahrten. Die Ausfahrt Kölliken Nord ist sehr kurz (50 m), sodass sich die 23 Bremsereignisse auf diese kurze Distanz konzentrieren. Die meisten finden kurz nach dem Verlassen der Autobahn statt. Da 23 von insgesamt 29 durchfahrende Lastwagen auf der Ausfahrt bremsten, beträgt die Ereignisdistanz nur 63 m. Sie entspricht dem numerischen Minimum der Ereignisdistanz von Autobahnausfahrten. Alle Bremsereignisse weisen einen Spitzenwert, der kleiner als 3 ms^{-2} ist. 14 Bremsereignisse fanden auf der Brücke über die Uerke statt. Abb. 64 zeigt, dass fast alle Bremsereignisse aus einer hohen Anfangsgeschwindigkeit starten und auf eine Geschwindigkeit von unter 30 km/h abbremsen. Dieses Verhalten ist auf die kurze Länge der Ausfahrt zurückzuführen.

Obwohl die Ausfahrt Spreitenbach deutlich länger ist (529 m), konzentrieren sich die Bremsereignisse am Ende der Ausfahrt (Abb. 63 rechts). Offenbar wird auch bei längeren Ausfahrten oft erst auf dem letzten Teilabschnitt abgebremst. Insgesamt traten 85 Ereignisse auf, wobei 11 einen Spitzenwert von mehr als 3 ms^{-2} hatten. 84 Bremsereignisse fanden auf einer Brücke statt. Die Ereignisdistanzen betragen 1.6 km (Schwellenwert 2 ms^{-2}) bzw. 12.4 km (Schwellenwert 3 ms^{-2}). Berücksichtigt man jedoch, dass die Mehrzahl der Bremsereignisse (79) in den letzten 100 m der Ausfahrt stattfinden, so reduziert sich die Ereignisdistanz auf etwa 330 m. Da die Bremsereignisse mit einem Spitzenwert über 3 ms^{-2} sich allesamt in den letzten 50 m befinden, reduziert sich die zugehörige Ereignisdistanz auf 1.2 km.

Bei Spreitenbach weisen die Bremsereignisse ein deutlich anderes Muster auf als in Kölliken Nord (Abb. 64). Das Muster ist ähnlicher dem Muster der Bremsereignisse am Limmattalerkreuz, wobei die Bremsereignisse mit einer Endgeschwindigkeit kleiner als 20 km/h aufgrund der Einmündung in die Hauptstrasse deutlich grösser ist. Obwohl die Ausfahrt deutlich länger ist, wird insgesamt auf der Ausfahrt Spreitenbach etwas stärker gebremst als auf der Ausfahrt Kölliken Nord.

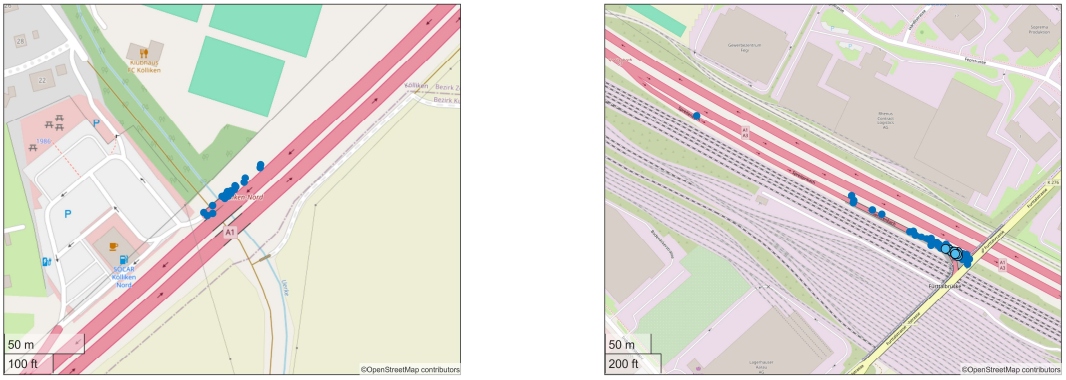


Abb. 63 *Verteilung der Bremsereignisse auf den Ausfahrten Kölliken Nord und Spreitenbach.*

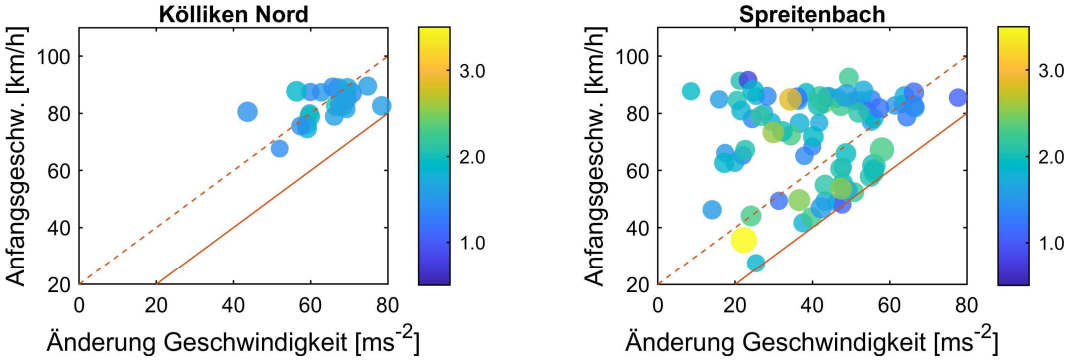


Abb. 64 *Merkmale der Bremsereignisse auf den Ausfahrten Kölliken Nord und Spreitenbach.*

Eine grosse Anzahl Bremsereignisse der Ausfahrten Kölliken Nord und Spreitenbach finden auf Brücken statt (96 Ereignisse bei einem Schwellenwert 2 ms^{-2}). Da gemäss Tab. 18 in Autobahnausfahrten auf Brücken insgesamt 187 Ereignisse gemessen wurden, machen die Bremsereignisse der beiden Ausfahrten etwas mehr als die Hälfte aller Ereignisse aus. Es ist daher naheliegend zu vermuten, dass diese beiden Ausfahrten die Bremsrate der Brücken auf Ausfahrten stark beeinflussen. Ohne Berücksichtigung dieser beiden Ausfahrten beträgt die Bremsrate der Brücken in Ausfahrten $2.51 \cdot 10^{-4}$ veh/m und ist damit kleiner als die Bremsrate der Anschlüsse. Die Bedeutung dieser beiden Ausfahrten ist so gross, dass man sich durchaus fragen muss, ob die Bremsrate, die durch Mittelung gebildet wird, in diesem Fall noch eine angemessene Beschreibung der Wahrscheinlichkeit eines Bremsereignisses ist. Diese Frage wird im nächsten Kapitel untersucht.

Dass das Bremsverhalten bei der Ausfahrt Spreitenbach typisch ist, zeigen die Verteilungen der Bremsereignisse längs der Ausfahrt Kirchberg und Bern Forsthaus (Abb. 65). In beiden Fällen finden die Mehrzahl der Bremsereignisse in den letzten 100 m der Ausfahrt statt. In beiden Fällen finden auch die Bremsereignisse mit einem Spitzenwert grösser als 3 ms^{-2} in den letzten 50 m statt. Die Ausfahrt Kirchberg zählt 91 Bremsereignisse wovon 7 einen Spitzenwert grösser als 3 ms^{-2} haben. Die Ereignisdistanzen betragen 1.3 km (Schwellenwert 2 ms^{-2}) bzw. 17.1 km (Schwellenwert 3 ms^{-2}). Berücksichtigt man die Häufung am Ende der Ausfahrt, so betragen die Ereignisdistanzen nur noch 140 m (Schwellenwert 2 ms^{-2}) bzw. 1.14 km (Schwellenwert 3 ms^{-2}). Die Ereignisdistanzen sind im gleichen Bereich wie jene der Ausfahrt Spreitenbach.

Bei der Ausfahrt Bern Forsthaus kann man drei Häufungen beobachten. Eine am Ende der Ausfahrt vor der Einmündung in die Hauptstrasse. Hinzu kommen die Häufungen vor der Einmündung der Ausfahrt aus der Fahrrichtung Ost und vor der Kurve kurz nach der Abzweigung der Ausfahrt von der Autobahn. Dieses Muster ist auch recht typisch für Ausfahrten: vor jeder Einmündung oder enger Kurve gibt es eine Häufung von Ereignissen. Auch die Ausfahrt Kirchberg weist vor der engen Kurve mehrere Bremsereignisse auf.

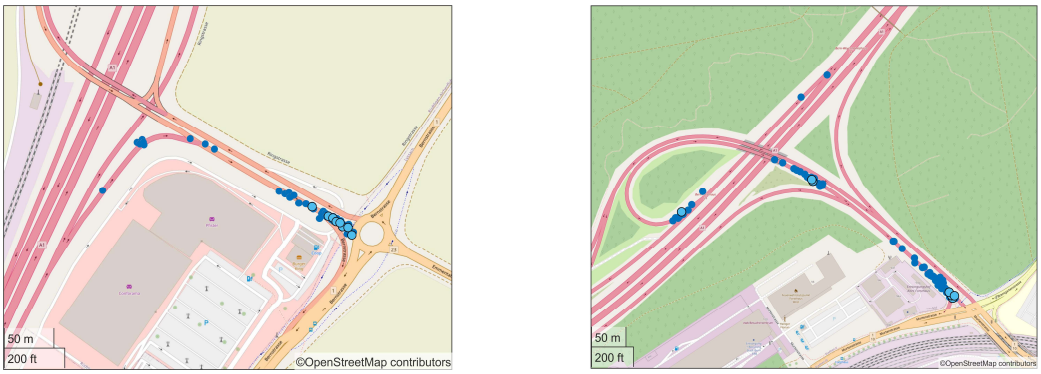


Abb. 65 *Verteilung der Bremsereignisse auf den Ausfahrten Kirchberg und Bern Forsthaus.*

Einfahrten weisen ebenfalls Häufungen von Bremsereignissen vor engen Kurven, Einmündungen und Verzweigungen auf. Zwei Beispiele sind in Abb. 66 dargestellt. Die Einfahrt Lenzburg (links) zeigt eine Häufung vor der Verzweigung in die Einfahrt Richtung Osten und vor der Engen Kurve. Nur 3 Bremsereignisse befinden sich hingegen auf der Einspurstrecke in die Autobahn. Die Einfahrt Kirchberg hat eine Häufung vor der Verzweigung Richtung Norden.

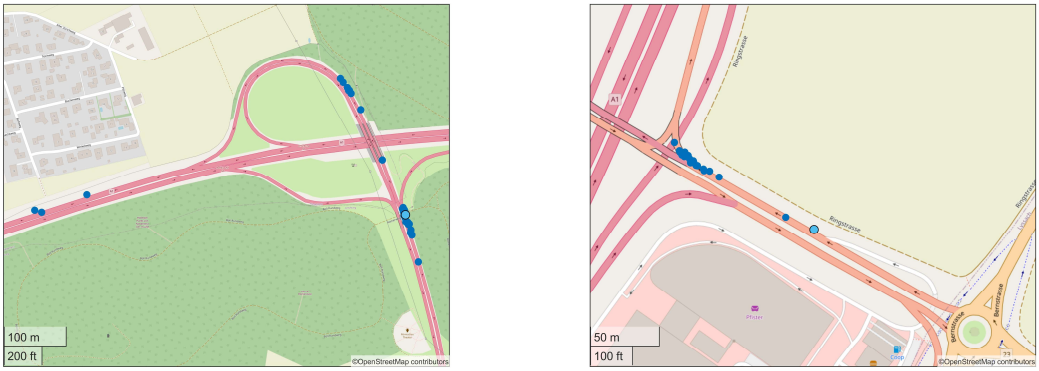


Abb. 66 *Verteilung der Bremsereignisse auf den Einfahrten Lenzburg und Kirchberg.*

Verbindungen weisen Häufungen vor allem bei Einmündungen in Autostrassen auf (Abb. 67 links). Verbindungen zwischen Autobahnen weisen in der Regel keine Häufungen auf, wie an der Verzweigung Härkingen zu erkennen ist. Diese Verbindung weist die kürzesten Ereignisdistanzen der Verbindungen zwischen Autobahnen auf. Sie betragen 18.6 km (Schwellenwert 2 ms^{-2}) bzw. 186 km (Schwellenwert 3 ms^{-2}). Diese Ergebnisse veranlassen eher dazu, Verbindungen zwischen Autobahnen und Autostrassen als Autobahnausfahrten zu behandeln. Dies würde die in Tab. 17 aufgeführte Bremsrate von Ausfahrten nicht wesentlich verändern, doch vermutlich jene für Verbindungen verkleinern. Insgesamt ist bei Autobahnen das Bremsverhalten in Einfahrten und Ausfahrten ähnlicher dem Bremsverhalten auf Hauptstrassen als auf Autobahnabschnitten.

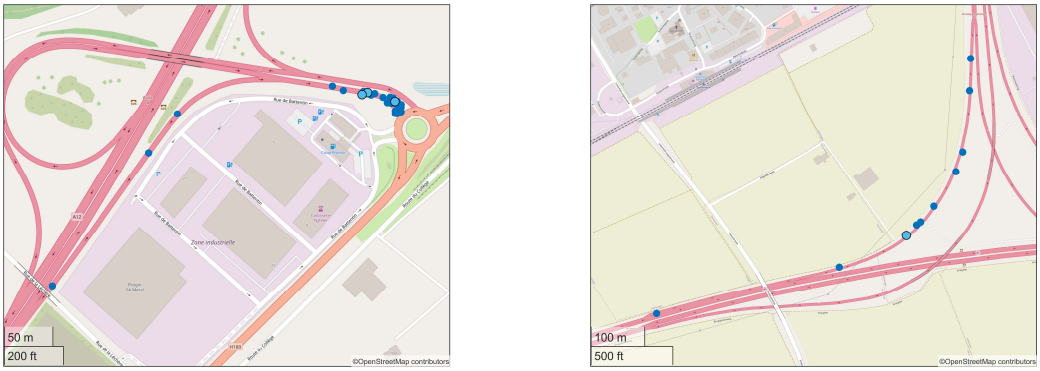


Abb. 67 *Verteilung der Bremsereignisse auf den Verbindungen Bulle und Verzweigung Härkingen.*

Dass die besprochenen Autobahnanschlüsse repräsentativ für das Bremsverhalten sind, zeigt Tab. 22, die für die verschiedenen Autobahnanschlüsse das durchschnittliche Verhältnis zwischen der Bremsrate in drei Sektoren eines Autobahnanschlusses und seiner durchschnittlichen Bremsrate zusammenfasst. Ein Autobahnanschluss ist jeweils in einem Anfangssektor, Mittelsektor und Endsektor aufgeteilt worden. Anfangs- und Endsektoren hatten jeweils eine Länge von 50 m. Der Mittelsektor bestand aus dem Autobahnanschluss abzüglich des Anfangs- und Endsektors. Es wurden nur Autobahnanschlusse berücksichtigt, die mindestens ein Bremsereignis und eine Länge von 150 m hatten.

Bei den Ausfahrten konzentrieren sich die Bremsereignisse, wie in den Beispielen dokumentiert, im Endsektor. Die Einfahrten weisen eine höhere Bremsrate im Anfangssektor auf. Dies hängt damit zusammenhängen, dass am Beginn einer Einfahrt oft 2 Einfahrtsstränge zusammenfliessen. Die Einfahrt in die Autobahn scheint nicht zu einer wesentlichen Zunahme der Bremsrate zu führen. Verbindungen haben im Mittel- und Endsektor eine etwas erhöhte Bremsrate, wobei jene des Endsektors, wie bereits vermerkt, durch die Bremsereignisse infolge der Einfahrt in Autostrassen beeinflusst wird.

***Tab. 22** Verhältnis der Bremsraten nach Sektoren.*

Strassenabschnitt	Anzahl Abschnitte	Anfangssektor	Mittelsektor	Endsektor
Ausfahrten	628	0.37	0.47	5.76
Einfahrten	254	3.37	0.57	1.54
Verbindungen	105	0.72	1.80	1.54
Autobahnabschnitt E	91	1.85	1.01	0.83
Autobahnabschnitt A	57	0.81	0.96	1.19

Eine analoge Analyse kann auch für Autobahnabschnitte durchgeführt werden. Zu diesem Zweck ist die Autobahn A1 in Autobahnabschnitte zwischen Ein- und Ausfahrten (Autobahnabschnitt E) und zwischen Aus- und Einfahrten (Autobahnabschnitt A) aufgeteilt worden. Die Länge der Anfangs- und Endsektoren betrug 250 m (Autobahnabschnitt E) bzw. 100 m (Autobahnabschnitt A). Es wurden nur Autobahnanschlusse berücksichtigt, die mindestens ein Bremsereignis und eine Länge von 750 m bzw. 300 m hatten. Eine signifikant erhöhte Bremsrate ist nur nach der Einfahrt zu beobachten. Offenbar führt die Vereinigung der Verkehrsflüsse der Autobahn und der Einfahrt zu Verkehrssituationen, die eine erhöhte Bremsrate verursachen. Die Strecke vor Ausfahrten ist hingegen unauffällig. Auch die Autobahnabschnitte A, die bei Autobahnkreuzen auftreten, zeigen im Wesentlichen eine über die ganze Länge gleichmässige Bremsrate.

4.3.6 Bremsrate und Bremswahrscheinlichkeit

Aus den in letzten Kapiteln besprochenen Beispielen wird deutlich, dass die Bremsrate im Allgenmeinen nicht gleichmässig über einen Strassenabschnitt verteilt ist. Insbesondere bei Häufungen von Bremsereignissen, wie sie bei Ein- und Ausfahrten zu beobachten sind, ist die Definition der Bremsrate als Quotient zwischen der Anzahl Bremsereignisse und der gefahrenen Distanz schwierig aufrecht zu erhalten, da sie implizit davon ausgeht, dass die Bremsereignisse sich mehr oder weniger gleichmässig auf den untersuchten Strassenabschnitt verteilen. Die Beispiele auf der Autobahn (Verzweigung Birrfeld und Limmattalerkreuz (Abb. 60), die in Kapitel 4.3.4 besprochen wurden, erfüllen näherungsweise diese Voraussetzung. Sie weisen zwar Dichtefluktuationen der Position der Bremsereignisse auf, doch dürften diese mit der Definition der Bremsrate noch verträglich sein. Dabei darf nicht völlig ausser Acht gelassen werden, dass die beobachteten Dichtefluktuationen auch durch eine zu kurze Monitoringperiode verursacht sein könnte.



***Abb. 68** Verteilung der Bremsereignisse auf den Autobahnabschnitten der A1 Oensingen–Härkingen und Luterbach–Wangen.*

Autobahnabschnitte, mit stärker ausgeprägten Dichtefluktuationen sind in Abb. 68 zu beobachten, welche die Bremsereignisse in den Autobahnabschnitten der A1 zwischen Oensingen und der Verzweigung Härkingen (links) und zwischen der Verzweigung Luterbach und Wangen zeigen (rechts). In der Figur links beobachtet man eine deutliche Häufung von Bremsereignissen nach der Einfahrt Oensingen, die etwas mehr als die Hälfte der Bremsereignisse des gesamten Abschnittes enthält. In der Figur rechts konzentrieren

sich die Bremsereignisse in 4 Anhäufungen. In diesen beiden Beispielen könnten die Häufungen nicht durch die Datenbasis, sondern durch reale Verkehrsbedingungen verursacht worden sein. Verschiedene Verkehrsbedingungen haben die Häufungen verursacht, wie die Merkmale in Abb. 69 belegen.

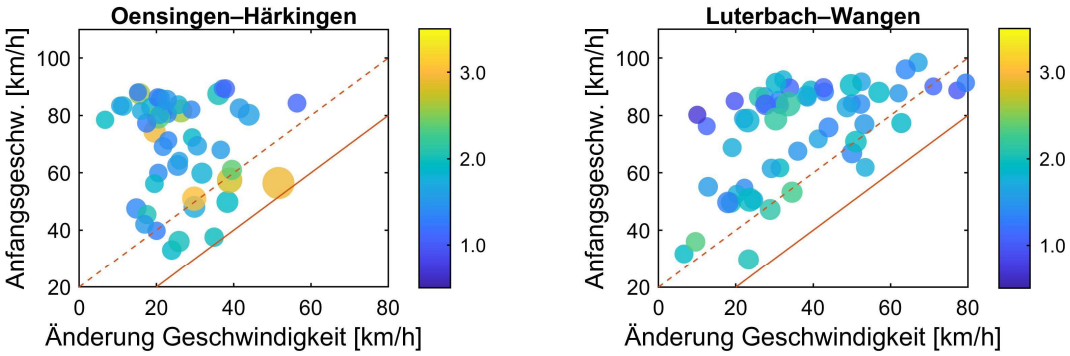


Abb. 69 *Merkmale der Bremsereignisse auf den Autobahnabschnitten der A1 Oensingen–Härkingen und Luterbach–Wangen.*

Bei Häufungen der Bremsereignisse, wie sie bei Autobahnanschlüssen entstehen, ist die Gleichmässigkeit der Bremsereignisse jedoch ganz eindeutig nicht mehr erfüllt. Streckenabschnitte mit hoher Anzahl Bremsereignisse wechseln mit Streckenabschnitten ab, die sehr wenige oder sogar keine Bremsereignisse aufweisen. Darüber hinaus lassen sich die Ursachen der Häufungen eindeutig als Folge struktureller Merkmale der Strasse begründen (enge Kurven, Einmündungen und Kreuzungen).

Bei Häufungen drängt sich daher eine alternative Definition auf, um die Häufigkeit der Bremsereignisse zu beschreiben. Eine naheliegende Option ist, den Quotienten aus der Anzahl Bremsereignisse und der Anzahl durchfahrender Fahrzeuge als Mass für die Häufigkeit von Bremsereignissen zu definieren. Dieses Mass beschreibt, mit welcher Wahrscheinlicht ein durchfahrendes Fahrzeug eine Bremsung ausführt:

$$p_B = \frac{n_B}{n_v}. \tag{3}$$

p_B bezeichnet die Wahrscheinlicht eines Bremsereignisses, kurz Bremswahrscheinlichkeit genannt, n_B ist die Anzahl Bremsereignisse und n_v die Anzahl durchfahrende Fahrzeuge. Die Bremswahrscheinlichkeit bezieht sich auf einen Ort (z.B. vor einer Kurve, Einmündung etc. oder auf einer Brücke) und nicht, wie die Bremsrate, auf eine Strecke. Will man z.B. die Bremswahrscheinlichkeit für eine Brücke bestimmen, so zählt man die vorbeifahrenden Fahrzeuge n_v und die Fahrzeuge n_B, die auf der Brücke gebremst haben. Daraus wird dann mit Gleichung (3) die Bremswahrscheinlichkeit berechnet, die unabhängig von der Länge der Brücke ist.

Bei gleichmässig verteilten Bremsereignissen kann die Bremswahrscheinlichkeit p_b und die Bremsrate R durch eine sehr einfache Beziehung verknüpft werden:

$$p_B = \frac{n_B}{n_v} = \frac{n_B}{D_v/L} = \frac{n_B}{D_v} L = R \cdot L, \tag{4}$$

wobei D_v die von den durchfahrenden Fahrzeugen auf dem Strassenabschnitt zurückgelegte Fahrstrecke und L die Länge des Strassenabschnitts bezeichnet. Dieser einfache Zusammenhang erlaubt bei der Simulation zur Bestimmung der Bremskräfte auf Brücken weiterhin die Bremsrate zu benutzen. Diese beträgt bei einer Brückenlänge L_b

$$R_b = \frac{p_B}{L_b} \tag{5}$$

Wird die Bremswahrscheinlichkeit bei der Ausfahrt Spreitenbach angewendet, so bremsten 33.3% der durchfahrenden Fahrzeuge mit einem Spitzenwert grösser als 2 ms^{-2} und etwa 4.35% mit einem Spitzenwert grösser als 3 ms^{-2}. Mit diesen Werten beträgt die Bremsrate auf der Brücke $2.11 \cdot 10^{-3}$ veh-m^{-1} (Schwellenwert 2 ms^{-2}) bzw. $2.77 \cdot 10^{-4}$ veh-m^{-1} (Schwellenwert 3 ms^{-2}). Die zugehörigen Ereignisdistanzen betragen 473 m bzw. 3.61 km. Diese Werte sind etwas grösser als jene, die in Kapitel 4.3.5 berechnet wurden, indem die Ereignisdistanz mithilfe des Quotienten aus der Länge der Ausfahrt und der Distanz in Fahrtrichtung zwischen dem ersten und letzten Bremsereignis der Häufung berechnet wurde. Die Bremswahrscheinlichkeit ist jedoch das bessere Mass, da die Anzahl durchfahrender Fahrzeuge weniger durch zufällig auftretende Verkehrsbedingungen beeinflussbar ist als die Distanz zwischen dem ersten und letzten Bremsereignis der Häufung.

Bei ungleichmässig verteilten Bremsereignissen stimmt Gleichung (4) nicht mehr. Wird ein Strassenabschnitt in n Teile unterteilt, so lässt sich gemäss Gleichung (3) für jeden Teil eine Bremswahrscheinlichkeit $p_{B,i}$ definieren. Die Bremswahrscheinlichkeit des gesamten Strassenabschnitts lässt sich dann durch den Mittelwert der Bremswahrscheinlichkeit der einzelnen Teile beschreiben:

$$\overline{p}_B = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} p_{B,i} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{n_{B,i}}{n_{v,i}} \tag{6}$$

Die Bremsrate R für den Strassenabschnitt ist wie folgt definiert:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n} n_{B,i}}{\sum_{i=1}^{n} D_{v,i}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} n_{B,i}}{\sum_{i=1}^{n} n_{v,i} \cdot L_i} \tag{7}$$

Sind die Teile des Strassenabschnittes gleich lang, so vereinfacht sich Gleichung (7) zu

$$R = \frac{1}{\tilde{L}} \frac{\sum_{i=1}^{n} n_{B,i}}{\sum_{i=1}^{n} n_{v,i}} \tag{8}$$

Aus den Gleichungen (6) und (8) lässt sich im Allgemeinen keine einfache Beziehung zwischen dem Mittelwert der Bremswahrscheinlichkeit und der Bremsrate herstellen. Nur unter der Annahme, dass in jedem Teil des Strassenabschnitts die gleiche Anzahl Fahrzeuge durchfahren, ist eine einfache Beziehung formulierbar:

$$\overline{p}_B = = \frac{1}{n \cdot n_v}\sum_{i=1}^{n} n_{B,i} = \frac{1}{n \cdot n_v} R\tilde{L}\sum_{i=1}^{n} n_{v,i} = R\tilde{L} \ . \tag{9}$$

Der Mittelwert der Bremswahrscheinlichkeit ist somit das Produkt aus der Bremsrate und der Länge des Teils des Strassenabschnittes. Dieser Zusammenhang ist eine Verallgemeinerung der Beziehung, die in Gleichung (4) formuliert wurde, und rechtfertigt die Anwendung von Gleichung (5). Bei gleichmässiger Verteilung der Bremsereignisse auf den Strassenabschnitt gilt Gleichung (9) selbstverständlich auch, wobei die Länge des Teils mit der Länge des Strassenabschnitts ersetzt wird.

Die Bremswahrscheinlichkeit erlaubt auch ein Mass für die Ungleichmässigkeit der Verteilung der Bremsereignisse auf einem Strassenabschnitt zu definieren. Mit Hilfe der Shannon-Entropie kann der folgende Heterogenitätsindex I_H definiert werden:

$$I_H = 10\left(1 + \frac{\sum_{i=1}^{n} \hat{p}_{B,i} \cdot \log(\hat{p}_{B,i})}{\log(n)}\right). \quad (10)$$

Zur Berechnung des Heterogenitätsindexes werden die Bremswahrscheinlichkeiten so normiert, dass ihre Summe 1 wird, sodass nur ihre Verteilung zwischen den Teilen und nicht ihre absolute Grösse in den Heterogenitätsindex einfliesst. Diese Definition stellt sicher, dass bei gleichmässiger Verteilung der Heterogenitätsindex Null ist. Bei grösstmöglicher Heterogenität, wenn sich alle Bremsereignisse nur auf einem einzigen Teil des Strassenabschnitts befinden, beträgt der Heterogenitätsindex 10.

Der Heterogenitätsindex ist nicht unabhängig von der Unterteilung des Strassenabschnitts. Er wächst mit feinerer Unterteilung, da dies zu einer grösseren Variation der Bremswahrscheinlichkeit führt. Vergleiche innerhalb spezifischer Strassenabschnitte wie z.B. Ausfahrten lassen sich ohne weiteres durchführen, indem man eine gemeinsame Länge der Teile (Skala) wählt. Die Skala sollte so gewählt werden, dass die Verteilung der Häufungen noch ausreichend in der Bremswahrscheinlichkeit abgebildet wird. Eine zu grosse Skala führt zu einer Verschmierung der Häufungen (Homogenisierung), während eine zu kleine Länge eine Aufsplitterung der Häufungen (Heterogenisierung) verursacht. Als Richtschnur dient z.B. die Ausdehnung der Häufungen. Um Vergleiche zwischen verschiedenen Strassenabschnitten wie Autobahnabschnitten und Ausfahrten durchzuführen, müssen die Skalen entsprechend gewählt werden. Auch hier dient als Richtschnur die Ausdehnung der Häufungen, die bei Autobahnabschnitten länger als bei Ausfahrten sind.

Tab. 23 listet die Heterogenität (Schwellenwert 2 ms^{-2}) der in diesem und im letzten Kapitel besprochenen Strassenabschnitten auf. Die Ausfahrten wurden mit einer Skala von 25 m und die Autobahnabschnitte mit einer Skala von 200 m berechnet. Die Ausfahrten weisen deutlich grössere Werte als die Autobahnabschnitte auf. Die Ausnahme bildet die Ausfahrt Kölliken Nord, die aufgrund ihrer Kürze, eine einzelne Häufung aufweist. Die Ausfahrten Spreitenbach und Kirchberg weisen die grössten Werte aus, da beide eine dominante Häufung am Ende aufweisen. Ähnlich den Ausfahrten weist der Autobahnabschnitt Oensingen–Härkingen den grössten Wert der Autobahnabschnitte auf, da etwa die Hälfte der Bremsereignisse kurz nach der Einfahrt auftreten. Die kleinste Heterogenität des Abschnitts Dietikon–Limmattalerkreuz entspricht auch gut dem visuellen Eindruck einer annähernd gleichmässigen Verteilung der Bremsereignisse.

***Tab. 23** Heterogenitätsindex von Strassenabschnitten.*

Strassenabschnitt	Skala	Heterogenität	Poisson
Baden West–Birrfeld	200 m	1.85	0.94±0.53
Dietikon–Limmattalerkreuz	200 m	0.70	0.52±0.26
Oensingen–Härkingen	200 m	1.96	1.09±0.28
Luterbach–Wangen	200 m	1.39	0.70±0.23
Ausfahrt Kölliken Nord	25 m	2.29	0.94±0.99
Ausfahrt Spreitenbach	25 m	6.36	0.43±0.15
Ausfahrt Kirchberg	25 m	8.72	0.84±0.17
Ausfahrt Bern Forsthaus	25 m	4.40	1.42±0.26

Als weiteres Kriterium, um die Heterogenität zu beurteilen, kann der mit einem Poisson-Prozess berechnete Heterogenitätsindex beigezogen werden. Da Bremsereignisse aus einem Zufallsprozess entstehen, werden auch bei einer konstanten Bremsrate die Bremswahrscheinlichkeiten der Teilabschnitte voneinander abweichende Bremswahrscheinlichkeiten aufweisen. Das heisst, auch bei konstanter Bremsrate ist eine gleichmässige Verteilung der Bremsereignisse auf einem Streckenabschnitt ein seltenes

Ereignis, sodass der Heterogenitätsindex praktisch immer grösser als 0 ist. Der Mittelwert und die Standartabweichung der theoretischen Heterogenitätsindices der untersuchten Strassenabschnitte sind in der letzten Spalte der Tab. 23 aufgelistet. Sie basieren jeweils auf 1'000 Simulationen, wobei für jeden Strassenabschnitt die aus den Messdaten berechnete konstante Bremsrate verwendet wurde.

Das Verhältnis zwischen dem theoretischen und gemessenen Heterogenitätsindex unterstreicht den qualitativen Unterschied zwischen Autobahnabschnitte und Ausfahrten. Der gemessene Heterogenitätsindex aller Autobahnabschnitte ist grösser als der theoretische und ausser beim Abschnitt Dietikon–Limmattalerkreuz ist die Hypothese einer konstanten Bremsrate auf der gesamten Strecke nicht ohne weiteres haltbar. Ihre Abweichungen von einer konstanten Bremsrate sind jedoch im Vergleich zu den Ausfahrten klein. Ausser bei der Ausfahrt Kölliken Nord übertrifft der Unterschied zwischen dem theoretischen und gemessenen Heterogenitätsindex die Unterschiede der Autobahnabschnitte bei weitem.

Bei Autobahnabschnitten und Ausfahrten können passende Skalen noch gut gewählt werden. Will man die Heterogenität ganzer Autobahnen wie die A1 und A2 bestimmen, so ist die Wahl der Skala nicht so intuitiv wie bei Ausfahrten und Autobahnabschnitten. Eine mögliche Skala richtet sich nach der Länge der Autobahnabschnitte zwischen Ein- und Ausfahrten. Eine Skala von 10 km ergibt für die A1 und A2 die Heterogenitätsindices, die in Tab. 24 aufgelistet sind. Die theoretischen Heterogenitätsindizes sind viel näher bei den gemessenen Heterogenitätsindizes als bei Autobahnabschnitten und Ausfahrten. Bei der A1 Richtung Westen und der A2 Richtung Norden weichen die gemessenen Heterogenitätsindizes sogar weniger als eine Standardabweichung von den theoretischen ab.
Autobahnen sind daher den Autobahnabschnitten ähnlicher als den Ausfahrten. Dies entspricht auch dem qualitativen Eindruck, wenn man die Verteilung der Bremsrate in Abb. 57 betrachtet. Die Heterogenität entspricht eher einem Autobahnabschnitt als einer Ausfahrt mit ihren klar abgegrenzten Häufungen.

Tab. 24 *Heterogenitätsindex von Autobahnen.*

Autobahn	Skala	Heterogenität	Poisson
A1 Richtung Osten	10 km	1.80	1.46±0.09
A1 Richtung Westen	10 km	1.52	1.49±0.11
A2 Richtung Norden	10 km	1.54	1.61±0.29
A2 Richtung Süden	10 km	2.02	1.54±0.27

5 Bremskraft auf Brücken

5.1 Stochastisches Modell zur Berechnung der Bremskräfte

5.1.1 Überblick des Modells

Im Vorgängerprojekt AGB 2011/003 [12] wurde ein Modell zur Berechnung des charakteristischen Werts der Bremskraft auf Strassenbrücken mittels stochastischer Simulation entwickelt (Abb. 70). Hier soll ein kurzer Überblick des Modells gegeben werden, um den Inhalt der folgenden Unterkapitel besser zu verstehen. Eine detaillierte Beschreibung des Modells ist in [7] zu finden. Das Modell besteht aus vier Teilen.

– Der erste Teil berücksichtigt den Verkehr, der durch eine zeitliche Reihenfolge von Fahrzeugen (Verkehrskonfiguration) modelliert wird. Diese Verkehrskonfiguration enthält sowohl leichte als auch schwere Fahrzeuge, da leichte Fahrzeuge die Bremskinematik der schweren Fahrzeuge beeinflussten. Die einzelnen Fahrzeuge sind durch mehrere Parameter wie Kategorie, Länge und Geschwindigkeit des Fahrzeugs, Abstand zum vorhergehenden Fahrzeug usw. charakterisiert. Alle Parameter des Verkehrsmodells werden mit Verkehrsdaten bestimmt, die durch die Schweizerische automatische Strassenverkehrszählung (SASVZ) und der WIM-Gewichtserfassung (Weigh-In-Motion) auf Schweizer Autobahnen erhoben worden sind.



Abb. 70 Aufbau des stochastischen Modells.

– Der zweite Teil modelliert mit einem Ausschnitt der Verkehrskonfiguration (Verkehrsszenario) ein Bremsereignis. Die Kinematik der einzelnen Fahrzeuge des Verkehrsszenarios während eines Bremsereignisses wird bestimmt, indem dem führenden Fahrzeug, welches ein leichtes oder schweres Fahrzeug sein kann, zufällig ein Verzögerungsprofil zugeordnet wird. Für jedes nachfolgende Fahrzeug werden dann eine Reaktionszeit des Fahrers und ein passendes Verzögerungsprofil bestimmt, sodass der Abstand zwischen den Fahrzeugen am Ende des Bremsereignisses möglichst klein wird, um den gesamten zur Verfügung stehenden Raum zum Abbremsen zu nutzen. Um das unterschiedliche Bremsverhalten der Fahrzeuge zu berücksichtigen, werden schweren und leichten Fahrzeugen unterschiedliche Verzögerungsprofile zugeordnet. Die Verzögerungsprofile stammen aus Datenbanken mit gemessenen Verzögerungsprofilen.

– Im dritten Teil wird für jedes Bremsereignis die Bremskraft berechnet. Zuerst wird die dynamische Einwirkung der bremsenden Fahrzeuge auf die Brücke bestimmt, indem die Trägheitskräfte (Produkt aus Masse und Verzögerungsprofil) der einzelnen Fahrzeuge aufsummiert wird, wobei selbstverständlich der Zeitverzug berücksichtigt wird. Zur Modellierung des dynamischen Verhaltens der Brücke in Längsrichtung wird ein linear-elastischer, viskos-gedämpfter Einmassenschwinger verwendet. Diese Vereinfachung basiert auf den Annahmen, dass die Längssteifigkeit des Brückenüberbaues ausreichend hoch ist, um als starrer Körper modelliert zu werden, und dass die Nichtlinearität der Längsschwingung der Brücke, die durch Lager, Brückenpfeiler und nichttragende Komponenten verursacht wird, klein ist. Die dieser

Vereinfachung zugrundeliegenden Annahmen wurden im Projekt ABG 2017/002 (Platooning) weitgehend bestätigt [24].

Die Bremskraft eines Bremsereignisses ist definiert als der Spitzenwert der Kraft, die von den Brückenpfeilern und Lager einer Brücke auf den Untergrund übertragen wird. Sie enthält daher auch eine Komponente, die aus der Schwingung der Brücke resultiert, sodass die Bremskraft in der Regel grösser als der Spitzenwert der Einwirkung durch die bremsenden Fahrzeuge ist (dynamische Vergrösserung). Die Bremskraft wird daher auch von den dynamischen Eigenschaften der Brücke (Eigenfrequenz und Dämpfung) beeinflusst. Am Einmassenschwinger wird die Bremskraft durch den Spitzenwert der Summe aus der elastischen Feder und dem viskosen Dämpfer bestimmt.

– Im vierten und letzten Teil werden zehntausende Bremsereignisse simuliert (Monte Carlo Simulation), um eine empirische Wahrscheinlichkeitsverteilung der Bremskräfte zu erzeugen. Die Zahl der Simulationen hängt, wie weiter unten gezeigt wird, von der Häufigkeit schwerer Fahrzeuge, der Bremsrate und der Simulationsperiode ab. Mit der empirischen Wahrscheinlichkeitsverteilung ermittelt das Modell den charakteristischen Wert der Bremskraft für eine bestimmte Wiederkehrperiode.

5.1.2 Anpassungen des Modells

Im Projekt AGB 2017/004 wurden bereits einige Anpassungen am ursprünglichen Modell vorgenommen, um das Platooning von Strassenfahrzeugen zu berücksichtigen [15]. Die wichtigste Änderung betraf das Modell zur Erzeugung der Verkehrskonfigurationen. Um numerisch effizient eine Vielzahl von Verkehrskonfigurationen mit Platoons (Parameterstudie) zu generieren, wurde ein Modell auf der Basis eines Markov-Ketten-Ansatzes entwickelt. Die Parameter des neuen Modells werden aus den Daten der Schweizerischen automatischen Strassenverkehrszählung (SASVZ) bestimmt.

In den Vorgängerprojekten AGB 2011/003 und AGB 2017/004 wurden Verkehrskonfigurationen für zwei Standorte, Denges-Morges an der A1 und Monte Ceneri an der A2, ermittelt, die den nationalen bzw. internationalen Schwerverkehr repräsentieren. Die Bremskräfte des modifizierten Modells stimmten mit dem Verkehr am Standort Denges sehr gut mit dem ursprünglichen Modell überein. Grössere Abweichungen traten hingegen mit dem Verkehr am Standort Monte Ceneri auf, wobei das modifizierte Modell bei längeren Brücken deutlich grössere Bremskräfte voraussagte. Die Ursache konnte auf die spontane Bildung von Konvois schwerer Fahrzeuge zurückgeführt werden, die das ursprüngliche Modell (die kommerzielle Software AIMSUN) für den Verkehr am Monte Ceneri nicht korrekt wiedergeben hatte. Unter dem Begriff spontan gebildeter Konvoi ist eine Anzahl schwerer Fahrzeuge gemeint, die als Gruppe hintereinanderfährt. Die Abstände zwischen den Fahrzeugen sind variabel und die Fahrzeuge werden individuell gesteuert (keine Platoons). Die Häufigkeit von spontanen Konvois mit 3 und mehr Fahrzeugen wurde deutlich unterschätzt, sodass daraus Bremskräfte resultierten, die etwa dem Verkehr Denges entsprachen, der deutlich weniger Konvois mit 3 und mehr Fahrzeugen als der Verkehr am Monte Ceneri aufwies.

Zur Berechnung der Bremskräfte wurde in diesem Projekt daher das modifizierte Modell eingesetzt. Zusätzlich wurden folgende Änderungen vorgenommen, um die Resultate aus Kapitel 4 zu berücksichtigen:

– Der Schwellenwert zur Definition eines harten Bremsereignisses wurde von 4 ms^{-2} auf 3 ms^{-2} herabgesetzt. Dies ist eine unmittelbare Konsequenz aus den Ergebnissen dieses Projekts, da der Schwellenwert von 4 ms^{-2} im Vergleich zum Vorgängerprojekt AGB 2011/003 [12] zu selten überschritten (468 Ereignisse) wurde, um eine zuverlässige Bremsrate für verschiedene Strassentypen und –abschnitte festzulegen. Den Schwellenwert von 4 ms^{-2} beizubehalten, würde ausserdem zu einer übermässigen Verwendung der wenigen Verzögerungsprofile und eine Schätzung des

charakteristischen Werts der Bremskraft auf der Basis einer kleinen Anzahl Bremsereignisse führen, sodass die Unsicherheit der Resultate zunehmen würde.

– Da in der Monitoringkampagne nur Messdaten an schweren Fahrzeugen erfasst wurden, wurde das Modell dahingehend modifiziert, dass ein Bremsereignis immer von einem schweren Fahrzeug ausgelöst wird. Bisher konnten die Bremsereignisse sowohl von einem leichten als auch von einem schweren Fahrzeug ausgelöst werden. Folgerichtig werden neu zur Bestimmung der Anzahl Simulationen von Bremsereignissen nur schwere Fahrzeuge gezählt, die den Schwellenwert überschreiten.

– Die Datenbank der Verzögerungsprofile für schwere Fahrzeuge wurde komplett neu mit den in diesem Projekt erfassten Verzögerungsprofile erstellt. In die Datenbank wurden Ereignisse mit einem maximalen Verzögerungswert von mehr als 2 ms^{-2} aufgenommen, damit nachfolgende Fahrzeuge je nach Abstand und Geschwindigkeitsunterschied mit einer geringeren Intensität bremsen konnten als das führende schwere Fahrzeug, das immer ein Verzögerungsprofil mit einem Spitzenwert grösser als 3 ms^{-2} aufweist. Die bestehende Datenbank der leichten Fahrzeuge wurde darüber hinaus mit neu aufgezeichneten Ereignissen ergänzt, um eine ausreichende Anzahl Verzögerungsprofile mit einem Spitzenwert kleiner als 3 ms^{-2} zu führen, um sie mit der Datenbank für schwere Fahrzeuge kompatibel zu machen.

– Das Modell ist so ausgelegt, dass Kollisionen zwischen Fahrzeugen vermieden werden. Bei Verkehrsszenarien mit Fahrzeugen, die mit einem bedeutenden Geschwindigkeitsunterschied in kleinem Abstand aufeinander folgen, konnte oft in der ursprünglichen kleinen Datenbank kein geeignetes Verzögerungsprofil gefunden werden. Als Ersatz wurde ein synthetisches Verzögerungsprofil eingesetzt, das einer Vollbremsung entsprach. Vollbremsungen schwerer Fahrzeuge führten häufig zu Bremsereignissen mit hohen Bremskräften. Deshalb wurden Massnahmen ergriffen, um die Häufigkeit dieser synthetischen Bremsvorgänge zu reduzieren. Die implementierte Strategie umfasste die Skalierung einer Auswahl kompatibler Bremsprofile mit der Geschwindigkeit. Für die synthetischen Verzögerungsprofile wurden die Spitzenwerte von 7,5 ms^{-2} und 9,5 ms^{-2} für schwere bzw. leichte Fahrzeuge verwendet. Die Erhöhung um 0,5 ms^{-2} gegenüber den in AGB 2011/003 festgelegten Grenzwerten wurde aufgrund der Beobachtung eingeführt, dass die gemessenen Profile typischerweise Spitzen in der Verzögerung und kein gleichmässiges Plateau aufweisen. Darüber hinaus wurde zur Förderung eines stärkeren Bremsverhaltens die Dauer des Bremsvorgangs durch Anpassung der Zeitskala verkürzt, wobei die Ruckwerte innerhalb der Grenzen der in AGB 2011/003 definierten synthetischen Verzögerungskurven blieben, um unrealistische Ruckwerte zu vermeiden. Zusätzlich wurden die Auswirkungen des analysierten Bremsprofils auf die Fahrzeuggeschwindigkeit überprüft, um sicherzustellen, dass die Fahrzeuggeschwindigkeit nicht negativ wird.

– Die Monte Carlo Simulation wurde automatisch gestoppt, sobald die erforderliche Anzahl von Bremsereignissen basierend auf der Bremsrate und der gewünschten Simulationsperiode erreicht war. Diese Änderung wird im folgenden Kapitel näher erläutert. Im ursprünglichen Modell wurde nach Abschluss der Simulation überprüft, ob die Simulationsperiode die Wiederkehrperiode überschritten hatte.

– Die charakteristischen Werte der Bremskraft wurden neu mit der Block-Maxima-Methode aus der Theorie der Extremwertwertverteilungen bestimmt. Im ursprünglichen Modell wurde der charakteristische Wert direkt aus der empirischen Wahrscheinlichkeitsverteilung der Bremskräfte ermittelt. Diese Änderung wird ebenfalls im folgenden Kapitel näher erläutert.

5.1.3 Berechnung des charakteristischen Werts der Bremskraft.

Zwei Gründe führten zur Änderung des Verfahrens zur Berechnung des charakteristischen Wertes der Bremskraft. Der primäre Grund war, dass die stark unterschiedlichen Bremsraten eine Vielzahl von Monte Carlo Simulationen erfordern würden, die im Rahmen des Projekts zeitlich nicht zu bewältigen gewesen wären. Eine Monte Carlo Simulation für eine Simulationsperiode von 1'000 Jahren benötigt bei einer Bremsrate von $R = 4.5 \cdot 10^{-7}$ (etwa durchschnittliche Bremsrate der A1) eine Rechenzeit von ca. einer Woche. Eine doppelt so grosse Bremsrate benötigt etwa doppelt so viel Rechenzeit, da die Anzahl Fahrzeuge, die den Schwellenwert überschreiten müssen, proportional mit der Bremsrate zunimmt. Das Resultat aus Kapitel 4, dass einzelne Autobahnabschnitte der A1 eine Bremsrate aufweisen, die über das Zehnfache der durchschnittlichen Bremsrate der A1 ist, beweist die dringende Notwendigkeit eines neuen Verfahrens.

Im ursprünglichen Modell wurde der charakteristische Wert der Bremskraft über den Rang der aus der Monte Carlo Simulation ermittelten Bremskräfte berechnet. Für eine hohe Wiederkehrperiode (z.B. 1'000 Jahre) stehen zur Bestimmung des charakteristischen Werts typischerweise nur zwei Datenpunkte zur Verfügung, die zudem oft weit auseinanderliegen. Dadurch ist die Bestimmung des charakteristischen Werts mit grossen Unsicherheiten verbunden. Die Monte Carlo Simulationen werden daher mehrmals durchgeführt, um einen Mittelwert bestimmen zu können. Dieses Verfahren konnte aus dem oben genannten Grund nicht angewendet werden.

Daher musste ein neues Verfahren konzipiert werden, der einerseits der beobachteten Variabilität der Bremsraten Rechnung trägt ohne gleichzeitig die Rechenzeiten ins unermessliche zu verlängern. Im Folgenden wird dieses Verfahren zur Berechnung des charakteristischen Wertes der Bremskraft dargelegt. Ausgangspunkt ist die Anzahl schwerer Fahrzeuge n_b, die den Schwellenwert übersteigen. Für einen Strassenabschnitt der Länge L_r ergibt sich die Anzahl dieser Fahrzeuge aus der Bremsrate R und der Anzahl der während der Simulationsperiode durchfahrenden schweren Fahrzeuge n_{veh} zu

$$n_b = n_{veh} \cdot L_r \cdot R \tag{11}$$

Da die Verkehrskonfiguration nicht die gesamte Simulationsperiode abbilden kann – die kleinste beträgt 100 Jahre – wird eine Verkehrskonfiguration mit einer sehr viel kürzeren Dauer eingesetzt. Dies ist unproblematisch, da die Anforderung an die Verkehrskonfiguration ist, ausreichend Verkehrsszenarien zu generieren, die den Verkehr an einem Standort abbildet. Ein Bremsereignis entspricht letztlich der Entnahme eines Verkehrsszenarios aus den Verkehrsszenarien der gesamten Wiederkehrperiode (Grundgesamtheit). Die Verkehrsszenarien einer Verkehrskonfiguration sollen daher eine repräsentative Stichprobe dieser Grundgesamtheit bilden: Da die Bremsrate klein und die Anzahl Fahrzeuge gross ist, weisen Verkehrskonfigurationen mit einer Dauer von einigen Wochen bereits ausreichend Verkehrsszenarien auf.

Enthält die Verkehrskonfiguration der Zeitdauer Δt_μ die Anzahl schwerer Fahrzeuge $n_{veh,\mu}$, so beträgt die Anzahl schwerer Fahrzeuge n_b in der Simulationsperiode P

$$n_{veh} = \frac{n_{veh,\mu}}{\Delta t_\mu} \cdot P \tag{12}$$

Sowohl Δt_μ als auch P müssen selbstverständlich die gleiche Zeiteinheit verwenden.

Da eine konkrete Realisierung der Zufallsvariable Bremskraft aus einem Bremsereignis berechnet wird, muss aus der Anzahl Fahrzeuge n_b noch die Anzahl Bremsereignisse bestimmt werden. Da bei einem Bremsereignis mehrere Fahrzeuge den Schwellenwert überschreiten können, ist die Anzahl Bremsereignisse n_{bev} kleiner als die Anzahl Fahrzeuge n_b. Führt man den Durchschnittswert dieser Fahrzeuge pro Bremsereignis $n_{veh/bev}$ ein, so folgt aus den Gleichungen (11) und (12) die Anzahl Bremsereignis n_{bev} zu

$$n_{bev} = \frac{n_b}{n_{veh/bev}} = \frac{n_{veh,\mu}}{\Delta t_\mu} \cdot \frac{L_r}{n_{veh/bev}} \cdot R \cdot P \tag{13}$$

Die Anzahl Fahrzeuge pro Bremsereignis $n_{veh/bev}$ hängt von der Brückenlänge und dem Abstand der schweren Fahrzeuge in der Verkehrskonfiguration ab. Gleichung (13) zeigt, dass die Anzahl der zu berechnenden Bremsereignisse proportional zur Simulationsperiode, der Bremsrate, der Länge des Strassenabschnitts und der Anzahl schwerer Fahrzeuge pro Verkehrskonfiguration ist. Die einzelnen Parameter haben einen unterschiedlichen Einfluss auf die empirische Wahrscheinlichkeitsverteilung der Bremskraft.

Die Simulationsperiode und die Bremsrate beeinflussen allein die Anzahl Bremsereignisse (Realisierungen der Zufallsvariable Bremskraft). Simulationsperiode und Bremsrate haben keinen Einfluss auf die Bremskraft eines Bremsereignisses. Das heisst, die Monte Carlo Simulation ergibt im Mittel die gleiche empirische Wahrscheinlichkeitsverteilung der Bremskraft, solange die Anzahl Bremsereignisse konstant gehalten wird (und die Verkehrskonfiguration und Brückenlänge unverändert bleibt).

Anders ist es bei der Länge des Strassenabschnitts, denn mit zunehmender Länge des Strassenabschnitts ist es wahrscheinlicher, dass mehrere schwere Fahrzeuge gleichzeitig bremsen. Dies beeinflusst selbstverständlich die Bremskraft eines Bremsereignisses und folglich die empirische Wahrscheinlichkeitsverteilung. Sie ändert sich, auch wenn die Anzahl Bremsereignisse n_{bev} unverändert bleibt aber z.B. die Länge halbiert und die Bremsrate verdoppelt wird.

Auch die Anzahl schwerer Fahrzeuge einer Verkehrskonfiguration beeinflusst z.B. durch die spontane Bildung von Konvois oder den Abstand zwischen den Fahrzeugen die Bremskraft eines Bremsereignisses. Auch bei einer konstant gehaltenen Anzahl Verkehrsszenarien n_{bev} führt eine Änderung dieser Parameter zu einer Änderung der empirischen Wahrscheinlichkeitsverteilung der Bremskraft und dadurch zu einem anderen charakteristischen Wert der Bremskraft.

Die oben erwähnte Eigenschaft, dass die empirische Wahrscheinlichkeitsverteilung der Bremskraft unverändert bleibt, solange das Produkt aus der Bremsrate und der Wiederkehrperiode konstant bleibt, erlaubt Änderungen der Bremsrate zu berücksichtigen, ohne eine neue Monte Carlo Simulation durchzuführen. Hier setzt die Block-Maxima-Methode im Zusammenhang mit der generalisierten Extremwertverteilung (GEV) an [25], da sie eine eindeutige Relation zwischen der Anzahl Bremsereignisse und der Widerkehrperiode erlaubt. Die alternative Peak-over-Threshold-Methode, die weniger Änderungen am Programm erlaubt hätte, wurde verworfen, da die Relation zwischen der Anzahl Bremsereignisse und der Widerkehrperiode von der Wahl des Schwellenwerts (Threshold) abhängt. Dadurch wird bei einer Extrapolation die Unsicherheit erhöht.

Bei der Block-Maxima-Methode wird wie mit einer Messreihe verfahren. Jedes simulierte Bremsereignis generiert einen Datenpunkt (Bremskraft). Die Datenpunkte, die während der Monte Carlo Simulation sukzessiv anfallen, werden in Blöcke unterteilt. Die Unterteilung erfolgt, indem Datenpunkte zusammenfasst werden, die innerhalb eines Zeitintervalls (z.B. ein Jahr) auftreten. Die Anzahl Datenpunkte in einem Block ist durch Gleichung (13) beschrieben, wenn die Simulationsperiode mit dem Zeitintervall ausgetauscht wird. Aus jeder Gruppe von Datenpunkten wird dann das Maximum bestimmt. Alle Maxima werden dann benutzt, um die Parameter der Extremwertverteilung (GEV) zu bestimmen [25].

Die daraus gewonnene GEV beschreibt "nur" mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Bremsereignis mit einer bestimmten Bremskraft auftritt. Sie sagt nichts aus über den Zusammenhang zwischen Wiederkehrperiode und charakteristischer Wert der Bremskraft. Dieser Zusammenhang wird festgelegt, indem man einem Quantil der GEV eine Wiederkehrperiode zuordnet. Die Wiederkehrperiode W wird üblicherweise als Kehrwert der Überschreitungswahrscheinlichkeit p_W festgelegt:

$$W = \frac{1}{p_W}. \tag{14}$$

Die Überschreitungswahrscheinlichkeit p_W bezieht sich dabei immer auf ein Zeitintervall (z.B. die jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit). Beträgt das Zeitintervall ein Jahr, so impliziert p_W = 0.01 eine Wiederkehrperiode von 100 Jahren. Bezieht sich die Überschreitungswahrscheinlichkeit auf ein Zeitintervall von 10 Jahren, so impliziert der gleiche Wert p_W = 0.01 eine Wiederkehrperiode von 1'000 Jahren.

Die zu einer Überschreitungswahrscheinlichkeit zugeordnete Quantile

$$q_W = 1 - p_W \tag{15}$$

besagt dann, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Wert der Bremskraft während der Dauer der Wiederkehrperiode im Mittel nicht überschritten wird. Diese Quantile definiert den charakteristischen Wert der Bremskraft und wird aus der inversen kumulativen Verteilungsfunktion (Quantilfunktion) berechnet. Solange die Anzahl der Blöcke unverändert bleibt, bleiben die Maxima der Blöcke und die GEV unverändert. Was ändert ist das zugeordnete Zeitintervall der Blöcke und mit diesem auch die zu einem Quantil zugeordnete Wiederkehrperiode.

Zusammenfassend erfolgt die Berechnung des charakteristischen Werts der Bremskraft nach folgendem Verfahren:

- Die Bremskräfte (Realisierungen der Zufallsvariable Bremskraft) werden mit einer Monte Carlo Simulation mit einer Anzahl Bremsereignisse berechnet, die durch die Verkehrskonfiguration, die Länge der Brücke, eine rechnerische Bremsrate und Simulationsperiode definiert wird (Gleichung (13)).

- Die Gesamtheit der Bremskräfte wird in eine Anzahl Blöcke unterteilt. Jeder Block weist eine Anzahl Bremskräfte auf. Für jeden Block wird das Maximum bestimmt und aus der Gesamtheit der Block-Maxima wird die GEV bestimmt.

- Mit einer spezifischen Bremsrate wird die dazu konjugierte Wiederkehrperiode bestimmt, indem das Produkt aus Bremsrate und Wiederkehrperiode gleich dem Produkt aus rechnerischer Bremsrate und Simulationsperiode ist. Mit der Quantile q_W aus Gleichung (16) wird der charakteristische Wert der Bremskraft aus der GEV bestimmt.

Die Berechnungsmethode wird in Abb. 71 an einem konkreten Beispiel erläutert. Es basiert auf eine Verkehrskonfiguration am Monte Ceneri für eine Brückenlänge von 250 m. Im linken Diagramm ist die empirische Wahrscheinlichkeitsdichte der Block-Maxima-Methode abgebildet, die sich aus 1'000 Gruppenmaxima bildet. Diese Maxima wurden jeweils aus 112'448 Bremsereignissen bestimmt. Die mit diesen Maxima berechnete GEV ist ebenfalls abgebildet. Ihre Übereinstimmung mit der empirischen Wahrscheinlichkeitsdichte ist insgesamt gut. Die GEV hat einen negativen Formparameter k, sodass sie einer Weibull-Verteilung entspricht. Diese Extremwertverteilung weist einen endlichen oberen Grenzwert auf. Dies bedeutet, dass der charakteristische Wert der Bremskraft mit zunehmender Bremsrate oder Wiederkehrperiode endlich bleibt.

Das Diagramm rechts vergleicht die Quantilwerte der empirischen Wahrscheinlichkeitsverteilung und der GEV (Quantil-Quantil-Diagramm). Die Quantilwerte der empirischen Wahrscheinlichkeitsverteilung wurden mit der heuristischen Rangmethode nach Van der Waerden (p = k/(n+1)) bestimmt [12]. Auch diese Darstellung bestätigt eine gute Übereinstimmung zwischen der empirischen Verteilung und der GEV. Die grösste Abweichung tritt beim höchsten Quantilwert (576 kN) auf. Der Wert der Bremskraft aus der empirischen Wahrscheinlichkeitsverteilung ist um 6% grösser als jener aus der GEV. Dies ist gut nachvollziehbar, denn innerhalb der Wiederkehrperiode kann ein

Ereignis auftreten, das einer grösseren Wiederkehrperiode entspricht. Die Wahrscheinlichkeit ist klein, aber nicht Null, dass z.B. das 5'000-jährige Ereignis bereits in den ersten 1'000 Jahren eintritt. Selbstverständlich kann auch ein Ereignis, das einer bestimmten Widerkehrperiode entspricht, während der Dauer dieser Wiederkehrperiode nicht eintreten. Daher nehmen die Abweichungen im Quantil-Quantil-Diagramm mit immer grösseren Quantilwerten tendenziell zu.

Abb. 72 stellt den charakteristischen Wert der Bremskraft in Funktion der Wiederkehrperiode dar, die mit der GEV berechnet wurden. Der Erwartungswert (blaue ausgezogene Kurve) ist zusammen mit den 95%-Konfidenzintervallen dargestellt. Die Unsicherheit nimmt konsequenterweise mit zunehmender Widerkehrperiode zu. Im linken Diagramm wird durch eine gelbe Kurve der charakteristische Wert der Bremskraft für eine Bremsrate dargestellt, die um einen Faktor 10 kleiner ist. Sie wurde mit der gleichen GEV berechnet, indem berücksichtigt wird, dass die Wiederkehrperiode um den Faktor 10 grösser geworden ist. Das heisst, der charakteristische Wert der Bremskraft, der auf der blauen Kurve 100 Jahre entspricht, befindet sich auf der gelben Kurve bei 1'000 Jahren. Äquivalent dazu entspricht der Wert auf der gelben Kurve bei 100 Jahren dem Wert auf der blauen Kurve bei 10 Jahren. Die Konfidenzintervalle werden selbstverständlich mittransformiert. Die Unsicherheit bis zu einer Widerkehrperiode von 1'000 Jahren nimmt dadurch ab. Dies ist konsequent, denn die Daten der Bremskräfte entsprechen der Dauer einer Simulationsperiode von 10'000 Jahren.

Analog geht man vor, wenn die Bremsrate vergrössert wird (Diagramm rechts). Eine Verdoppelung der Bremsrate impliziert eine Halbierung der Simulationsperiode. Der charakteristische Wert der Bremskraft der blauen Kurve bei einer Widerkehrperiode von 1'000 Jahren entspricht nun einer Simulationsperiode von 500 Jahren usw. Die gelbe Kurve im Diagramm entspricht dieser Transformation. Will man den charakteristischen Wert für eine Wiederkehrperiode von 5'000 Jahren berechnen, so wird extrapoliert. Die Unsicherheit nimmt dabei konsequenterweise zu.

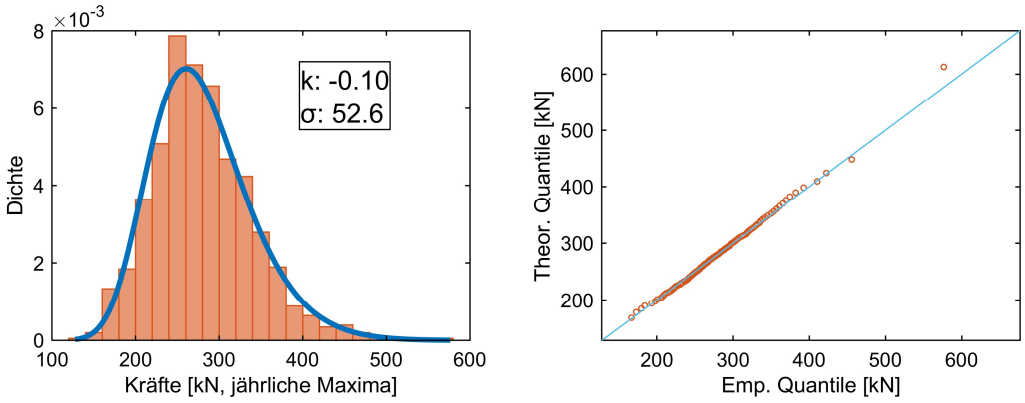


Abb. 71 *Vergleich zwischen der empirischen Wahrscheinlichkeitsverteilung und der GEV.*

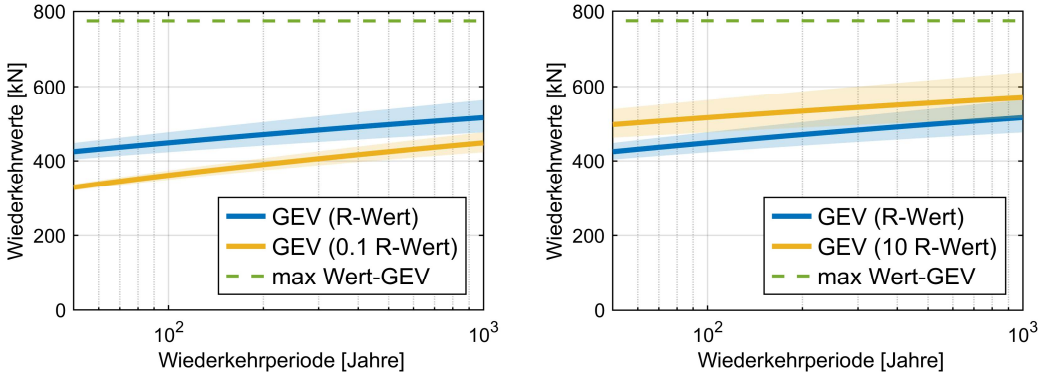


Abb. 72 *Bremskraft in Funktion der Widerkehrperiode.*

Als Ergänzung sei noch vermerkt, dass das gleiche Verfahren eingesetzt werden kann, um Bremskräfte auf Brücken zu berechnen, die in beiden Richtungen befahren werden. Dabei wird angenommen, dass jede Richtung die gleiche Verkehrskonfiguration und die gleiche Bremsrate aufweist. Diese Vereinfachung ist akzeptabel, da an vielen Standorten für jede Richtung der durchschnittliche Verkehr und der Massenstrom des Schwerverkehrs sehr ähnlich sind. Eine Verdoppelung der Anzahl schwerer Fahrzeuge bei gleichbleibender Bremsrate und gleichbleibender Anzahl Bremsereignisse bedeutet die Halbierung der Simulationsperiode. Bei gegebener Wiederkehrperiode entspricht daher der charakteristische Wert der Bremskraft einer Brücke mit einer Fahrrichtung dem Wert einer Brücke mit zwei Fahrrichtungen bei der Hälfte der Wiederkehrperiode. Dabei wird implizit angenommen, dass zwei in entgegengesetzte Richtung auftretende Bremsereignisse nicht stattfinden.

5.2 Resultate

5.2.1 Referenzwerte der Bremsrate

In Kapitel 4 wurde auf dem Autobahnnetz signifikante Unterschiede der Bremsraten festgestellt. Wie aus den Tabellen Tab. 16 bis Tab. 22 hervorgeht, variiert die Bremsrate um etwa eine Grössenordnung. Diese grosse Variation führt jedoch nicht zu einer ähnlich grossen Variation der charakteristischen Werte der Bremskraft. Wie bereits erwähnt, beeinflusst die Bremsrate bei gegebener Verkehrskonfiguration und Brückenlänge die Anzahl Bremsereignisse der Monte Carlo Simulation. Mehr Bremsereignisse bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit, dass ein extremes Verkehrsszenario (mehrere schwere Fahrzeuge mit hoher Geschwindigkeit und kurzem Abstand zueinander) mit stark beladenen Fahrzeugen eine sehr starke Bremsung ausführen, zunimmt. Dies erhöht tendenziell die Maxima der Blöcke und verschiebt die GEV in Richtung grösserer Bremskräfte. Dadurch nimmt der charakteristische Wert der Bremskraft zu.

Die Grössenordnung dieser Zunahme lässt sich an der Zunahme des charakteristischen Werts in Funktion der Wiederkehrperiode beobachten. Eine Wiederkehrperiode von 100 Jahren enthält 1/10 der Bremsereignisse einer Wiederkehrperiode von 1’000 Jahren. Aus Abb. 72 geht hervor, dass der charakteristische Wert von 448.4 kN auf 516.4 zunimmt. Diese bescheidene Zunahme von 15% im Vergleich zur Zunahme der Bremsereignisse um den Faktor 10, rührt davon, dass die Kombination mehrerer extremer Komponenten immer unwahrscheinlicher wird (Produkt von unwahrscheinlichen Ereignissen).

In der praktischen Umsetzung des im vorhergehenden Kapitel besprochenen Vorgehens, wird für eine Verkehrskonfiguration und eine Brückenlänge eine rechnerische Bremsrate und eine Simulationsperiode gewählt, mit der die Monte Carlo Simulation durchgeführt wird. Die daraus berechnete GEV dient dann zur Berechnung der charakteristischen Werte der Bremskraft für andere Bremsraten. Die für die Monte Carlo Simulation gewählte Bremsrate (Referenzwert) sollte so gewählt werden, dass sie den Variationsbereich angemessen abdeckt. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass eine Extrapolation mit grösseren Unsicherheiten behaftet ist als eine Interpolation.

Die Bremsrate der A1 wird als Referenz verwendet, da auf der A1 die meisten Kilometer zurückgelegt wurden und somit repräsentativer ist. Aus diesem Grund ist der Mittelwert für das gesamte Autobahnnetz nahezu identisch mit dem Mittelwert der A1. Ausserdem weisen die A1 und A2 nahezu ähnliche Bremsraten auf. Abb. 73 vergleicht das Verhältnis zwischen verschieden Bremsraten (mit Schwellenwert 3 ms^{-2}) und der durchschnittlichen Bremsrate der A1. Als blaue und hellblaue Punke sind die Bremsraten der Autobahn Abschnitte aus den Tab. 19, Tab. 20 und Tab. 21 dargestellt. Die Bremsraten der in Kapitel 4 besprochenen Strassenabschnitte der A1 Verzweigung Birrfeld, Limmattalerkreuz, Wallisellen und Verzweigung Zürich Ost sind ebenfalls (als Horizontale Line) dargestellt. Die Bandbreite der Bremsraten beträgt etwa zwei Grössenordnungen (0.3 bis 30). Dieses Verhältnis wird im Folgenden als Häufigkeitsfaktor H bezeichnet.

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die meisten Abschnitte der A1 und A2 in einem Bereich des Häufigkeitsfaktors zwischen 0.5 bis 2 fallen. Um diese Fälle abzudecken, würde die Wahl der durchschnittlichen Bremsrate der A1 für die Monte Carlo Simulation völlig genügen. Die Berechnungen des charakteristischen Werts der lokalen Strassenabschnitte der A1 würden dann jedoch starke Skalierungen der Wiederkehrperiode (etwa Häufigkeitsfaktor 30 für Zürich Ost) erfordern. Um diese Strassenabschnitte angemessen abzudecken, ist daher für die Monte Carlo Simulation eine Bremsrate mit einem Häufigkeitsfaktor von etwa 3.5 gewählt worden (gelbe Linie in Abb. 73). Dadurch reduziert sich die Skalierung der Wiederkehrperiode für den Standort Zürich Ost auf etwa den Häufigkeitsfaktor 8.

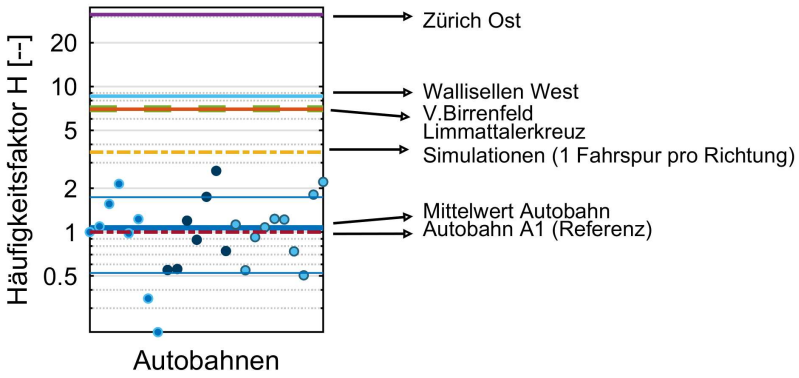


Abb. 73 *Häufigkeitsfaktoren von Autobahnen und Autobahnabschnitten.*

5.2.2 Simulationsparameter

Wie in den vorhergehenden Vorgängerprojekten AGB 2011/003 und AGB 2017/004 werden die Verkehrsdaten von den Standorten Denges und Monte Ceneri verwendet. Diese Standorte repräsentieren den nationalen (Denges auf der A1) und den internationalen (Monte Ceneri auf der A2) Schwerverkehr, die unterschiedliche Dichte, Zusammensetzung und Gewicht des Schwerkehrs aufweisen. Zur Charakterisierung des Verkehrs wurden Daten aus einem Zeitraum von vier Wochen mit einem hohen Schwerverkehrsaufkommen gewählt. Die Zeiträume wurden nach den Kriterien Datenqualität (geringer Datenverlust) und Homogenität (keine Feiertage an Werktagen) ausgewählt.

Detaillierte Verkehrsdaten für diese Standorte, die beide Fahrtrichtungen und verschiedene Jahre berücksichtigen, finden sich im Bericht des Projekts AGB 2017/004 [15]. An dieser Stelle werden kurz die wichtigsten Eckdaten der in den Simulationen verwendeten Verkehrskonfiguration kurz zusammengefasst. Die Zahl der schweren Fahrzeuge ist an den beiden Standorten etwa gleich (ca. 40’000). Da die Anzahl leichter Fahrzeuge in Denges (96’000) deutlich höher als in Monte Ceneri (50’000) ist, ist die Dichte der schweren Fahrzeuge stark unterschiedlich. Der durchschnittliche wöchentliche Massenstrom an Werktagen beträgt am Standort Monte Ceneri 348.3 kt gegenüber 169.7 kt am Standort Denges. Am Standort Monte Ceneri wird der Schwerverkehr von Sattelzügen geprägt, während sich der Schwerverkehr in Denges fast gleichmässig auf Motorwagen, Motorwagen mit Anhängern und Sattelzüge verteilt. Zur Förderung der Lesbarkeit werden nachfolgend die Verkehrscharakteristiken dieser beiden Standorte verkürzt mit Denges und Monte Ceneri bezeichnet.

Die für die Simulation relevanten Eingangsparameter sind in Tab. 25 zusammengefasst. Es wurden nur Verkehrskonfigurationen aus dem Projekt AGB 2017/004 verwendet, die auf der Grundlage des Markov-Kette-Ansatzes generiert wurden [15]. Dadurch lassen sich die neuen Ergebnisse mit den Ergebnissen des Projekts AGB 2017/004 vergleichen. Die Verkehrskonfigurationen basieren auf die Verkehrsdaten der rechten Spur. Die linke Spur (Überholspur) wurde nicht berücksichtigt, da sie wegen der in der Regel geringen Dichte

schwerer Fahrzeuge keinen nennenswerten Beitrag an den Bremskräften leistet [12]. Die Verkehrskonfigurationen mit Platoons beziehen sich auf Verkehrsszenarien, in denen schwere Fahrzeuge in enger Formation mit geringen Abständen und automatischer Fahrkontrolle hintereinanderfahren (Platoons). Diese Formationen bestehen in diesem Szenario aus 3 oder 4 Fahrzeugen. Der Anteil der schweren Fahrzeuge, die in Platoons unterwegs sind, beträgt in diesem Szenario 40 % und wird mit dem Begriff Durchdringung bezeichnet.

Die Brückenlängen L_b variieren zwischen 5 und 500 m, wobei unter dem Begriff Brückenlänge nicht notwendigerweise deren totale Länge zu verstehen ist, sondern die Distanz zwischen zwei benachbarten Fahrbahnübergängen, die es einem Brückenteil erlaubt, sich in Längsrichtung unabhängig von den anderen Brückenteilen zu bewegen. Diese Bewegung während eines Bremsereignisses führt zu dynamischen Effekten, die mit der Grundfrequenz (f) der Brücke in Längsrichtung berücksichtigt werden. Diese wurde zwischen 0.5 Hz bis 10 Hz (Periode zwischen 2 bis 0.1 s) variiert. Der untere Wert stellt schwimmend gelagerte Brücken mit weicher Lagerung dar. Der obere Wert entspricht einer sehr steif gelagerten Brücke. Die Dämpfung der Brücke von 7% (Lehr'sches Dämpfungsmass) entspricht dem Wert, der in den Vorgängerprojekten AGB 2011/003 und AGB 2017/004 verwendet wurde. Im Vorgängerprojekt Projekt AGB 2011/003 wurde gezeigt wurde, dass moderate Dämpfungen die Ergebnisse nicht signifikant beeinflussen [9].

***Tab. 25** Eingangsparameter der Simulationen.*

Verkehrscharakteristik	Denges (2008)
	Monte Ceneri (2017)
	Denges (2008) mit Platoons
	Monte Ceneri (2017) mit Platoons
Brückenlänge L_b [m]	5-10-15-20-25-50-75-100-150-200-250-350-500
Fahrspur	1
Richtungen	2
Eigenfrequenz f	10 Hz, 2 Hz, 1.0 Hz, 0.50 Hz
Dämpfung ξ	7 %
Bremsrate	4.52·10-7
Simulationsperiode	1’000 Jahre

5.2.3 Resultate

Einfluss der Eigenfrequenz

Abb. 74 zeigt die charakteristischen Werte der Bremskraft in Funktion der Brückenlänge ohne Platoons für eine Wiederkehrperiode von 1’000 Jahren für Monte Ceneri und Denges. Die Ergebnisse zeigen erwartungsgemäss, dass die charakteristischen Werte mit abnehmender Brückenfrequenz zunehmen. Die Ursache ist, dass das Frequenzspektrum der Einwirkung starke Komponenten unterhalb von 4 Hz aufweist.

Der charakteristische Wert der Bremskraft nimmt bei kurzen Brückenlängen stark zu, um dann mit zunehmender Länge immer stärker abzuflachen. Bei grossen Brückenlängen wird fast ein stationärer Zustand erreicht. Die Zunahme der Bremskraft wir grob durch zwei Parameter angetrieben: die Anzahl gleichzeitig auf einer Brücke bremsenden Fahrzeuge und die Anzahl Bremsereignisse, die proportional zur Länge sind. Bei kurzen Brückenlängen (kleiner als ca. 40 m) wird die Bremskraft durch ein einziges Fahrzeug verursacht. Die starke Zunahme rührt daher, dass die Anregungskraft proportional zum Anteil der Länge des Fahrzeugs, das sich auf der Brücke befindet, und aufgrund der kurzen Längen die Verdoppelung der Bremsereignisse kurz aufeinander folgen (5, 10, 20, 40 m).

Dadurch wächst bei jeder aufeinander folgenden Länge die Wahrscheinlichkeit, dass extreme Parameterwerte wie Gewicht des Fahrzeugs, Spitzenwert Verzögerung usw. kombiniert werden.

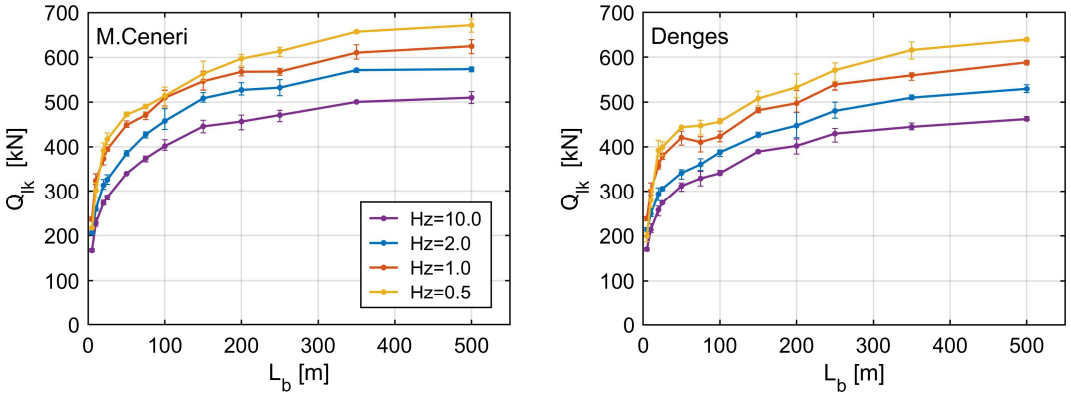


***Abb. 74** Einfluss der Eigenfrequenz auf den charakteristischen Wert der Bremskraft.*

Bei Brückenlängen ab ca. 40 m werden zunehmend Bremsereignisse mit 2 gleichzeitig auf der Brücke bremsenden Fahrzeugen massgebend. Im Verkehr treten zwei schwere Fahrzeuge hintereinander seltener als ein schweres Fahrzeug auf. Die Distanz zwischen den Fahrzeugen und die Reaktionszeit des Fahrers führen zudem zu zeitlich verzögerten Einwirkungen der Fahrzeuge, sodass die superponierte Einwirkung kleiner ist als jene, die von zwei synchron bremsenden Fahrzeugen hervorgerufen würde. Darüber hinaus wird es unwahrscheinlicher, dass beide Fahrzeuge extreme Parameterwerte annehmen. Dadurch beginnt die Zunahme des charakteristischen Werts sich abzuflachen.

Mit zunehmender Länge werden dann 3, 4 usw. Fahrzeuge gleichzeitig auf einer Brücke bremsende Fahrzeuge massgebend. Die oben genannten Gründe führen zu einer weiteren Abflachung der Zunahme des charakteristischen Werts. Ab einer bestimmten Brückenlänge wird der Zuwachs nicht mehr durch die zunehmende Anzahl gleichzeitig bremsender Fahrzeuge angetrieben, weil diese Konvois viel zu selten auftreten oder weil die Fahrzeuge viel zu weit voneinander entfernt sind, um gleichzeitig zu bremsen. Der Zuwachs wird nur noch durch zunehmend unwahrscheinlich werdende extreme Parameterwerte angetrieben, sodass nahezu ein stationärer Zustand auftritt.

Die Unterschiede sind hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass aufgrund der höheren Dichte des Schwerverkehrs am Monte Ceneri 3, 4 oder 5 gleichzeitig bremsende schwere Fahrzeuge viel wahrscheinlicher auftreten als in Denges (Abb. 74).

Zur Beschreibung der dynamischen Auswirkungen wird – analog zum Projekt AGB 2017/004 – der dynamische Amplifikationsfaktor α_{dyn} verwendet, der als Verhältnis zwischen dem charakteristischen Wert der Bremskraft bei einer Eigenfrequenz und dem charakteristischen Wert bei der Eigenfrequenz 10 Hz festgelegt ist. Er beschreibt die Zunahme des charakteristischen Werts bezüglich einer Brücke mit sehr steifer oder fester Lagerung.

Abb. 75 zeigt den dynamischen Amplifikationsfaktor α_{dyn} für Monte Ceneri und Denges. Er ist für alle Eigenfrequenzen ab einer Brückenlänge von ca. 100 m etwa konstant. Bei kürzeren Brücken nimmt α_{dyn} mit abnehmender Brückenlänge zu. Bei einer Eigenfrequenz von 2 Hz ist die Zunahme auf Brückenlängen unter 10 m beschränkt. Dies ist jedoch ein Artefakt des Modells, der aus der Vereinfachung entsteht, dass die Anregungskraft nicht auf die einzelnen Achsen des Fahrzeugs aufteilt werden, sondern proportional zum Anteil der Länge des Fahrzeugs ist, das sich auf der Brücke befindet. Da schwere Fahrzeuge immer länger als etwa 8 m sind, befindet sich bei einer Brückenlänge von 5 m immer nur ein Teil des Fahrzeugs auf der Brücke. Eine abrupte Änderung von α_{dyn} zu kleineren Werten ist auch bei einer Eigenfrequenz von 0.5 Hz zu beobachten.

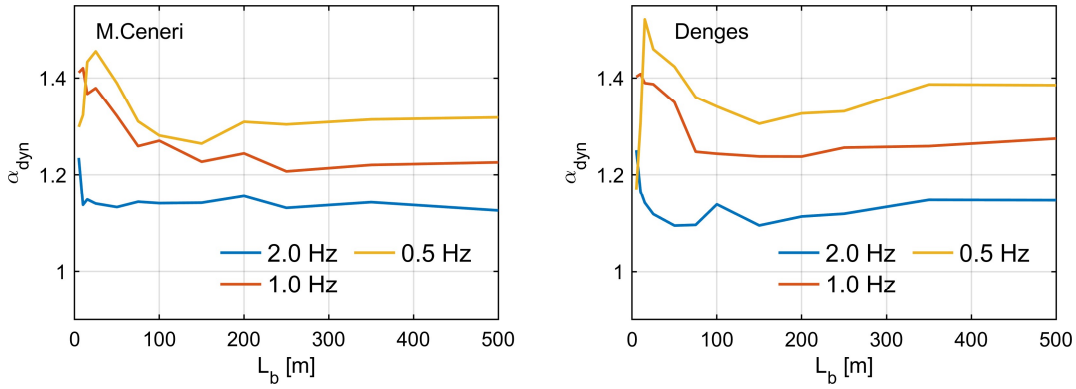


***Abb. 75** Dynamischer Amplifikationsfaktor α_{dyn}.*

Die Zunahme des dynamischen Amplifikationsfaktor α_{dyn} unter 100 m lässt sich erklären, wenn die Dauer der Einwirkungen der Bremsereignisse für verschiedene Brückenlängen analysiert wird. Abb. 76 (links) zeigt die Verkehrsszenarien einer 150 m lange Brücke, die eine Bremskraft in der Nähe des charakteristischen Werts (rote Linie) erzeugen. Das Gewicht und die Geschwindigkeit der einzelnen Fahrzeuge sind unter jedem Fahrzeug angegeben. Die Brückenlänge ist durch den blau schattierten Bereich dargestellt. Das massgebende Verkehrsszenario beinhaltet mehrere schwere Fahrzeuge, die gleichzeitig auf der Brücke bremsen. Auf der rechten Seite der Abbildung sind die Zeitverläufe der Einwirkungen der Bremsereignisse auf die Brücke dargestellt. Die Dauer der Einwirkungen beträgt in der Regel mehr als 5 Sekunden, da mehrere schwere Fahrzeuge beteiligt sind. Abb. 77 zeigt analog zu Abb. 76 Verkehrsszenarien und Einwirkungen für eine Brückenlange von 25 m. In diesem Fall beträgt die Dauer der Einwirkung etwa 2 Sekunden, da infolge der kurzen Brückenlänge nur ein Fahrzeug die Einwirkung verursacht.

Die Einwirkungen aus einem Bremsereignis haben einen Zeitverlauf, der näherungsweise die Form eines Halbsinus-Impulses aufweist. Ein solcher Impuls führt zu starken Antworten des linearen Einmassenschwingers, wenn die Dauer der Einwirkung etwa 80% seiner Schwingungsperiode entspricht [26]. Da eine Dauer der Einwirkung von 2 s der Schwingungsperiode eines Einmassenschwingers mit einer Eigenfrequenz von 0.5 Hz entspricht, ist eine starke dynamische Antwort des Einmassenschwingers zu erwarten, die folglich zu einer grösseren Bremskraft führt. Da mit zunehmendem Verhältnis zwischen Dauer der Einwirkung und Schwingungsperiode die dynamische Antwort nachlässt, weisen längere Brücken oder Brücken mit einer kürzeren Schwingungsperiode (höhere Eigenfrequenz) einen kleineren dynamischen Amplifikationsfaktor α_{dyn} auf.

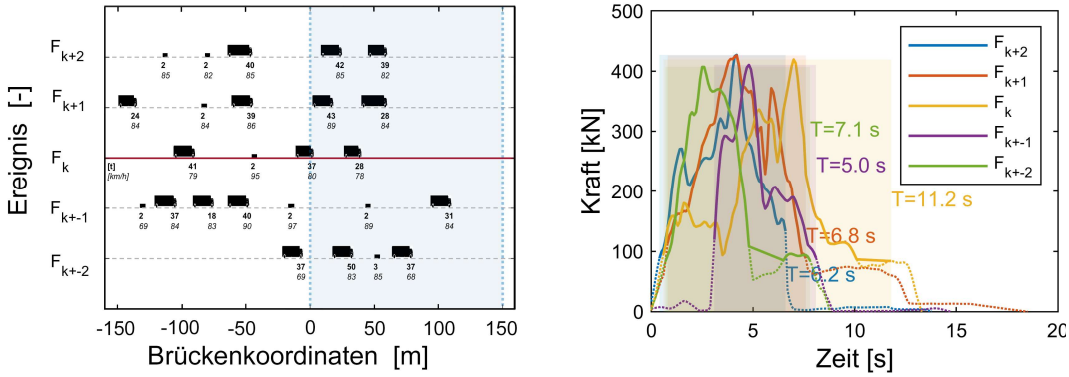


***Abb. 76** Verkehrsszenarien (links) und dazugehörige Einwirkungen (rechts) bei einer 150 m langen Brücke.*

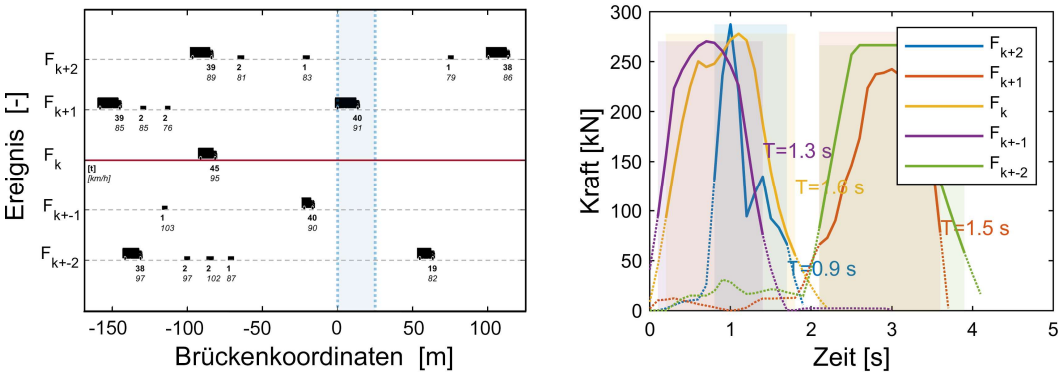


Abb. 77 *Verkehrsszenarien (links) und dazugehörige Einwirkungen (rechts) bei einer 25 m langen Brücke.*

Die praktischen Auswirkungen des zunehmenden dynamischen Amplifikationsfaktors für Brücken unter 100 m Länge ist sehr begrenzt, da Brücken dieser Länge sehr oft mit steifer Lagerung ausgeführt werden, da die durch Temperaturausdehnung, Kriechen und Schwinden hervorgerufenen Längskräfte unproblematisch sind. Integrale Brücken – Brücken ohne Lager und Fahrbahnübergänge – können eine Länge von weit über 50 m aufweisen. Semi-integrale Brücken – Brücken mit Lager aber ohne Fahrbahnübergänge – können noch grössere Längen abdecken. Diese Brücken weisen Eigenfrequenzen in Längsrichtung auf, die grösser als 2 Hz sind.

Einfluss der Bremsrate

Abb. 78 zeigt die charakteristischen Werte der Bremskraft für Monte Ceneri und Denges mit einem Verkehr in beiden Richtungen und einer Wiederkehrperiode von 1'000 Jahren. Die Eigenfrequenz der Brücke beträgt 10 Hz (steife Lagerung). Die charakteristischen Werte für die durchschnittliche Bremsrate der A1 (Häufigkeitsfaktor H = 1) ist als violette Kurve dargestellt. Für Bremsraten im typischen Bereich von Autobahnen und Autobahnabschnitten mit Häufigkeitsfaktoren zwischen 0.5 und 2 bleiben die Auswirkungen auf die charakteristischen Werte klein. Sie schwanken in einer Bandbreite von etwa +/- 5%. Dies wird visuell durch den blau schattierten Bereich zwischen den blauen Linien dargestellt.
Nimmt der Häufigkeitsfaktor auf 10 bzw. 20 zu, um die Bremsraten der lokalen Abschnitte der A1 abzudecken, nehmen die charakteristischen Werte erwartungsgemäss zu. Die durchschnittlichen Zunahmen betragen etwa 13% für Monte Ceneri und 16% für Denges. Die Zunahme zwischen dem Häufigkeitsfaktor 10 und 20 ist deutlich kleiner als die Zunahme des Häufigkeitsfaktor zwischen 1 und 10. Dies ist darauf zurückzuführen, dass für jede Brückenlänge die GEV eine Gumbel-Verteilung mit endlichem Grenzwert ist. Weitere Zunahmen des Häufigkeitsfaktors führen daher zu immer kleineren Zunahmen des charakteristischen Werts.

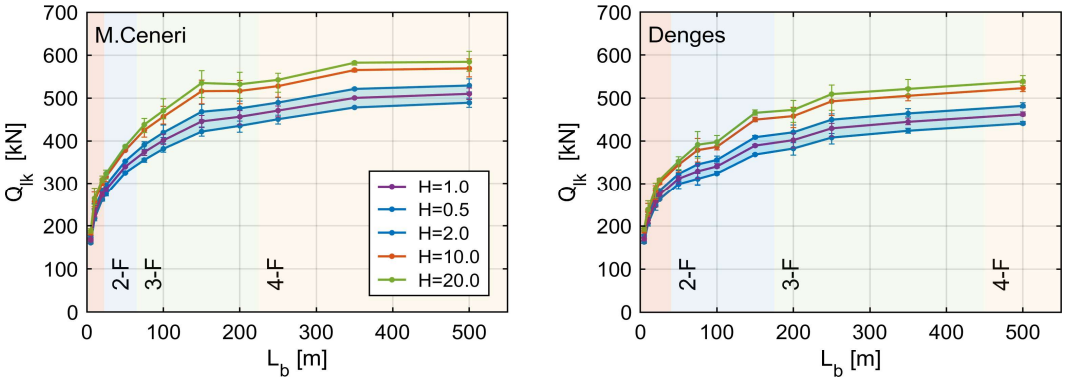


Abb. 78 *.Einfluss des Häufigkeitsfaktors auf den charakteristischen Wert der Bremskraft,2-F, 3-F, 4-F beziehen sich auf die Anzahl der Fahrzeuge (2 Fahrzeuge, 3 Fahrzeuge, 4 Fahrzeuge).*

Abb. 79 zeigt die relative Auswirkung des Häufigkeitsfaktors α_H auf den charakteristischen Wert bezogen auf einen Häufigkeitsfaktor H=1. Die schattierten Bereiche decken den Variationsbereich infolge der verschiedenen Eigenfrequenzen ab. Für niedrige Häufigkeitsfaktoren (H = 0.5 und H = 2) bleibt der relative Einfluss über den gesamten Längenbereich praktisch konstant und die Variation infolge der Eigenfrequenz ist sehr klein. Auch zwischen Monte Ceneri und Denges sind kaum Unterschiede festzustellen. Bei hohen Häufigkeitsfaktoren (H = 10 und H = 20) variiert der Einfluss über den Längenbereich und auch die Variation infolge der Eigenfrequenz nimmt deutlich zu. Die Unterschiede bleiben insgesamt wenig ausgeprägt.

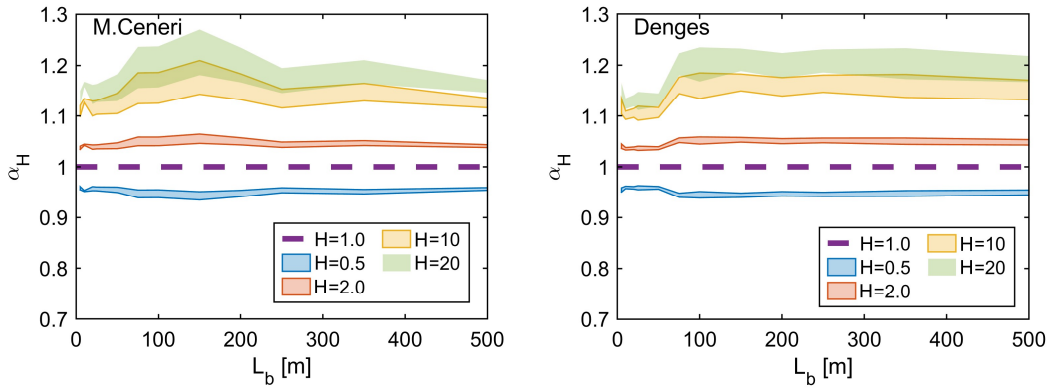


***Abb. 79** Relative Auswirkung des Häufigkeitsfaktors α_H auf den charakteristischen Wert.*

Einfluss der Wiederkehrperiode

Abb. 80 vergleicht die Ergebnisse für verschiedene Wiederkehrperioden für Monte Ceneri und Denges mit einer Eigenfrequenz der Brücke von 10 Hz. Die charakteristischen Werte der Bremskraft sind für Wiederkehrperioden von 5'000, 1'000, 500 und 100 Jahren dargestellt. Das Beispiel zeigt, dass die Verringerung der Wiederkehrperiode auf 500 Jahre eine kleine Auswirkung hat. Um eine signifikante Reduktion des charakteristischen Werts zu erreichen, müssen die Wiederkehrperioden auf 100 Jahren reduziert werden.

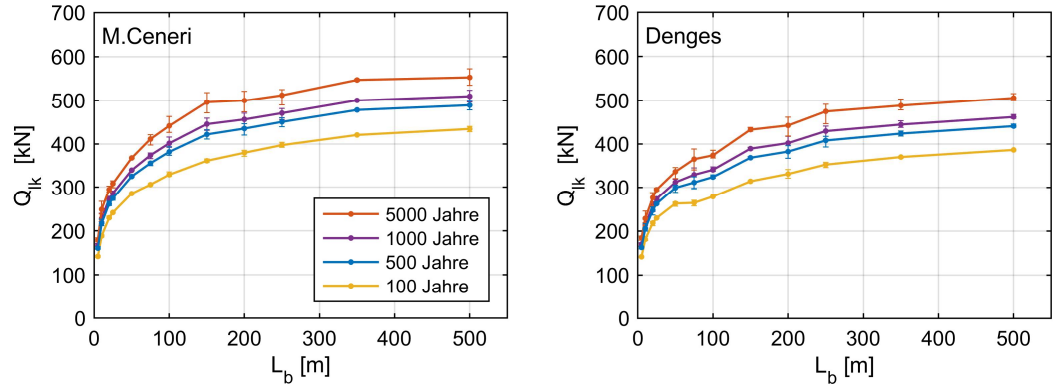


***Abb. 80** Einfluss der Wiederkehrperiode auf den charakteristischen Wert.*

Das Verhältnis α_W zwischen dem charakteristischen Wert einer Wiederkehrperiode und dem der Wiederkehrperiode 1'000 Jahre ist in Abb. 81 dargestellt. α_W variiert wenig sowohl mit der Brückenlänge wie auch mit dem Verkehr. Bei einer Halbierung der Wiederkehrperiode von 1'000 auf 500 Jahre beträgt das Verhältnis α_W = 0.95. Für eine Wiederkehrperiode von 100 Jahren nimmt das Verhältnis das Verhältnis α_W auf 0.85 ab. Die Variation zwischen den Verkehren und den Brückenlängen nimmt dabei etwas zu. Wird die Wiederkehrperiode auf 5'000 Jahre erweitert, so nimmt das Verhältnis α_W auf etwa 1.1 zu.

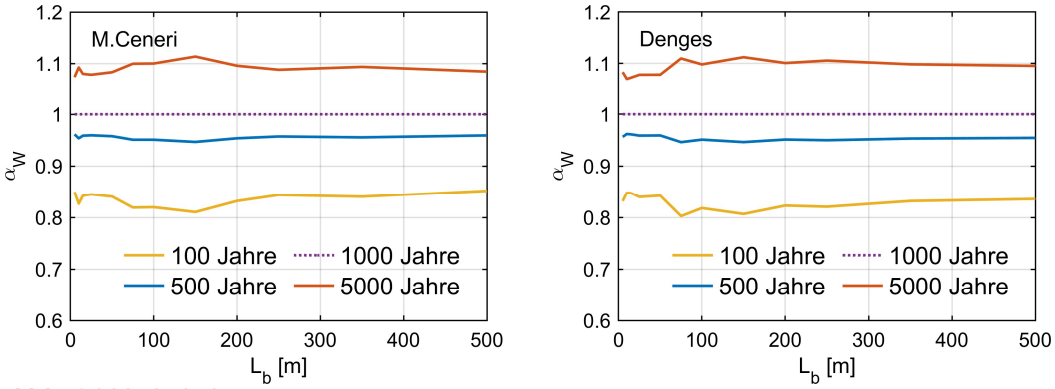


Abb. 81 *Verhältnis α_W.*

5.2.4 Vergleich der Resultate zum Vorgängerprojekt AGB 2017/004

In diesem Abschnitt werden die charakteristischen Werte der Bremskraft, die in diesem Projekt errechnet wurden, mit den Werten aus dem vorangehenden Projekt AGB 2017/004 [15] verglichen. Die Ergebnisse des Vorgängerprojekts AGB 2011/003 werden nicht berücksichtigt, da sie auf eine unterschiedliche Verkehrskonfiguration basierten. Das Ziel ist der Einfluss der aktualisierten Bremsrate und des verbesserten Datensatzes aufzuzeigen. Im Weiteren werden zur Vereinfachung der Sprache die Resultate dieses Projekts als neue Modellsimulation und die Resultate des Projekts AGB 2017/004 als alte Modellsimulation bezeichnet.

Verkehr ohne Platoons

Abb. 82 vergleicht die charakteristischen Werte der Bremskräfte für Monte Ceneri und Denges (Eigenfrequenz f = 10 Hz, Wiederkehrperiode W = 1'000 Jahre). Die violette Kurve bezieht sich auf die neue und die blaue Kurve auf die alte Modellsimulation. Sowohl für Monte Ceneri als auch für Denges weist die alte Modellsimulation deutlich grössere charakteristische Werte als die neue auf. Die Reduktion beträgt im Mittel rund 27% für Verkehr Monte Ceneri und 25% für Denges.

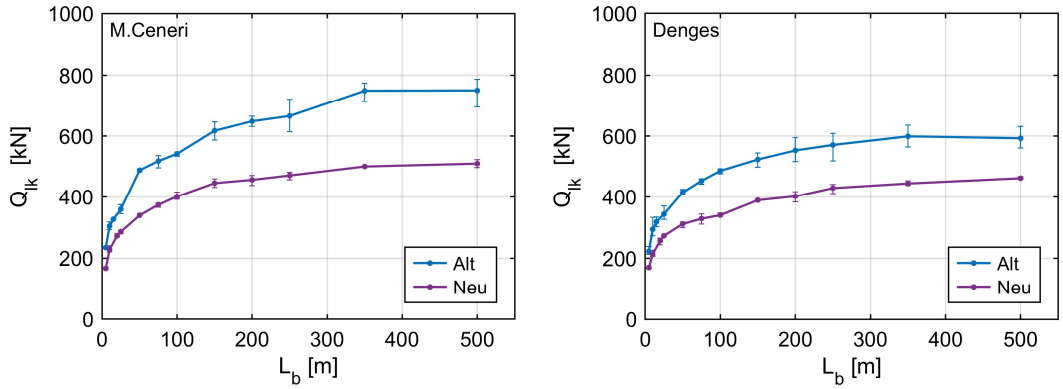


Abb. 82 *Vergleich der charakteristischen Werte der Bremskraft zwischen der neuen und alten Modellsimulation.*

Die Reduktion des charakteristischen Werts der Bremskraft hat folgende Gründe:

– Die Häufigkeit starker Bremsereignisse ist im Vergleich zur alten Modellsimulation deutlich kleiner. Die Bremsrate bei einem Schwellenwert von 4 ms^{-2} verkleinerte sich aufgrund der Resultate der Monitoringkampagne um den Faktor 7 von $8.0 \cdot 10^{-7}$ auf etwa $1.24 \cdot 10^{-7}$ (Durchschnitt Autobahnnetz). Eine solche Änderung der Bremsrate ist äquivalent zu einer Reduktion der Wiederkehrperiode um denselben Faktor. Aus Abb. 81 geht hervor, dass dadurch der charakteristische Wert weitestgehend unabhängig vom Verkehr und der Brückenlänge um etwa 15% abnimmt.

– Dadurch, dass neu das führende Fahrzeug eines Verkehrsszenarios, das ein Bremsereignis auslöst, immer ein schweres Fahrzeug ist, führt tendenziell zu kleineren Bremskräften. In der alten Modellsimulation konnte ein leichtes Fahrzeug das führende Fahrzeug sein. Leichte Fahrzeuge können härtere Bremsvorgänge (kürzere Bremsvorgänge mit höheren maximalen und mittleren Verzögerungen) ausführen als schwere Fahrzeuge. Dies führte dazu, dass schwere Fahrzeuge keine geeigneten Verzögerungsprofile in der Datenbank fanden, um einen Zusammenstoss mit dem vorangehenden Fahrzeug zu vermeiden. Um dies zu unterbinden, wurde ein synthetisches Verzögerungsprofil verwendet, das eine extreme Bremsverzögerung eines schweren Fahrzeugs simulierte. Während der Monitoringkampagne sind solch extreme Verzögerungsprofile jedoch nicht beobachtet worden. Dieses synthetische Verzögerungsprofil, trat sehr oft bei Bremsereignissen auf, die den charakteristischen Wert bestimmten.
– Die Erweiterung der Datenbank der Bremsprofile schwerer Fahrzeuge führt ebenfalls dazu, dass die Bremskräfte tendenziell abnehmen, da die grössere Auswahl erlaubt, weniger auf das synthetische Verzögerungsprofil zurückzugreifen.
– Auch die neu eingeführte Skalierung der Verzögerungsprofile reduziert den Einsatz des synthetischen Verzögerungsprofils und vermindert dadurch tendenziell die Bremskräfte.

Die Reduktion des Einsatzes des synthetischen Verzögerungsprofils ist in Abb. 83 deutlich ersichtlich. Dargestellt ist die kumulierte Häufigkeit des Spitzenwerts der Verzögerung der beteiligten Fahrzeuge, die mit dem charakteristischen Wert vergleichbare Bremskräfte hervorrufen (+/-10 %). Im Projekt AGB 2017/004 (Platooning) führen 40% bis 50% der Fahrzeuge eine Bremsung mit dem synthetischen Verzögerungsprofil durch. Dies erkennt man an der plötzlichen Zunahme der kumulierten Häufigkeit bei 7 ms^{-2}. Die kumulierte Häufigkeit aufgrund des aktuellen Modells weist hingegen eine nahezu gleichmässige Häufigkeit der Spitzenwerte auf. Das synthetische Verzögerungsprofil kommt praktisch nicht mehr zum Einsatz. Durch die Skalierung können hingegen Verzögerungsprofile auftreten, die einen Spitzenwert grösser als 7 ms^{-2} (bei 10% der Fahrzeuge) aufweisen. Einen Spitzenwert von 8 ms^{-2} können bei einer Vollbremsung durchaus auftreten, wie die Versuche an der Brücke Matran zeigten [24].

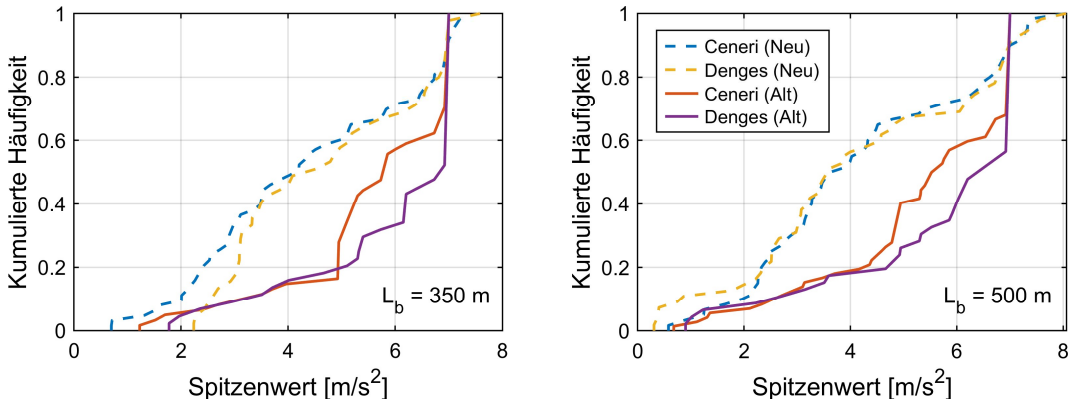


***Abb. 83** Kumulative Häufigkeit des Spitzenwerts der Verzögerung für 350 m (links) und 500 m (rechts) lange Brücken.*

Verkehr mit Platoons

Im Projekt AGB 2017/004 [15] wurden die Auswirkungen von Platoons auf Schweizer Brücken ausführlich untersucht. Platoons führten unter bestimmten Bedingungen zu einer massiven Zunahme der Bremskräfte, da in einem Platoon der Abstand zwischen den Fahrzeugen klein ist (etwa 10 m) und die Fahrzeuge praktisch zeitsynchron bremsen. Den grössten Einfluss haben die Anzahl der in einem Platoon fahrenden Fahrzeuge (2, 3 oder 4) und der Prozentsatz des in Platoons fahrenden Güterverkehrs (Durchdringungsrate). In diesem Projekt, wurden nur die Szenarien mit Platoons bestehend aus 3 und 4 Fahrzeugen bei einer Durchdringungsrate von 40% untersucht.

Abb. 84 zeigt den charakteristischen Wert der Bremskraft für den Verkehr mit Platoons für die beiden Verkehre für eine steif (links) und schwimmend gelagerten Brücke mit einer Eigenfrequenz von 0.5 Hz (rechts). Die Wiederkehrperiode beträgt 1'000 Jahre. Zum Vergleich sind auch die charakteristischen Werte mit einem Güterverkehr ohne Platoons dargestellt. Wie zu erwarten war, führen Platoons auch mit dem neuen Modell zu einer massiven Zunahme des charakteristischen Werts der Bremskraft. Die Zunahme beträgt über den gesamten Längenbereich etwa 40% für 3 Fahrzeuge (PL-3) und 70% für 4 Fahrzeuge (PL-4).

Nur bei Brücken, die kürzer als 25 Meter sind, wird kein Platooning-Effekt beobachtet, da die Bremskraft in diesen Fällen weiterhin von einem einzigen Fahrzeug erzeugt wird. Für Längen grösser als 25 m führen Platoons vorerst zu einem steilen Anstieg der Bremskraft, da er wie ein einziges Fahrzeug wirkt. Erst ab einer Länge, die etwa der Länge eines Platoons entspricht, flacht der weitere Anstieg der Bremskraft ab. Bei 3 Fahrzeugen in einem Platoon entspricht dies einer Länge von etwa 100 m und bei 4 Fahrzeugen einer Länge von etwa 130 m. Ab diesen Längen führen die vorangehenden Unterkapitel beschriebenen Mechanismen zu einer geringeren Zunahme der Bremskräfte mit zunehmender Länge. Die Zunahme ist jedoch grösser als für den Verkehr ohne Platoons, da durch die Platoons die Wahrscheinlichkeit von 3 und mehr gleichzeitig bremsenden Fahrzeugen grösser ist. Zudem bremsen einige dieser Fahrzeuge synchron. Daher ist bei einer Länge von 500 m noch kein stationärer Zustand zu erkennen.

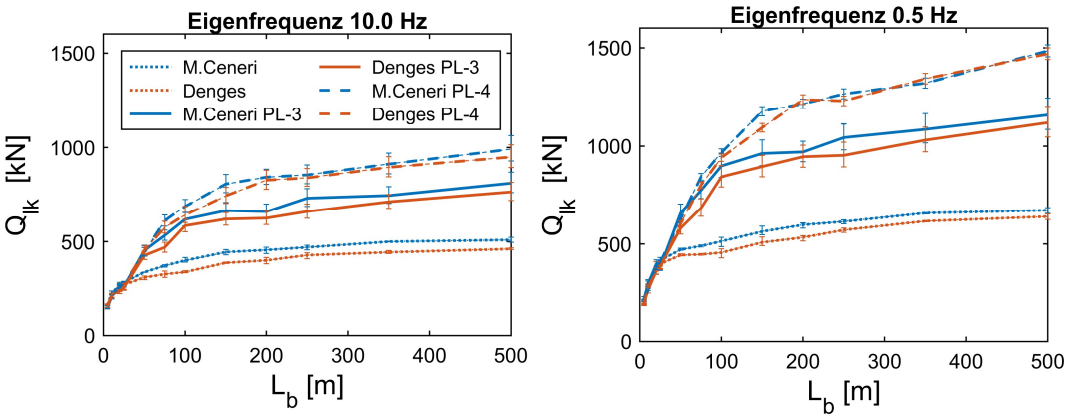


***Abb. 84**. Vergleich des charakteristischen Werts der Bremskraft für Verkehr mit und ohne Platoons.*

Ebenfalls wie erwartet nimmt der charakteristische Wert der Bremskraft für den Verkehr mit Platoons der neuen Modellsimulation im Vergleich zur alten ab (Abb.85). Die Abnahme beträgt über den gesamten Längenbereich etwa 19% für 3 Fahrzeuge und 16% für 4 Fahrzeuge und fällt damit geringer aus als mit dem Verkehr ohne Platoons. Im Gegensatz zur alten Modellsimulation stellt man bei der neuen Modellsimulation bei Platoons mit 3 Fahrzeugen einen deutlichen Unterschied zwischen den Verkehren fest. Dieser Unterschied verschwindet nahezu bei Platoons mit 4 Fahrzeugen. Im Projekt AGB 2017/004 wurde die Übereinstimmung zwischen den Verkehren damit erklärt, dass bei einer Durchdringungsrate von 40 % der charakteristische Wert der Bremskraft allein durch die Platoons bestimmt wird.

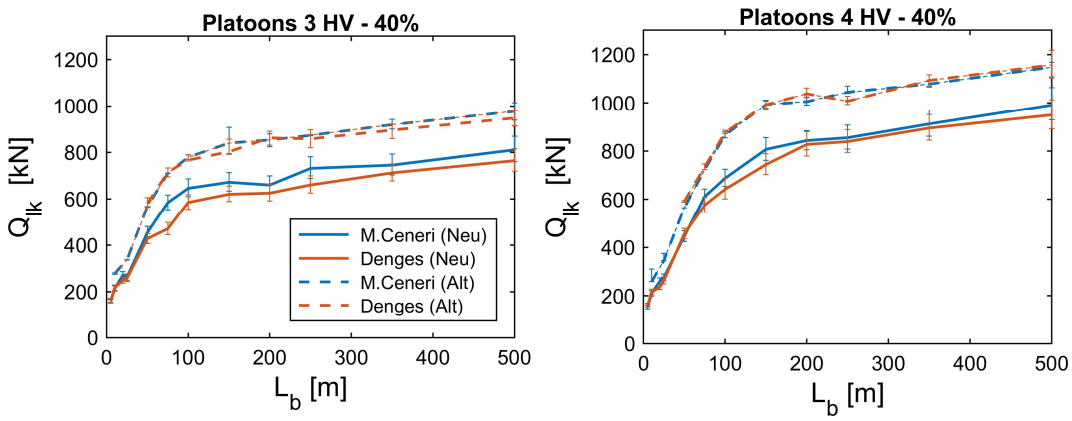


Abb.85 *Vergleich des charakteristischen Werts der Bremskraft für Verkehr mit Platoons.*

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

6.1 Bewertung der Resultate

Die Ergebnisse des Kapitels 4 zeigen, dass auf dem schweizerischen Autobahnnetz die Bremsraten sehr stark variieren. Diese starke Variation führt zu einer Variation des charakteristischen Werts der Bremskraft, die – wie in Kapitel 5 aufgezeigt – aus statistischen Gründen deutlich geringer ausfällt. Sie ist jedoch gross genug, um nicht als völlig vernachlässigbar zu gelten. In diesem Kapitel werden verschiedene Faktoren, welche die Bremsrate beeinflussen, untersucht.

Die Bremsraten auf Autobahnen dürften aus einer Kombination aus lokalen baulichen Eigenschaften des Autobahnnetzes und des Verkehrs (Verkehrszusammensetzung, Verkehrsdichte) resultieren, wobei temporäre Verkehrsbehinderungen wie Baustellen auch einen Einfluss ausüben können. Dass lokale bauliche Eigenschaften des Autobahnnetzes eine Ursache der Variation der Bremsrate sind, ist durch die beobachtete Häufung von Bremsereignissen bei der Einmündung in das lokale Strassennetz am Ende einer Autobahnausfahrt sowie bei Einmündungen, Verzweigungen und scharfen Kurven bei Ein- und Ausfahrten von Autobahnen gut belegt. Auch auf der Autobahn selber können bauliche Eigenschaften wie ein Abschnitt mit starkem Gefälle vor einer Autobahnausfahrt (z.B. Verzweigung Birrfeld) oder der Abschnitt nach einer Autobahneinfahrt (Tab. 22) höhere Bremsraten verursachen.

Wie in Kapitel 4.3.6 beschrieben, sind auf Autobahnen keine typischen Häufungen der Bremsereignisse zu beobachten. Untersucht man die Bremsraten der Autobahn auf der Skala der Autobahnabschnitte zwischen Ein- und Ausfahrten, so weisen auf der A1 der grösste Teil dieser Abschnitte einen Häufigkeitsfaktor (Verhältnis der Bremsrate zur durchschnittlichen Bremsrate der A1) kleiner als 1 auf. (Abb. 86). Die Bremsrate dieser Abschnitte ist daher kleiner als die durchschnittliche Bremsrate der Autobahn A1. Bei einem Schwellenwert von 3 ms^{-2} betrifft dies etwa 75% der Abschnitte. Die restlichen 25% der Abschnitte weisen einen Häufigkeitsfaktor auf, der kleiner als 10 ist. Ein ähnliches Verhältnis, etwa 80% zu 20%, weist auch die A2 auf (Abb. 87), obwohl die Verkehrszusammensetzung (Verhältnis zwischen leichten und schweren Fahrzeugen) sich sehr von der A1 unterscheidet. Bei einem Schwellenwert von 2 ms^{-2} ändert sich das Verhältnis für beide Autobahnen auf etwa 65% zu 35%. Dieses Resultat könnte so interpretiert werden, dass die Verkehrszusammensetzung keinen wesentlichen Einfluss auf die Bremsrate hat.

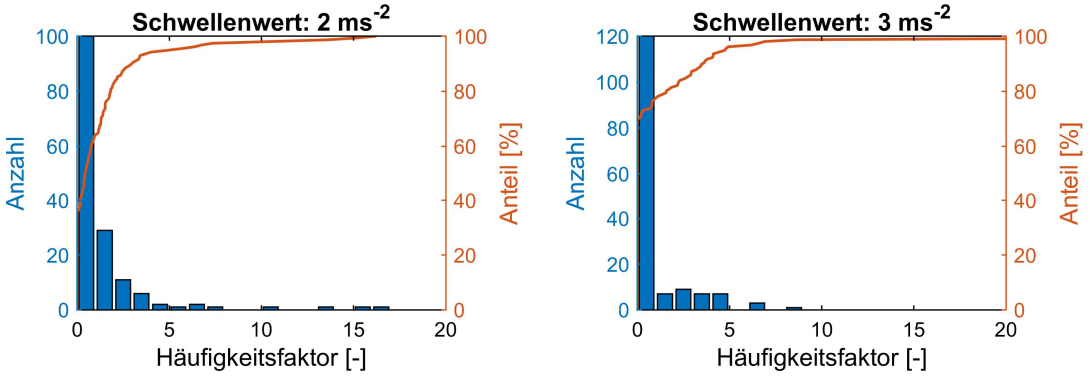


Abb. 86 *Verteilung des Häufigkeitsfaktors der Abschnitte der A1 für die Schwellenwerte 2 ms^{-2} und 3 ms^{-2}.*

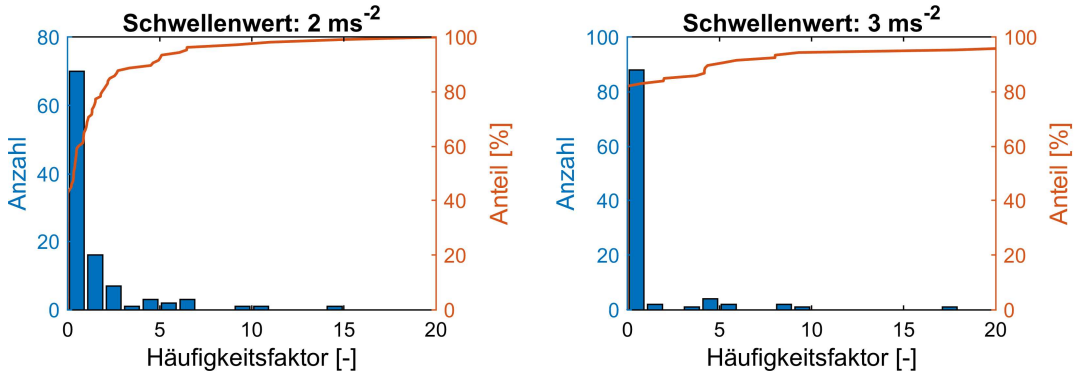


Abb. 87 *Verteilung des Häufigkeitsfaktors der Abschnitte der A2 für die Schwellenwerte 2 ms^{-2} und 3 ms^{-2}.*

Ob auch die Verkehrsdichte die Bremsrate beeinflusst, ist anhand der obigen Resultate nicht eindeutig zu beantworten. Die deutlich höheren Bremsraten auf dem sehr stark ausgelasteten Autobahnabschnitt der A1 zwischen Zürich und Winterthur könnten auf die hohe Verkehrsdichte zurückführen sein. Andererseits lassen die unterschiedlichen Bremsraten auf der stark befahrenen A1 zwischen Bern-Forsthaus und Limmattalerkreuz (Abb. 57) vermuten, dass die Verkehrsdichte zu keiner generellen Zunahme der Bremsraten führt. Obwohl in diesem Projekt die Verkehrsdichte nicht erfasst wurde, kann der Zusammenhang zwischen Bremsrate und Befahrung (Anzahl der Fahrzeugdurchfahrten) eines Strassenabschnitts einen Hinweis zum Einfluss der Verkehrsdichte auf die Bremsrate liefern. In Kapitel 4.1.1 wurde aufgezeigt, dass die Befahrung gut mit dem Verkehrsstrom des Güterverkehrs korreliert (Abb. 43 und Abb. 44), sodass sie ein brauchbares Mass zumindest für die Dichte des Schwerverkehrs darstellt.

Abb. 88 zeigt die Korrelation zwischen Bremsrate und Befahrung der Autobahnabschnitte zwischen Ein- und Ausfahrten der A1. Für beide Schwellenwerte nimmt die Bremsrate unter grosser Streuung mit grösserer Befahrung ab. Die Abnahme ist bei einem Schwellenwert von 3 ms^{-2} deutlicher als bei 2 ms^{-2}. Die blauen Kurven bezeichnen den Mittelwert (gestrichelt) und den 95%-Konfidenzintervall (punktiert) einer linearen Regression zwischen dem Logarithmus der Bremsdaten (Basis 10) und der Befahrung. Insgesamt besagen die Daten der Monitoringkampagne, dass die Bremsrate unabhängig von der Verkehrsdichte oder – für stärkere Bremsereignisse – sogar tendenziell mit der Dichte des Schwerverkehrs abnehmen. Die Analyse der Daten an der A2 weisen aufgrund der kleineren Befahrung eine noch grössere Streuung auf. Sie bestätigen insgesamt die Resultate an der A1.

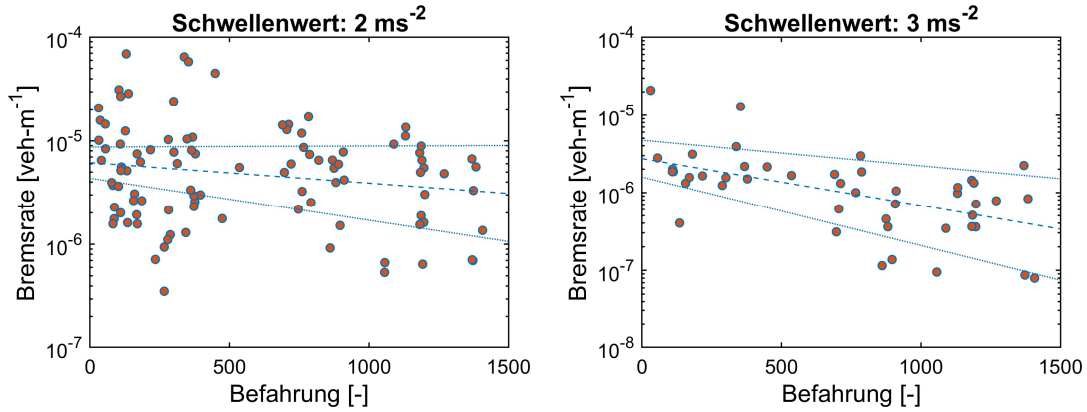


Abb. 88 *Korrelation zwischen Bremsrate und Befahrung der Abschnitte der A1 für die Schwellenwerte 2 ms^{-2} und 3 ms^{-2}.*

Einen weiteren Hinweis des möglichen Einflusses der Verkehrsdichte geben die Abschnitte der A1 und A2 mit einem Häufigkeitsfaktor grösser als 1 (Abb. 89). Die Grösse der Kreise sind proportional zum Häufigkeitsfaktor. Ein nahezu durchgehend erhöhter Häufigkeitsfaktor ist auf der A1 zwischen Solothurn und Winterthur und zwischen Genf und Yverdon zu beobachten. Auch auf der A9 zwischen Lausanne und Vevey tritt ein erhöhter Häufigkeitsfaktor auf. Weiter ist in der Umgebung der Städte Basel, Bellinzona, Bern, Freiburg, Lausanne, Luzern, St. Gallen, Winterthur und Zürich ein erhöhter Häufigkeitsfaktor anzutreffen. Dass um die Stadt Genf kein erhöhter Häufigkeitsfaktor auftritt, ist auf die sehr schwache Befahrung während der Monitoringkampagne zurückzuführen (zu wenig Daten). Betrachtet man einige dieser Abschnitte in der Umgebung von Grossstädten in einem grösseren Massstab an, so handelt es sich um relativ kurze Abschnitte mit vielen Ein- und Ausfahrten und folglich komplexer Verkehrsführung (Abb. 90). Weitere Abschnitte mit erhöhtem Häufigkeitsfaktor befinden sich vor dem Gotthardtunnel und vor Chiasso. Diese Abschnitte dürften weniger auf die Verkehrsführung als auf strukturell induzierte Verkehrshemmnisse (Reduktion der Spuren, Zoll) zurückzuführen sein.

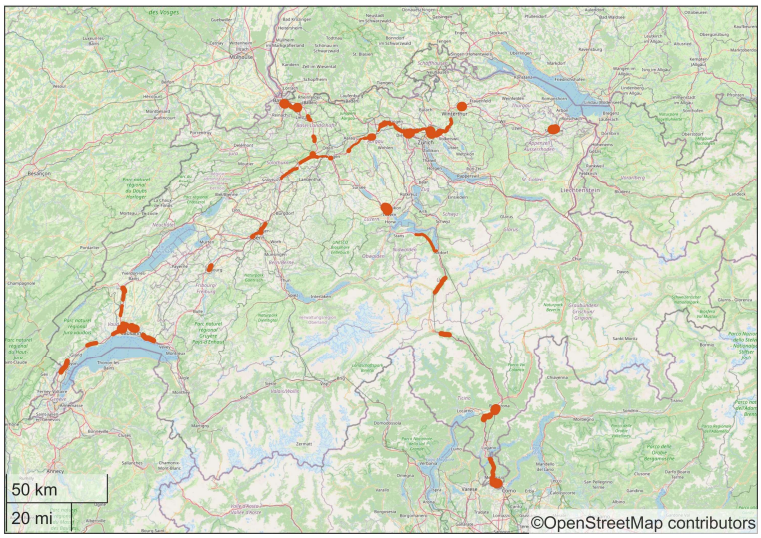


Abb. 89 *Abschnitte des Autobahnnetzes mit einem Häufigkeitsfaktor grösser als 1 (Schwellenwert 3 ms^{-2}).*

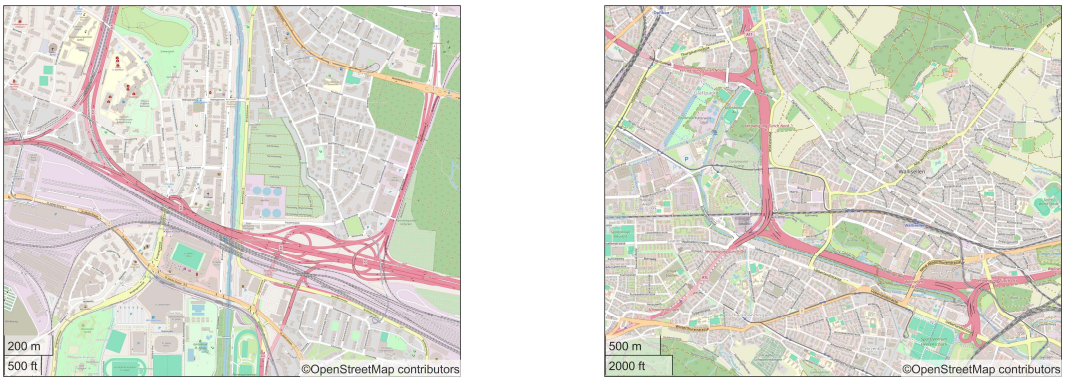


Abb. 90 *Abschnitte bei Basel und Zürich mit hohem Häufigkeitsfaktor (Schwellenwert 3 ms^{-2}).*

Insgesamt entsteht der Eindruck, dass ein erhöhter Häufigkeitsfaktor dann zu erwarten ist, wenn eine hohe Verkehrsdichte auf eine komplexe Verkehrsführung oder auf häufige Stausituationen trifft. Aufgrund der negativen Korrelation zwischen Bremsrate und Befahrung durch schwere Fahrzeuge, ist der erhöhte Häufigkeitsfaktor auf die Verkehrsdichte der leichten Fahrzeuge zurückzuführen. In der Tat korrelieren die Abschnitte mit einem erhöhten Häufigkeitsfaktor recht gut mit den dicht besiedelten Regionen der Schweiz (Abb. 91), in denen mit einer hohen Verkehrsdichte der leichten

Fahrzeuge zu rechnen ist. In eher ländlichen, schwach bevölkerten Regionen ist nahezu durchwegs kein erhöhter Häufigkeitsfaktor zu beobachten. Eine Bestätigung dieses Ergebnisses bedarf weiterer Untersuchungen, indem z.B. mit Daten der automatischen Strassenverkehrszählung jedem Bremsereignis eine Verkehrsdichte zugeordnet wird.

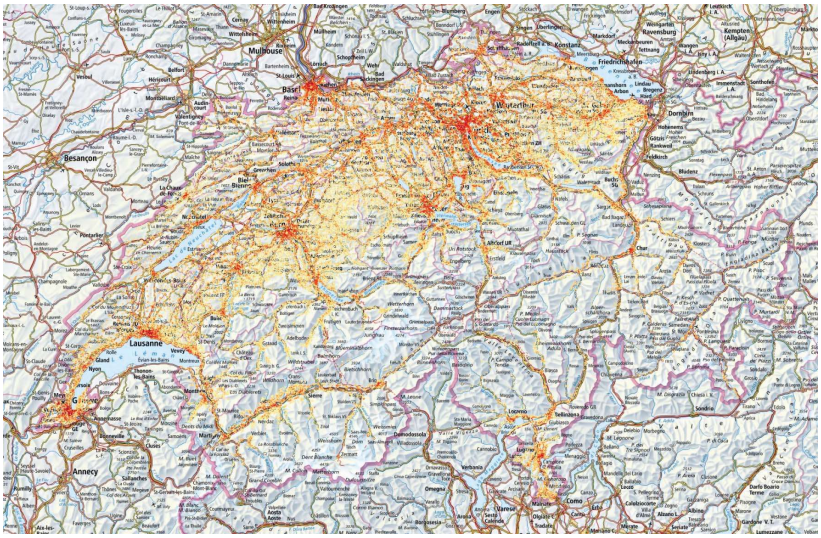


Abb. 91 *Bevölkerungsdichte der Schweiz (Quelle: www.map.geoadmin.ch).*

6.2 Klassifizierung der Brücken für die praktische Anwendung

Im Hinblick auf die praktische Anwendung der Resultate, stellt sich die Frage, wie die beobachteten Variationen der Bremsrate berücksichtigt werden sollen. Es ist kaum sinnvoll, eine allzu detaillierte Klassifizierung der Brücken des Autobahnnetzes nach Bremsraten durchzuführen. Dagegen spricht neben der komplizierten Handhabung auch die Tatsache, dass Teile der Resultate dieses Projekts eine Momentaufnahme widerspiegeln könnten. Zudem können die Bremsraten durch zukünftige Änderungen der Netzkapazität oder der Verkehrsführung grössere Veränderungen erfahren.

In Anbetracht des moderaten Einflusses der Bremsrate auf den charakteristischen Wert der Bremskraft, beschränken wir uns hier auf eine Aufteilung der Brücken des Autobahnnetzes in zwei **Brückenkategorien**.

– Die **erste Kategorie** beinhaltet Brücken auf Abschnitten der Autobahn und auf Autobahnverbindungen, die sich in schwach bevölkerten, ländlichen Gebieten befinden. Der charakteristische Wert der Bremskraft dieser Brücken wird mit der durchschnittlichen Bremsrate der A1 (Häufigkeitsfaktor gleich 1) berechnet.

– Die **zweite Kategorie** beinhaltet alle Brücken auf Ein- und Ausfahrten sowie Brücken auf Abschnitten der Autobahn und auf Autobahnverbindungen, die sich in stark bevölkerten Gebieten befinden, oder die sich vor strukturell induzierten Verkehrshemmnissen (permanent überlastete Autobahnkreuze, Reduktion der Fahrspuren, Zoll) befinden. Der charakteristische Wert der Bremskraft dieser Brücken wird mit einem Häufigkeitsfaktor von 20 berechnet.

Diese starke Vereinfachung, die durch eine rein qualitative Abgrenzung vorgenommen wird, ist neben den oben diskutierten Ergebnissen auch durch folgende Aspekte motiviert.

– Bei Brücken auf Ein- und Ausfahrten besteht ein stark erhöhter Häufigkeitsfaktor, wenn diese vor scharfen Kurven und vor Einmündungen und Verzweigungen auftreten. Brücken in anderen Verkehren sind weniger stark durch Bremsereignisse gefährdet. Die durchschnittlichen Bremsraten der Ein- und Ausfahrten und der Verbindungen sind jedoch so viel höher als die durchschnittliche Bremsrate der A1 und deren Länge ist in

der Regel zu kurz, um eine standortspezifische Kategorisierung dieser Brücken zu begründen.

– Aus Tab. 22 (Abschnitt 4.3.5) geht hervor, dass im Mittel der Häufigkeitsfaktor der Sektoren der Autobahnabschnitte zwischen etwa 0.8 und 2 variieren (*Tab. 22*). Brücken der ersten Kategorie könnten sich daher in einem ungünstigen Sektor befinden, sodass der Häufigkeitsfaktor 2 beträgt. Wie in Kapitel 5 gezeigt, führt ein Häufigkeitsfaktor von 2 auf eine Zunahme des charakteristischen Werts von rund 5% im Vergleich zum charakteristischen Wert gemäss der durchschnittlichen Bremsrate der A1. Dieser bescheidene Zuwachs begründet keine standortspezifische Kategorisierung dieser Brücken.

Die Bestimmung des charakteristischen Werts der Bremskraft für Ein- und Ausfahrten von Autobahnen trifft auf ein grundlegendes Problem: Es gibt keine zuverlässigen Verkehrsdaten mit denen Verkehrsszenarien für Bremsereignisse generiert werden können. Die Schweizerische automatische Strassenverkehrszählung (SASVZ) enthält Stationen an Autobahnverbindungen, doch praktisch keine Stationen an Ein- und Ausfahrten. Die Parameter der Verkehrsszenarien wie Anzahl Fahrzeuge, Abstand zwischen den Fahrzeugen, Geschwindigkeit der Fahrzeuge usw. beeinflussen jedoch die Bremskräfte. Einige Hinweise lassen sich aus den Daten der Monitoringkampagne herausarbeiten. An den Diagrammen der Bremsereignisse, die Anfangsgeschwindigkeit, Geschwindigkeitsänderung sowie Spitzen- und Plateauwert der Bremsverzögerung darstellen, ist in Kapitel 4 kein fundamentaler Unterschied zwischen Autobahnabschnitten und Ein- und Ausfahrten zu entnehmen.

Indem an einer Ein- oder Ausfahrt die Anzahl Durchfahrten mit der Anzahl Durchfahrten des Autobahnabschnitts im Bereich der Ein- oder Ausfahrt verglichen wird, kann aus der Anzahl Fahrzeuge des Autobahnabschnitts näherungsweise die Anzahl Fahrzeuge einer Ein- oder Ausfahrt bestimmt werden. Selbstverständlich variiert dieses Verhältnis, doch im Mittel weisen Ein- oder Ausfahrt etwa 1/12 der Anzahl Fahrzeuge eines Autobahnabschnitts auf. Damit kann man grob den Häufigkeitsfaktor für den charakteristischen Wert der Bremskraft von Ein- und Ausfahrten abschätzen. Aus Kapitel 4.3.5 ist bekannt, dass die Bremsereignisse in Ein- und Ausfahrten lokal konzentriert sind. Dadurch erhöht sich die Bremsrate auf rund das 100-Fache der durchschnittlichen Bremsrate der Autobahnen A1 und A2. Berücksichtigt man die oben geschätzte reduzierte Anzahl Fahrzeuge, so dürfte der Häufigkeitsfaktor etwa zwischen 10 und 20 betragen. Da die charakteristischen Werte dieser Häufigkeitsfaktoren sich nicht wesentlich unterscheiden, wird für die zweite Kategorie von Brücken der Häufigkeitsfaktor 20 gewählt.

Darüber hinaus hat neben der Bremsrate auch die Verkehrszusammensetzung einen Einfluss auf den charakteristischen Wert der Bremskraft. Der eher internationale Schwerverkehr auf der A2 (Monte Ceneri) führt aufgrund der höheren spontanen Bildung von Konvois zu einem grösseren charakteristischen Wert als der eher nationale Schwerverkehr auf der A1 (Denges). Dieser Einflussfaktor ist bedeutend genug, um nicht vernachlässigt zu werden. Da spontan gebildete Konvois von 3 und mehr Fahrzeugen auf Ein- und Ausfahrten kaum anzutreffen sein dürften, ist für Monte Ceneri nur für die Autobahn A2 ohne ihre Ein- und Ausfahrten repräsentativ. Für den Rest des Autobahnnetzes sollte Denges die Verkehrszusammensetzung realistischer abbilden als Monte Ceneri.

6.3 Vergleich zu den Normen SIA 261 und SIA 269/1

Basierend auf der im vorigen Kapitel vorgenommen Kategorisierung der Brücken soll hier ein Vergleich der in diesem Projekt erarbeiteten Resultate zum charakteristischen Wert der Bremskraft mit den Bestimmungen der Normen SIA 261 und 269/1 vorgenommen werden. Das Ziel ist es abzuklären, ob darüber hinaus gehende Empfehlungen ausgearbeitet werden sollen.

Abb. 92 zeigt den charakteristischen Wert der Bremskraft des Simulationsmodells für Monte Ceneri und Denges im Vergleich zur Norm SIA 261, die für die Auslegung neuer Brücken gilt. Die Resultate sind für eine Wiederkehrperiode von 1'000 Jahren (10% Überschreitungswahrscheinlichkeit bei einer Nutzungsdauer von 100 Jahren) und einem Verkehr in zwei Richtungen dargestellt. Die farblich hinterlegten Bereiche stellen den Einfluss einer Variation des Häufigkeitsfaktors zwischen 1 (Brückenkategorie 1, unterer Rand) und 20 (Brückenkategorie 2, oberer Rand) dar. Darüber hinaus ist für jede Eigenfrequenz nur der Längenbereich dargestellt, der für diese Brücken repräsentativ ist.

Leider gibt es in der Literatur kaum experimentelle Daten zu den Eigenfrequenzen der Längsschwingungen von Brücken, sodass die hier gewählten Längenbereiche approximativ sind. Brücken mit einer Länge unter 50 m dürften mit einer steifen Lagerung ausgestattet sein. Steife Lagerungen kommen aber auch für Brücken bis zu 100 m Länge vor. Diese Brücken sind durch den charakteristischen Wert bei einer Eigenfrequenz in Längsrichtung von 10 Hz repräsentiert. Brücken mit einer Brückenlänge unter 100 m stellen etwa 60% der Brücken des schweizerischen Autobahnnetzes dar. Brücken mit einer Brückenlänge zwischen 50 und 150 m dürften durch eine Eigenfrequenz von 2 Hz angemessen repräsentiert sein, falls sie schwimmend gelagert sind. Schwimmend gelagerte Brücken mit einer Eigenfrequenz um 1 Hz dürften zwischen 100 und 250 m variieren. Ab 200 m sind zunehmend tiefere Eigenfrequenzen zu erwarten, die eher mit einer Eigenfrequenz um 0.5 Hz beschrieben sind.

Insgesamt deckt der charakteristische Wert gemäss der Norm SIA 261 den gesamten Längenbereich mit unterschiedlichen Reserven ab. Die grössten Reserven liegen für Brückenlängen über 200 m vor. Die Reserven von Denges sind für Brücken bis zu 200 m Länge grösser als die von Monte Ceneri. Die geringe Überschreitung der Norm SIA 261 für Monte Ceneri bei Brückenlängen zwischen 50 und 150 m ist in der Praxis unbedeutend.

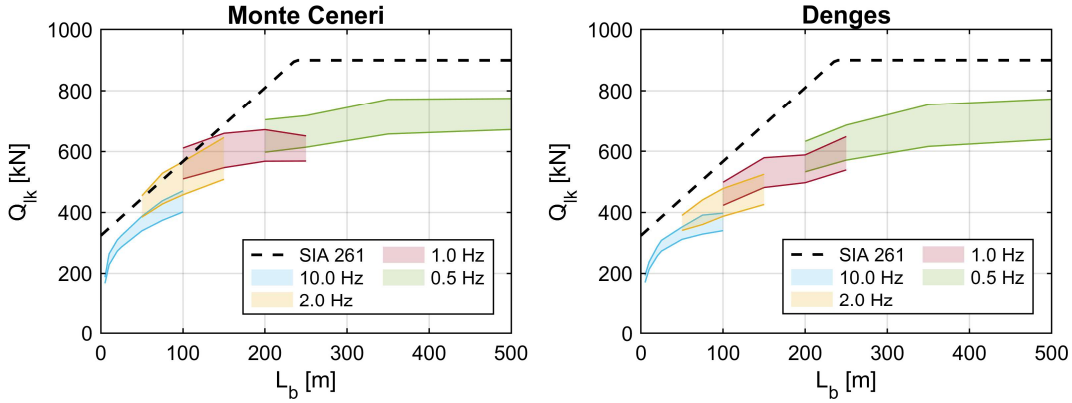


Abb. 92 *Vergleich des charakteristischen Werts der Bremskraft des Simulationsmodells mit der Norm SIA 261 (Wiederkehrperiode von 1'000 Jahren).*

Ein besseres Bild über die relativen Reserven bietet Abb. 93, die das Verhältnis des charakteristischen Werts der Bremskraft des Simulationsmodells zur Norm SIA 261 ($E_{SIA\ 261}$) darstellt. Aus dieser Darstellung geht hervor, dass am für Monte Ceneri die relativen Reserven bei Längen zwischen 50 und 150 m am kleinsten sind. Bei Längen über 200 m sind zwischen Monte Ceneri und Denges keine relevanten Unterschiede festzustellen. Selbstverständlich weisen Brücken der ersten Kategorie die grösseren Reserven auf (untere Ränder). Das Verhältnis variiert zwischen 0.6 und 0.9 für Monte Ceneri und zwischen 0.6 und 0.75 für Denges. Brücken der zweiten Kategorie weisen ein Verhältnis (für $L_b > 200$) zwischen 0.7 und 1.05 bzw. 0.7 und 0.9 auf (obere Ränder,). In Anbetracht der geringen Zusatzkosten bei Neubauten gibt es keinen Handlungsbedarf, die Regelung der Norm SIA 261 zu modifizieren.

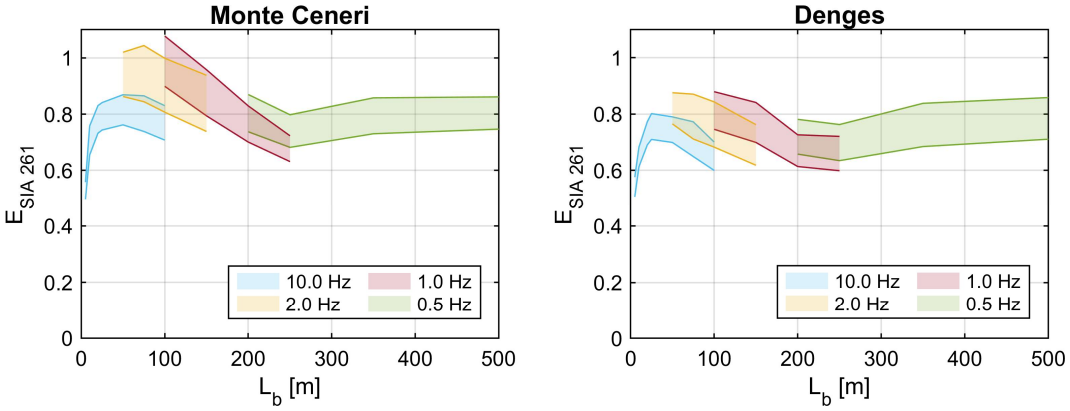


Abb. 93 *Verhältnis des charakteristischen Werts der Bremskraft des Simulationsmodells zur Norm SIA 261.*

Zur Beurteilung bestehender Bauwerke weist die Norm SIA 269/1 tiefere charakteristische Werte der Bremskraft als die Norm SIA 261 auf, da sie die kleinere Restnutzungsdauer einer Brücke berücksichtigt. Das Modell der Norm SIA 269/1 entspricht etwa dem Durchschnitt der Modelleder SIA 261 und SIA 160 (1972). In der SIA 269/1 ist weder eine Wiederkehrperiode noch eine Restnutzungsdauer explizit festgelegt. Gemäss dem Fachhandbuch des ASTRA sollte für instandgesetzte oder erneuerte Bauteile die Restnutzungsdauer mindestens 20 Jahre betragen [8]. Bei der üblicherweise verwendeten Überschreitungswahrscheinlichkeit des charakteristischen Werts einer Einwirkung von 10% während der Restnutzungsdauer, beträgt die Wiederkehrperiode 200 Jahre.

Abb. 94 zeigt den charakteristischen Wert der Bremskraft des Simulationsmodells für Monte Ceneri und Denges im Vergleich zur Norm SIA 269/1. Die Resultate sind für eine Wiederkehrperiode von 200 Jahren und einem Verkehr in zwei Richtungen dargestellt. Es ist sofort ersichtlich, dass die Situation völlig anders zu bewerten ist als bei neuen Brücken. Die teils reichlichen Reserven, welche der charakteristische Wert der Norm 261 aufweist, sind bei der Norm 269/1 trotz der kürzeren Wiederkehrperiode nicht mehr vorhanden.

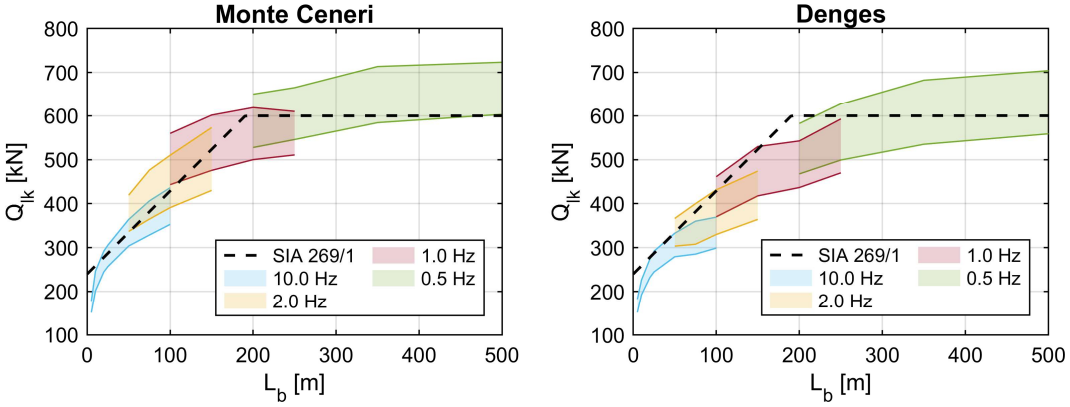


Abb. 94 *Vergleich des charakteristischen Werts der Bremskraft des Simulationsmodells mit der Norm SIA 269/1.*

Das Verhältnis des charakteristischen Wertes der Bremskraft des Simulationsmodells zur Norm SIA 269/1 ($E_{SIA\ 269/1}$) ist in Abb. 95 dargestellt. Bei Brücken der ersten Kategorie (untere Ränder) wird die Norm 269/1 nicht überschritten. Steif gelagerte Brücken deckt die Norm 269/1 für jeden Häufigkeitsfaktor noch weitestgehend ab. Für Brücken der zweiten Kategorie (obere Ränder) wird die Norm 269/1 für Monte Ceneri immer überschritten, wobei die Überschreitung zwischen 1 und 1.3 variiert. Für Denges variiert die Überschreitung zwischen 0.9 und 1.15.

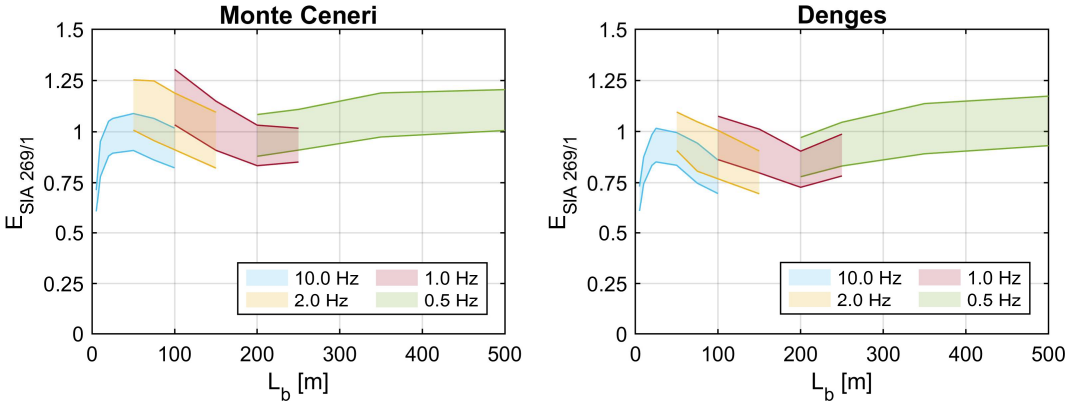


Abb. 95 *Verhältnis des charakteristischen Werts der Bremskraft des Simulationsmodells zur Norm SIA 269/1 (Wiederkehrperiode von 200 Jahren)*

6.4 Einwirkungsmodell für bestehende Brücken

Das oben beschriebene Ergebnis legt die Formulierung eines Einwirkungsmodells für die Bemessungspraxis nahe, das für bestehende Brücken eine bessere Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Modellsimulationen aufweist als die Norm SIA 269/1. Ein Modell für die Bemessungspraxis sollte die wichtigsten Eigenschaften des charakteristischen Werts der Bremskraft möglichst einfach wiedergeben. Diese Reduktion der Komplexität führt unweigerlich zu Ungenauigkeiten.

Als Grundlage der Modellbildung wird der charakteristische Wert der Bremskraft für steife Brücken gewählt. Diese Werte sollen durch eine einfache Funktion der Länge möglichst gut beschrieben werden. Die Einflüsse der Eigenfrequenz und der Brückenkategorie sollen durch Multiplikation dieser Funktion durch konstante Faktoren berücksichtigt werden. Grundsätzlich könnte jeder Verkehr durch eine spezifische Funktion beschrieben werden. Im Sinne einer möglichst einfachen Handhabung soll auch der Verkehr durch einen Faktor beschrieben werden. Das Einwirkungsmodell soll also folgende Form ausweisen:

$$Q_B = \alpha_V \alpha_H \alpha_{dyn} \alpha_W f(L_b) \tag{16}$$

wobei Q_B der charakteristische Wert der Bremskraft und α_V, α_H, α_{dyn}, α_W die Faktoren sind, die den Verkehr, die Brückenkategorie, die Eigenfrequenz und die Wiederkehrperiode berücksichtigen. Die Funktion $f(L_b)$ ist frei wählbar, doch sie sollte einfach sein und den charakteristischen Wert der Bremskraft für steife Brücken gut reproduzieren können. Als zweckmässig wurde die Funktion

$$f(L_b) = A L_b^E \ln(L_b) \tag{17}$$

erachtet, die sich aus dem Produkt einer Potenz und des natürlichen Logarithmus der Länge bildet. Dieses Produkt wir noch durch eine Konstante skaliert. Die Skalierungskonstante A und der Exponent E wird durch Approximation an die charakteristischen Werte der Bremskraft für steife Brücken bestimmt. Für diese Approximation sind die Werte von Monte Ceneri für eine Wiederkehrperiode von 200 Jahren gewählt worden. Die Parameterwerte $A = 90$ und $E = -0.03$ geben eine ausreichend gute Übereinstimmung.

Die Faktoren α_V, α_H, α_{dyn} und α_W können dann so festgelegt werden, dass sie die Resultate des Simulationsmodell hinreichend genau beschreiben. Sie betragen:

– $\alpha_V = 1$ für Monte Ceneri, $\alpha_V = 0.9$ für Denges,

– $\alpha_H = 1.0$ für die erste Brückenkategorie (Häufigkeitsfaktor gleich 1), $\alpha_H = 1.2$ für die zweite Brückenkategorie (Häufigkeitsfaktor gleich 20),

– $\alpha_{dyn} = 1.0$ für die Eigenfrequenz 10 Hz, $\alpha_{dyn} = 1.15$ für die Eigenfrequenz 2 Hz, $\alpha_{dyn} = 1.25$ für die Eigenfrequenz 1 Hz und $\alpha_{dyn} = 1.30$ für die Eigenfrequenz 0.5 Hz.

– $\alpha_W = 0.95$ für eine Wiederkehrperiode von 100 Jahren, $\alpha_W = 1.05$ für eine Wiederkehrperiode von 200 Jahren.

Das Verhältnis des charakteristischen Werts der Bremskraft des Simulationsmodells zum vorgeschlagenen Einwirkungsmodell (E_{Modell}) ist in Abb. 96 dargestellt. Die Bandbreite der farblich hinterlegten Flächen repräsentieren den Bereich zwischen der Brückenkategorie 1 ($\alpha_H = 1.0$) und der Brückenkategorie 2 ($\alpha_H = 1.2$). Wird das Verhältnis 1 unterschritten, so überschätzt das Einwirkungsmodell den charakteristischen Wert der Bremskraft des Simulationsmodells für die Brückenkategorie 1. Wird das Verhältnis 1.2 überschritten, so unterschätzt das Einwirkungsmodell den charakteristischen Wert für die Brückenkategorie 2.

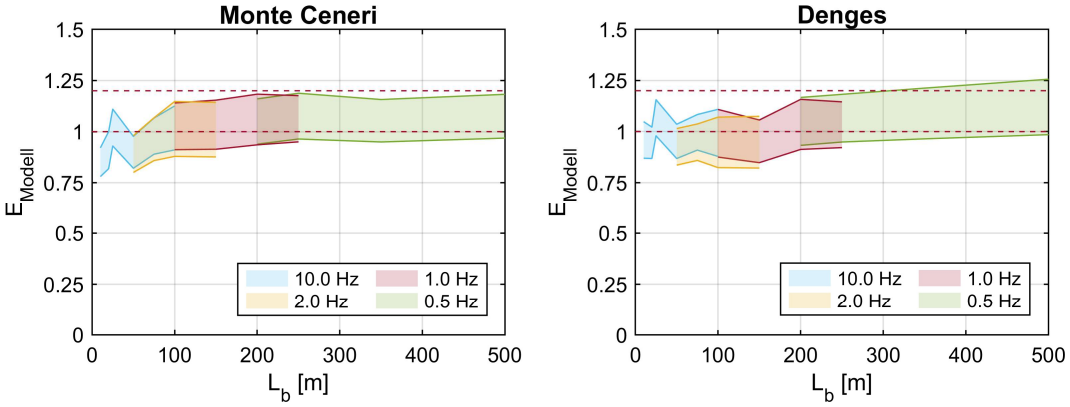


Abb. 96 *Verhältnis des charakteristischen Werts der Bremskraft des Simulationsmodells zum Einwirkungsmodell (Wiederkehrperiode von 200 Jahren).*

Für die langen Brücken passt das Modell recht gut mit den Resultaten des Simulationsmodells überein. Für Längen unter 100 m für Monte Ceneri und unter 200 m für Denges ist das Modell etwas konservativ. Dies kann korrigiert werden, indem man einen weiteren Faktor α_L (Längenfaktor) einführt, der über einen Längenbereich einen Wert kleiner als 1 annimmt. Für Monte Ceneri ist dann

$$\alpha_L = \begin{Bmatrix} 0.9 & L_b \leq 100\ \text{m} \\ 1.0 & L_b > 100\ \text{m} \end{Bmatrix}. \tag{18}$$

Analog gilt für Denges

$$\alpha_L = \begin{Bmatrix} 0.9 & L_b \leq 200\ \text{m} \\ 1.0 & L_b > 200\ \text{m} \end{Bmatrix} \tag{19}$$

Das Ergebnis dieser Korrektur ist in Abb. 97 ersichtlich. Die Übereinstimmung zwischen Einwirkungsmodell und Simulationsmodell ist über die gesamte Länge etwa gleichmässig gut. Da etwa 80% der Brücken des schweizerischen Autobahnnetzes eine Länge kleiner als 200 m aufweist, dürfte es sich lohnen, diese Korrektur einzuführen.

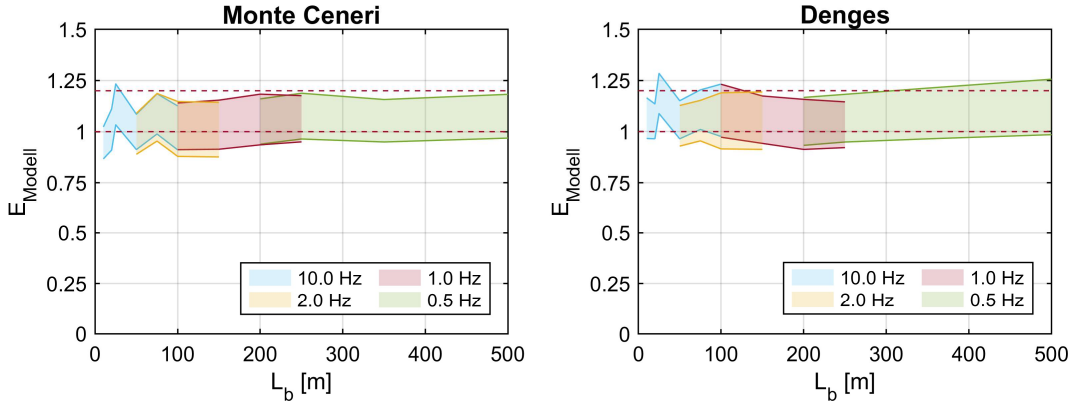


Abb. 97 *Verhältnis des charakteristischen Werts der Bremskraft des Simulationsmodells zum Einwirkungsmodell mit Längenfaktor α_L (Wiederkehrperiode von 200 Jahren).*

Vergleicht man den charakteristischen Wert des Einwirkungsmodells mit dem der SIA 269/1 [7], so stellt man fest, dass für Monte Ceneri das Einwirkungsmodell für die Brückenkategorie 1 etwas kleinere Werte ergibt (Abb. 98). Die grössten Unterschiede treten bei steifen Brücken und bei Längen zwischen etwa 150 und 250 m auf. Für Brücken der Kategorie 2 weist das Einwirkungsmodell ausser bei steifen Brücken grössere Werte auf. Wesentlich anders ist die Situation in Denges. Das Einwirkungsmodell weist ausser bei Brücken der Kategorie 2 über 300 m immer kleinere Werte auf. Für Brücken der Kategorie 1 weist das Einwirkungsmodell deutlich kleinere charakteristischen Werte auf. In Anbetracht der Tatsache, dass Monte Ceneri sich allein auf die Brücken der Autobahn A2 und Denges sich auf die restlichen Brücken des Autobahnnetzes bezieht, erlaubt das Einwirkungsmodell potenziell höhere Einsparmöglichkeiten als das Modell der SIA 269/1.

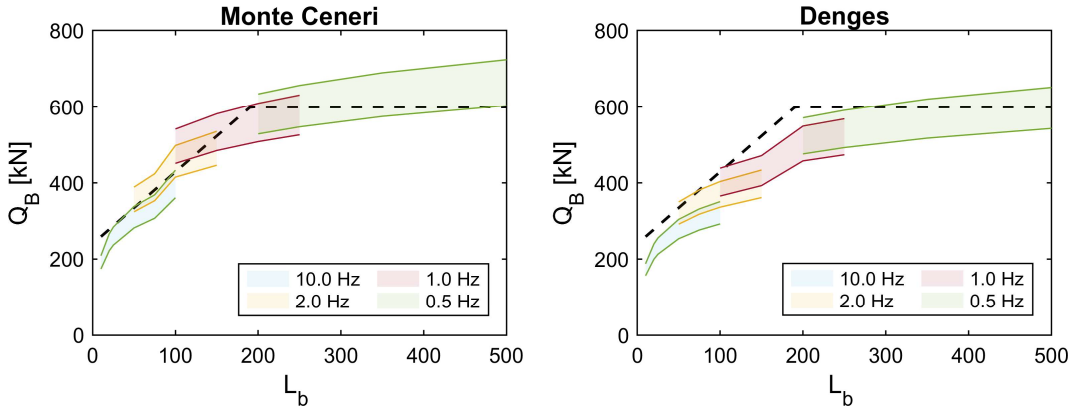


Abb. 98 *Vergleich zwischen Einwirkungsmodell (Wiederkehrperiode von 200 Jahren) und Modell der SIA 269/1.*

6.5 Bewertung des Verkehrs mit Platoons

Abb. 99 zeigt den charakteristischen Wert der Bremskraft des Simulationsmodells bei einem Verkehr mit Platoons bestehend aus 3 Fahrzeugen. Die Wiederkehrperiode beträgt 1'000 Jahre. Die Kräfte sind für Monte Ceneri ab ca. 50 m Länge und für Denges ab ca. 90 m Länge grösser als die Kräfte des Einwirkungsmodell der SIA 261 für neue Bauwerke. Bei Brücken, die länger als 100 Meter sind, können die Unterschiede zur Norm erheblich werden.

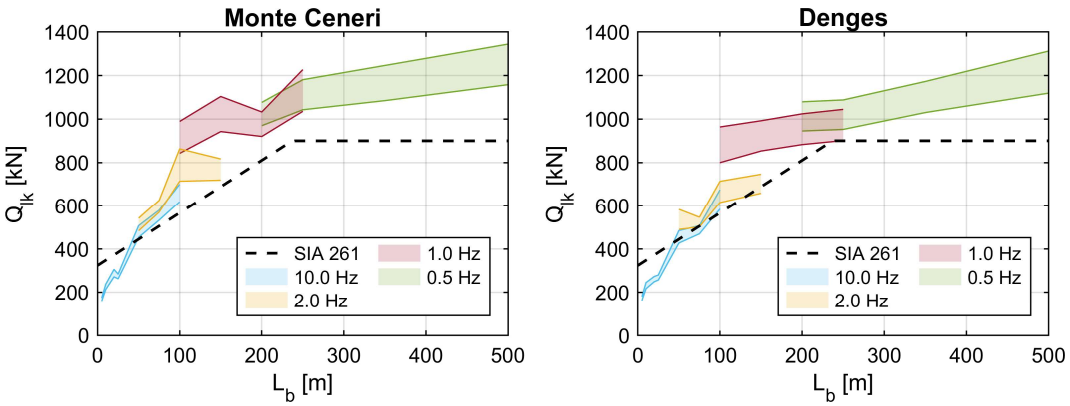


Abb. 99 *Vergleich des charakteristischen Werts der Bremskraft mit Platooning des Simulationsmodells mit der Norm SIA 261 (Widerkehrperiode 1'000 Jahre).*

Noch deutlicher nehmen die Unterschiede des charakteristischen Werts zwischen dem Simulationsmodell und dem Modell der SIA 269/1 für bestehende Brücken auch bei einer Widerkehrperiode 200 Jahren zu (Abb. 100). Die Norm deckt nur noch Brücken mit einer Länge unter ca. 40 m vollständig ab. Für alle anderen Längen überschreitet das Simulationsmodell die Kräfte der Norm zum Teil massiv.

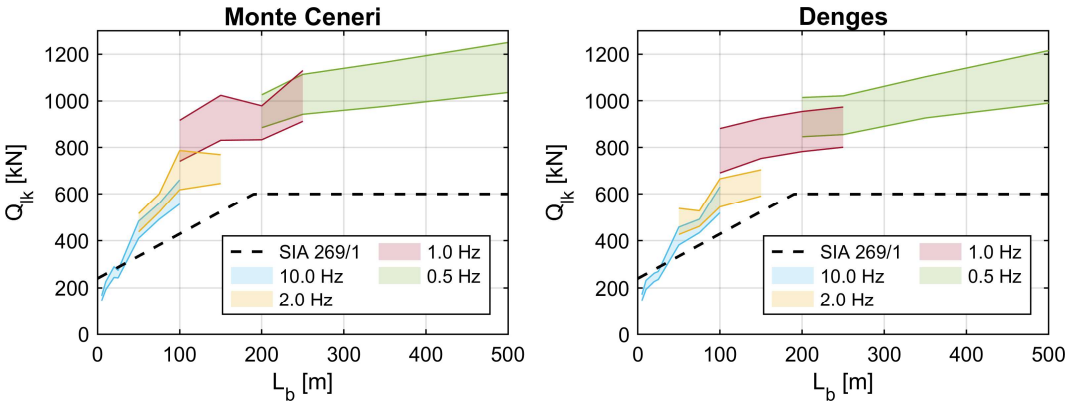


Abb. 100 *Vergleich des charakteristischen Werts der Bremskraft mit Platooning des Simulationsmodells mit der Norm SIA 269/1 (Widerkehrperiode 200 Jahre).*

Die im Kapitel 5.2.4 besprochenen Reduktion des charakteristischen Werts der Bremskraft im Vergleich zum Simulationsmodell des Projekts AGB 2017/004 entschärft die Gefährdung der bestehenden Brücken durch die Einführung von Platoons nicht wesentlich. Die im Projekt AGB 2017/004 erarbeitete Bewertung bleibt deshalb weiterhin gültig: Die Zulassung von Platoons mit drei oder vier Fahrzeugen erfordert eine systematische Bewertung zumindest einer repräsentativen Stichprobe von Autobahnbrücken, um den Erfüllungsgrad oder die Versagenswahrscheinlichkeit und die allenfalls erforderlichen Nachrüstungskosten zu ermitteln.

Anhänge

I Dynamische Amplifikation bei Verkehrslasten 125
I.1 Einführung 125
I.2 Ziel 126
I.3 Berechnungsannahmen 126
I.3.1 Modell 126
I.3.2 Lastfälle 127
I.4 Resultate 127
I.4.1 Zyklische Einwirkung 127
I.4.2 Brückendurchfahrt 130
I.4.3 Lokale Fahrbahnunebenheit 134
I.4.4 Bremskraft in Längsrichtung 138
I.4.5 Rückfederung Fahrzeug 142
I.5 Schlussfolgerungen 145
I.5.1 Lastfall Brückenüberfahrt 146
I.5.2 Lastfall lokale Fahrbahnunebenheit 147
I.5.3 Lastfall Bremskraft in Längsrichtung 147
I.5.4 Lastfall Rückfederung Fahrzeug 148
I.6 Zusammenfassung 148

II Untersuchung zur Bewertung der vertikalen Beschleunigung des Fahrzeugs 151
II.1 Ziel 151
II.2 Erfassung der Beschleunigungen 151
II.3 Resultate 151

I Dynamische Amplifikation bei Verkehrslasten

I.1 Einführung

Verkehrslasten auf Strassenbrücken sind veränderliche Einwirkungen, die eine Brücke in Schwingungen versetzen können. Die Variabilität wird durch die zeitliche Änderung des Verkehrsaufkommens, die beweglichen Fahrzeugmassen, die sich dauernd ändernden Radlasten (Unebenheit der Fahrbahn) und die Verzögerung oder Beschleunigung von Fahrzeugen hervorgerufen. Diese Brückenschwingungen verursachen Trägheitskräfte, die für die Bemessung verschiedener Bauteile einer Brücke relevant sein können. Moderne Bauwerksnormen verlangen in der Regel keine dynamische Analyse, um für die Bemessung einer neuen oder der Beurteilung einer bestehen Brücke diese Trägheitskräfte zu berücksichtigen. Sie werden hingegen in die statischen Lastmodelle integriert, sodass der Nachweis durch eine statische Analyse erfolgen kann. Die Vergrösserung der statischen Verkehrslasten durch die Trägheitskräfte wird als dynamische Amplifikation bezeichnet.

Zur dynamischen Amplifikation bei Strassenbrücken wird seit Jahrzehnten geforscht. Sehr ausführlich ist das dynamische Verhalten des Längsträgers bei der Überfahrt von schweren Fahrzeugen auf Brücken untersucht worden. Das bisher erarbeitete Wissen weist jedoch durch teils erhebliche Unsicherheiten [29]. Die Mechanismen der verschiedenen Einflussparameter (Fahrbahnunebenheit, Fahrzeuggeschwindigkeit, Fahrzeuggewicht, Interaktion mehrerer Fahrzeuge) sind weiterhin noch teilweise unverstanden, sodass für eine spezifische Brücke in der Regel keine zuverlässige Aussage gemacht werden kann. Diese Sachlage schlägt sich auch in der Berücksichtigung der dynamischen Amplifikation in den Bauwerksnormen der führenden Industrieländer nieder, die teils stark unterschiedliche Modelle anwenden [29]. Diese Unsicherheit ist in der Komplexität des Phänomens, in der Vielzahl und im hohen Variabilitätsbereich der Einflussparameter, in der experimentellen Untersuchungsmethodik und teils in der Definition der dynamischen Amplifikation begründet.

Bei der Überfahrt auf Brücken wird nicht nur der Längsträger in Schwingungen versetzt, sondern durch Fahrbahnübergänge und lokale Unebenheiten auch Bauteile des Längsträgers, wie z.B. die Fahrbahnplatte. Während die Schwingungen des Längsträgers vornehmlich die dynamische Amplifikation der verteilten Verkehrslasten bestimmen, beeinflussen die Schwingungen der Bauteile die konzentriert wirkenden Verkehrslasten (Achslasten). Die dynamische Amplifikation der konzentriert wirkenden Verkehrslasten ist generell verschieden zur dynamischen Amplifikation, der über den Längsträger verteilt wirkenden Verkehrslasten. Dies ist darin begründet, dass der Längsträger wesentlich andere Eigenfrequenzen, modale Dämpfungen und Schwingungsformen aufweist als z.B. eine Fahrbahnplatte, sodass das dynamische Verhalten unterschiedlich ist. Darüber hinaus erfährt eine Fahrbahnplatte die Variabilität der Radlasten in viel stärkerem Masse als der gesamte Längsträger, da die Lastverteilungswirkung wesentlich kleiner ist.

Neben den Schwerelasten aus dem Verkehr generieren auch die Kräfte von bremsenden Fahrzeugen Schwingungen auf Brücken. Schwingungen in Längsrichtung der Brücke werden durch die Trägheitskräfte der bremsenden Fahrzeuge hervorgerufen. Im Rahmen des Projekts AGB 2017-002 wurden Versuche mit stark bremsenden Fahrzeugen an einer schwimmend gelagerten Brücke durchgeführt [24]. Aus den Versuchsdaten konnten die dynamischen Amplifikationen bestimmt werden, wobei die dynamische Amplifikation als das Verhältnis zwischen der grössten einwirkenden Kraft (Produkt aus Verzögerung und Masse des Fahrzeugs) und der grössten über Lager und Stützen übertragenen Kraft (Summe aus der Einwirkung und der Trägheitskraft) definiert wurde. Die dynamische Amplifikation variierte zwischen 1.09 und 1.54. Tendenziell hatte ein Fahrzeug eine grössere dynamische Amplifikation als zwei Fahrzeuge (Bemessungssituation). Ein starkes nichtlineares Verhalten der Brücke führte zu deutlich grösseren dynamischen Amplifikationen als ein schwach nichtlineares Verhalten. Die beobachtete dynamische Amplifikation für das schwach nichtlineares Verhalten konnte durch ein lineares Einmassenschwingermodell gut reproduziert werden.

Ausserdem treten beim Beginn und am Ende eines harten Bremsmanövers vertikal auf die Fahrbahn wirkende Kräfte auf, die durch die Ein- und Rückfederung des Fahrzeugs entstehen. Diese können zu bedeutenden Schwingungen des Längsträgers führen, wie ebenfalls im Rahmen des Projekts AGB 2017-002 festgestellt wurde [24]. Die dynamische Amplifikation durch die Ein- und Rückfederung ist experimentell kaum untersucht worden. Die wenigen experimentellen Ergebnisse zeigen, dass für den Längsträger eine dynamische Amplifikation von 1.2–1.4 auftreten kann, wobei die dynamische Amplifikation mit der Zunahme der Verzögerung zunimmt [27][30]. Diese Werte sind mit Simulationen mit Mehrmassenschwinger-Modellen von Fahrzeugen kompatibel [27].

I.2 Ziel

Im Rahmen des vorliegenden Projekts lassen sich keine definitiven Antworten auf Jahrzehnte alte Fragestellungen erarbeiten. Das Ziel ist für die wichtigsten Lastfälle abzuklären, unter welchen Umständen relevante dynamischen Amplifikationen auftreten könnten und wie sich plastische Verformungen auf die dynamischen Amplifikationen auswirken. Auch wenn die Untersuchung auf Modellrechnungen beruht, sind nicht die quantitativen, sondern die qualitativen Ergebnisse von Bedeutung. Dadurch konnten die Modellannahmen stark vereinfacht werden, ohne die qualitativen Ergebnisse zu beeinträchtigen.

I.3 Berechnungsannahmen

I.3.1 Modell

Als Modell ist ein elasto-plastischer Einmassenschwinger gewählt worden (Abb. 1). Das Verhalten eines Bauteils wurde durch eine elasto-plastische Feder modelliert. Es wurden zwei Stoffgesetzte verwendet: ideal-plastisches Verhalten und ein plastisches Verhalten mit isotroper Verfestigung. Der viskose Dämpfer berücksichtigt eine zusätzliche Systemdämpfung.

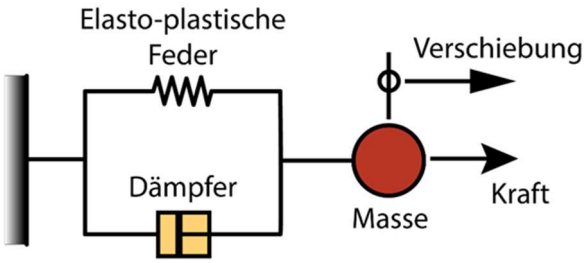


***Abb. 1** Elasto-plastischer Einmassenschwinger.*

Die Bewegungsgleichung des Modells und die elasto-plastischen Materialgesetze wurden mit dimensionslosen Parametern formuliert, um von der Masse unabhängige Ergebnisse zu erhalten. Die Bewegungsgleichung lautet:

$$\ddot{\delta}(\tau) + 2\zeta\dot{\delta}(\tau) + \kappa(\tau) = \varphi(\tau) \tag{20}$$

wobei τ die dimensionslose Zeit bezeichnet, $\delta(\tau)$ die Verschiebung, $\kappa(\tau)$ die Federkraft und $\varphi(\tau)$ die einwirkende Kraft. ζ bezeichnet das Lehr'sche Dämpfungsmass. Die dimensionslosen Grössen sind folgendermassen definiert:

$$\tau = \omega t = 2\pi t / T$$
$$\delta(\tau) = d(\tau) / d_{stat}$$
$$\varphi(\tau) = \frac{f(\tau)}{f_{stat}} = \frac{f(\tau)}{K_{el} d_{stat}} = \frac{f(\tau)}{M \omega^2 d_{stat}} \quad (21)$$
$$\kappa(\tau) = \frac{f_k(\delta)}{f_{stat}}$$

K_{el} bezeichnet die elastische Federkonstante und M die Masse. $d_{stat} = f_{stat} / K_{el}$ ist die elastische Verschiebung beim Aufbringen der statischen Einwirkung und $\omega = \sqrt{K_{el} / M}$ ist die Kreisfrequenz und $T = 2\pi / \omega$ die Periode des elastischen Einmassenschwingers.

I.3.2 Lastfälle

In der Parameterstudie sind fünf verschiedene Lastfälle untersucht worden:

1. Erdbeben
2. Brückendurchfahrt
3. Lokale Fahrbahnunebenheit
4. Bremskraft in Längsrichtung
5. Vertikale Einwirkungen durch Rückfederung des Fahrzeugs

Bei jeder Einwirkung wurde neben dem charakteristischen Parameter der Einwirkung auch der Widerstand der Feder variiert. Als zusätzlicher Parameter wurde das Verhältnis der Fliesskraft der Feder zum quasi-statischen Anteil der Einwirkung gewählt: F_y / F_{stat} eingeführt. In allen Lastfällen wurden die statischen Einwirkungen (z.B. Eigengewicht des Tragwerks) nicht berücksichtigt, da sie für die qualitativen Ergebnisse keine Bedeutung haben. Durch diese Wahl sollte die Auswirkung der veränderlichen Einwirkungen besser zum Ausdruck gebracht werden.

I.4 Resultate

I.4.1 Zyklische Einwirkung

Diese Einwirkung wird durch eine harmonische Kraft beschrieben (Abb. 2). Sie hat keine quasi-statische Kraftkomponente und ähnelt, stark vereinfacht, einer Einwirkung durch Erdbeben. Die Dauer der Einwirkung beträgt 20 Perioden. Über diese Zeitspanne wird die Einwirkung mit einem Halbsinus moduliert. Ihr Maximum wird immer bei 10 Perioden erreicht. Parametrisiert wird die Schwingungsperiode T_s der Einwirkung.

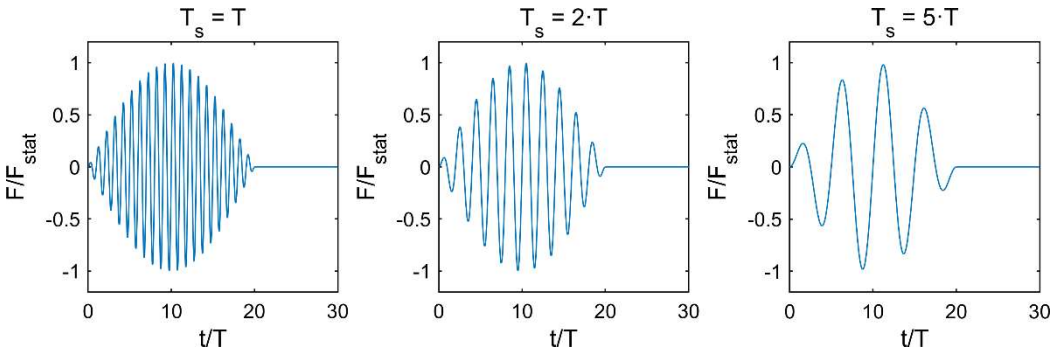


***Abb. 2** Zyklische Einwirkung.*

Abb. 3 zeigt den Zeitverlauf der Verformung, die dynamische Kraft und das Kraft-Verformungs-Diagramm eines Einmassenschwingers (EMS) mit einem ideal-plastischen Federverhalten und einem Widerstand von F_y/F_{stat} = 1.2, der bei der Resonanzfrequenz angeregt wird. Zum Vergleich ist jeweils auch der Zeitverlauf eines linearen EMS

dargestellt. Dieser zeigt sowohl bei der Verformung wie auch bei der dyn. Kraft, eine Zunahme der Schwingungsamplituden mit fortschreitender Anregung bis ein Maximum erreicht (quasi-Resonanz) wird. Danach werden aufgrund der viskosen Dämpfung und der abnehmenden und schliesslich verschwindenden Einwirkung die Amplituden sukzessiv kleiner. Die Verformung der dyn. Kraft des elasto-plastischen EMS ist sehr viel kleiner als jene des elastischen EMS. Der Grund ist aus dem Kraft-Verformungs-Diagramm ersichtlich, das die Hysteresekurven aufgrund des elasto-plastischen Verhaltens der Feder zeigt. Bei jedem Zyklus wird durch die plastischen Verformungen Energie dissipiert (Fläche innerhalb der Hysteresekurven), die eine stark dämpfende Wirkung auf den EMS hat. Da das Stoffgesetz ideal-plastisch ist, wird der Absolutbetrag der dyn. Kraft auf F_y/F_{stat} = 1.2 begrenzt.

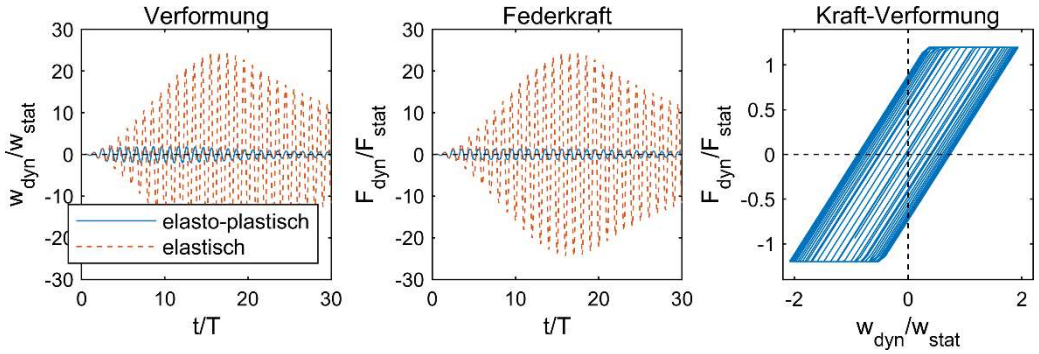


***Abb. 3** Zeitverläufe der Verformung und dyn. Kraft sowie Kraft-Verformungs-Diagramm eines EMS mit einem ideal-plastischen Federverhalten.*

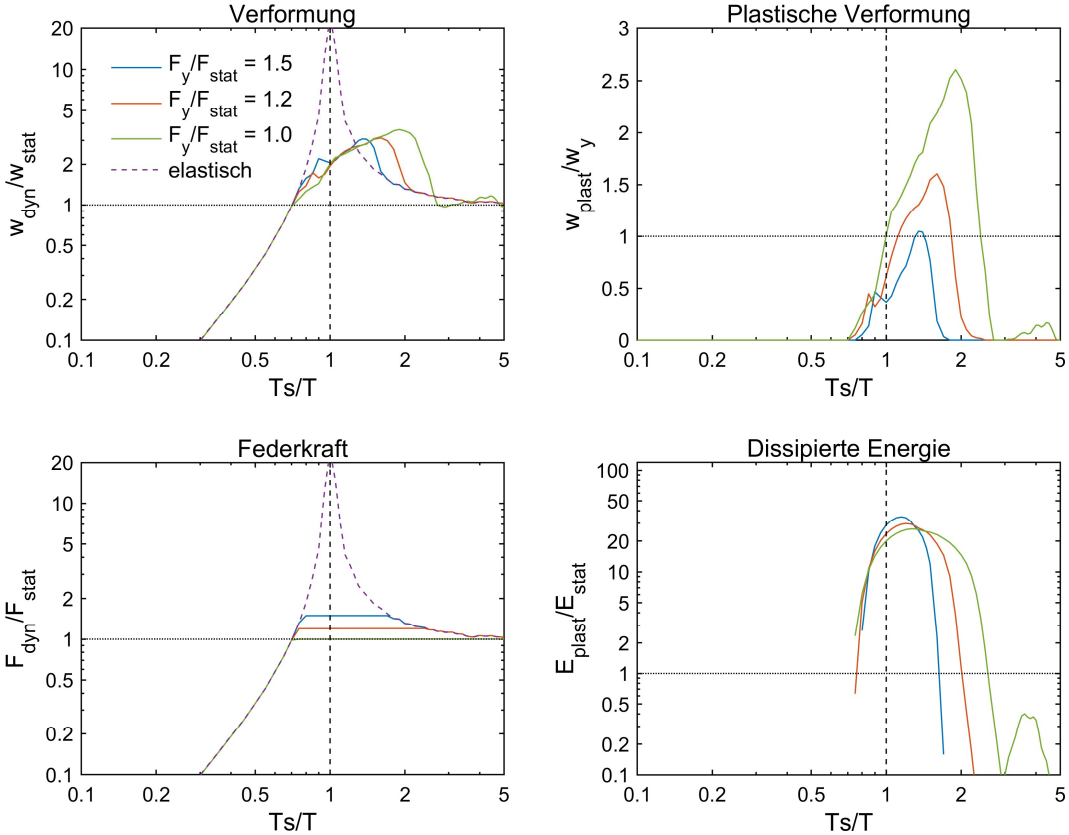


***Abb. 4** Verformung, plastische Verformung, dyn. Kraft und dissipierte Energie eines EMS mit einem ideal-plastischen Federverhalten.*

Eine Übersicht des Verhaltens des EMS mit einem ideal-plastischen Federverhalten bei verschiedenen Anregungsfrequenzen und Widerständen zeigt Abb. 4. Das Diagramm links oben zeigt den Maximalwert der Verformung des EMS im Verhältnis zur elastischen statischen Verformung. Den Maximalwert der plastischen Verformung im Verhältnis zur

Verformung bei Fliessbeginn zeigt das Diagramm oben rechts. Im Diagramm unten links ist die dyn. Kraft im Verhältnis zur statischen Kraft dargestellt und unten rechts ist die kumulierte, durch die Plastifizierung der Feder dissipierte Energie im Verhältnis zur elastischen Energie der Feder beim Aufbringen der statischen Kraft abgebildet.

Die Verformung und die dynamische Kraft des elastischen EMS weisen den typischen Kurvenverlauf eines Resonators mit einem Maximum bei der Eigenperiode des EMS, auch wenn der stationäre Resonanzzustand nicht erreicht wird, da die Anregung zu kurz währt. Die Verformungen des elasto-plastischen EMS folgt bei Perioden kleiner als der Eigenperiode der Kurve des elastischen EMS solange die jeweilige Fliessgrenze nicht überschritten wird. Oberhalb der Eigenperiode schmiegen sich die Kurven wieder an die Kurve des elasto-plastischen EMS an, sobald die jeweilige Fliessgrenze nicht mehr erreicht wird. Das Intervall der Anregungsperioden, in dem die Fliessgrenze überschritten wird ist (erwartungsgemäss) kleiner, je höher die Fliessgrenze ist. Dies ist auch sehr deutlich in den Diagrammen ersichtlich, welche die plastische Verformung und die dyn. Kraft darstellen.

Die Amplitude der plastischen Verformung nimmt, ebenfalls erwartungsgemäss, mit abnehmender Fliesskraft zu. Es ist zu beachten, dass in diesem Diagramm nicht die kumulierte plastische Verformung festgehalten wird, sondern der Betrag der grössten Amplitude. Aufgrund der vielen Zyklen ist die kumulierte plastische Verformung selbstverständlich viel grösser. Bemerkenswert hingegen ist, dass die grösste plastische Verformung nicht bei der Eigenperiode auftritt, sondern bei längeren Anregungsperioden. Die Differenz zwischen der Anregungsperiode mit der maximalen plastischen Verformung und der Eigenperiode nimmt mit abnehmender Fliesskraft zu. Dieses Verhalten schlägt sich selbstverständlich auch auf die Verformungen nieder. Der Grund für dieses Verhalten wird im Kapitel zur Brückendurchfahrt erläutert.

Abb. 5 zeigt den Zeitverlauf der Verformung, die dyn. Kraft und das Kraft-Verformungs-Diagramm des EMS mit einer Feder mit Verfestigung und einer Festigkeit von $F_y/F_{stat} = 1.2$, der bei der Resonanzfrequenz angeregt wird. Im Vergleich zum EMS mit ideal-plastischer isotrope Feder weist er grössere Verformungen und Federkräfte auf. Das jeweilige Maximum tritt auch etwa zeitgleich zum Maximum des linear elastischen EMS auf. Dieses Verhalten ist darin begründet, dass die plastischen Verformungen aufgrund der Verfestigung den linear elastischen Bereich vergrössern. Dadurch kann der EMS mehr Energie aufnehmen. Dadurch entstehen zusätzliche plastische Verformungen, die wiederum den elastischen Bereich vergrössern. Eine Reduktion der Verformungen und Federkräfte tritt daher erst ein, wenn die Einwirkung abnimmt und verschwindet. Die Hysterese im Kraft-Verformungs-Diagramm ist daher enger als bei einer ideal-plastischen Feder und ähnelt stark einem EMS mit viskoser Dämpfung.

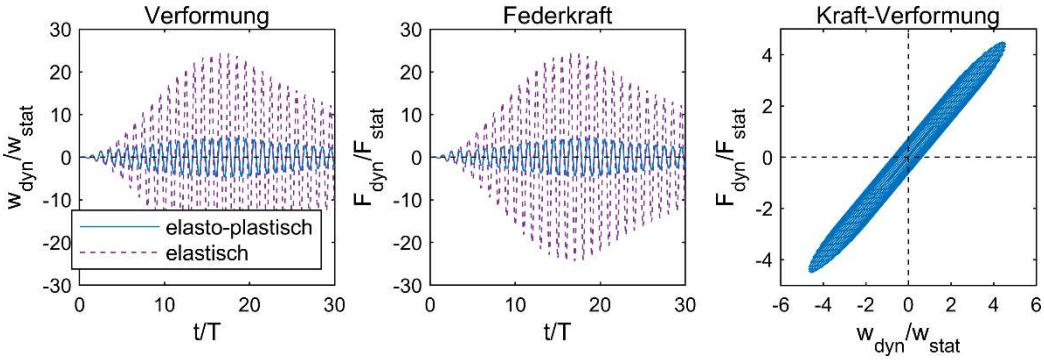


***Abb. 5** Zeitverläufe der Verformung und dyn. Kraft sowie Kraft-Verformungs-Diagramm eines EMS mit einem elasto-plastischen Federverhalten mit Verfestigung.*

Dieses Verhalten ist auch deutlich in Abb. 6 ersichtlich. Die Kurven der Verformung und dyn. Kraft des EMS mit Verfestigung ähneln stark den Kurven eines linear elastischen EMS mit grosser viskoser Dämpfung. Die Kurven der verschiedenen Festigkeiten weichen, insbesondere bei der dyn. Kraft, wenig voneinander ab. Die grössten Abweichungen treten bei der Verformung bei Anregungsperioden auf, die grösser als die Eigenperiode sind. Bei

den Festigkeiten F_y/F_{stat} = 1.2 und F_y/F_{stat} = 1.5 schmiegen sich die Kurven an die Kurve des linear elastischen EMS, sobald die Fliesskraft nicht mehr überschritten wird. Die Amplitude und Anregungsperiode der Maxima sind praktisch gleich. Die plastischen Verformungen nehmen im Vergleich zum EMS mit ideal-plastischer Feder ab und das Maximum der Amplitude tritt nun wesentlich näher zur Eigenperiode auf.

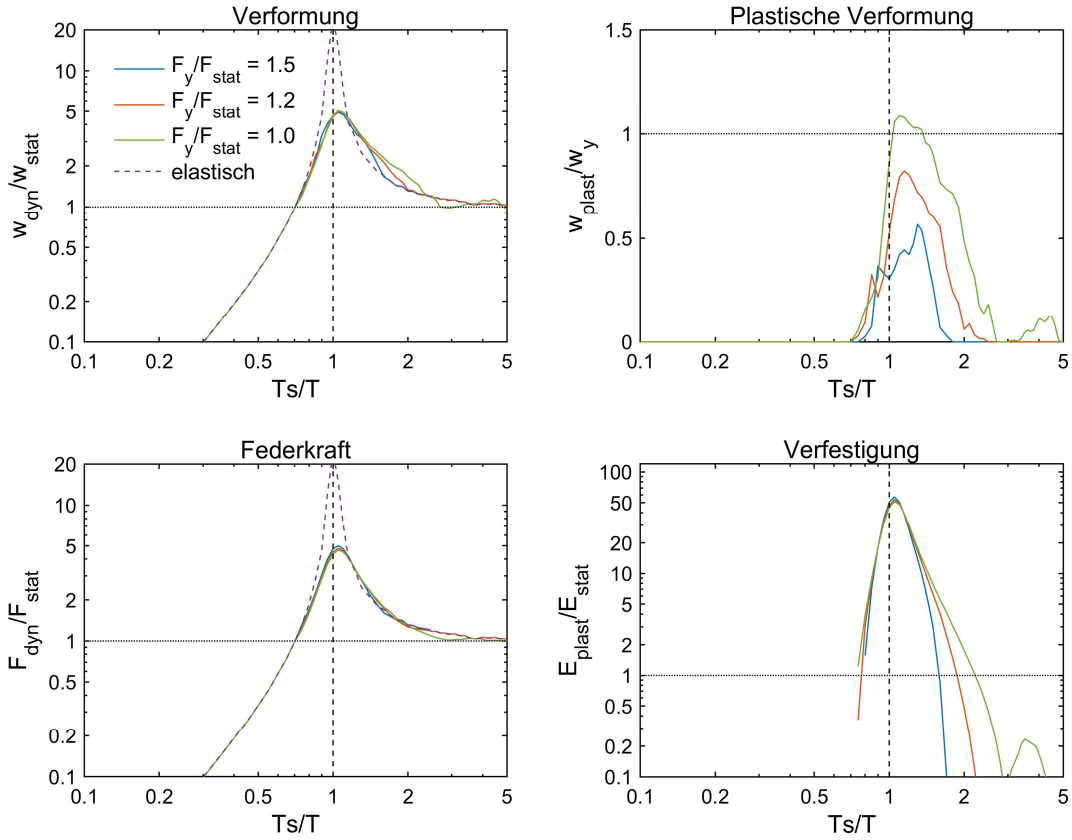


***Abb. 6** Verformung, plastische Verformung, dyn. Kraft und dissipierte Energie eines EMS mit einem elasto-plastischen Federverhalten mit Verfestigung.*

I.4.2 Brückendurchfahrt

Diese Einwirkung beschreibt die Durchfahrt eines Fahrzeugs über eine Brücke. Sie enthält eine quasi-statische Komponente, welche die Einwirkung der beweglichen Masse des Fahrzeugs beschreibt, und eine harmonische Komponente, welche die zeitveränderlichen Radlasten berücksichtigt (Abb. 7). Die Dauer der Einwirkung beträgt 20 Perioden. Die quasi-statische Komponente wird durch eine Halbsinus modelliert und ihr Maximum wird immer bei 10 Perioden erreicht. Die Amplitude der dynamischen Komponente beträgt 5% der quasi-statischen Komponente. Parametrisiert wird die Schwingungsperiode T_s der dynamischen Komponente.

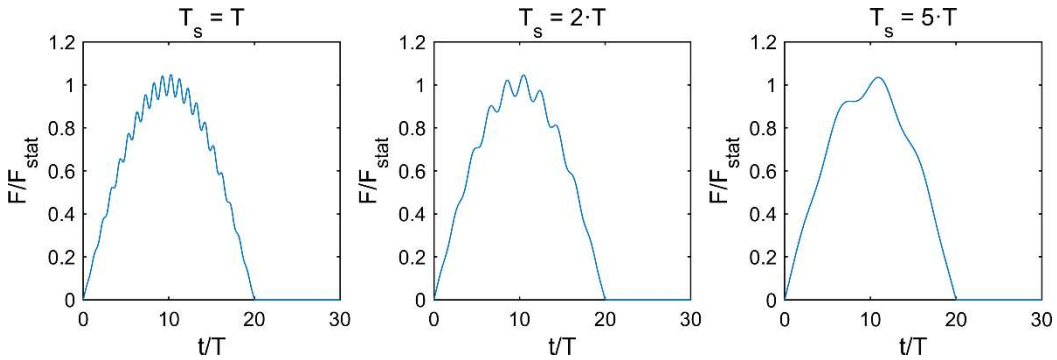


***Abb. 7** Einwirkung bei Brückendurchfahrt.*

Abb. 8 zeigt den Zeitverlauf der Verformung, die dyn. Kraft und das Kraft-Verformungs-Diagramm eines EMS mit einem ideal-plastischen Federverhalten und einem Widerstand von F_y/F_{stat} = 1.2, der bei der Resonanzfrequenz angeregt wird. Zum Vergleich sind die Zeitverläufe des linear elastischen EMS dargestellt. Der Zeitverlauf ist für beide EMS identisch, solange die Fliesskraft nicht überschritten wird. Nach dem Überschreiten der Fliesskraft nehmen beim elasto-plastischen EMS die Verformungen im Vergleich zum linear elastischen EMS zu. Die Schwingungsamplituden nehmen im Vergleich zum linear elastischen EMS hingegen ab, da durch die plastische Verformungen Energie dissipiert wird. Kurz vor dem Erreichen der maximalen Verformung nehmen die Schwingungsamplituden wieder zu, da offenbar die Plastifizierung abnimmt. Nachdem die Einwirkung verschwindet, schwingt der elasto-plastische EMS um die bleibenden Verformungen aus. Der linear elastische EMS schwingt hingegen um die ursprüngliche Ruhelage aus.

Im Gegensatz zum vorhergehenden Lastfall, ist bei der Brückendurchfahrt die maximale Verformung des elasto-plastischen EMS grösser als die die maximale Verformung des linear elastischen EMS. Zudem sind die Schwingungsamplituden des elasto-plastischen EMS kleiner als jene des linear elastischen EMS, doch die Reduktion fällt deutlich kleiner aus als beim Lastfall Erdbeben. Die Ursache ist aus dem Kraft-Verformungsdiagramm ersichtlich: Es fehlen vollkommen die Hysteresen, die für eine grosse dämpfende Wirkung sorgen. Die Schwingungsamplituden der dynamischen Komponente der Einwirkung sind zu klein im Vergleich zur Verformung, die aufgrund der quasi-statischen Komponente der Einwirkung auftritt. Dadurch haben plastische Verformungen immer die gleiche Richtung und die maximale plastische Verformung ist daher gleich der kumulierten plastischen Verformung. Energiedissipation durch plastische Verformung tritt auf, doch ist diese sehr viel kleiner als beim Lastfall Erdbeben. Zudem ist eine grössere Energiedissipation immer mit grösseren bleibenden (plastischen) Verformungen verbunden.

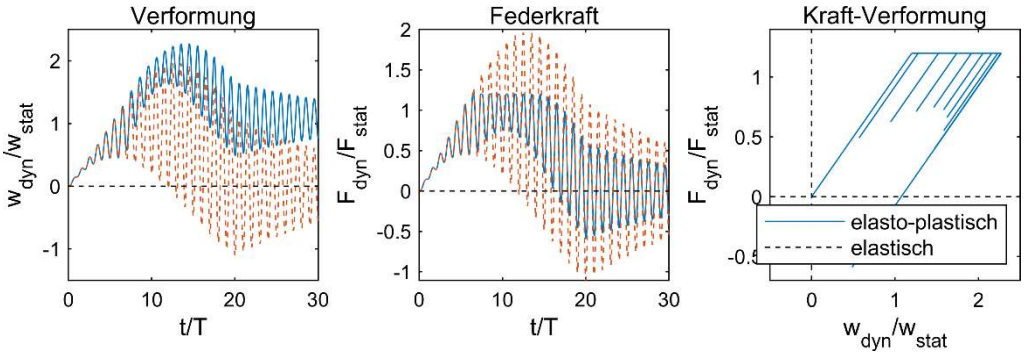


Abb. 8 *Zeitverläufe der Verformung und dyn. Kraft sowie Kraft-Verformungs-Diagramm eines EMS mit einem ideal-plastischen Federverhalten.*

Diese Feststellungen werden deutlich in den Frequenzganglinien in Abb. 9 bestätigt. Die Verformungen des elasto-plastischen EMS sind bei jeder Anregungsfrequenz grösser als die Verformungen des linear elastischen EMS. Dies ist besonders deutlich bei einer Festigkeit von F_y/F_{stat} = 1.0 ersichtlich, die bei sehr langen Perioden ihr Maximum annimmt. Bei den höheren Festigkeiten sind die Unterschiede zum linear elastischen EMS nicht besonders gross und zudem auf einen engen Periodenbereich um die Eigenfrequenz beschränkt. Die plastischen Verformungen weisen aufgrund der Äquivalenz zwischen der kumulierten und der maximalen plastischen Verformung sehr ähnliche Eigenschaften auf.

Die dynamische Kraft des elasto-plastischen EMS ist durch die Fliesskraft der Feder beschränkt. Im Vergleich zum Lastfall Erdbeben ist die Reduktion relativ zum linear elastischen EMS jedoch weniger gross. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass die Amplitude der dynamischen Komponente der Einwirkung nur 5% der statischen Komponente der Einwirkung beträgt. Eine grössere dynamische Komponente würde die dyn. Kraft auch stärker reduzieren. Die Frequenzganglinien der dissipierten Energie zeigen deutlich, dass durch plastische Verformungen viel weniger Energie dissipiert wird als im Lastfall Erdbeben.

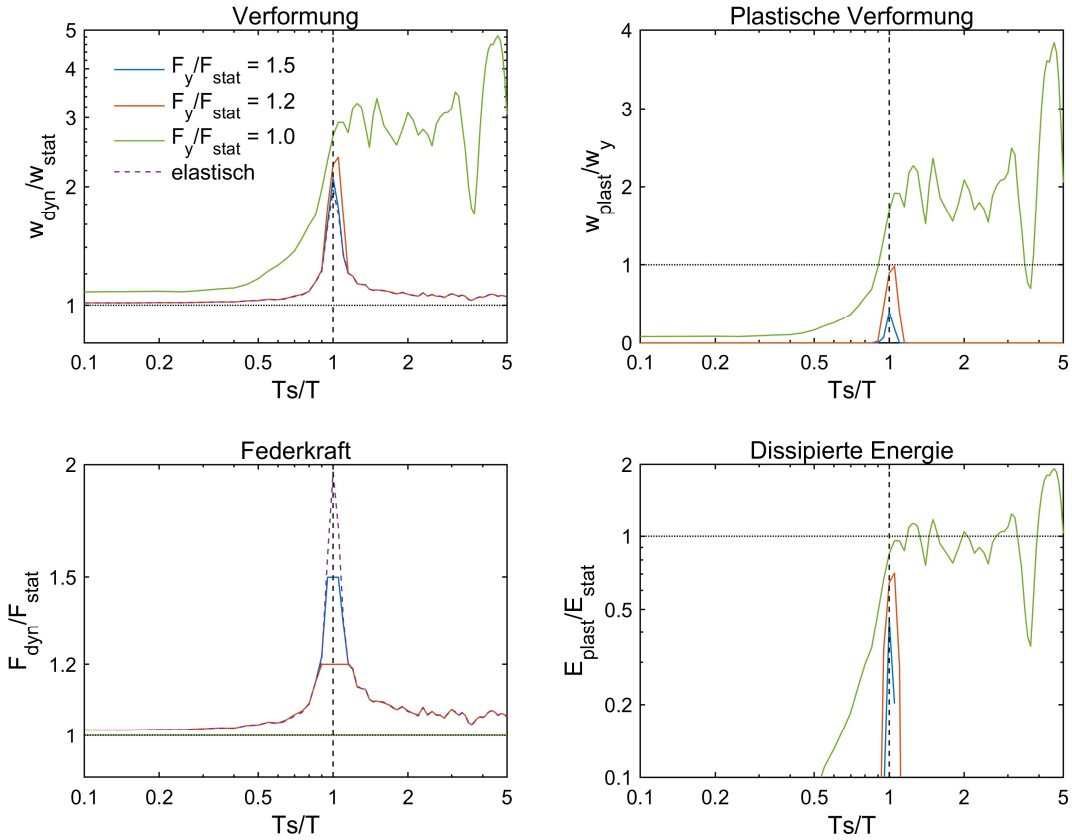


Abb. 9 *Verformung, plastische Verformung, dyn. Kraft und dissipierte Energie eines EMS mit einem ideal-plastischen Federverhalten.*

Die Phasen der plastischen Verformung des elasto-plastischen EMS mit einer Festigkeit von F_y/F_{stat} = 1.0 sind in Abb. 10 dargestellt. Das Diagramm links bezieht sich auf eine Anregung mit der Eigenfrequenz des EMS und das Diagramm rechts auf eine Anregung mit fünffacher Periode der Eigenfrequenz. Die blauen Kurven zeigen die Schwinggeschwindigkeit und die roten Kurven die plastische Verformung. Die Phasen mit plastischer Verformung sind mit roter Hintergrundfarbe markiert.

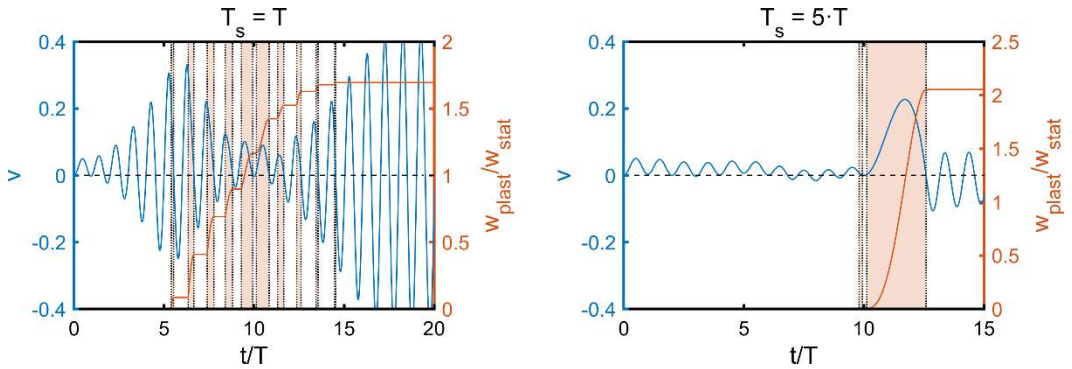


Abb. 10 *Phasen plastischer Verformung des EMS mit einem ideal-plastischen Federverhalten.*

Bei einer Anregung des EMS mit seiner Eigenfrequenz nimmt die Schwinggeschwindigkeit vorerst markant zu, da der EMS bei dieser Anregungsfrequenz viel Energie aufnimmt. Sobald plastische Verformungen auftreten, werden die Schwingungen abgedämpft und erreichen ein Minimum im Bereich des Maximums der Einwirkung. Obwohl die Einwirkung danach abnimmt, nehmen die Schwingungen trotzdem wieder zu, da die zusätzlichen plastischen Verformungen abnehmen. Der EMS verhält sich vornehmlich linear und nimmt daher wieder verstärkt Energie auf. In einer Plastifizierungsphase ist die dissipierte Energie

proportional zum Inkrement der plastischen Verformung. Da die Plastifizierungsphasen bereits bei etwa t/T = 6 einsetzen, d.h. deutlich bevor die Einwirkung ihr Maximum erreicht, wird die Plastifizierung durch die Schwingungen verursacht. Im Bereich des Maximums der Einwirkung (t/T = 10) wird die Plastifizierung sowohl durch die Einwirkung, die grösser als die Fliesskraft ist, wie auch durch die deutlich abgeschwächten Schwingungen (elastische Energie) verursacht.

Bei der Anregung mit der fünffachen der Periode der Eigenfrequenz bleibt die Schwinggeschwindigkeit klein, solange der EMS sich elastisch verhält. Die Schwinggeschwindigkeit bleibt klein, weil bei dieser Anregungsfrequenz die Energieaufnahme des EMS gering ist. Sobald die Fliesskraft überschritten ist, nimmt die Schwinggeschwindigkeit stark zu. Bei einer Anregung mit der fünffachen der Periode der Eigenfrequenz tritt dies kurz nach t/T = 10 ein, wenn die Einwirkung die Fliessgrenze erreicht, da praktisch keine Schwingungen auftreten. Die Phase mit den plastischen Verformungen endet, wenn die Schwinggeschwindigkeit wieder auf null zurückgeht. Zu diesem Zeitpunkt ist auch die Verformung maximal. Die Phase der Plastifizierung entspricht etwa der Hälfte der Periode der dynamischen Komponente der Einwirkung und belegt, dass sobald die Einwirkung kleiner als die Fliesskraft ist, die elastische Phase einsetzt. Die plastische Verformung ist deshalb praktisch allein durch die quasi-statische Einwirkung selbst und nicht durch die Dynamik des EMS verursacht. Die kurze Plastifizierungsphase kurz vor t/T = 10 und die leicht verzögert einsetzende grosse Plastifizierungsphase ist auf eine dynamische Schwingung zurückzuführen. Ihre Auswirkung auf die plastische Verformung ist jedoch verschwindend klein.

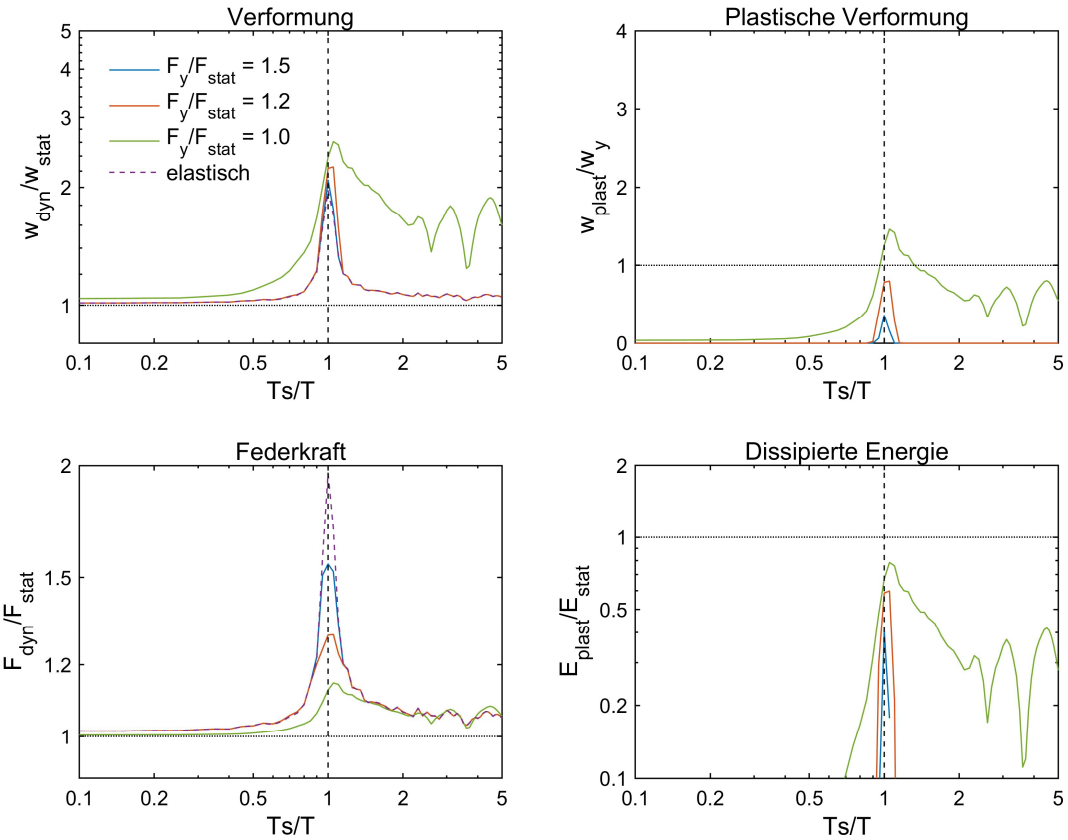


Abb. 11 *Verformung, plastische Verformung, dyn. Kraft und dissipierte Energie eines EMS mit elasto-plastischem Federverhalten mit Verfestigung.*

Dieser Mechanismus ist beim elasto-plastischen EMS mit Verfestigung deutlich weniger wirksam, wie die Frequenzganglinie des Widerstands F_y/F_{stat} = 1.0 in Abb. 11 zeigt. Die jeweiligen Maxima treten etwas oberhalb der Periode der Eigenfrequenz auf. Die Verformungen bzw. plastischen Verformungen bei Anregungungsperioden über der Periode der Eigenfrequenz sind deutlich kleiner als beim EMS ohne Verfestigung. Völlig

verschwinden sie nicht, doch ihr Ausmass wird durch die, infolge der Verfestigung, verbleibende Rückstellkraft der Feder begrenzt. Dies ist gut in der deutlich kleineren Schwinggeschwindigkeit bei der Anregungsperiode 5T in Abb. 12 ersichtlich. Die verbleibende Steifigkeit der Feder führt zu einer Umkehrung der Bewegungsrichtung und dadurch zum raschen Ende der Plastifizierungsphase kurz nachdem das lokale Maximum der Einwirkung bei etwa t/T = 12 erreicht wird (Abb. 7).

Die Verfestigung führt zu keiner signifikanten Reduktion der Verformungen und plastischen Verformungen bei den Widerständen F_y/F_{stat} = 1.2 und 1.5. Die dynamische Kraft nimmt erwartungsgemäss im Vergleich zum ideal-plastischen EMS zu. Dies umso deutlicher, je kleiner der Widerstand ist. Die grössten Amplituden der Frequenzganglinie der dynamischen Kraft treten in der Nähe der Eigenfrequenz auf (T_s/T = 1). Die durch plastische Verformungen dissipierte Energie nimmt bei der Festigkeit F_y/F_{stat} = 1.0 generell ab, während sie bei den höheren Festigkeiten nahezu unverändert bleibt.

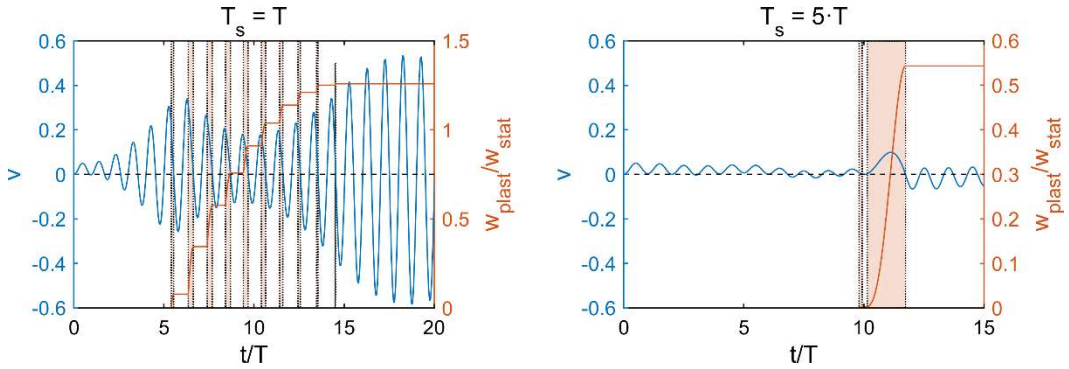


***Abb. 12** Phasen plastischer Verformung des EMS mit Verfestigung.*

I.4.3 Lokale Fahrbahnunebenheit

Diese Einwirkung beschreibt den Stoss einer Radlastgruppe infolge einer Fahrbahnunebenheit oder eines Fahrbahnübergangs auf eine Fahrbahnplatte. Der Zeitverlauf der Einwirkung besteht aus einem Halbsinus-Impuls (quasi-statische Komponente), der die vorbeifahrende statische Radlast modelliert, und einem zeitlich begrenzten Impuls, der die Radlastvergrösserung infolge der lokale Fahrbahnunebenheit modelliert (Abb. 13). Die maximale Amplitude der Einwirkung ist um 20% grösser als das Maximum der quasi-statischen Komponente. Die Periode des Impulses entspricht der Periode der Eigenfrequenz des EMS. Er wird proportional zu einer Exponentialfunktion mit zunehmender Zeit abgemindert. Parametrisiert wird die Dauer der Einwirkung T_s.

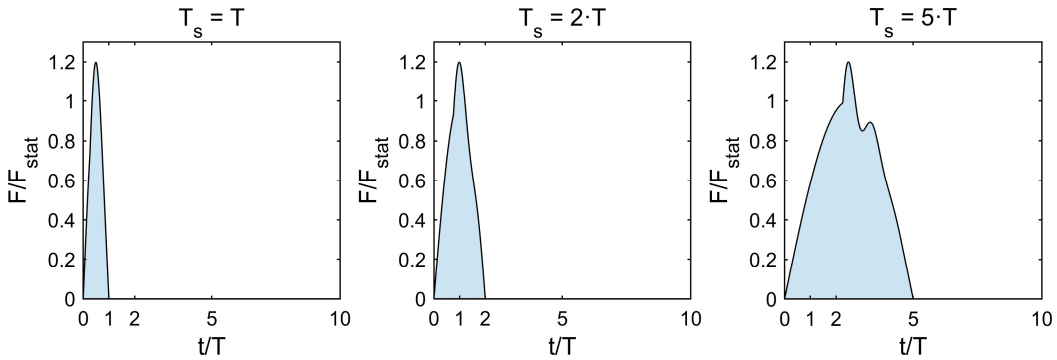


***Abb. 13** Einwirkung bei Fahrbahnunebenheit.*

Abb. 14 zeigt den Zeitverlauf der Verformung, die dyn. Kraft und das Kraft-Verformungs-Diagramm eines EMS mit einem ideal-plastischen Federverhalten und einem Widerstand von F_y/F_{stat} = 1.2. Die Dauer der Einwirkung beträgt T_s/T = 1. Die Verformung des elasto-plastischen EMS folgt nach dem Einsetzen der Einwirkung zunächst dem Zeitverlauf der Verformung des linear elastischen EMS. Während der linear elastische EMS bei etwa

w_{dyn}/w_{stat} = 2 zurückfedert, nimmt die Verformung des elasto-plastischen EMS weiter zu bis die plastische Verformung die kinetische Energie des EMS aufgezehrt hat. Danach schwingt der EMS um die bleibende Verformung von etwa w_{plast}/w_{stat} = 1.6 aus. Der linear elastische EMS schwingt selbstverständlich um die ursprüngliche Ruhelage aus.

Die dyn. Kraft der beiden EMS ist identisch, bis der elasto-plastischen EMS die Fliesskraft erreicht. Die dyn. Kraft des elasto-plastischen EMS bleibt dann konstant solange die Plastifizierung anhält. Danach schwingt die dyn. Kraft aus. Der linear elastische EMS erreicht hingegen eine dyn. Kraft von etwa dem zweifachen der statischen Kraft, bevor die Ausschwingphase einsetzt. Die Schwingungsamplituden des elasto-plastischen EMS sind etwas kleiner als jene des linear elastischen EMS, weil die Plastifizierung Energie dissipiert hat.

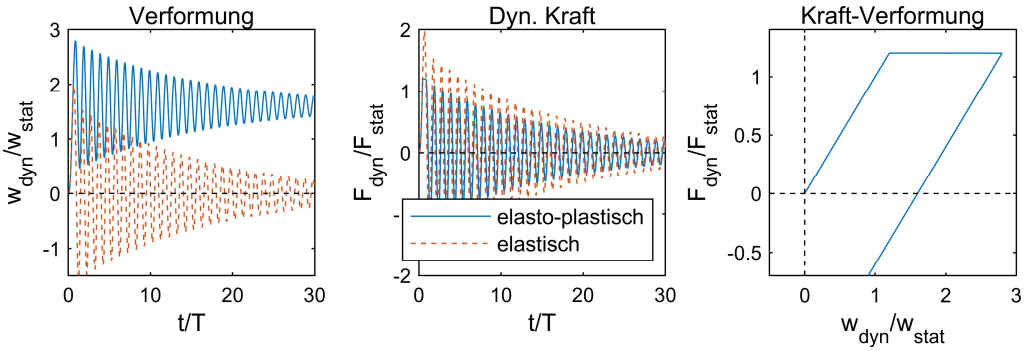


Abb. 14 *Zeitverläufe der Verformung und dyn. Kraft sowie Kraft-Verformungs-Diagramm eines EMS mit einem ideal-plastischen Federverhalten.*

Die Plastifizierungsphase beschränkt sich auf den ersten Schwingungszyklus bis zum Erreichen des Maximums der Verformung. Abb. 15 bestätigt dies sowohl für die Dauer der Einwirkung T_s/T = 1 wie für T_s/T = 5. Bei T_s/T = 1 beginnt die plastische Verformung nachdem die Einwirkung die Fliesskraft erreicht hat (mit B bezeichnete vertikale Linie) und endet nachdem die Einwirkung kleiner als die Fliesskraft geworden ist (mit E bezeichnete vertikale Linie). Zu Beginn verzögert die Trägheitskraft der Masse, die entgegen der Einwirkung wirkt, den Beginn der plastischen Verformung. Dieser Mechanismus verhindert auch die Bildung einer plastischen Verformung für Einwirkungen mit kurzer Dauer, obwohl die Einwirkung die Fliesskraft überschreitet (Abb. 16). Die kinetische Energie, die der EMS infolge der Einwirkung aufnimmt, verzögert das Ende der plastischen Verformung. In Abb. 15 ist ersichtlich, dass etwas weniger als die Hälfte der plastischen Verformung gebildet wird, nachdem die Einwirkung kleiner als die Fliesskraft wird.

Bei einer Dauer der Einwirkung T_s/T = 5 verläuft die Plastifizierungsphase sehr ähnlich. Da weniger kinetische Energie aufgenommen wird (kleinere maximale Schwinggeschwindigkeit), fällt die plastische Verformung kleiner aus als bei T_s/T = 1.

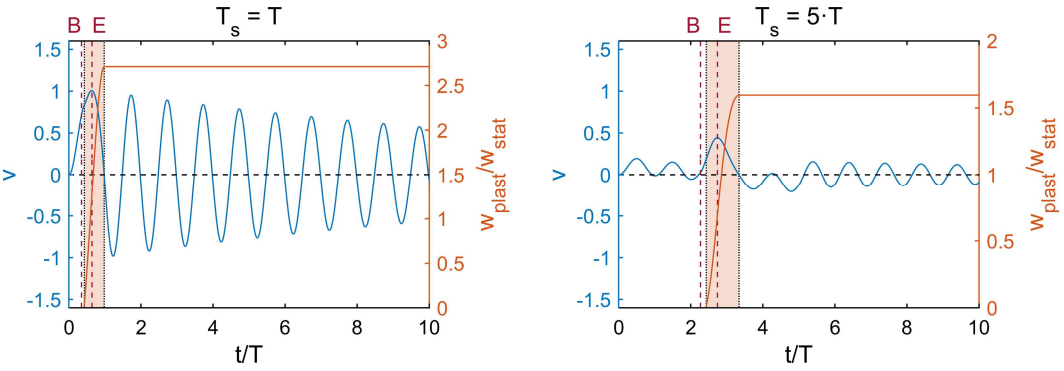


Abb. 15 *Phase plastischer Verformung des EMS mit einem ideal-plastischen Federverhalten* mit der Festigkeit F_y/F_{stat} = 1.0.

Die Frequenzganglinien in Abb. 16 bestätigen, dass bei diesem Lastfall die plastische Verformung durch die initiale Aufnahme kinetischer Energie und nicht durch Quasi-Resonanz bestimmt ist. Der Bereich der Dauer der Einwirkung, in der plastischen Verformung auftritt, ist viel breiter als beim Lastfall Brückendurchfahrt, in der die plastische Verformung sehr stark um die Periode der Eigenfrequenz des EMS konzentriert war. Die grösste plastische Verformung tritt auch bei diesem Lastfall um die Periode der Eigenfrequenz auf. Mit zunehmender Festigkeit wird der Bereich der Dauer der Einwirkung, in den plastischen Verformungen auftreten, immer kleiner, wie die Frequenzganglinien der plastischen Verformung und der dynamischen Kraft zeigen (Abb. 16).

Ein wichtiger Teil der plastischen Verformung wird bereits von der quasi-statischen Komponente erzeugt, wie die punktierten Frequenzganglinien in Abb.16 zeigen. Die Dynamik (aufgenommene kinetische Energie) führt deshalb auch zu plastischer Verformung, obwohl die Einwirkung die Fliesskraft nicht überschreitet. Der Einfluss der lokalen Unebenheit führt, erwartungsgemäss, zu einer generellen Vergrösserung der plastischen Verformung und zu einer Verbreiterung des Bereichs der Dauer der Einwirkung, in der plastische Verformung auftritt. Bei der Festigkeit $F_y/F_{stat} = 1.0$ tritt dieser Einfluss am deutlichsten hervor, da bedeutende plastische Verformungen bis zu einer Dauer der Einwirkung von $T_s/T = 5$ auftreten.

Mit zunehmender Festigkeit schwindet der Anteil der plastischen Verformung der quasi-statischen Komponente und der lokalen Unebenheit. Mit zunehmender Dauer der Einwirkung nimmt die plastische Verformung tendenziell ab (Abb. 16). Die Abnahme verläuft jedoch nicht monoton, da die Frequenzganglinien eine Wellenform aufweisen. In gewissen Intervallen der Dauer der Einwirkung nimmt der EMS mehr kinetische Energie auf, sodass wieder grössere plastische Verformungen daraus resultieren. Diese plastischen Verformungen erreichen jedoch nicht das Ausmass des Maximums der Frequenzganglinie, das, wie beim Lastfall Erdbeben, etwas oberhalb der Periode der Eigenfrequenz auftritt. Je grösser die Festigkeit, desto näher rückt das Maximum zur Periode der Eigenfrequenz und desto kleiner fällt seine Amplitude aus.

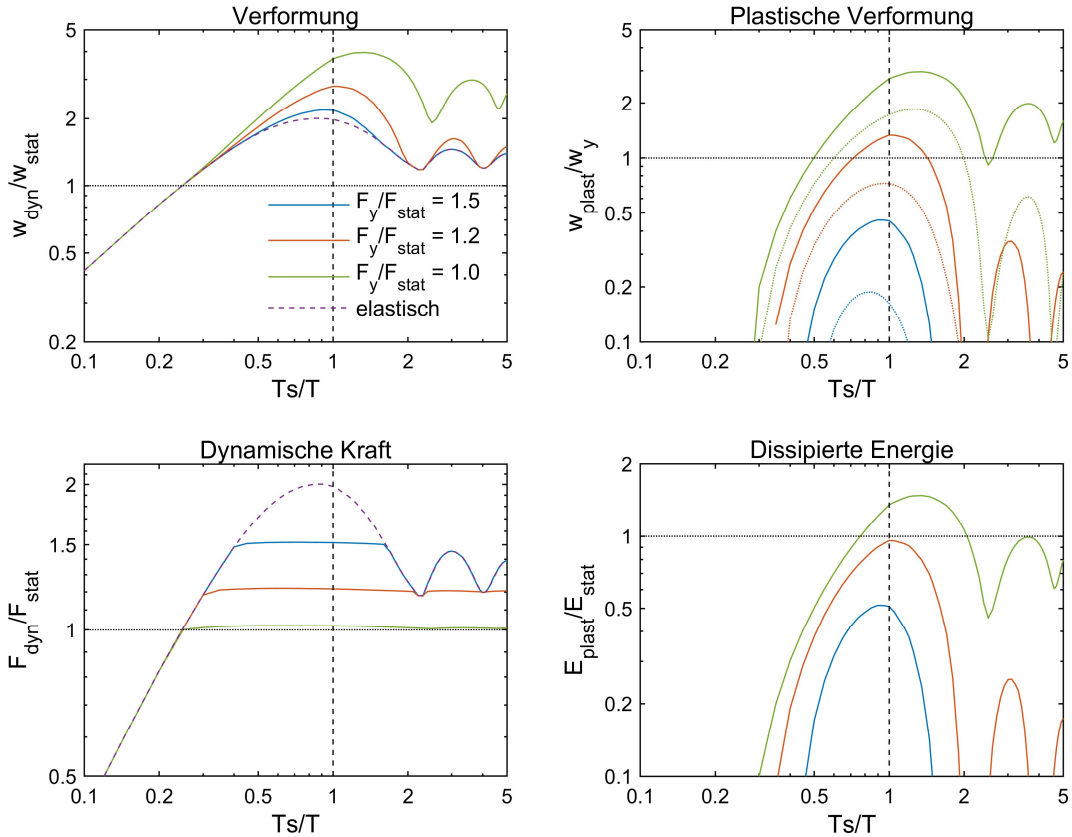


***Abb. 16** Verformung, plastische Verformung, dyn. Kraft und dissipierte Energie eines EMS mit einem ideal-plastischen Federverhalten.*

Die dynamische Kraft wird bei ideal-plastischem Verhalten selbstverständlich durch die Fliesskraft begrenzt. Diese Begrenzung führt jedoch wie im Lastfall Brückendurchfahrt automatisch zu grösseren plastischen Verformungen. Die Frequenzganglinie der dissipierten Energie ist proportional zur Frequenzganglinie der plastischen Verformung. Auch bei diesem Lastfall ist die dissipierte Energie bescheiden und eine dämpfende Wirkung nur über grosse plastische Verformungen zu erkaufen, wie der Fall mit einer Festigkeit von F_y/F_{stat} = 1.0 zeigt.

Die Verfestigung führt zu einer generellen Reduktion der plastischen Verformungen und Verformungen (Abb. 17). Am deutlichsten tritt dies bei einer Festigkeit von F_y/F_{stat} = 1.0 auf. Die bescheidene Reststeifigkeit führt dazu, dass der EMS bei plastischer Verformung nicht nur kinetische Energie, sondern auch potenzielle Energie speichert. Die Folge ist, dass deutlich kleinere Schwinggeschwindigkeiten auftreten, sodass das Ende der Phase mit plastischen Deformationen deutlich früher eintritt als bei einem ideal-elastischen Verhalten (Abb. 18). Mit zunehmenden Festigkeiten fällt die Reduktion im Vergleich zu einem ideal-plastischen EMS hingegen eher bescheiden aus. Die dynamische Kraft nimmt durch die Verfestigung erwartungsgemäss zu. Die Zunahme fällt desto grösser aus, je kleiner die Festigkeit ist. Bei einer Festigkeit von F_y/F_{stat} = 1.5 ist die Zunahme sehr bescheiden: das Maximum der Frequenzganglinie beträgt ca. 1.6. Die Zunahme verläuft affin zur plastischen Verformung. Auch für diesen Lastfall gilt: eine Zunahme des linear-elastischen Bereichs führt zu einer grösseren dynamischen Kraft und deshalb zu einer grösseren dynamischen Amplifikation.

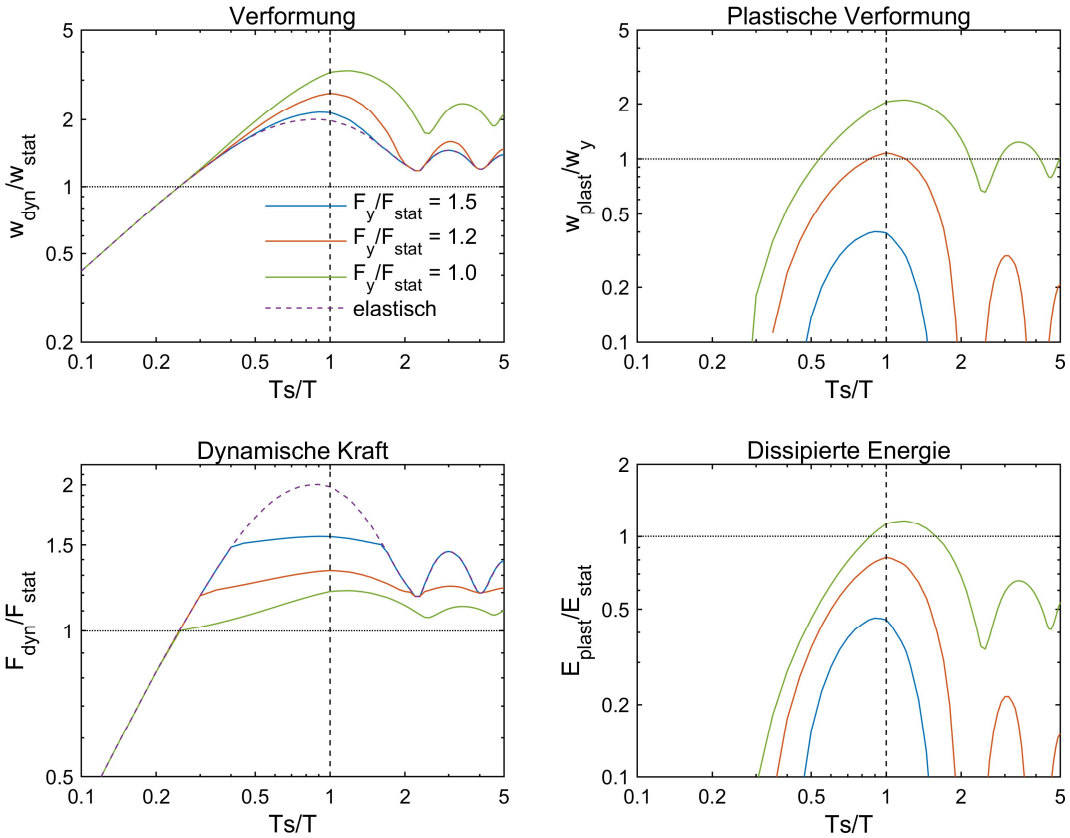


Abb. 17 *Verformung, plastische Verformung, dyn. Kraft und dissipierte Energie eines EMS mit elasto-plastischem Federverhalten mit Verfestigung.*

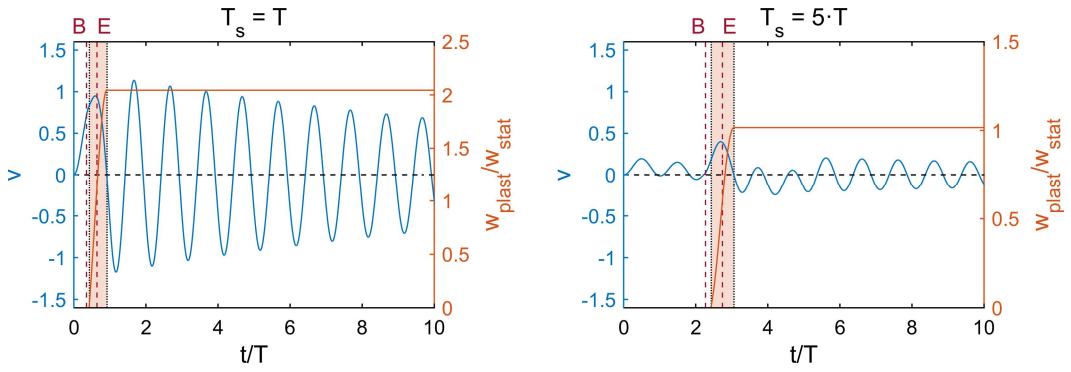


***Abb. 18** Phase plastischer Verformung des EMS mit Verfestigung (Festigkeit Fy/Fstat = 1.0).*

I.4.4 Bremskraft in Längsrichtung

Diese Einwirkung beschreibt den Kraftverlauf in Längsrichtung der Brücke bei einer Vollbremsung eines Fahrzeugs. Der Kraftverlauf ist zusammengesetzt aus einem Viertelsinus-Impuls (Lastzunahme bis zum Plateau) gefolgt von einem Rechteck-Impuls (Abb. 19). Parametrisiert ist die Dauer des Viertelsinus-Impulses. Die Dauer des Rechteckimpulses beträgt immer 5 Perioden. Die Amplitude der statischen Einwirkung entspricht der Amplitude des Plateaus.

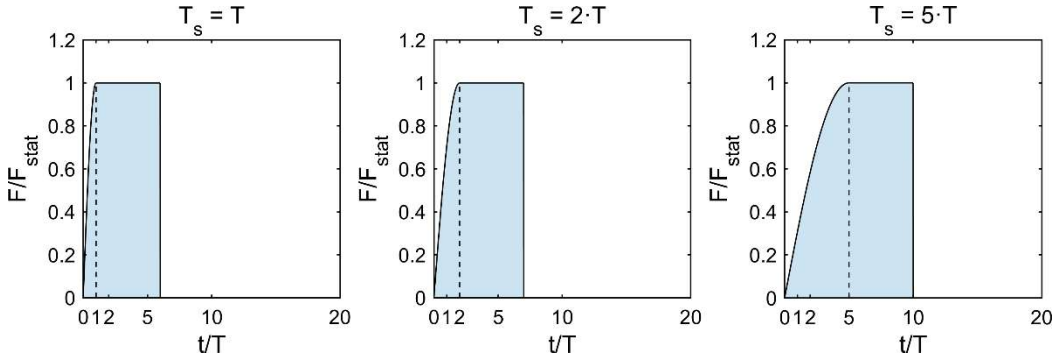


***Abb. 19** Einwirkung bei Bremskraft in Längsrichtung.*

Abb. 20 zeigt den Zeitverlauf der Verformung, die Federkraft und das Kraft-Verformungs-Diagramm eines EMS mit einem ideal-plastischen Federverhalten und einem Widerstand von F_y/F_{stat} = 1.2. Die Steigzeit der Einwirkung beträgt T_s/T = 0.2. Wie beim Lastfall Fahrbahnunebenheit wird durch die impulsartige Einwirkung das Maximum der Verformung und der Federkraft bereits in der ersten Schwingung erreicht. Auch die gesamten plastischen Verformungen entstehen während der ersten Schwingung (siehe dazu das Kraft-Verformungsdiagramm). Das weitere Schwingungsverhalten ist dann linear elastisch. Bemerkenswert ist, dass die Amplituden der Verformung und Federkraft in der Ausschwingphase, nachdem die Einwirkung verschwunden ist, beim elasto-plastischen EMS grösser als beim elastischen EMS sind. Der elasto-plastische EMS nimmt durch das abrupte Ende der Einwirkung mehr kinetische Energie auf als der linear-elastische EMS. Die Schwingungsamplituden in der Einwirkungsphase sind beim elasto-plastischen EMS hingegen deutlich kleiner als beim linear-elastischen EMS, da Energiedissipation durch die plastische Verformung die kinetische Energie reduziert.

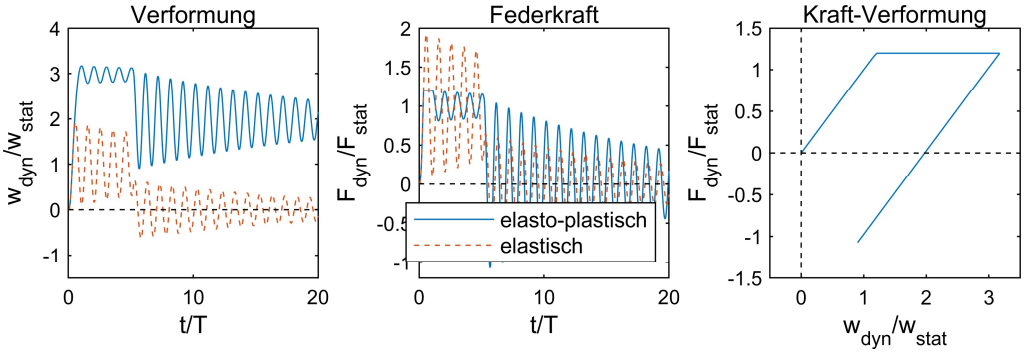


Abb. 20 *Zeitverläufe der Verformung und dyn. Kraft sowie Kraft-Verformungs-Diagramm eines EMS mit einem ideal-plastischen Federverhalten.*

Die Phase der plastischen Verformung ist in Abb. 21 dargestellt. Bei einer Steigzeit der Einwirkung von $T_s/T = 0.2$ weist der EMS am Abschluss der elastischen Anfangsphase eine deutlich grössere Schwinggeschwindigkeit auf als bei einer Steigzeit von $T_s/T = 1$. Dies ist konform zur bekannten Tatsache, dass je schneller die Belastung eines Heaviside-Impulses zunimmt, desto grösser fallen die maximalen Verformungen eines linear-elastischen EMS aus. Bei einer unendlich schnell zunehmenden Belastung beträgt das Verhältnis w_{dyn}/w_{stat} bekanntlich 2. Bei $T_s/T = 1$ beginnt die plastische Verformung, nachdem die Schwinggeschwindigkeit ihr Maximum erreicht hat.

Aufgrund der grösseren Schwinggeschwindigkeit treten bei $T_s/T = 0.2$ auch grössere plastische Deformationen auf als bei $T_s/T = 1$, da die Dauer der Plastifizierungsphase, die etwa der Dauer der konstanten Einwirkung entspricht, in beiden Fällen etwa gleich ist. Die plastische Verformung entspricht daher etwa der Dauer der konstanten Einwirkung multipliziert mit der mittleren Schwinggeschwindigkeit während dieser Dauer. In Wirklichkeit beginnt bei $T_s/T = 0.2$ die Plastifizierung etwas nach dem Ende der aufsteigenden Rampe (E) während bei $T_s/T = 1$ die Plastifizierung bereits während der Kraftzunahme beginnt, sodass die Plastifizierungsphase etwas länger ist. Das Ende der Plastifizierungsphase stimmt hingegen ziemlich genau mit dem Ende der Einwirkung überein.

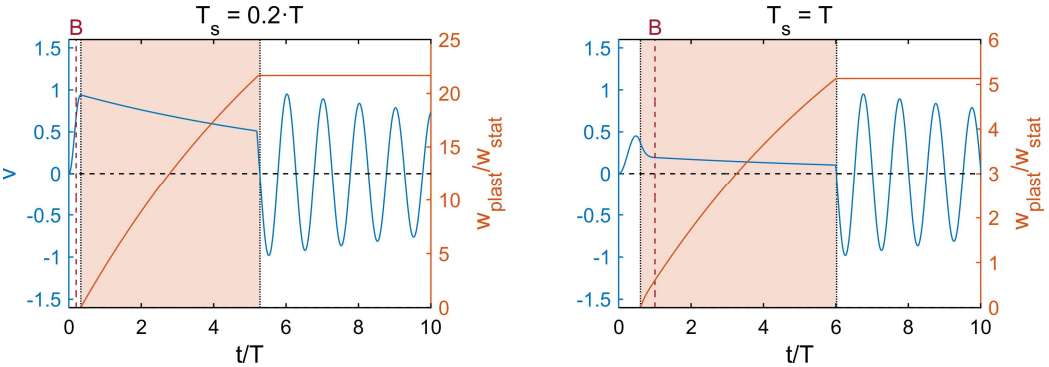


Abb. 21 *Phase plastischer Verformung des ideal-plastischen EMS mit der Festigkeit F_y/F_{stat} = 1.0.*

Die erwähnte Wirkung einer raschen Zunahme der Einwirkung ist deutlich an allen Frequenzganglinien in Abb. 22 zu erkennen. Bei allen Festigkeiten treten die Maxima der Frequenzganglinie bei der kürzesten Steigzeit der Einwirkung (Ts/T = 0.1) auf. Die Maxima der Verformung und plastischen Verformung nehmen mit zunehmender Festigkeit ab, wobei eine massive Reduktion zwischen den Festigkeiten F_y/F_{stat} = 1.0 und F_y/F_{stat} = 1.2 stattfindet.

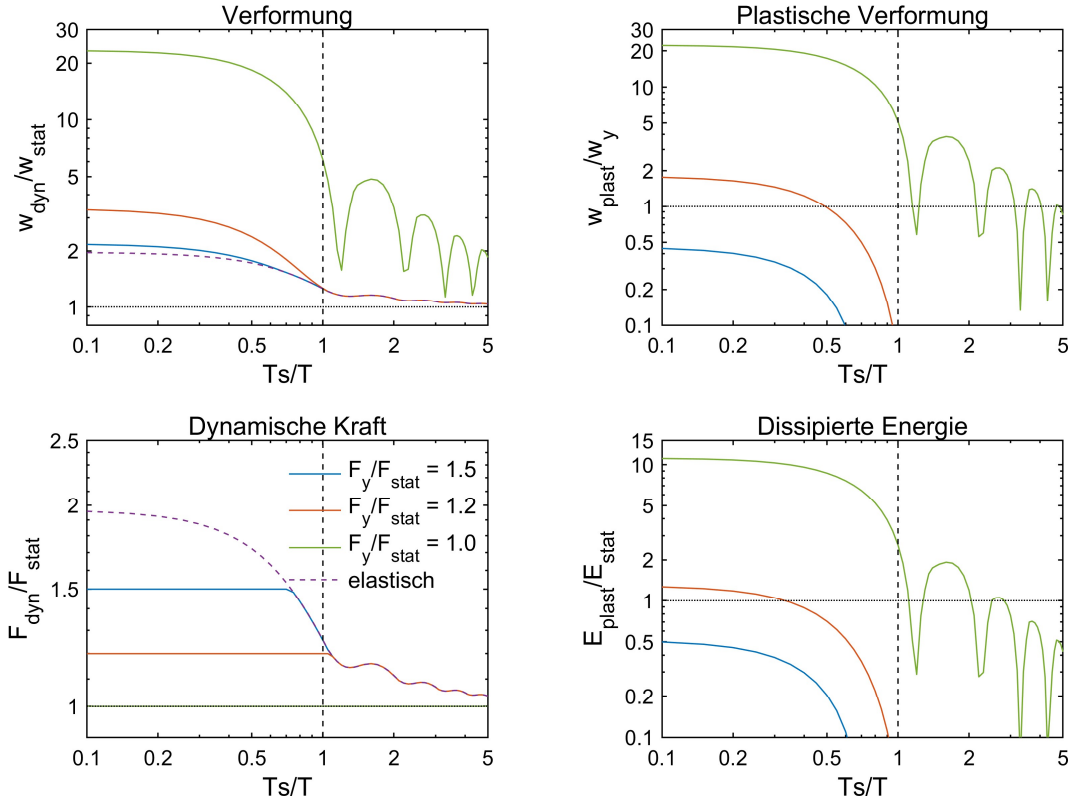


***Abb. 22** Verformung, plastische Verformung, dyn. Kraft und dissipierte Energie eines EMS mit einem ideal-plastischen Federverhalten.*

Im Bereich unterhalb der Periode der Eigenfrequenz nehmen die Amplituden der Frequenzganglinien mit zunehmenden T_s/T monoton ab. Bei den Festigkeiten F_y/F_{stat} = 1.5 und F_y/F_{stat} = 1.2 geht die Frequenzganglinie der Verformung und der dynamischen Kraft vor bzw. etwas nach der Periode der Eigenfrequenz in die Frequenzganglinie des linear-elastischen EMS über. Bei der Festigkeit F_y/F_{stat} = 1.0 weicht die Frequenzganglinie hingegen im gesamten untersuchten Parameterbereich deutlich von der Frequenzganglinie des linear-elastischen EMS ab. Oberhalb der Periode der Eigenfrequenz nimmt zudem die Frequenzganglinie nicht monoton ab, sondern weist eine wellenartige Form mit mehreren lokalen Maxima auf. Diese Form weist auch der linear-elastische EMS auf, doch sind die Amplituden deutlich schwächer ausgebildet. Offenbar verstärkt die Plastifizierung die Amplituden der Wellenform.

Wie bereits beim Lastfall Fahrbahnunebenheit beobachtet, führt die Verfestigung bei einer Festigkeit von F_y/F_{stat} = 1.0 zu einer massiven Reduktion der Verformungen und plastischen Verformungen (Abb. 23). Bei den restlichen Festigkeiten fällt die Abminderung wesentlich bescheidener aus. Der Ursache ist die gleiche wie beim Lastfall Fahrbahnunebenheit: Bei plastischer Verformung führt die Reststeifigkeit den EMS dazu, dass er nicht nur kinetische, sondern auch potenzielle Energie speichert. Dadurch treten deutlich kleinere Schwinggeschwindigkeiten auf, sodass die Plastifizierungsphase deutlich kürzer ausfällt als bei einem ideal-elastischen Verhalten (Abb. 24). Am Beginn der plastischen Verformungen sind die Schwinggeschwindigkeiten gleich wie die des ideal-plastischen EMS (Abb. 21). Danach mindern sich die Schwinggeschwindigkeiten jedoch sehr schnell ab, sodass die Plastifizierungsphase deutlich verkürzt wird. Das Ergebnis sind kleinere plastische Verformungen.

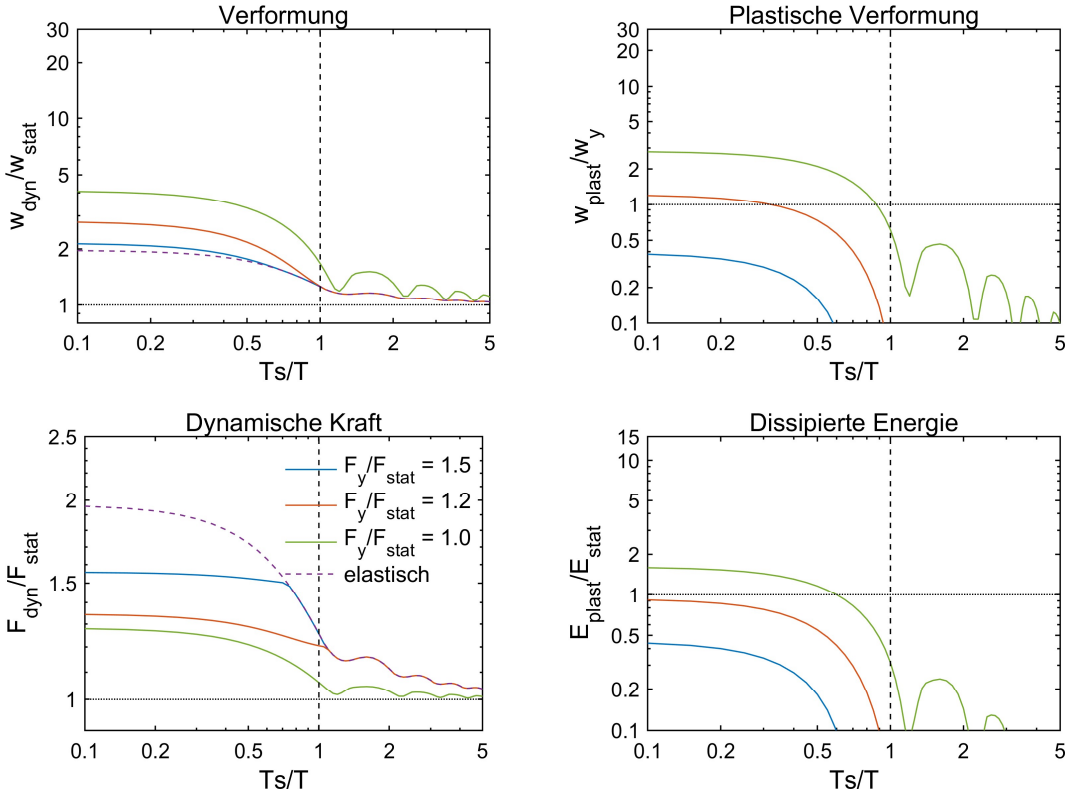


***Abb. 23** Verformung, plastische Verformung, dyn. Kraft und dissipierte Energie eines EMS mit Verfestigung.*

Ebenso wie beim Lastfall Fahrbahnunebenheit nimmt die dynamische Kraft mit abnehmender Festigkeit zu. Die grösseren plastischen Verformungen bei niedriger Festigkeit führen bei Verfestigung zu einer stärkeren Zunahme der dynamischen Kraft und dadurch der dynamischen Amplifikation. Die Phase der plastischen Verformung ist in Abb. 24 dargestellt. Bei einer Steigzeit der Einwirkung von $T_s/T = 0.2$ weist der EMS am Abschluss der elastischen Anfangsphase eine deutlich grössere Schwinggeschwindigkeit auf als bei einer Steigzeit von $T_s/T = 1$. Dies ist konform zur bekannten Tatsache, dass je schneller die Belastung eines Heaviside-Impulses zunimmt, desto grösser fallen die maximalen Verformungen eines linear-elastischen EMS aus. Bei einer unendlich schnell zunehmenden Belastung beträgt das Verhältnis w_{dyn}/w_{stat} bekanntlich 2. Bei $T_s/T = 1$ beginnt die plastische Verformung, nachdem die Schwinggeschwindigkeit ihr Maximum erreicht hat.

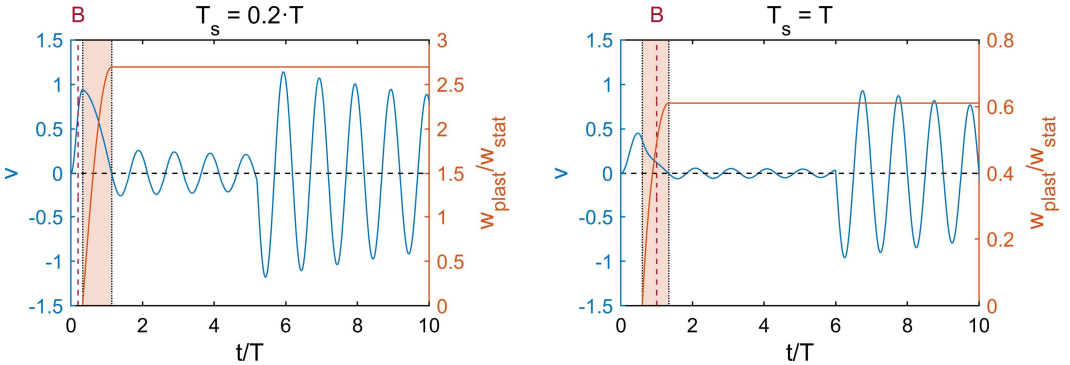


***Abb. 24** Phase plastischer Verformung des EMS mit Verfestigung mit der Festigkeit F_y/F_{stat} = 1.0.*

I.4.5 Rückfederung Fahrzeug

Diese Einwirkung beschreibt den Kraftverlauf infolge der Rückfederung des Fahrzeugs in vertikaler Richtung beim Halten (vertikale Einwirkung). Der Kraftverlauf ist zusammengesetzt aus einem Viertelsinus-Impuls (Lastzunahme bis zum Plateau), an dem eine konstante Kraft anschliesst (Abb. 25). Dies modelliert die Auffahrt einer Radlastgruppe und das anschliessende Halten des Radlastgruppe (statische Kraft). Ab dem Ende der Lastzunahme ist der statischen Kraft der Radlastgruppe eine stark gedämpfte Sinusschwingung überlagert, deren Maximum 20% des Betrags der konstanten Kraft beträgt. Die Periode der gedämpften Sinusschwingung ist gleich der Periode des EMS. Dieser Kraftanteil beschreibt die Einwirkung infolge der Rückfederung des Fahrzeugs. Parametrisiert wurde die Dauer das Lastanstiegs T_s ohne Berücksichtigung der Rückfederung des Fahrzeugs.

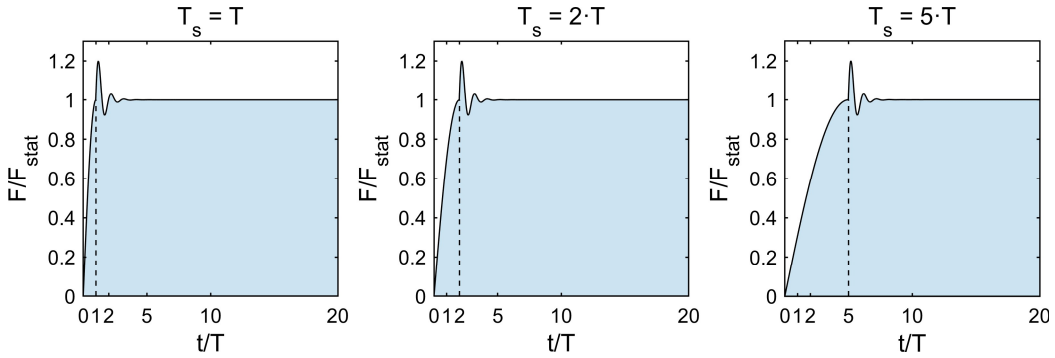


***Abb. 25** Einwirkung bei Bremskraft vertikal zur Fahrbahn (Endruck).*

Abb. 26 zeigt den Zeitverlauf der Verformung, die Federkraft und das Kraft-Verformungs-Diagramm eines EMS mit einem ideal-plastischen Federverhalten und einem Widerstand von F_y/F_{stat} = 1.2. Die Steigzeit der Einwirkung beträgt Ts/T = 0.2. Die impulsartige Einwirkung führt wie in den beiden vorangehenden Lastfällen dazu, dass das Maximum der Verformung und der Federkraft bereits in der ersten Schwingung erreicht wird. Auch die gesamten plastischen Verformungen entstehen während der ersten Schwingung (siehe dazu das Kraft-Verformungsdiagramm). Das weitere Schwingungsverhalten ist dann linear elastisch. Der elasto-plastische EMS führt nach dem Erreichen des grössten Verformung Schwingungen mit kleinen Amplituden um die Endverformung aus (Summe der elastischen statischen und der plastischen Verformung). Der linear-elastische EMS weist ein analoges Verhalten auf. Die Schwingungen um die statische Endverformung weisen jedoch eine deutlich grössere Amplitude auf. Beim elasto-plastischen EMS führt die bleibende statische Kraft zu grösseren plastischen Verformungen und, infolge der grösseren Energiedissipation, zu kleineren Schwingungsamplituden als beim Lastfall Bremskraft in Längsrichtung.

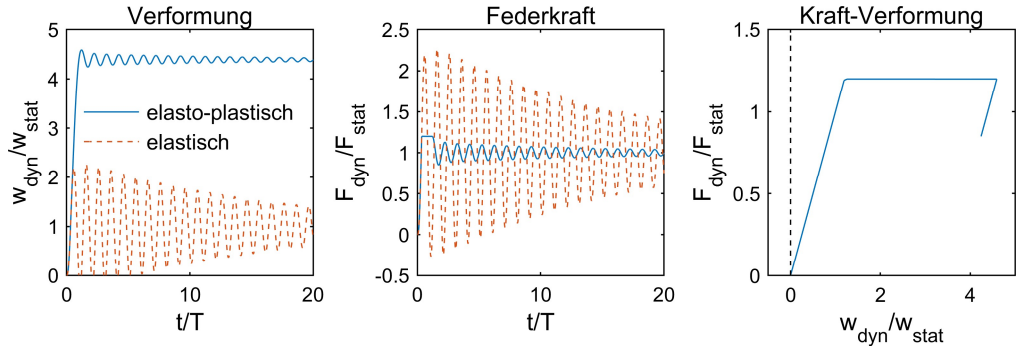


***Abb. 26** Zeitverläufe der Verformung und dyn. Kraft sowie Kraft-Verformungs-Diagramm eines ideal-plastischen EMS.*

Beim elasto-plastischen und elastischen EMS schwingt die Federkraft um die statische Kraft aus. Die Federkraft des elasto-plastischen EMS ist selbstverständlich durch den Widerstand (F_y/F_{stat} = 1.2) begrenzt. Der elastische EMS weist hingegen eine deutlich

grössere maximale Federkraft aus. Die Phase der plastischen Verformung (Abb. 27) wird durch die bleibende statische Kraft stark beeinflusst. Durch die plastische Verformung leistet diese äussere Arbeit, die die Wirkung der Energiedissipation reduziert. Bei einem Widerstand F_y/F_{stat} = 1.2 überwiegt die Energiedissipation, sodass die kinetische Energie (Schwinggeschwindigkeit) effektiv reduziert werden kann. Dadurch werden die plastischen Verformungen beschränkt. Bei einem Widerstand F_y/F_{stat} = 1.0 ist die Energiedissipation durch plastische Verformung gleich der äusseren Arbeit der statischen Kraft. Die Reduktion der kinetischen Energie kann nur noch über die kleine viskose Dämpfung erfolgen, sodass die plastische Phase sehr lange dauert. Dadurch werden die plastischen Verformungen sehr gross.

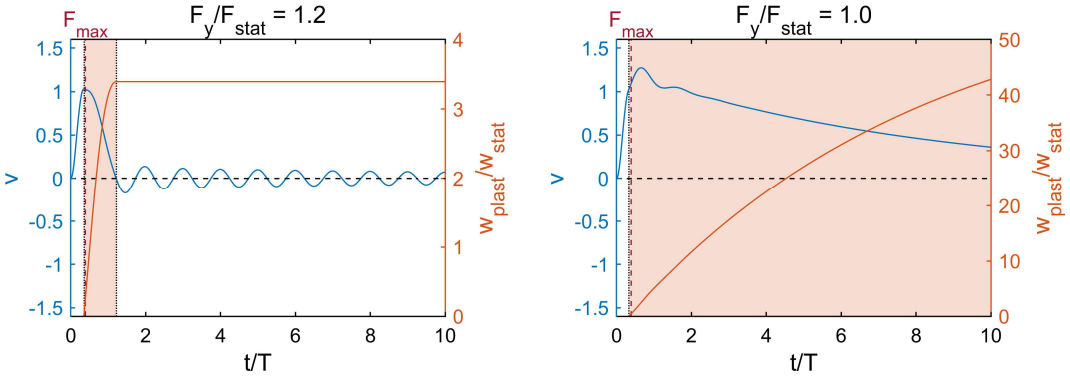


***Abb. 27** Phase plastischer Verformung des ideal-plastischen EMS bei einer Steigzeit der Einwirkung von T_s/T = 0.2.*

Im Vergleich zum Lastfall Bremskraft in Längsrichtung führt die reduzierte Energiedissipation insbesondere bei einem Widerstand F_y/F_{stat} = 1.0 zu deutlich grösseren plastischen Verformungen und Verformungen, wie die Frequenzganglinien aufzeigen (Abb. 28). Dieses Verhalten ist auch bei einer Dauer des Kraftanstiegs oberhalb der Periode der Eigenfrequenz zu beobachten. Die Zunahme tritt auch bei den höheren Widerständen ein. Bei beiden tritt plastische Verformung auch oberhalb der Periode der Eigenfrequenz auf, wobei diese bei einem Widerstand F_y/F_{stat} = 1.5 sehr beschränkt bleibt (w_{plast}/w_y<0.1).

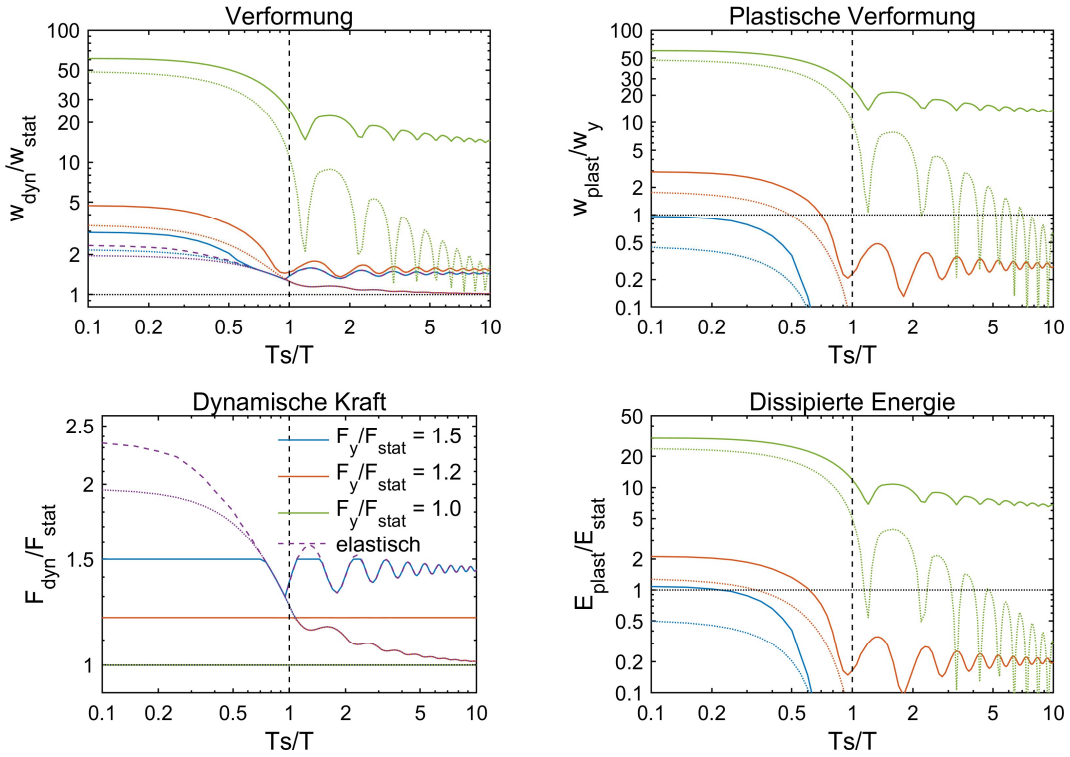


***Abb. 28** Verformung, plastische Verformung, dyn. Kraft und dissipierte Energie eines EMS mit einem ideal-plastischen Federverhalten.*

Die Wirkung des Kraftanteils der Rückfederung des Fahrzeugs erschliesst sich aus dem Vergleich mit den Frequenzganglinien ohne diesen Kraftanteil (punktierte Kurven) in Abb. 28. Die Frequenzganglinien zeigen bei allen Widerständen eine signifikante Reduktion der plastischen Verformung und Verformung im Vergleich zum Lastfall mit Rückfederung des Fahrzeugs. Dies tritt besonders markant bei einer Dauer des Kraftanstiegs oberhalb der Periode der Eigenfrequenz auf. Bei den beiden Widerständen grösser als F_y/F_{stat} = 1.0 treten keine plastischen Verformungen mehr auf. Dieses Ergebnis war zu erwarten, da die Kraftkomponente der Rückfederung, die das Maximum der Einwirkung um 20% erhöht, nicht vorhanden ist.

Bemerkenswert hingegen ist, dass oberhalb der Periode der Eigenfrequenz die Frequenzganglinie der plastischen Verformung und der Verformung bei der Festigkeit F_y/F_{stat} = 1.0 markante lokale Maxima und Minima aufweist, wohingegen die entsprechende Frequenzganglinie des Lastfalls mit Rückfederung deutlich bescheidener variiert. Das letztere Verhalten wird durch die Kraftkomponente der Rückfederung hervorgerufen. Abb. 29 zeigt die Phasen plastischer Verformung des ideal-plastischen EMS bei einer Steigzeit der Einwirkung von Ts/T = 2. Das linke Diagramm bezieht sich auf den Lastfall mit Rückfederung des Fahrzeugs und das rechte Diagramm auf den Lastfall ohne Rückfederung. Bis zum Beginn der plastischen Verformung, der zur gleichen Zeit eintritt, verläuft die Schwinggeschwindigkeit in beiden Lastfällen gleich, da die plastische Verformung bereits vor dem Ende der Kraftanstiegsphase des Heaviside-Impulses beginnt (t/T = 2). Auch nach dem Beginn der Plastifizierung verhält sich der EMS bis zur Zeit t/T = 2 in beiden Lastfällen gleich. Da der Lastfall mit Rückfederung sein Kraftmaximum (quasi-statische Kraft) erreicht hat, beginnt anschliessend die Phase der Reduktion der kinetischen Energie durch die viskose Dämpfung. Beim Lastfall mit Rückfederung hingegen steigt die Kraft infolge der Rückfederung weiter an, sodass der EMS weiter kinetische Energie aufnimmt. Diese grössere kinetische Energie muss wiederum vorwiegend durch die viskose Dämpfung abgebaut werden, sodass grössere plastische Verformungen daraus entstehen. Man beachte die unterschiedlichen Massstäbe der plastischen Verformung.

Ein weiterer Unterschied des Lastfalls mit Rückfederung zum Lastfall ohne Rückfederung ist die dynamische Amplifikation. Oberhalb der Periode der Eigenfrequenz (Ts/T = 1) nimmt sie beim Lastfall ohne Rückfederung mit grösser werdender Periode ab und nähert sich dem Wert 1.0 (keine dynamische Amplifikation). Beim Lastfall Rückfederung des Fahrzeugs hingegen, bleibt die Abminderung der dynamischen Amplifikation aus. Bei der Festigkeit F_y/F_{stat} = 1.2 bleibt sie aufgrund der plastischen Verformungen unverändert. Bei der Festigkeit F_y/F_{stat} = 1.5 folgt sie, ausser im Bereich mit plastischen Verformungen, wo sie durch die Festigkeit begrenzt wird, der dynamischen Amplifikation des elastischen EMS. Diese konvergiert für grosse Perioden gegen einen Wert um 1.43.

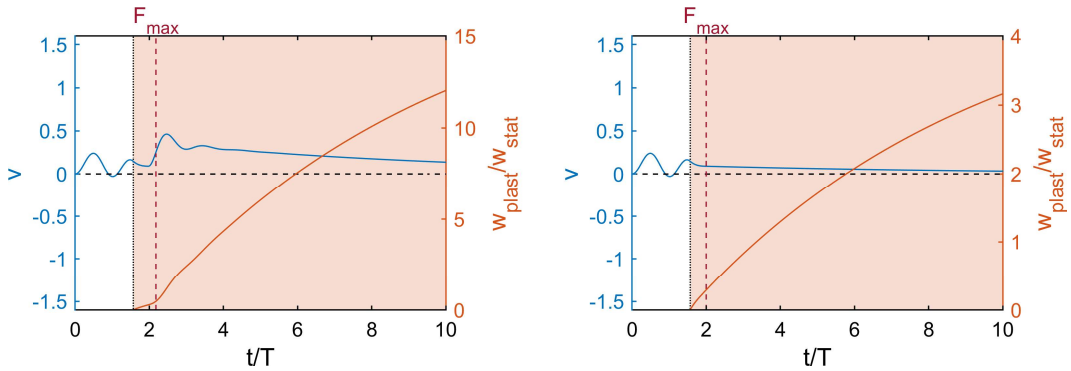


***Abb. 29** Phase plastischer Verformung des ideal-plastischen EMS bei einer Steigzeit der Einwirkung von T_s/T = 2 (Links: Bremskraft Rückfederung des Fahrzeugs; rechts: Quasi-Heaviside-Impuls).*

Wie bereits in den beiden vorhergehenden Lastfällen beobachtet, führt die Verfestigung bei einer Festigkeit von F_y/F_{stat} = 1.0 zu einer massiven Reduktion der Verformungen und plastischen Verformungen (Abb. 30). Ebenso fällt bei den restlichen Festigkeiten die Abminderung wesentlich bescheidener aus. Die Ursache ist die gleiche wie bei den

vorhergehenden Lastfällen. Auch der qualitative Unterschied zwischen der Einwirkung mit und ohne Rückfederung (punktierte Frequenzganglinien) bleibt im Vergleich zum EMS mit ideal-plastischem Verhalten unverändert.

Deutlich weniger Unterschiedlich als bei den vorhergehenden Lastfällen ist hingegen das Verhalten bei einer Dauer des Kraftanstiegs oberhalb der Periode der Eigenfrequenz des EMS. Bei einer Festigkeit von F_y/F_{stat} = 1.0 treten, wie beim ideal-plastischen EMS, in der Frequenzganglinie der plastischen Verformung keine markanten lokalen Maxima und Minima mehr auf. In diesem Periodenbereich erhöht die Verfestigung die dynamische Amplifikation für die beiden tieferen Festigkeiten. Am deutlichsten nimmt sie für eine Festigkeit F_y/F_{stat} = 1.0 auf einen Wert von etwa 1.1 zu. Bei der Festigkeit F_y/F_{stat} = 1.2 bleibt die Zunahme sehr bescheiden und bei der Festigkeit F_y/F_{stat} = 1.5 bleibt sie nahezu unverändert.

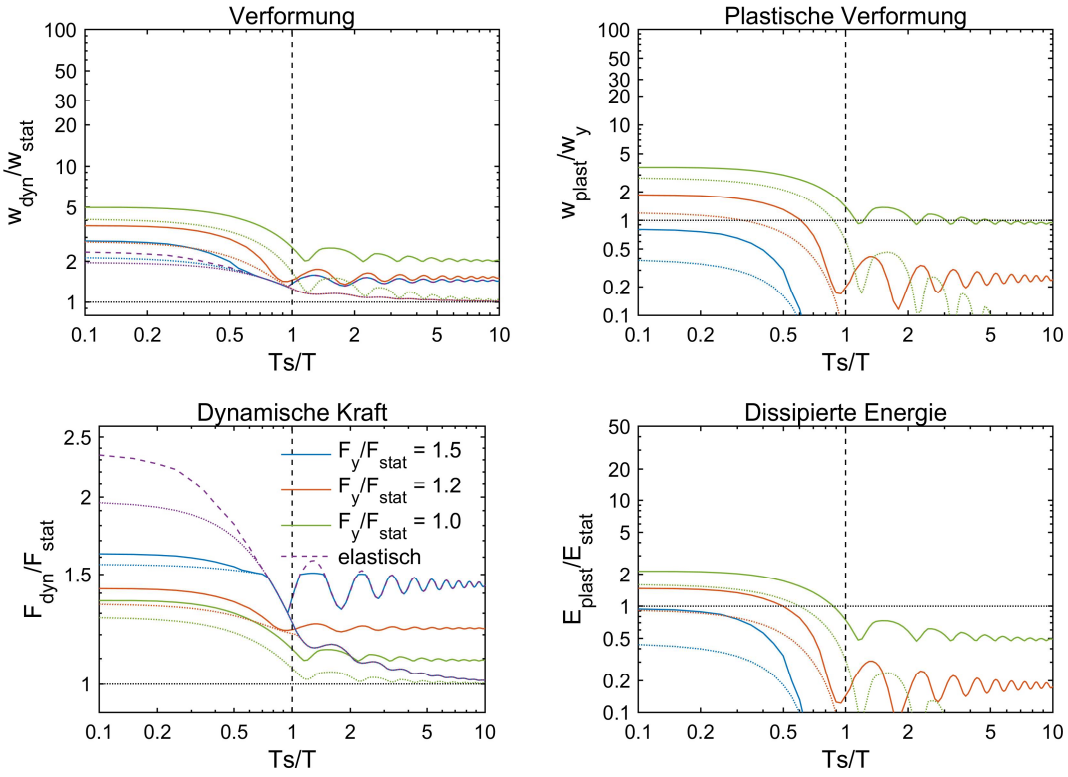


Abb. 30 *Verformung, plastische Verformung, dyn. Kraft und dissipierte Energie eines EMS mit Verfestigung.*

I.5 Schlussfolgerungen

Die Parameterstudie zeigt einige qualitative Resultate, die für alle untersuchten Lastfälle gelten:

1. Schwingungen infolge Verkehrslasten führen zu keinen Hysteresezyklen der plastischen Verformung. Bei der Durchfahrt von Fahrzeugen auf der Brücke (quasi-Resonanz) werden Hysteresezyklen durch die hohe statische und quasi-statische Einwirkung praktisch verunmöglicht. Bei den impulsartigen Belastungen sind plastische Verformungen aufgrund der initial gespeicherten kinetischen Energie so gross, dass die Schwingungsamplituden aus der verbleibenden elastischen Energie zu klein sind, um Hysteresezyklen zu generieren.

2. Aus der obigen Feststellung folgt, dass eine stark dämpfende Wirkung auf das dynamische Verhalten nur durch grosse plastische Verformungen erkauft werden kann.

3. Die dynamische Amplifikation wird durch die Fliesskraft und Verfestigung des Bauteils begrenzt. Die Verfestigung führt dazu, dass die dynamische Amplifikation desto mehr zunimmt, je grösser die plastische Verformung, d.h. je grösser die Energiedissipation, wird. Die These, dass bei genügender Dissipationskapazität, die dynamische Vergrösserung vernachlässigt werden kann [31], gilt nur bei ideal-plastischem Verhalten eines Bauteils.

4. Hohe Tragreserven führen generell zu einer potenziell grösseren dynamischen Amplifikation, da der elastische Bereich erweitert wird.

5. Die Vernachlässigung der dynamischen Amplifikation beim Tragsicherheitsnachweis führt zu einem Bauteil, das tendenziell eine kleinere Tragreserve aufweist. Die Wahrscheinlichkeit, dass signifikante plastische Deformationen durch Einwirkungen, die kleiner als die Einwirkung des Tragsicherheitsnachweis sind, nehmen infolge der dynamischen Amplifikation zu. Die Wiederholung dieser Einwirkungen während der Nutzungsdauer des Bauteils kann zu einer sukzessiven Akkumulation plastischer Vorformungen und schliesslich zu einem Versagen durch Erschöpfung der Duktilität führen.

Die obigen allgemeinen Resultate werden nun für die spezifischen Lastfälle besprochen. Insbesondere gilt es abzuklären, unter welchen Bedingungen relevante dynamische Amplifikation auftreten können.

I.5.1 Lastfall Brückenüberfahrt

Eine signifikante dynamische Amplifikation oder plastische Verformung ist nur bei einer Einwirkung mit relevanten Anregungsfrequenzen in der Umgebung einer Eigenfrequenz des Längsträgers möglich, sofern der effektive Widerstand im Vergleich zur Einwirkung eine ausreichende Reserve aufweist. Ausserdem sollte die dynamische Einwirkung ausreichend lange wirken, um einen quasi-resonanten Zustand zu ermöglichen, wobei als Zeiteinheit die Periode der Eigenschwingung massgebend ist. Selbstverständlich hängt die dynamische Amplifikation auch von den Amplituden der dynamischen Komponente der Radlasten ab. Je grösser diese Amplitude ist, desto grösser wird die dynamische Antwort der Brücke sein.

Bei kurzen Brücken (bis ca. 30 m Länge) wird der für die Bemessung massgebende Lastfall durch ein einziges Fahrzeug erzeugt. Die typischen Eigenfrequenzen eines schweren Fahrzeugs befinden sich, je nach Schwingungsart, Gewicht und Federung, zwischen 1 und 4 Hz [32]. Kurze Brücken weisen in der Regel eine Frequenz auf, die grösser ist als 5 Hz. Darüber hinaus wirkt aufgrund der beschränkten Länge der Brücke die Einwirkung relativ kurz (bei 25 m Spannweite und 5 Hz ca. 12 Perioden), sodass sich kein quasi-resonanter Zustand einstellen kann. In der Tat sind bei Schweizer Brücken Eigenfrequenzen ab ca. 4 Hz kleinere dynamische Amplifikationen gemessen worden als für tiefere Eigenfrequenzen [34]. Wird noch berücksichtigt, dass die Messungen mit einem leichten Fahrzeug (16 t) durchgeführt wurden und als experimentell gesichert gilt, dass die dynamische Amplifikation mit zunehmendem Gewicht des Fahrzeugs abnimmt, so dürften kurze Brücken eher eine bescheidene dynamische Amplifikation aufweisen. Die Beobachtung, dass die dynamische Amplifikation mit zunehmendem Gewicht des Fahrzeugs abnimmt, wird am einfachsten dadurch erklärt, dass der Abstand der Eigenfrequenz des Fahrzeugs zur Eigenfrequenz der Brücke mit zunehmendem Gewicht zunimmt, sodass die dynamische Anregung kleiner wird. Diese Tendenz ist z.B. in Versuchen mit schweren Fahrzeugen gut ersichtlich [33].

Bei längeren Brücken kann eher ein quasi-resonanter Zustand auftreten. Einschränkend muss jedoch vermerkt werden, dass längere Brücken mehrere Felder aufweisen. Die Biegemodes modulieren die Einwirkung der Radlasten, sodass nicht die volle Länge der Brücke zur Erzeugung des quasi-resonanten Zustands wirksam ist. Längere Brücken weisen eher Eigenfrequenzen der Biegeschwingung auf, die im Bereich der

Eigenfrequenzen eines schweren Fahrzeuges liegen (1.5 und 4 Hz). Bei diesen Brücken bestimmen jedoch mehrere Fahrzeuge den massgebenden Lastfall. Dass alle Fahrzeuge die gleichen Schwingungseigenschaften aufweisen, ist eher unwahrscheinlich. Dass zudem die Abstände der Fahrzeuge zu einer Aufsummierung der Einwirkungen der einzelnen Fahrzeuge führt, wird mit zunehmender Anzahl der Fahrzeuge ebenfalls immer unwahrscheinlicher. Der massgebende Lastfall wird ausserdem durch eine Stausituation bestimmt, in der die Fahrzeuge einen kleinen Abstand voneinander haben und die Geschwindigkeit der Fahrzeuge klein ist (kleiner als 30 km/h) [31]. Dadurch sind auch die Amplituden der dynamischen Radlasten und die Wirkung der beweglichen Masse klein. Insgesamt dürfte auch bei längeren Brücken hohe dynamische Amplifikationen eher die Ausnahme sein.

Insgesamt sollte daher die dynamische Amplifikation beim Lastfall Brückendurchfahrt eher beschränkt sein. Die teils grossen dynamischen Amplifikationen, die auf Schweizer Brücken zwischen 2 und 4 Hz gemessen wurden [34], dürften auf die experimentellen Randbedingungen zurückzuführen sein (leichtes Fahrzeug mit Blattfederung, dynamische Amplifikation bei Geschwindigkeit grösser als 30 km/h). Fälschlicherweise wurden diese Ergebnisse dann auf Bemessungssituationen mit einzelnen oder mehreren schweren Fahrzeugen generalisiert.

I.5.2 Lastfall lokale Fahrbahnunebenheit

Während im Lastfall Brückenüberfahrt die plastischen Verformungen sich auf die enge Umgebung der Eigenperiode beschränken, treten in diesem Lastfall relevante plastische Verformungen in einem viel weiteren Bereich T_s/T auf. Die grössten plastischen Verformungen treten auch bei diesem Lastfall dann auf, wenn T_s/T um 1 ist, d.h. die Dauer der Einwirkung etwa der Eigenperiode entspricht. Die Beurteilung der dynamischen Amplifikation hängt vom Bauteil ab. Die Fahrbahnplatte einer Kastenbrücke dürfte eine Biegegrundfrequenz aufweisen, die grösser als 8 Hz ist. Die Periode der Eigenfrequenz ist somit kürzer als 0.12 s. Unter der Annahme, dass eine auf einer Kragplatte wirkende Radlast auf einer Länge verteilt wird, die etwa dem doppelten der Weite der Kragplatte entspricht, erhält man etwa 5 m. Ein mit 80 km/h vorbeifahrendes Fahrzeug würde eine Einwirkungsdauer von etwa 0.25 s aufweisen. Tendenziell dürfte daher die Dauer der Einwirkung mindestens dem Zweifachen der Periode der Eigenfrequenz der Kragplatte entsprechen. Die Frequenzganglinien in Abb. 16 und Abb. 17 zeigen, dass im Bereich $T_s/T > 2$ durchaus mit plastischen Verformungen zu rechnen ist, insbesondere wenn die Tragfähigkeit tief ist. Die Vernachlässigung der dynamischen Komponente der Radlast kann bei einer knapp ausgelegten Festigkeit zu bedeutenden plastischen Verformungen führen.

I.5.3 Lastfall Bremskraft in Längsrichtung

Bei diesem Lastfall ist vor allem die Schnelligkeit der Zunahme der Einwirkung von Bedeutung, die vom Verhältnis zwischen dem Ruck des Fahrzeugs und der Eigenfrequenz der Längsschwingung der Brücke abhängt. Aus den Messungen der Bremsversuche am Viaduc de Matran (Projekt AGB 2017/002, [24]) geht hervor, dass der Endruck bei einer Vollbremsung im Mittel etwa 25 ms^{-3} beträgt. Bei einer mittleren Bremsverzögerung von etwa 6.5 ms^{-2} entspricht dies einer Steigzeit von etwa 0.25 s. Da Brücken mit schwimmender Lagerung in der Regel eine Eigenfrequenz kleiner als 2 Hz aufweisen, ist T_s/T daher deutlich kleiner als 1. Die Brücke Viaduc de Matran hatte eine Eigenfrequenz von etwa 1 Hz ($T_s/T = 0.25$), sodass die dynamische Amplifikation im elastischen Fall etwa 1.9 beträgt. Tatsächlich war die dynamische Amplifikation bei den massgebenden Lastfällen höchstens 1.15, da zwei Fahrzeuge beteiligt waren, die darüber hinaus mit einer Zeitverzögerung zu bremsen begannen, sodass die Steigzeit der Einwirkung deutlich länger dauerte ($T_s/T > 0.5$). Darüber hinaus war die Dämpfung der Längsschwingung aufgrund der Elastomer-Blocklager hoch (Lehr'sches Dämpfungsmass ca. 14%). Versuche mit einem einzelnen Fahrzeug ergaben in der Regel dynamische Amplifikationen, die grösser waren als mit zwei Fahrzeugen (ca. 1.30). Insgesamt hatte ein lineares Modell mit

den aus den Versuchen ermittelten Parametern die aus den Versuchen berechneten dynamischen Amplifikationen recht genau wiedergegeben.

Die Parameterstudie und die Versuche an der Brücke Viaduc de Matran weisen darauf hin, dass bei schwimmend gelagerten Brücken beim Lastfall Bremskraft in Längsrichtung mit einer dynamischen Amplifikation zu rechnen ist. Diese dürfte je nach der Eigenfrequenz der Brücke, den Dämpfungseigenschaften des Lagerungssystems und der massgebenden Einwirkungsszenarios variieren. Die in diesem Projekt ermittelten dynamischen Amplifikationen sind mit den Versuchen an der Brücke Viaduc de Matran kompatibel (1.25 bei einer Eigenfrequenz von 1 Hz, Abb. *75*) und dürften auch bei längeren Brücken in etwa zutreffen. Bei Brücken mit fester Lagerung kann die dynamische Amplifikation hingegen vernachlässigt werden.

I.5.4 Lastfall Rückfederung Fahrzeug

Dieser Lastfall ist ähnlich dem Lastfall Bremskraft in Längsrichtung. Die Dauer der Kraftzunahme muss jedoch neu bewertet werden. Da das Fahrzeug kurz vor dem Halt eine kleine Geschwindigkeit aufweist, ist mit den analogen Überlegungen des Lastfalls lokale Belagsunebenheit die Dauer im Vergleich zur Periode der Eigenfrequenz der Fahrbahnplatte deutlich länger: $T_s/T = 5…10$. In diesem Bereich ist, ausser für $F_y/F_{stat} = 1.0$, nur mit sehr beschränkten plastischen Verformungen zu rechnen. Die dynamische Amplifikation ist nahezu unabhängig vom Verhältnis T_s/T und entspricht mindestens dem Verhältnis F_y/F_{stat}. Hier muss wiederum hervorgehoben werden, dass die tatsächlich am Bauwerk vorhandene Fliesskraft und Verfestigung und nicht die in der Bemessung nominellen Fliesskraft und Verfestigung massgebend sind.

Die erste Biege- oder Torsionseigenfrequenz eines Längsträgers variiert je nach Spannweite ziemlich stark. Das Verhältnis T_s/T dürfte jedoch weiterhin grösser als 1 sein. Auch wenn bei Verfestigung eine stärkere Variation der dynamischen Amplifikation mit dem Verhältnis T_s/T auftritt als bei Fahrbahnplatten, entspricht die dynamische Amplifikation mindestens dem Verhältnis F_y/F_{stat}. Dass die Rückfederung des Fahrzeugs den Längsträger zu signifikanten Schwingungen anregt, ist durch die Versuche am Viaduc de Matran (Projekt AGB 2017/002, [24]) eindrücklich demonstriert worden. Diese Schwingungen waren auch deutlich grösser als die Schwingungen, die bei der Durchfahrt eines Fahrzeugs auftraten.

Beim Lastfall Rückfederung des Fahrzeugs sollte daher eine dynamische Amplifikation berücksichtigt werden. Bisher ist die dynamische Amplifikation an Brücken experimentell kaum untersucht worden. Die wenigen experimentellen Ergebnisse an einer Brücke zeigen, dass für den Längsträger eine dynamische Amplifikation bis zu 1.4 auftreten kann [30]. Diese Werte sind mit Simulationen mit Mehrmassenschwinger-Modellen von Fahrzeugen kompatibel [27].

I.6 Zusammenfassung

Diese Untersuchung zeigt, dass unter bestimmten Bedingungen eine dynamische Amplifikation der Verkehrslasten auftreten kann. Diese dynamische Amplifikation in der Bemessung generell zu vernachlässigen kann mit erheblichen Risiken einhergehen. Hat ein Tragwerk oder Tragwerksteil unter den statischen Einwirkungen aus dem Verkehr (Bemessungslasten) keine oder geringe (effektive) Tragreserven, so ist aufgrund der Dynamik mit erheblichen plastischen Verformungen zu rechnen. Hat ein Tragwerk oder Tragwerksteil hingegen unter diesen statischen Einwirkungen (effektive) Tragreserven, so können unter bestimmten Bedingungen dynamische Amplifikationen auftreten, die entweder durch die Tragreserven (Plastifizierung) oder durch den dynamischen Prozess begrenzt werden. Massgebend für die dynamische Amplifikation ist, neben den dynamischen Rahmenbedingungen, die tatsächlich am Bauwerk vorhandene Fliesskraft und Verfestigung und nicht die in der Bemessung angenommene Fliesskraft und Verfestigung.

Da die effektiven Tragreserven oft nicht zuverlässig bestimmt werden können, ist somit immer mit einer dynamischen Amplifikation zu rechnen. Auch wenn das Tragwerk oder Tragwerksteil dabei eine genügende Tragsicherheit aufweist, führt die dynamische Amplifikation zu einer Erhöhung der Einwirkungen an den benachbarten Tragwerksteilen. Diese sollten für diese Einwirkungen bemessen werden.

Diese Untersuchung hat anhand der Frequenzganglinien auch gezeigt, dass jeder Lastfall eine dynamische Charakteristik aufweist, die sich qualitativ von den anderen Lastfällen unterscheidet. Die dynamische Amplifikation sollte daher für jeden einzelnen Lastfall festgelegt werden.

Für die Bemessung auf Ermüdung wird vorausgesetzt, dass sich das Bauteil elastisch verhält. Es sind daher die dynamischen Amplifikationen eines elastischen Bauteils massgebend.

II Untersuchung zur Bewertung der vertikalen Beschleunigung des Fahrzeugs

II.1 Ziel

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurde eine kurze Studie durchgeführt, um die Aussagekraft vertikaler Beschleunigungen und die Qualität der Telefondaten zu untersuchen. Dazu wurden Testfahrten unternommen, in denen die vertikale Beschleunigung des Fahrzeugs kontinuierlich aufgenommen wurde.

Das Ziel war, ob die Analyse der Vertikalbeschleunigungen von Lastkraftwagen Informationen über die vertikalen dynamischen Kräfte auf Brücken liefern kann. Dabei müssen verschiedene Aspekte berücksichtigt werden, wie die Bewegung des Fahrzeugs, Schwingungen aufgrund von Unebenheiten der Fahrbahnoberfläche und Übergänge zwischen Fahrbahnabschnitten.

II.2 Erfassung der Beschleunigungen

Zur Erfassung der Erschütterungen des Fahrzeugs werden die Beschleunigungen während Testfahrten mit Personenkraftwagen gemessen. Die gemessenen Werte folgten der gleichen Strategie, die für die Anwendung zur Messung der Bremsverzögerung beschrieben wurde. Die Abtastfrequenz betrug standardmässig 50 Hz, es wurden jedoch auch höhere Abtastfrequenzen getestet. Das oben beschriebene Referenzsystem wurde mit einer Abtastrate von 100 Hz und die weissen und schwarzen Telefone mit einer Abtastrate 50 Hz betrieben.

***Tab. 26** Aufgezeichnete Grössen bei kontinuierlicher Aufzeichnung der Beschleunigung.*

Messgrösse	**Einheit**
Zeitstempel	Millisekunden ab 1. Januar 1970, 0:00 Uhr
Sensorzeit	Picosekunden
Beschleunigung in X-Richtung	ms^{-2}
Beschleunigung in Y-Richtung	ms^{-2}
Beschleunigung in Z-Richtung	ms^{-2}
Drehrate in X-Richtung	Grad/Sekunde (°/s)
Drehrate in Y-Richtung	Grad/Sekunde (°/s)
Drehrate in Z-Richtung	Grad/Sekunde (°/s)

II.3 Resultate

Der Vergleich ist in Abb. 1 dargestellt. Das obere Diagramm zeigt die Rohdaten. Es sind Unterschiede in den Beschleunigungsamplituden zu erkennen. Das Referenzsystem weist generell höhere Amplituden auf. Diese Abweichung ist jedoch hauptsächlich auf die höheren Frequenzen zurückzuführen, die möglicherweise durch die niedrigere Datenabtastrate des Telefons von 50 Hz im Vergleich zum Referenzsystem von 100 Hz verursacht werden.

Das mittlere Diagramm zeigt den quadratisches Mittel (RMS) bei einem Zeitfenster von 0,5 Sekunden. Das weisse Telefon stimmt gut mit dem Referenzsystem überein, während das schwarze Telefon etwas grössere Abweichungen aufweist. Dies bestätigt die Ergebnisse der Versuche mit dem Schwingungserregers, bei dem das schwarze Telefon bei niedrigeren Frequenzen vom Referenzsystem abzuweichen begann als das weisseTelefon.

Wenn der RMS-Wert mit einer gefilterten vertikalen Beschleunigung (Tiefpassfilter, obere Eckefrequenz 10 Hz) berechnet wird, stimmen alle Messungen recht gut überein (unteres Diagramm).

Weitere Tests wurden durchgeführt, um die Wiederholbarkeit der Messungen zu bewerten. Dabei wurde die gleiche Strecke nochmals mit dem gleichen Fahrzeug befahren. Abb. 2 zeigt den Vergleich der zwei Tests. Die RMS-Werte des zweiten Tests (Test 2) stimmt gut mit dem ersten Test (Test 1) überein. Unebenheiten oder Fahrbahnanomalien, die sich durch lokalen Spitzen in der vertikalen Beschleunigung äussern, treten in beiden Tests an den gleichen Stellen auf, obwohl dies von der Fahrgeschwindigkeit und dem örtlichen Strassenzustand abhängt. Die Telefondaten können auch Fahrbahnabschnitte mit unregelmässiger Fahrbahn erkennen, bei denen das Signal deutlich über den durchschnittlichen Fahrzeugvibrationen liegt, beispielsweise im Intervall zwischen km 10 und km 14.

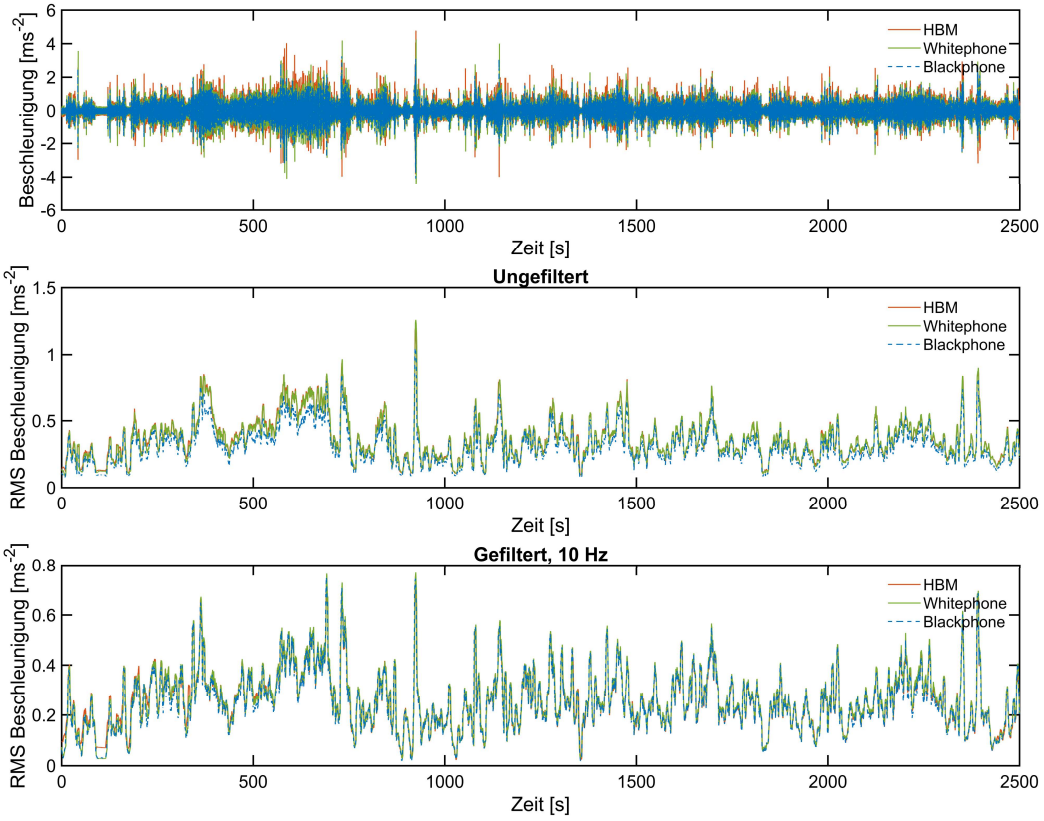


***Abb. 1** Beschleunigungen: Vergleich zwischen Rohdaten (oben), RMS ungefiltert (Mitte) und RMS gefiltert (unten).*

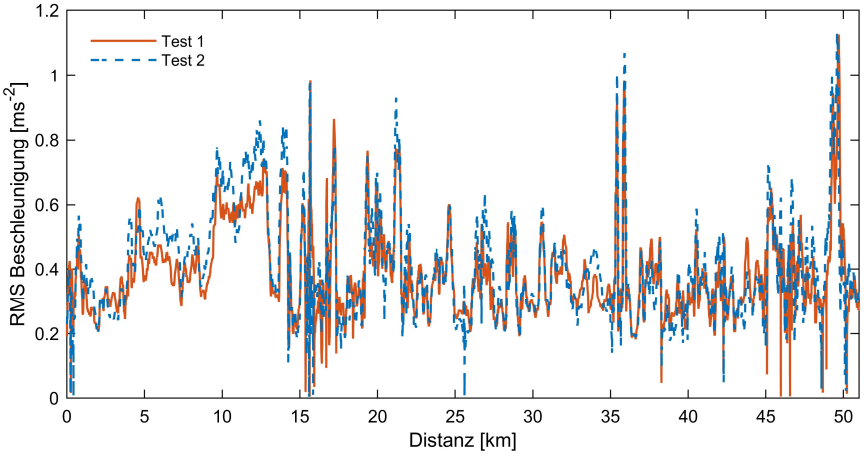


***Abb. 2** Wiederholbarkeit der Messung.*

Um den Einfluss des Fahrzeuggewichts zu beurteilen, wurde ein zusätzlicher Versuch mit einem Lieferwagen durchgeführt. Um die Masse zu erhöhen, wurde das Fahrzeugs mit einer schweren Stahlplatte von ca. 400 kg beladenen (Abb. 3). Abb. 4 zeigt die RMS-Werte und das Frequenzspektrum der vertikalen Beschleunigung der Messungen des Personen- und des Lieferwagens. Die beiden Kurven sind sehr ähnlich. Spitzen infolge lokaler Unebenheiten treten an den gleichen Stellen auf. Abschnitte mit höheren RMS-Werten beim PKW treten auch beim Lieferwagen auf. Der PKW weist tendenziell etwas grössere RMS-Werte auf. Dies könnte auf das grössere Gewicht des Lieferwagens zurückzuführen sein, welches die vertikalen Beschleunigungen reduziert. Da die Beschleunigungen an verschiedenen Orten in den Fahrzeugen erfasst wurden, ergeben sich daraus ebenfalls Unterschiede in den Messungen.

Das Spektrum der vertikalen Beschleunigungen zeigt ebenfalls, dass der PKW tendenziell grössere Beschleunigungen aufweist als der Lieferwagen. In beiden Spektren sind deutlich zwei Eigenfrequenzen erkennbar. Die Grundfrequenz der beiden Fahrzeuge ist sehr ähnlich und befindet sich bei etwa 2 Hz. Die zweite Eigenfrequenz ist höher als 10 Hz (ca. 16 Hz beim PKW und ca. 14 Hz beim Lieferwagen).



***Abb. 3** Testaufbau für den beladenen* Lieferwagen.

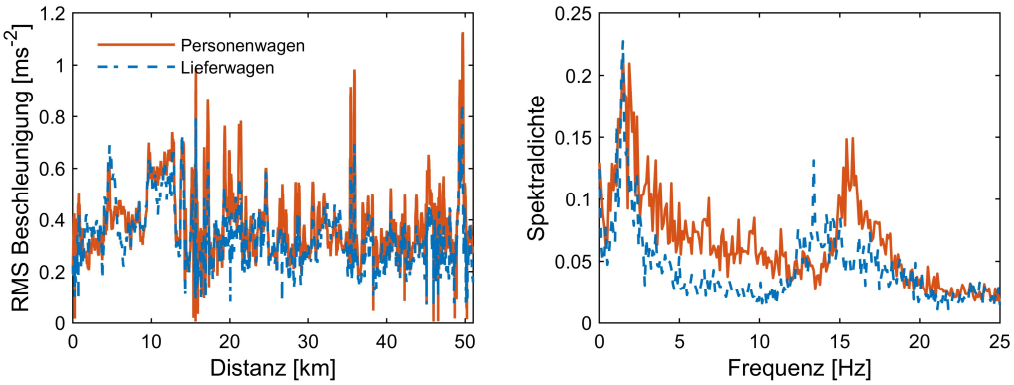


***Abb. 4** Test für die Studie zum Einfluss des Fahrzeuggewichts: (a) RMS-Beschleunigung, (b) Frequenzspektrum der Antwort.*

Zusammenfassend zeigen diese kurzen Tests:

1. Die Telefone erlauben, die transienten vertikalen Beschleunigungen des Fahrzeugs bis zu einer Frequenz von ca. 10 Hz ausreichend genau zu erfassen. Zudem sind die Messergebnisse weitgehend reproduzierbar.

2. Die mit einem Telefon erfassten Daten erlauben sowohl lokale Belagsunebenheiten wie auch Belagsabschnitte mit aussergewöhnlichen Unebenheiten zuverlässig zu lokalisieren. Inwieweit die vertikalen Beschleunigungen sich für eine quantitative Beurteilung der Belagsunebenheiten eignen, müsste eingehender untersucht werden. Eine ähnliche Genauigkeit und Auflösung von konventionellen Verfahren zur Messung

der Belagsunebenheiten dürfte schwierig zu erreichen sein. Zur qualitativen Beurteilung von Änderungen der Belagsunebenheiten oder Fahrbahnübergängen mit der Nutzungsdauer (z.B. zwecks Auswahl der mit genauen Verfahren zu prüfenden Strassenabschnitten) dürfte eher machbar sein [35].

3. Eine quantitative und ausreichend genaue Bestimmung der dynamischen Achslasten dürfte allein mit Beschleunigungsmessungen auf dem gefederten Teil eines LKW ebenfalls schwierig zu bewerkstelligen sein. Grundsätzlich dürften die Trägheitskräfte der gefederten Masse den grössten Anteil an den dynamischen Achslasten beitragen. Da Gleichgewicht zwischen diesen Trägheitskräften und den Kräften des Federungssystems herrschen muss, fliesst die Beschleunigung (inkl. Erdbeschleunigung) der gefederten Masse in die dynamischen Achslasten ein. Da grundsätzlich mehrere Schwingungsformen des gefederten Teils aktiviert werden, müsste das Messverfahren auch über mehrere Beschleunigungssensoren verfügen. Dessen Signale müssten zudem auch ausreichend zeitsynchron erfasst werden. Mit Telefonen allein dürfte die erforderliche Genauigkeit der Zeitsynchronisation nicht erreichbar sein. Die in der Literatur beschriebenen Verfahren basierten auf Verformungsmessungen des Federungssystems [28]. Im Forschungsprojekt "Cargo-TrailSense_AI" der Fachhochschule Dortmund [42] wird zurzeit ein Messsystem zur Erfassung der dynamischen Radkräfte entwickelt und erprobt. Das Messsystem ist äusserst komplex und besteht aus Beschleunigungssensoren, die die Schwingungen des Fahrwerks und des Chassis messen, Dehnmessstreifen zur Erfassung der Dehnungen am Fahrwerk, Drucksensoren, die den Druck der Luftfederung und den Reifendruck erfassen und Wegsensoren, die die die Position der Luftfederung messen. Die erwartete Genauigkeit dieses Messsystems beträgt ±5%.

Literaturverzeichnis

Normen

[1] SN 505261:2003 - SIA261 (2003). **Einwirkungen auf Tragwerke**. Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein, Zürich.

[2] CEN (European Committee for Standardization) (2003). **Actions on structures, part 2: Traffic loads on bridges. Eurocode 1**, Brussels, Belgium: CEN.

[3] SIA 160:1956 (1956). **Norm für die Belastungsannahmen, die Inbetriebenahme und die überwachung der Bauten**. Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein, Zürich

[4] SNV 505160:1970 – SIA 160 (1970). **Norm für die Belastungsannahmen, die Inbetriebenahme und die überwachung der Bauten**. Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein, Zürich.

[5] SN 505160:1989 - SIA 160 (1989). **Einwirkungen auf Tragwerke**. Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein, Zürich.

[6] SN 505269:2011 - SIA269 (2011). **Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken**. Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein, Zürich

[7] SN 505269/1:2011 - SIA269/1(2011). **Erhaltung von Tragwerken - Einwirkungen**. Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein, Zürich

Fachhandbuch des ASTRA

[8] Bundesamt für Strassen ASTRA (2024). **ASTRA 22001- Fachhandbuch Kunstbauten** (FHB K), Ausgabe: Januar 2024.

Publikationen

[9] Meystre, T., Hirt M.A. (2006). **Evaluation de ponts routiers existants avec un modèle de charge de trafic actualisé**, Mandat de recherche 2002/005 effectué à la demande du groupe de travail recherche en matière de ponts, Berne.

[10] Bailey, S. (1996). **Basic principles and load models for the structural safety evaluation of existing road bridges**, EPF Lausanne: Lausanne. p. 187.

[11] Merzenich, G., Sedlacek, G. (1995). **Hintergrundbericht zum Eurocode 1 – Teil 3.2: "Verkehrslasten auf Strassenbrücken**, Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg, Germany.

[12] Martins J., Feltrin G., Beyer K. (2016). **Updated braking forces for the assessment of road bridges**, Bundesamt für Strassen ASTRA, Forschungsauftrag AGB 2011/003.

[13] FOT-Net partners, **FOT-Net Wiki: AOS**, available at https://wiki.fot-net.eu/index.php/AOS in February 2016.

[14] Dingus T.A., Klauer S.G., Neale V.L., Petersen A., Lee S.E., Sudweeks J., PerezM.A., Hankey J., Ramsey D., Gupta S., Bucher C., Doerzaph Z.R, Jermeland J., Knipling R.R. (2006). **The 100-Car Naturalistic Driving Study, Phase II – Results of the 100-Car Field Experiment**, Report No. DOT HS 810 593, National Highway Traffic Safety Administration.

[15] Sjaarda M., Breveglieri M., Nussbaumer A., Feltrin G. (2022). **Impact of heavy vehicle platooning of Swiss Bridges**, Bundesamt für Strassen ASTRA, Forschungsauftrag AGB 2017/004.

[16] Olson, R.L., Hanowski R.J., Hickman J.S., Bocanegra J. (2009). **Driver Distraction in Commercial Vehicle Operations**, U.S.D.O. Transportation and F.M.C.S.A. (FMCSA).

[17] Barnard, Y., Utesch F., van Nes N., Eenink R., Baumann M. (2016). **The study design of UDRIVE: the naturalistic driving study across Europe for cars, trucks and scooters**. European Transport Research Review. 8(2).

[18] Bärgman, J., van Nes N., Christoph M., Janssen R., Heijne V., Carsten O., Dotzauer M., Utesch F., Svanberg E., Pereira-Cocron M., (2017). **The Udrive dataset and key analysis results**, Deliverable 41.1.

[19] Dotzauer, M., E. Stemmler, F. Utesch, J. Bärgman, L. Guyonvarch, J. Kovaceva, and O. Carsten (2017). **Risk factors, crash causation and everyday driving.** EU FP7 Project UDRIVE Consortium.

[20] Jansen, R.J., Wesseling S. (2018). **Harsh Braking by Truck Drivers: A Comparison of Thresholds and Driving Contexts Using Naturalistic Driving Data**, in 6th Humanist Conference: The Hague, Netherlands.

[21] Hickman, J.S., Hanowski R.J. (2011). **Use of a video monitoring approach to reduce at-risk driving behaviors in commercial vehicle operations**, Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, 2011. 14(3) : p. 189-198.

[22] Grzebieta, R., (2015). **Australia's naturalistic driving study**. Journal of the Australasian College of Road Safety, 26(1): p. 46.

[23] Agerholm N., Jensen R., Andersen C.S., (2015). **Identification of Hazardous Road Locations on the basis of jerks**.

[24] Feltrin, G. (2021). **Validierung des Modells zur Berechnung der dynamischen Einwirkung der Bremskraft auf Strassenbrücken**. Bundesamt für Strassen, Bericht Nr. 704, Bern, Schweiz.

[25] Coles S., (2001). **An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values**. Springer-Verlag London Limited.

[26] Clough R.W, Penzien J. (1993). **Dynamics of Structures**, McGraw Hill, 2nd Ed., New York.

[27] Law, S.S., Zhu, X. Q. (2005). **Bridge dynamic responses due to road surface roughness and braking of vehicle**, Journal of Sound and Vibration, 282(3-5), 805-830. doi:10.1016/j.jsv.2004.03.032.

[28] Hahn, W.-D., (1987). **Quantifizierung der Radlastdynamik bei Einfach-, Doppel-und Dreifachachsen in Abhängigkeit vom Federungs-und Dämpfungssystem des Fahrzeugs**. Forschungsvereinigung Automobiltechnik, Heft 483.

[29] Deng, L., Yu, Y., Zou, Q., Cai, C.S., (2015). **State-of-the-Art Review of Dynamic Impact Factors of Highway Bridges**, Journal of Bridge Engineering, 20(5). doi:10.1061/(asce)be.1943-5592.0000672.

[30] Nguyen, X.-T., Tran, V.-D., Hoang,N.-D., (2017). **A Study on the Dynamic Interaction between Three-Axle Vehicle and Continuous Girder Bridge with Consideration of Braking Effects**, Journal of Construction Engineering, 1-12. doi:10.1155/2017/9293239.

[31] Ludescher, H. (2004). **Berücksichtigung von dynamischen Verkehrslasten beim Tragsicherheitsnachweis von Strassenbrücken**, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne. (Thèse No 2894).

[32] Cantieni, R., (1988). **Stossempfindlichkeit von Strassenbrücken unter rollendem Verkehr, Dynamische Belastungsversuche an der Bergspurbrücke Deibül**. Bundesamt für Strassenbau, Bericht Nr. 169 A, Bern, Schweiz.

[33] Cantieni, R., Krebs, W., Heywood, R., (2000). **Dynamic Interaction Between Vehicle and Infrastructure, Experiment**, OECD IR DIVINE Project, Element 6, Bridge Research, Final Report. Test Report no. 153'031. Empa, Dübendorf, Schweiz.

[34] Cantieni, R., (1992). **Beitrag zur Dynamik von Strassenbrücken unter der Überfahrt schwerer Fahrzeuge**, Bericht Nr. 220, Empa, Dübendorf, Schweiz.

[35] Yu, Q., Fang Y., Wix R., (2022). **Pavement roughness index estimation and anomaly detection using smartphones**. Automation in Construction. Volume 141, September 2022, 104409.

Andere Literaturverzeichnis

[36] Developers.android - Location https://developer.android.com/reference/android/location/Location#getVerticalAccuracyMeters()

[37] LSVA - Leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe https://www.are.admin.ch/are/de/home/mobilitaet/grundlagen-und-daten/lsva.html

[38] Free Weather API https://open-meteo.com/

[39] AndFTP (FTP Client) LYSESOFT https://play.google.com/store/apps/details?id=lysesoft.andftp

[40] TeamViewer GmbH - TeamViewer Germany GmbH, Bahnhofsplatz 2, 73033 Göppingen, Deutschland.

[41] Binäre Suche (Algoritmus) https://de.wikipedia.org/wiki/Bin%C3%A4re_Suche#:~:text=Die%20bin%C3%A4re%20Suche%20ist%20ein,Ordnungsrelation%20angeordnet%20(sortiert)%20sind.

[42] CargoTrailSense, https://www.fh-dortmund.de/news/cargotrailsense-geht-in-die-verlaengerung.php.

Verdankung

Bedeutende Teile dieses Projekts hätten ohne die Unterstützung und Mitarbeit vieler Beteiligten, die in einem technisch-wissenschaftlichen Bericht naturgemäss keine Erwähnung finden, nicht durchgeführt werden können. Die Autoren möchten dies an dieser Stelle nachholen. Ein herzliches Dankeschön geht an

- die Firma Planzer AG, die diese Studie durch die Bereitstellung von Arbeitszeit und Fahrzeugen überhaupt ermöglicht hat. Die Autoren danken insbesondere die Herren Miguel Schilknecht, Raphael Hertach, Mike Schmid und Fabio Poletto für die immer sehr gute Zusammenarbeit, das stets offene Verständnis für unsere Forschungsbedürfnisse und die effiziente Organisation und Koordination der gemeinsamen Tests und der Monitoringkampagne. Die Autoren möchten auch den Technikern und Mechanikern Yannic Rabenbauer, Sandor Barsony, Gabriel Kayakoparan, Sankajan Kirupa und Tarek Jarjour für ihre fachlich exzellente Arbeit bei der Ausrüstung der Fahrzeuge in Dällikon (ZH) und Villmergen (AG) danken.
- Herrn Slavko Tudor, Kollege an der Empa, für die Unterstützung beim Aufbau und der Installation des Messsystems in den zahlreichen Vorversuchen.
- Herrn Ahmet Batirel für die Initialentwicklung der Telefon-Applikationen während seines Praktikums an der Empa.
- die OpenStreetMap Foundation für die frei nutzbaren Geodaten und die Entwickler der freien Softwarepakete Python, Pandas, NumPy, Shapely und iGraph, die eine rasche Entwicklung der Algorithmen und eine effiziente Analyse der Daten der Monitoringkampagne erlaubte.

Die Autoren möchten sich auch bei den Mitgliedern der Begleitkommission BKC für die immer hilfreichen Diskussionen, Kommentare und Anregungen bedanken. Schliesslich gilt unser grosser Dank dem Bundesamt für Strassen und der Empa für das entgegengebrachte Vertrauen und die Bereitstellung der finanziellen Mittel, um dieses Forschungsprojekt durchführen zu können.

Projektabschluss

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am:	25.04.2025

Grunddaten

Projekt-Nr.:	BGT_20_02D_01
Projekttitel:	Monitoring von Bremsereignissen schwerer Fahrzeuge zur Bestimmung der Bremskräfte auf Strassenbrücken
Enddatum:	30.06.2025

Texte

Zusammenfassung der Projektresultate:

Das Forschungsprojekt liefert umfassende und detaillierte Daten zu Bremsereignissen von schweren Fahrzeugen auf dem Schweizer Strassennetz. Diese Daten verbessern die Zuverlässigkeit des stochastischen Modells zur Berechnung der charakteristischen Bremskraft, das im Vorprojekt AGB2011/003 "Aktualisierte Bremskräfte für die Überprüfung von Strassenbrücken“ entwickelt wurde.

Die wichtigsten Ergebnisse des Projekts sind:
1. Ermittlung der Bremsrate für unterschiedliche Strassenklassen sowie für spezifische Autobahnabschnitte (Strecken zwischen Ein- und Ausfahrten sowie Ein- und Ausfahrten und Autobahnverbindungen).
2. Aufbau einer umfassenden Datenbank von Verzögerungsprofilen von Bremsereignissen.
3. Detaillierte Charakterisierung der Verzögerungsprofile anhand von Kennwerten, um Unterschiede im Bremsverhalten je nach Strassenklasse, Autobahnabschnitt und Fahrzeugtyp zu identifizieren.
4. Aktualisierung des charakteristischen Werts der Bremskraft für repräsentative Verkehrsszenarien (Monte Ceneri auf der Autobahn A2 und Denges auf der Autobahn A1) und verschiedene Wiederkehrperioden.
5. Entwicklung eines vereinfachten Lastmodells basierend auf den aktualisierten Bremskräften, welches für die Überprüfung bestehender Strassenbrücken eingesetzt werden kann.

Die zentralen Erkenntnisse aus der Auswertung sind:
1. Der Fahrzeugtyp hat keinen Einfluss auf die Kennwerte der Bremsverzögerungen und nur einen geringen Einfluss auf die Bremsrate.
2. Die Strassenklasse beeinflusst die Kennwerte der Bremsverzögerungen und die Bremsrate. Auf dem Autobahnnetz wird signifikant weniger häufig stark gebremst als auf Haupt- und Nebenstrassen. Die durchschnittliche Bremsrate auf der Autobahn ist um etwa eine Grössenordnung kleiner als jene, die im Projekt AGB 2011/003 bestimmt wurde.
3. Innerhalb des Autobahnnetzes sind stark unterschiedliche Bremsraten anzutreffen. Die höchsten Bremsraten treten auf Ein- und Ausfahrten auf. Die Bremsereignisse finden dabei gehäuft vor scharfen Kurven, Verzweigungen, seitlichen Einmündungen und am Ende der Ausfahrten auf. Die Bremsrate an diesen Stellen kann über das Hundertfache der durchschnittlichen Bremsrate auf einer Autobahn sein. Die Variation der Bremsrate auf der Autobahn selber ist um eine Grössenordnung kleiner. Hohe Bremsraten treten vor allem auf Abschnitten in dicht besiedelten Gebieten wie z.B. um Städte auf.
4. Die mit den neuen Daten berechneten charakteristischen Werte der Bremskraft sind im Vergleich zu den Projekten AGB 2011/003 und AGB 2017/004 "Impact of heavy vehilce platooning on Swiss bridges" generell um 20% kleiner.
5. Die Reduktion des charakteristischen Werts der Bremskraft im Vergleich zum Simulationsmodell des Projekts AGB 2017/004 entschärft die Gefährdung der bestehenden Brücken durch die Einführung von Platoons mit 3 oder 4 Fahrzeugen nicht wesentlich.

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Die fünf Ziele des Forschungsprojekts konnten im Wesentlichen erreicht werden:
1. Es konnten umfassende und detaillierte Informationen zu Bremsereignissen von schweren Fahrzeugen auf dem Schweizer Strassennetz gesammelt werden.
2. Die Häufigkeit von Bremsereignissen wurde für verschiedene Strassenklassen, -kategorien und -abschnitte bestimmt. Da das Ziel des Projekts die Bestimmung der charakteristischen Bremskräfte auf Autobahnbrücken war, wurden für Haupt- und Nebenstrassen nur Durchschnittswerte bestimmt.
3. Es konnte eine umfangreiche Datenbank mit Verzögerungsprofilen aufgebaut werden, die sowohl detaillierte Verzögerungskennwerte als auch Strassen- und Umgebungskennwerte (einschliesslich Strassentopologie) der Bremsereignisse enthält.
4. Die charakteristischen Werte der Bremskräfte wurden auf Grundlage der neu erhobenen Daten berechnet, um die im Projekt AGB2011/003 ermittelten Werte zu aktualisieren.
5. Zusätzlich wurde ein vereinfachtes Modell als Grundlage für eine Überarbeitung bestehender Normen und Richtlinien entwickelt.

Folgerungen und Empfehlungen:

Um die starke Variation der Bremsrate auf dem Autobahnnetz zu berücksichtigen, wurden für die Anwendung in der Praxis zwei Brückenkategorien festgelegt. Diese stark vereinfachte Einteilung ist gerechtfertigt, da die Bremsrate nur einen mässigen Einfluss auf den charakteristischen Wert der Bremskraft hat. Kategorie 1 umfasst Autobahnbrücken in ländlichen, dünn besiedelten Gebieten und basiert auf der durchschnittlichen Bremsrate der Autobahnen A1 und A2. Kategorie 2 umfasst Autobahnbrücken in dicht besiedelten Gebieten, an Ein- und Ausfahrten oder vor baulichen Verkehrshindernissen (z.B. überlastete Autobahnknoten, Fahrstreifenreduzierungen, Zollanlagen) und weist eine um das 20-fache grössere Bremsrate auf.
1) Der Vergleich mit der Norm SIA 269/1 zeigt, dass für Brücken der Kategorie 1 die Regelung der SIA 269/1 in der Regel konservativ ist. Für Brücken der Kategorie 2 sind die in der Norm SIA 269/1 angenommenen Bremskräfte hingegen zu gering. Das Modell der Norm SIA 269/1 sollte daher überarbeitet werden.
2) Die Regelung der SIA 261 für neue Brücken ist auch bei Brücken der Kategorie 2 – insbesondere bei langen Brücken – konservativ. Eine Reduktion der Bremskraft für Brücken ab 200 m Länge auf 800 kN wäre allenfalls möglich.
3) Trotz der reduzierten Bremsrate treten bei einem Verkehr mit Platoons aus drei oder vier Fahrzeugen immer noch zu hohe Bremskräfte im Vergleich zur Regelung der SIA 269/1. Für deren Zulassung ist eine systematische Bewertung repräsentativer Autobahnbrücken erforderlich, um Sicherheitsreserven und mögliche Nachrüstkosten genauer zu ermitteln.

Publikationen:

Die Ergebnisse dieses Forschungsprojekts wurden regelmässig an der ASTRA TAG an der Empa und an internationalen Konferenzen wie der IABMASS 2024[1] und SMAR 2024 [2] vorgestellt. Zwei Veröffentlichungen in internationalen Fachzeitschriften sind in Vorbereitung.

[1] Breveglieri M.,Feltrin G. (2024) Smartphone-based monitoring: Improving the bridges braking force model. Bridge Maintenance, Safety, Management, Digitalization and Sustainability,CRC Press 1646-1654.

[2] Breveglieri M.,Feltrin G. (2024) Monitoring heavy vehicle braking events using smartphones to improve the braking force model. SMAR 2024 Salerno (IT).

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Breveglieri Vorname: Matteo

Amt, Firma, Institut: Empa

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

Matteo Breveglieri Digitally signed by Matteo Breveglieri Date: 2025.05.06 16:52:31 +02'00'

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Das Projekt konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Die gewählte Methodik für die "in situ"-Messung mittels Smartphones hat sich bewährt. Die angestrebten Ziele wurden erreicht. Es konnten wichtige Erfahrungen zu den effektiv angetroffenen und anzutreffenden Bremskräften gesammelt und dokumentiert werden. Es wurden vereinfachte Modelle und Empfehlungen für die künftigen Normen erarbeitet.

Umsetzung:

Der Bericht präsentiert ein weiterentwickeltes Modell zur Berechnung der Bremskräfte, das auf den Projektergebnissen basiert. Die vorgeschlagenen Empfehlungen können zur Überprüfung bestehender Brücken dienen und künftig in Normen oder Richtlinien aufgenommen werden.Um die Anwendung in der Praxis zu erleichtern, wurden zwei Brückenkategorien eingeführt (siehe Seite 2: Folgerungen und Empfehlungen). Dabei wurden auch dynamische Effekte direkt im Modell berücksichtigt.

weitergehender Forschungsbedarf:

- Weitere Datenanalysen und Bremsratenberechnungen könnten zukünftig unter Berücksichtigung neuer Daten aus der Entwicklung moderner Fahrzeugtechnik erfolgen. Da die Datenerfassung mit dem Smartphone aufwendig sein kann, wäre es sinnvoll, in Zukunft vermehrt auf fahrzeuginterne Daten zurückzugreifen. Zukünftige Analysen sollten sich vor allem auf Bremsereignisse mit hohen Schwellwerten konzentrieren, um Extremfälle besser abbilden zu können.
- Experimentelle Untersuchungen zur Validierung des entwickelten Modells wären wünschenswert und könnten im Rahmen einer Zusammenarbeit mit laufenden oder künftigen Forschungsprojekten durch-geführt werden.
- Weitere Untersuchungen zum Platooning könnten für die Umsetzung erforderlich sein, insbesondere sobald genauere Informationen über die praktische Anwendung auf dem Schweizer Straßennetz vorliegen.
- Bei Elektrofahrzeugen ist derzeit nicht mit einer Erhöhung der Bremskräfte zu rechnen, sofern das zulässige Gesamtgewicht unverändert bleibt und keine grundlegenden Änderungen an der Bremsme-chanik vorgenommen werden.

Einfluss auf Normenwerk:

Die Studie hat gezeigt, dass die derzeitige Formulierung für neue Brücken, insbesondere bei langen und steifen Brücken, meist konservativ ist. Für bestehende Brücken könnte die vorgeschlagene Formulierung als Alternative zur SIA 269/1 dienen.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Lutz Vorname: Anita

Amt, Firma, Institut: Dr. Vollenweider AG

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

