

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Verkehrswegebau

Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Optimierung des Dynamischen Gleisstabilisators (DGS) im Hinblick auf eine Verbesserung der Gleislagestabilität

Sophie Feurig

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Prof. Dr.-Ing. Gebhard Wulfhorst

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Freudenstein
2. Prof. Dr. Jan Mys

Die Dissertation wurde am 06.05.2020 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt
am 05.10.2020 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	8
1.1	Instandhaltung von Eisenbahnstrecken	9
1.2	Der Dynamische Gleisstabilisator	12
2	Stand der Wissenschaft und Praxis	16
2.1	Regelwerke für den Einsatz des DGS.....	16
2.2	Ausrüstungsstandard des Oberbaus.....	20
2.3	Ergebnisse der Literaturrecherche.....	21
3	Qualitative Messgrößen zur Bewertung des DGS.....	28
3.1	Querverschiebewiderstand	28
3.2	Beschleunigungsmessung.....	31
3.3	Gleislage	35
3.4	Schotterbeprobung	37
3.5	Schwellenbiegung	38
3.6	Steifigkeit der Zwischenlagen	39
4	Feldmessungen	41
4.1	Wiesloch.....	42
4.1.1	Versuchsaufbau und -durchführung.....	42
4.1.2	Ergebnisse und Auswertung.....	44
4.1.2.1	Querverschiebewiderstand	44
4.1.2.2	Gleislage	48
4.1.2.3	Schotterbeprobung	49
4.2	Nörten-Hardenberg.....	51
4.2.1	Versuchsaufbau und -durchführung.....	51
4.2.2	Ergebnisse und Auswertung.....	52
4.3	Hildesheim.....	56
4.3.1	Versuchsaufbau und -durchführung.....	56
4.3.2	Ergebnisse und Auswertung.....	60
4.3.2.1	Querverschiebewiderstand	60
4.3.2.2	Gleislage	66
4.3.2.3	Beschleunigungsmessung.....	67
4.3.3	Erkenntnisse aus bisherigen Feldmessungen.....	70
4.4	Neusiedl	71
4.4.1	Versuchsaufbau und -durchführung.....	71
4.4.2	Ergebnisse und Auswertung.....	73
4.4.3	Erkenntnisse aus bisherigen Feldmessungen.....	77
4.5	Langenschwarz	78
4.5.1	Versuchsaufbau und -durchführung.....	78

4.5.2	Ergebnisse und Auswertung	78
4.5.3	Erkenntnisse aus bisherigen Feldmessungen.....	80
4.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	81
5	Laborversuche.....	83
5.1	Versuchsaufbau.....	84
5.2	Instrumentierung des Laborversuchs	87
5.2.1	Beschleunigungsmessung im Labor	88
5.2.2	Induktivwegaufnehmer.....	89
5.2.3	Querverschiebewiderstand	90
5.2.4	Schwellenbiegung.....	90
5.3	Einflussfaktoren im Laborversuch	92
5.4	Vorversuch	94
5.4.1	Versuchsdurchführung.....	94
5.4.2	Auswertung der Beschleunigungsmessung	95
5.5	Simulation der Überfahrt des DGS und der Verkehrsbelastung	102
5.5.1	Versuchsdurchführung.....	102
5.5.1.1	Schwellenbiegung.....	104
5.5.1.2	Schotterproben	108
5.5.1.3	Steifigkeit der Zwischenlagen	109
5.5.2	Ergebnisse und Auswertung	109
5.5.2.1	Beschleunigungs- und Setzungsmessung	109
5.5.2.2	Querverschiebewiderstand (QVW)	117
5.5.2.3	Schwellenbiegung.....	120
5.5.2.4	Schotterproben	125
5.5.2.5	Steifigkeit der Zwischenlagen	128
6	Bewertung der Feldmessung und Laborversuche.....	131
6.1	Beschleunigung	131
6.2	Querverschiebewiderstand	132
6.3	Schotterproben	133
7	Fazit	134
8	Literaturverzeichnis.....	138
	Tabellenverzeichnis.....	149
	Anlagenverzeichnis	153
	Anlagen	154

Abkürzungen

1. Stabi	1. Stabilisierung (in 2. Lage)
2. Stabi	2. Stabilisierung (in 3. Lage)
DACH	Deutschland, Österreich, Schweiz
DB	Deutsche Bahn AG
DGS	Dynamischer Gleisstabilisator
DTS	Dynamic Track Stabiliser (DGS)
Dua	Durcharbeitung
FFT	Fast Fourier Transformation
HuV	Hebe- und Verdichtgang (in 1. Lage)
Lt	Lasttonnen
LTR	Lateral Track Resistance
MKS	Mehrkanalschreiber
ÖBB	Österreichische Bundesbahn
ORE	European Rail Research Institute
QVW	Querverschiebewiderstand
SBB	Schweizerische Bundesbahnen AG
SMS	Schottermessstein
UIC	Union of Railways
Wfp	Winkelführungsplatte
zul. V	Zulässige Geschwindigkeit
Zw	Zwischenlage

Kurzfassung

Der vorliegende Forschungsbericht beschäftigt sich mit der experimentellen und theoretischen Untersuchung zur Optimierung des Dynamischen Gleisstabilisators (DGS) im Hinblick auf eine Verbesserung der Gleislagestabilität insbesondere bei neuen Oberbauformen. Der DGS wurde durch die Firma Plasser & Theurer entwickelt und ist seit ca. 45 Jahren im Einsatz. Neben der Weiterentwicklung des DGS wurden auch die Oberbaukomponenten optimiert. Weiterhin sind die Anforderungen an die Streckenverfügbarkeit gestiegen, welche mit zunehmenden Qualitätsanforderungen an Instandhaltungsmaßnahmen einhergehen.

In dem Forschungsbericht wurde zunächst der verfügbare Kenntnisstand über die Entwicklung des DGS und dessen Anwendung auf Basis der einschlägigen Fachliteratur analysiert. Anschließend wurde die Wirksamkeit des DGS im Hinblick auf den Querverschiebewiderstand (QVW) mit den derzeitigen Standardeinstellungen an den Schwellen B70 und der besohlenen B07 So in situ gemessen. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde eine Optimierung der anzuwendenden Maschinenparameter des DGS bei Laborversuchen angestrebt. Zur Evaluierung der Wirkung des DGS wurde neben dem QVW auch die Schwellen- und Schotterbeschleunigung, die Gleislage, der Verschleiß des Schotters und der Zwischenlage sowie die Schwellenbiegung gemessen.

Die Literaturrecherche ergab teilweise kontroverse Feststellungen zur Wirkung und Anwendung des DGS, jedoch mit positiver Tendenz in Bezug auf die Gleislagestabilität durch eine Erhöhung des QVW unmittelbar nach den Durcharbeitungen. Weiterhin wurde festgehalten, dass kein erhöhter Verschleiß der Gleiskomponenten sowie des Schotters durch den Einsatz des DGS erfolgt. Die Wirksamkeit des DGS wird hier maßgeblich anhand des QVW bewertet. Hierbei soll die Vorwegnahme der Konsolidierung durch den DGS äquivalent zu gefahrenen Verkehrsbelastung in Lasttonnen (Lt) ausgedrückt werden. Für die Schwelle B70 konnte eine Vorwegnahme von äquivalent 100.000 Lt durch die Feldmessungen nachgewiesen werden. Die Zunahme des QVW durch den Einsatz des DGS war bei der besohlenen Schwelle B07 So halb so groß wie bei der B70. Der Grund hierfür liegt in den unterschiedlichen Ausprägungen der Schwellen wie Schwellengewicht, Schwellenform, Schwellenbesohlung und unterschiedliche Steifigkeiten der Schienenbefestigungssysteme. Durch eine Anpassung der spezifischen Maschinenparameter des DGS für die unterschiedlichen Schwellentypen (B70, B07 So und B90) soll eine Steigerung der Wirksamkeit erzielt werden und diese im Labor überprüft werden. Die Laborversuche wurden mit einem speziell angefertigten DGS-Aggregat durchgeführt, wobei die Maschinenparameter Auflast und Schwingfrequenz variiert wurden. Bei den Laborversuchen konnte für jede untersuchte Oberbauform optimierte Maschinenparameter bestimmt werden. So konnte im Labor durch die optimierten Maschinenparameter ein Zuwachs des QVW von 15 % bis 32 % gegenüber

dem QVW nach dem Stopfvorgang ohne einen Einsatz des DGS erreicht werden. Es gilt nun diese optimierten Maschinenparameter auch bei Feldmessungen zu verifizieren. Weiterhin konnte bestätigt werden, dass kein erhöhter Verschleiß der Gleiskomponenten oder des Schotters durch den Einsatz des DGS auftritt.

Neben der Bestätigung der optimierten Maschinenparameter besteht weiterer Forschungsbedarf in Bezug auf den Einfluss einer synchronen bzw. asynchronen Einwirkung der eingeleiteten horizontalen Schwingungen des DGS auf die Gleislagestabilität. Dafür muss das Verhalten des Schotters tiefergehend untersucht werden. Es konnte bereits festgestellt werden, dass durch eine synchrone bzw. asynchrone Einwirkung unterschiedliche Intensitäten der Schwellenbeschleunigung erreicht werden und dass durch eine asynchrone Einwirkung die harmonische Anregung der Schwelle durch eine breitbandige deutlich kleinere Anregung überlagert wird. Es ist zu klären, welchen Einfluss diese unterschiedlichen Anregungen auf den Querverschiebewiderstand haben.

Abstract

This study deals with the experimental and theoretical investigation to optimize the dynamic track stabiliser (DTS) with the goal of improving the stability of the track position. The DTS was developed by Plasser & Theurer and has been used for around 45 years. The DTS was developed in parallel with the optimization of the track components. The requirements for track availability have also increased, which goes hand in hand with increasing quality requirements for maintenance measures.

Based on the relevant technical literature, the state of knowledge about the development of the DTS and the application of the DTS was analyzed. Subsequently, the current effectiveness was measured on the sleeper B70 and the padded B07 So in situ. With these findings, the aim was to optimize the machine parameters of the DTS to be used in laboratory tests. The effectiveness of the DTS was evaluated by measuring the lateral track resistance (LTR), the sleeper and ballast acceleration, the track position, the ballast erosion, the sleeper bend, and the abrasion of the rail pad.

The literature review showed disagreement as to the effectiveness of DTS, with a positive tendency towards effectiveness in relation to the stability of the track position. Furthermore, the DTS did not detect any marked abrasion on the track components or the ballast. The effectiveness of the DTS was assessed by the lateral track resistance (LTR). The anticipation of the consolidation by the DTS should be expressed in terms of the traffic load in gross load tones (Lt). For the sleeper B70 an anticipation of equivalent 100,000 Lt by the field measurements was determined. The increase in LTR due to the use of the DTS was half as large for the padded sleeper B07 So as for the B70. The reason is the different specifics of the sleepers such as weight of the sleeper, shape of the sleeper, under sleeper pad and different stiffnesses of the rail fastening systems. By adjusting the machine parameters of the DTS specifically for the different types of Sleeper (B70, B07 So and B90), an increase in effectiveness should be observed in the laboratory. The laboratory tests were conducted with a specially made DTS unit, which was able to operate with varying load and vibration frequency parameters. For each type of superstructure optimized machine parameters could be determined by laboratory tests. With these machine parameters, the DTS was able to increase the LTR by 15 % to 32 % in the laboratory. It is important to verify these optimized machine parameters during field measurements. Furthermore, no increased abrasion of the track components or the ballast caused by the DTS could be detected.

In addition to the confirmation of the optimized machine parameters, there is further research needed in relation to the influence of a synchronous or asynchronous effect of horizontal and vertical vibrations of the DTS on the stability of the track position. For this, the behavior of the ballast must be examined in more detail. It has already been found that different intensities of the sleeper acceleration are achieved by a synchronous or asynchronous simulation and that the harmonic excitation of the sleeper by noise is

superimposed by an asynchronous action. The influence these different suggestions have on the lateral track resistance needs to be further examined.

1 Einleitung

Das Transportsystem Eisenbahn gewann seit der Einführung stetig an Bedeutung und ist bis heute ein Rückgrat von Transport und Mobilität. Wichtigstes Element, neben den Eisenbahnfahrzeugen, ist dabei der Eisenbahnoberbau. Hier werden heute im Wesentlichen zwei Oberbausysteme eingesetzt, der Schotteroberbau und die Feste Fahrbahn. Das Schottergleis ist universell für nahezu alle Anwendungsfälle, von Nebenstrecken bis hin zum Hochgeschwindigkeitsverkehr, einsetzbar. Für einen Schotteroberbau ist die schwimmende Lagerung der Schwellen in dem losen Haufwerk der Schottersteine charakteristisch. Aufgrund der Belastung durch den Zugverkehr verändert sich die Gleislage und muss in regelmäßigen Abständen korrigiert werden. Dies geschieht im Rahmen von Instandhaltungsmaßnahmen. Im Bereich von Neu-, Aus-, Umbau und der Instandhaltung kommen zunehmend Großmaschinen zum Einsatz. Eine wesentliche Entwicklung in diesem Bereich stellt der Dynamische Gleisstabilisator dar.

Der Dynamische Gleisstabilisator (DGS) wurde 1974 entwickelt und wird mittlerweile in verschiedenen adaptierten Formen auf Eisenbahnstrecken in vielen Teilen der Welt eingesetzt. Der DGS wird im Zuge von Neu- bzw. Umbauten sowie in der Instandhaltung eingesetzt, um die Gleislagestabilität zu verbessern. In den vergangenen Jahren hat sich der DGS im Hinblick auf die Steuerungsparameter und die Steuerung an sich weiterentwickelt. Neben der Weiterentwicklung des DGS haben sich ebenfalls die Gleiskomponenten bzw. der Gleisaufbau verändert. Diese maschinenseitigen Veränderungen ermöglichen es, den DGS dem stetigen Wandel der Gleiskomponenten anzupassen. Aus dieser Entwicklung heraus ist es notwendig die Wirksamkeit des DGS zu evaluieren.

Die vorliegende Forschungsarbeit beschäftigt sich mit den Auswirkungen auf den Oberbau beim Einsatz des DGS durch einen theoretischen und experimentellen Ansatz. Zentraler Parameter dieser Untersuchung ist die Gleislagestabilität und damit der Querverschiebewiderstand (QVW). Das Forschungsprojekt wurde durch die Firma Plasser & Theurer initiiert, wissenschaftlich begleitet und finanziert. Weiterhin wurde das Forschungsprojekt durch die DB Netz AG und die ÖBB insbesondere durch das zur Verfügung stellen von Messtrecken unterstützt.

Zunächst werden die bisherigen Forschungen zusammengetragen und in den Kontext gesetzt. Die theoretische Zusammenstellung der bisherigen Forschung ist die Grundlage für Feldmessungen, mit denen die Ausgangslage bewertet wird. Die Feldmessungen geben Aufschluss über die Auswirkung des DGS auf die aktuellen Oberbauformen in Deutschland im Hinblick auf den QVW. Neben der Gleislage wird die Wirkungsweise des DGS vor allem im Hinblick auf die weiterentwickelten Oberbauformen untersucht, die

zunehmend mit elastischen Komponenten ausgestattet sind. Hierbei stellt sich die Frage, welchen Einfluss elastische Komponenten auf die Einleitung der lateral gerichteten Schwingung des DGS auf die Schwelle bzw. den Schotter ausüben. Zur Klärung dieser Forschungsfrage wird die Anregung der Schwelle bzw. des Schotters durch den DGS mittels Beschleunigungsmessungen festgehalten.

Die Maschinenparameter wie Schwingfrequenz, Auflast und Schlagkraft sind steuerbar. Dadurch bietet der DGS die Möglichkeit sich an unterschiedliche Rahmenbedingungen, wie beispielsweise elastische Gleiskomponenten, anzupassen. Nach aktuellem Kenntnisstand sind die Auswirkungen solcher Parameteränderungen auf die Gleislagestabilität sowie auf die Gleiskomponenten unbekannt. Durch Laborversuche sollen optimale Maschinenparameter für die einzelnen Oberbauformen eruiert und gleichzeitig die Auswirkung auf die Gleislage und die Gleiskomponenten festgehalten werden.

Die Forschungsarbeit umfasst die Analyse zum Kenntnisstand über die Entwicklung des DGS und Anwendung des DGS auf Basis der einschlägigen Fachliteratur, die Evaluierung der Wirkung des DGS auf die Gleislagestabilität sowie die Anregung der Schwelle durch den DGS und abschließend die Optimierung der anzuwendenden Maschinenparameter für repräsentative Oberbauformen und die Auswirkungen der angepassten Maschinenparameter.

1.1 Instandhaltung von Eisenbahnstrecken

Moderne Eisenbahnstrecken sind mit unterschiedlichen Oberbauformen ausgestattet. Dominierende Oberbauform ist nach wie vor der Schotteroberbau, der sich unter anderem durch eine einfache Instandhaltung, wirtschaftliche Bauverfahren und eine günstige Lastverteilung auszeichnet. Durch die Betriebsbelastung verändert sich die Gleislage aufgrund der schwimmend im Schotter gelagerten Schwellen zwangsläufig. Aus diesem Grund ist eine Instandhaltung in Abhängigkeit der vorgegebenen Grenzwerte der Gleislage der jeweiligen Eisenbahngesellschaft notwendig. Unter der Instandhaltung wird allgemein eine „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus eines Objekts, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung seines funktionsfähigen Zustands dient, sodass es die geforderte Funktion erfüllen kann“ verstanden [1]. Im Eisenbahnwesen auch innerhalb der DACH-Staaten (Deutschland, Österreich, Schweiz) wird die Qualität der Gleislage durch wiederkehrende Stopfmaßnahmen erhalten. Der Stopfvorgang folgt unabhängig von der eingesetzten Maschine dem gleichen Ablauf. Die Stopfmaschine hebt das Gleis in vertikaler Richtung und richtet es in horizontaler Lage, sodass die angestrebte Gleislage (Solllage) erreicht wird. Für den Hebe- und Richtvorgang nutzt die Stopfmaschine Richtrollen und Hebezeugen, die unter bzw. an dem Schienenkopf angreifen und so das Gleis in die Solllage heben. Abbildung 1 zeigt

den Ausschnitt der Stopfmaschine mit dem der Stopf-Hebe- und Richtvorgang ausgeführt wird.



Abbildung 1: Ausschnitt einer Stopfmaschine

Während des Hebe- und Richtvorgangs greifen die Stopfpickel des Stopfaggregats links und rechts neben der Schwelle in den Schotter und schieben durch eine Bewegung zueinander den Schotter unter die Schwelle (siehe Abbildung 2). Durch diesen sogenannten Beistellvorgang bestehend aus Eindringen, Beistellen und Hochziehen der Stopfpickel wird das Gleis in der Solllage fixiert. Abhängig vom Regelwerk der jeweiligen Bahn sowie der erforderlichen Hebung kann es mehrere Beistellvorgänge sogenannte Eingriffe pro Schwelle geben.



Abbildung 2: links - Stopfpickel über dem Gleis vor dem Eindringen; rechts - Stopfpickel sind eingetaucht und im Beistellvorgang

Bei einem Neubau bzw. Umbau wird die Gleislage durch lagenweise Stopfvorgänge, in der Regel drei Durchgänge, des Schotterbetts aufgebaut. Zusätzliche Stopfgänge können nötig werden, wenn beispielsweise die Einschotterung des Gleises zu gering war und dadurch die Solllage nicht erreicht wird oder die benötigte Hebung durch die Begrenzung der Hebewerte bei den drei Stopfgängen nicht erreicht werden kann. Jede

Bahn legt in ihrem nationalen Regelwerk separat für Neu- bzw. Umbau und für die Instandhaltung fest, welche Stopfparameter eingehalten werden müssen. Hierbei ist die Anzahl der Eingriffe und die Begrenzung der vertikalen Hebung wichtig. Die folgende Tabelle 1 gibt einen Überblick wie diese Parameter bei den DACH-Bahnen geregelt sind. Die „1. Lage“ beschreibt hierbei die unterste Schotterschicht über dem Planum und die „3. Lage“ die Schotterschicht direkt unterhalb der Schwellen.

Tabelle 1: Überblick über die Hebewerte und Anzahl der Eingriffe bei den DACH-Staaten [2]

	DB	ÖBB	SBB
Neubau bzw. Umbau			
1. Lage	≤ 60mm; 2 Eingriffe	≤ 150mm; 2 Eingriffe	≤ 60mm; 2 Eingriffe ≤ 100mm; 3 Eingriffe
2. Lage	≤ 25mm; 1 Eingriff ≤ 30mm; 2 Eingriffe	≤ 80mm; 2 Eingriffe	≤ 60mm; 3 Eingriffe
3. Lage	≤ 25mm; 1 Eingriff	≤ 60mm; 2 Eingriffe	≤ 60mm; 2 Eingriffe
Instandhaltung			
Name	Durcharbeitung (Dua)	Planbare Instandhaltungsstopfung	Unterhaltsstopfung
	≤ 25mm; 1 Eingriff ≤ 40mm; 2 Eingriffe	≤ 60mm; Anzahl der Eingriffe nach Bedarf	≤ 60mm; 2 Eingriffe

Im weiteren Verlauf wird die Terminologie, die bei der Deutschen Bahn (DB) üblich ist, verwendet:

- Stopfvorgang in 1. Lage = Hebe- und Verdichtgang (HuV)
- Stopfvorgang in 2. Lage = 1. Stabilisierung (1. Stabi)
- Stopfvorgang in 3. Lage = 2. Stabilisierung (2. Stabi)
- Zusätzliche Stopfvorgänge = verlorener Stopfgang
- Stopfvorgang bei Instandhaltung = Durcharbeitung (Dua)

Bei einer Stopfmaßnahme verschlechtert sich zunächst die Gleislagestabilität, da der vom Verkehr konsolidierte Schotter durch das Eintauchen der Stopfpickel aufgelockert wird. Die Stopfmaßnahme kann an die Gleislagestabilität des konsolidierten Schotters nicht anknüpfen [3]. Eine Verschlechterung der Gleislagestabilität kann mit dem Querverschiebewiderstand (QVW) erkannt werden. Oberste Priorität bei den Eisenbahnen ist die Gewährleistung eines sicheren Verkehrs. Der verminderte QVW kann durch die Anordnung einer reduzierten Fahrgeschwindigkeit, einer sogenannten Langsamfahrstelle (La), ohne Sicherheitsrisiko wieder ansteigen. Bei einer reduzierten Geschwindigkeit muss das Gleis geringere dynamische Kräfte abtragen. Die mit der La verbundene Minderung der Verfügbarkeit einer Eisenbahnstrecke verursacht einen

Kapazitätsverlust und belastet ggf. zusätzlich Umgehungsstrecken. In dem Zeitraum, in der die La angeordnet ist, kommt es zu einem Verdichtprozess durch die Umlagerung der Schotterkörner. Diese Umlagerung zieht eine Setzung nach sich, die als sogenannte Anfangssetzung bezeichnet wird [4]. Diese Anfangssetzung führt zu meist ungleichmäßigen Setzungen aufgrund der eingebrachten Verkehrsbelastung, die aus einem stochastisch verteilten Gemisch von Kräften besteht. Durch den Einsatz des DGS soll unter anderem die Anfangssetzung kontrolliert vorweggenommen werden sowie der QVW durch eine Konsolidierung des Schotterbetts erhöht werden. Dazu wird eine lateral gerichtete Schwingung über den Gleisrost in den Oberbau eingebracht. Durch den DGS wird die Setzung durch die Verkehrsbelastung, die ansonsten im Zeitraum der Langsamfahrstelle stattfindet, künstlich vorweggenommen. Die La kann dadurch zeitlich verkürzt werden oder sogar komplett entfallen.

1.2 Der Dynamische Gleisstabilisator

Der Dynamische Gleisstabilisator ist eine Gleisbaumaschine die entweder als selbstfahrende Einheit oder als Kombination mit einer anderen Gleisbaumaschine wie der Stopfmaschine zum Einsatz kommen kann. Abbildung 3 zeigt eine Kombination aus Stopfmaschine (links) und integriertem DGS (rechts), die erstmalig im Jahr 2000 eingesetzt wurde, aus der Serie 09-3X-Dynamic von Plasser & Theurer. Der Maschinenteil, der für die Stabilisierung durch den DGS maßgebend ist, wird im Detailausschnitt in Abbildung 4 dargestellt. Die Arbeitsgeschwindigkeit des DGS ist abhängig von der Ausstattung. Eingesetzt werden Maschinen mit einem Single-Stabilisationsaggregat oder einem Doppel-Stabilisationsaggregat. Ein Doppel-Stabilisationsaggregat ermöglicht dabei die Anpassung an die Arbeitsgeschwindigkeit der Stopfmaschine [5].



Abbildung 3: Gleisbaumaschine 09-3X-Dynamic, links - vorderer Teil Stopfmaschine; rechts - hinterer Teil DGS

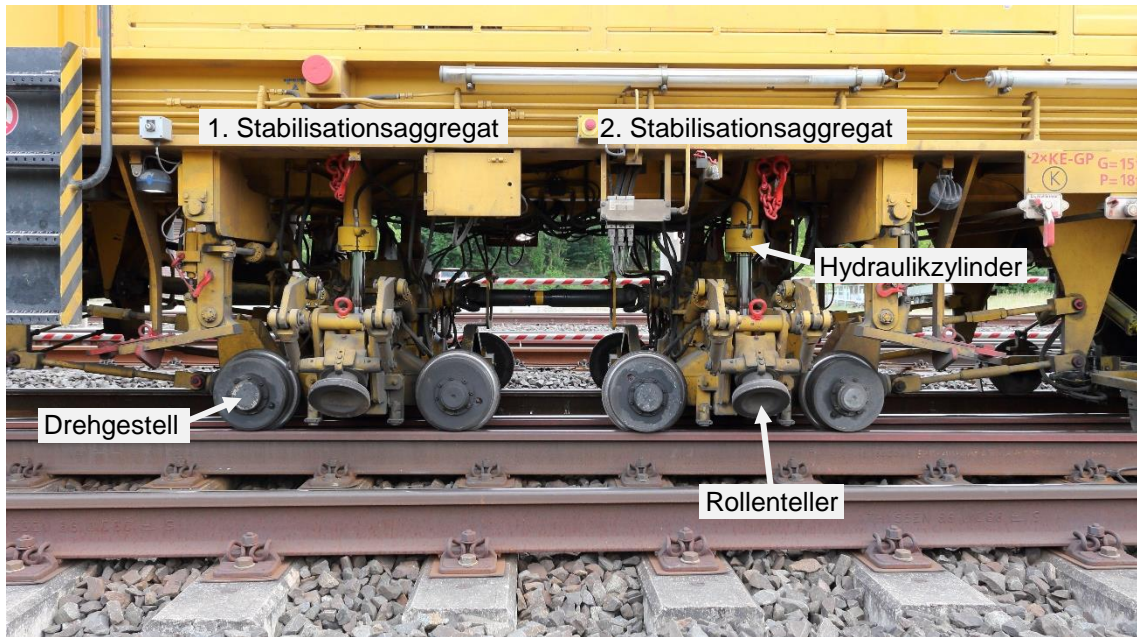


Abbildung 4: Ausschnitt des DGS 09-3X-Dynamic

Bei einem DGS mit Doppel-Stabilisationsaggregat, wie in Abbildung 4 und Abbildung 5 zu erkennen, sind diese zwischen den Drehgestellen in einem Abstand von 1.600 mm angeordnet (Nr. 9 in Abbildung 5). Das Gleis wird in lateraler Richtung an der Schiene durch innenliegende Spurrollen und außenliegenden Rollenteller gehalten (siehe Abbildung 4). In vertikaler Richtung wird ein kraftschlüssiger Verbund zwischen DGS und Schiene durch vier Hydraulikzylinder hergestellt (Nr. 8 in Abbildung 5), die sich gelenkig gegen den Fahrzeugrahmen abstützen [6]. Neben der Sicherstellung des kraftschlüssigen Verbunds können durch die Hydraulikzylinder die vertikalen Auflasten angepasst und so die Setzungen kontrolliert werden. Der DGS verfügt zusätzlich über ein Bezugssystem, einer sogenannten integrierten Messeinrichtung (Nr. 10 in Abbildung 5). Dieses Bezugssystem ermöglicht mit Hilfe einer Nivellier- und Querhöhenautomatik bzw. der sogenannten Absenkautomatik, die Hydraulikzylinder separat anzusteuern und somit eine gute Gleislage zu erreichen [7, 8].

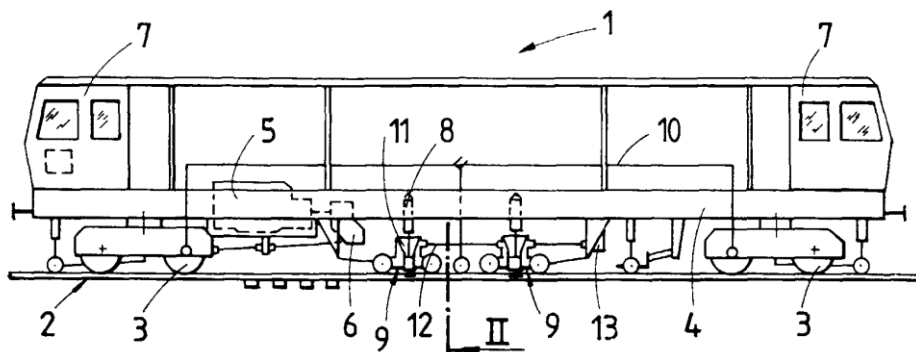


Abbildung 5: Schematische Seitenansicht eines DGS [9]

Das Kernstück des DGS und die Grundlage für die Arbeitsweise sind die Unwuchten der Stabilisationsaggregate. Jedes Stabilisationsaggregat hat vier Unwuchten (Erregermassen). Jeweils zwei von den Unwuchten sind wie rechts in Abbildung 6 zu sehen gegenläufig angeordnet. Dadurch entsteht in horizontaler Richtung eine Schlagkraft, die von der Schwingfrequenz sowie der Exzentrizität der Unwuchten abhängt und sich ausfolgender Formel ergibt:

$$F = m \cdot r \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \quad 1.1$$

F = Schlagkraft [N]

r = Exzentrizität [m]

m = exzentrische Masse [kg]

f = Stabilisierfrequenz [Hz]

Die Wirkung in vertikaler Richtung ist durch die Anordnung aufgehoben [10]. Diese synchronisierten Unwuchten (Nr. 15 in Abbildung 6 links) bringen das Gleis in laterale Schwingungen mit einer verstellbaren Schwingfrequenz von 0 Hz bis 45 Hz bei kontinuierlicher Weiterfahrt.

Hierbei entsteht, unabhängig von der Schwingrichtung, eine gesamte laterale Schlagkraft von bis zu 350 kN (Nr. 15 in Abbildung 6 rechts), in Abhängigkeit der Schwingfrequenz. Über die Hydraulikzylinder (Nr. 8 in Abbildung 6) wird durch einen Druck von maximal 100 bar gleichzeitig eine vertikale Auflast erzeugt, die dadurch maximal 365 kN betragen kann. Die Auflast ist ebenso wie die Schwingfrequenz stufenlos regelbar. Aus Abbildung 6 sind die Rollenteller (Nr. 24) und die Spurrollen (Nr. 16) ersichtlich.

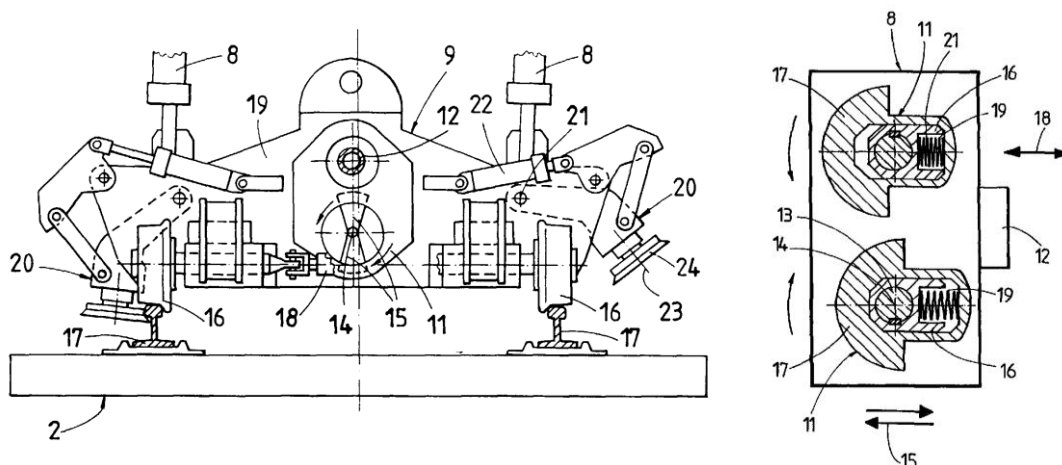


Abbildung 6: Querschnitt der Maschine gemäß Schnitt II aus Abbildung 5 (links) und Unwucht im Detail (rechts) [9] [11]

Aktuell sind DGS mit unterschiedlichen Funktionsweisen in Bezug auf die synchronisierten Unwuchten im Einsatz. Die Unwuchten der beiden Stabilisationsaggregate arbeiten lateral entweder gleichgerichtet (rote Pfeile in Abbildung 7) oder gegengleich (blaue Pfeile in Abbildung 7). Im Folgenden werden die

Schwingrichtungen als synchrone bzw. asynchrone Anregung bezeichnet, die in einem Abstand von 1.600 mm die Schwingungen in die Schiene und somit in das Gleis leiten. Durch einen Einsatz der Stabilisationsaggregate mit asynchroner Wirkrichtung wird eine Reduzierung der Erschütterungsemissionen erreicht, ohne die Wirkung nennenswert zu beeinträchtigen. Diese Konfiguration wurde 1996 zum Patent angemeldet [11].

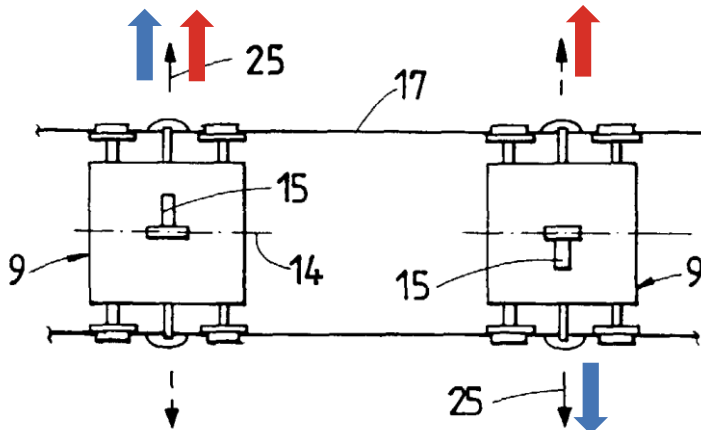


Abbildung 7: Schematisierte Draufsicht auf zwei Stabilisationsaggregaten [11]

Aus Erfahrungswerten geht hervor, dass es vor allem bei Arbeiten im Verbund zu einer plötzlichen Unterbrechung der Arbeiten kommen kann. In diesem Fall wird der DGS abgestellt, damit an dieser Stelle keine Setzungsmulde entsteht. Bei diesem Abschaltprozess werden alle Frequenzen unterhalb der aktuell eingestellten Frequenz durchfahren bis die Unwuchten in Ruhelage sind. Dieses Prozedere kann auf Brücken zu einer Resonanzproblematik führen, weshalb in verschiedenen Regelwerken der Einsatz des DGS auf Brücken eingeschränkt wird [12]. Mit einer gesonderten Entwicklung wurde dieser Problematik entgegengewirkt: Die Schwingungsamplitude der Unwuchten wurde zwischen 0 bis 2,5 mm steuerbar ausgebildet. Ist die Schwingungsamplitude Null, so ist die Schlagkraft ebenfalls Null, wird die Schwingungsamplitude auf 2,5 mm gestellt so ergibt sich die maximale Schlagkraft in Abhängigkeit der Schwingfrequenz. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass diese Technik nur in den neueren Gleisbaumaschinen implementiert ist.

2 Stand der Wissenschaft und Praxis

Der Dynamische Gleisstabilisator wurde in den Jahren 1974 bis 1978 von der Firma Plasser & Theurer entwickelt. Seitdem wurden viele Untersuchungen durchgeführt, während der Dynamische Gleisstabilisator stetig weiterentwickelt wurde. Im Rahmen einer Literaturrecherche wurden diverse Ergebnisse zu unterschiedlichen Aspekten zusammengetragen. Dabei zeigt sich deutlich, dass die Fachwelt bisher zu sehr unterschiedlichen Einschätzungen in Bezug auf die Wirksamkeit des DGS kommt. Diese Diskrepanzen lassen sich teilweise durch unterschiedliche Eingangsgrößen bzw. Versuchsvoraussetzungen erklären. Vor allem die Versuchsvoraussetzungen beeinflussen die Bewertung maßgebend. Oft werden bei Versuchen die Stopfqualität, Umwelteinflüsse (Witterung), die Messqualität sowie die Versuchsdurchführung nur unzureichend beschrieben. Das beeinträchtigt die Interpretation der Versuchsergebnisse. Die teilweise kontroversen Forschungsergebnisse wurden im Laufe des Forschungsprojektes aufgenommen und weiter untersucht.

2.1 Regelwerke für den Einsatz des DGS

Der Einsatz des DGS wird in den jeweiligen Ländern durch Regelwerke bzw. Technische Anweisungen festgelegt, in Deutschland beispielsweise durch die DS 820 03 15 [13] und in Österreich durch die TA-MATE 01.2014 [14]. Im Folgenden werden die Unterschiede herausgearbeitet.

In beiden Richtlinien ist zunächst das Einsatzgebiet definiert und anschließend die Arbeitsparameter wie beispielsweise die Arbeitsgeschwindigkeit, die vertikale Auflast oder auch die Schwingfrequenz. Die Deutsche Bahn (DB) unterscheidet bei den Vorgaben der Parameter zwischen dem Einsatz des DGS nach der 1. Stabilisierung (Stopfvorgang in 2. Lage) und dem Einsatz der übrigen Stopfvorgänge: Dazu gehört laut Richtlinie die 2. Stabilisierung (Stopfvorgang in 3. Lage) und die Dua (Durcharbeitung bei einer Instandhaltung).

Die Österreichische Bundesbahn (ÖBB) hingegen unterscheidet bei der Vorgabe der Parameter nach ihren Streckenklassen, die in der Richtlinie 07.02.01 festgelegt sind. Hierbei steht die Streckenklasse B für eine Belastung mit einer maximalen Achslast von 18 to, Streckenklasse C für 20 to und Streckenklasse D für 22,5 to [15].

Zur Übersichtlichkeit werden die Unterschiede der Vorgaben für den Einsatz des DGS in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Zusammenstellung der Vorgaben zum Einsatz des DGS [13] [14]

Kategorien	DB		ÖBB	
	1. Stabi	Übrigen Einsätze	Streckenklasse B	Streckenklasse C und D
Einsatzbereich	Schotteroberbau mit Betonschwellen		Schotteroberbau mit allen Schwellentypen	
Einsatz erforderlich	muss	soll	Nach jedem Stopfvorgang	
Schwingfrequenz	ca. 33 Hz		30–35 Hz	
Auflast	80–90 bar	40–50 bar	60 bar	75 bar
Arbeitsgeschwindigkeit	ca. 1100 m/h	ca. 1800 m/h	keine Vorgaben	
Geschwindigkeitsreduzierung nach DGS	Vorgaben laut Ril 824		Keine Reduzierung	
Nivellierautomatik	Nein	ja	immer	
Tunnel				
	50 % der vorher eingestellten Auflast		Keine Vorgaben	
	d.h. 40–45 bar	d.h. 20–25 bar		
Brücken				
Definition	Alle Arten		Gilt für Brücken und Durchlässen mit lichte Weite bis 4 m und gemauerte Gewölbe	
	Nicht beginnen oder enden mit dem DGS			
Arbeitsgeschwindigkeit	1000 m/h		Keine Vorgaben	
Auflast	Keine Vorgaben		ca. 25 bar	

Zusätzlich zu den Angaben in der Tabelle gibt es in beiden Richtlinien Bereiche, in denen der Einsatz des DGS verboten ist. In der Richtlinie der DB (DS 820 03 15) zählen dazu [13]:

- Stahlbrücken und Gewölbebrücken sowie Tunnel die aus Ziegel- oder Natursteinmauerwerk und unbewehrtem Beton hergestellt sind.
- Bei Weichschichten im Untergrund, bei anstehenden, stark wasserhaltigen Sanden, bei stark bindigen Böden und in Bereichen von rutschgefährdeter Böschung.

In der Technischen Anweisung der ÖBB (TA-MATE 01.2014) werden u.a. folgende Bereiche von einem Einsatz des DGS ausgeschlossen [14]:

- In Überhöhungsrampen auf Brücken
- In Gleisbögen auf gemauerten Gewölben mit einer lichten Weite größer 15 m oder mit einer Überschüttung kleiner 1 m
- Bei Tunneln in sehr schlechtem Bauzustand oder mit gemauerten Sohlkanälen bzw. Abdeckplatten
- Konstruktionen, die auf Grund ihres Bauzustandes mit einer Geschwindigkeitseinschränkung belegt sind

Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass die ÖBB im Gegensatz zur DB weniger Vorgaben trifft. Ein relevanter Aspekt in Bezug auf die kapazitative Streckenverfügbarkeit ist die Geschwindigkeitsreduzierung nach einer Neu- oder Umbaumaßnahme bzw. einem Stopfvorgang im Zuge einer Instandhaltung. Die ÖBB verzichtet gänzlich auf eine Geschwindigkeitsreduzierung im Nachgang zu einer Gleisdurcharbeitung. In der Technischen Anweisung wird festgehalten, dass der DGS die Anfangssetzungen vorwegnimmt und somit anschließend mit maximaler Streckengeschwindigkeit gefahren werden kann, im Unterschied zur deutschen Richtlinie, die dem DGS nur eine gewisse Verdichtwirkung äquivalent zu gefahrenen Lasttonnen zuschreibt. Daraus resultieren Geschwindigkeitseinschränkungen, die in der Richtlinie 824.2200 geregelt sind. Die Höchstgeschwindigkeiten werden in Abhängigkeit von der Gleisbelastung durch gefahrene Lasttonnen, sowie von der örtlichen zulässigen Geschwindigkeit und der Oberbauform festgelegt. Generell wird in der Richtlinie unterschieden zwischen Neu- und Umbaumaßnahmen und Dua (Instandhaltungsmaßnahme). Die Tabelle 3 zeigt die Geschwindigkeitsregulierungen nach der 2. Stabilisierung bei Neu- und Umbaumaßnahmen. Nach Anwendung des DGS entfällt nur ein Teil der Geschwindigkeitsreduzierungen bei Betonschwellen, die mit einer zulässigen Geschwindigkeit größer 160 km/h befahren werden. Für den Geschwindigkeitsbereich von 160 km/h bis 200 km/h und größer als 200 km/h bleibt auch bei Anwendung des DGS eine Geschwindigkeitsreduzierung während der ersten 50.000 Lt bestehen. Lediglich während der Belastungsphase jenseits der 50.000 Lt kann durch die Anwendung des DGS die maximale zulässige Geschwindigkeit (zul. v) vorzeitig freigegeben werden. Dies betrifft zwei von elf Anwendungsfällen bei Strecken mit Betonschwellen.

Tabelle 3: Zulässige Höchstgeschwindigkeit nach 2. Stabilisierung [16]

Örtlich zul. Geschwindigkeit zul. v [km/h]	Oberbauform		Höchstgeschwindigkeit [km/h] in Abhängigkeit von der Gleisbelastung aus Gesamtzuglasten [t]						
	Oberbau auf Betonschwellen mit $l \geq 2,60\text{m}$	Übrige Oberbauformen	≤ 25.000	> 25.000	> 50.000	> 100.000	> 150.000	> 200.000	
			≤ 50.000	≤ 100.000	≤ 150.000	≤ 200.000			
≤ 70	x	x	zul. v						
> 70 bis ≤ 120	x		70	zul. v					
		x	70	70	zul. v				
> 120 bis ≤ 140	x		90	zul. v					
		x	90	90	zul. v				
> 140 bis ≤ 160	x		90	140	140	zul. v			
		x	90	110	110	zul. v			
> 160 bis ≤ 200	x		90	140	140¹⁾	zul. v			
		x	90	110	160	160	160	160	zul. v
> 200	x		90	140	140¹⁾	zul. v			

1) Nach einer dynamischen Stabilisierung gemäß Richtlinie 15 darf zul. v zugelassen werden.

Tabelle 4 zeigt die Geschwindigkeitsrestriktionen nach einer Dua, hier wird zusätzlich nach der Temperatur unterschieden. Im Bereich der Betonschwellen ergibt sich nach einer Dua nur bei Geschwindigkeiten größer als 160 km/h eine Langsamfahrstelle, die durch den DGS vermieden werden kann. Im Bereich von Betonschwellengleisen kann demnach durch die Anwendung des DGS nach einer Dua vollständig auf die Einrichtung von Langsamfahrstellen verzichtet werden.

Tabelle 4: Zulässige Höchstgeschwindigkeit nach der Durcharbeitung [16]

Zu erwartende Schienentemperatur	Örtlich zul. Geschwindigkeit zul. v [km/h]	Oberbauform		Höchstgeschwindigkeit [km/h] in Abhängigkeit von der Gleisbelastung aus Gesamtzuglasten [t]									
		Oberbau auf Beton-schwellen mit $\geq 2,60\text{m}$	Übrige Oberbau-formen	≤ 25.000	> 25.000 ≤ 50.000	> 50.000 ≤ 100.000	> 100.000 ≤ 150.000	> 150.000					
$\leq +40^\circ\text{C}$	≤ 160	x	x	zul. v									
	> 160 bis ≤ 200	x							160				
	> 200	x											
$> +40^\circ\text{C}$	≤ 70	x	x	zul. v									
	> 70 bis ≤ 120	x							70	70			
	> 120 bis ≤ 140	x							90	90			
	> 140 bis ≤ 160	x							110	110	110		
	> 160 bis ≤ 200	x							160¹⁾				
	> 200	x							110	110	160	160	
	> 200	x		160¹⁾	160¹⁾								

1) Nach einer dynamischen Stabilisierung gemäß DS 820 03 15 (künftig Ril 824.2410) darf zul. v zugelassen werden.

2.2 Ausrüstungsstandard des Oberbaus

Im Folgenden wird im Wesentlichen auf den Ausrüstungsstandard der Deutsche Bahn (DB) Bezug genommen, da die Baumaßnahmen, bei denen die Feldmessungen durchgeführt werden konnten, in Deutschland liegen und die Strecken dementsprechend ausgestattet sind. Weiterhin wurden für die Laborversuche anhand des Ausrüstungsstandard der DB drei unterschiedliche, gängige Aufbauten ausgesucht, um ein möglichst breites Spektrum der in Deutschland verwendeten Oberbauformen abzudecken.

Im Netz der Deutschen Bahn wird anhand des Regelwerkes Richtlinie 820.2010 der Ausrüstungsstandard des Streckennetzes festgelegt. Hierbei findet zunächst eine Unterteilung nach der Gleisbelastung der vorgesehenen Strecke und anschließend nach Geschwindigkeit statt. Die ausgesuchten Oberbauformen erhalten innerhalb der Tabelle der Richtlinie 820.2010 erste Priorität für Gleisbelastung zwischen 10.000 Lt/d und 30.000 Lt/d sowie Gleisbelastungen größer 30.000 Lt/d.

Bei der Schienenwahl kann als Schientyp unter 80 km/h die 54E4 und über 80 km/h die 60E2 gewählt werden. Ab 120 km/h ist ein Schwellenabstand von 60 cm erforderlich. Bei geringeren Geschwindigkeiten kann der Schwellenabstand auf 65 cm erhöht

werden. In Bereichen kleiner oder gleich 160 km/h sind 40 cm Schotter vor Kopf erforderlich, bei höheren Geschwindigkeiten 50 cm. Für die Höhe der Bettungsdicke liegt die Geschwindigkeitsgrenze bei 230 km/h. Bei Geschwindigkeiten über 230 km/h ist eine Bettungsdicke von 35 cm erforderlich, darunter sind 30 cm ausreichend. Für die Laborversuche wurden Parameter für eine Geschwindigkeit von 160 km/h gewählt. Somit ergeben sich folgende Parameter [17]:

- Schientyp 60E2
- Schwellenabstand 60 cm
- Bettungsdicke 30 cm
- Schotter vor Kopf 40 cm

Weiter wurden folgende drei Schwellentypen mit Befestigungssystemen ausgewählt:

1. B70 W mit W 14 K 686a/ 687a (Schwellen ohne elastische Sohle)
2. B90 W mit W 14 K 900 (Schwellen ohne elastische Sohle)
3. B07 So W mit W 21 K 1000 (Schwellen mit elastischer Sohle)

Das erste System ist bis zu einer Geschwindigkeit von 160 km/h zulässig und unterscheidet sich von der Steifigkeit sowie vom Schwellengewicht signifikant von den weiteren Systemen. Die beiden anderen Systeme sind für Geschwindigkeiten über 160 km/h zugelassen. Durch diese Auswahl werden verschiedene Oberbausteifigkeiten betrachtet, aus der sich eine Tendenz für zukünftige Oberbauformen ableiten lässt. In Anlage A.1 finden sich die Regelzeichnungen der Schwellen B70, B90 und B07 So. Zur Einordnung in den internationalen Kontext kann die Schwelle B70 sowohl von den Abmessungen (Länge und Schwellenhöhe) als auch vom Gewicht mit der österreichischen Schwelle K1 oder L2 und mit der schweizerischen B70 verglichen werden. Allerdings hat die K1 noch stärker als die L2 die charakteristische Einschnürung oder Knochenform der Schwelle B07 So bzw. B90. Für die B07 So und B90 konnte keine angemessene Vergleichsschwelle in den Regelwerken der ÖBB bzw. SBB gefunden werden.

2.3 Ergebnisse der Literaturrecherche

Das erste Patent für den DGS wurde 1973 von Franz Plasser der Firma Plasser & Theurer beantragt. Anschließend wurde der DGS als Prototyp in einer Versuchsphase erprobt. Ein bedeutender Meilenstein ist die Entwicklung der verstellbaren Unwuchten. Die modernste Gleisbaumaschine mit integriertem DGS ist die hybridangetriebene Stopfmaschine 4S Dynamic E³ (2015). Mittlerweile wurden über 900 Maschinen in 45 Ländern verkauft [5]. Die gesamte Entwicklungshistorie des DGS wurde fortlaufend von verschiedenen Firmen und Instituten mit Versuchsreihen begleitet, um die Qualität des DGS zu beurteilen.

Die Literaturrecherche konzentriert sich auf die Aspekte, die aussagekräftig zur Wirksamkeit des DGS sind, in Bezug auf:

- Die Anfangsqualität der Gleislage
- Die Langlebigkeit der Gleislagequalität
- Die Gleislagestabilität
- Verschleiß von Oberbaukomponenten

Als Indikator zur Beurteilung der Gleislage können Parameter wie die Längshöhe, die Richtung, die gegenseitige Höhenlage oder die Verwindung gemessen werden. Die Gleislagestabilität kann durch die Messung des QVW der Schwellen, der als Wert in kN oder bezogen auf den Schwellenabstand in N/mm angegeben wird, beurteilt werden. Der QVW wird in der Literatur auch oft durch äquivalente Lasttonnen (Betriebsbelastung) ausgedrückt.

Die Literaturrecherche zeigt oftmals widersprüchliche Aussagen zu den oben genannten Aspekten. Da meist nicht in allen Berichten die Rahmenbedingungen umfassend dokumentiert wurden, ist eine Analyse der widersprüchlichen Aussagen nicht durchgehend möglich. Die daraus resultierenden offenen Fragestellungen werden im Rahmen des Forschungsprojektes bearbeitet. Im Wesentlichen konzentrieren sich die Untersuchungen auf die folgenden sechs Aspekte:

- Vorwegnahme der Anfangssetzung aus Betriebsbelastung
- Qualität der Gleislagegeometrie
- Verlängerung der Durcharbeitungsintervalle
- Möglicher beschleunigter Verschleiß des Schotterbettes
- Schwellenbiegung (Schwellenreiten)
- Schwellenschraubenauszugskraft bei der Durcharbeitung

Vorwegnahme der Anfangssetzung aus Betriebsbelastung

Einheitlich bewerten die Quellen, dass der DGS eine gewisse Anfangssetzung bzw. Verdichtung des Schotterbettes vorwegnimmt. Jedoch schwanken hierzu die Angaben zwischen 70.000 äquivalenten Lasttonnen (Lt) [18] und 700.000 äquivalenten Lasttonnen [19]. Aktuellere Quellen vergleichen die Verdichtleistung des DGS mit 100.000 Lasttonnen [20, 7, 21]. Dieser Wert von 100.000 Lt findet sich auch in der Richtlinie der Deutschen Bahn wieder [13]. Eine andere Quelle bezieht die Qualität des DGS auf den konsolidierten Zustand vor einem Stopfvorgang. Durch den Stopfvorgang sinkt der QVW auf 50 % des konsolidierten Zustandes und kann durch den DGS dann wieder um 50 % des QVW nach dem Stopfen erhöht werden. Demnach steigt nach dem Einsatz des DGS der QVW auf 75 % des konsolidierten Zustandes an [7].

Die Höhe der Anfangssetzung und der damit verbundene Konsolidierungsgrad, der durch den QVW ausgedrückt werden kann, ist ausschlaggebend zur Festlegung von

notwendigen Geschwindigkeitsreduzierungen. Die DB legt beispielsweise Geschwindigkeitsreduzierungen im Bereich von Neu- und Umbaumaßnahmen fest, auch wenn der DGS zum Einsatz kam, siehe hierzu Kapitel 2.1.

Es gilt abschließend zu klären wie groß die Konsolidierung durch den DGS ist und ob dadurch die aktuell vorgeschriebenen La der Richtlinie 824 entfallen können.

Diese offenen Fragen werden in der Untersuchung dieser Forschungsarbeit in Kapitel 4 und 5 aufgegriffen. Bei den Feldversuchen und Laborversuchen wird dazu der QVW direkt nach dem Stopfen, nach einer Betriebsbelastung von 100.000 Lt und nach 1,5 Mio. Lt gemessen. Diese Messungen werden jeweils in einem Abschnitt durchgeführt, in dem der DGS zum Einsatz kam und in einem Referenzabschnitt, der nur gestopft wurde. Diese drei Messpunkte wurden gewählt, da nach 100.000 Lt laut DB Richtlinie die Langsamfahrstellen entfallen und nach 1,5 Mio. Lt von einem abschließend konsolidierten Schotterbett ausgegangen werden kann. Damit kann neben der Anfangssetzung auch der Zuwachs des QVW innerhalb der ersten 100.000 Lt festgestellt und beide QVW können auf die Werte im konsolidierten Gleis (nach 1,5 Mio. Lt) bezogen werden.

Qualität der Gleislagegeometrie

Durch die Überfahrt von Zügen wird das teilweise auch inhomogene Gleis durch stochastisch verteilte Kräfte beansprucht, was ungleichmäßige Setzungen zur Folge hat. Der DGS hingegen benutzt eine singuläre Frequenz und ein Nivelliersystem, wodurch das Gleis gezielt und kontrolliert abgesenkt, respektive verdichtet wird [22]. Diese Verdichtwirkung auf die Schotterbettung unter Beibehaltung der Gleislagequalität und die geringe Beeinflussung des Gleisumfeldes wird ebenfalls durch Untersuchungen vom ehemaligen Bundesbahn-Zentralamt, heute Eisenbahnbundesamt, bestätigt [6]. Allerdings wurde diese Aussage nicht in allen Versuchen des Bundesbahn-Zentralamt widerspiegelt. Im Sachstandsbericht zur Erprobung des DGS von 1986 wird eine unruhige Gleislage in Bezug auf die Richtung genannt. Weiter heißt es, dass bei den Längs- und Querhöhenfehlern kein signifikanter Unterschied zwischen dem DGS-behandelten Gleis und dem nur gestopften Gleis zu erkennen ist. Häufig wird sogar von einer geringen Gleislageverschlechterung durch den DGS berichtet [23, 24].

In einem Forschungsbericht des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen, heute Prüfam für Verkehrswegebau, wurde 1976 bei Nullsetzungsmessungen festgestellt, dass sich die Fehlstellen und Streuwerte bei einer Arbeitsfrequenz des DGS von 45 Hz und 30 mm Hebung beim Stopfvorgang gegenüber einer Arbeitsfrequenz des DGS von 35 Hz und ebenfalls 30 mm Hebung beim Stopfvorgang vergrößern [25].

In einer Fachtechnische Stellungnahme der DB Netz AG [26] wurde die Qualität der Gleislage mit unterschiedlich steifen Zwischenlagen (Zw) und unterschiedlichen Hebungen bei den vorher durchgeführten Stopfgängen und nach der dynamischen Gleisstabilisation verglichen. Bei den zugrundeliegenden Messungen war ein Abschnitt

mit der Zw 687a und der zweite Abschnitt mit der elastischeren Zw 700 ausgerüstet. Bei geringen Hebewerten bis 15 mm wiesen beide Versuchsabschnitte eine gute Gleislage auf. Bei Hebewerten bis 30 mm (zzgl. Überhebung für den DGS) war die Längshöhe des Gleises bei der Zw 700 deutlich schlechter. Bei allen anderen Gleislageparametern (gegenseitige Höhenlage, Verwindung und Krümmung) konnte keine Verschlechterung durch die Durcharbeitung festgestellt werden. Auch nach der Konsolidierung ein paar Monate später wies der Bereich mit der Zw 700 eine schlechtere Gleislage als vor der Durcharbeitung auf.

Die betrachteten Untersuchungen kommen im Hinblick auf die Gleislagequalität zu keinem eindeutigen Konsens. Zusammenfassend lässt sich jedoch festhalten, dass die Frequenz, die Hebung sowie die Auflast beim Einsatz des DGS die Gleislagequalität beeinflussen. Auch scheint die Zw, als ein elastisches Element des Oberbaus, einen gewissen Einfluss auf die Gleislagequalität zu haben. In den betrachteten Feldversuchen ist es schwierig die Ursache für die Schwankungen der Gleislagequalität zu detektieren. In den hier vorliegenden Berichten sind oft keine Angaben über die Beschaffenheit des Untergrundes und die Qualität des Stopfvorganges zu finden. Beides hat jedoch ebenfalls, wie der DGS, einen Einfluss auf die Gleislagegeometrie. Zur Auswertung der Gleislagegeometrie sollten daher die unterschiedlichen Einflüsse aus den örtlichen Randbedingungen aber auch resultierend aus den Arbeitsparametern der Gleisbaumaschinen sowie deren Arbeitsweise Berücksichtigung finden.

Die Qualität der Gleislagegeometrie durch den Einsatz des DGS wird in den Kapiteln 4 und 5 anhand von Feldmessungen und Laborversuchen untersucht. In den durchgeführten Feldmessungen und Laborversuchen wurden die Einflüsse präzise dokumentiert. Gleichzeitig wurden bei jeder Messung Referenzabschnitte eingerichtet, um so den Effekt auf die Gleislagegeometrie durch den DGS im Verhältnis festhalten zu können. Weiterhin wird durch die Wahl der Oberbauformen für die Feldmessungen und Laborversuche der Einfluss der Zwischenlagen untersucht.

Verlängerung der Durcharbeitungsintervalle

Der Durcharbeitungszyklus hängt von der Gleislagequalität ab. Zur Ermittlung des Zeitpunktes einer technischen und wirtschaftlichen Instandsetzung gibt es sogenannte Eingriffsschwellen, die in der EN 13848-5 festgelegt sind. Die drei Eingriffsschwellen sind nach der Richtlinie wie folgt definiert [27]:

- Aufmerksamkeitsschwelle (AL)
bezieht sich auf den Wert, der, falls er überschritten wird, eine Analyse des geometrischen Gleiszustands erfordert, und dass dieser in den regulär geplanten Instandhaltungsarbeiten berücksichtigt wird.
- Eingriffsschwelle (IL)
bezieht sich auf den Wert, der, wenn er überschritten wird, korrigierende

Instandhaltungsmaßnahmen erfordert, damit die Soforteingriffsschwelle nicht vor der nächsten Inspektion erreicht werden kann.

- Soforteingriffsschwelle (IAL)
bezieht sich auf den Wert, der, wenn er überschritten wird, Maßnahmen erfordert, die zur Reduzierung des Entgleisungsrisikos auf ein akzeptables Niveau führen. Dies kann entweder durch Sperren des Gleises, durch Reduzierung der Geschwindigkeit oder durch Korrektur der Gleisgeometrie erfolgen.

In den nationalen Normen der DACH-Staaten finden sich diese Eingriffsschwellen unter anderer Bezeichnung wieder. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick zu der Benennung der drei Eingriffsschwellen, in den jeweiligen nationalen Normen der DACH-Staaten.

Tabelle 5: Bezeichnung der Eingriffsschwellen bei den DACH-Staaten [2]

	EN 13848-5	DB	ÖBB	SBB
Aufmerksamkeitsschwelle	AL	SR _A	AS	-
Eingriffsschwelle	IL	SR ₁₀₀	ES	ES
Soforteingriffsschwelle	IAL	SR _{Lim}	SES	SES

Die Gleislage wird nach einer Dua oder einem Neu- bzw. Umbau durch Gleismesszüge gemessen. Dies ist die sogenannte Anfangsqualität eines Gleises. In regelmäßigen Abständen wird die Gleislage erneut gemessen und mit den jeweiligen Werten der Eingriffsschwellen verglichen. Auf Basis dieser Messungen muss der Verantwortliche eine Instandhaltung in Form einer Durcharbeitung planen.

Die Erfahrung zeigt, dass ein Gleis im Netz der DB im Mittel alle vier bis fünf Jahre durchgearbeitet werden muss [28]. Der Erfahrungswert des Durcharbeitungszyklus mit dem Einsatz des DGS bei der ÖBB liegt im Mittel bei ca. acht Jahren.

Die Versuche mit dem DGS, oder im englisch sprachigen Raum mit DTS (Dynamic Track Stabiliser) abgekürzt, ergaben sehr unterschiedliche Ergebnisse. Im ORE-Bericht (Forschungs- und Versuchsamt des Internationalen Eisenbahnverbandes) wurde als Fazit festgehalten: „Im Durchschnitt aller Versuche konnte bei einer Anwendung des DTS kein Vorteil hinsichtlich einer langsamer eintretenden Verschlechterung der Geometrie gesehen werden“ [21]. Im Gegensatz dazu spricht die Firma Plasser & Theurer von einer Verlängerung des Instandhaltungsintervalls um 20 % – 30 % [29]. Eine Umfrage der DB Netz AG ergab eine Verlängerung der Durcharbeitungsintervalle von 20 % – 50 % in Südafrika [3]. Es gibt jedoch andere Untersuchungen, die sehr unterschiedliche Ergebnisse aufweisen. Abschließend wird in dem Forschungsbericht der DB festgehalten, dass eine Verlangsamung der Verschlechterungsrate durch den DGS festgestellt werden kann, diese jedoch durch eine schlechtere Anfangsqualität der Gleislage, keinen Vorteil im Hinblick auf den Durcharbeitungszyklus bringt [3].

Die gesamthafte Auswertung der Quellen lässt den Schluss zu, dass die Tendenz positiv für eine Verlängerung der Durcharbeitungsintervalle ist. Auffällig ist, dass die negative Aussage [21] bezüglich des Durcharbeitungszyklus eine der ältesten Quellen ist. Die aufgeführte schlechtere Anfangsqualität bzw. Gleislagequalität nach der Durcharbeitung mit DGS sowie die zunehmende Verschlechterung der Gleislage durch die Belastung wird anhand der Feldversuche und der Laborversuche in Kapitel 4 und 5 neu bewertet.

Beschleunigter Verschleiß des Schotterbettes

Die gezielte räumliche Verdichtung mittels DGS erfolgt innerhalb von wenigen Sekunden. Im Vergleich dazu dauert, abhängig von der Streckenbelastung, eine äquivalente Verdichtung durch Betriebsbelastung mehrere Tage. Der Einsatz des DGS erfolgt direkt nach jedem Stopfvorgang. Dies führt gegebenenfalls zu einem höheren Kraftaufwand beim Eintauchen der Stopfpickel in die dann besser verdichtete Schotterschicht [3]. Dieses Schotterbett weist durch den höheren Konsolidierungsgrad eine geringere Elastizität auf, was zu einer höheren Beanspruchung des Schotters durch Betriebsbelastung führen könnte [3]. Diese Umstände werfen die Frage auf, ob durch den DGS ein erhöhter Schotterverschleiß entsteht.

Im Rahmen eines Versuches der DB auf einer Strecke mit B70 Schwellen wurden nach einer Durcharbeitung mit und ohne nachfolgenden Einsatz des DGS Schotteranalysen durchgeführt. Dabei konnte festgehalten werden, dass die Schotterkörner sowohl von der Kornform als auch von dem Feinkornanteil beim Stopfen mit dem DGS keinen signifikanten Unterschied im Vergleich zum Stopfen ohne zusätzlichen Einsatz des DGS aufweisen [3].

Es kann durch die Literaturstudie festgehalten werden, dass kein erhöhter Schotterverschleiß durch den Einsatz des DGS mit regulären Maschinenparameter bei der B70 Schwelle entsteht. Im Zuge dieses Forschungsprojektes wird im Labor (siehe Kapitel 5) bei unterschiedlichen Oberbauformen das gesamte Spektrum an möglichen Maschinenparametern (Auflast und Frequenz) des DGS untersucht. Daher werden zusätzlich zu den hier vorliegenden positiven Ergebnissen der Schotteranalyse weitere Untersuchungen diesbezüglich stattfinden. Zum einen wird der Einfluss von weiteren Oberbauformen und zum anderen der Einfluss der Maschinenparameter, die von den Standardeinstellungen abweichen, auf den Schotterverschleiß untersucht.

Schwellenbiegung

Die Thematik der Auflagerung der Schwelle wurde im Untersuchungsbericht zur technischen und wirtschaftlichen Bewertung des Verfahrens zur dynamischen Gleisstabilisierung (DGS) aufgegriffen [3]. Es zeigte sich die Tendenz, dass in den Abschnitten, die mit dem DGS stabilisiert wurden, durch anschließende Zugüberfahrten eine höhere Schwellendehnung registriert wird als in den Abschnitten, die nicht mit dem DGS bearbeitet wurden. Dieses Phänomen kann durch eine Auflagerung der Schwelle in der Schwellenmitte, dem sogenannten „Reiten“, entstehen [3].

Inwieweit die Schwelle direkt bei dem Stabilisierungsprozess mit dem DGS auf Biegung beansprucht wird, wurde bislang nicht untersucht. Der Aspekt der Schwellenbiegung wird in Kapitel 5 bei den Laborversuchen unter zu Hilfenahme von Dehnmessstreifen betrachtet.

Befestigungskomponenten

Der Dynamische Gleisstabilisator verspannt sich kraftschlüssig mit dem Gleis, um die gerichteten horizontalen Schwingungen ins Gleis zu übertragen. Auf Grund dieser zusätzlichen Beanspruchung der Schienenbefestigung wurden 1976 Versuche zu den Schwellenschraubenauszugskräften durchgeführt. In dem Versuch wurde festgestellt, dass die zusätzliche Belastung unter dem DGS 2 % der Gebrauchslast ausmacht und daher zu vernachlässigen ist [25]. Neben den damals relativ steifen Zwischenlagen (Zw 687a) gehören mittlerweile elastische Zwischenlagen (Zw 900 oder Zw 1000) zum Standard. Durch die kraftschlüssige Verspannung und die horizontale Schlagkraft wird die elastische Zwischenlage gequetscht und auf Scherung sowie Druck beansprucht. Welchen Einfluss der DGS auf die elastischen Zwischenlage hat, soll bei Untersuchungen des Prüfamtes für Verkehrswegebau in dieser Forschungsarbeit aufgegriffen werden (siehe Kapitel 5).

Abschließend zeigt die Literaturrecherche neben einer kontroversen Diskussion Potential für die Anwendung des DGS. Durch umfangreiche Messungen im Betriebsgleis und Labor, die in Kapitel 4 und 5 vorgestellt sowie ausgewertet werden, wird die Qualität der Wirksamkeit des DGS und die Auswirkungen auf Gleiskomponenten bewertet.

3 Qualitative Messgrößen zur Bewertung des DGS

Zur Bewertung der Qualität des Dynamischen Gleisstabilisators wurden folgende Parameter betrachtet:

- Querverschiebewiderstand
- Beschleunigung der Schwelle und des Schotters
- Schwellenbiegung (Labor)
- Gleislage
- Schotter → Korngrößenverteilung, Feinkorn, Feinstkorn, Kornform
- Steifigkeit der Zwischenlagen (Labor)

Im Folgenden werden die einzelnen Versuchsdurchführungen zur Bewertung der genannten Parameter vorgestellt, die bei den Feldmessungen sowie Laborversuchen Anwendung fanden.

3.1 Querverschiebewiderstand

Bei den Feldmessungen und Laborversuchen wurde der statische Querverschiebewiderstand (QVW) gemessen. Bei Durchführung durch das Prüfamts für Verkehrswegebau wurde die gleiche Vorgehensweise im Feld sowie im Labor angewandt. Die Feldmessung in Wiesloch wurde durch die DB Netz AG mit einem Messverfahren in leicht abgewandelter Form durchgeführt. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse durch die beiden Messverfahren werden im Merkblatt „Lateral Track Resistance (LTR)“ der International Union of Railways (UIC) bestätigt [30].

Neben dem statischen QVW wurde bei der Feldmessung in Hildesheim ebenfalls der sogenannte dynamische QVW gemessen. Dabei wird an die bestehende Versuchseinheit ein Unwuchtschwinger adaptiert, wodurch die dynamischen Anregungen durch den Verkehr simuliert werden sollen.

Bei dem seit Jahrzehnten eingeführten Verfahren des Prüfamtes für Verkehrswegebau der Technischen Universität München zur Bestimmung des QVW an unbelasteten Einzelschwellen im Betriebsgleis wird wie nachfolgend beschrieben vorgegangen. Angemerkt sei, dass dieses Verfahren auch Eingang in das Merkblatt der UIC gefunden hat:

Vor der Messung des QVW werden die Schienenbefestigungen im jeweiligen Versuchsabschnitt gelöst und beide Schienen angehoben, bis beide Zwischenlagen der zu untersuchenden Schwellen entfernt werden können. Anschließend werden die Schienen wieder abgesetzt und an den übrigen Schwellen befestigt. Durch das Entfernen der Zwischenlage wird sichergestellt, dass während des horizontalen

Verschiebevorganges kein Kontakt zwischen Schwelle und Schienenfußunterseite besteht.

Anschließend wird der QVW durch Verschieben von einzelnen, unbelasteten Schwellen ermittelt. Das Widerlager für den Verschiebevorgang bildet die mit den übrigen Schwellen verspannte Schiene. Die Belastungseinheit wird mit einer Schraube im innen liegenden Dübel zur Schwelle befestigt und die horizontale Kraft greift etwa auf Höhe des Schienenschwerpunktes an.



Abbildung 8: QVW-Messung im Feld



Abbildung 9: QVW-Messung im Labor

Der Weg der Querverschiebung wird in Abhängigkeit der aufgebracht Kraft und das Maß der Schwellenanhebung in Abhängigkeit der Verschiebung kontinuierlich durch Induktivwegaufnehmer aufgezeichnet. In Abbildung 8 ist der Versuchsaufbau im Feld und in Abbildung 9 im Labor dargestellt. Im Feldversuch wurde eine bewegliche Messbasis benutzt, die mit Hilfe eines Schienenstücks beschwert wurde. Im Labor konnte die vom Versuchsaufbau entkoppelte Messbasis genutzt werden. Nach der Messung wird die untersuchte Schwelle in ihre ursprüngliche Position im Gleis zurückverschoben.



Abbildung 10: Dynamische QVW-Messung

Für die dynamischen Querverschiebewiderstandsmessungen wurde die Belastungseinheit um eine Stahlplatte erweitert, die durch eine zweite Schwellenschraube kraftschlüssig mit der Schwelle verbunden war und dabei den Verschiebevorgang nicht

behindert. Auf dieser Platte wurde ein Unwuchterreger befestigt, wobei die Rotationsachse des Schwingers in Gleislängsrichtung (d.h. senkrecht zur Schwellenlängsachse) angeordnet wurde.

Durch die radial wirkende und nicht gerichtete Schwingungsabgabe mit einer Frequenz von 50 Hz wurden während des Verschiebevorganges, in Schwellenlängsrichtung wirksame Schwingungen in die Schwelle eingeleitet. Die Kraftamplitude wurde auf +/- 2,2 kN eingestellt. Angemerkt sei hierbei, dass die Eigengewichtskraft einer B70 Schwelle bei ca. 3 kN und bei einer Schwelle B07 So bei ca. 3,6 kN liegt und die aus der Biegelinie der Schiene aktivierten statischen Abhebekräfte aus Vertikallast i.d.R. diese Größenordnung nicht übersteigt [31].

Im Nachfolgenden sind die einzelnen Versuchsparameter zur Bestimmung des QVW von unbelasteten Einzelschwellen zusammengefasst:

- Kein Kontakt zwischen Prüfschwelle und Schienenfußunterseite während der Messung (Aufsteigen möglich)
- Widerlager der lateralen Kraft: Schiene, die mit den benachbarten Schwellen fest verspannt ist
- Abstand zwischen den Prüfschwellen in Gleislängsrichtung: mindestens zwei Schwellen
- Gewicht der statischen Belastungseinheit: ca. 50 kg
- Zusatzgewicht der dynamischen Belastungseinheit: ca. 20 kg
- Position der Belastungseinheit: auf der Schwelle, im Bereich zwischen den Schienen (Schwellenmitte)
- Kraftübertragung Belastungseinheit - Schwelle: mittels Formschluss über ein Passstück (entsprechend Wfp-Kontur) im innen liegenden Schwellenhöcker sowie über die eingedrehte Schraube im innen liegenden Schwellendübel
- Kraftübertragung Belastungseinheit - Schiene: über ein Passstück im Schienensteg etwa im Schienenschwerpunkt, parallel zur Schwellenunterseite
- Kraftübertragung Unwuchterreger - Schwelle: erfolgt mittels einer Platte auf der der Unwuchterreger montiert ist, die auf der einen Seite kraftschlüssig an die Belastungseinheit angeschlossen und auf der anderen Seite mittels eingedrehter Schraube im innenliegenden Dübel (feldseitig) befestigt wird
- Laterale Schwellenverschiebung: bis ca. 10 mm
- Art der Lasteinleitung: kontinuierliche Laststeigerung mit elektrischer Pumpe und hydraulischem Zylinder
- Aufzeichnung von Querverschiebung (lateral) und Schwellenanhebung (vertikal) in Abhängigkeit der aufgebrachten lateralen Kraft bzw. Verschiebeweg mit Induktivwegaufnehmern
- Aufzeichnung der lateralen Kraft mit einer Kraftmessdose.

Zur Darstellung der Entwicklung des QVW über einen größeren Bereich wurden Verschiebewege bis zu ca. 10 mm angestrebt. Abbildung 11 zeigt den typischen Verlauf einer QVW-Messung.

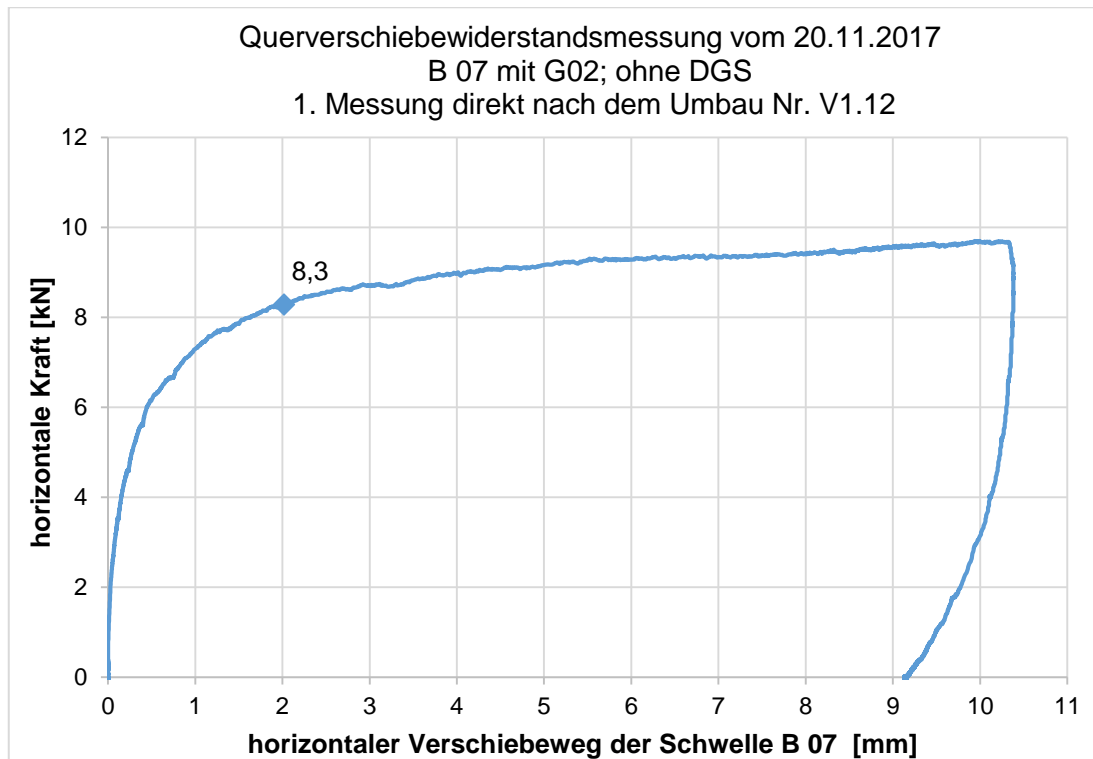


Abbildung 11: Exemplarische Kraft-Verformungslinie einer QVW-Messung

Bedingt durch eine i.d.R. zu beobachtende, aufsteigende Bewegung der Schwellen während der Verschiebung ist jedoch bei großen Verschiebewegen ein evtl. eintretender Kontakt zur Schiene zu beachten. Die Schwelle kann um die Höhe der zuvor ausgebauten Zw (6 – 10 mm) aufsteigen bevor dieser Kontakt entstehen kann. Durch die dadurch aktivierte Niederhaltung der Schwelle und damit Verzahnung mit dem Schotter, kann ein deutlicher Anstieg der gemessenen Widerstandskraft festgestellt werden. In diesem Fall wäre das Messergebnis unbrauchbar. Maßgebend für die Untersuchung des Gesamt-QVW im Hinblick auf die Gleislagestabilität des Gleisrostes im Schotterbett ist der aktivierte Widerstand bei einem Verschiebeweg von 2 mm ohne zusätzliche Niederhaltung. Dieser Wert wird nachfolgend bezogen auf die Einzelschwelle als QVW (2mm) [kN] bzw. bezogen auf die Gleislänge als $w(2\text{mm})$ [N/mm] angegeben, wobei der vorhandene Schwellenabstand zu Grunde gelegt werden kann.

3.2 Beschleunigungsmessung

Für die Feld- und Laborversuche wurden unterschiedliche Beschleunigungssensoren verwendet. Die Auswahl der Sensoren erfolgte nach den vorher abgeschätzten

Randbedingungen und Erfahrungswerten. Zu den Randbedingungen gehörten neben der Schwelle oder dem Schotter auch welche Beschleunigungsrichtungen aufgenommen werden sollen und die zu erwartenden Beschleunigungen, die aus früheren Versuchen des Prüfamtes für Verkehrswegebau abgeschätzt werden können. Weiterhin wurden in situ robustere Sensoren verwendet. Es wurden mit den Beschleunigungssensoren die vertikale (z) und laterale (y) Beschleunigung der Schwelle durch den DGS im Feld und Labor gemessen. Zusätzlich wurde im Labor mit Hilfe von sogenannten Schottermesssteinen, bei denen Beschleunigungssensoren eingebaut sind, die Beschleunigung im Schotter in alle drei Raumrichtungen (x, y, z) aufgezeichnet. Abbildung 12 zeigt die Definition der Messrichtungen.

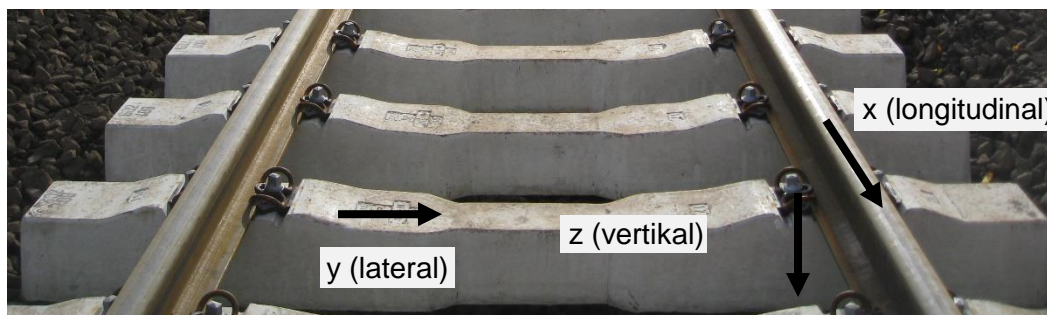


Abbildung 12: Bezeichnung der Messrichtung

In Tabelle 6 sind die Sensortypen mit dem jeweiligen Einsatzgebiet (Feldmessung oder Laborversuch) sowie die Messmöglichkeit (uniaxial oder triaxial) und welches Medium gemessen wurde (Schwelle oder Schotter) aufgelistet. Die Beschleunigungssensoren Nummer eins bis vier basieren auf dem piezoelektrischen Effekt, wobei der Potentialunterschied gemessen wird. Der Axivity AX3 (Nr. 5) beruht auf einem kapazitiven Messprinzip.

Tabelle 6: Beschleunigungssensoren mit Einsatzgebiet

Nr.	Beschleunigungssensor	Einsatzgebiet, Richtung, Medium	Frequenzbereich [Hz]	Messbereich [m/s ²]
1	Bruel&Kjaer 4370 mit Ladungswandler 2646	Feldmessung, uniaxial, Schwelle	0,1 - 4.800	19.620
2	Bruel&Kjaer 4397A	Laborversuch, uniaxial, Schwelle	1 - 25.000	7.500
3	Synotech PCB-352C41	Laborversuch, uniaxial, Schotter	0,5 - 10.000	4.905
4	Bruel&Kjaer 4321	Laborversuch, triaxial, Schotter	0,1 - 10.000	4.905
5	Axivity AX3	Laborversuch, triaxial, Schotter	12,5 - 3.200	157

Abbildung 13 zeigt die Beschleunigungssensoren an der Schwelle des Typs Bruel&Kjaer 4370, die bei den Feldversuchen eingesetzt wurden und Abbildung 14 zeigt die Beschleunigungssensoren an der Schwelle des Typs Bruel&Kjaer 4397A, die im Labor verwendet wurden. Zur vertikalen und lateralen Messung der Beschleunigung, unabhängig ob die Messung im Labor oder im Feld stattfand, wurde ein Stahlwinkel an das Schwellenende mittels speziellen Klebers appliziert. Die Beschleunigungssensoren wurden dann an die Winkel geklebt.



Abbildung 13: Sensor Bruel&Kjaer 4397A (Feld)



Abbildung 14: Sensor Bruel&Kjaer 4370 (Labor)

Die Abbildung 15 zeigt die drei verwendeten Typen von Schottermesssteinen (Nr. 3, 4 und 5 entsprechend Tabelle 6), die am Lehrstuhl und Prüfamt für Verkehrswegebau entwickelt und gebaut wurden. Der Schottermessstein auf der linken Seite in der Abbildung 15 zeigt den triaxialen Schottermessstein mit dem innenliegenden Beschleunigungssensor Bruel&Kjaer 4321. In der Mitte ist der uniaxiale Schottermessstein mit dem Beschleunigungssensor Synotech PCB-352C41 und rechts der kabellose triaxiale Schottermessstein mit dem Beschleunigungssensor Axivity AX3 abgebildet.



Abbildung 15: verschiedene Typen von Schottermessstein

Die Beschleunigungssignale wurden mittels der Software MEDA (Version 2019-1) der Firma Wölfel Engineering GmbH + Co. KG registriert und ausgewertet. Bei allen Beschleunigungsmessungen wurden die Signale der Beschleunigungsaufnehmer mit einer Abtastrate von mindestens 10 kHz für 60 s aufgezeichnet. Die Datenauswertung wurde ausschließlich auf den Bereich, indem der DGS Einwirkung auf die Schwellenbeschleunigung bzw. Schotterbeschleunigung zeigte, begrenzt.

Die aufgezeichneten Beschleunigungssignale in [m/s²] wurden durch eine einfache Integration in die Schwinggeschwindigkeit [mm/s] und durch eine weitere Integration in die Amplitude [mm] umgerechnet. Außerdem wurde mit Hilfe des Programms Frequenzspektren [Hz] über eine Fast Fourier Transformation (FFT) berechnet. Der gleitende Effektivwert spiegelt den zeitlichen Verlauf des quadratischen Mittelwertes wider. Dieser wurde für die Auswertung der Beschleunigung, Schwinggeschwindigkeit und Amplitude herangezogen und berechnet sich zu:

$$X_{glEff}(t_k) = \sqrt{\left\{ \frac{1}{\tau} \int_{\xi=0}^{t_k} e^{-\frac{\xi}{\tau}} [X(t_k - \xi)]^2 d\xi \right\}} \quad 3.1$$

Durch die Quadrierung des Schwingungssignals ($X(t_k - \xi)$) und die anschließende Integration über ein gleitendes Zeitintervall ($\xi = 0 \rightarrow t_k$), werden die positiven, sowie negativen Schwingungsamplituden berücksichtigt und die Daten geglättet. Hierbei ist „Tau“ (τ) die Integrationskonstante. Das Zeitintervall wurde bei allen Auswertungen zu 0,5 Sekunden gewählt. Dadurch konnte eine Glättung erzielt werden und gleichzeitig ist das Zeitintervall so kurz, dass sich Maxima eindeutig abbilden lassen. Somit können die Beschleunigungssignale eindeutig ausgewertet werden und Interferenzen oder Fehlsignale sofort lokalisiert und von der Auswertung ausgeschlossen werden. Bei der kleinsten gemessenen Frequenz von 27 Hz werden jeweils 13 Amplituden und bei der größten gemessenen Frequenz von 34 Hz werden jeweils 17 Schwingungsamplituden bei der Bildung des gleitenden Effektivwertes berücksichtigt. Die folgende Abbildung zeigt die Transformation eines ursprünglichen Beschleunigungssignals (Abbildung 16) in die Kurve des gleitenden Effektivwertes (Abbildung 17).

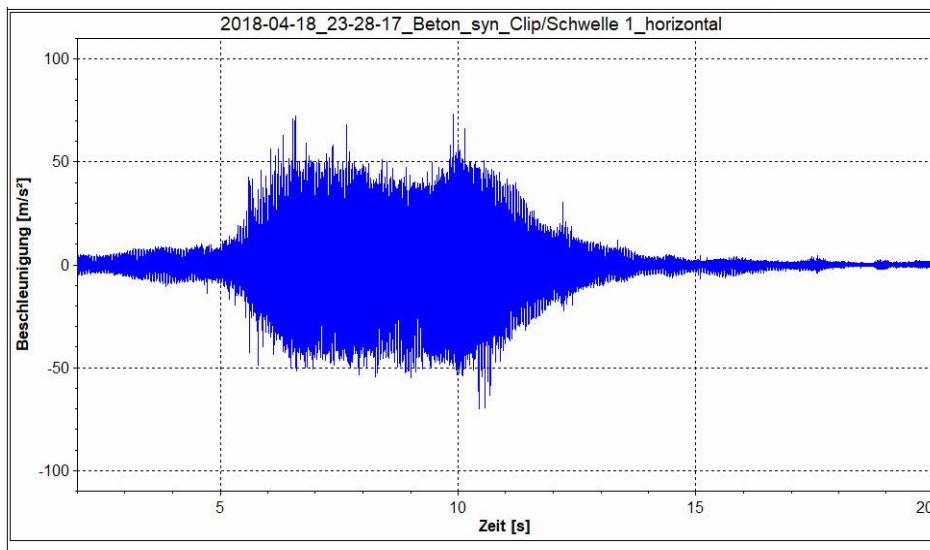


Abbildung 16: gemessenes laterales Beschleunigungssignal im Zeitbereich der Betonschwelle 1 bei Neusiedl

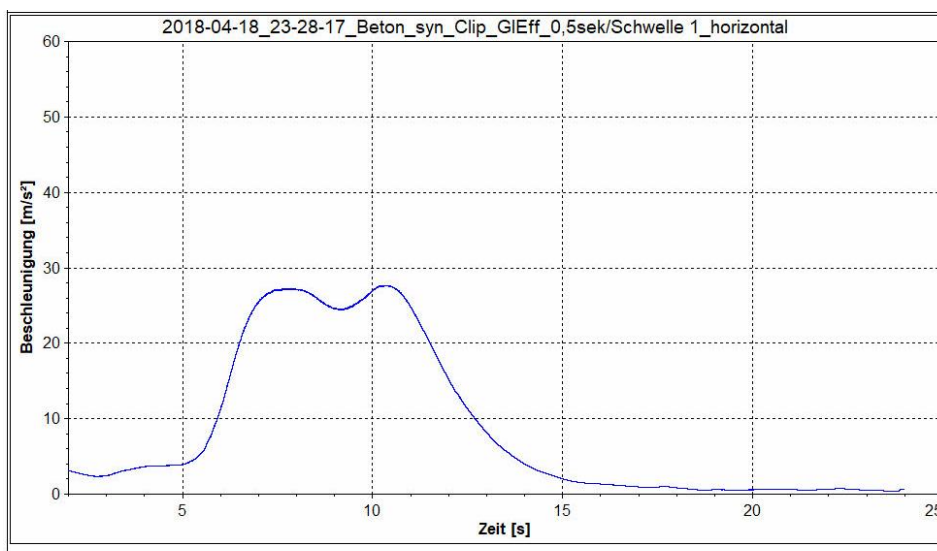


Abbildung 17: Gleitender Effektivwert des gemessenen lateralen Beschleunigungssignals im Zeitbereich der Betonschwelle 1 bei Neusiedl

3.3 Gleislage

Zur Evaluierung der Gleislage wurden verschiedene Messverfahren angewendet. Bei den Feldmessungen in Wiesloch und Hildesheim wurde die Gleislage mit dem GEDO CE, einem Laserlangsehnenverfahren, aufgenommen. Teilweise liegen die Messschriebe der Stopfmaschine von einem analogen Mehrkanalschreiber (MKS) vor. Im Labor wurde die Gleislage mit Induktivwegaufnehmern, die vertikal und lateral am Schwellenende angebracht wurden, gemessen. Im Folgenden werden die

verschiedenen Messverfahren vorgestellt und auf die Besonderheiten bei der Auswertung eingegangen.

Das GEDO CE ist ein Handmesswagen, mit dem die absolute unbelastete Gleislage aufgenommen werden kann. Eine Messgenauigkeit wird vom Hersteller „Trimble“ mit $\pm 0,5$ mm angegeben [32]. Die Mastbolzen dienen als Fixpunkte zum Einmessen für die absolute Gleislage. Nach Aussage der Baufirma hat das GEDO CE in der Praxis jedoch nur eine Messgenauigkeit von 2 – 3 mm. Weiterhin kann durch Refraktion, Parallaxenfehler und in Abhängigkeit der Entfernung der Mastbolzen (Fixpunkte) im ungünstigsten Fall eine Abweichung von 10 mm der absoluten Gleislage im Raum entstehen [33]. Bei den ersten Messungen (in Wiesloch) wurde nur auf jeden zweiten Mast aufgrund des kritischen Zeitfaktors referenziert. Diese Erkenntnisse der Messgenauigkeit ergaben sich im Verlauf der Auswertung der ersten Datensätze, da auffiel, dass sich das gestopfte Gleis nach 100.000 Lasttonnen laut den Messwerten in der absoluten Höhenlage angehoben hat, was aufgrund der Setzungsvorgänge im Schotter unrealistisch ist.

In allen in Kapitel 4 beschriebenen Feldmessungen, die in Deutschland durchgeführt wurden, kam jeweils eine Stopfmaschine von Plasser & Theurer des Typs 09-3X Dynamic zum Einsatz, jedoch unterschiedliche Maschinen. Die Maschinen sind mit einem analogen Mehrkanalschreiber (MKS) ausgerüstet. Bei der Feldmessung in Hildesheim ergab sich eine Problematik bezüglich der Zuordnung der jeweiligen Messabschnitte im Messschrieb. Erschwerend hinzu kommt, dass ausschließlich die analogen Messschriebe aus den Stopfvorgängen mit/ ohne DGS vorliegen und keine digitalen Messschriebe aus Messfahrten. Daher ist die Auswertung der Gleislage in Hildesheim nur auf Grundlage der GEDO CE Messung möglich.

Bei den Laborversuchen musste zur Auswertung der Gleislageveränderung nicht auf Maschinendaten zurückgegriffen werden, sondern es konnten Induktivwegaufnehmer eingesetzt werden. Die verwendeten Induktivwegaufnehmer messen die sich verändernde Induktivität einer Spule durch die Bewegung des Tauchankers innerhalb des Sensors. Hierbei ist besonders darauf zu achten, dass der kalibrierte Messbereich des Tauchankers von beispielsweise 20 mm eingehalten wird und dass eine widerstandsfreie Beweglichkeit des Tauchankers möglich ist. Die Schwierigkeit bei den Laborversuchen eine exakte und reproduzierbare Wegmessung durchzuführen, lag in der Vibration des gesamten Versuchsaufbaus durch den DGS. Daher wurden die Induktivwegaufnehmer an einer Messbasis, die entkoppelt vom Versuchsaufbau freistand, befestigt. Außerdem wurde auf Grund der dynamischen Beanspruchung als Widerlager bzw. als Messpunkt ein Magnet verwendet damit der Kontakt zum Messpunkt nicht verloren geht.

Nichts desto trotz trat bei einer dauerhaften Beanspruchung, die bei den Vorversuchen nötig war, das Problem auf, dass die Setzungen zu groß für den Messbereich der

Induktivwegaufnehmer waren. Für die Simulierung einer Überfahrt durch den DGS stellte dies kein Problem dar, da sich die Setzungen innerhalb des Messbereichs befanden. Bei den Vorversuchen konnte die Gleislage dadurch nicht gemessen werden, was jedoch auch nicht erforderlich war.

3.4 Schotterbeprobung

Durch Entnahme von Schotterproben und deren Untersuchung zu unterschiedlichen Zeitpunkten kann detektiert werden, welchen Verschleiß der Schotter durch den Einsatz des DGS erfährt. Zur Beurteilung von Schotterproben werden nach der DIN EN und nach dem DB Standard folgende Parameter herangezogen [34, 35]:

- Korngrößenverteilung
- Feinkorn
- Feinstkorn
- Kornform mittels Plattigkeitskennzahl, Kornformkennzahl und Kornlänge

Abgesehen von der Kornlänge wurden die genannten Parameter zur Beurteilung der Schotterproben herangezogen. Zur Bestimmung der Korngrößenverteilung wird die Sieblinie bestimmt. Entsprechend der DIN EN wird der Durchgang der Schotterprobe mittels Quadratlochsieben nach festgelegten Bereichen von Sieböffnungsweiten gemessen. Der Feinkorngehalt wird mit einer Sieböffnungsweite von 0,5 mm und das Feinstkorn mit einer Sieböffnungsweite von 0,063 mm bestimmt [34]. Abhängig vom prozentualen Siebdurchgang als Massenanteil können die Ergebnisse Kategorien zugeordnet und so die Tauglichkeit als Gleisschotter festgestellt werden. Bei der Korngrößenverteilung wird nach der DIN EN 13450 in die Kategorien „A“ bis „F“ unterschieden. Die nationale Richtlinie der DB (DBS 918 061) fordert für die Korngrößenverteilung die Kategorie D. Hierbei werden aufgrund technischer und wirtschaftlicher Erfahrungen eine Abweichung bei der Sieböffnung 63 mm von 97 % bis 100 % und bei der Sieböffnung 50 mm von 65 % bis 100 % erlaubt [35]. Die ÖBB hingegen fordert die Kategorie B [2]. Tabelle 7 zeigt die Anforderungen der Korngrößenverteilung der Kategorien „B“ und „D“ sowie die Abweichung, die durch die DB erlaubt ist.

Tabelle 7: Anforderung der Korngrößenverteilung

Sieböffnungsweite [mm]	Gleisschotter der Korngröße 31,5mm bis 50mm	Gleisschotter der Korngrößen 31,5mm bis 63mm	
	Siebdurchgang als Massenanteil in %		
	Kategorie der Korngrößenverteilung		
	B	D	D mit Abweichung
80	100	100	100
63	97 – 100	95 – 99	97 – 100
50	70 – 99	65 – 99	65 – 100
40	30 – 70	30 – 65	30 – 65
31,5	1 – 25	1 – 25	1 – 25
22,4	0 – 3	0 – 3	0 – 3
31,5 bis 50	≥ 50	-	-
31,5 bis 63	-	≥ 50	≥ 50

Nach allgemeinen Anforderungen muss Gleisschotter „aus gebrochenen, unregelmäßig geformten, scharfkantigen Körnern bestehen“ [35]. Die Anforderungen sind im deutschen Regelwerk DBS 918 061 festgehalten und gelten analog für andere Bahnen. Diese Eigenschaften werden mittels Plattigkeitskennzahl, Kornformkennzahl sowie Kornlänge bewertet. Die Plattigkeitskennzahl wird mit Hilfe von Stabsieben der Schlitzweiten von 20 mm sowie 25 mm bestimmt. Hierbei müssen nur die Kornklassen 31,5 mm bis 40 mm und 40 mm bis 50 mm geprüft werden. Die Kornformkennzahl beschreibt das Länge-zu-Dicken-Verhältnis. Dabei wird die prozentuale Masse festgehalten, die größer als 3 zu 1 (Länge zu Dicke) misst. Dieser Wert soll laut DBS zwischen 5,0 M.-% und 30 M.-% liegen. Zur Bestimmung der Kornlänge wird die prozentuale Masse an Schotter bestimmt, bei denen die Kornlänge größer 100 mm ist. Maximal dürfen von diesen Körnern 6,0 M.-% in der Schotterprobe vorhanden sein [35].

3.5 Schwellenbiegung

Durch Dehnmessstreifen (DMS) soll über die Verformung bzw. Dehnung an der Oberseite der Schwelle die Schwellenbiegung unter der Belastung des DGS festgehalten werden. Dehnmessstreifen können anhand von Widerstandsänderungen der eingebauten metallischen Leiter die Längenänderung messen [36]. In den Laborversuchen wird der Dehnmessstreifen auf der Oberseite der Schwelle mit einem speziellen Kleber aus Methylmetacrylat fixiert, um die Beanspruchung der Schwellen durch den DGS beurteilen zu können. Erfährt nun die Schwelle durch eine Belastung auf der Oberseite

eine Zugbeanspruchung, dehnt sich der DMS mit. Die Länge des DMS nimmt zu und gleichzeitig nimmt die Querschnittfläche der Leiter im DMS ab. Dadurch ergibt sich eine Erhöhung des Widerstandes, welche eine positive relative Widerstandsänderung zur Folge hat und mit einer positiven Dehnung verbunden ist. Analog funktioniert der DMS unter Druckbeanspruchung.

Bei der Messung mit Dehnmessstreifen werden drei Arten von Messabweichungen nach [37] unterschieden:

- Grobe Fehler
- Zufallsstreuung
- Systematische Abweichungen

Unter „grobe Fehler“ fallen unter anderen die falsche Anwendung von Messwertaufnehmern, Irrtümer beim Ablesen des Messwertes oder Fehler in der Schaltung. Für diese Messabweichungen gibt es keine Korrekturmöglichkeit. Das heißt die Messung muss korrekt und sorgfältig durchgeführt werden.

Die „Zufallsstreuung“ berücksichtigt Messabweichungen, die beispielsweise durch den Messgegenstand (Alterung), durch Umwelteinflüsse wie Temperatur, Feuchtigkeit und elektrische sowie magnetische Felder entstehen. Die entstehenden Abweichungen können nicht einem Einfluss zugeordnet werden und folgen auch keiner Gesetzmäßigkeit. Diese Abweichungen können durch wiederholende Messungen eliminiert werden.

„Systematische Abweichungen“ entstehen durch die Unvollkommenheit des Messverfahrens, der Messgeräte oder des Messgegenstandes. Anhand von Vergleichsmessungen kann diese Abweichung quantifiziert werden und von allen Werten abgezogen bzw. beaufschlagt werden.

Auf Grundlage der Fehleranfälligkeit der DMS besonders hinsichtlich der Temperaturanfälligkeit und des Zeitmangels bei den Feldversuchen und damit einhergehend die mögliche Sorgfältigkeit bei der Messung wurde entschieden die DMS ausschließlich im Labor einzusetzen. Im Labor kann eine korrekte und saubere Umsetzung des Messverfahrens gewährleistet werden. Somit bleibt maßgeblich der Einfluss der „Zufallsstreuungen“ ein wichtiger Aspekt, der bei der Auswertung berücksichtigt werden muss. Einige wenige Ergebnisse wurden als Fehlmessungen deklariert mit der Begründung, dass durch die dynamische Beanspruchung auch „grobe Fehler“ in Form von Fehlschaltungen auftreten können.

3.6 Steifigkeit der Zwischenlagen

Um mechanische Überbeanspruchungen der Zwischenlagen durch den DGS auszuschließen, wurden die Zwischenlagen vor und nach den Versuchen untersucht.

Hier wurde eine mögliche Veränderung der Steifigkeit durch die statischen und niederfrequenten Federziffern ausgedrückt. Die Versuchsdurchführung ist in der DIN EN 13146-9 geregelt, die Prüflasten sowie die Anforderungen sind in der DIN EN 13481-2. [38, 39] festgelegt. Abbildung 18 zeigt den dazu erforderlichen Versuchsaufbau.

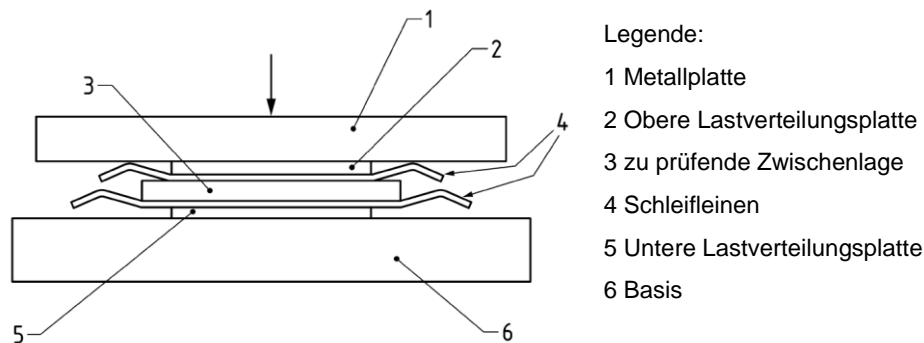


Abbildung 18: Prüfanordnung für Zwischenlagen [38]

Die zu prüfende Zwischenlage wird zwischen Schleifleinen und Lastverteilungsplatten gelegt und mit einer statischen oder pulsierenden Kraft beaufschlagt. Die dabei entstehende Einsenkung wird mittels Induktivwegaufnehmer gemessen. Aus diesen beiden Größen wird die Steifigkeit der Zwischenlage berechnet. Der Pfeil symbolisiert die statische Krafteinleitung bzw. die zyklische Kraft bei der dynamischen Prüfung. Zur Festlegung der Prüfkräfte wurde die Kategorie C für Befestigungssysteme aus der DIN EN 13481-1 gewählt. Zu dieser Kategorie gehören Vollbahnen mit einer maximalen Achslast von 22,5 Tonnen [40]. Die Oberlast liegt bei 85 kN und die Unterlast bei 18 kN. Die statische Steifigkeit wird anhand der Verformung bei 18 kN und 68 kN bestimmt. Für die Prüfung im niederfrequenten Bereich wird die Prüfkraft (Oberlast = 68 kN, Unterlast = 18 kN) dynamisch, harmonisch bei 5 Hz, 10 Hz und 20 Hz aufgebracht [38].

4 Feldmessungen

Die Durchführung von Feldmessungen soll den aktuellen Stand der Technik und die Wirksamkeit des Dynamischen Gleisstabilisators mit den bisher in der Praxis verwendeten Regelungsparametern zeigen.

Insgesamt wurden bei fünf verschiedenen Umbaumaßnahmen bzw. Durcharbeitungen in Deutschland und Österreich Messungen durchgeführt:

- Wiesloch (März 2017)
- Nörten-Hardenberg (August 2017)
- Hildesheim (November 2017)
- Neusiedl am See (April 2018)
- Langenschwarz (Juni 2018)

Diese Messungen haben sich den jeweiligen Baumaßnahmen untergeordnet. Aus diesem Grund musste an manchen Stellen Kompromisse eingegangen werden, auf die im weiteren Verlauf hingewiesen wird.

Nach Möglichkeit wurde der Einsatz des DGS schwingungsmesstechnisch begleitet. Hierzu wurden wie in Kapitel 3.2 beschrieben, die Beschleunigungssensoren Bruel&Kjaer 4370 mit Ladungswandler 2646 auf Stahlwinkeln vertikal und lateral an der Schwelle mittels Kleber befestigt.

Im Anschluss an die Stopfvorgänge wurden die Querverschiebewiderstände der Schwellen gemessen. Nach dieser sogenannten Nullmessung wurde die Strecke für den Verkehr freigegeben. Nach einer Betriebsbelastung von ca. 100.000 Lt und von 1,5 Mio. Lt wurde der QVW erneut gemessen, um die fortschreitende Konsolidierung des Schotters bestimmen zu können. Die jeweiligen Messabschnitte, bei denen der DGS nicht eingesetzt wurde, dienten als Referenz.

Im Folgenden werden die einzelnen Feldmessungen chronologisch beschrieben und ausgewertet, da die Erkenntnisse aus einer beendeten Messung bei der Durchführung der folgenden Messung Berücksichtigung fanden. Tabelle 8 gibt einen Überblick der gemessenen Oberbauformen unter Angabe der Spezifikationen und bei welchen Baumaßnahmen diese eingebaut sind.

Tabelle 8: Spezifikationen der Oberbauformen

Schwelle	Gewicht [kg]	Befestigung	Wfp Winkel-führungsplatte	Zw	Schiene	Bahn	Maßnahme
B70	290	W	Kunststoff	687a	60E2	DB	Wiesloch Hildesheim
B07 So	346	W	Kunststoff	1000	60E2		Nörten, Hildesheim, Langensch.
B90	340	W	Kunststoff	900	60E2		Hildesheim
Holz	100	Pandrol	-	-	54E	ÖBB	Neusiedl
L2	290	W	Kunststoff		49E1		
19a	290	W	Stahl		S49		

4.1 Wiesloch

4.1.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Auf der zweigleisigen Strecke 4000 Wiesloch – Bruchsal, wurden im Zuge einer Umbaumaßnahme sechs Versuchsabschnitte eingerichtet. Die Strecke ist durchgehend mit dem Schwellentyp B70 und einem Schwellenabstand von 60 cm, einer Zw 900 und einer Schiene 60E2 ausgerüstet. Die Verkehrsbelastung beträgt 42.000 Lt/d bei einer örtlichen zulässigen Geschwindigkeit von 160 km/h. Die Breite des Schotters vor Kopf beträgt ca. 60 cm, dies entspricht 20 cm mehr als im Regelwerk vorgesehen [17].

Grundlage für die Einteilung der Versuchsabschnitte ist die Überprüfung der aktuell gültigen Richtlinie der DB Netz AG und der ÖBB [13, 14]. Die Parameter des DGS wurden nach Angaben des Maschinenbedieners bei allen Durchgängen auf eine Frequenz von 32 Hz und eine vertikale Auflast von 80 bar eingestellt, entsprechend der deutschen Richtlinie DS 820 03 15.

Die ersten drei Versuchsabschnitte befinden sich im Bereich Kilometer 34,3 bis 35,2 und liegen auf einer Planumsschutzschicht (PSS). Die Versuchsabschnitte V4 bis V6 liegen im Bereich Kilometer 35,3 bis 36,2 ohne PSS. Die Versuchsabschnitte V1 und V4 wurden durchgängig nach jedem der drei Stopfgänge (Hebe- und Verdichtgang, 1. Stabilisierung, 2. Stabilisierung) mit dem DGS bearbeitet, wie es nach der österreichischen Richtlinie empfohlen wird (TA-MATE 01.2014). Die Versuchsabschnitte V2 und V5 wurden nur nach der 1. Stabilisierung mit dem DGS bearbeitet, wie es in der deutschen Richtlinie beschrieben wird (DS 820 03 15). Nach dem Hebe- und Verdichtgang und der 2. Stabilisierung fand der DGS keine Anwendung. Die

Versuchsabschnitte V3 und V6 dienen als Referenzabschnitte. Hier wurde der DGS nicht eingesetzt. In Tabelle 9 ist die Aufteilung der Versuchsabschnitte V1 bis V3 mit PSS und in Tabelle 10 die Aufteilung der Versuchsabschnitte V4 bis V6 ohne PSS dargestellt.

Tabelle 9: Schematische Darstellung der Versuchsabschnitte mit PSS - Wiesloch

← Norden	mit PSS			Süden →
	V1	V2	V3	
km 34,3	km 34,6	km 34,9	km 35,2	
HuV	mit DGS	ohne DGS	ohne DGS	
1.Stabi	mit DGS	mit DGS	ohne DGS	
2.Stabi	mit DGS	ohne DGS	ohne DGS	
Wiesloch	←—————→			Bruchsal

Tabelle 10: Schematische Darstellung der Versuchsabschnitte ohne PSS - Wiesloch

← Norden	ohne PSS			Süden →
	V4	V5	V6	
km 35,3	km 35,6	km 35,9	km 36,2	
HuV	mit DGS	ohne DGS	ohne DGS	
1.Stabi	mit DGS	mit DGS	ohne DGS	
2.Stabi	mit DGS	ohne DGS	ohne DGS	
Wiesloch	←—————→			Bruchsal

In jedem Versuchsabschnitt wurde an jeweils 25 Schwellen der QVW zu drei verschiedenen Zeitpunkten gemessen, insgesamt 75 QVW pro Versuchsabschnitt. Die erste Messung fand in der Nacht vom 29.03. auf 30.03.2017 direkt im Anschluss an den Umbau statt (Nullmessung). Die zweite Messung nach einer Betriebsbelastung von 100.000 Lt fand am 10./11.04.2017 und die dritte Messung nach 1,5 Mio. Lt am 04./05.07.2017 statt. Alle drei QVW-Messungen konnten bei trockener Witterung durchgeführt werden. Die gesamte Baumaßnahme wurde durch Gleislagemessungen mit dem GEDO CE begleitet. Die Gleislage wurde in allen Versuchsabschnitten jeweils vor und nach den Stopfvorgängen gemessen und nach einer Betriebsbelastung von 100.000 Lt sowie von 1,5 Mio. Lt. Detailliert sind der Versuchsablauf und die Begebenheiten während der Durchführung in einer durch die DB Netz AG betreute Master's Thesis aufgeführt [33].

Weiterhin wurde in jedem der sechs Versuchsabschnitte jeweils eine Schotterprobe durch das Prüfinstitut und Ingenieurbüro Dr. Moll, Isernhagen, entnommen. Hierzu wurde zunächst der Schotter zwischen zwei Schwellen bis zur Unterkante der Schwellen ausgeräumt und seitlich gelagert. Die Probe wurde nun frei Hand entnommen von der Unterkante der Schwelle bis zur PSS bzw. dem Vlies. Hierbei wurde darauf geachtet, dass die Probe aus dem Schotter des Schwellenfaches und aus dem unter der Schwelle

lagernden Schotter besteht. Es ergab sich so jeweils eine Probenmenge von ca. 50 kg bis 60 kg. Es wurde die Sieblinie, die Kornform sowie die Plattigkeitskennzahl ebenfalls durch das Prüfinstitut und Ingenieurbüro Dr. Moll, Isernhagen, ausgewertet.

4.1.2 Ergebnisse und Auswertung

Zu der Feldmessung in Wiesloch liegen Ergebnisse bezüglich des QVW, der Gleislage sowie der Schotterqualität vor. Die Auswertung erfolgt separat für jeden Parameter.

4.1.2.1 Querverschiebewiderstand

Zur Bewertung des QVW wird aus den Kraftverformungsverläufen die Kraft bei einem Verschiebeweg von 2 mm abgelesen. Die Durchführung der Messung in Wiesloch erfolgte durch DB Systemtechnik. Eine tabellarische und grafische Ergebniszusammenstellung findet sich in Anlage A.2, die ausführlichen Ergebnisse sind in dem Bericht „Querverschiebewiderstandsmessung an Schwellen mit und ohne DGS Einsatz in Wiesloch-Walldorf“ zu finden [41]. Tabelle 11 zeigt die Mittelwerte der QVW in kN bei einem Verschiebeweg von 2 mm und die dazugehörige Standardabweichung (s) ebenfalls in kN von der Nullmessung, der Messung nach einer Betriebsbelastung von 100.000 Lt und der Messung nach einer Betriebsbelastung von 1,5 Mio. Lt. Tendenziell sind die QVW-Werte mit PSS um ca. 2 % bis 17 % größer als die QVW-Werte ohne PSS. Anhand der Ergebnisse zeigt sich, dass die PSS keine entscheidende Rolle für die Größe des QVW spielt. Für die weiteren Auswertungen wird daher der Mittelwert zwischen den QVW-Werten mit und ohne PSS gebildet.

Tabelle 11: Mittelwerte der statischen QVW-Messungen bei 2 mm Verschiebeweg [41]

Feldmessung Wiesloch	Nullmessung		100.000 Lt		1,5 Mio. Lt	
	QVW [kN]	s [kN]	QVW [kN]	s [kN]	QVW [kN]	s [kN]
B70 mit PSS ohne DGS	5,8	0,4	7,0	0,5	9,5	0,8
B70 o. PSS ohne DGS	5,3	0,4	6,0	0,6	8,4	0,7
B70 mit PSS mit 1 x DGS	5,4	0,4	6,7	0,5	8,6	0,6
B70 o. PSS mit 1 x DGS	5,2	0,3	6,3	0,4	8,4	0,7
B70 mit PSS mit DGS	7,4	0,6	7,9	0,6	9,0	0,5
B70 o. PSS mit DGS	7,1	0,6	8,3	0,5	10,4	0,9

Bei der Gegenüberstellung der QVW-Ergebnisse der Nullmessung ohne DGS (5,6 kN), mit DGS nur nach der 1. Stabi (5,3 kN) und mit DGS (7,3 kN) zeigt sich, dass durch den Einsatz des DGS bei allen Stopfvorgängen der QVW um ca. 30 % ansteigt. Weiterhin ist zu erkennen, dass der einmalige Einsatz des DGS nach der 1. Stabi keine positive Wirkung auf den QVW hat. In Abbildung 19 sind die Kraftverformungsverläufe der Nullmessung dargestellt, die die positive Wirkung des DGS auf den QVW verdeutlichen.

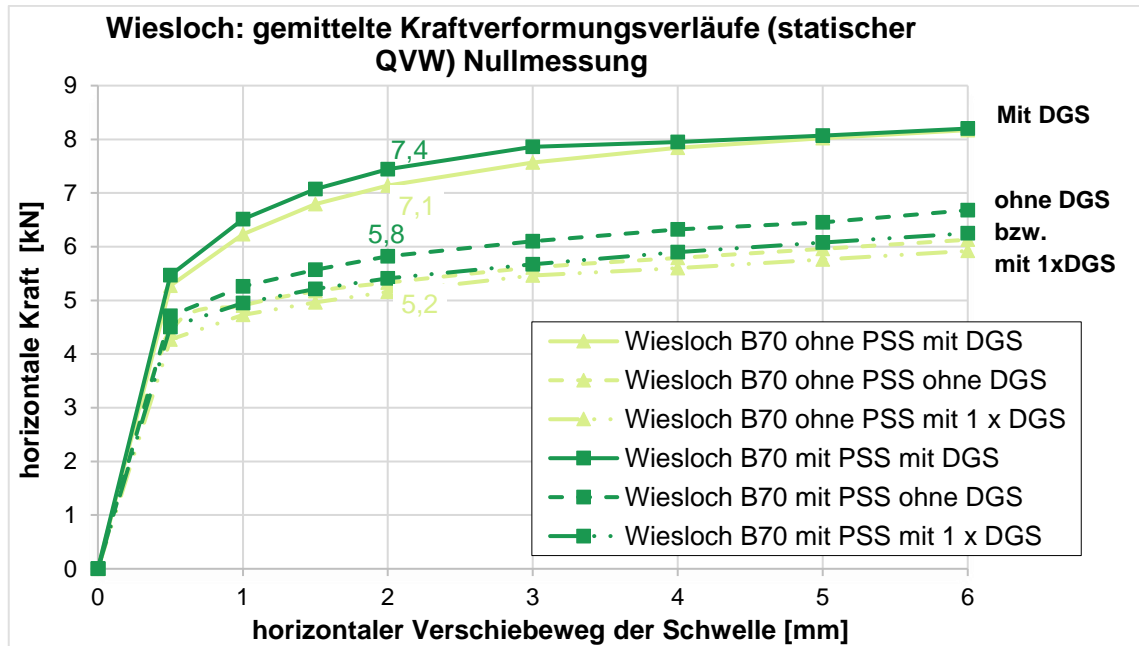


Abbildung 19: Wiesloch - gemittelte Kraftverformungsverläufe der statischen QVW der Nullmessung

Die Abbildung 20 zeigt die gemittelten Kraftverformungsverläufe nach einer Betriebsbelastung von 100.000 Lt. Mit den Ergebnissen aus der Nullmessung lässt sich ein prozentualer Zuwachs des QVW berechnen. Bei nur einmaligem Einsatz des DGS lässt sich ein Zuwachs des QVW um 23 %, bei keinem Einsatz des DGS um 17 % und bei Einsatz des DGS nach allen Stopfgängen um 12 % errechnen.

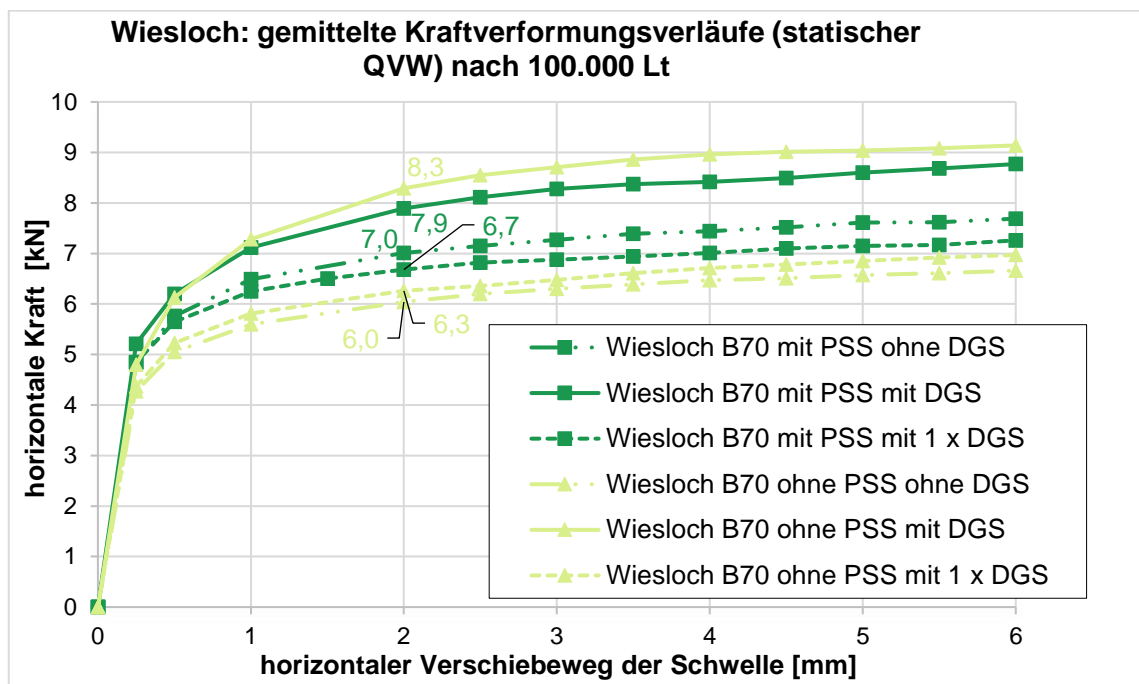


Abbildung 20: Wiesloch - gemittelte Kraftverformungsverläufe der statischen QVW nach einer Betriebsbelastung von 100.000 Lt

Nach 1,5 Mio. Lt Betriebsbelastung kann von einem konsolidierten Schotterbett ausgegangen werden. Dies zeigen auch die Verläufe der QVW-Messungen, da sie nun nah beieinanderliegen. Eine deutliche Steigerung des QVW ist nicht mehr zu erwarten. Abbildung 21 zeigt den Kraftverformungsverlauf nach einer Betriebsbelastung von 1,5 Mio. Lt. Auch hier lässt sich der prozentuale Zuwachs zwischen dem QVW nach einer Betriebsbelastung von 100.000 Lt und 1,5 Mio. Lt berechnen. Für den Versuchsabschnitt ohne DGS ergibt sich ein Zuwachs des QVW von 38 %, für den Versuchsabschnitt mit nur einmaligem Einsatz des DGS von 31 % und bei Einsatz des DGS nach allen Stopfgängen von 20 %. Der durchweg kleinere Zuwachs des QVW im Versuchsabschnitt mit DGS ist positiv zu bewerten, da dieser Abschnitt stärker konsolidiert ist und daher der Zuwachs langsamer voranschreitet, wie im Folgenden noch erläutert wird.

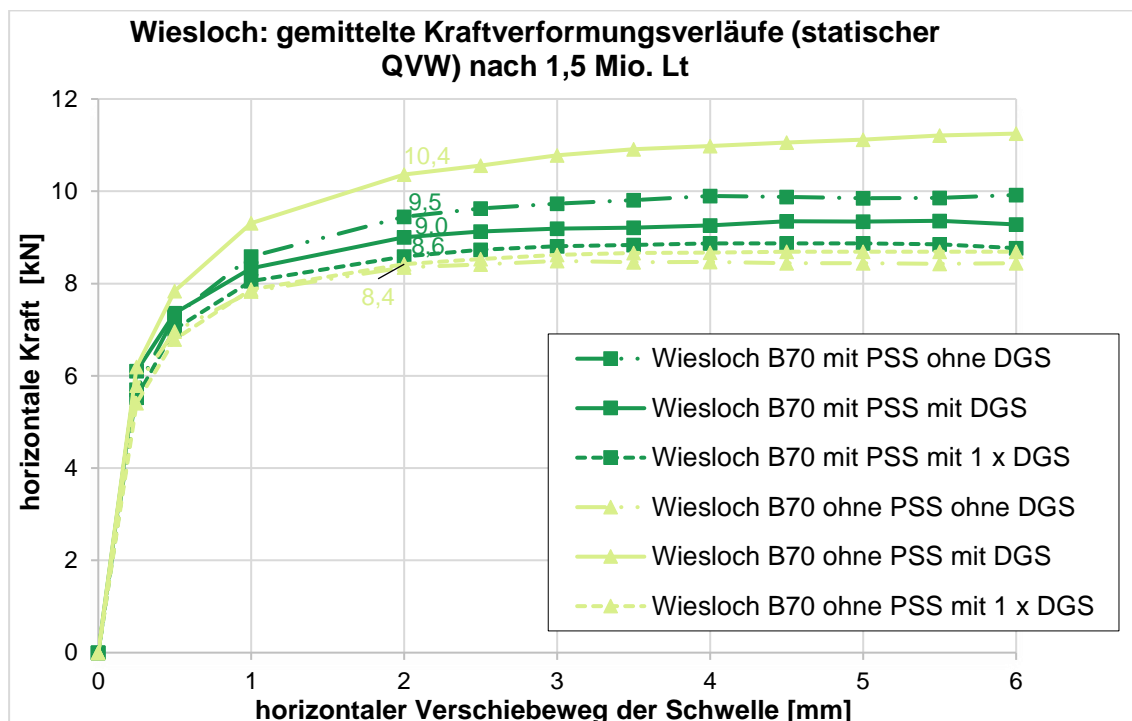


Abbildung 21: Wiesloch - gemittelte Kraftverformungsverläufe der statischen QVW nach einer Betriebsbelastung von 1,5 Mio. Lt

Generell lässt sich auch aus früheren Messungen ableiten, dass der Zuwachs des QVW innerhalb der ersten Betriebsbelastung von ca. 100.000 Lt größer als der Zuwachs des QVW durch weitere Betriebsbelastungen ist [42]. Dies ist auf den Konsolidierungsgrad des Schotters zurückzuführen. Abbildung 22 zeigt den QVW in Abhängigkeit der Betriebsbelastungen (Lt). Zur Veranschaulichung kann der Zuwachs des QVW pro 100.000 Lt berechnet werden. Für die B70 mit PSS ohne DGS ergibt sich beispielsweise ein Zuwachs innerhalb der ersten 100.000 Lt von 7,0 kN/100.000 Lt. Hingegen zwischen einer Betriebsbelastung von 100.000 Lt und 1,5 Mio. Lt sich ein Zuwachs des QVW von 0,6 kN/100.000 Lt ergibt. Dieser Vergleich zeigt, dass innerhalb der ersten 100.000 Lt

der Zuwachs des QVW um ca. das 10-fache größer ist als der Zuwachs zwischen 100.000 Lt und 1,5 Mio. Lt. Für die anderen Versuchsabschnitte gilt diese Erkenntnis ebenso.

In Abbildung 22 sind die Ergebnisse der QVW-Messung aus Wiesloch zusammengefasst. Auf der Ordinate ist der QVW und auf der Abszisse die Betriebsbelastung in Lasttonnen angegeben. Nach dem deutschen Regelwerk muss nach einem Um- oder Neubau eine Langsamfahrstelle für die ersten 100.000 Lt Betriebsbelastung eingerichtet werden [16]. Nach einer Betriebsbelastung von 100.000 Lt wird ein QVW von 6 kN (ohne PSS) bzw. 7 kN (mit PSS), in den Versuchsabschnitten ohne einen Einsatz des DGS, erreicht. Die rote gepunktete Linie in Abbildung 22 kennzeichnet den Mittelwert (6,5 kN) des erforderlichen QVW damit die La entfallen kann. Es wird deutlich, dass die Versuchsabschnitte mit DGS direkt nach dem Umbau den erforderlichen QVW überschreiten und somit keine La nötig wäre. Dadurch würde eine Geschwindigkeitsreduzierung auf 90 km/h bzw. 140 km/h von knapp drei Tagen entfallen.

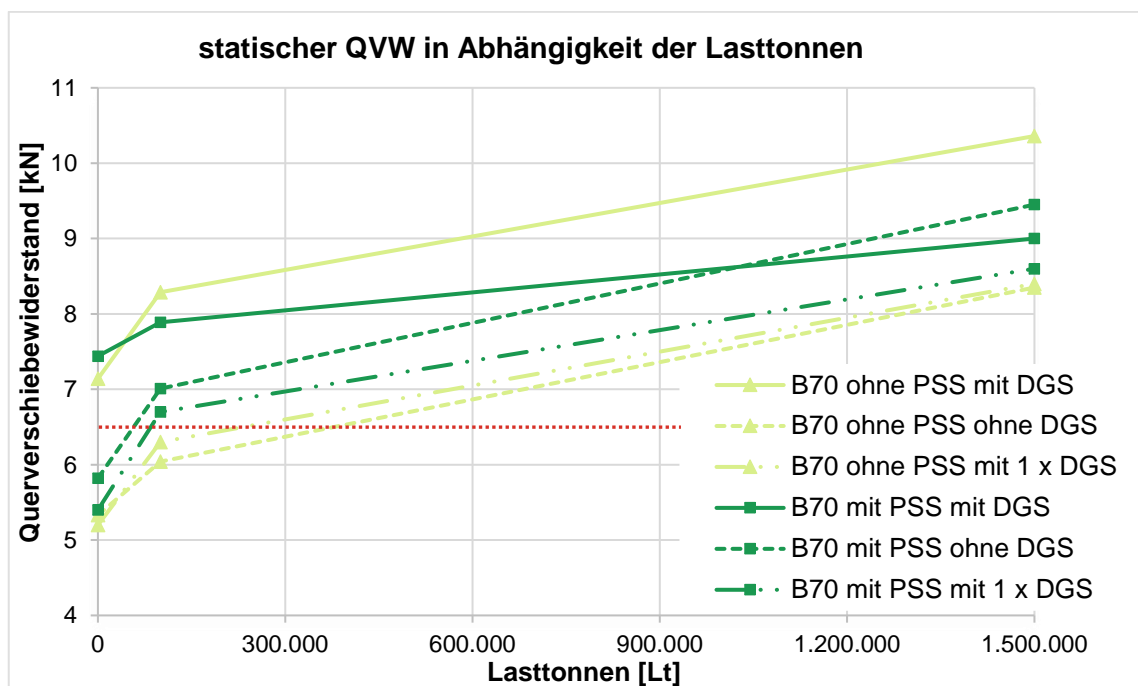


Abbildung 22: Zusammenfassung der statischen QVW-Werte in Abhängigkeit der Lasttonnen der Feldmessungen

Abschließend werden die Ergebnisse der Feldmessung Wiesloch aus den Querverschiebewiderstandsmessungen zusammengefasst:

- Der DGS kann eine Konsolidierung des Schotters äquivalent zu 100.000 Lt Verkehrsbelastung vorwegnehmen.
- Wird der DGS eingesetzt, ergibt sich ein um ca. 30 % größerer QVW als ohne DGS.

- Für eine Verbesserung des QVW ist der Einsatz nach allen Stopfdurchgängen erforderlich. Ein Einsatz des DGS nur nach einzelnen Stopfdurchgängen führt nicht zu einer Verbesserung des QVW.
- Eine zusätzliche Tragschicht, wie eine PSS, hat keinen maßgebenden Einfluss auf den QVW.
- Der Zuwachs des QVW ist während der ersten Betriebsbelastungen (100.000 Lt) am größten.

4.1.2.2 Gleislage

Zur Auswertung der Gleislage wurde die Differenz der Höhenlage nach 100.000 Lt und 1,5 Mio. Lt zur Ausgangslage nachdem Umbau, demnach vor einer Betriebsbelastung, gebildet. Diese Vorgehensweise erfolgte in Anlehnung der Auswertung der durch die DB Netz AG betreuten Master's Thesis [33]. Abbildung 23 zeigt die Ergebnisse der Feldmessung in Wiesloch. Die Differenz der Ausgangslage zur Höhenlage nach 100.000 Lt wird durch die blauen Säulen und zur Höhenlage nach 1,5 Mio. Lt durch die roten Säulen dargestellt. Aus der Feldmessung Wiesloch gehen sechs Säulenpaare hervor. Die ersten drei Säulenpaare (von links aus) zeigen die Ergebnisse des Abschnittes mit einer Planumsschutzschicht (PSS), die letzten drei ohne PSS. In diesen Abschnitten wurde jeweils einmal der DGS bei allen drei Stopfgängen, einmal wurde der DGS nur nach der 1. Stabilisierung und einmal gar nicht eingesetzt.

Wie bereits in Kapitel 3.3 beschrieben ist nicht sichergestellt, ob die Daten fehlerbehaftet sind. Eine Hebung des Gleises nach einer Betriebsbelastung ist nicht realistisch, daher wird der positive Wert, in Abbildung 23 hellblau dargestellt, von der Auswertung ausgeschlossen. Bei allen Säulenpaaren nimmt die Setzung der Gleislage mit steigenden Lasttonnen zu. Die geringsten Setzungen nach 100.000 Lt und 1,5 Mio. Lt treten in den Versuchsabschnitten auf, wo der DGS bei allen Stopfvorgängen eingesetzt wurde. Je geringere Setzungen sich im Gleis unter Betriebsbelastung ausbilden können, desto geringer ist das Potential, dass Gleislagefehler entstehen können. Die Setzungen ohne DGS und DGS nur nach der 1. Stabi liegen in der gleichen Größenordnung. Dies zeigt, dass ein einmaliger Einsatz des DGS nach der 1. Stabi sich nicht positiv auf die Gleislage und, wie bereits in Kapitel 4.1.2.1 festgestellt, auch nicht positiv auf den QVW auswirkt. In Summe kommt es bei dem Oberbau mit PSS zu geringeren Setzungen als bei dem Oberbau ohne PSS.

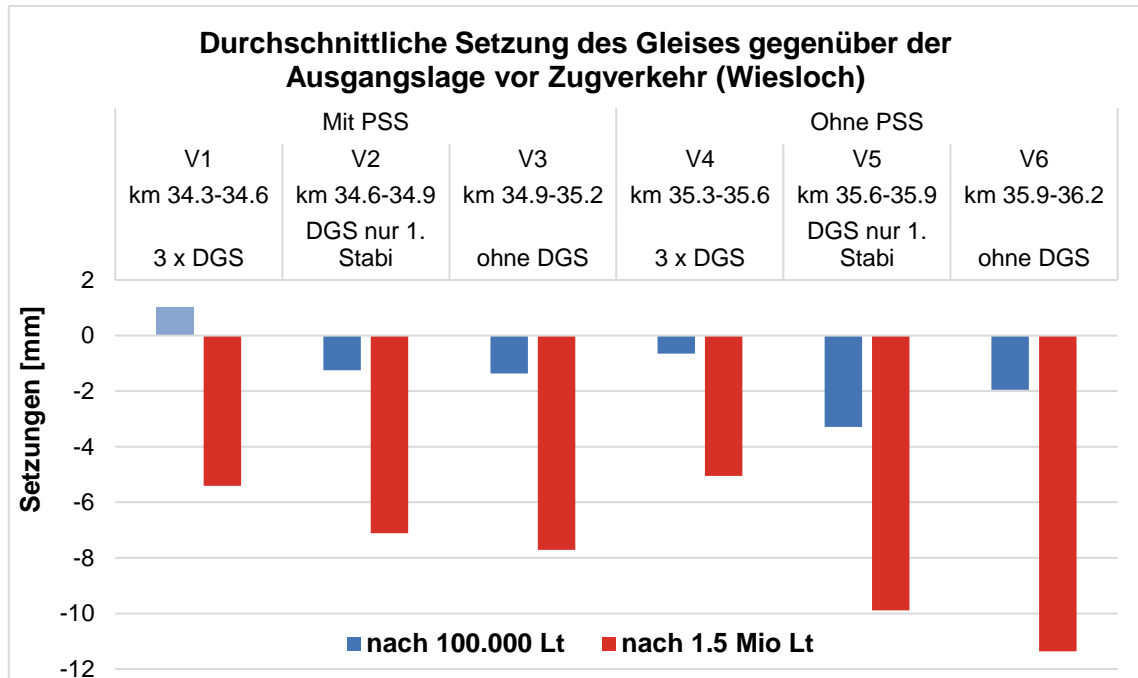


Abbildung 23: Feldmessung Wiesloch - Durchschnittliche Setzungen des Gleises gegenüber der Ausgangslage vor Zugverkehr

Die Ergebnisse der Gleislagemessung in Wiesloch werden kurz zusammengefasst:

- Je geringere Setzungen sich im Gleis unter Betriebsbelastung ausbilden können, desto geringer ist das Potential, dass Gleislagefehler entstehen können.
- Die geringsten Setzungen wurden in den Versuchsabschnitten gemessen in denen der DGS nach jedem Stopfgang eingesetzt wurde.
- Die Setzungen in den Versuchsabschnitten ohne den Einsatz des DGS und mit einmaligen Einsatz des DGS sind von der Größenordnung gleich. Der einmalige Einsatz des DGS bringt keinen nennenswerten Vorteil für die Gleislagequalität.
- Die Versuchsabschnitte mit einer zusätzlichen Tragschicht in Form einer PSS zeigen generell geringere Setzungen im Gegensatz zu den Abschnitten ohne PSS.

4.1.2.3 Schotterbeprobung

Durch den Versuchsaufbau konnten die Unterschiede der Schotterbeanspruchung durch den DGS bei einmaligem (V2, V5) sowie dreimaligem Einsatz des DGS (V1, V4) im Vergleich zu den Versuchsabschnitten ohne einen Einsatz des DGS (V3, V6) bewertet werden. Weiterhin konnte der Einfluss der Planumsschutzschicht untersucht werden.

Mit den Schotterproben aus jedem einzelnen Versuchsabschnitt wurden die Korngrößenverteilungen anhand der Sieblinie bestimmt. Tabelle 12 zeigt eine Übersicht der Ergebnisse der Siebdurchgänge sowie den Feinkornanteil (0,5 – 22,4 mm) und den Feinstkornanteil (< 0,063 mm). Nach den technischen Lieferbedingungen der DB (DBS 918 061) soll die Korngrößenverteilung von Gleisschotter die Grenzwerte der

Kategorie D aus der DIN EN 13450 einhalten [2, 35]. Zum Vergleich wird in Tabelle 12 ebenfalls die Kategorie B, die bei der ÖBB gefordert wird gezeigt [2]. Die grau hinterlegten Werte überschreiten die Vorgaben der DB an Neuschotter. Wie bereits in Kapitel 3.4 vorgestellt, wird bei der DB aufgrund von technischen und wirtschaftlichen Erfahrungen, die Änderung der Vorgaben in der Kornklasse 63 mm bis 80 mm von 99 % auf 100 % erlaubt. Somit liegt keine Überschreitung der Vorgaben der Korngrößenverteilung vor. Bei einer Überschreitung des Feinkornanteils von 1,0 M.-%, soll nach DBS 918 061 von dieser Probe zusätzlich der Feinstkornanteil bestimmt werden. Liegt der Feinstkornanteil unter 1,0 M.-% sind die Vorgaben der DB erfüllt. Somit halten die Schotterproben aller Versuchsabschnitte die Vorgaben der DB ein.

Tabelle 12: Ergebnisse der Siebdurchgänge sowie Feinkornanteil und Feinstkornanteil

Kornklasse [mm]	Soll DIN EN 13450		V1 [M.-%]	V2 [M.-%]	V3 [M.-%]	V4 [M.-%]	V5 [M.-%]	V6 [M.-%]
	B [M.-%]	D [M.-%]						
> 80	100	100	100	100	100	100	100	100
63 - 80	97 - 100	97 - 99	99,3	100	99,4	98,0	99,4	100
50 - 63	70 - 99	65 - 99	79,9	84,6	87,4	89,1	84,9	89,9
40 - 50	30 - 70	30 - 65	42,2	50,1	49,8	54,7	50,0	56,7
31,5 - 40	1 - 25	1 - 25	13,4	14,1	14,0	17,7	14,9	20,8
22,4 - 31,5	0 - 3	0 - 3	2,3	1,8	1,2	1,8	2,0	2,3
Feinkorn 0,5 - 22,4	≤ 1,0	≤ 1,0	1,3	0,9	0,9	1,1	1,1	1,2
Feinstkorn < 0,063	≤ 1,0	≤ 1,0	0,8	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6

Weiterhin wurden die Kornformkennzahl, die Plattigkeitskennzahl sowie die Kornlänge ermittelt. Die geforderten Werte aus den technischen Lieferbedingungen [35] verweisen auf verschiedene Kategorien der DIN EN 13450. Bei der Kornformkennzahl ist die Kategorie SI_{5/30}, bei der Plattigkeitskennzahl die Kategorie FI₃₅ und bei der Kornlänge die Kategorie B nach DBS 918 061 gefordert. In Tabelle 13 sind die Ergebnisse aus den einzelnen Versuchsabschnitten dargestellt und zum Vergleich die Werte aus der DIN EN 13450 der geforderten Kategorien [35]. Es zeigt sich, dass die Vorgaben der DB aus der DIN EN eingehalten sind.

Tabelle 13: Ergebnisse der Kornformkennzahl, der Plattigkeitskennzahl und der Kornlänge

	Soll DIN EN 13450	V1 34,385	V2 34,535	V3 34,985	V4 35,310	V5 35,535	V6 35,985
Kornformkennzahl SI [M.-%]	5 - 30	7,9	10,0	7,2	5,8	12,1	4,7
Plattigkeitskennzahl FI [M.-%]	0 - 35	6	8	6	3	8	3
Kornlänge [M.-%]	≤ 6	1,2	0,7	1,6	0,8	1,1	0,9

Abschließend kann zu den Schotterproben der Feldmessung Wiesloch festgehalten werden:

- Durch den einmaligen bzw. dreimaligen Einsatz des DGS bei einer Umbaumaßnahme findet keine signifikant erhöhte Schotterbeanspruchung, die sich aus einer Siebdurchgangsänderung ableiten lässt, statt.
- Dieses Ergebnis ist unabhängig davon, ob das Schotterbett auf einer Planumsschutzschicht lagert oder direkt auf dem Untergrund.

4.2 Nörten-Hardenberg

4.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Auf der zweigleisigen Strecke 1770 Lehrte-Nordstemmen, bei Nörten-Hardenberg, sollte die zweite Messung stattfinden. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf der Strecke beträgt 140 km/h bei einer Belastung von ca. 20.000 Lt/ Tag. Die Strecke ist ausgerüstet mit besohnten Schwellen B07 So die im Abstand von 60 cm verlegt sind. Auf den Schwellen sind Zw 1000 und Schienen des Typs 60E2 eingebaut.

Aufgrund der Ergebnisse aus der Feldmessung in Wiesloch wurden nur zwei Versuchsabschnitte gebildet. Ein dritter Versuchsabschnitt mit dem Einsatz des DGS nur nach der 1. Stabi ist nicht notwendig, da die Messung in Wiesloch bereits zeigte, dass keine positiven Ergebnisse bei dieser Vorgehensweise erzielt werden. Weiterhin ließen die Gegebenheiten eine Unterteilung in Abschnitte mit und ohne Planumsschutzschicht nicht zu, da der Untergrund von gleichbleibender Qualität ist. Somit ergab sich der erste Versuchsabschnitt mit Einsatz des DGS nach allen Stopfvorgängen und der zweite Versuchsabschnitt ohne DGS Einsatz als Referenzabschnitt. Es waren jeweils 15 bis 25 statische QVW-Messungen und weitere 10 bis 15 dynamische QVW-Messungen geplant.

Diese konnten jedoch nicht umgesetzt werden, da zu Beginn der Umbaumaßnahme die Stopfmaschine 09-3X Dynamic einen schwerwiegenden Defekt hatte. Die Stopfmaschine konnte nicht weiterarbeiten und die Feldmessung wurde abgesagt. Der DGS der defekten Stopfmaschine konnte jedoch genutzt werden, um die Beschleunigungssensoren zu testen und erste Messwerte zu generieren, wie Abbildung 24 und Abbildung 25 zeigt.



Abbildung 24: DGS über Messsensoren



Abbildung 25: Übersicht Messschwellen

Zu beachten ist, dass der DGS das unstabilisierte Gleis, abweichend vom realen Ablauf der Stopfvorgänge mit DGS, mehrmals bearbeitet hat. Es wurden vier Messungen durchgeführt, wobei je drei Schwellen mit vertikalen und horizontalen Beschleunigungssensoren (Bruel&Kjaer 4370 mit Ladungswandler 2646) ausgestattet waren. Die erste Überfahrt erfolgte bei der Einstellung für die Auflast von 45 bar, entsprechend einer Gesamtauflast von 180 kN und einer Stabilisierungsfrequenz von 34 Hz. Bei der zweiten und dritten Überfahrt wurde die Auflast auf das Maximum der Maschine von 83 bar erhöht, dies entspricht einer Kraft von ca. 300 kN, bei einer gleichbleibenden Frequenz von 34 Hz. In einem letzten Durchgang wurde der DGS über den Messsensoren positioniert. Bei gleichbleibenden Parametern (83 bar, 34 Hz) wurde der DGS angestellt, abgewartet bis die volle Drehzahl erreicht ist und wieder abgestellt. Mit diesem Vorgehen sollte simuliert werden, welche Beschleunigungen durch einen plötzlichen Stillstand oder Ausfall des DGS entstehen.

4.2.2 Ergebnisse und Auswertung

In Tabelle 14 sind die Mittelwerte der maximalen effektiven Gleitwerte der Beschleunigung sowie der Mittelwert der maximalen Amplituden aus vier Schwellen dargestellt. In Anlage A.3 finden sich die ausführlichen Messergebnisse aus Nörten-Hardenberg. Die maximalen effektiven Gleitwerte wurden für ein Zeitintervall von 0,5 Sekunden ausgewertet. Die maximalen Amplituden, in lateraler und vertikaler Richtung, ergeben sich aus der zweifachen Integration der Schwellenbeschleunigung. Aus den drei Überfahrten des DGS mit einer Auflast von ca. 300 kN (83 bar) wurde in der ersten Zeile der Tabelle die Mittelwerte gebildet. Bei der vierten Überfahrt wurde die Auflast auf ca. 180 kN (45 bar) reduziert. Bei jeder Überfahrt wurden vier Schwellen gemessen.

Tabelle 14: Zusammenstellung der Mittelwerte der maximalen effektiven Gleitwerte der Beschleunigung und der maximalen Wegamplituden aus der Feldmessung Nörten-Hardenberg

Nörten-Hardenberg	Parameter des DGS		max. effektiver Gleitwert d. Beschl.		Max. Wegamplitude	
	Auflast	Frequenz [Hz]	horizontal [m/s ²]	vertikal [m/s ²]	horizontal [mm]	vertikal [mm]
B07 So– Mittelwert	83 bar	34	38,1	20,6	1,2	0,6
B07 So- 1. Überfahrt	83 bar	34	39,7	21,4	1,1	0,6
B07 So- 2. Überfahrt	83 bar	34	37,9	20,7	1,1	0,5
B07 So– stat. an/aus	83 bar	34	36,8	20,7	1,4	1,0
B07 So- 4. Überfahrt	45 bar	34	49,4	38,3	1,2	0,6

Mit der angewandten Messtechnik konnten die Schwellenbeschleunigungen aus der Einwirkung des DGS ohne Schwierigkeiten gemessen werden.

Der Mittelwert des maximalen effektiven Gleitwertes der Beschleunigung bei den Überfahrten mit einer Auflast von ca. 300 kN (83 bar) ergibt sich zu 38,1 m/s². Im Gegensatz zu einem maximalen effektiven Gleitwert von 49,4 m/s², der sich aus den Ergebnissen der Überfahrt des DGS bei einer Auflast von 180 kN (45 bar) berechnet. Das bedeutet, dass bei einer Reduzierung der Auflast von 300 kN auf 180 kN sich der Mittelwert der effektiven Beschleunigung um ca. 30 % erhöht.

Die maximale laterale Wegamplitude beträgt unabhängig von der Auflast ca. 1,2 mm. Die laterale Wegamplitude des DGS wird in der Arbeitsanweisung von Plasser & Theurer mit 2,5 mm angegeben [43]. Somit entsteht eine Differenz von ca. 50 % der Wegamplitude des DGS zu der lateralen Wegamplitude an der Schwelle. Diese Differenz kann unterschiedliche Gründe haben. Zum einen ist die Schwelle im Schotter eingebettet, wodurch die Schwingungen gedämpft werden. Zum anderen können die elastischen Komponenten zwischen dem Einleitungspunkt der Schwingung am Schienenkopf und dem Messpunkt an der Schwelle eine Reduzierung der Wegamplitude hervorrufen. Zu diesen elastischen Komponenten gehören die Schiene und die Schienenbefestigung auch die Zwischenlage. Die vertikale Wegamplitude beträgt 0,6 mm. Einzige Ausnahme ist die dritte Messung bei der der DGS direkt über den Messsensoren angestellt und wieder abgestellt wurde. Hier beträgt die vertikale Wegamplitude 1,0 mm. Aufgrund der versuchstechnischen Besonderheit, dass der DGS mehrmals über ein nicht gestopftes Gleis gefahren ist, kann keine realistische Aussage zu der vertikalen Wegamplitude getroffen werden. Es ist davon auszugehen, dass die vertikale Wegamplitude stark von der Auflast sowie dem Konsolidierungsgrad des Schotters abhängt.

Abbildung 26 zeigt einen exemplarischen Verlauf der Schwinggeschwindigkeit während der DGS arbeitet. Es bilden sich zwei Maxima aus. Der Abstand der Maxima entspricht

dem Abstand der Unwuchten bzw. der Rollenteller von 1.600 mm. Zwischen den zwei Maxima entsteht ein lokales Minimum.

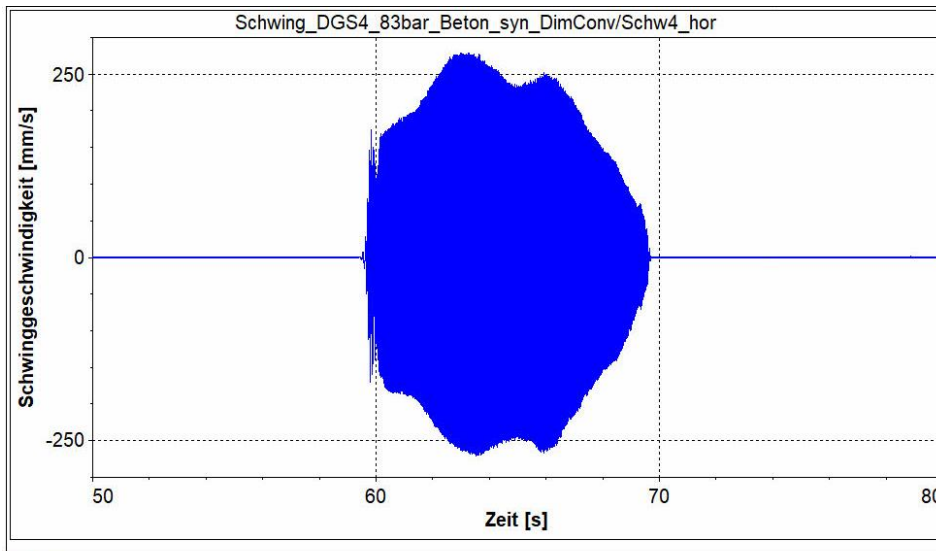


Abbildung 26: Exemplarischer Verlauf der Schwinggeschwindigkeit [mm/s] bei einer Auflast von 300 kN

Die Beschleunigungssignale wurden spektral ausgewertet. Abbildung 27 zeigt exemplarisch an der Schwelle ein Frequenzspektrum.

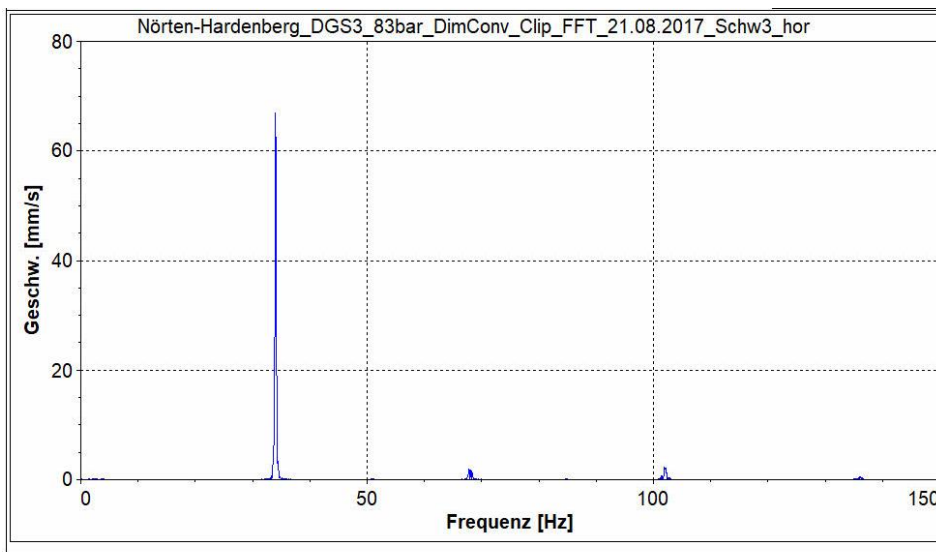


Abbildung 27: Spektrale Auswertung der Schwellenbeschleunigung, exemplarisch an der Schwelle B07 So

Der erste Peak tritt bei 34 Hz auf, alle weiteren bei einem Vielfachen von 34 Hz. Demnach ist die erste harmonische Frequenz der Schwellenanregung gleich der Schwingfrequenz des DGS.

Aus den Erkenntnissen, dass zwischen den beiden Maxima der Schwinggeschwindigkeit sich ein lokales Minimum befindet und dass die Schwellen neben der Anregungsfrequenz des DGS auch bei ganzzahligen Vielfachen von 34 Hz angeregt werden, lässt sich schließen, dass bei der Überfahrt des DGS unterschiedliche Schwingungsformen gleichzeitig angeregt werden. Die folgenden vier horizontalen Schwingungsformen werden angenommen:

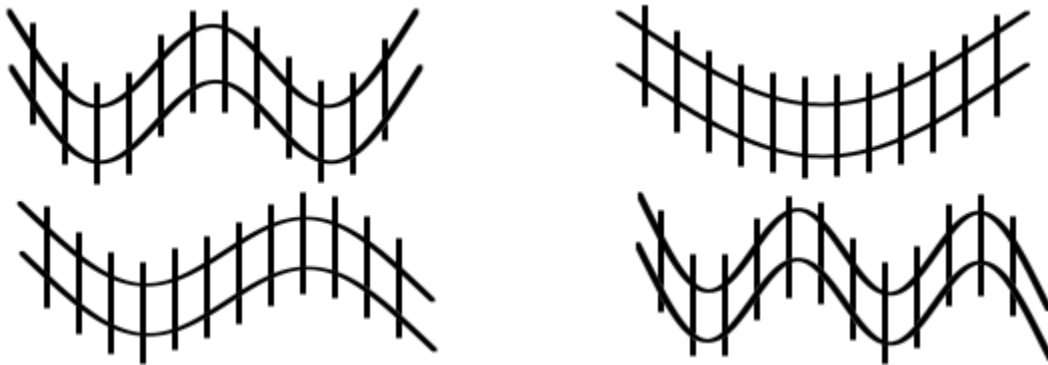


Abbildung 28: Visualisierung der ersten vier Schwingungsformen unter der horizontalen Anregung des DGS

Die Verifikation der horizontalen Schwingungsformen wurde mittels Simulation auf Basis der Finiten Element Simulation (FEM) mit dem Programm ANSYS Workbench (Version 18.1) durchgeführt. ANSYS Workbench bietet die Option einer Modalanalyse, mit der es möglich ist die Eigenfrequenz und die dazugehörigen Eigenformen einer Struktur zu ermitteln. Dabei kann festgestellt werden, ob die Eigenfrequenz der Struktur mit der Frequenz der Anregung durch den DGS zusammenfällt. In diesem Fall würde eine Resonanz vorliegen, die zu unkontrollierten Schwingungen führt.

Die Eigenfrequenz bzw. Eigenform einer Struktur ist abhängig von den Werkstoffeigenschaften, der Geometrie und den Einspannbedingungen [44]. In ANSYS Workbench wurde ein vereinfachter Gleisrost von 15 m Länge generiert. Es wird davon ausgegangen, dass die maximale Entfernung zwischen den Drehgestellen des DGS 15 m beträgt. Die simulierte Länge hat Einfluss auf die Wellenlänge der Eigenformen aber nicht auf die Form an sich. Ziel der Simulation war es die horizontalen Eigenformen des Gleisrostes zu bestimmen. Aus diesem Grund wurde der Gleisrost in vertikaler und Gleislängsrichtung unverschieblich gelagert. Die Modalanalyse ergab Eigenformen ab einer Frequenz von ca. 59 Hz. Sollten die Drehgestelle weniger als 15 m voneinander angeordnet sein, führt dies zu einer höheren Eigenfrequenz. Die folgenden Abbildungen bestätigen die vermuteten Schwingungsformen des Gleisrosts. Es kommt zu keiner Resonanzwirkung, da die Schwingfrequenz der Eigenformen erst ab 59 Hz beginnt und die Schwingfrequenz des DGS nur zwischen 0 und 45 Hz variiert werden kann.

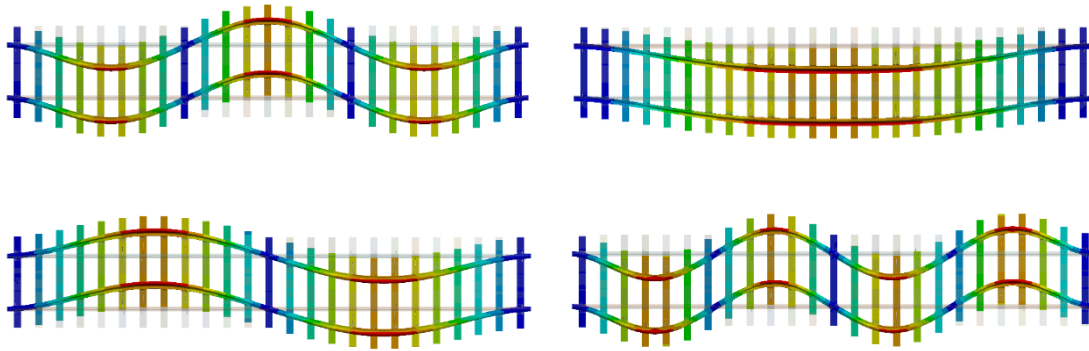


Abbildung 29: Horizontale Schwingungsformen bei einer Frequenz zwischen 59 Hz bis 61 Hz

Bei der Messung der Schwinggeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zeit, wird die Summe aus den unterschiedlichen Schwingungsformen detektiert. Aus diesem Grund kommt es bei der Schwingweise des DGS zu einem Minimum der Schwinggeschwindigkeit zwischen den beiden horizontalen DGS Rollenteller. Der Grund dafür ist, dass beispielsweise für die Schwingungsform in Abbildung 29 links unten eine minimale Amplitude in der Mitte zwischen den beiden Anpressrollen auftritt und somit in die Gesamtsumme mit eingeht.

Die hier vorliegenden Ergebnisse werden mit den folgenden Ergebnissen der Beschleunigungsmessungen in Hildesheim, Neusiedl und Langenschwarz in den jeweiligen Kapiteln in den Kontext gesetzt.

Aus der Beschleunigungsmessung in Nörten-Hardenberg lassen sich folgende Erkenntnisse festhalten:

- Die Messtechnik ist geeignet zur Registrierung der Beschleunigung durch den DGS.
- Mit steigender Auflast zwischen 180 kN (45 bar) und 300 kN (83 bar) nimmt die Schwellenbeschleunigung ab.
- Die Oberbaukomponenten sowie die Schotterbettung dämpfen die laterale Wegamplitude des DGS (2,5 mm) um ca. 50 %.
- Der Verlauf der Schwinggeschwindigkeiten zeigt zwei Maxima im Abstand der Rollenteller (1.600 mm).

4.3 Hildesheim

4.3.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Der Messbereich der zweigleisigen Strecke 1770 Harsum – Hildesheim liegt zwischen Kilometer 38,440 und 39,040. Die Streckenbelastung beträgt > 30.000 Lt/ d bei einer zulässigen Geschwindigkeit von 140 km/h. Auf der Strecke wurden Schienen 60E2 mit

folgenden Schwellentypen eingebaut: B07 So, B90, B70. Die Schwellen B07 So sind im Gegensatz zur B70 und B90 vollflächig besohlte Schwellen, haben aber eine nahezu identische Geometrie wie die Schwellen B90. Der Schotter vor Kopf betrug 50 cm bis 55 cm. Damit wurde 10 cm bis 15 cm nach Richtlinie 820.2010 zu viel Schotter vor Kopf angeordnet.

Im Zuge der Umbaumaßnahme wurden, wie aus Abbildung 32 ersichtlich, vier Versuchsabschnitte festgelegt.

	V1	V2	V3	V4	
Norden ←	B70 ohne DGS	B70 mit DGS	B07 So mit DGS	B07 So ohne DGS	→ Süden
	km 38,440	km 38,590	km 38,740	km 38,890	km 39,040
			Brücke	B90	
stat. QVW bei km	38,565-38,500	38,615-38,651	38,800-38,836	38,929-38,965	
dyn. QVW bei km	38,500-38,524	38,651-38,665	38,836-38,850	38,965-38,989	
Harsum ←	→				Hildesheim

Abbildung 30: Schematische Darstellung der Versuchsabschnitte - Hildesheim

In jedem der vier Versuchsabschnitte wurde der QVW jeweils an 15 Schwellen statisch und an 10 Schwellen dynamisch gemessen. Zusätzlich befindet sich eine Stahltragbrücke in dem Messbereich, hier liegen B07 So Schwellen, und im Anschluss an die Brücke jeweils ein kurzer Abschnitt mit B90 Schwellen. Die Abkürzung der Oberbauformen wird anhand eines Beispiels erläutert:

W21 - 60 - B07 So (G02) - 1667
 Befestigungstyp - Schientyp - Schwellentyp Besohlt mit Typ G02 - Schwellen auf 1 km

Dadurch ergaben sich folgende Versuchsabschnitte. Zusätzlich findet sich in Anlage A.4 ein Lageplan mit den Abschnitten:

- Versuchsabschnitt 1 (V1): W21-60-B07 So (G02) -1667 mit Zw 1000 ohne DGS von km 38,440 bis 38,590
- Versuchsabschnitt 2 (V2): W21-60-B07 So (G02) -1667 mit Zw 1000 mit DGS von km 38,590 bis 38,740
- Versuchsabschnitt 3 (V3): W14-60-B70-1667 mit Zw 687a mit DGS von km 38,740 bis 38,890
- Versuchsabschnitt 4 (V4): W14-60-B70-1667 mit Zw 687a ohne DGS von km 38,890 bis 39,040

Aufgrund der örtlichen Begebenheiten wurden zwei zusätzliche statische QVW-Messungen auf der Brücke und drei im Abschnitt mit den Schwellen B90 durchgeführt:

- Versuchsabschnitt B (B) auf der Stahlrogbrücke innerhalb des Versuchsabschnitts 2: W-60-B07So (G02) -1667 mit DGS von km 38,688 bis 38,723
- Versuchsabschnitt B90 (B90) im Bereich der Schwellen B90 innerhalb des Versuchsabschnitts 3: W-60-B90-1667 mit DGS von km 38,746 bis 38,753

In den Abschnitten V2 und V3 kam der DGS nach jedem Stopfgang zum Einsatz. In der Regel wurden drei Stopfgänge mit der Maschine 09-3X Dynamic durchgeführt (Hebe- und Verdichtgang, 1. Stabilisierung und 2. Stabilisierung). Im Bereich der Brücke und der Schwellen B 90 wurde ein zusätzlicher Stopfgang nötig, ein sogenannter „verlorener Stopfgang“. Grund hierfür war eine zu geringe Einschotterung des Gleises vor dem zweiten Stopfgang.

Die Nummerierung der Schwellen erfolgt in Kilometrierungsrichtung. Bei den Schwellennummern V1.1 bis V1.15 wurden die Querverschiebewiderstandsmessungen im ersten Versuchsabschnitt statisch und bei den Schwellennummern V1.16 bis V1.25 dynamisch durchgeführt. Diese Nomenklatur wurde in allen Versuchsabschnitten (V2, V3, V4, B90 und B) angewandt und ist in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15: Aufteilung der Versuchsabschnitte bei der Feldmessung Hildesheim

Schwellennummer	QVW	Art	DGS Einsatz	Messabschnitt [km]
V1.1 bis V1.15	statisch	B07So	ohne DGS	38,565 - 38,500
V1.16 bis V1.25	dynamisch	B07So	ohne DGS	38,000 - 38,524
V2.1 bis V2.15	statisch	B07So	mit DGS	38,615 - 38,651
V2.16 bis V2.25	dynamisch	B07So	mit DGS	38,651 - 38,665
V3.1 bis V3.15	statisch	B70	ohne DGS	38,800 - 38,836
V3.16 bis V3.25	dynamisch	B70	ohne DGS	38,836 - 38,850
V4.1 bis V4.15	statisch	B70	mit DGS	38,929 - 38,965
V4.16 bis V4.25	dynamisch	B70	mit DGS	38,965 - 38,989
VB.1 bis VB.2	statisch	B07So	mit DGS	38,698 - 38,700
B90.1 bis B90.3	statisch	B90	mit DGS	38,746 - 38,751

Beschleunigungsmesstechnisch wurden jeweils zwei Schwellen des Typs B07 So, eine des Typs B70 und eine B90 während der vier DGS-Überfahrten am 19.11.2017 instrumentiert und die Beschleunigungen erfasst. Die gemessenen Schwellen sind exemplarisch in der Abbildung 31 markiert. Es wurden bei jeder Überfahrt die identischen vier Schwellen gemessen.

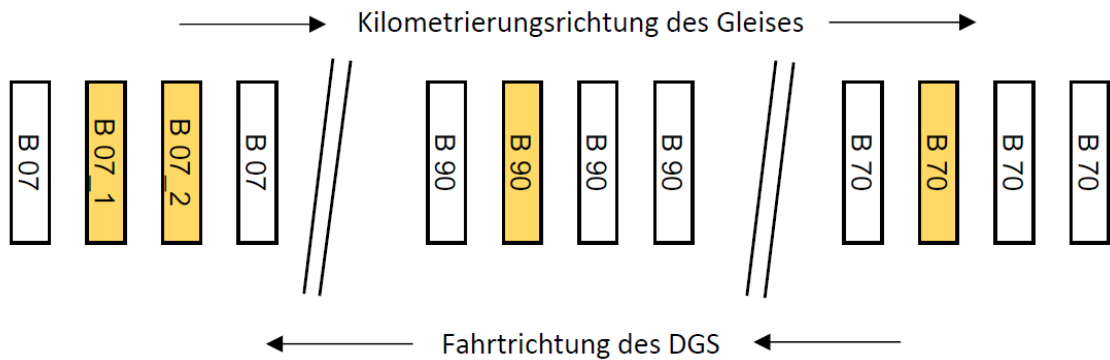


Abbildung 31: Skizze der gemessenen Schwellen

Der Einsatz des DGS erfolgte bei einer Schwingfrequenz von ca. 31 Hz. Die Auflast des DGS wurde nach jedem Stopfgang reduziert. Bei dem Hebe- und Verdichtgang (HuV) wurde die Auflast des DGS auf ca. 260 kN (70 bar), bei der 1. Stabi und dem verlorenen Stopfgang auf ca. 230 kN (60 bar) und bei der 2. Stabi auf ca. 200 kN (50 bar) eingestellt. Die eingestellten Maschinenparameter des DGS, Auflast und Schwingfrequenz lassen sich überprüfen. Die Auflast wird in der Regel auf dem Messchrieb der Stopfmaschine mit aufgezeichnet und durch die Auswertung der Beschleunigungsmessung konnte die Frequenz messtechnisch festgehalten werden.

Die QVW-Messungen in Hildesheim wurden, wie in Wiesloch, jeweils nach dem DGS am 20./21.11.2017, nach einer Verkehrsbelastung von 100.000 Lt in den Nachtschichten 04. bis 06.12.2017 und nach 1,5 Mio. Lt in den Nachtschichten 12. bis 14.03.2018 durchgeführt. Abbildung 32 zeigt das Messraster der statischen und dynamischen Querverschiebewiderstandsmessung. Zur Vermeidung einer Beeinflussung der QVW-Messungen untereinander wurde jede vierte Schwelle gemessen.

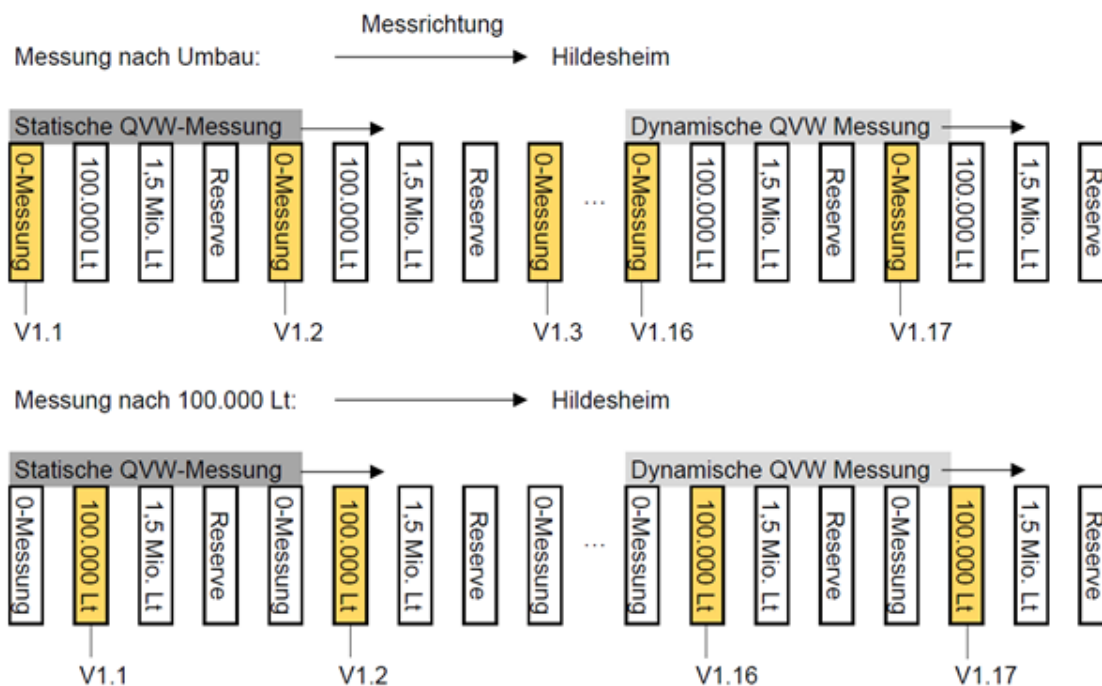


Abbildung 32: Lage der Schwellen in den Versuchsabschnitten

Während des DGS-Einsatzes und der ersten QVW-Messung (Nullmessung) kann aufgrund des Dauerregens von einem durchfeuchteten Schotter ausgegangen werden. Bei der zweiten QVW-Messung hat es teilweise leicht geregnet. Bei der dritten Messung herrschten trockene Witterungsverhältnisse.

4.3.2 Ergebnisse und Auswertung

Bei der Feldmessung in Hildesheim wurden der QVW, die Gleislage und die Schwellenbeschleunigung festgehalten. Im Folgenden werden die Ergebnisse vorgestellt und ausgewertet.

4.3.2.1 Querverschiebewiderstand

Die eingebrachte Feuchtigkeit im Schotterbett, beispielsweise durch den Dauerregen während der ersten QVW-Messung, wirkt mit dem vorhandenen Feinkornanteil wie eine Schmierschicht zwischen den Schotterkörnern und verringert damit den Reibungskoeffizienten [42]. Bei am Prüfamts für Verkehrswegebau durchgeführten Laborversuchen wurde ein starker Regenfall simuliert. Hierbei hat sich herausgestellt, dass der QVW bei besohlenen Schwellen um 15 % bis 19 % und bei unbesohlenen Schwellen um 16 % bis 26 % abnimmt [42]. Messungen in einem Betriebsgleis zeigten dagegen eine Abnahme des QVW um 11 % im Vergleich zu einem trockenen Schotterbett [31]. Bei der ersten QVW-Messung kann davon ausgegangen werden, dass die gemessenen Werte durch den nassen Schotter reduziert waren. Auf der sicheren Seite liegend wird der reduzierte QVW nicht berücksichtigt.

Tabelle 16 zeigt die Mittelwerte der statischen QVW in kN, die bei einem Verschiebeweg von 2 mm ausgewertet wurden und die dazugehörigen Standardabweichungen (s) in kN. Die vollständigen Messergebnisse mit den Standardabweichungen und Variationskoeffizienten befinden sich in Anlage A.5.

Tabelle 16: Mittelwerte der statischen QVW-Messungen bei 2 mm Verschiebeweg [41, 45]

Feldmessung Hildesheim	Nullmessung		100.000 Lt		1,5 Mio. Lt	
	QVW [kN]	s [kN]	QVW [kN]	s [kN]	QVW [kN]	s [kN]
B07 So ohne DGS	8,1	0,4	9,5	0,6	10,1	0,4
B07 So mit DGS	8,9	0,4	10,2	0,5	10,4	0,5
B70 ohne DGS	6,3	0,4	8,6	0,8	9,5	0,6
B70 mit DGS	7,7	0,3	9,5	0,8	9,8	0,9

In den Abschnitten ohne DGS wurde bei der Nullmessung für die Schwelle B07 So ein Mittelwert des QVW von 8,1 kN und für die Schwelle B70 von 6,3 kN gemessen. Der QVW der Schwelle B07 So ist somit um ca. 29 % größer als der QVW der Schwelle B70. Es wird deutlich, dass bereits durch das Schwellengewicht, der Schwellenform und einer vollflächigen Schwellenbesohlung der QVW steigt. Durch das höhere Schwellengewicht und die Besohlung wächst der Reibungskoeffizient zwischen der Schwellenunterseite und dem Schotter. Die Schwellenform mit der charakteristischen Einschnürung in Schwellenmitte erhöht die seitliche Kontaktfläche und bringt eine bessere Verzahnung mit dem Schotter, wodurch der Reibungskoeffizient steigt.

Abbildung 33 zeigt den Kraftverformungsverlauf des QVW für die Nullmessung und verdeutlicht den Zuwachs des QVW durch den DGS. Bei der Schwelle B07 So steigt der Mittelwert des QVW durch den DGS von 8,1 kN (ohne DGS) auf 8,9 kN (mit DGS). Bei der Schwelle B70 zeigt sich ein Anstieg von 6,3 kN (ohne DGS) auf 7,7 kN (mit DGS). Damit ergibt sich ein Anstieg des QVW durch den Einsatz des DGS bei der Schwelle B07 So um ca. 10 % und bei der B70 um ca. 22 %. Die Maschinenparameter (Schwingfrequenz und Auflast) waren bei beiden Versuchsabschnitt gleich eingestellt. Die Effektivität des DGS ist im Hinblick auf den QVW bei der B70 um Faktor zwei größer als bei der B07 So. Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass durch optimierte Maschinenparameter (Schwingfrequenz und Auflast) hinsichtlich des DGS der QVW-Zuwachs der B07 So durch den DGS gesteigert werden kann.

Zusammenfassend lässt sich zu den Ergebnissen der Nullmessung sagen, dass die Höhe des QVW nach dem Stopfen aber auch der Zuwachs des QVW durch den DGS vom Schwellentyp abhängt.

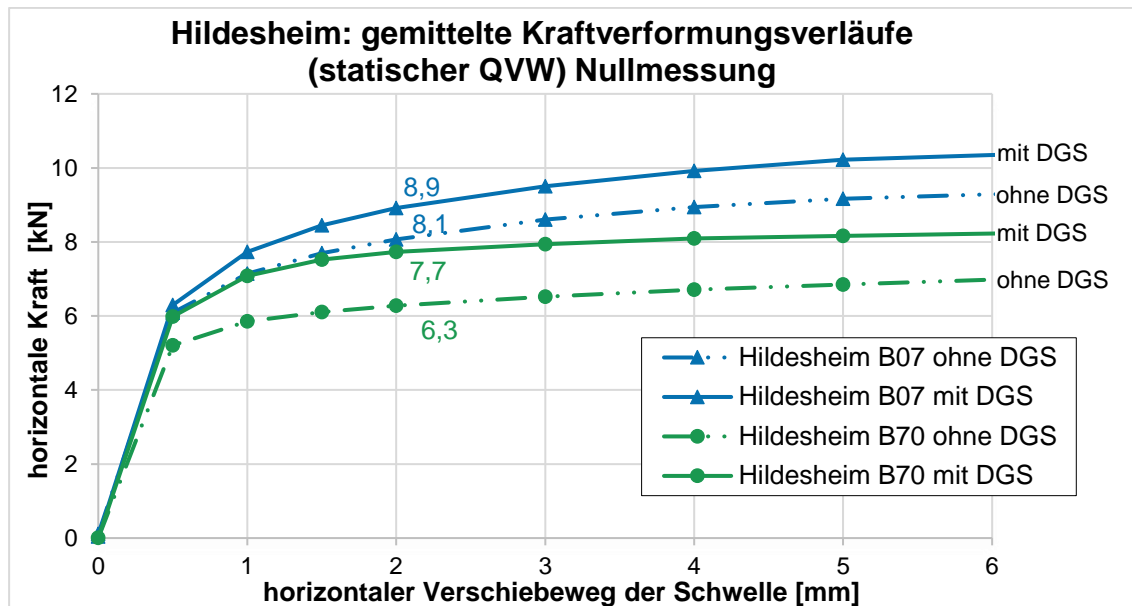


Abbildung 33: Hildesheim - gemittelte Kraftverformungsverläufe der statischen QVW Nullmessung

In Abbildung 34 ist der Mittelwert des QVW nach einer Betriebsbelastung von 100.000 Lt für die einzelnen Versuchsabschnitte dargestellt. Der Zuwachs des QVW durch die Betriebsbelastung ist bei beiden Schwellen B07 So und B70 jeweils in dem Versuchsabschnitt mit DGS geringer. Bei der B07 So steigt der QVW im Versuchsabschnitt mit DGS um knapp 15 % und ohne DGS um 17 %. Bei der Schwelle B70 ist der prozentuale Anstieg im Vergleich zur B07 So größer. Im Versuchsabschnitt der B70 mit DGS steigt der QVW um 23 % und ohne DGS um knapp 37 %.

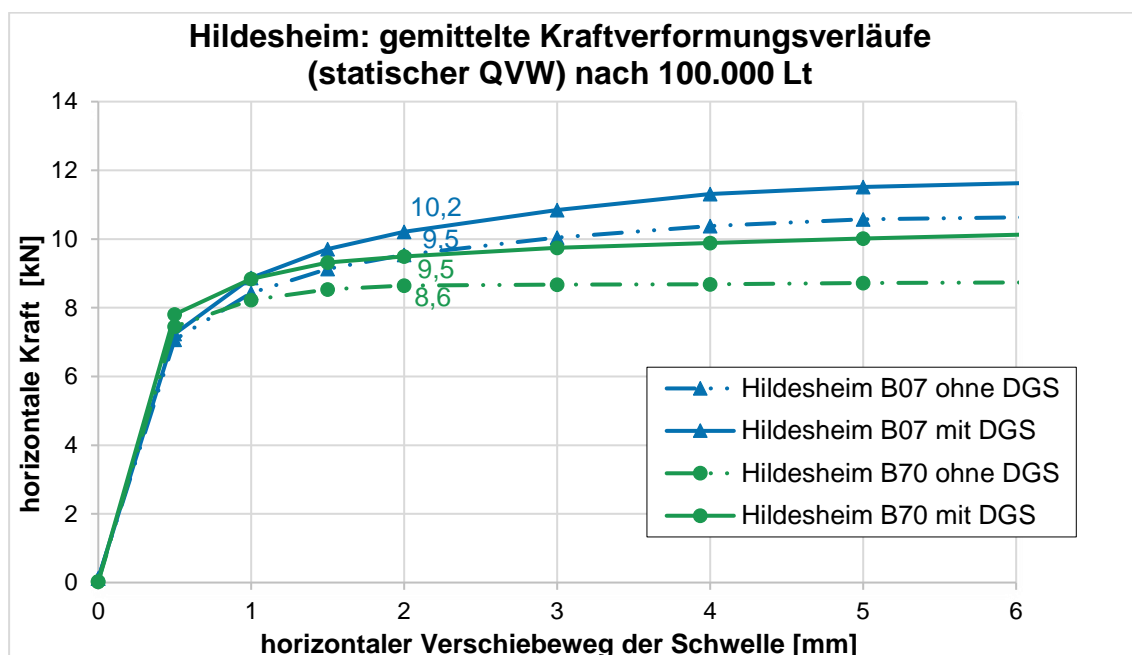


Abbildung 34: Hildesheim - gemittelte Kraftverformungsverläufe der statischen QVW nach 100.000 Lt

Bei dem Zuwachs des QVW nach weiteren 1,4 Mio. Lt zeigt sich das gleiche Verhalten im Hinblick auf den Anstieg des QVW. Die Kraftverformungsverläufe nach insgesamt 1,5 Mio. Lt sind in Abbildung 35 dargestellt. Der Zuwachs des QVW zwischen einer Betriebsbelastung von 100.000 Lt und 1,5 Mio. Lt ergibt sich zu 2 % für die B07 So mit DGS, zu 6 % für die B07 So ohne DGS und zu 3 % für die B70 mit DGS und zu 10 % für die B70 ohne DGS. Der Schotter ist so lange in einem Umlagerungsprozess, bis dieser den konsolidierten Zustand erreicht hat. Danach ist kein maßgeblicher Anstieg des QVW zu erwarten. Eine Umlagerung der Schotterkörner ist einhergehend mit Bewegung und somit auch mit Setzung bzw. Gleislageveränderung. Demnach spricht es für eine Wirksamkeit des DGS, wenn der Ausgangswert des QVW nach der Durcharbeitung möglichst hoch und der sich zwangsläufig einstellende Zuwachs entsprechend geringer ist. Nach einer Betriebsbelastung von 1,5 Mio. Lt ist von einem konsolidierten Zustand des Schotters auszugehen. Diese Erkenntnis zeigt sich in Abbildung 35, da sich ein QVW der Schwellen von 10 kN (+/- 0,5 kN) in allen Versuchsabschnitten einheitlich einstellt.

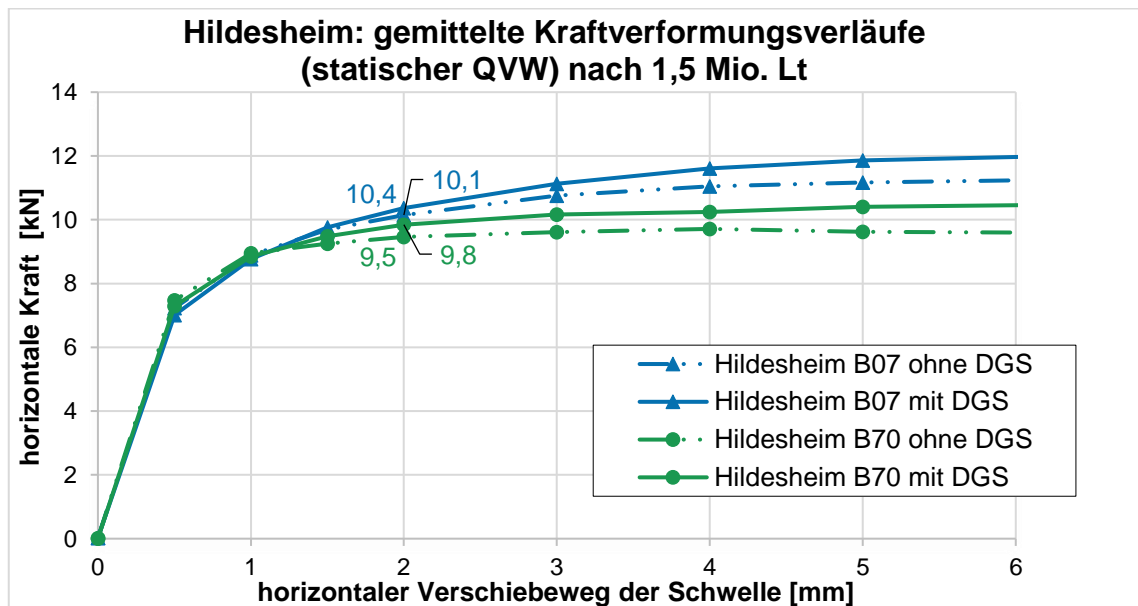


Abbildung 35: Hildesheim - gemittelte Kraftverformungsverläufe der statischen QVW nach 1,5 Mio. Lt

Abbildung 36 fasst die Ergebnisse der QVW-Messungen aus Hildesheim zusammen. Der Querverschiebewiderstand wird in Abhängigkeit des horizontalen Verschiebeweges dargestellt. Nach dem deutschen Regelwerk muss nach einem Um- oder Neubau eine Langsamfahrstelle für die ersten 100.000 Lt Betriebsbelastung eingerichtet werden [16]. Nach einer Betriebsbelastung von 100.000 Lt wird im Versuchsabschnitt B70 ohne DGS ein QVW von 8,6 kN und im Versuchsabschnitt B07 So ohne DGS 9,5 kN gemessen. In dem Regelwerk wird nicht zwischen verschiedenen Betonschwellentypen (mit $l \geq 2,60$ m) unterschieden. Daher kann der kleinere Wert als erforderlicher QVW angenommen werden, damit die Langsamfahrstelle (La) entfallen kann. Direkt nach dem

Umbau erreicht nur der Versuchsabschnitt der Schwelle B07 So mit DGS den erforderlichen QVW, damit keine Geschwindigkeitsreduzierung auf 90 km/h bzw. 140 km/h von knapp drei Tagen nötig ist. Wie eingangs erläutert, ist davon auszugehen, dass die QVW-Werte der Nullmessung aufgrund des Dauerregens reduziert sind. Die Abnahme kann zwischen 11 % und 26 %, hervorgehend aus den bisherigen Untersuchungen, liegen [31, 42]. Auf der sicheren Seite liegend wird der QVW der B70 mit DGS nach dem Umbau theoretisch um 11 % erhöht. Damit ergibt sich ein rechnerischer QVW des Versuchsabschnittes B70 mit DGS von 8,5 kN. Damit wird der QVW (8,6 kN), der erforderlich ist, um die La entfallen zu lassen, annähernd erreicht.

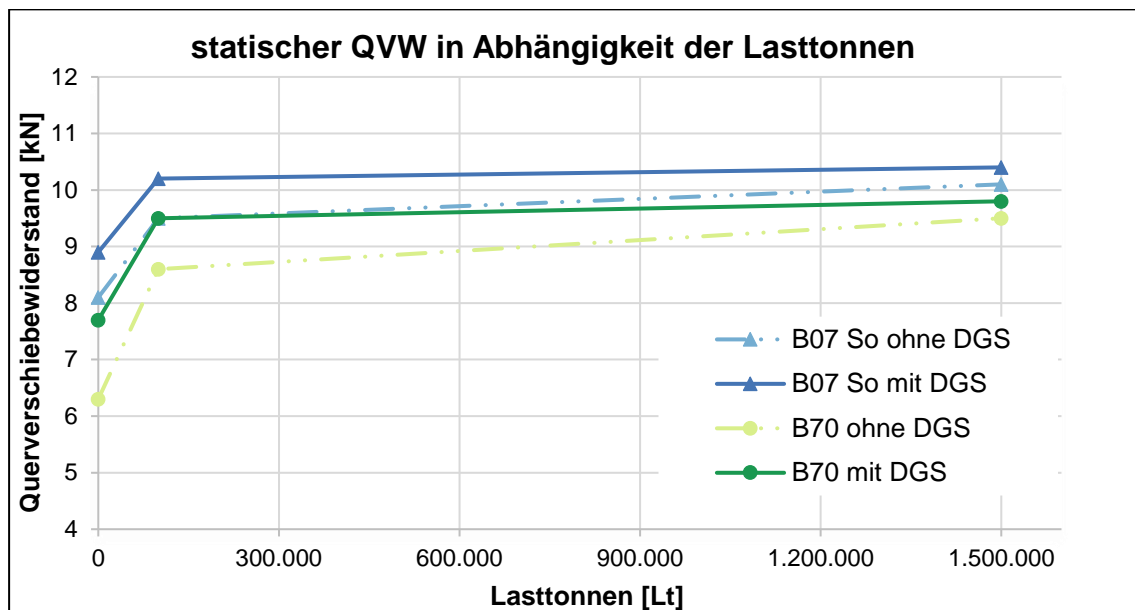


Abbildung 36: Zusammenfassung der statischen QVW-Werte in Abhängigkeit der Lasttonnen der Feldmessungen Hildesheim

Neben dem statischen QVW wurde auch der dynamische QVW gemessen. Hierzu wurde während der QVW-Messung die Schwelle durch einen Unwuchtschwinger mit 50 Hz und einer Kraftamplitude von +/- 2,2 kN dynamisch angeregt. Tabelle 17 zeigt die Mittelwerte der dynamischen QVW-Werte bei einem Verschiebeweg von 2 mm. Die ausführlichen Messergebnisse mit den Standardabweichungen und den Variationskoeffizienten finden sich in Anlage A.5.

Der dynamische QVW der Schwelle B07 So (5,0 kN) ist 47 % größer als der dynamische QVW der B70 (3,4 kN). Es zeigt sich die gleiche Tendenz wie bei den statischen QVW. Der Grund hierfür liegt ebenfalls in den charakteristischen Eigenschaften der Schwellentypen wie die Schwellenform, dem Schwellengewicht und der Schwellenbesohlung.

Der dynamische QVW der Nullmessung ist nach dem Einsatz des DGS bei der B07 So um 6 % und bei der B70 um 18 % größer. Hier zeigt sich der QVW-Zuwachs durch den DGS.

Nach einer Betriebsbelastung von 1,5 Mio. Lt, entsprechend dem konsolidierten Zustand des Schotters, kann in den Versuchsbereichen V1, V2 ein dynamischer QVW von 5,3 kN und in V3, V4 (B70) ein dynamischer QVW von 4,4 kN gemittelt werden. Im Vergleich dazu ergibt sich ein statischer QVW für den konsolidierten Zustand von 10,3 kN für die Bereiche der Schwelle B07 So und 9,7 kN für die Bereiche der Schwelle B70. Daraus ergibt sich eine Abnahme des dynamischen QVW gegenüber dem statischen QVW von 49 % für die B07 So und 55 % für die B70. Frühere Versuche im Betriebsgleis und im Labor zeigen die gleiche Tendenz. Hier wurde ebenfalls der dynamische und statische QVW am Schwellentyp B70 im konsolidierten Schotter gemessen und die Abnahme des dynamischen QVW ermittelt. Bei der Messung im Betriebsgleis ergab sich eine Abnahme von 37 % [31] und im Labor von 50 % [42].

Tabelle 17: Mittelwerte der dynamischen QVW-Werte bei 2 mm Verschiebeweg

Versuchsabschnitt	Nullmessung		Messung nach 100.000 Lt		Messung nach 1,5 Mio. Lt	
	QVW [kN]	w [N/mm]	QVW [kN]	w [N/mm]	QVW [kN]	w [N/mm]
B07 So ohne DGS (V1)	5,0	8,4	5,7	9,4	5,2	8,6
B07 So mit DGS (V2)	5,3	8,9	5,5	9,2	5,4	9,0
B70 ohne DGS (V4)	3,4	5,7	4,3	7,0	4,1	6,8
B70 mit DGS (V3)	4,0	6,7	5,5	9,2	4,6	7,7

Der Verlauf des dynamischen QVW in Abhängigkeit der Verkehrsbelastung ist in Abbildung 37 dargestellt. Die einzelnen Kraft-Verformungs-Diagramme und die tabellarische Ergebniszusammenstellung der Nullmessung, nach 100.000 Lt und nach 1,5 Mio. Lt sind in Anlage A.5 zu finden.

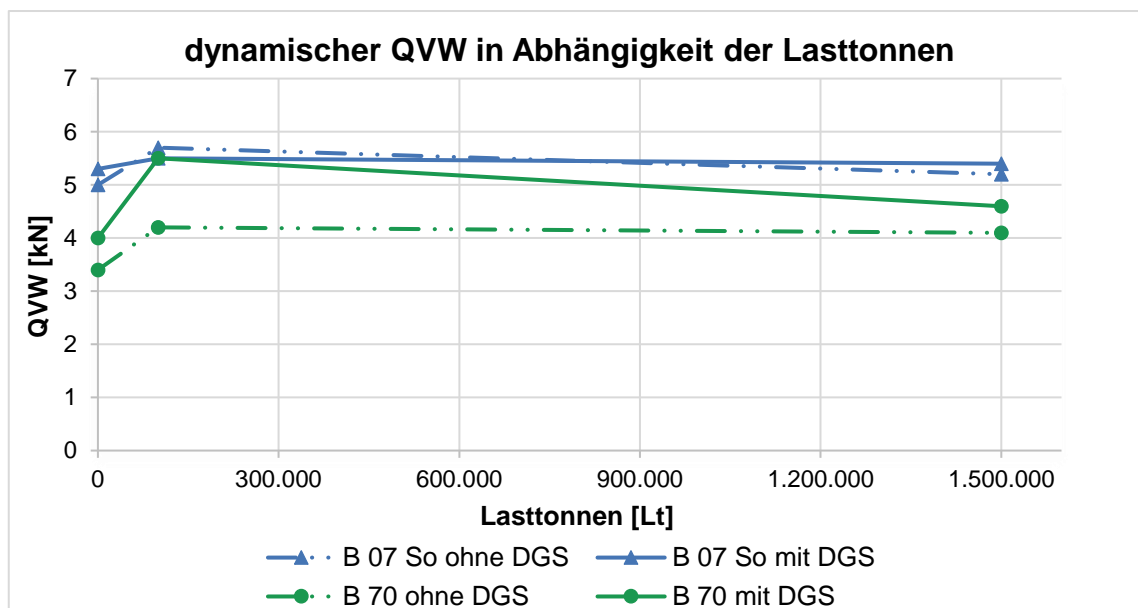


Abbildung 37: Zusammenfassung der dynamischen QVW-Werte in Abhängigkeit der Lasttonnen

Der Zuwachs des dynamischen QVW nach 100.000 Lt beträgt für die Schwelle B07 So ohne DGS 14 % und mit DGS 4 %. Bei den Ergebnissen der Schwelle B70 ohne DGS ist ein Anstieg des QVW von 24 % und mit DGS von 38 % zu erkennen. Der QVW der Schwelle B70 ohne DGS nach 100.000 Lt beträgt 4,3 kN. Dieser Wert wird nach der Nullmessung von der B70 mit DGS (4,0 kN) knapp erreicht. Der QVW der B07 So liegt ohne DGS (5,0 kN) und mit DGS (5,3 kN) über diesem Wert. Bezugnehmend auf die notwendige Langsamfahrstelle könnte auch auf Basis der dynamischen QVW-Werte auf eine Geschwindigkeitsreduzierung, sofern der DGS angewendet wird, verzichtet werden.

Die Ergebnisse der Feldmessung in Hildesheim lassen durch die Auswertung der Querverschiebewiderstände folgende Aussagen zu:

- Der DGS kann eine Konsolidierung des Schotters äquivalent zu 100.000 Lt Verkehrsbelastung vorwegnehmen
- Höheres Schwellengewicht, Schwellenform und Schwellenbesohlung beeinflussen den QVW positiv (Bei B07 So gegenüber B70 +29 %, stat. QVW)
- Der Anstieg des QVW durch den DGS variiert in Abhängigkeit des Schwellentyps (B70 → +22 %; B07 So → +10 %, stat. QVW)
- Der dynamische QVW ist um 38 % - 57 % geringer als der statische QVW
- Nach einer Betriebsbelastung von 1,5 Mio. Lt ist von einem konsolidierten Schotterbett auszugehen. Die Konsolidierung ist annähernd abgeschlossen und der QVW steigt kaum weiter an.
- Ist der Ausgangswert des QVW nach der Durcharbeitung hoch und der weitere Zuwachs entsprechend geringer, ist die Entwicklungswahrscheinlichkeit von Gleislagefehlern kleiner.

4.3.2.2 Gleislage

Die Auswertung der Gleislage erfolgte anhand der Differenz der Höhenlage nach 100.000 Lt und 1,5 Mio. Lt zur Ausgangslage nach dem Umbau, demnach vor einer Betriebsbelastung. Diese Vorgehensweise erfolgte in Anlehnung der Auswertung der durch die DB Netz AG betreuten Master's Thesis [33]. Die Ergebnisse der Gleislage der Feldmessung in Hildesheim sind in Abbildung 38 gezeigt. Die Differenz der Ausgangslage zur Höhenlage nach 100.000 Lt wird durch die blauen Säulen und zur Höhenlage nach 1,5 Mio. Lt durch die roten Säulen dargestellt. Das erste Säulenpaar (von links) zeigt die Setzungen des Versuchsabschnittes ohne den Einsatz des DGS der Schwelle B07 So. Das zweite Säulenpaar die Ergebnisse der Schwelle B07 So bei dem der DGS eingesetzt wurde. Das dritte und vierte Säulenpaar zeigt die Setzungen der Schwelle B70, erst ohne den Einsatz des DGS und dann mit dem Einsatz des DGS.

In den ersten 100.000 Lt tritt der größte Anteil an der Gesamtsetzung auf. In den Versuchsabschnitten, in denen der DGS das Gleis stabilisiert, treten geringere Setzungen auf als in denen der DGS nicht zum Einsatz kommt. Diese Differenz wird

durch den DGS homogen vorweggenommen, als dies unter Betriebsbelastung erfolgt. Generell gilt, je geringer die Setzungen im Gleis unter Verkehrsbelastung sich ausbilden können, desto geringer ist die Entwicklungswahrscheinlichkeit, das Gleislagefehler entstehen können. Dieses Schotterverhalten deckt sich mit den Erkenntnissen von Kienzer aus dem Jahr 1983, dass ein gut verdichtetes Schotterbett große Achslasten ohne größere Verformungen aufnehmen kann [46].

Durch die vorliegenden Ergebnisse kann der Unterschied der Ausgangslage der Schwelle B70 und B07 So untersucht werden. Es zeigt sich, dass die Setzungen der B07 So gegenüber der B70 geringer sind. Dies ist neben der Besohlung auch durch die größere Schwellengrundfläche zu begründen. Die Schwellengrundfläche der Schwelle B07 So beträgt 6.688 cm². Im Vergleich dazu beträgt die Schwellengrundfläche der Schwelle B70 5.700 cm² [47, 48].

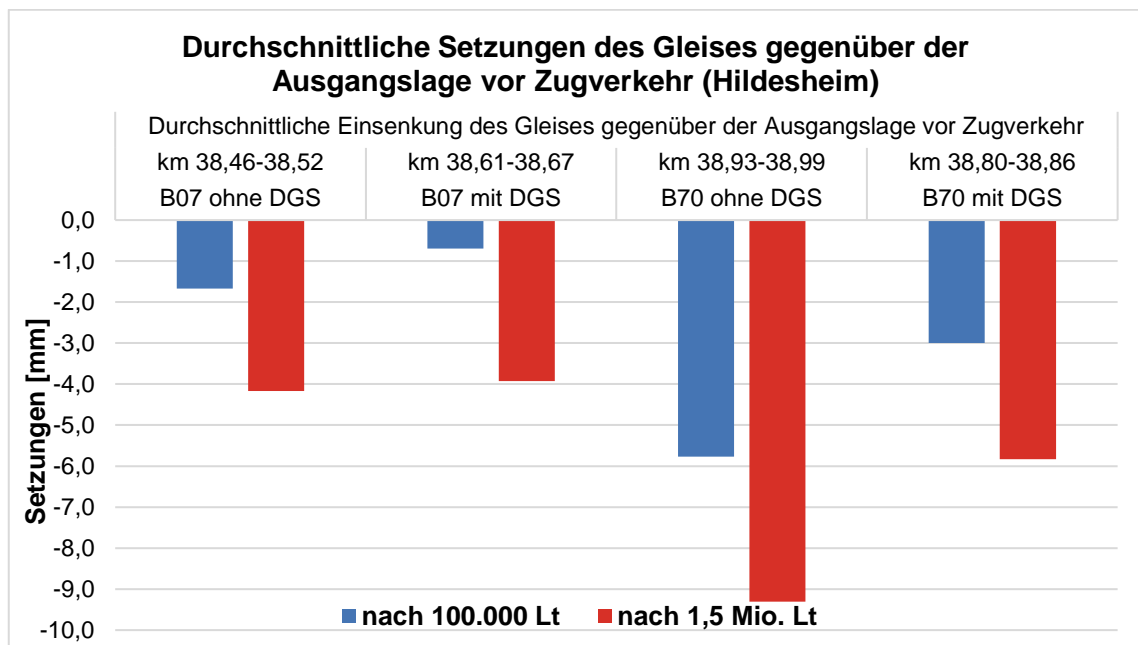


Abbildung 38: Feldmessung Hildesheim - Durchschnittliche Setzungen des Gleises gegenüber der Ausgangslage vor Zugverkehr

Aus den Gleislagemessungen in Hildesheim lassen sich folgende Aussagen formulieren:

- Der DGS wirkt sich positiv auf die Gleislage, durch eine geringere Setzung in Bezug auf die Ausgangslage, aus.
- Eine große Schwellengrundfläche in Verbindung mit einer Schwellenbesohlung bewirkt eine geringere Setzung.

4.3.2.3 Beschleunigungsmessung

Bei der Feldmessung in Hildesheim konnten vier Stopfgänge, indem der DGS zum Einsatz kam, beschleunigungsmesstechnisch begleitet werden. Die Tabelle 18 zeigt für die Schwellen B70, B90 und B07 So die Mittelwerte des maximalen gleitenden

Effektivwertes der Beschleunigung sowie die Wegamplituden getrennt für den Einsatz des DGS beim Hebe- und Verdichtgang (HuV), bei dem verlorenen Stopfgang sowie bei der 1. und 2. Stabilisierung (1. und 2. Stabi). Eine Zusammenstellung der ausführlichen Messergebnisse ist in Anlage A.7 zu finden. Aufgrund eines Defekts des lateralen Beschleunigungssensors der Schwelle B90 konnten hier nur die ersten beiden Überfahrten des DGS (HuV und verlorenen Stopfgang) ausgewertet werden.

Tabelle 18: Zusammenstellung der maximalen effektiven Gleitwerte der Beschleunigung und der maximalen Wegamplituden aus der Feldmessung Hildesheim

Hildesheim	Gewicht Schwelle	Parameter des DGS		max. effektiver Gleitwert d. Beschl.		max. Wegamplitude	
		Auflast	Frequ. [Hz]	horiz. [m/s ²]	verti. [m/s ²]	horiz. [mm]	verti. [mm]
B70 - Mittelwert	300 kg		31	44,1	16,1	1,3	0,3
B70 - HuV	300 kg	70 bar	31	40,1	9,8	1,3	0,3
B70 - verloren	300 kg	60 bar	31	37,1	10,4	1,3	0,4
B70 - 1. Stabi	300 kg	60 bar	31	51,0	20,1	1,3	0,3
B70 - 2. Stabi	300 kg	50 bar	31	48,0	24,3	1,3	0,3
B90 - Mittelwert	355 kg		31	39,4	14,9	1,3	0,3
B90 - HuV	355 kg	70 bar	31	40,9	9,3	1,3	0,2
B90 - verloren	355 kg	60 bar	31	37,8	-	1,2	-
B90 - 1. Stabi	355 kg	60 bar	31	-	13,1	-	0,3
B90 - 2. Stabi	355 kg	50 bar	31	-	22,3	-	0,3
B07 So - Mittelwert	360 kg		31	34,1	12,5	1,1	0,4
B07 So - HuV	360 kg	70 bar	31	40,7	11,8	1,2	0,3
B07 So - verloren	360 kg	60 bar	31	26,6	11,5	0,9	0,4
B07 So - 1. Stabi	360 kg	60 bar	31	37,1	16,9	1,2	0,4
B07 So - 2. Stabi	360 kg	50 bar	31	32,1	12,0	1,1	0,3

Bei einem Vergleich des maximalen lateralen effektiven Gleitwertes der Beschleunigung fällt auf, dass bei dem HuV die Werte der B70 (40,1 m/s²), der B90 (40,9 mm/s²) und der B07 So (40,7 mm/s²) auf einem Niveau liegen. Bei den weiteren Überfahrten des DGS ist die laterale Beschleunigung der B70 Schwelle größer als die laterale Beschleunigung der B07 So. Die laterale Beschleunigung der Schwelle B90 des verlorenen Stopfganges liegt mit 37,8 mm/s² im Bereich der Schwelle B70. Mit jedem Stopfgang steigt die Schotterbettstärke und der Konsolidierungsgrad des Schotters. Durch den gleichen Beschleunigungsbereich der B70 und B90 bei dem verlorenen Stopfgang, zeigt sich, dass das Schwellengewicht und die unterschiedlichen Steifigkeiten der Schienenbefestigung bei einer Auflast von 70 bar keinen Einfluss auf die Größe des horizontalen Beschleunigungswertes hat. Der Grund für die größere laterale Beschleunigung der B70 gegenüber der B07 So liegt in der Schwellensole der B07 So.

Die Schwellensohle bewirkt eine bessere Verzahnung mit den Schotterkörnern, wodurch der Reibungskoeffizient gesteigert wird. Die Schwellensohle hat demnach eine dämpfende Wirkung auf die laterale Beschleunigung der Schwelle.

Bei den Feldmessungen konnte festgestellt werden, dass die vertikale Beschleunigung zwei- bis viermal kleiner als die horizontale Beschleunigung ist.

Die maximale laterale Wegamplitude der Schwelle B70 und B90 erreicht im Mittel einen Wert von 1,3 mm. Die laterale Wegamplitude der B07 So liegt im Mittel bei 1,1 mm. Die laterale Wegamplitude des DGS wird in der Arbeitsanweisung von Plasser & Theurer mit 2,5 mm angegeben [43]. Somit entsteht eine Differenz von ca. 50 % der Wegamplitude des DGS zu der lateralen Wegamplitude an der Schwelle. Die Begründung liegt hier in der dämpfenden Wirkung des konsolidierten Schotters sowie in den elastischen Komponenten wie Schiene, Schienenbefestigung und Schwellenbesohlung.

Die B70 und B90 unterscheiden sich maßgeblich neben dem Schwellengewicht in der Schienenbefestigung. Die Zwischenlage der B90 ist elastischer als die der B70. Die B90 und B07 So unterscheiden sich kaum im Schwellengewicht und nur gering in der Elastizität der Schienenbefestigung. Demnach muss die etwas kleinere laterale Wegamplitude der Schwelle B07 So (1,1 mm) im Gegensatz zu der Wegamplitude der Schwelle B90 bzw. B70 (1,3 mm) aus der dämpfenden Wirkung der Schwellenbesohlung kommen.

Die vertikale Wegamplitude hingegen liegt im Mittel für alle Schwellentypen bei einem Wert von 0,3 mm.

Abbildung 39 zeigt die spektrale Auswertung der Beschleunigung am Beispiel der Schwelle B07 So. Die erste harmonische Frequenz der Schwellenanregung entspricht der Erregerfrequenz des DGS, alle weiteren sind ein Vielfaches der Erregerfrequenz.

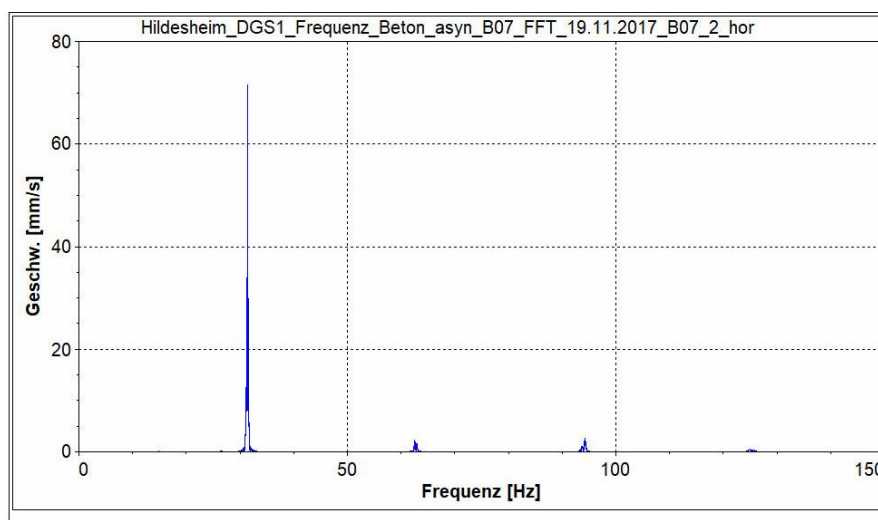


Abbildung 39: Spektrale Auswertung der Schwellenbeschleunigung, exemplarisch an der Schwelle B07 So

In Abbildung 40 ist ein exemplarischer Verlauf für die Schwinggeschwindigkeit bei einer Stabilisierung durch den DGS dargestellt. Im Abstand der Rollenteller entstehen zwei Maxima. Zwischen den zwei Maxima geht die Schwinggeschwindigkeit gegen Null. Die Begründung erfolgt in Kapitel 4.3.3.

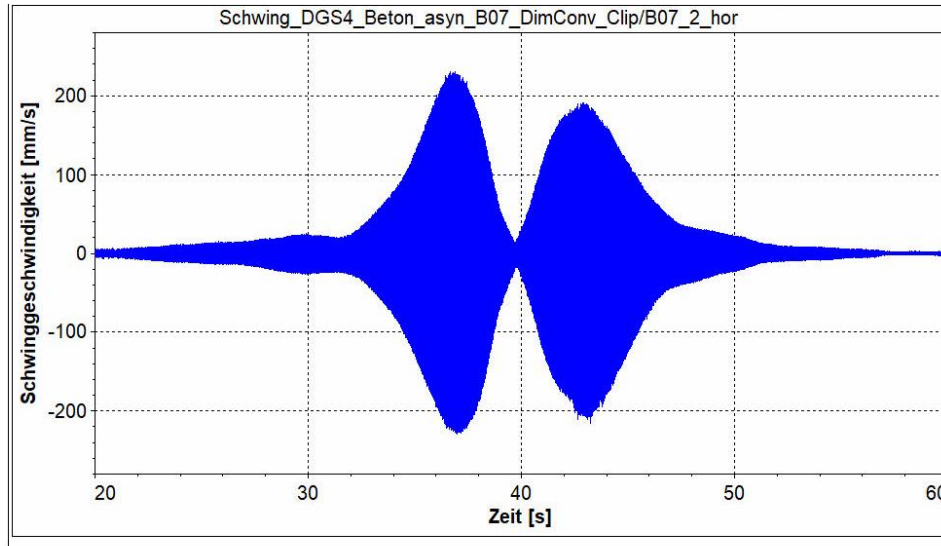


Abbildung 40: Exemplarischer Verlauf der Schwinggeschwindigkeit [mm/s] bei einer Auflast von 260 kN

Aus den Feldmessungen in Hildesheim lassen sich abschließend folgende Erkenntnisse festhalten.

- Die Schwellenbeschleunigung nimmt tendenziell mit steigendem Konsolidierungsgrad ab.
- Durch eine Schwellenbesohlung kommt es zu einem besseren Verbund zwischen Schotter und Sohle wodurch die Schwellenbeschleunigung im Vergleich zu unbesohlenen Schwellen abnimmt.
- Die Schotterbettung und elastische Elemente wie die Schienenbefestigung dämpfen die laterale Wegamplitude des DGS (2,5 mm) um ca. 50 %. Sodass eine laterale Wegamplitude von ca. 1,3 mm an der Schwelle gemessen wird. Durch die Schwellenbesohlung reduziert sich die laterale Wegamplitude auf 1,1 mm.
- Die vertikale Beschleunigung ist zwei- bis viermal kleiner als die horizontale Beschleunigung.
- Zwischen den beiden Maxima entsteht ein lokales Minimum, welches gegen Null geht.

4.3.3 Erkenntnisse aus bisherigen Feldmessungen

Bei dem Vergleich der Beschleunigungsmessergebnisse der beiden Feldmessungen Nörten-Hardenberg und Hildesheim konnten ähnliche maximale gleitende Effektivwerte

der Beschleunigung festgestellt werden. Allerdings besteht ein markanter Unterschied in den Verläufen der Schwinggeschwindigkeit, wie in Abbildung 41 zu sehen ist.

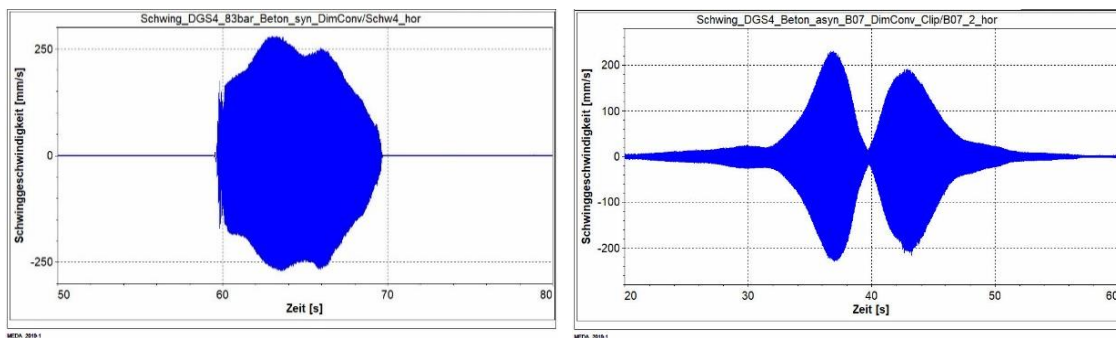


Abbildung 41: Verlauf der Schwinggeschwindigkeit der Schwelle, links - Nörten-Hardenberg, rechts – Hildesheim

Bei beiden Verläufen sind zwei Maxima zu sehen, die sich im Abstand der Unwuchten von 1.600 mm befinden. Weiterhin gibt es bei beiden Verläufen zwischen den Maxima ein lokales Minimum. Bei der Feldmessung Nörten-Hardenberg beträgt das lokale Minimum ca. 80 % – 90 % der maximalen Schwinggeschwindigkeitsamplitude. Das lokale Minimum bei der Feldmessung Hildesheim hingegen geht gegen Null. Aufgrund der technischen Möglichkeiten des DGS wurde die These aufgestellt, dass in Nörten-Hardenberg die Unwuchten synchron liefen und in Hildesheim gegenläufig bzw. asynchron. Durch gegenläufig arbeitende Unwuchten entsteht eine asynchrone Schwingung, die über die Schiene auf die Schwelle und den Oberbau übertragen wird. Hierbei könnte es in der Mitte zwischen den Unwuchten zu einer Interferenz der Schwellenbeschleunigung kommen. Weder die Baufirma noch die Maschinenbediener konnten Auskunft darüber geben wie die Unwuchten eingestellt sind.

Aus diesem Grund wurde eine weitere Beschleunigungsmessung erforderlich, bei der eine kontrollierte Steuerung der Unwuchten möglich ist, um die These zu bestätigen.

4.4 Neusiedl

4.4.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Aufgrund der bisherigen Beschleunigungsergebnisse in Nörten-Hardenberg und Hildesheim wurde eine weitere Feldmessung durchgeführt, um die synchrone und asynchrone Anregung der Stabilisationsaggregate des DGS zu untersuchen.

Die Messung fand im Netz der ÖBB auf der Strecke 1952 Purbach – Neusiedl a. See statt und wurde im Zuge einer Instandhaltungsstopfung mit der Stopfmaschine des Typs 09-4X E³ mit im Verbund laufendem DGS durchgeführt. Wie sich vor Ort herausstellte, wurden in den drei Nächten vom 17.04.2018 bis 20.04.2018 drei Messungen auf

unterschiedlichen Oberbauformen durchgeführt. In dem Versuchsabschnitt der ersten Nacht sind Holzschwellen mit einer Pandrol Befestigung, in der zweiten Nacht Betonschwellen des Typs L2 mit einer W-Befestigung sowie einer üblichen Kunststoffwinkelführungsplatte (Kst-Wfp) und in der dritten Nacht Betonschwellen des Typs 19a mit einer W-Befestigung und Stahlwinkelführungsplatten (Stahl-Wfp) eingebaut. Abbildung 42 zeigt die drei Befestigungssysteme der Versuchsabschnitte.



Abbildung 42: Oberbauformen: links - Holzschwelle mit Pandrol; mitte - Betonschwelle L2 mit Kst Wfp; rechts - Betonschwelle 19a mit Stahl-Wfp

In den ersten beiden Nächten arbeitet der DGS mit einer synchronen Schwingung der Unwuchten. Am 19.04.2018 wurden dann die Unwuchten des Aggregats umgebaut, sodass in der dritten Nachtschicht der DGS mit einer asynchronen Schwingung arbeitete. Der DGS wurde bei einer Auflast von 320 kN (90 bar) und einer Schwingfrequenz von 32 Hz eingesetzt. Die Maschinenparameter waren in allen drei Nachtschichten gleich. Tabelle 19 gibt eine Übersicht der Oberbauformen in den jeweiligen Versuchsabschnitten mit den Einstellungsparametern des DGS.

Tabelle 19: Übersicht der Oberbauformen und Maschineneinstellung des DGS der Versuchsabschnitte

Schwelle	Gewicht [kg]	Befestigung	Wfp	Schiene	Schwingung des DGS	Auflast [kN]	Frequenz [Hz]
Holz	100	Pandrol	-	54E	synchron	320	32
Beton L2	290	W	Kst	49E1	synchron	320	32
Beton 19a	290	W	Stahl	S49	asynchron	320	32

Die Beschleunigungsaufnehmer Bruel&Kjaer 4370 mit Ladungswandler 2646 wurden wie in Kapitel 3.2 beschrieben installiert. Mit Hilfe von Schaumstoffabdeckungen wurden die Beschleunigungssensoren vor durch die Stopfung möglicherweise aufwirbelnden Schotterkörnern geschützt (siehe Abbildung 43).



Abbildung 43: links - Beschleunigungssensor; rechts - Schutz der Messtechnik

4.4.2 Ergebnisse und Auswertung

Die folgende Auswertung basiert auf drei Messungen von drei hintereinanderliegenden Schwellen. In Tabelle 20 sind die Mittelwerte der maximalen effektiven Gleitwerte der Beschleunigung sowie die maximalen Wegamplituden dargestellt. Die vollständigen Ergebnisse finden sich im Anhang A.8. Der maximale horizontale effektive Gleitwert der Beschleunigung beträgt für die Holzschwelle 23,0 m/s², gefolgt von der Schwelle L2 mit 29,5 m/s² und für die Schwelle 19a 41,7 m/s². Der größte Wert zeigt sich hier bei der Betonschwelle, bei der die W-Befestigung mit einer Stahlwinkelführungsplatte ausgerüstet ist, und asynchron angeregt wurde. Durch diese relativ steife Verbindung werden die eingebrachten horizontalen Schwingungen ohne große Verluste in die Schwelle weitergeleitet. Die Holzschwelle hingegen mit der Schienenbefestigung Pandrol Federbügel hat im Vergleich die elastischste Verbindung, was sich ebenfalls in der geringen Beschleunigung widerspiegelt. Es kann aufgrund der unterschiedlichen Oberbausysteme nicht geklärt werden, welchen Einfluss die synchrone bzw. asynchrone Schwingweise auf die Größe der Messergebnisse hat.

Tabelle 20: Zusammenstellung der maximalen effektiven Gleitwerte der Beschleunigung und der maximalen Wegamplituden aus der Feldmessung Neusiedl a. See

Neusiedl a. See	Spezifikation und Einstellungen des DGS		max. effektiver Gleitwert d. Beschl.		max. Wegamplitude	
	Gewicht Schwelle	Unwucht	horiz. [m/s ²]	vert. [m/s ²]	horiz. [mm]	vert. [mm]
Holzschwellen	100 kg	syn.	23,0	26,3	0,6	0,4
L2 Betonschwellen	290 kg	syn.	29,5	17,3	0,9	0,2
19a Betonschwellen	290 kg	asyn.	41,7	42,4	1,3	0,3

Die horizontale Wegamplitude ist bei der Holzschwelle mit 0,6 mm etwas geringer als bei den Betonschwellen (L2 – 0,9 mm; 19a – 1,3 mm). Die Unterschiede der Wegamplituden kann neben den variierenden steifen Befestigungssystemen auch an unterschiedlich stark konsolidierten Schotter liegen. Bei dieser Feldmessung wurden keine Querverschiebewiderstände gemessen, weshalb hier keine Aussage über den Konsolidierungsgrad des Schotters getroffen werden kann.

Die Beton- und Holzschwellen, ob synchron oder asynchron durch die Unwucht des DGS angeregt, zeigen als erste Frequenz der spektral ausgewerteten Beschleunigung ca. 32 Hz. Diese stimmen mit den an der Maschine eingestellten Erregerfrequenz überein. Abbildung 44 zeigt exemplarisch das Frequenzspektrum einer durch die Unwuchten des DGS angeregten Schwelle mit der entsprechenden spektralen Schwingschnelle.

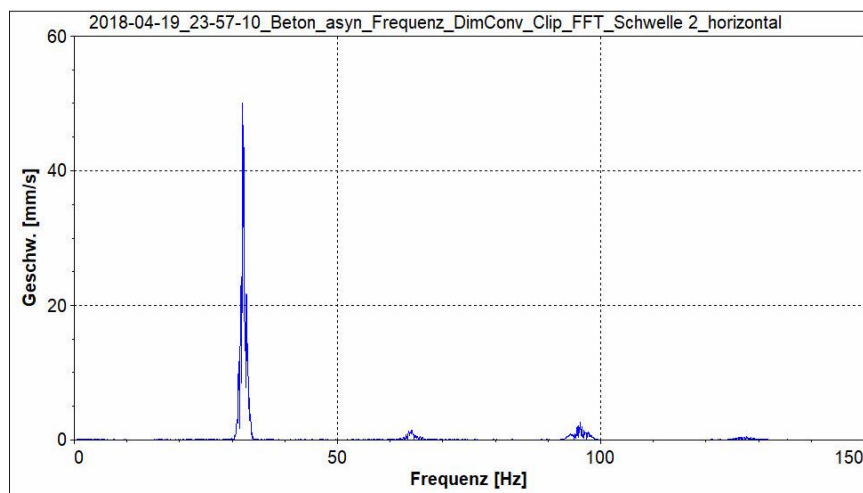


Abbildung 44: Exemplarisches Frequenzspektrum der Betonschwelle 19a unter asynchroner Anregung

In den grafisch dargestellten Verläufen der lateralen Schwinggeschwindigkeit zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen der synchron (Abbildung 45, Abbildung 46) und asynchron (Abbildung 47) laufenden Unwucht. Bei der synchronen und asynchronen Schwingweise der Unwuchten des DGS, wird jeweils zwischen den beiden horizontalen Rollenteller bzw. Unwuchten, die im Abstand von 1.600 mm angeordnet sind, ein lokales Minimum in der Schwinggeschwindigkeit beobachtet.

Bei der synchronen Anregung liegt ein lokales Minimum von ca. 80 % – 90 % der maximalen Amplitude der Schwinggeschwindigkeit vor. Die Abbildung 45 und Abbildung 46 zeigen die Verläufe durch eine synchrone Anregung. Dies kann durch die Interferenz von unterschiedlichen Schwingungsformen erklärt werden.

Bei der asynchronen Einstellung liegt ein Minimum mit einer Amplitude von annähernd Null vor (siehe Abbildung 47). Dies kann durch die Gegenläufigkeit der Unwucht und

somit der beiden horizontalen Rollenteller erklärt werden, sodass sich genau in der Mitte eine Interferenz der Schwingungen ausbildet.

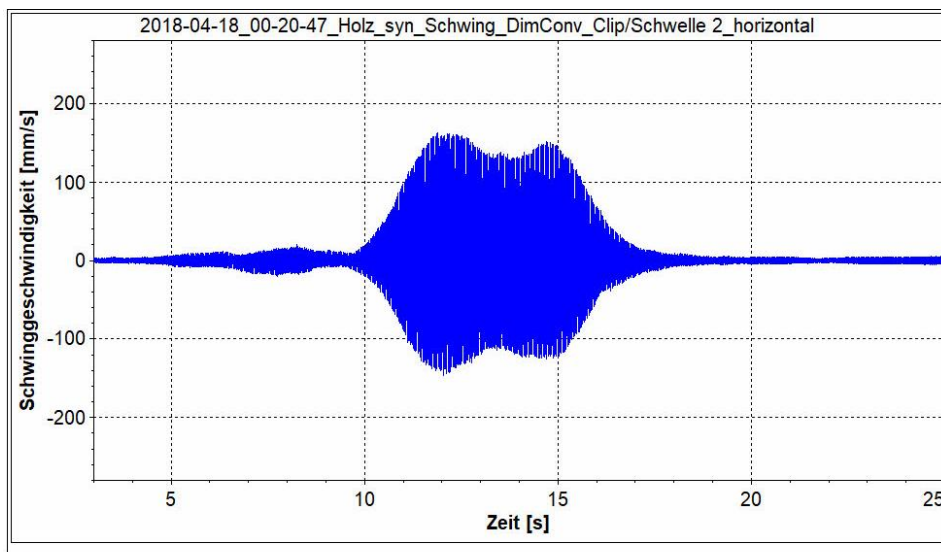


Abbildung 45: Exemplarischer Verlauf der Schwinggeschwindigkeit der Holzschwelle unter synchroner Anregung durch den DGS

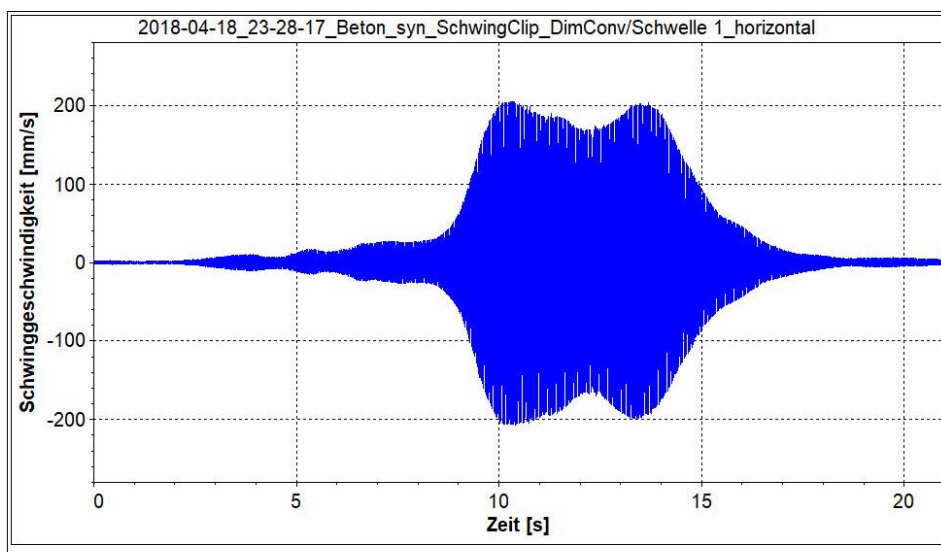


Abbildung 46: Exemplarischer Verlauf der Schwinggeschwindigkeit der Betonschwelle L2 unter synchroner Anregung durch den DGS

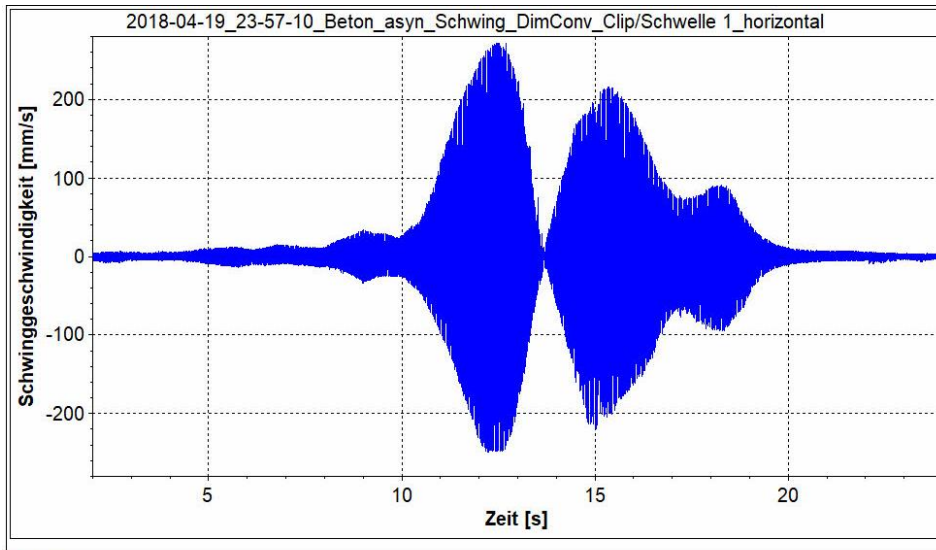


Abbildung 47: Exemplarischer Verlauf der Schwinggeschwindigkeit der Betonschwelle 19a unter asynchroner Anregung durch den DGS

Die Abbildung 48 (synchrone Anregung) und Abbildung 49 (asynchrone Anregung) zeigen einen ein-sekündigen Ausschnitt der Beschleunigungssequenz. Bei einer synchronen Anregung zeigt sich ein harmonischer Verlauf. Bei der asynchronen Anregung hingegen wird der harmonische Verlauf durch eine breitbandige deutlich kleinere Anregung überlagert, die im weiteren Verlauf als Rauschen bezeichnet wird. Die Schwelle wird stochastisch angeregt. Welche Anregung, ob harmonisch oder stochastisch, beispielsweise in Bezug auf den QVW von Vorteil ist, konnte bei dieser Feldmessung nicht geklärt werden. Da aufgrund der betrieblichen Verhältnisse keine QVW-Messung durchgeführt werden konnte.

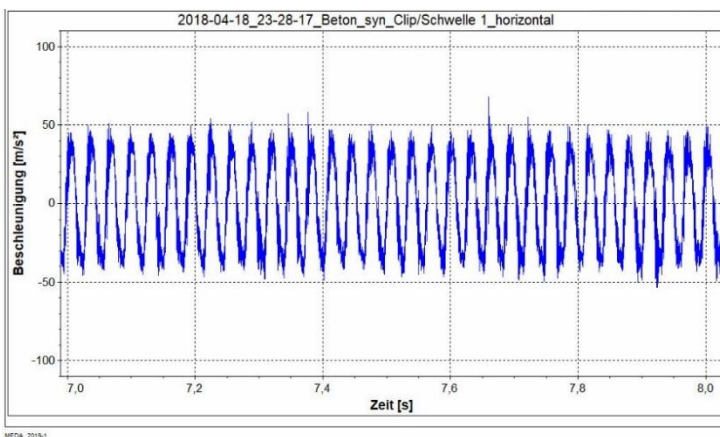


Abbildung 48: Messung Neusiedl, Betonschwelle L2, Ausschnitt der horizontalen Schwellenbeschleunigung bei synchroner Anregung

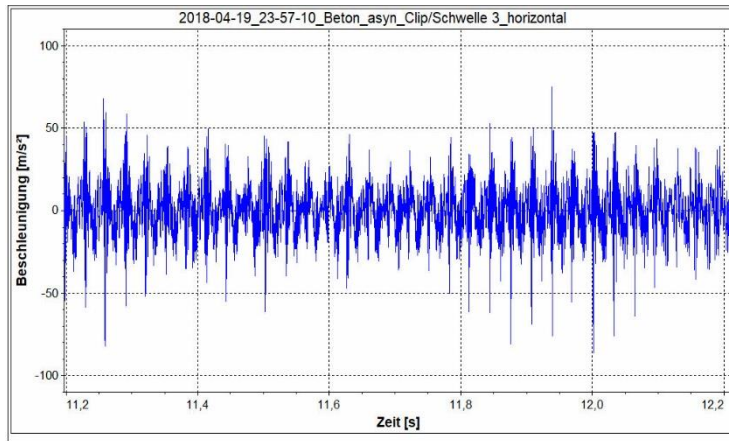


Abbildung 49: Messung Neusiedl, Betonschwelle 19a, Ausschnitt der horizontalen Schwellenbeschleunigung bei asynchroner Anregung

In Neusiedl a. See sollte das Verhalten der Schwellenbeschleunigung durch eine synchrone bzw. asynchrone Anregung des DGS untersucht werden. Aufgrund der unterschiedlichen Oberbausysteme konnte nicht geklärt werden, welchen Einfluss die Schwingweise auf die Absolutwerte der Schwellenbeschleunigung hat. Folgende Erkenntnisse können aus dieser Feldmessung festgehalten werden:

- Durch eine steife Schienenbefestigung bzw. ein wenig elastisches Oberbausystem werden die Schwellenbeschleunigungen größer im Vergleich zu elastischeren Schienenbefestigungen bzw. Oberbausystemen.
- Die erste Frequenz der spektral ausgewerteten Schwellenbeschleunigung entspricht der eingestellten Erregerfrequenz des DGS.
- Durch Interferenzen von unterschiedlichen Schwingungsformen entsteht ein lokales Minimum zwischen den Maxima, die sich unter den Unwuchten im Abstand von 1.600 mm ausbilden.
- Bei asynchron schwingenden Unwuchten hebt sich aufgrund der Interferenzen die Schwinggeschwindigkeit der Schwellen in der Mitte der Unwuchten annähernd auf.

4.4.3 Erkenntnisse aus bisherigen Feldmessungen

In Neusiedl a. See wurde für die Betonschwelle L2 ein maximaler effektiver Gleitwert der lateralen Beschleunigung von 29,5 m/s² gemessen. In Hildesheim konnte hingegen für die B70 eine laterale Beschleunigung von 44 m/s² ermittelt werden. Die Betonschwelle L2 und die B70 sind in Schwellenform und Schwellengewicht ähnlich. Ebenfalls waren die Steifigkeiten der Schienenbefestigungssysteme der L2 und B70 bei den Messungen äquivalent. Die Begründung für diese Differenz der beiden Messergebnisse kann in der unterschiedlich eingestellten Auflast bei der Stabilisierung mit dem DGS liegen. In Neusiedl a. See wurde mit 90 kN (+/- 30 kN) mehr Auflast stabilisiert als in Hildesheim.

Durch die größere Auflast wird die Schwelle stärker ins Schotterbett gedrückt, der Reibungskoeffizient steigt, wodurch die Schwellenbeschleunigung gedämpft wird.

4.5 Langenschwarz

4.5.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Auf der Strecke 1733 Kassel – Fulda in Höhe von Langenschwarz wurde an sechs Schwellen die Beschleunigung der Schwelle durch die Anregung eines DGS im Zuge einer Umbaumaßnahme gemessen. Die Strecke ist mit der vollflächig beschliffenen Schwelle B07 So, einer W-Befestigung mit einer Kunststoff-Winkelführungsplatte, der Spannklemme Skl 21 und einer Schiene 60E2 ausgerüstet. Der Schwellenabstand beträgt 60 cm. Drei Schwellen wurden mit dem Beschleunigungssensor Bruel&Kjaer 4370 mit Ladungswandler 2646 und drei Schwellen mit Bruel&Kjaer 4397A ausgerüstet, wie exemplarisch Abbildung 50 zeigt.



Abbildung 50: Beschleunigungsaufnehmer links: Bruel&Kjaer 4370, rechts: Bruel&Kjaer 4397A

Es konnte während zwei Überfahrten, dem Hebe- und Verdichtgang (HuV) und der 1. Stabilisierung, gemessen werden. In beiden Fällen war die Schwingfrequenz auf 32 Hz eingestellt. Der DGS stabilisierte bei dem HuV mit einer Auflast von 260 kN (70 bar) und bei der 1. Stabi mit 230 kN (60 bar). Dies bestätigte sich durch den Messschieb der Stopfmaschine (bar) sowie durch die Spektralanalyse der Beschleunigungsergebnisse ($\text{m/s}^2 \rightarrow \text{Hz}$).

4.5.2 Ergebnisse und Auswertung

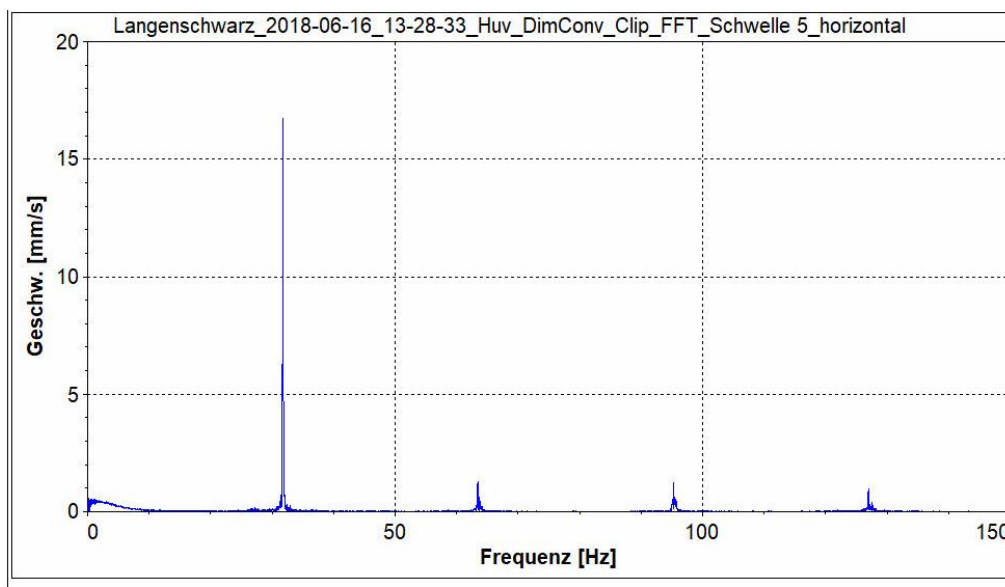
Die Ergebnisse des maximalen gleitenden Effektivwerts und die maximale Wegamplitude der Feldmessung Langenschwarz sind in Tabelle 21 zusammengestellt. Weitere Ergebnisse finden sich in Anlage A.9. Bei dem Hebe- und Verdichtgang (HuV) konnte eine Beschleunigung der Schwelle B07 So von $82,5 \text{ m/s}^2$ gemessen werden. Diese ist um 45 % größer als die gemessene Beschleunigung bei der 1. Stabilisierung.

Der Grund für diese Reduzierung kann die fortschreitende Steigerung des Konsolidierungsgrads nach jeder Stabilisierung sein. Gleichzeitig sinkt die laterale Wegamplitude von 1,4 mm bei dem HuV auf 0,9 mm bei der 1. Stabi. Dies ist ebenfalls ein Indiz, dass die Schwelle aufgrund der besseren Einbettung in den Schotter und so mit steigendem Reibungskoeffizienten eine kleinere Wegamplitude erreicht.

Tabelle 21: Zusammenstellung der maximalen effektiven Gleitwerte der Beschleunigung und der maximalen Wegamplituden aus der Feldmessung Langenschwarz

Langenschwarz	Einstellungen des DGS		max. effektiver Gleitwert d. Beschl.		max. Wegamplitude	
	Auflast	Frequenz [Hz]	horiz. [m/s ²]	vert. [m/s ²]	horiz. [mm]	vert. [mm]
B07 So - Mittelwert	70 bar	32	72,2	44,5	1,1	1,0
B07 So - HuV	70 bar	32	82,5	69,2	1,4	1,7
B07 So - 1.Stabi	60 bar	32	56,8	19,7	0,9	0,2

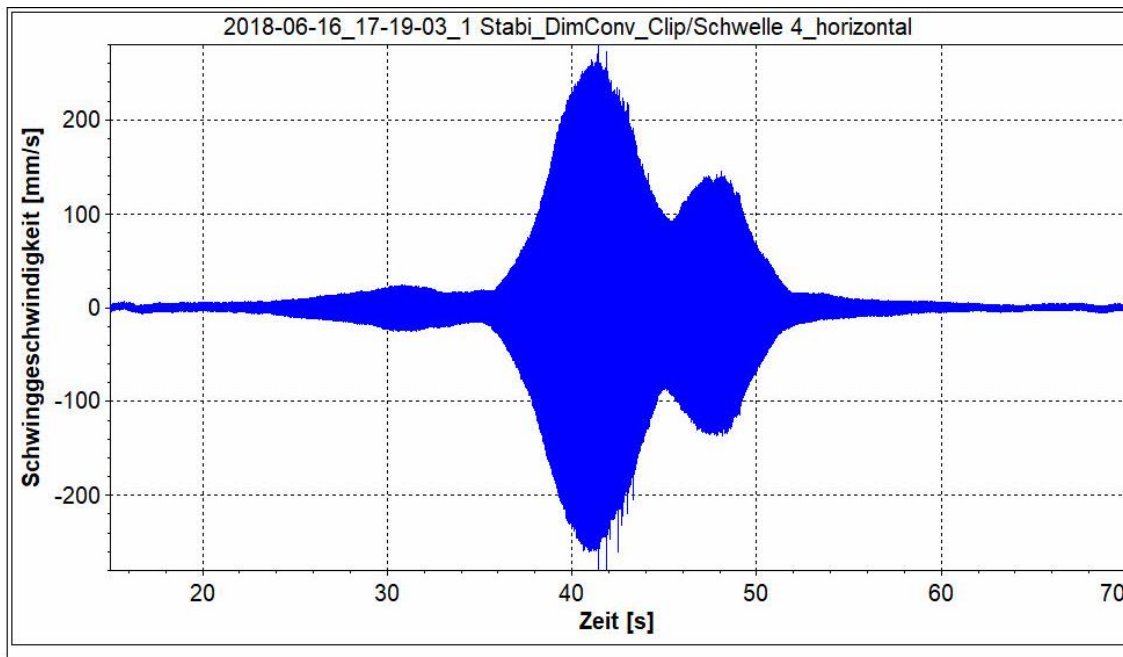
Abbildung 51 zeigt als erste Frequenz der spektral ausgewerteten Schwellenbeschleunigung 32 Hz. Diese Frequenz entspricht der Anregungsfrequenz durch den DGS.



MEDA 2019-1

Abbildung 51: Exemplarisches Frequenzspektrum der Schwellenbeschleunigung - Langenschwarz

Die grafische Darstellung der Schwinggeschwindigkeit der Schwelle ist in Abbildung 52 dargestellt. Der Verlauf der Schwinggeschwindigkeit lässt den Schluss zu, dass in Langenschwarz der DGS mit synchron schwingenden Unwuchten stabilisiert hat. Das zweite Maximum ist deutlich kleiner als das erste. Diese Differenz ist ein Hinweis, dass eine Unwucht ggf. nicht die eingestellten Maschinenparameter erreicht hat.



MEDA 2019-1

Abbildung 52: Exemplarischer Verlauf der Schwingungsgeschwindigkeit der Schwelle unter synchroner Anregung durch den DGS

Aus der Feldmessung in Langenschwarz können folgende Ergebnisse zusammengefasst werden:

- Mit einem hohen Konsolidierungsgrad des Schotters nimmt die Schwellenbeschleunigung ab.
- Der Verlauf der Schwingungsgeschwindigkeit gibt Aufschluss über die korrekte Arbeitsweise der Unwuchten.

4.5.3 Erkenntnisse aus bisherigen Feldmessungen

Bei der quantitativen Betrachtung der Messergebnisse Hildesheim und Langenschwarz fällt auf, dass die Schwellenbeschleunigung aus Langenschwarz bei dem HuV doppelt so groß ist wie bei der vergleichbaren Messung in Hildesheim. Bei einem Vergleich der Schwellenbeschleunigung von der 1. Stabi nähern sich die Ergebnisse langsam wieder an. In Hildesheim wurde eine Schwellenbeschleunigung von $37,1 \text{ m/s}^2$ und in Langenschwarz von $56,8 \text{ m/s}^2$ bei der 1. Stabi gemessen. Bei der 1. Stabi wurde in Langenschwarz mit einer etwas geringeren Auflast (230 kN) als in Hildesheim (260 kN) gearbeitet. Ein weiterer Vergleich der Schwellenbeschleunigung nach der 2. Stabi ist nicht möglich, da diese Stabilisierung in Langenschwarz nicht gemessen wurde. Diese Ergebnisse, des HuV und der 1. Stabi, sind ein Hinweis, dass nicht nur die Maschinenparameter wie Schwingfrequenz und Auflast, sondern auch weitere Randbedingungen die Höhe der Schwellenbeschleunigung beeinflussen. Neben Umwelteinflüssen spielt der Konsolidierungsgrad des Schotters eine entscheidende Rolle. Ein Indiz dafür ist, dass sich bei der zweiten Stabilisierung mit dem DGS die

Schwellenbeschleunigungen, bei den gleichen Oberbauformen und fast den gleichen Maschinenparametern angleichen.

4.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Mit den verschiedenen Feldmessungen konnten Erkenntnisse zu den Themen: Querverschiebewiderstand, Gleislage, Schwellenbeschleunigung und möglicher Verschleiß des Schotters gewonnen werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse der verschiedenen Feldmessungen thematisch zusammengefasst.

Aus den Ergebnissen der QVW-Messungen in Wiesloch und Hildesheim kann die Vorwegnahme einer Konsolidierung des Schotters äquivalent zu 100.000 Lt Verkehrsbelastung durch den DGS für die Schwellen B70 und B07 So festgehalten werden. Der Anstieg des QVW durch den Einsatz des DGS variiert je nach Schwellentyp zwischen 10 % und 30 %. Dieser Faktor wird auch durch die individuellen Randbedingungen der jeweiligen Messstelle beeinflusst. Hierzu gehören u.a. die Witterung, der Konsolidierungsgrad des Schotters, der Verschmutzungsgrad des Schotters und die Untergrundverhältnisse.

Grundsätzlich wird der QVW positiv durch ein höheres Schwellengewicht, eine Einschnürung der Schwellenform sowie durch eine Schwellenbesohlung beeinflusst. Auf Grund dieser Eigenschaften der B07 So wurde ein um 29 % höherer QVW im Vergleich zur B70 Schwelle gemessen. Es konnte kein Einfluss auf den QVW durch eine zusätzliche Tragschicht, wie eine PSS, festgestellt werden.

Für eine optimale Wirkung des DGS im Hinblick auf den QVW muss der DGS-Einsatz nach allen Stopfgängen erfolgen. Ein Einsatz nur bei einzelnen Stopfgängen führt nicht zu der gewünschten Verbesserung. Der Zuwachs des QVW ist während der ersten Betriebsbelastung (100.000 Lt) am größten. Weiterhin kann davon ausgegangen werden, dass bei einem hohen Ausgangswert des QVW nach der Durcharbeitung der weitere Zuwachs geringer ist als bei niedrigeren Ausgangswerten. Bei hohen Ausgangswerten des QVW ist auch die Entwicklungswahrscheinlichkeit von Gleislagefehlern kleiner. Nach einer Betriebsbelastung von 1,5 Mio. Lt ist die Konsolidierung annähernd abgeschlossen, da der QVW kaum weiter ansteigt. Es ist von einem konsolidierten Schotterbett auszugehen. Bei den Messungen des dynamischen QVW wurde ein Wert gemessen, der 38 % bis 57 % geringer ist als der statische QVW.

Bildet sich im Gleis unter Betriebsbelastung eine geringere Setzung aus, so ist das Potential für die Entstehung von Gleislagefehlern ebenfalls geringer. Die Messungen in Wiesloch und Hildesheim zeigen jeweils die geringsten Setzungen unter Betriebsbelastung in den Abschnitten, in denen der DGS nach jedem Stopfgang zum Einsatz kam. Weiterhin wurden kleinere Setzungen in den Versuchsabschnitten mit einer zusätzlichen Tragschicht in Form einer PSS gemessen. Eine große Schwellen-

grundfläche in Verbindung mit einer Schwellenbesohlung wirkt sich ebenfalls positiv auf das Setzungsmaß aus.

Anhand der Schotterproben in Wiesloch konnte bei einem einmaligen bzw. dreimaligen Einsatz des DGS kein signifikant erhöhter Schotterverschleiß gegenüber einer Umbaumaßnahme ohne Einsatz des DGS abgeleitet werden. Dieses Ergebnis ist unabhängig vom Vorhandensein einer Planumsschutzschicht.

Der Verlauf der Schwinggeschwindigkeit gibt Aufschluss über die Arbeitsweise der Unwuchten in den Stabilisationsaggregaten des DGS. Durch Interferenzen von unterschiedlichen Schwingungsformen entsteht ein lokales Minimum zwischen den Maxima, die sich unter den beiden Stabilisationsaggregaten des DGS im Abstand von 1.600 mm ausbilden. Bei asynchron schwingenden Unwuchten in den Stabilisationsaggregaten des DGS hebt sich aufgrund der Interferenzen die Schwinggeschwindigkeit der Schwellen in der Mitte der Unwuchten annähernd auf.

Der erste deutliche Peak der Frequenz der spektral ausgewerteten Schwellenbeschleunigung entspricht der eingestellten Erregerfrequenz des DGS. Die Schotterbettung und elastischen Elemente, wie die Schienenbefestigung und Schwellenbesohlung, dämpfen die anregende laterale Wegamplitude des DGS (2,5 mm) bei den untersuchten Betonschwellen um ca. 50 % auf 0,9 mm bis 1,4 mm.

Anhand der Feldmessungen sind verschiedene Tendenzen erkennbar:

- In Neusiedl am See konnten bei Messungen an einem steiferen Oberbausystem größere Schwellenbeschleunigungen als an einem elastischeren Oberbausystem festgestellt werden.
- Eine Steigerung der Auflast - von 180 kN (45 bar) auf 300 kN (83 bar) - führte bei der Messung in Nörten-Hardenberg zu einer Abnahme der Schwellenbeschleunigung.
- In Hildesheim und Langenschwarz konnte beobachtet werden, dass mit steigendem Konsolidierungsgrad die Schwellenbeschleunigungen tendenziell abnehmen.
- Durch eine Schwellenbesohlung und damit einhergehend besserem Verbund zwischen Schotter und Sohle nimmt die Schwellenbeschleunigung im Vergleich zur unbesohlenen Schwelle ab.

Durch diese Beobachtungen zeichnet sich ab, dass eine Abnahme der Schwellenbeschleunigungen infolge hoher Auflasten oder durch die Verwendung einer Schwellenbesohlung zu einer Steigerung des QVW führt. Ein eindeutiger, mathematisch reproduzierbarer Zusammenhang zwischen den beiden Parametern lässt sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht ableiten. Neben den Maschinenparametern (Auflast und Frequenz) spielen auch der Konsolidierungsgrad des Schotters und Umwelteinflüsse eine Rolle.

5 Laborversuche

Mit Hilfe eines maßstabsgetreuen Aufbaus (1:1) kann die Wirksamkeit der aktuellen Einstellungen des DGS (vgl. Kapitel 2.1) und gleichzeitig der Einfluss der Variation der Einstellungsparameter auf die unterschiedlichen Oberbauformen untersucht werden. Aufgrund der in der Praxis verwendeten unterschiedlichen Standardparameter des DGS wurden für die Laborversuche im Einvernehmen mit Plasser & Theurer als Standardparameter eine Stabilisierungsfrequenz von 34 Hz und ein Auflastdruck von 70 bar festgelegt. Diese Parameter liegen im Bereich der Vorgaben der ÖBB sowie der DB. Zunächst wird die Wirksamkeit der aktuellen Einstellungsparameter (34 Hz und 70 bar) festgehalten. Durch das Variieren der Einstellungsparameter des DGS, wie Frequenz und Auflast, kann die Wirksamkeit gegenüber der Standardeinstellung verifiziert werden.

Wie in Kapitel 2.2 erläutert, wurden die drei in Deutschland gängigen Oberbauformen für die Laborversuche ausgewählt. Für jede untersuchte Oberbauform (B70, B07 So und B90) wurden zunächst durch Vorversuche relevante Frequenzen und Auflasten generiert, um diese anschließend bei der Simulation einer DGS Überfahrt genauer zu untersuchen. Im letzten Schritt wurde die Verkehrsbelastung simuliert. Dadurch entstand folgender Ablauf:

- Einbau Oberbauform (B70)
- Vorversuch der Oberbauform (Maschinenparameter variieren – Hz, bar)
- Auswertung der Vorversuche
 - Bestimmung der Frequenz bzw. der Auflast für 2. bzw. 3. Simulation
- Festlegung der Versuchseinstellungen
- 1. Simulation einer Überfahrt mit Standardeinstellung (34 Hz, 70 bar)
- Simulation der Verkehrsbelastung (1,5 Mio.)
- Auflockerung Schotter, Stopfen und Wiederherstellung des Versuchsaufbaus
- 2. Simulation einer Überfahrt mit variierten Frequenz (30 Hz oder 27 Hz, 70 bar)
- Simulation der Verkehrsbelastung (1,5 Mio.)
- Auflockerung Schotter, Stopfen und Wiederherstellung des Versuchsaufbaus
- 3. Simulation (B07 So, B90) einer Überfahrt mit variierten Auflast (34 Hz, 130 bar)
- Simulation der Verkehrsbelastung (1,5 Mio.)

Das Schema in Abbildung 53 zeigt exemplarisch am Schwellentyp B70 den Versuchsablauf:

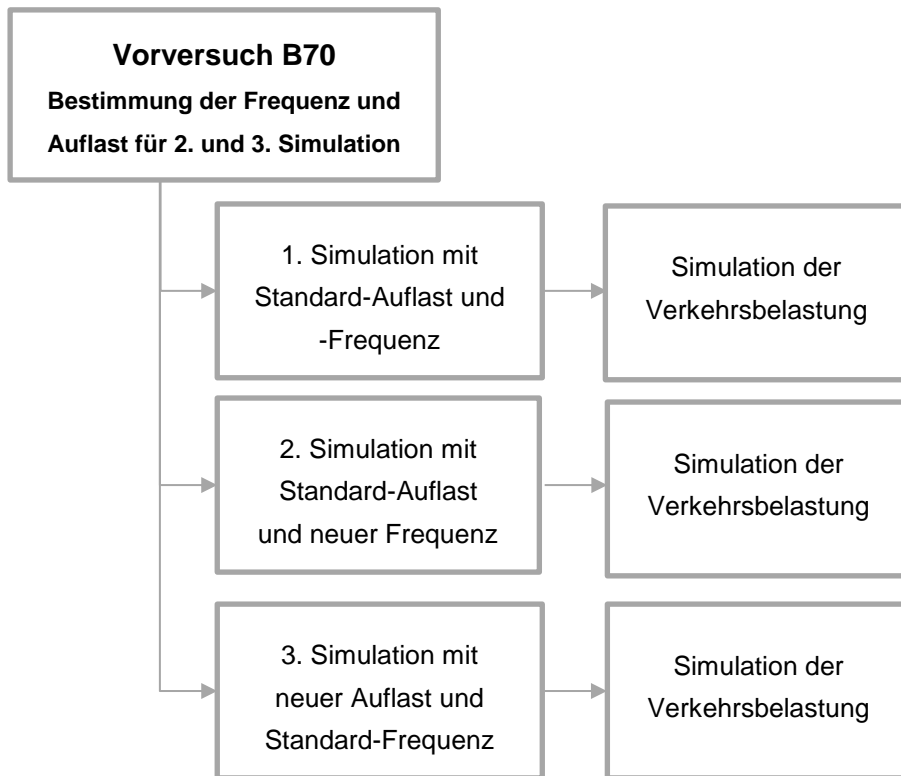


Abbildung 53: Ablauf einer Versuchsreihe am Beispiel der Schwelle B70

Nachdem die Versuchsreihe mit der Schwelle B70 abgeschlossen ist, wird nach dem gleichen Schema die Schwelle B07 So und B90 untersucht. Abschließend werden die Ergebnisse aus der Simulation der Überfahrt und aus der Verkehrsbelastung ausgewertet. Nachfolgend wird zunächst allgemein der Versuchsaufbau sowie die Instrumentierung der Laborversuche beschrieben und anschließend auf die Vorversuche und die Simulation der Überfahrt sowie die Verkehrsbelastung eingegangen.

5.1 Versuchsaufbau

Der Laborversuchsaufbau wurde nach dem Ausrüstungsstandard der Deutschen Bahn, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, ausgebildet. Abbildung 54 und Abbildung 55 zeigen den Aufbau mit den gewählten Abmessungen. Das Versuchsfeld wurde in einen Kasten eingefasst und auf einer Unterschottermatte gelagert, die den Schotter vom Boden des Versuchstandes entkoppelt und zur Simulation des Untergrundes dient. Die Unterschottermatte wurde von der Firma Getzner geliefert mit einer Dicke von 4,5 mm und einer Steifigkeit nach Herstellerangaben von 0,4181 N/mm³. Die Regelböschung (1:1,25) konnte aufgrund von Platzverhältnissen in der Prüfhalle nur einseitig ausgebildet werden. Auf der anderen Seite wurde die Böschung mittels eines Verbaus eingekürzt. Somit ergab sich eine Querschnittsbreite von ca. 4,40 m (Abbildung 54). Die Breite des Schotters vor Kopf von 40 cm blieb davon unberührt. Die folgenden drei Oberbauformen wurden der aufgeführten Reihenfolge entsprechend untersucht:

1. B70 W14 K 687a
2. B07 So W 21 K 1000
3. B90 W 14 K 900

Unter den Schwellen wurde bei den unterschiedlichen Schwellentypen jeweils 30 cm Schotter eingebracht.

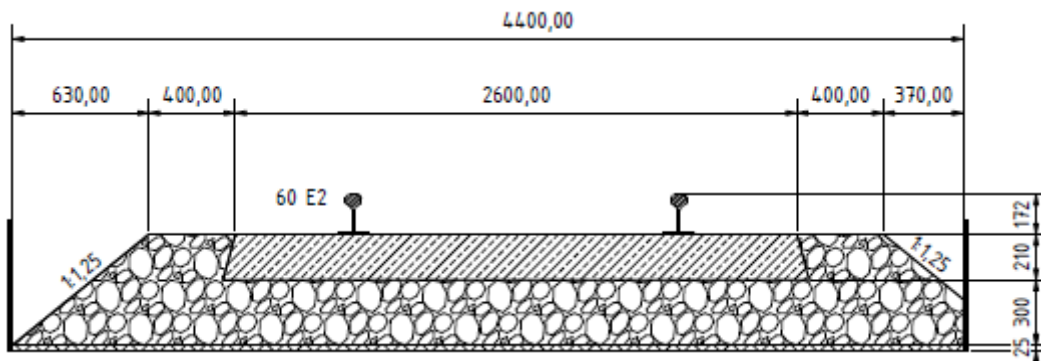


Abbildung 54: Querschnitt des Laborversuchsaufbaus (Maße in mm)

Die Schienenprofile 60E2 waren 5,65 m lang und bildeten mit den gewählten Schwellentypen jeweils einen Gleisrost. Die neun Schwellen wurden mit einem Schwellenabstand von 0,60 m verlegt, wie aus Abbildung 55 zu erkennen.

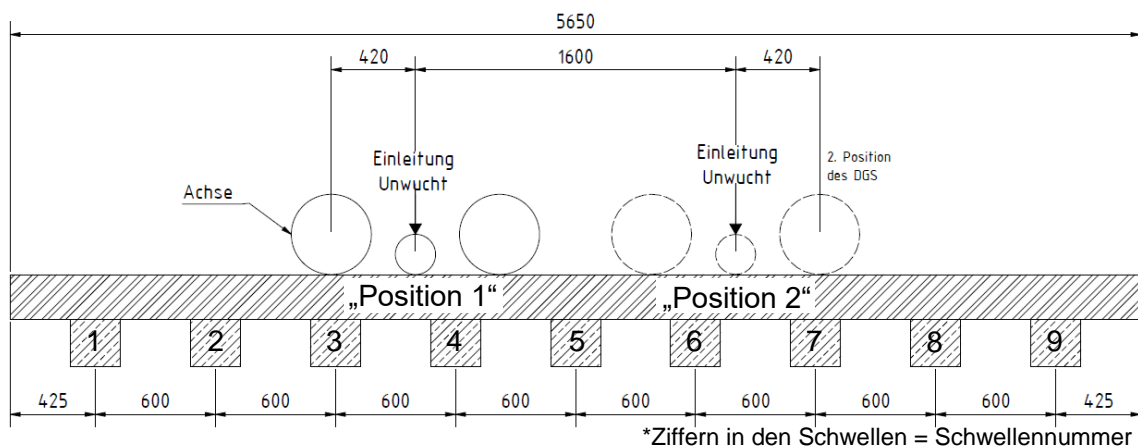


Abbildung 55: Längsschnitt des Laborversuchsaufbaus

Der Aufbau des Oberbaus erfolgte durch die Firma Leonhard Weiß. Zunächst wurde die Unterschottermatte in den Kasten eingelegt. Der Schotter nach DBS 918 061 [35] wurde lagenweise eingebracht und verdichtet. Nachdem der Grundsotter mittels einer Rüttelplatte verdichtet war, wurde der vormontierte Gleisrost auf den Grundsotter gehoben. Anschließend konnte der restliche Schotter eingebracht, der Gleisrost mit Gleiswinden auf Lage gehoben und mittels vertikalen Hand-Schwingstopfern verdichtet werden. In einem nächsten Schritt wurde die Messtechnik appliziert und dann der Dynamische Gleisstabilisator eingehoben.

Für den Laborversuch wurde nur ein Stabilisationsaggregat verwendet. Bei im Gleis eingesetzten DGS werden üblicherweise zwei dieser Stabilisationsaggregate gekoppelt und dieselhydraulisch angetrieben. Im Labor wird das Stabilisationsaggregat, elektrohydraulisch angetrieben, im weiteren DGS genannt. Es ist im Labor mit zwei Auflastzylindern und einer verstellbaren Unwucht, bestehend aus vier Unwuchtscheiben, ausgestattet. Durch die Modifizierungen konnte im Labor die Frequenz zwischen 25 bis 40 Hz und die zwei Auflastzylinder zwischen 40 bar bis 130 bar angefahren werden. Die Parametereinstellung der Auflast erfolgt in bar. Eine Umrechnung in die aufgebrachte Kraft erfolgt durch die beiden Kolbendurchmesser, die üblicherweise bei allen DGS je 100 mm betragen. Im Folgenden ein Beispiel für 70 bar:

$$F = \frac{100^2 \cdot \pi}{4} \cdot \frac{70}{10 \cdot 1000} \cdot 2 = 110 \text{ kN} \quad 5.1$$

Damit ergibt sich eine gesamte minimale Auflast von 60 kN (40 bar) und eine gesamte maximale Auflast von 204 kN (130 bar). Für diese Bereiche (Auflast und Frequenz) hat Plasser & Theurer den DGS vorab in ihrem Labor kalibriert. Die zwei Auflastzylinder übertragen durch zwei Achsen die vertikale Auflast von 40 bar bis 130 bar in das Oberbausystem. Durch die verstellbare Unwucht kann mittels der einstellbaren Exzentrizität der vier Unwuchtmassen die Schlagkraft unabhängig von der Frequenz zwischen 0 % und 100 % verstellt werden. Diese Funktion ist vor allem im Labor für die Simulation der Überfahrt notwendig. Das Gewicht des modifizierten DGS inklusive Rahmen beträgt ca. 2,7 Tonnen. In Abbildung 56 ist in blau das Stabilisationsaggregat dargestellt, in Gelb der Rahmen des DGS und in grau der Prüfrahm an dem der DGS befestigt wurde und der als Widerlager diente.



Abbildung 56: DGS im Labor

Der DGS wurde an zwei Positionen stationär eingesetzt, da dieser nicht über das Gleis bewegt werden konnte. Der Abstand der Positionen entspricht exakt dem Abstand eines

Doppelaggregats (1.600 mm). Die Positionen wurden symmetrisch angeordnet. Somit ergab sich wie in Abbildung 55 ersichtlich, dass die „Position 1“ zwischen Schwelle sechs und sieben und die „Position 2“ zwischen Schwelle drei und vier lag.

Im Anschluss an den Stabilisierungsprozess durch den DGS wurde mittels eines Belastungsrahmens die Verkehrsbelastung von insgesamt 1,5 Mio. Lasttonnen simuliert. Die Einleitung der Belastung erfolgte exakt an den Stellen, wo die horizontale Schwingung durch den DGS eingebracht wurde. Der Abstand der Lasteinleitung entspricht demnach dem Abstand der Rollenteller bei einem Doppelaggregat (1.600 mm). Der in Abbildung 57 gezeigte Belastungsrahmen wurde mittig durch einen Hydraulikzylinder mit 360 kN entsprechend einer Achslast von 180 kN durch eine harmonische Schwingung mit einer Unterlast von 36 kN und einer Oberlast von 360 kN, bei maximal 3 Hz angeregt. Durch die 360 kN ergeben sich für 100.000 Lasttonnen (Lt) 5.600 Lastzyklen und für die 1,4 Mio. Lasttonnen (Lt) 77.800 Lastzyklen. Durch eine Kalotte zwischen Belastungsrahmen und Hydraulikzylinder konnte eine gleichmäßige Verteilung der Verkehrsbelastung gewährleistet werden.



Abbildung 57: Belastungsrahmen für Verkehrsbelastung

5.2 Instrumentierung des Laborversuchs

Der Laborversuchsaufbau wurde mit unterschiedlicher Messtechnik ausgestattet mit dem Ziel möglichst genau das Verhalten des Gleises nachvollziehen zu können. Allgemeine Angaben zur Messtechnik finden sich in Kapitel 3.

5.2.1 Beschleunigungsmessung im Labor

An den drei Schwellen (Nr. 4, 5 und 6), die dicht im Einflussbereich des DGS liegen, wurden die vertikalen (z) und lateralen (y) Beschleunigungen mit piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer der Firma Brüel&Kjær 4397A gemessen. Im weiteren Verlauf wird folgende Nomenklatur verwendet, die in Abbildung 58 dargestellt ist. Die Messpunkte „M“ beschreiben mit der Ziffer die Nähe zum Rollenteller und somit zum Einwirkzentrum des DGS. M1 ist demnach der Beschleunigungssensor direkt unter dem Rollenteller. M2 liegt auf der benachbarten Schwelle und M3 auf der zweiten Schwelle vom Einwirkzentrum entfernt. Die Beschleunigung in Schienenlängsachse wird durch „x“, die laterale Beschleunigung durch „y“ und die vertikale Beschleunigung durch „z“ gekennzeichnet.

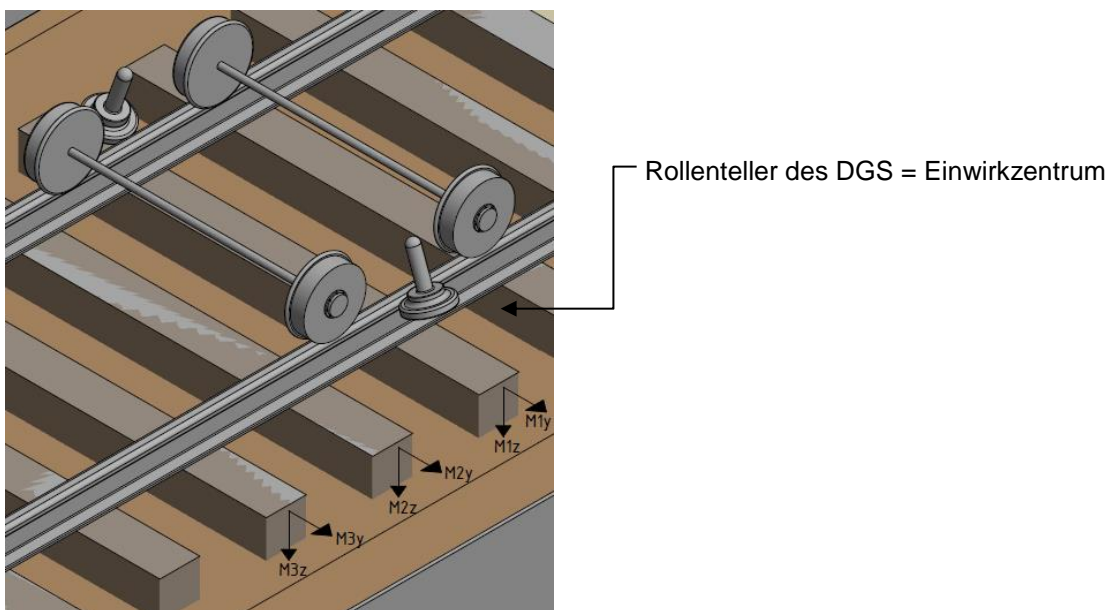


Abbildung 58: Nomenklatur der Messsensorik

Zur Messung der lateralen Beschleunigungen wurde einseitig auf dem Schwellenkopf ein Winkel montiert und auf diesem die Sensoren in vertikaler und lateraler Ausrichtung fixiert (siehe Abbildung 59).

Mit Hilfe der unterschiedlichen Schottermesssteine sollte die Tiefenwirkung des Schwingungseintrages detektiert werden.

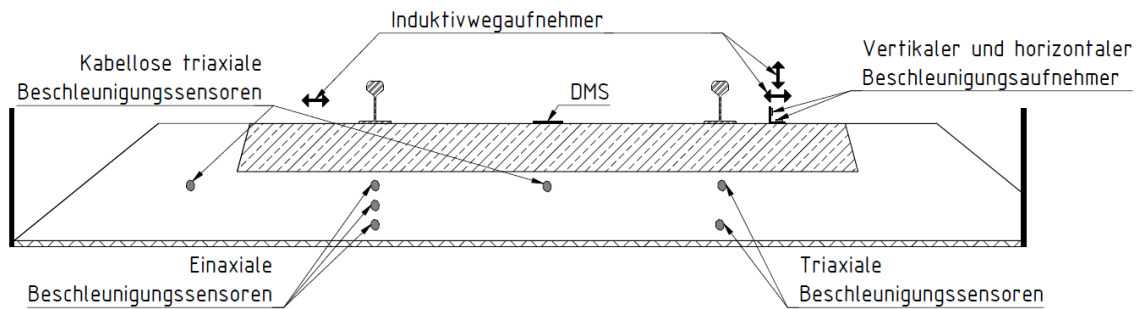


Abbildung 59: Messtechnik bei den Laborversuchen

Abbildung 59 zeigt die Positionen der verschiedenen Schottermesssteine. Es wurden drei einaxiale Schottermesssteine unter dem Schienenaufleger jeweils 8 cm, 15 cm und 24 cm unter der Schwellenunterkante positioniert (siehe Abbildung 59 unter der linken Schiene). Unter der rechten Schiene wurden zwei triaxiale Schottermesssteine in einer Tiefe von 8 cm und 24 cm unter Schwellenunterkante eingebettet. Weiterhin wurden noch drei triaxiale kabellose Schottermesssteine genutzt, um einen Eindruck der räumlichen Verteilung der Wirkung des DGS zu erhalten. Ein Schottermessstein wurde unter die Schwellenmitte, einer im Schwellenfach der Schwelle 5 und 6 unterhalb der Schiene und der dritte ca. 15 cm in den Vorkopfschotter eingebettet, jeweils 8 cm unterhalb der Schwellenunterkante (siehe Abbildung 59).

5.2.2 Induktivwegaufnehmer

Mit Hilfe zweier schwingungsentkoppelten Messbasen und geklebten Winkeln auf der Schwelle konnten die vertikalen und lateralen Verschiebungen der Schwelle mit Hilfe von Induktivwegaufnehmern festgehalten werden (in Abbildung 59 gekennzeichnet durch die schwarzen Pfeile und Abbildung 60).



Abbildung 60: Laborversuch mit applizierter Messtechnik

5.2.3 Querverschiebewiderstand

Die Verdichtungswirkung des DGS wurde mittels des Querverschiebewiderstandes (QVW) überprüft. Die Versuchsdurchführung erfolgte wie im Kapitel 3.1 Querverschiebewiderstand beschrieben. Der QVW wurde direkt nach dem Stopfen, nachdem der DGS eingesetzt wurde, nach einer Belastung von 100.000 Lasttonnen (Lt) und nach 1,5 Mio. Lasttonnen gemessen. Damit besteht eine Vergleichbarkeit mit den Feldversuchen. Aufgrund der begrenzten Anzahl an verfügbaren Schwellen und der stationären Einsatzpositionen des DGS zwischen Schwelle drei und vier bzw. sechs und sieben wurde der Querverschiebewiderstand zu folgenden Zeitpunkten an bestimmten Schwellen gemessen (Abbildung 61):

- Nach dem Stopfen: Schwelle 8
- 0-Messung – nach DGS: Schwelle 2 und Schwelle 5
- 100.000 Lt – Messung: Schwelle 3 und Schwelle 6
- 1,5 Mio. Lt – Messung: Schwelle 4 und Schwelle 7

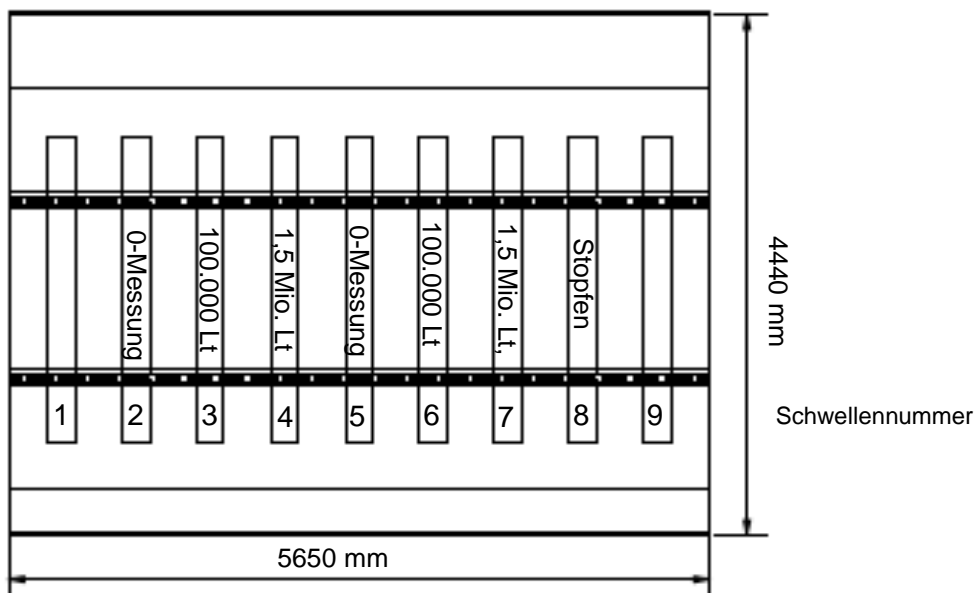


Abbildung 61: Anordnung der QVW-Messung

5.2.4 Schwellenbiegung

Auf sieben Schwellen wurden Dehnmessstreifen (DMS) appliziert um gegebenenfalls auftretendes „Reiten“ der Schwellen bzw. die Dehnung der Schwellen zu detektieren. (siehe Abbildung 62)

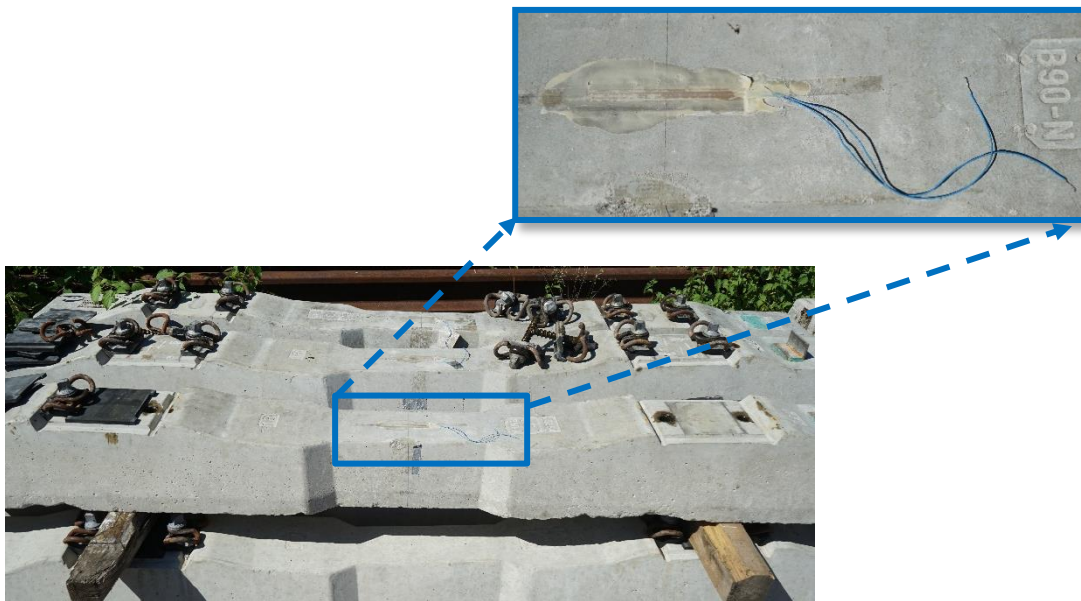
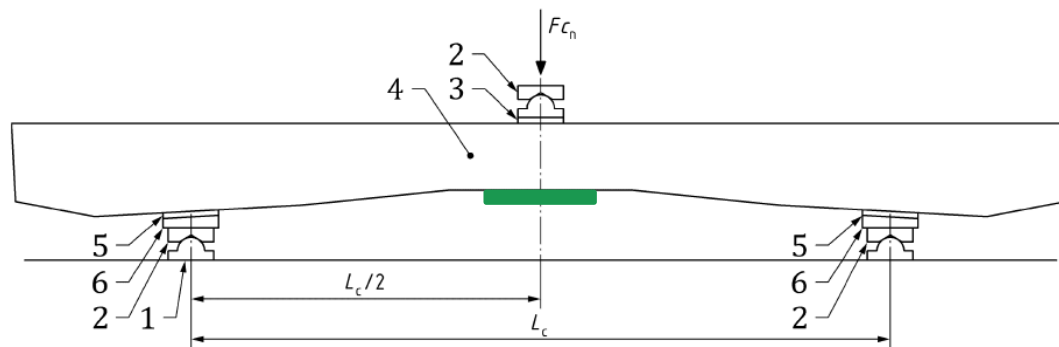


Abbildung 62: Nach Versuchsende gelagerte B90 Schwellen mit vergrößerter Darstellung des verklebten DMS

Mit Hilfe des nachfolgend beschriebenen 3-Punkt-Biegeversuchs wird überprüft, ob die Betonschwellen eine übermäßige Biegebeanspruchung durch den DGS erfahren könnten. Die beiden Randschwellen wurden nicht mit Messtechnik ausgestattet, da durch die Randlage unrealistische Werte entstehen würden. Zum Schutz vor mechanischen Einwirkungen wurden die DMS während der Versuche mit Styropor abgedeckt. Gleichzeitig konnte durch das Styropor Einflüsse durch Temperaturänderung, beispielsweise durch kurzzeitiges Öffnen des Hallentors, eingedämmt werden.

Zur qualitativen Bewertung der Biegebeanspruchung, die an der Schwelle bei den Übergängen des DGS im Labor und auch im Feld auftreten, wurde ein Kalibrierungsversuch in Anlehnung an die Regelwerke DIN EN 13230 und DBS 918 143 durchgeführt [49, 50]. Es wurde die Prüfanordnung für die Belastungsprüfung des negativen Biegemoments in der Schwellenmitte gewählt, da diese Prüfung neben der Schienenaugerprüfung eine kritische Beanspruchung der Schwellen im Schotterbett widerspiegelt. Die Kalibrierungsversuche wurden im Anschluss an die Laborversuche durchgeführt. Hierzu wurden die bereits im Labor eingesetzten Schwellen verwendet. Die Schwellen mit den DMS lagerten bis zum Kalibrierungsversuch auf dem Freigelände und waren hier mechanischen und alterungstechnischen Beanspruchungen sowie der Witterung ausgesetzt. Daher wurden die DMS auf ihre Funktionsfähigkeit geprüft und konnten ohne Ausnahme für den Kalibrierungsversuch verwendet werden.



Legende

- | | |
|------------------------|--------------------------------|
| 1 festes Auflager | 4 Spannbeton-Monoblockschwelle |
| 2 Gelenkstütze | 5 Standardzwischenlage |
| 3 Elastische Unterlage | 6 Neigungsausgleichsplatte |

Abbildung 63: Versuchsaufbau für den Kalibrierungsversuch des negativen Biegemoments nach [47]

Die Abbildung 63 zeigt den Versuchsaufbau, in grün ist die Position des DMS markiert. Zur Überprüfung des Verformungsverhaltens, wurden zusätzlich zu der Dehnung auf der Schwellenoberseite die vertikale Einsenkung an den Auflagern und in Schwellenmitte durch Induktivwegaufnehmer bzw. einen Laser erfasst.



Abbildung 64: Aufbau des Kalibrierungsversuchs

Der Aufbau im Labor ist in Abbildung 64 dargestellt. Es wurden von jedem Schwellentyp (B70, B07 So und B90) jeweils drei Schwellen untersucht.

5.3 Einflussfaktoren im Laborversuch

Im Gegensatz zu den Feldversuchen können im Labor einige Einflussfaktoren durch gleichbleibende und kontrollierte Versuchsrandbedingungen eliminiert werden. Nichts

desto trotz treten auch im Labor Einflüsse auf, die im Folgenden dargestellt werden sollen.

Zunächst werden die Herausforderungen, die bereits im Planungsprozess berücksichtigt wurden, vorgestellt. Aufgrund der Platzrestriktion wurde im Labor ein Versuchsfeld von 5,65 m auf 4,44 m gewählt. Hier konnte ein Gleisrost mit neun Schwellen abgebildet werden. Auf dieser Länge konnte das Aggregat wie ein stationäres Doppelaggregat, durch die Umsetzung von Position 1 auf Position 2, angewendet werden.

Im freien Feld finden wir eine unendlich lang lückenlos verschweißte Schiene. Dieser Umstand wurde im Labor nicht simuliert, da durch eine Abspannung oder Ballastierung eine weitere unbekannte, aber stark beeinflussende Größe im Hinblick auf das Schwingungsverhalten des Gleisrostes hinzugekommen wäre.

Die regelkonforme Querschnittsbreite misst 4,86 m. Zwischen den feststehenden Säulen standen jedoch nur 4,44 m zu Verfügung. Daher wurde die Böschung, wie in Kapitel 5.1 dargestellt, einseitig eingekürzt und mittels eines Verbaus abgestützt. Somit konnte einseitig eine ungestörte Böschung hergestellt werden, an der die Querverschiebewiderstandsmessungen durchgeführt werden konnten.

Im Labor treten naturgemäß Einflüsse auf, die vom Einsatz in Betriebsgleisen abweichen.

Aufgrund des stationären Einsatzes sollte die Überfahrt mittels einer acht Sekunden langen Rampe, in der die Unwuchten auf die maximale Exzentrizität aus- und wieder einfahren, simuliert werden. Durch die Trägheit der Unwuchtsteuerung konnte innerhalb dieser Zeit nicht die maximale Exzentrizität der Unwucht, also der Schlagkraft, erreicht werden. Zur Optimierung an die realen Verhältnisse wurden unterschiedliche Einstellungen getestet. Abschließend wurde eine Rampe von zehn Sekunden gewählt, innerhalb der ca. 85 % der Unwuchtaussteuerung erreicht werden konnten. Für jeden Versuch im weiteren Verlauf musste ein Testlauf erfolgen bei dem die richtigen Einstellungen (85 % Unwuchtaussteuerung innerhalb zehn Sekunden) gefunden werden mussten. Die Unwuchten reagieren abhängig von der Frequenz unterschiedlich träge.

Nach der ersten Messung während der Überfahrtsimulation mit dem DGS wurde bei den Ergebnissen der Beschleunigungssensoren ein deutliches „Rauschen“ festgestellt. Der Grund hierfür lag im Schaltschrank des DGS. Nachdem das Problem identifiziert war, konnte es durch eine angepasste Anordnung und verbesserte Abschirmung der Messtechnik behoben werden.

Bei den Vorversuchen zeigte sich, dass bei den höheren Stabilisierungsfrequenzen ab ca. 37 Hz der DGS zu „schaukeln“ beginnt. Vermutlich kommt es beim DGS bei der Regelung der Auflastzylinder zu Verzögerungen, wodurch die beiden Auflastzylinder gegengleich arbeiten. Ob der DGS sich im Betriebsgleis genauso verhält konnte nicht ermittelt werden. Gegebenenfalls kann diesem Phänomen durch modifizierte

Regelungsparameter der Auflaststeuerung entgegengewirkt werden. Für die Überfahrtsimulationen war dieser Umstand jedoch nicht relevant, da sich bei den hohen Anregungsfrequenzen aus den Vorversuchen kein Mehrwert gezeigt hat.

5.4 Vorversuch

Mit den Vorversuchen soll ein besseres Verständnis entstehen, wie die verschiedenen Oberbauformen auf unterschiedliche Stabilisierungsfrequenzen und Auflasten reagieren. Die Kombination mit der größten Schwellenbeschleunigung wurde dann durch die Simulation einer Überfahrt genauer untersucht.

5.4.1 Versuchsdurchführung

Der DGS wurde auf dem mit neuem Schotter hergestellten und gestopften Gleis auf Position 1, wie in Kapitel 5.1 Abbildung 55 beschrieben, installiert und elektrisch sowie hydraulisch angeschlossen.

Die Messtechnik sowie eine Videokamera wurden eingerichtet. In einem ersten Durchlauf wurde bei einer Auflast von 70 bar die Stabilisierungsfrequenz von 25 Hz bis 40 Hz gesteigert und dann wieder auf 25 Hz reduziert, um mögliche Veränderungen der Schwellenbeschleunigung aufgrund der Stabilisierungsdauer mit aufzunehmen.

Nach einer ersten Auswertung wurde neben der Standardfrequenz von 34 Hz eine weitere Frequenz, bei der die größte Schwellenbeschleunigung während der Vorversuche gemessen wurde, ausgewählt. Die Auswahl wurde auf Basis der Schwellenbeschleunigung getroffen, da die Induktivwegaufnehmer durch die lange vibrierende Beanspruchung während der Vorversuche keine brauchbaren Ergebnisse lieferten.

Aufgrund von anfänglichen Anpassungsprozessen im Versuchsablauf konnte bei der Schwelle B70 die Variation der Auflast nur bei 30 Hz erfolgen. Bei den Oberbauformen mit der Schwelle B07 So und B90 wurde die Auflast bei 34 Hz und 27 Hz variiert.

In einem weiteren Durchlauf wurde nun bei gleichbleibender Frequenz (27 Hz, 30 Hz oder 34 Hz) die Auflast durch eine schrittweise Druckerhöhung in den Auflastzylinder um je 10 bar von 40 bar bis 130 bar gesteigert und dann wieder in Stufen von 130 bar bis 40 bar reduziert. Somit sollten die Auswirkungen der Auflast und die Auswirkung der Einflussdauer des DGS auf die Schwellenbeschleunigung untersucht werden. Als Übersicht ist das Ablaufschema für die Vorversuche in Abbildung 65 dargestellt.

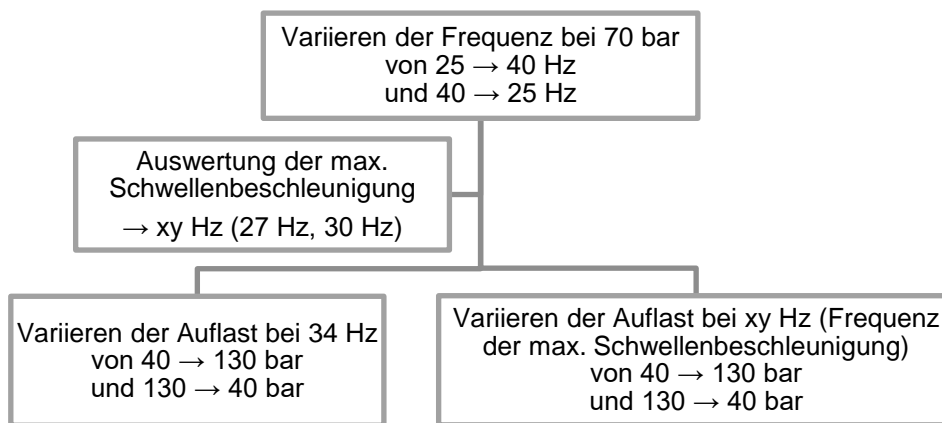


Abbildung 65: Ablaufschema der Vorversuche

5.4.2 Auswertung der Beschleunigungsmessung

Zur Auswertung der Beschleunigungssignale wurde die Software Meda (Version 2019-1) genutzt. Hiermit wurde der Wert des maximalen gleitenden Effektivwerts der Beschleunigung sowie der Schwinggeschwindigkeit ausgewertet. Das Zeitintervall des gleitenden Effektivwertes wurde so ausgewählt, dass mit der gleichen Methode die Überfahrtsimulation sowie die Vorversuche und auch die Feldmessungen ausgewertet werden konnten, um somit einen Vergleich der Signale zu ermöglichen. Durch einfache Integration der Beschleunigung [m/s^2] erhält man die Schwinggeschwindigkeit [mm/s]. Bei einer weiteren Integration ergibt sich die Amplitude [mm]. Die Maxima der Amplitude können ausschließlich für die Schwellenbeschleunigungen ausgewertet werden, da aufgrund der zweifachen Integration bei einem nicht harmonischen Signal das Ergebnis verfälscht werden könnte.

Abbildung 66 zeigt für die Schwelle B07 So exemplarisch den Ablauf bei den Vorversuchen. Nach der Herstellung des Gleises für den Vorversuch, wurde mit dem DGS bei gleichbleibender Auflast von 110 kN (70 bar), die Frequenz von 25 Hz auf 40 Hz erhöht. Die hellblaue Linie zeigt die erste Belastung von 25 Hz bis 40 Hz. Die dunkelblaue Linie zeigt die Zweitbelastung von 40 Hz bis 25 Hz. Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Unterschied im Frequenzbereich zwischen 25 Hz und 29 Hz. Aus diesem Grund wurde eine dritte Belastung vorgenommen. Die dunkelblau Punkt-Strich-Linie zeigt die Ergebnisse bei einer Frequenzänderung beginnend bei 25 Hz bis 33 Hz (Abbildung 66). Es zeigt sich, dass zwischen der Zweit- und Drittbelastung kein maßgeblicher Unterschied zwischen den Verläufen der Schwellenbeschleunigung besteht. In Anlange A.10 ist das Diagramm der B90 Schwelle abgebildet, welches das gleiche Phänomen zeigt.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass nachdem der Schotter eine gewisse Verdichtung erreicht hat, eine mehrmalige Belastung nicht zu einer gravierenden

Änderung der Beschleunigungsergebnisse führt. Aus diesem Grund wurden bei der Auswertung nur die Ergebnisse herangezogen, die bei einem homogenen Schotterverhalten gemessen wurden.

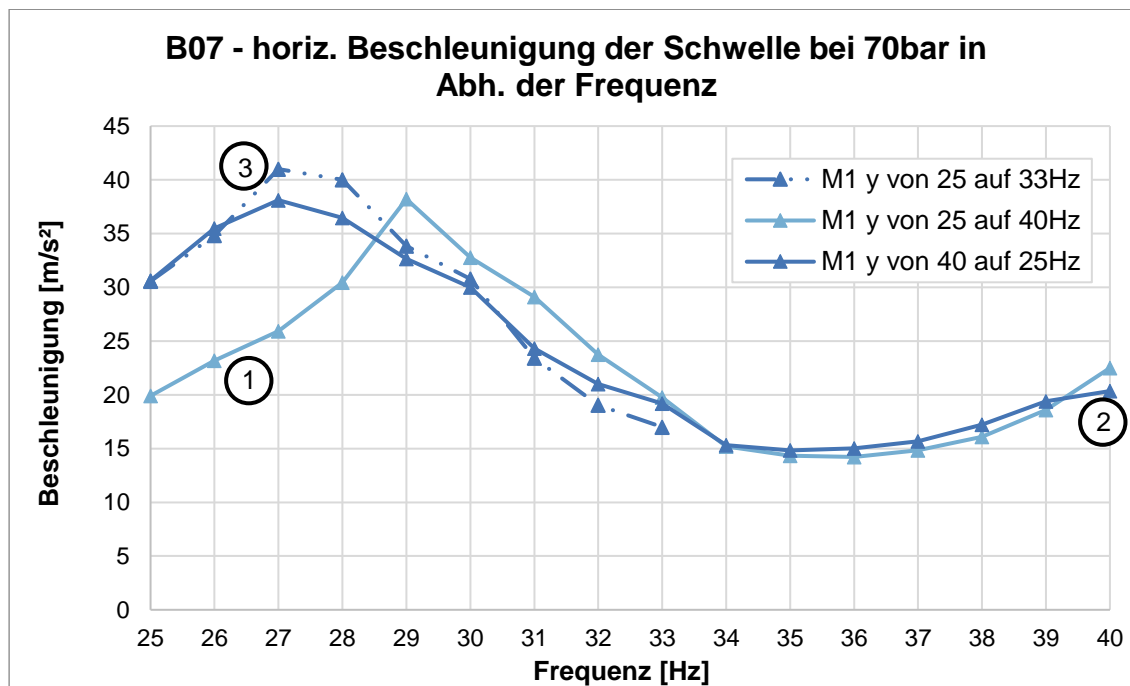


Abbildung 66: Die Beschleunigungen in Abhängigkeit der Einwirkungsdauer des DGS

Definition Schotterfließen:

Das im weiteren Verlauf sogenannte Schotterfließen beschreibt den Zustand des Schotters, wenn dieser durch hochdynamische Beanspruchung zusätzliche Tragfähigkeitskräfte entwickelt. Die zusätzlichen Tragfähigkeitskräfte reduzieren die Reibungskräfte zwischen den Schotterkörnern und erzeugen dadurch sogenannte Gleitflächen, die ein Schotterfließen ermöglichen [51].

Bei der Darstellung der Ergebnisse wird auf ein einheitliches Farbschema zurückgegriffen. Die Ergebnisse der Schwelle B70 werden in grün, der B07 So in blau und der B90 in rot dargestellt wie in Abbildung 67 erkennbar.

Die Abbildung 67 zeigt den Vergleich der Beschleunigung [m/s²] der drei Oberbauformen (B70 - grün, B07 So - blau, B90 - rot). Bei der Schwelle B70 konnten nur die Beschleunigungen bei 25 Hz, 30 Hz, 35 Hz und 40 Hz ausgewertet werden, die linear verbunden wurden.

Bei der Betrachtung der Maximalwerte der Beschleunigungen in Abbildung 67 fällt auf, dass unabhängig von der Frequenzvariation die Schwelle B70 immer größere horizontale Beschleunigungen aufweist als die Schwelle B07 So und B90. Die Begründung hierfür liegt im Schwellengewicht, in der steiferen Schienenbefestigung und im geringeren Reibungskoeffizienten. Die Schwelle B70 ist 290 kg schwer somit rund

20 % leichter als die Schwelle B07 So (346 kg) und die B90 (340 kg). Die Schwelle B70 hat im Gegensatz zu der B07 So und der B90 keine Verjüngung in Schwellenmitte. Dadurch hat die B70 eine kleinere Kontaktfläche zum Schotter was zu einem geringeren Reibungskoeffizienten führt. Weiterhin wird durch ein steiferes Schienenbefestigungssystem die Beschleunigung mit weniger Verlusten weitergeleitet und die Schwelle dadurch bei gleichen Maschinenparametern stärker beschleunigt.

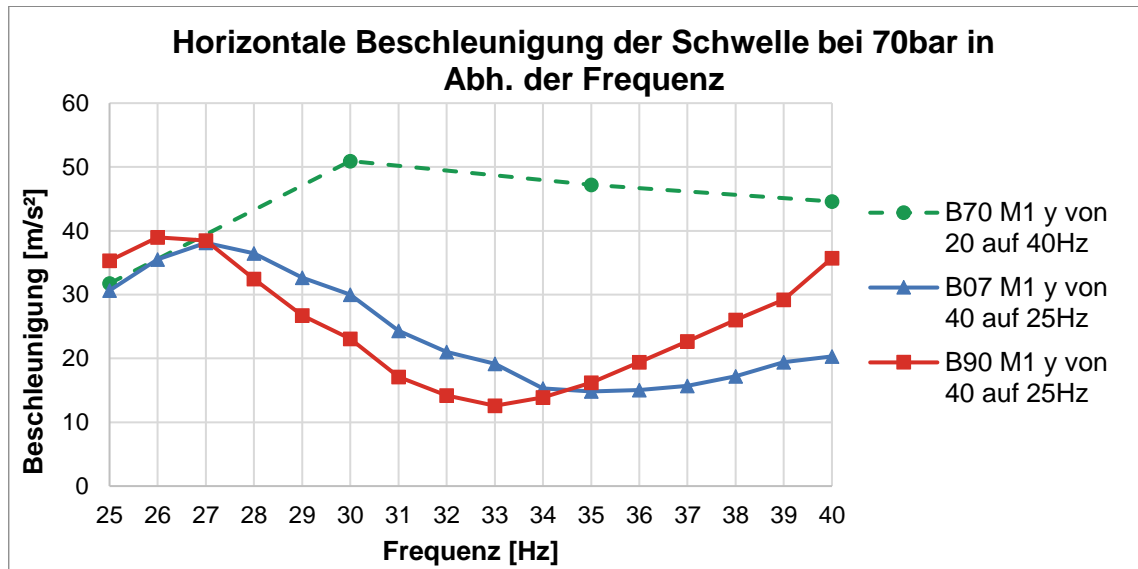


Abbildung 67: Maximaler horizontaler gleitender Effektivwert der Beschleunigung der Schwelle bei 70bar in Abh. der Frequenz

Tabelle 22 zeigt die Maximalwerte des gleitenden Effektivwerts der Beschleunigung für die einzelnen Oberbauformen (B70, B07 So und B90) in Abhängigkeit der Frequenz bei einer Auflast von 110 kN (70 bar). Die entsprechenden grafischen Verläufe sind in Anlage A.10 dargestellt. Die quantitativ größte Beschleunigung von 51 m/s² tritt bei der Schwelle B70 unter 30 Hz auf. Die größte Beschleunigung der Schwelle B90 tritt bei 26 Hz bzw. 27 Hz mit 38 m/s² bzw. 39 m/s² auf und die größte Beschleunigung der B07 So Schwelle ist bei 27 Hz mit 38 m/s² zu verzeichnen. Die genannten Werte sind in Tabelle 22 jeweils hervorgehoben. Aus diesen Ergebnissen wurde die Frequenz für die Variation der Auflast gewählt. Bei der Schwelle B07 So und B90 wird neben der Standardfrequenz von 34 Hz auch bei 27 Hz die Auflast variiert. Bei der B70 wird die Auflast nur bei 30 Hz variiert.

Tabelle 22: Maximalwert des gleitenden Effektivwerts der Beschleunigung [m/s²] der drei Oberbauformen

Frequenz [Hz]	max. gleitender Effektivwert d. Beschleunigung [m/s ²]								
	B70			B07 So			B90		
	M1y	M2 y	M3 y	M1y	M2y	M3y	M1y	M2y	M3y
25	32	24	15	31	20	4	35	23	3
26				35	26	4	39	26	4
27				38	24	4	38	25	4
28				36	22	4	32	22	4
29				33	20	3	27	18	3
30	51	47	33	30	17	3	23	15	3
31				24	14	3	17	11	2
32				21	12	3	14	10	3
33				19	12	3	13	10	3
34				15	12	4	14	11	3
35	47	41	25	15	13	4	16	13	4
36				15	15	5	19	16	4
37				16	15	5	23	18	5
38				17	16	5	26	22	5
39				19	17	5	29	25	6
40	45	31	27	20	18	5	36	31	7

Im nächsten Schritt wurde die Auflast variiert, zunächst bei der Standardfrequenz von 34 Hz und anschließend bei der maximalen Frequenz (30 Hz bzw. 27 Hz), die sich aus der Frequenzvariation (Tabelle 22) ergab.

Abbildung 68 zeigt, dass die betragsmäßig größten horizontalen Beschleunigungen bei der Schwelle B70 auftreten. Es zeigt sich das gleiche Verhalten wie bei der Variation der Frequenz. Das ist ein Indiz dafür, dass ein geringeres Schwellengewicht sowie ein geringerer Reibungskoeffizient und ein steiferes Schienenbefestigungssystem zu einer größeren Schwellenbeschleunigung führen.

Der Kurvenverlauf der Schwelle B70 bei 30 Hz ist annähernd parallel zu den Kurvenverläufen der Schwelle B07 So und B90 bei 27 Hz. Die Verläufe der Schwelle B07 So und B90 bei gleichen Frequenzen sind ähnlich lediglich etwas phasenversetzt. Die Kurvenverläufe der Schwelle B90 und B07 So bei 34 Hz fallen zunächst zwischen 40 bar (62 kN) bis 80 bar (125 kN) leicht ab. Die Beschleunigungswerte steigen dann auf ihr Maximum von 33 m/s² (B90 34 Hz 130 bar) bzw. 41 m/s² (B07 So 34 Hz 130 bar) an. Die Kurvenverläufe bei 27 Hz (Schwelle B07 So und B90) bzw. 30 Hz (Schwelle B70) steigen zunächst zwischen 40 bar und 80 bar an und fallen dann bis 130 bar ab. Das Beschleunigungsmaximum der Schwelle B70 liegt unter einer Auflast von 80 bar/ 90 bar bei 59 m/s², das Beschleunigungsmaximum der Schwelle B90 liegt unter einer Auflast

von 80 bar/ 90 bar bei 45 m/s² und dass der Schwelle B07 So liegt unter einer Auflast von 80 bar bei 42 m/s².

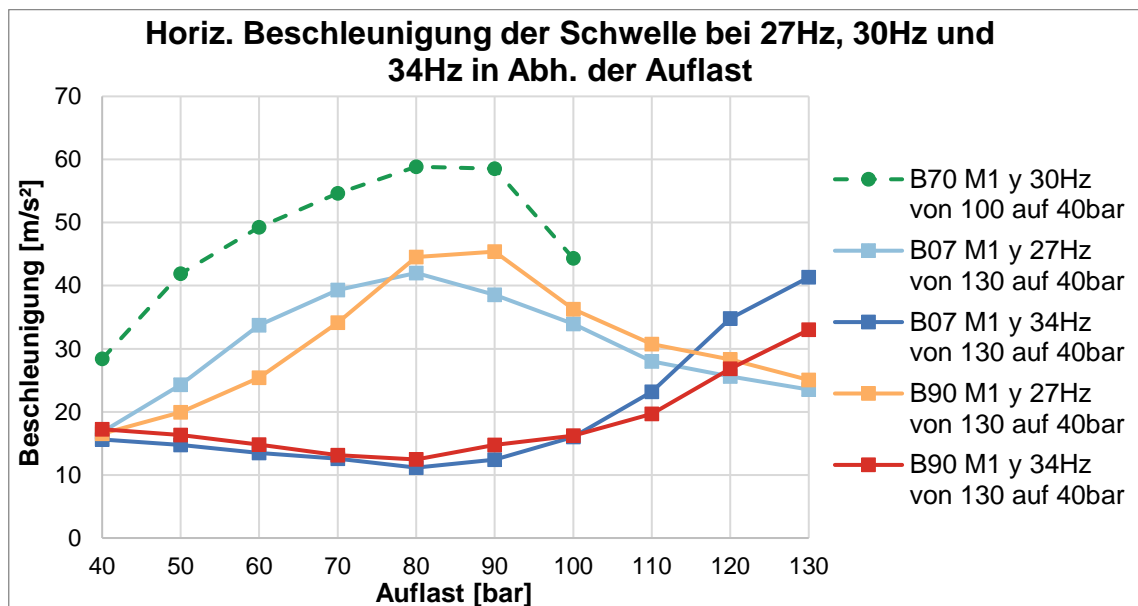


Abbildung 68: Maximaler horizontaler Effektivwert der Beschleunigung der Schwellen B70, B07 So und B90 bei unterschiedlichen Frequenzen in Abhängigkeit der Auflast

Der Grund für die verschiedenen Verläufe der Linien bei 27 Hz bzw. 30 Hz und bei 34 Hz muss das Schotterfließen sein, da sich sonst keine weiteren Parameter geändert haben. Im Folgenden wird versucht den Verlauf der Linien zu klären.

Außerhalb Fließbereich

Die Beschleunigungsverläufe der Schwelle B07 So und B90 können außerhalb des Fließbereich des Schotters (27 Hz bzw. 30 Hz) in zwei Abschnitte aufgeteilt werden. Im ersten Abschnitt, zwischen 40 bar (62 kN) und 80 bar (125 kN) bzw. 90 bar (140 kN) steigt die Beschleunigung an. Im zweiten Abschnitt, zwischen 80 bar (125 kN) bzw. 90 bar (140 kN) und 130 bar (204 kN), nimmt die horizontale Beschleunigung ab. Durch die steigende Auflast erhöht sich die Systemsteifigkeit, was zunächst zu einer besseren Übertragung der Schwellenbeschleunigung führt. Ab 80 bar (125 kN) bzw. 90 bar (140 kN) kann davon ausgegangen werden, dass das System „überdrückt“ ist. Der Oberbau ist durch den Schotter eingezwängt, die Schwelle verkeilt sich, wodurch der Reibungskoeffizient steigt und somit sinkt die Beschleunigung mit weiterer Zunahme der Auflast. Außerhalb des Fließbereiches führt eine zu hohe Auflast zu einem „Überdrücken“ des Systems und behindert damit den Schwingungseintrag in das System Schottergleis.

Innerhalb Fließbereich

Die Beschleunigungsverläufe der Schwelle B07 So und B90 im Fließbereich des Schotters (34 Hz) können ebenfalls in zwei Abschnitte aufgeteilt werden. Im ersten Abschnitt, zwischen 40 bar (62 kN) und 80 bar (125 kN), nimmt die Beschleunigung

leicht um ca. 30 % ab. Im zweiten Abschnitt, zwischen 80 bar (125 kN) und 130 bar (204 kN), steigt die horizontale Beschleunigung um das 2,5-fache bei der Schwelle B90 und um das 3,5-fache bei der B07 So an. Mit der Zunahme der Auflast steigt die Systemsteifigkeit, wodurch die Übertragung der horizontalen Beschleunigung in die Schwelle steigt. Anders als bei 27 Hz kommt es ab 80 bar (125 kN) nicht zu einem erhöhten Reibungskoeffizienten, da sich Gleitflächen durch das Schotterfließen ausbilden. Deshalb steigt innerhalb des Fließbereiches die Schwellenbeschleunigung ab 80 bar (125 kN) mit der steigenden Auflast an.

Der laterale Beschleunigungsverlauf der beiden annähernd gleichschweren Schwellen - B07 So (346 kg) und B90 (340 kg) - ist relativ ähnlich. Im Auflastbereich 40 bar bis 90 bar ist die Beschleunigung der Schwelle B07 So etwas geringer als bei der Schwelle B90. Dann reagiert die Beschleunigung bei der Schwelle B90 stärker auf die Frequenzsteigerung mit einem steileren Abfall der Beschleunigung, um nach dem Tiefpunkt bei 33 Hz stärker anzusteigen als die Schwelle B07 So. Wegen dieser Erkenntnis wurde bei dem Vorversuch der Schwelle B90 die Auflast neben einer Frequenz von 34 Hz und 27 Hz auch bei 32 Hz variiert. Der Verlauf bei 32 Hz ist in Abbildung 69 in Orange dargestellt. Bei 100 bar treffen sich die Schwellenbeschleunigungen der B07 So (34 Hz) und der B90 (32 Hz, 34 Hz) bei ca. 17 m/s². Davor verlaufen die Schwellenbeschleunigungen der B90 (34 Hz) und B07 So (34 Hz) ähnlich. Ab 110 bar folgt der Beschleunigungsverlauf der B07 So (34 Hz) dem Verlauf der B90 (32 Hz). Im Bereich ab 110 bar zeigt sich ein um etwa 2 Hz abweichender Verlauf der Schwellenbeschleunigung an der B90 (34 Hz) und der B07 So (34 Hz) Schwelle. Da sich beide Schwellen in den grundlegenden Parametern, außer der Schwellenbesohlung, nicht wesentlich unterscheiden, lässt sich diese Abweichung auf den Einfluss der Schwellenbesohlung zurückführen. Es gilt diesen Einfluss bei den Versuchen der Überfahrtsimulation zu beobachten.

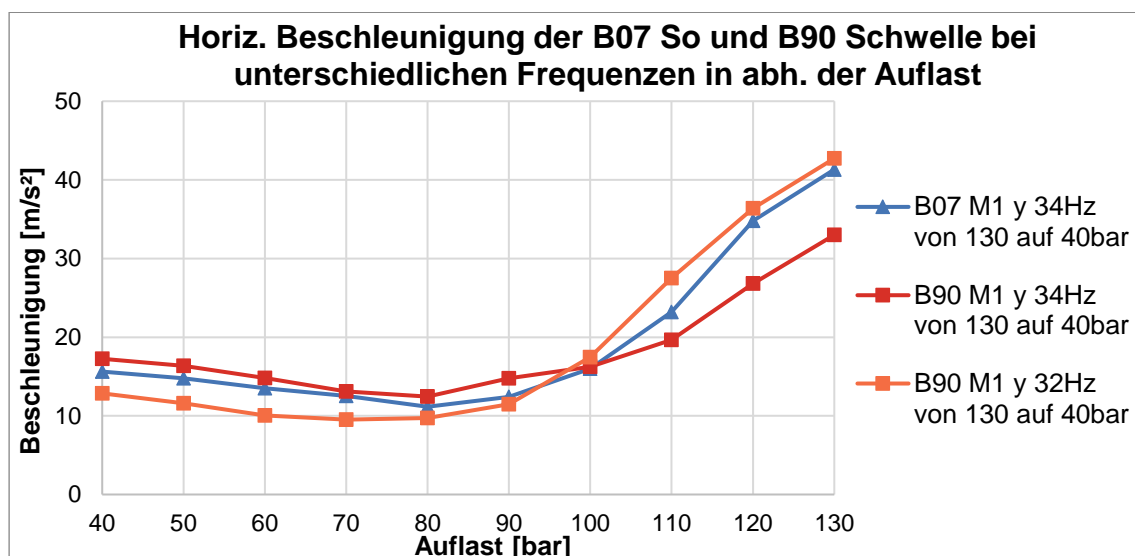


Abbildung 69: Maximaler horizontaler Effektivwert der Beschleunigung der B07 So und B90 Schwelle bei unterschiedlichen Frequenzen in Abh. der Auflast

Abbildung 70 zeigt die laterale Schwellenbeschleunigung der Schwelle B07 So und B90 in Abhängigkeit der Auflast zum einen von der ersten Belastung von 40 bar (62 kN) auf 130 bar (204 kN, durchgezogene Linie) und zum anderen von der zweiten Belastung (Entlastung) von 130 bar (204 kN) auf 40 bar (62 kN, gestrichelte Linie).

Bei dem Vergleich der horizontalen Beschleunigung der Variation der Auflast während der Erstbelastung (40 bar auf 130 bar) und der Zweitbelastung (130 bar auf 40 bar) ist auffällig, dass unabhängig vom Schwellentyp (B07 So, B90) die Schwellenbeschleunigungen bei der Erstbelastung ab ca. 70 bar etwas höher ist. Dieses Verhalten deckt sich mit der Annahme, dass der Konsolidierungsgrad während der Stabilisierung mit dem DGS kontinuierlich zunimmt. Bei einem höheren Konsolidierungsgrad des Schotters wird durch den Kontakt Schwellenunterseite – Schotter die Beschleunigung gedämpft, da der Schotter als Schwungmasse aktiviert wird. In dem Auflastbereich 40 bar bis 70 bar liegen alle Kurven unabhängig von Erst- oder Zweitbelastung oder von B07 So oder B90 Schwelle, nah beieinander. In diesem Bereich entsteht die größte Beeinflussung auf die Schwellenbeschleunigung durch das Eigengewicht der Schwelle. Der Einfluss aus der Schwellensohle oder dem Kontakt Schwellenunterseite - Schotter und damit die aktivierte Masse (Schotter) ist aufgrund der geringen Auflast nicht ausschlaggebend.

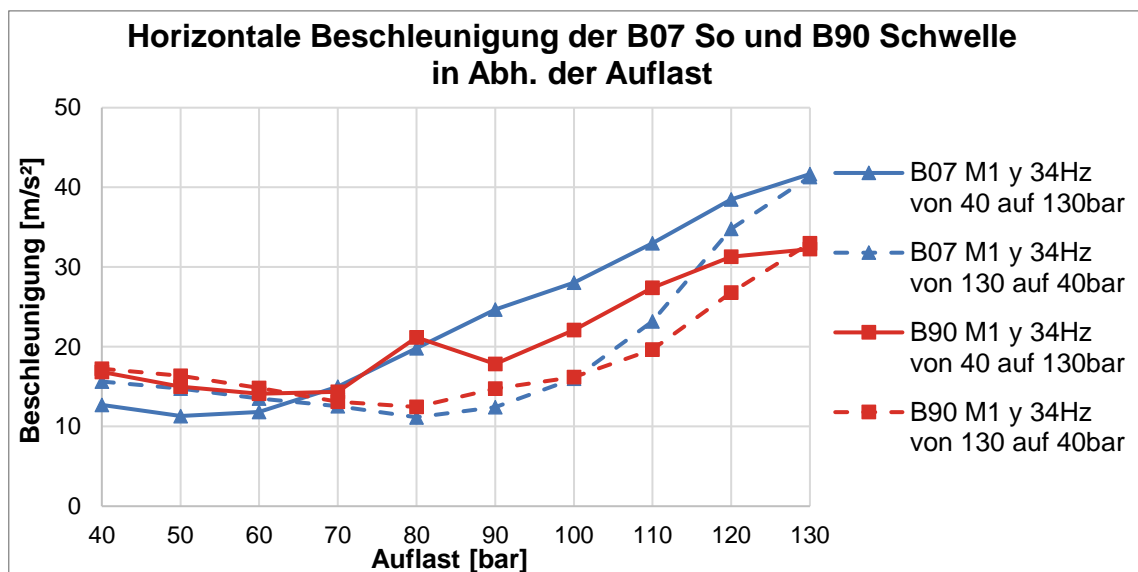


Abbildung 70: Maximaler horizontaler Effektivwert der Beschleunigung der B07 So und B90 Schwelle in Abh. der Auflast

Die gesamten grafisch dargestellten Ergebnisse der Schwellenbeschleunigung und der Schotterbeschleunigung aus den Vorversuchen sind in Anlage A.10 abgebildet.

Abschließend wurde auf der Grundlage der vorliegenden Ergebnisse entschieden die Simulation der Überfahrt des DGS neben den Standardmaschinenparameter von 34 Hz und 70 bar bei den Parametereinstellungen mit der größten Schwellenbeschleunigungen durchzuführen. Damit ergaben sich aus den Vorversuchen folgende Parameter-

einstellungen für die Simulation der Überfahrten des DGS. Die Farbkombinationen werden im Folgenden durchgängig verwendet:

B70 34 Hz 70 bar

B07 So 34 Hz 70 bar

B90 34 Hz 70 bar

B70 30 Hz 70 bar

B07 So 27 Hz 70 bar

B90 27 Hz 70 bar

B07 So 34 Hz 130 bar

B90 34 Hz 130 bar

5.5 Simulation der Überfahrt des DGS und der Verkehrsbelastung

Zur Untersuchung der Wirksamkeit des DGS wurde im Labor die Überfahrt des DGS bei den Standardparametern (34 Hz, 70 bar) und bei Parameterkombinationen, die durch den Vorversuch festgelegt wurden, simuliert. Anschließend wurde das Gleis durch eine Verkehrsbelastung beansprucht. Es wurden neben den Schwellen- und Schotterbeschleunigungen, die Dehnung in Schwellenmitte und auch die Setzungen während der Überfahrt des DGS festgehalten. Weiterhin wurde bei der Verkehrsbelastung die Setzung und die zunehmende Konsolidierung des Schotters durch den QVW gemessen. Anhand von Schotterproben und durch Steifigkeitsmessung der Zwischenlage wurde der jeweilige Verschleiß durch die Beanspruchung des DGS festgehalten.

5.5.1 Versuchsdurchführung

Bevor der Versuch beginnt, wurde der QVW an einer Schwelle gemessen, um eine Referenz zu der Entwicklung des QVW durch den DGS zu erhalten.

Aufgrund der stationären Anordnung des DGS im Labor musste die Überfahrt mittels einer Rampe, in der die Unwuchten auf die maximale Exzentrizität aus- und wieder einfahren, simuliert werden. Die Dauer der Rampe ergab sich aus den Feldversuchen zu 8 Sekunden (siehe Abbildung 71, exemplarisch an einer Feldmessung in Hildesheim). Aufgrund der Maschinensteuerung der Unwuchten des DGS wurde dieser Wert auf 10 Sekunden erhöht, andernfalls wäre der Rampenverlauf sehr unruhig geworden und die Unwuchtaussteuerung läge unter 85 %. (Details in Kapitel 5.3)

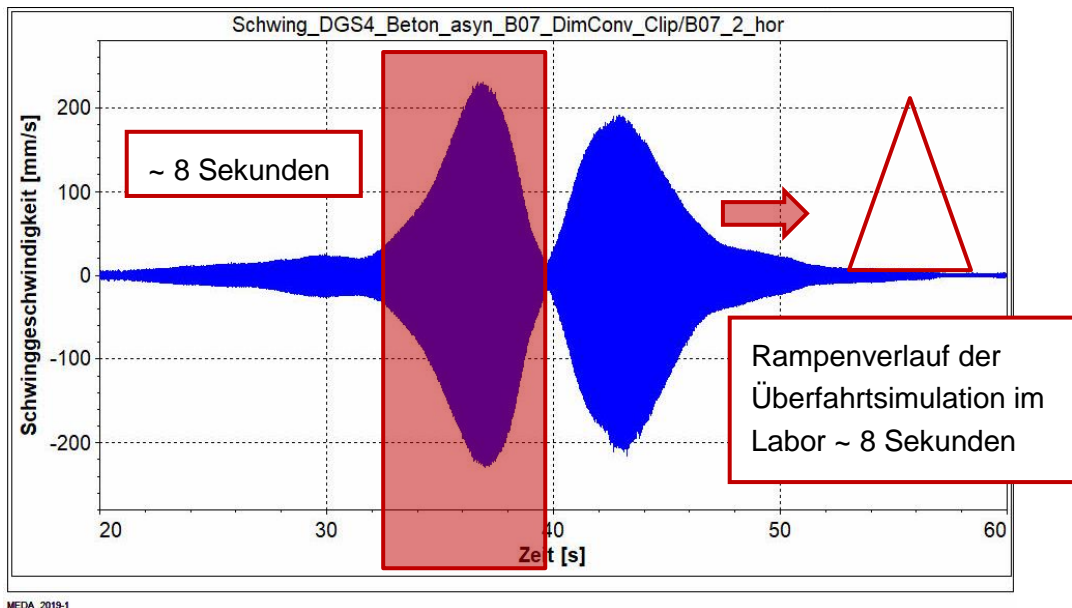


Abbildung 71: Exemplarische Auswertung der Feldversuche für die Definition der Rampe für die Unwuchtaussteuerung bei den Laborversuchen

Zur Simulation der Überfahrt des DGS wurde die Rampe zunächst in Position 1 aufgebracht. Anschließend wurde der DGS umgesetzt und die Rampe in Position 2 mit den gleichen Parametereinstellungen gefahren.

Für jede Oberbauform wurde zunächst immer die Standardeinstellung mit einer Stabilisierfrequenz von 34 Hz und einer Auflast von 110 kN (70 bar) gewählt. In dem zweiten Versuch wurde die Stabilisierfrequenz und im dritten Versuch die Auflast geändert. Jeweils ein Parameter, Stabilisierfrequenz oder Auflast, entsprach der Standardeinstellung. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um den Bezug zu der Standardeinstellung herstellen zu können und somit die Auswirkungen auf den QVW und die Beschleunigung jeweils den Veränderungen eindeutig zuzuordnen. Im Gegensatz zu den Vorversuchen konnten hier durch die begrenzte Einwirkungsdauer des DGS und den damit verbundenen Setzungen auch die Induktivwegaufnehmer ausgewertet werden.

Nach der Simulation der Überfahrt des DGS wird die Verkehrsbelastung aufgebracht. Vor der ersten Verkehrsbelastung wurde neben dem QVW auch die Steifigkeit des Schotters bzw. des Oberbaus gemessen, indem jeweils die Verkehrsbelastung von 360 kN dreimal mittels des Stahlrahmens auf den Gleisrost analog der DGS-Auflast aufgebracht wurde. Anschließend wurde für eine Vergleichbarkeit zu den Feldversuchen zunächst eine Verkehrsbelastung von 100.000 Lasttonnen simuliert. Danach wurden der Querverschiebewiderstand und die Steifigkeit des Schotters gemessen. Die restlichen 1,4 Mio. Lasttonnen wurden aufgebracht und die Messungen wiederholt.

Die simulierte Verkehrsbelastung im Labor entspricht aufgrund des Aufbaus mit einem Hydraulikzylinder, der über einen Stahlrahmen die Verkehrsbelastung auf zwei Achsen

in den Gleisrost einbringt, einer niederfrequenten dynamischen Beanspruchung bei maximal 3 Hz. Im Gegensatz dazu ist im realen Gleis das Frequenzspektrum vielfältig und liegt zwischen 0 – 700 Hz und die Anregung ist diskontinuierlich, hervorgerufen durch die Streuung der Zugfahrten, durch den Schwellenabstand, durch Einflüsse wie Radunrundheiten, Schienenimperfectionen oder Gleislagefehler und unterschiedliche Geschwindigkeiten [52, 53]. Aus diesem Grund wird von einem geringeren Zuwachs des QVW durch die Verkehrsbelastung im Labor ausgegangen.

Die folgende Auflistung gibt den Ablauf der Versuchsdurchführung der Simulation der Überfahrt des DGS und der Verkehrsbelastung wieder:

- Nach Gleisherstellung QVW an Schwelle 8 messen
- DGS auf Position 1 montieren
- Überfahrtsrampe in Position 1 wird mit DGS simuliert
- DGS auf Position 2 verschieben und fixieren
- Überfahrtsrampe in Position 2 wird mit DGS simuliert
- DGS ausbauen
- QVW an Schwelle 2 und 5 messen
- Stahlrahmen für Verkehrsbelastung einbauen
- 3 Belastungszyklen mit 360 kN fahren (Ermittlung Steifigkeit Oberbau)
- 100.000 Lt aufbringen bei max. 3 Hz und 360 kN
- QVW an Schwelle 3 und 6 messen
- 3 Belastungszyklen mit 360 kN fahren (Ermittlung Steifigkeit Oberbau)
- 1,4 Mio. Lt aufbringen bei max. 3 Hz und 360 kN
- 3 Belastungszyklen mit 360 kN fahren (Ermittlung Steifigkeit Oberbau)
- QVW an Schwelle 4 und 7 messen
- Rückbau

Für jede untersuchte Oberbauform wurde dieser Ablauf durchgeführt.

5.5.1.1 Schwellenbiegung

Die Beanspruchung der Schwelle durch den DGS setzt sich aus zwei Anteilen zusammen. Zum einen aus dem Anteil der vorwiegend horizontal wirkenden Schlagkraft und zum anderen aus der vertikalen Auflast. Aufgrund des Versuchsablaufs wurden, nachdem die Auflast aufgebracht wurde, die Messsensoren tariert. Damit wurde die Dehnung der Schwelle aus der Auflast eliminiert und es konnte nur die Dehnung der Schwelle durch die Beanspruchung der Schlagkraft gemessen werden.

Zur Bestimmung der Beanspruchung der Schwelle durch die vertikale Auflast des DGS stehen nun nur die Ergebnisse aus der Verkehrsbelastung zur Verfügung. Die Messungen wurden nach der Überfahrtsimulation mit dem DGS durchgeführt, bevor die erste Verkehrsbelastung aufgebracht wurde. Hierzu wurden nach der Überfahrtsimulation der Stahlrahmen auf dem Gleis positioniert und drei Be- und

Entlastungszyklen mit einer maximalen vertikalen Auflast von 360 kN, die mittels des Stahlrahmens auf vier Belastungspunkte verteilt wurden, aufgebracht.

Ein Nachteil bei der gewählten Vorgehensweise ist, dass die Dehnung der Schwelle auf bereits durch den DGS konsolidiertem Schotter gemessen wird. Der Unterschied der Schwellenbiegung auf nicht durch den DGS konsolidiertem Schotter und auf durch den DGS konsolidiertem Schotter wird durch die folgende Messung deutlich.

Bei der Schwelle B07 So wurde im Zuge einer Überfahrtsimulation des DGS die Steifigkeit des Schotters vor der ersten Überfahrtsimulation, demnach auf nicht durch den DGS konsolidiertem Schotter, gemessen. Hierbei wurde der DGS zunächst auf Position 1 gehoben, am Stahlrahmen befestigt und schwebt ohne Kontakt zum Gleis über dem selbigen. Von diesem schwebenden Zustand wurde das Gleis dreimal mit 204 kN (130 bar) und einmal mit 110 kN (70 bar) beansprucht. Anschließend wurde die Stabilisierung auf Position 1 durchgeführt. Auf der Position 2 wurde genauso vorgegangen. Abbildung 72 zeigt exemplarisch den Ablauf der vertikalen Belastung durch den DGS auf Position 1 bzw. Position 2. Die Daten wurden über das Programm Catman direkt aus dem Signal der Steuerung des DGS aufgezeichnet. Auf der Ordinate ist die vertikale Belastung in bar dargestellt und die Abszisse zeigt den zeitlichen Verlauf in Sekunden. Es zeigt sich zunächst, dass die Auflaststeuerung in diesem Fall auf knapp 220 kN (140 bar) übersteuerte.

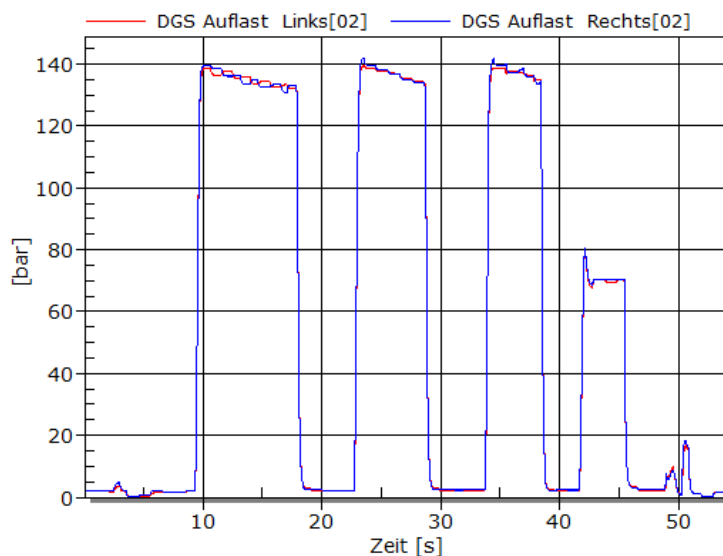


Abbildung 72: Belastung des Gleisrostes auf Position 1 bzw. Position 2 durch vertikale Auflast des DGS

Abbildung 73 zeigt nun den Vergleich des Biegeverhaltens exemplarisch an der am stärksten beanspruchten Schwelle 4 unter der Belastung durch den DGS auf unverdichtetem Schotter und unter Verkehrsbelastung durch den Stahlrahmen auf verdichtetem Schotter durch den DGS. Der Stahlrahmen simuliert die Belastungspunkte des DGS auf Position 1 und 2, daher muss für einen Vergleich mit der Schwellenbiegung

durch den DGS auf einer Position die Belastung durch den Stahlrahmen auf 180 kN halbiert werden. Die grünen Punkte zeigen die Dehnung auf der Schwellenoberseite bei einer Belastung von 110 kN bzw. 204 kN durch den DGS und der blaue Punkt zeigt die Dehnung der Schwelle 4 durch die Verkehrsbelastung von 180 kN.

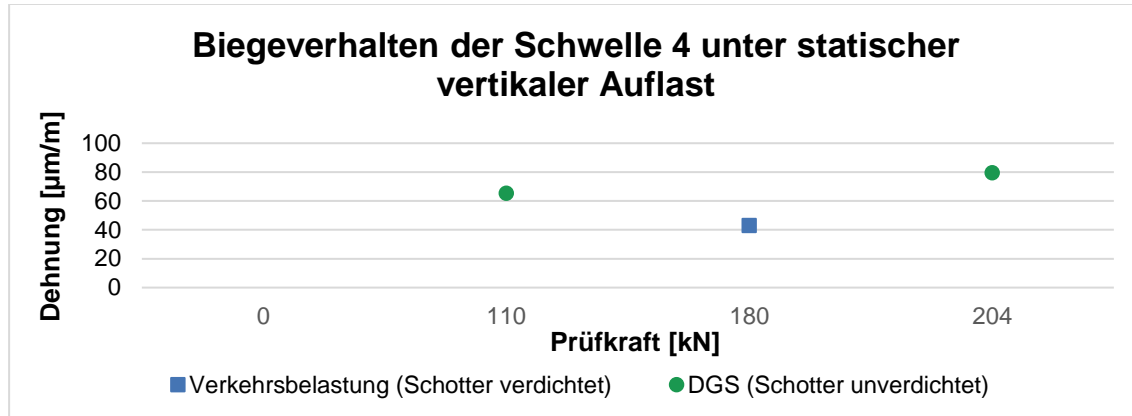


Abbildung 73: Dehnungsverhalten der Schwelle 4 unter statischer vertikaler Auflast

In Abbildung 73 ist deutlich zu erkennen, dass die Schwelle bei einer ungleichmäßigen Lagerung deutlich stärker auf Biegung beansprucht wird. Da allerdings nur die Ergebnisse der Schwellenbiegung aus der Verkehrsbelastung vorliegen und diese deutlich geringer sind als die Schwellenbiegung auf dem nicht durch den DGS verdichtetem Schotter, wird ein Korrekturfaktor eingeführt. Der Korrekturfaktor wird für jede Messung angewandt und soll die vorliegenden Ergebnisse aus der Verkehrsbelastung berichtigen, damit die durch den DGS hervorgerufene Schwellenbiegung nicht unterschätzt wird.

Der Korrekturfaktor wird aus dem Verhältnis des Ergebnisses aus der Belastung durch den DGS (unkonsolidierter Schotter) von 110 kN oder 204 kN zu dem Ergebnis aus der Verkehrsbelastung von 180 kN berechnet. Damit kann das Ergebnis der Verkehrsbelastung bei 180 kN durch einen Korrekturfaktor entweder auf die Schwellenbiegung bei einer Belastung von 110 kN (70 bar) oder 204 kN (130 bar) für einen unkonsolidierten Schotter umgerechnet werden.

Der Faktor liegt für die maßgeblichen Schwellen 4, 5 und 6 zwischen 5,1 – 8,3. Die genauen Werte für die Schwellen 4, 5 und 6 finden sich in Tabelle 23. Die Korrekturfaktoren für alle anderen Schwellen sind in Anlage A.11 zu finden.

Tabelle 23: Korrekturfaktor aus der Schwellendehnung der B07 So auf unkonsolidiertem Schotter zu den Schwellendehnungen auf konsolidiertem Schotter

Schwellenbiegung in [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Schwelle Nr.		
	4	5	6
auf unkonsolidiertem Schotter bei 110 kN (70 bar)	65,2	68,3	69,9
auf unkonsolidiertem Schotter bei 204 kN (130 bar)	79,5	77,0	78,1
auf konsolidiertem Schotter unter Verkehrsbelastung	12,8	9,3	12,9
Korrekturfaktor für Auflast 110 kN (70 bar)	5,1	7,3	5,4
Korrekturfaktor für Auflast 204 kN (130 bar)	6,2	8,3	6,0

Mit Hilfe der Korrekturfaktoren konnte die Biegung der Schwellen durch die vertikale Auflast berechnet werden.

Durch eine Superpositionierung der Messdaten aus der Schlagkraft und der vertikalen Auflast mit Korrekturfaktor kann die gesamte Beanspruchung der Schwellenbiegung durch den DGS abgeleitet werden.

Nachdem nun die Schwellenbiegung aus der Beanspruchung des DGS berechnet wurde, sollen diese Schwellenbiegungen qualitativ bewertet werden. Zur Bewertung der Schwellenbiegung aus der Beanspruchung des DGS dienen Vergleichswerte aus dem Kalibrierungsversuch, der angelehnt an das gültige Regelwerk [49, 35, 50] durchgeführt wurde.

Im Anschluss an die Laborversuche mit dem DGS wurden für die Kalibrierungsversuche von jedem Schwellentyp drei Schwellen gemessen, somit wurden neun Kalibrierungsversuche durchgeführt. Bei jedem Versuch wurde eine Erstbelastung von 20 kN aufgebracht. Nach der Entlastung wurde zunächst die Schwelle mit der charakteristischen Prüfkraft ($F_{C_{on}}$) belastet und wieder entlastet. Als letzter Zyklus wurde die Schwelle mit der Prüfkraft ($F_{C_{m}} = k_t \times F_{C_{on}}$), bei der nach geltendem Regelwerk noch kein Riss entstehen darf, belastet [50]. Die Prüfkraft, wie aus Tabelle 24 ersichtlich, sind vom Schwellentyp abhängig.

Tabelle 24: Spezifische Prüfkraft des Kalibrierungsversuchs für die Schwellentypen

	Schwellentyp		
	B70	B07 So	B90
Erstbelastung [kN]	20	20	20
$F_{C_{on}}$ [kN]	32	35	35
$F_{C_{m}} = k_t \times F_{C_{on}}$ [kN]	43	49	49

Im Anschluss an die Belastungen wurden die Schwellen auf Risse und etwaige andere Schäden überprüft.

5.5.1.2 Schotterproben

Jede Schotterprobe wurde über die gesamte Höhe des Querschnitts genommen. Damit die Probenentnahme vergleichbar ist wurde unter Zuhilfenahme eines Stahlrahmens der Schotter lagenweise entnommen und so der Rahmen bis zum Untergrund bzw. der Unterschottermatte abgesenkt (Abbildung 74).



Abbildung 74: Schotterprobeentnahme vor der Versuchsreihe B70

Für jede der im Labor untersuchten Oberbauform wurden drei Schotterproben vor dem ersten Einsatz des DGS und drei Schotterproben nachdem die Versuchsreihe abgeschlossen war genommen. Somit wurden insgesamt 18 Einzelschotterproben

untersucht. Eine Sammelprobe umfasst in diesem Fall die Ergebnisse aus drei Einzelproben.

Die Einzelprobenmenge betrug ca. 0,063 m³. Die empfohlene Mindestmasse M einer Sammelprobe berechnet sich nach der DIN EN 932-1 aus dem Größtkorn D sowie der Schüttdichte ρ_b zu [54]:

$$M = 6 \cdot \sqrt{D} \cdot \rho_b \quad 5.2$$

Aus der Leistungserklärung des Herstellers geht hervor, dass die Rohdichte des gelieferten Gleisschotters 2,7 Mg/m³ beträgt [55]. Hieraus lässt sich überschlägig die Mindestmasse für die Sammelprobe zu 128 kg errechnen. Die Einzelprobe wiegt ca. 171 kg. Somit wird die Mindestmasse der Sammelprobe durch die drei Einzelproben von je ca. 171 kg erfüllt.

Die Schotterprobe wurde dem Centrum für Baustoffe und Materialprüfung übergeben. Hier wurde neben einer Siebanalyse die Plattigkeits- und Kornformkennzahl nach gültigem Regelwerk ermittelt [56 – 58].

5.5.1.3 Steifigkeit der Zwischenlagen

Die drei untersuchten Oberbauformen sind mit folgenden unterschiedlich steifen Zwischenlagen ausgestattet: die B70 mit der Zw 687a, die B07 So mit der Zw 1000 und die B90 mit der Zw 900. Zur Ermittlung des Verhaltens unter dynamischer Beanspruchung durch den DGS wurden die Zwischenlagen vor der Versuchsreihe und nach der gesamten Versuchsreihe nach aktuell gültigem Regelwerk hinsichtlich ihrer Steifigkeit untersucht [38]. Bei dem statischen und niederfrequenten Prüfverfahren wird die zu prüfende Zwischenlage senkrecht belastet und dabei die Einsenkung gemessen. Im niederfrequenten Bereich wurde das Prüfverfahren bei 5 Hz, 10 Hz und 20 Hz angewandt. Aufgrund der Gleiskategorie C entsprechend einer Vollbahn ergab sich für die statische Prüfung die Oberlast zu 85 kN und die Unterlast zu 18 kN und für die dynamische Prüfung zu 68 kN und 18 kN [39].

5.5.2 Ergebnisse und Auswertung

5.5.2.1 Beschleunigungs- und Setzungsmessung

Die Auswertung erfolgte anhand der maximalen Werte des gleitenden Effektivwerts der Beschleunigung bzw. der Schwinggeschwindigkeit und der maximalen Wegamplitude, die aus der zweifachen Integration der Beschleunigung berechnet wurde. Zur Vereinfachung werden im Folgenden die maximalen gleitenden Effektivwerte als maximale Beschleunigungen bezeichnet.

Aufgrund des stationären Einsatzes des DGS auf Position 1 und 2 ist die Schwelle 6 bzw. 4 die Schwelle, die sich annähernd unterhalb der Rollenteller befinden und somit den größten Einfluss erfährt. Die Mittelwerte der maximalen Beschleunigungen und Wegamplituden der Schwelle werden aus den Ergebnissen der Schwelle 6 (Position 1) und der Schwelle 4 (Position 2) gebildet. Die Beschleunigungssensoren im Schotter wurden unter der Schwelle 6 unter dem linken und rechten Schienenaufleger eingebaut. Daher werden hier die Mittelwerte der Schotterbeschleunigung ausschließlich aus dem Einsatz des DGS auf Position 1 ermittelt.

Bei der simulierten Überfahrt eines DGS wurden die Beschleunigungen auf der Schwellenoberseite sowie in drei verschiedenen Tiefen gemessen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Schwellenbeschleunigung an der Oberseite der Schwelle und an der Unterseite der Schwelle gleich sind [59].

Abbildung 75 zeigt die Verteilung der Beschleunigung über den Schotterquerschnitt. Die Ordinate gibt die Schottertiefe an, die Abszisse die Beschleunigung in m/s^2 . Bei 0 cm ist die Schwellenbeschleunigung angegeben und in 8 cm, 15 cm sowie 25 cm Tiefe sind die lateralen Beschleunigungen aus den Schottermesssteinen (SMS) angetragen.

Die Schwellenbeschleunigungen bei den verschiedenen Versuchen liegen zwischen 8 m/s^2 bis 31 m/s^2 . Mit zunehmender Tiefe nehmen die Unterschiede der gemessenen

Schotterbeschleunigungen ab. Aufgrund der starken Streuung der Schwellenbeschleunigungen lässt sich keine offensichtliche Erkenntnis in Abhängigkeit der verschiedenen Einstellungsparameter (Frequenz und Auflast) ableiten.

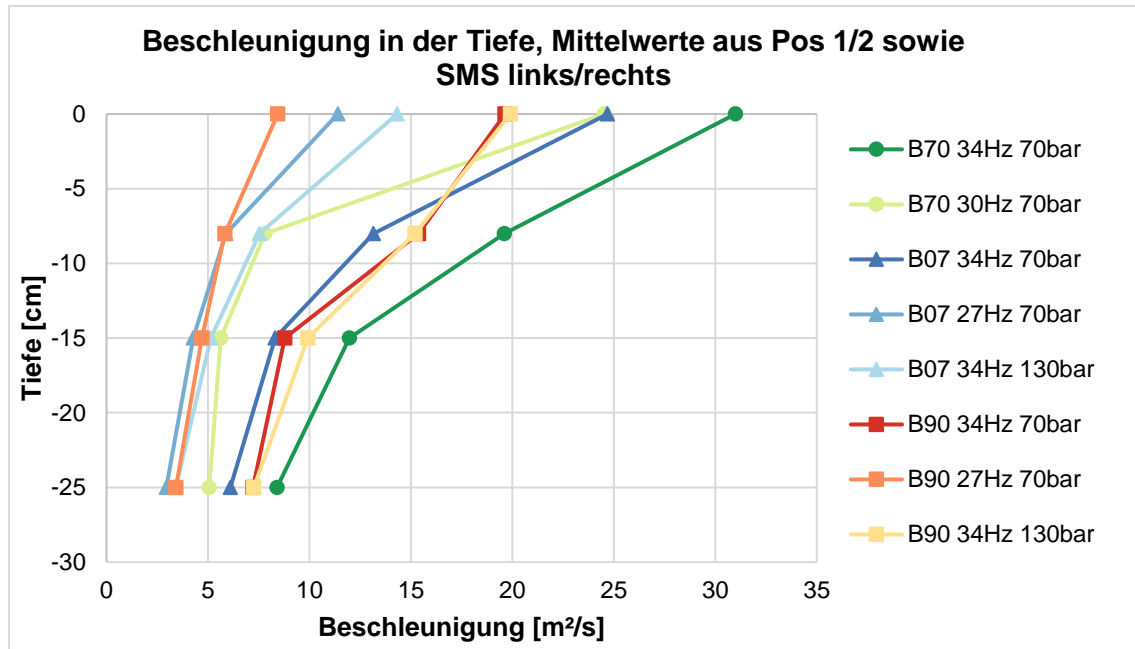


Abbildung 75: Beschleunigungswerte in der Tiefe, Mittelwerte aus Position 1/2 sowie Schottermessstein (SMS) links/rechts

Im nächsten Schritt wird daher die Schwellenbeschleunigung aller Versuche zu 100 % gesetzt. Dadurch kann die Weiterleitung der Beschleunigung im Schotter unabhängig von der Schwellenbeschleunigung bewertet werden.

Abbildung 76 zeigt die prozentuale Verteilung der Beschleunigung des Schotters auf Basis der Schwellenbeschleunigung. Es zeigt sich eine gewisse Gruppenbildung bei der Schwelle B07 So und B90 mit Ausnahme der B70. Auf Basis der Messungen scheint die Weiterleitung der Beschleunigung in die Tiefe im Schotter nur vom Schwellentyp und nicht von den Einstellungsparametern (Frequenz und Auflast) abzuhängen. Das würde bedeuten, dass die Beschleunigung im Schotter anhand der Schwellenbeschleunigung abgeschätzt werden kann und nicht durch eine aufwendige Messung mit Schottermesssteinen gemessen werden muss.

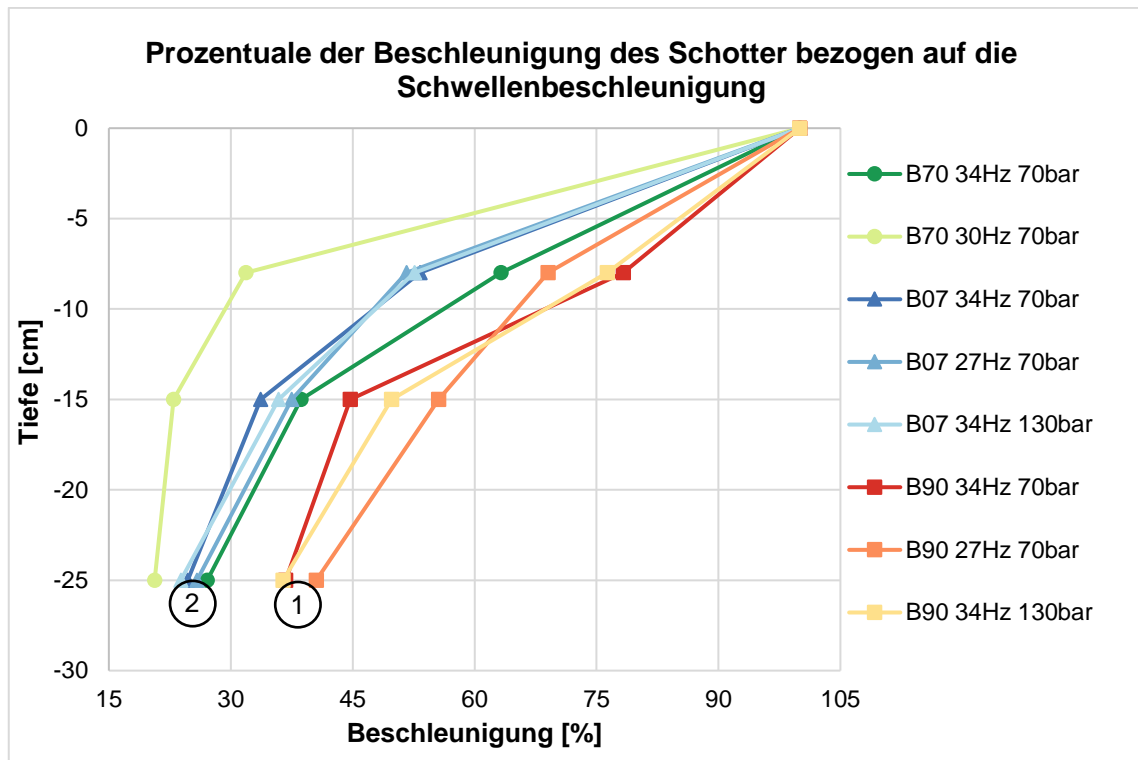


Abbildung 76: Prozentuale Abnahme der Beschleunigung des Schotters mit zunehmender Tiefe

Um diesen Aspekt zu verdeutlichen ist in Tabelle 25 die prozentuale Beschleunigung des Schotters in Bezug auf die Schwellenbeschleunigung mit der Angabe der Schwankungen dargestellt. Mit Hilfe der Tabelle können nun die lateralen Schotterbeschleunigungen aus der Schwellenbeschleunigung der Schwelle B90 und B07 So abgeschätzt werden.

In Anlage A.12 finden sich die Messwerte aus den drei kabellosen Schottermesssteinen (Axiivity) die jeweils 8 cm unter der Schwellenunterkante in der Schwellenmitte der Schwelle Nr. 6, im Vorkopfschotter und im Schwellenfach unterhalb der Schiene eingebettet wurden. Aus den Ergebnissen konnten keine weiteren Erkenntnisse gewonnen werden.

Tabelle 25: Prozentuale laterale Schotterbeschleunigung bezogen auf die Schwellenbeschleunigung (100 %)

[cm] unter Schwellenunterkante	0	-8	-15	-25
B70 (34Hz 70bar)	100 %	63 %	39 %	27 %
B70 (30Hz 70bar)		32 %	23 %	21 %
B07 So (34Hz 70bar)	100 %	53 %	36 %	25 %
B07 So (27Hz 70bar)		(+/- 5 %)	(+/- 2 %)	(+/- 1 %)
B07 So (34Hz 130bar)				
B90 (34Hz 70bar)	100 %	74 %	50 %	38 %
B90 (27Hz 70bar)		(+/- 5 %)	(+/- 5 %)	(+/- 2 %)
B90 (34Hz 130bar)				

Neben den Beschleunigungen wurden auch die Setzungen durch den DGS sowie durch die Verkehrsbelastung mittels Induktivwegaufnehmer gemessen. Abbildung 77 zeigt die Mittelwerte der maximalen Setzungen, wenn der DGS auf Position 1 stabilisiert. Dadurch entstehen die maximalen Setzungen bei den Schwellen 6 und 7. Die Grafik für Position 2 findet sich in der Anlage A.12.

Die Gesamtsetzung der Schwellen im Labor ist durch die roten Punkte gekennzeichnet. Diese Gesamtsetzung besteht aus drei Teilen. Der erste Setzungsanteil kommt aus der simulierten Überfahrt des DGS (gelbe Punkte in Abbildung 77). Der zweite Anteil kommt aus den ersten 100.000 Lt und der dritte Setzungsanteil aus der weiteren Verkehrsbelastung von 1,4 Mio. Lt.

Die Setzungen durch den DGS sind größer als durch die anschließende Verkehrsbelastung von 100.000 Lt bzw. 1,5 Mio. Lt.

Im Regelbetrieb besteht vor allem in den ersten 100.000 Lt, wenn der DGS nicht eingesetzt wird, die Wahrscheinlichkeit einer ungleichmäßigen Setzung durch die Betriebsbelastung, der sogenannten Anfangssetzung. Die Ergebnisse aus den Laborversuchen zeigen, dass der DGS einen Anteil dieser Anfangssetzungen durch eine kontrollierte Stabilisation vorwegnimmt. Es liegen jedoch keine Vergleichswerte aus dem Labor für ein nur gestopftes Gleis vor. Daher konnte nicht ermittelt werden wie groß die Setzungen sind, die der DGS im Vergleich zu einem Gleis, das nicht mit dem DGS stabilisiert wurde, vorwegnimmt.

Weiterhin zeigt sich, dass die Auflast einen Einfluss auf die Größe der Setzung hat. Bei der Schwelle B07 So und B90 entsteht durch eine Auflast von 204 kN (130 bar) eine größere Setzung als bei einer geringeren Auflast von 110 kN (70 bar).

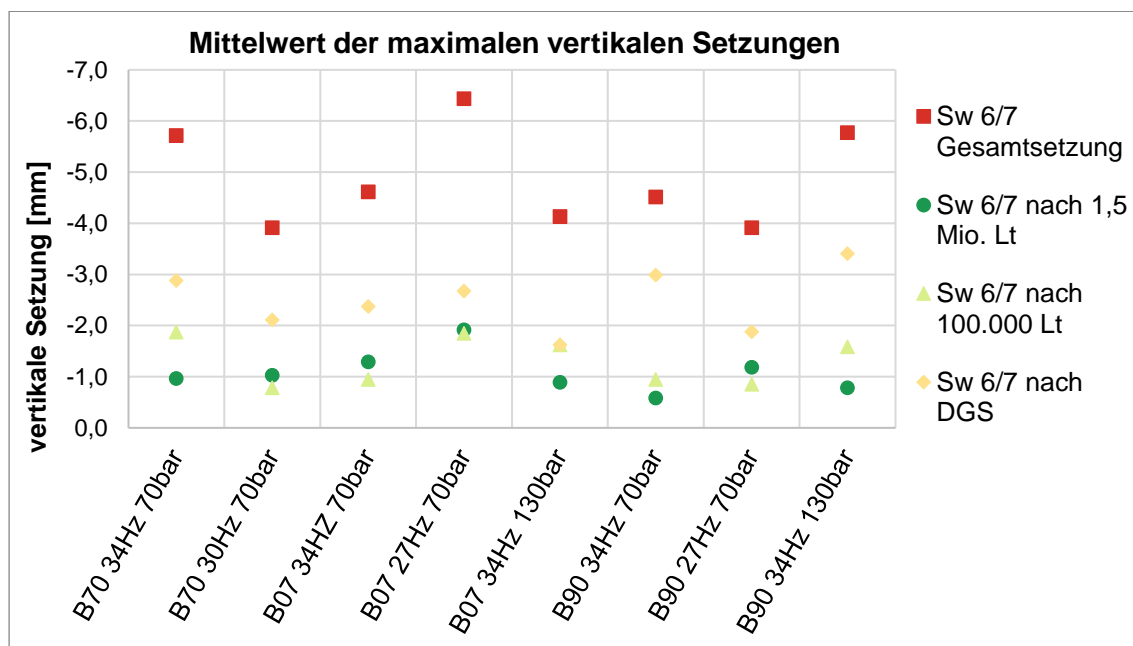


Abbildung 77: Mittelwert der maximalen vertikalen Setzung der Schwelle 6 und 7 (Sw 6/7)

Die maximalen horizontalen Wegamplituden, die unter der simulierten Überfahrt des DGS auf Position 1 und 2 entstehen, wurden mit zwei Messmethoden aufgenommen. Zum einen wurde die horizontale Bewegung der Schwelle mittels Induktivwegaufnehmer gemessen und zum anderen wurden die Ergebnisse der Beschleunigungsmessungen zweifach integriert und somit die Amplitude berechnet. Die Ergebnisse beider Messmethoden sind in Tabelle 26 dargestellt. Aufgrund der harmonischen Anregung durch den DGS liefert die zweifache Integration der Schwellenbeschleunigung vergleichbare Ergebnisse zu den Wegamplituden, die mit den Induktivwegaufnehmern mitgemessen wurden. Die zweifache Integration der Beschleunigung der Schottermesssteine liefert hingegen keine plausiblen Ergebnisse, aufgrund der diskontinuierlichen Anregung.

Die Ergebnisse der maximalen Wegamplituden liegen zwischen 0,5 mm und 1,0 mm. Die größte Wegamplitude entsteht bei der Schwelle B70. Dies steht direkt im Zusammenhang mit dem Schwellengewicht, der Schwellenform sowie der fehlenden Schwellenbesohlung. Die B70 hat neben einem geringeren Schwellengewicht (290 kg) auch die geringste Schwellengrundfläche (5.700 cm²) [48]. Daraus ergibt sich für die B70 ein geringerer Reibungskoeffizient, was eine größere Wegamplitude ermöglicht. Im Gegensatz dazu haben die B07 So und die B90 ein um ca. 50 kg höheres Schwellengewicht und eine größere Schwellengrundfläche (6.688 cm²) [47, 60]. Zusätzlich hat die Schwellenform eine Einschnürung in der Schwellenmitte, wodurch sich die seitliche Kontaktfläche erhöht. Diese Aspekte wirken sich positiv auf den Reibungskoeffizienten aus. Die kleinste Wegamplitude wurde bei der Schwelle B07 So gemessen. Die B07 So besitzt ähnliche Spezifika wie die B90 nur hat sie zusätzlich eine Schwellenbesohlung. Durch die Besohlung können sich die Schotterkörner besser mit der Schwellengrundfläche verzahnen, der Reibungskoeffizient erhöht sich und die Wegamplitude ist nochmal etwas geringer (0,5 mm) als bei der Schwelle B90 (0,7 mm).

Die maximale horizontale Wegamplitude des DGS wird von Plasser & Theurer mit 2,5 mm angegeben [43]. Damit ergibt sich eine Abnahme der eingebrachten Wegamplitude von 64 % bis 80 %. Im Vergleich dazu zeigen die Ergebnisse der Feldmessungen eine Reduzierung der Wegamplitude um ca. 50 %. Ein Großteil dieses Verlustes entsteht durch die Bettung der Schwelle im Schotter, der die Bewegungsfreiheit der Schwelle einschränkt, sowie durch die Schientorsion und die elastischen Befestigungskomponenten bzw. die Schwellenbesohlung. Die Differenz der horizontalen Wegamplitude zwischen den drei Schwellentypen entsteht durch die soeben genannten Spezifika der Schwellen.

Tabelle 26: Mittelwerte der maximalen lateralen Wegamplitude der Schwellen 3, 4 und 6, 7

Versuchsaufbau	Mittelwert der maximalen Wegamplitude [mm]		Mittelwert der maximalen Amplitude aus den Beschleunigungsdaten [mm]	
B70 34Hz 70bar	0,8	0,9	1,0	1,0
B70 30Hz 70bar	1,0		1,0	
B07 So 34Hz 70bar	0,4	0,5	0,7	0,6
B07 So 27Hz 70bar	0,6		0,6	
B07 So 34Hz 130bar	0,4		0,5	
B90 34Hz 70bar	0,9	0,7	0,7	0,6
B90 27Hz 70bar	0,6		0,5	
B90 34Hz 130bar	0,6		0,7	

Abschließend werden die Ergebnisse der maximalen Wegamplitude und der Schwellenbeschleunigung gegenübergestellt und in Kontext gebracht (siehe Tabelle 27).

Tabelle 27: Gegenüberstellung der maximalen Wegamplituden und der Mittelwerte des maximalen effektiven Gleitwert der Beschleunigung

Versuchsaufbau	Mittelwert der maximalen Wegamplitude [mm]	Mittelwert des maximalen effektiven Gleitwert der Beschleunigung[m/s ²]
B70 34Hz 70bar	0,8	31
B70 30Hz 70bar	1,0	25
B07 So 34Hz 70bar	0,4	25
B07 So 27Hz 70bar	0,6	11
B07 So 34Hz 130bar	0,4	14
B90 34Hz 70bar	0,9	20
B90 27Hz 70bar	0,6	8
B90 34Hz 130bar	0,6	20

Dabei fällt auf, dass die Ergebnisse in die Kategorien „im Fließbereich“ und „außerhalb des Fließbereichs“, unabhängig von dem Schwellentyp eingeordnet werden können. Das Schotterfließen zeichnet sich dadurch aus, dass sich die Reibungskräfte zwischen den Schotterkörnern reduzieren und dadurch Gleitflächen erzeugt werden (siehe Kapitel 5.4.2.).

Innerhalb Fließbereich:

Im Fließbereich (34 Hz) entsteht bei der Schwelle B90 für eine höhere Auflast eine geringere Wegamplitude (0,6 mm). Mit einer Erhöhung der Auflast (130 bar) steigt der Kontaktdruck und dadurch wird die Bewegungsfreiheit der Schwelle zunehmend eingeschränkt, gekennzeichnet durch die kleinere Wegamplitude (0,6 mm). Die Schwellenbeschleunigung bleibt allerdings für eine Auflast von 110 kN (70 bar) und

204 kN (130 bar) mit 20 m/s² gleich groß. Der Grund hierfür liegt in dem Schotterfließen. Durch die entstehenden Gleitflächen der Schotterkörner und die glatte Schwellengrundfläche der B90 wird der Schotter nicht als Widerstand für die Schwellenbeschleunigung aktiviert. Dadurch wird bei einer erhöhten Auflast die Schwellenbeschleunigung nicht gemindert.

Die Schwelle B07 So verhält sich im Fließbereich (34 Hz) wegen ihrer Schwellenbesohlung etwas anders. Die Wegamplitude für eine Auflast von 110 kN und 204 kN ist mit 0,4 mm gleich groß und ist kleiner als die Wegamplitude der B90 (0,9 mm bzw. 0,6 mm). Durch die Schwellenbesohlung verankern sich, anders als bei der glatten Grundfläche der Schwelle B90, die Schotterkörner in der Sohle. Dadurch wird der Reibungskoeffizient erhöht und die Wegamplitude wird damit kleiner (0,4 mm). Gleichzeitig scheint die Auflast keinen weiteren Einfluss auf den Reibungskoeffizienten auszuüben. Daraus lässt sich ableiten, dass durch die Schwellenbesohlung bereits bei einer Auflast von 110 kN (70 bar) sich eine Art maximaler Reibungskoeffizient einstellt und dieser durch eine Laststeigerung nicht weiter erhöht werden kann.

Bei der B07 So wurde bei einer Auflast von 110 kN (70 bar) eine maximale Schwellenbeschleunigung von 25 m/s² und bei einer höheren Auflast von 204 kN (130 bar) eine maximale Schwellenbeschleunigung von nur 14 m/s² gemessen. Die Erklärung für die Reduzierung der Beschleunigung mit steigender Auflast liegt ebenfalls in der Schwellenbesohlung. Bei 70 bar verankert sich die oberste Schicht der Schotterkörner. Durch eine höhere Auflast werden auch aus tieferen Schichten die Schotterkörner in ihrer Bewegung eingeschränkt und als angebundene Schwungmasse aktiviert.

Die horizontale Schlagkraft (F) ist abhängig von der Unwuchtmasse, der Exzentrizität und der Frequenz (siehe Kapitel 1.2). Das bedeutet, dass die Schlagkraft bei einer Auflast von 110 kN oder 204 kN gleichbleibt. Die Beschleunigung errechnet sich ausfolgender Formel:

$$a = \frac{F}{m} \quad 5.3$$

Daraus ergibt sich, dass die Schwellenbeschleunigung (a) sinkt, wenn die Schwungmasse (m), bei gleichbleibender Schlagkraft (F), größer wird. Durch die höhere Auflast verankert sich neben der obersten Schotterschicht auch die tiefere Schotterschicht mit der Schwellenbesohlung und wirkt somit als angebundene Schwungmasse. Aus diesem Grund entsteht eine geringere Schwellenbeschleunigung (14 m/s²) der B07 So bei einer höheren Auflast (130 bar).

Für die Schwellentypen im Einzelnen betrachtet, treten die größten Schwellenbeschleunigungen im Fließbereich (34 Hz) auf. Gleichzeitig wurden bei der B70 und B90 die größten Setzungen während des Einsatzes des DGS ebenfalls im

Fließbereich gemessen. Dies lässt den vorsichtigen Schluss zu, dass durch den Einsatz des DGS im Fließbereich eine größere Setzung vorweggenommen werden kann und dann durch weitere Verkehrsbelastungen weniger Setzungen erfolgen sollten. Damit würde das Potential von Gleislagefehlern minimiert werden. Diese Setzungen scheinen im Zusammenhang mit der Schwellenbeschleunigung zu stehen. Diese Zusammenhänge sollten weiter bei Feldmessungen unter Anwendung einer maschinellen Stopfung und DGS-Einsatz untersucht werden. Da im Feld Einflüsse aus der Handstopfung wie beim Versuchsaufbau im Labor entfallen.

Außerhalb Fließbereich:

Außerhalb des Fließbereichs wurden für die Schwellen B90 und die B07 So annähernd die gleichen Werte für die maximale Wegamplitude und die maximale Schwellenbeschleunigung gemessen. Die Schwellenbeschleunigung außerhalb des Fließbereichs (8 m/s^2 bzw. 11 m/s^2) ist wesentlich kleiner als zu der vergleichbaren Beschleunigung im Fließbereich (20 m/s^2 bzw. 25 m/s^2). Bei einer Schwingfrequenz von 27 Hz wird der Schotter nicht zum Fließen angeregt. Stattdessen entsteht mehr Widerstand durch die Reibungsinteraktion der einzelnen Schotterkörner wodurch die Schwellenbeschleunigung behindert wird.

Die Ergebnisse aus den Beschleunigungs- und Einsenkungsmessungen bei der Simulation der Überfahrt des DGS und der Verkehrsbelastung werden zusammengefasst:

- Die Weiterleitung der Schwellenbeschleunigung in den Schotter ist prozentual für einen Schwellentyp immer gleich. Demnach ist der Wert der Schwellenbeschleunigung entscheidend für die Größe der Schotterbeschleunigung. Aus der Schwellenbeschleunigung kann somit die Schotterbeschleunigung abgeschätzt werden und eine aufwändige Messung wäre nicht mehr notwendig.
- Eine zweifache Integration der Schwellenbeschleunigung entspricht der gemessenen horizontalen Wegamplitude.
- Die größte Wegamplitude wurde bei der leichtesten Schwelle (B70) gemessen, aufgrund des geringen Schwellengewichts, der Schwellenform und dem sich daraus ergebenden kleineren Reibungskoeffizienten.
- Im Fließbereich: Für die unbesohlte Schwelle B90 gilt, dass aufgrund des Schotterfließens die Schwellenbeschleunigung durch eine Steigerung der Auflast (von 110 kN auf 204 kN) nicht beeinflusst wird.

Für eine besohlte Schwelle B07 So gilt, dass mehr Schotter als angebundene Schwungmasse aktiviert wird, wodurch die Schwellenbeschleunigung bei einer höheren Auflast sinkt.

Außerhalb des Fließbereichs: Die Schwellenbeschleunigung wird unabhängig des Schwellentyps aufgrund des höheren Widerstandes durch die Reibungsinteraktion der Schotterkörner behindert.

5.5.2.2 Querverschiebewiderstand (QVW)

Bei den Laborversuchen wurde der QVW nach dem Handstopfen, nach dem simulierten Einsatz des DGS und nach einer simulierten Verkehrsbelastung von 100.000 Lt sowie 1,5 Mio. Lt gemessen. Die Tabelle 28 zeigt die gemittelten QVW-Werte über die Einzelversuchsergebnisse. Es fällt auf, dass die QVW-Werte nach dem Stopfen zwischen 5,4 kN und 8,1 kN stark streuen. Das bedeutet, dass bereits die Ausgangslage der Versuche sehr unterschiedlich ist. Die grau hinterlegten Werte in Tabelle 28 bei dem Versuch B90 34 Hz 130 bar und B90 stopfen ohne DGS sind untypisch, da hier der QVW nach dem Stopfen im Vergleich zu dem QVW nach einer Verkehrsbelastung sinkt. Diese Ausreißer könnten durch ein ungleichmäßiges Stopfen hervorgerufen worden sein. Eine gesicherte Aussage woher diese Ausreißer kommen, kann nicht getroffen werden. Im weiteren Verlauf werden die Ergebnisse des Versuchs B90 (34 Hz 130 bar) ohne Veränderungen dargestellt. Der QVW nach 100.000 Lt der Schwelle B90 ohne DGS wird aus der Wertung genommen und hier das Ergebnis nach dem Stopfen und nach 1,5 Mio. Lt linear verbunden, da dies einen plausiblen Verlauf ergibt.

Die Anfangswerte der QVW nur nach dem Stopfen ohne den Einsatz des DGS (B07 So – 6,8 kN; B90 – 8,1 kN) sind im Vergleich zu den anderen Anfangswerten höher. Bei dem Versuch der Schwelle B07 So ohne einen DGS Einsatz ergibt sich nach 100.000 Lt ein QVW-Wert von 7,7 kN. Dieser Wert wird bei der B07 So nach einem DGS Einsatz nicht erreicht und auch nicht nach einer weiteren Belastung von 100.000 Lt. Bei der Schwelle B90 ist der QVW-Wert bei dem Versuch ohne den Einsatz des DGS nach 100.000 Lt unrealistisch und daher kann keine Aussage getroffen werden. Bei der Schwelle B70 wurde kein Versuch ohne DGS durchgeführt.

Tabelle 28: Mittelwerte der Querverschiebewiderstände

Versuchsaufbau	Mittelwerte QVW [kN]			
	nach Stopfen	nach DGS	nach 100.000 Lt	nach 1,5 Mio. Lt
B70 34Hz 70bar	5,7	5,8	6,1	6,9
B70 30Hz 70bar	5,4	6,3	6,8	7,2
B07 So 34Hz 70bar	6,6	7,3	7,5	8,0
B07 So 27Hz 70bar	6,3	6,7	7,4	9,0
B07 So 34Hz 130bar	5,7	7,1	7,6	7,7
B07 So ohne DGS	6,8	-	7,7	7,8
B90 34Hz 70bar	5,5	7,3	7,3	8,0
B90 27Hz 70bar	5,8	6,7	7,3	7,4
B90 34Hz 130bar	6,6	7,1	6,5	6,7
B90 ohne DGS	8,1	-	6,4	9,6

Aufgrund des stark variierenden QVW nach dem Stopfen wird dieser Wert für die folgende Auswertung auf 100 % gesetzt und dann der Zuwachs des QVW durch den

DGS bzw. durch die Verkehrsbelastung berechnet. Mit dieser Methode kann die Wirksamkeit des DGS bewertet werden ohne den Einfluss des Handstopfvorganges. Abbildung 78 zeigt den Zuwachs des QVW in Bezug auf den QVW des Stopfvorganges. Zu beachten ist, dass für die Schwelle B07 So und B90 ohne DGS nur Ergebnisse für die Zustände „nach Stopfen“, „nach 100.000 Lt“ und nach „1,5 Mio. Lt“ ermittelt wurden. Da hier der DGS nicht angewandt wurde, entsteht auch kein Zuwachs des QVW. Daher bleiben hier die Werte für den Zustand „nach Stopfen“ und „nach 100.000 Lt“ bei 100 %.

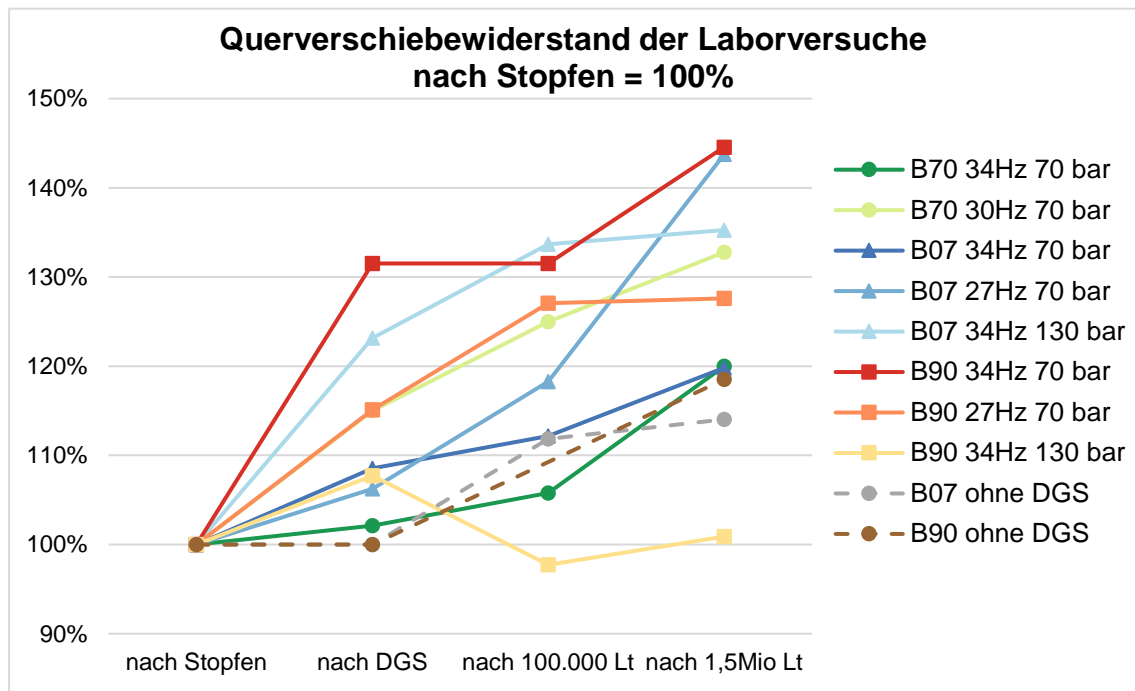


Abbildung 78: Zuwachs des QVW auf Basis des QVW nach dem Stopfen

Die Abbildung 78 wird für eine bessere Übersicht in die Tabelle 29 überführt. Die Tabelle zeigt für jeden Laborversuch den QVW nach dem Stopfen, nach dem simulierten Einsatz des DGS und nach einer simulierten Verkehrsbelastung von 100.000 Lt. Weiterhin wird der prozentuale Zuwachs aus dem Einsatz des DGS bzw. aus der Verkehrsbelastung dargestellt. Bei der Schwelle B70 wurde kein Versuch ohne DGS durchgeführt, bei dem der Zuwachs des QVW durch die Verkehrsbelastung gemessen wurde. Der Abfall des QVW bei der B90 ohne einen Einsatz des DGS ist nicht plausibel und wird daher nicht zur Auswertung herangezogen. Für die Schwelle B07 So liegen plausible Werte für den Zuwachs des QVW ohne DGS vor. Nach dem Einsatz des DGS wird der größte QVW-Zuwachs bei dem Versuch B90 34 Hz 70 bar (31,8 %) erreicht. Bei den Versuchen B07 So 34 Hz 130 bar (23,7 %), B70 30 Hz 70 bar (15,7 %) und B90 27 Hz 70 bar (14,7 %) ist ebenfalls ein großer Zuwachs zu verzeichnen. Um die Vorwegnahme einer Verdichtung äquivalent von 100.000 Lt in Bezug auf die Gleislagestabilität zu beurteilen, wird der Zuwachs durch eine Verkehrsbelastung von 100.000 Lt der B07 So ohne DGS (12,5 %) mit den Zuwächsen der Versuche, bei denen der DGS eingesetzt wurde,

verglichen. Daraus geht hervor, dass durch den DGS bei dem Versuch B07 So 34 Hz 130 bar einer äquivalenten Verdichtung des Oberbaus von ca. 100.000 Lt vorweggenommen werden kann. Bei dem Versuch B07 So 34 Hz 70 bar (9,8 %) wird der Referenzwert nur knapp unterschritten. Für die anderen Schwellentypen (B90 und B70) kann aus den Laborversuchen eine solche Aussage aufgrund der fehlenden Referenzwerte nicht getroffen werden.

Aus diesen Ergebnissen (Tabelle 29) geht hervor, dass durch optimierte Parameter des DGS der QVW erhöht werden kann. Diese guten Erkenntnisse sollten mit Feldversuchen evaluiert werden. Die vielversprechendsten Kombinationen, die aus den Laborversuchen auf Grundlage der Querverschiebewiderstandsauswertung hervorgehen, sind:

- B90 34 Hz 70 bar
- B07 So 34 Hz 130 bar
- B90 27 Hz 70 bar
- B70 30 Hz 70 bar

Die Ergebnisse zeigen die Tendenz, dass durch den DGS im Fließbereich höhere Zuwächse des QVW erreicht werden. Diese Tendenz deckt sich weitestgehend mit den größeren Beschleunigungs- und Setzungsergebnissen im Fließbereich während des DGS-Einsatzes. Daher sollte in weiteren Feldmessungen untersucht werden, ob Rückschlüsse aus der Schwellenbeschleunigung bzw. auftretende Setzungen während des DGS-Einsatzes auf den QVW getroffen werden können.

Tabelle 29: Querverschiebewiderstände und der Zuwachs durch DGS bzw. Verkehrsbelastung

Versuchsaufbau	Mittelwerte QVW [kN] und Zuwachs [%]				
	nach Stopfen [kN]	Zuwachs DGS [%]	nach DGS [kN]	Zuwachs 100.000 Lt [%]	nach 100.000 Lt [kN]
B70 34Hz 70bar	5,7	+ 1,8	5,8	+ 3,5	6,0
B70 30Hz 70bar	5,4	+ 15,7	6,3	+ 9,3	6,8
B07 So 34Hz 70bar	6,6	+ 9,8	7,3	+ 3,0	7,5
B07 So 27Hz 70bar	6,3	+ 5,6	6,7	+ 11,1	7,4
B07 So 34Hz 130bar	5,7	+ 23,7	7,1	+ 9,6	7,6
B07 So ohne DGS	6,8	-	-	+ 12,5	7,7
B90 34Hz 70bar	5,5	+ 31,8	7,3	+ 0,0	7,3
B90 27Hz 70bar	5,8	+ 14,7	6,7	+ 11,2	7,3
B90 34Hz 130bar	6,6	+ 7,6	7,1	- 9,8	6,5
B90 ohne DGS	8,1	-	-	- 21,0	6,4

Die unterschiedlichen Spezifika der Schwellen wie Schwellengewicht, Schwellenform und Schwellenbesohlung tragen dazu bei, welcher QVW sich nach dem Stopfen ergibt. Der Mittelwert nach dem Stopfen aller Versuche aus Tabelle 29 ergibt sich für die B70

zu 5,6 kN, für die B07 So zu 6,4 kN und für die B90 zu 6,0 kN. Bei der B90 wird der Wert aus dem Versuch ohne DGS (8,1 kN) nicht berücksichtigt. Der Zuwachs des Querverschiebewiderstandes ohne DGS steigt von der Schwelle B70 (5,6 kN) zur Schwelle B07 So (6,4 kN) um 14,3 %. Der Zuwachs ist hier dem Schwellengewicht, der Schwellenform und der Schwellenbesohlung zu zuschreiben. Der Zuwachs des QVW der Schwelle B90 (6,0 kN) zur Schwelle B07 So (6,4 kN) beträgt 6,7 %. Aufgrund der ähnlichen Form und des ähnlichen Schwellengewichts muss die Schwellenbesohlung für den Zuwachs verantwortlich sein. Daraus ergibt sich, dass der Zuwachs von der B70 zur B07 So (14,3 %) sich aus 6,7 % durch das Schwellengewicht und der Schwellenform und der Rest aus 7,6 % durch die Schwellenbesohlung zusammensetzen. Das lässt den Schluss zu, dass ca. 50 % des QVW-Zuwachses bei einer besohnten Schwelle B07 So aus dem Schwellengewicht und der Schwellenform und ca. 50 % aus der Schwellenbesohlung im Gegensatz zur Schwelle B70 kommen.

Die Ergebnisse der QVW-Messungen werden abschließend zusammengefasst:

- Eine Verdichtung des Schotters äquivalent zu einer Verkehrsbelastung von ca. 100.000 Lt konnte bei der B07 So für eine Parameterkombination von 34 Hz 130 bar und knapp für 34 Hz 70 bar nachgewiesen werden.
- Der QVW ist abhängig von der Schwellenform, dem Schwellengewicht sowie der Schwellenbesohlung. 50 % des QVW-Zuwachses kommt bei einer besohnten Schwelle B07 So aus dem Schwellengewicht und der Schwellenform und 50 % aus der Schwellenbesohlung.
- Zu den Parametervariationen, bei denen der größte QVW-Zuwachs durch den DGS entsteht, gehören:
 - B90 34 Hz 70 bar (+ 31,8 %)
 - B07 So 34 Hz 130 bar (+ 23,7 %)
 - B90 27 Hz 70 bar (+ 14,7 %)
 - B70 30 Hz 70 bar (+ 15,7 %)

5.5.2.3 Schwellenbiegung

Durch den Einsatz des DGS wird die Schwelle auf Biegung beansprucht. Durch Dehnmessstreifen wurde die Dehnung in Schwellenmitte gemessen. Diese Dehnung wird mit den Ergebnissen des Kalibrierungsversuchs, der in Kapitel 5.5.1.1 beschrieben wird, bewertet.

Aufgrund des Ablaufs der Labormessungen mussten bei der Messung die Dehnmessstreifen tariert werden. Daher wurden die Schwellendehnungen für die unterschiedlichen Belastungssituationen bzw. Konsolidierungszustände des Schotters mit einem pessimistischen Ansatz superpositioniert und ein Korrekturfaktor eingeführt (siehe Kapitel 5.5.1.1).

Generell wurden die Ergebnisse aus den einzelnen Messungen am Gleisrost an Position 1 und an Position 2 des DGS superponiert, um die Beanspruchung eines DGS-

Doppelaggregats beurteilen zu können. Die Biegebeanspruchung der Schwelle aus dem DGS setzt sich zum einen aus der horizontalen dynamischen Belastung (Schlagkraft) und zum anderen aus der vertikalen quasi-statischen Auflast zusammen. Die Dehnungen aus diesen beiden Anteilen werden superponiert und mit dem Korrekturfaktor beaufschlagt.

Zunächst wird erläutert wie sich die Schwellenbeanspruchung aus dem DGS zusammensetzt und welche Gesamtdehnung, aus den verschiedenen Anteilen, dabei in der Schwelle entstehen. Anschließend werden die Ergebnisse aus dem Kalibrierungsversuchs vorgestellt und mit der Gesamtdehnung der Schwelle aus den Laborversuchen verglichen.

Das Vorgehen zur Ermittlung der Gesamtdehnung der Laborversuche wird anhand der Schwellen 4, 5 und 6 beschrieben, da dies die am stärksten belasteten Schwellen im Versuchsaufbau sind. Die Ergebnisse aller Schwellen im Labor sind in Anlage A.11 dargestellt. Die Auswertung erfolgt mit den maximalen Werten, die die Dehnung der Schwelle widerspiegeln.

Tabelle 30 zeigt die maximalen Dehnungen in $\mu\text{m}/\text{m}$ der Dehnmesstreifen unter der Schlagkraft des DGS überlagert für die Position 1 und 2:

Tabelle 30: Superponierte (Position 1 + 2) Ergebnisse der Dehnungsmessung unter horizontaler dynamischer Belastung (Schlagkraft)

Dehnungen aus Superposition der DGS Position 1 und Position 2 [$\mu\text{m}/\text{m}$]			
Versuchsaufbau	Schwelle Nr. 4	Schwelle Nr. 5	Schwelle Nr. 6
B70 34Hz 70bar	50,6	27,4	110,3
B70 30Hz 70bar	18,6	4,3	24,3
B07 So 34Hz 70bar	27,7	20,9	27,9
B07 So 27Hz 70bar	15,7	15,4	20,3
B07 So 34Hz 130bar	62,9	48,5	36,7
B90 34Hz 70bar	36,3	28,4	42,2
B90 27Hz 70bar	13,8	21,1	17,0
B90 34Hz 130bar	16,2	7,7	21,8

Die Ergebnisse aus der vertikalen Verkehrsbelastung von 180 kN durch den Belastungsrahmen bei jedem Versuchsaufbau zeigt Tabelle 31.

Tabelle 31: Ergebnisse Dehnungsmessung unter vertikaler Auflast durch den Belastungsrahmen aufgebracht

Dehnungen aus vertikaler Auflast (180 kN) durch Belastungsrahmen [$\mu\text{m/m}$]				
Versuchsaufbau	Auflast [kN]	Schwelle Nr. 4	Schwelle Nr. 5	Schwelle Nr. 6
B70 34Hz 70bar	180	59,6	30,8	43,2
B70 30 Hz 70bar	180	38,4	21,4	28,9
B07 So 34Hz 70bar	180	43,0	14,8	40,9
B07 So 27Hz 70bar	180	24,7	21,8	16,3
B07 So 34Hz 130bar	180	12,8	9,3	12,9
B90 34Hz 70bar	180	55,2	7,8	14,7
B90 27Hz 70bar	180	47,2	29,9	58,3
B90 34Hz 130bar	180	31,1	10,6	8,1

Wie in Kapitel 5.5.1.1 erläutert, wurde ein Korrekturfaktor berechnet, um den unterschiedlichen Konsolidierungszuständen des Schotters Rechnung zu tragen. Aus Tabelle 32 können die Korrekturfaktoren der einzelnen Schwellen für eine vertikale Auflast von 110 kN (70 bar) und 204 kN (130 bar) entnommen werden.

Tabelle 32: Korrekturfaktor für die Schwellen in Abhängigkeit der Belastung

Schwellen Nr.:	2	3	4	5	6	7	8
Korrekturfaktor für 110 kN (70 bar)	3,4	2,8	5,1	7,3	5,4	4,1	6,2
Korrekturfaktor für 204 kN (130 bar)	3,7	3,5	6,2	8,3	6,0	5,0	6,9

Der Korrekturfaktor wird mit den Messergebnissen aus Tabelle 31 multipliziert und zu den Dehnungen aus der Schlagkraft (Tabelle 30) addiert. Dadurch ergibt sich die in Tabelle 33 dargestellte Gesamtdehnung der Schwelle aus der Beanspruchung des DGS.

Tabelle 33: Gesamtdehnung der Schwelle durch die Beanspruchung des DGS

Gesamtdehnung aus den Laborversuchen [$\mu\text{m}/\text{m}$]							
Schwellen Nr.:	2	3	4	5	6	7	8
B70 34Hz 70bar	75,5	Störung	355,0	253,1	343,8	85,1	118,0
B70 30 Hz 70bar	75,5	302,8	214,9	161,4	180,6	233,0	211,9
B07 So 34Hz 70bar	104,2	199,4	247,2	129,1	248,8	104,5	Störung
B07 So 27Hz 70bar	Störung	114,5	141,7	175,7	108,4	176,5	Störung
B07 So 34Hz 130bar	68,8	149,2	142,4	125,4	114,7	67,8	58,4
B90 34Hz 70bar	84,6	125,1	318,4	85,5	121,7	66,3	150,8
B90 27Hz 70bar	77,7	74,7	254,9	240,5	331,8	199,5	105,8
B90 34Hz 130bar	170,3	146,0	209,8	95,2	70,5	207,7	209,5

Die grau hinterlegten Felder konnten aufgrund von Messfehlern nicht ausgewertet werden. Die größten Dehnungen durch die Beanspruchung des DGS treten bei den Schwellen 3, 4 und 5, 6 auf. Die maximalen Dehnungen für die unterschiedlichen Versuche liegen zwischen 149,2 $\mu\text{m}/\text{m}$ und 355 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Zur Bewertung der maximalen Dehnungen durch die Beanspruchung des DGS werden die Ergebnisse aus dem Kalibrierungsversuch zum Vergleich herangezogen. Tabelle 34 zeigt die Mittelwerte der Kalibrierungsversuche unterteilt nach Schwellentyp für die Erstbelastung von 20 kN, für die charakteristische Prüfkraft (F_{con}) und die Prüfkraft bei der noch kein Riss entstehen darf (F_{crn}). Die Mittelwerte ergeben sich jeweils aus drei gemessenen Schwellen für jeden Schwellentyp. Die einzelnen Ergebnisse finden sich in Anlage A.10.

Bei der Belastung mit der charakteristischen Prüfkraft (F_{con}) wird eine Dehnung erzeugt, die ein Maß für die zu erwartenden Dehnungen unter Nutzlast und auf freier Strecke darstellt. Bis zum Erreichen der Dehnung die unter der Mindestprüfkraft zur Erstrissbildung (F_{crn}) entsteht, kann davon ausgegangen werden, dass keine strukturellen Schäden an der Schwelle auftreten [49, 50].

Tabelle 34: Ergebnisse des Kalibrierungsversuch

Schwellentyp	Mittelwert der Dehnung [$\mu\text{m}/\text{m}$]				
	Erstbelastung 20 kN	F_{con}		$F_{\text{crn}} = k_t \cdot F_{\text{con}}$	
		32 kN	32 kN	43 kN	49 kN
B70	183,7	303,5		440,0	
B07 So	177,5		339,4		579,4
B90	182,2		344,9		606,2

Für die Bewertung der Schwellenbiegung wurde die prozentuale Auslastung der Schwelle durch die Belastung des DGS bezogen auf die charakteristische Prüfkraft (F_{con}) sowie auf die Mindestprüfkraft zur Erstrissbildung (F_{crn}) berechnet. Die Ergebnisse der Schwelle 2 bis 8 sind in der Tabelle 35 für die drei unterschiedlichen Schwellentypen dargestellt. Die gesamthaften Ergebnisse sind in Anlage A.11 in den Tabelle 81 bis Tabelle 83 abgebildet.

Anhand der prozentualen Auslastung der Schwellenwerte (F_{con} , F_{crn}) lässt sich erkennen, dass lediglich für die charakteristische Prüfkraft (F_{con}) eine Überschreitung bei der B70 (34 Hz 70 bar) an Schwelle 4 und 5 auftritt. Diese Überschreitung bedeutet, dass die Schwellen stärker belastet werden als unter üblichen Verkehrsbelastungen. Die Schwelle wird jedoch nicht strukturell überbelastet. Für die Auslastung der Mindestprüfkraft zur Erstrissbildung (F_{crn}) wurde keine Überschreitung festgehalten. Das bedeutet, dass der Einsatz des DGS zu keiner Schädigung der Schwellen hinsichtlich der Biegung führt.

Tabelle 35: Schwellenauslastung der B70 Schwelle durch den DGS bezogen auf die charakteristische Prüfkraft und die Mindestprüfkraft zur Erstrissbildung

Versuchsaufbau	Vergleichskraft	Schwellenauslastung durch dynamische Stabilisation für Schwellen Nr.					
		3	4	5	6	7	8
B70 34Hz 70bar	F_{con} (32 kN)	45 %	117 %	83 %	113 %	28 %	39 %
	F_{crn} (43 kN)	31 %	81 %	58 %	78 %	19 %	27 %
B70 30Hz 70bar	F_{con} (32 kN)	100 %	71 %	53 %	60 %	77 %	70 %
	F_{crn} (43 kN)	69 %	49 %	37 %	41 %	53 %	48 %
B07 So 34Hz 70bar	F_{con} (35 kN)	59 %	73 %	38 %	73 %	31 %	27 %
	F_{crn} (49 kN)	34 %	43 %	22 %	43 %	18 %	16 %
B07 So 27Hz 70bar	F_{con} (35 kN)	34 %	42 %	52 %	32 %	52 %	27 %
	F_{crn} (49 kN)	20 %	24 %	30 %	19 %	30 %	16 %
B07 So 34Hz 130bar	F_{con} (35 kN)	44 %	42 %	37 %	34 %	20 %	17 %
	F_{crn} (49 kN)	26 %	25 %	22 %	20 %	12 %	10 %
B90 34Hz 70bar	F_{con} (35 kN)	36 %	92 %	25 %	35 %	19 %	44 %
	F_{crn} (49 kN)	21 %	53 %	14 %	20 %	11 %	25 %
B90 27Hz 70bar	F_{con} (35 kN)	22 %	74 %	70 %	96 %	58 %	31 %
	F_{crn} (49 kN)	12 %	42 %	40 %	55 %	33 %	17 %
B90 34Hz 130bar	F_{con} (35 kN)	42 %	61 %	28 %	20 %	60 %	61 %
	F_{crn} (49 kN)	24 %	35 %	16 %	12 %	34 %	35 %

Aus der Auswertung der Schwellenbiegung durch die Belastung einer simulierten Überfahrt des DGS kann folgendes Ergebnis festgehalten werden:

- Es konnte kein Schädigungspotential im Hinblick auf die Schwellenbiegung durch den DGS festgestellt werden.

5.5.2.4 Schotterproben

Die Schotterproben wurden jeweils nach der Herstellung des Gleises im Labor und nach einer Versuchsreihe, die jeweils einen Vorversuch und drei weitere Versuche umfasst, genommen. Aus den Schotterproben vor sowie nach der Versuchsreihe wurde für jeden Schwellentyp der Siebdurchgang sowie der Feinkornanteil (0,5 – 22,4 mm) und der Feinstkornanteil (< 0,063 mm) bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 36 dargestellt. Bei der Schwelle B70 und der B90 treten bereits bei der Schotterprobe vor der Versuchsreihe eine leichte Überschreitung des Siebdurchgangs der Kornklasse 22,4 – 31,5 mm auf. Weiterhin tritt eine geringe Überschreitung bei der Schotterprobe der Schwelle B90, die nach der Versuchsreihe genommen wurde, auf. Die Überschreitungen bei den Schotterproben, die vor dem Einsatz des DGS genommen wurden, geben keine Aussage über das Schädigungspotential des DGS.

Die Probeentnahme erfolgte nur nach dem ersten Handstopfen und nach der Versuchsreihe. Während der Versuchsreihe wurde der Gleisschotter viermal mit Handstopfern, einmal relativ lange durch den Vorversuch mit dem DGS und dreimal durch die Überfahrtsimulation mit dem DGS bearbeitet. Daher lässt sich der geringfügig entstandene Schotterverschleiß nicht differenziert dem Vorgang des Handstopfens oder dem DGS zuordnen. Für eine detaillierte Zuordnung des Verschleißes müsste ein gezielter Versuchsaufbau erstellt werden, in dem nur dieser untersucht wird. Aus diesem Grund kann dem DGS die leichte Überschreitung bei der Kornklasse 50 – 63 mm der Schwelle B90 nicht eindeutig zugeordnet werden.

Tabelle 36: Ergebnisse - Mittelwerte der Sieblinie sowie Feinkornanteil und Feinstkornanteil

Kornklasse [mm]	Soll DIN EN 13450	B70 vor DGS	B70 nach DGS	B07 So vor DGS	B07 So nach DGS	B90 vor DGS	B90 nach DGS
> 80	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
63 - 80	97 - 99	97,4	98,2	97,5	98,7	97,5	96,1
50 - 63	65 - 99	69,8	70,4	73,8	76,6	75,3	64,3
40 - 50	30 - 65	39,1	36,5	42,9	42,1	45,0	32,5
31,5 - 40	1 - 25	17,0	14,8	16,6	15,0	18,0	13,2
22,4 - 31,5	0 - 5	5,1	3,8	2,1	2,6	5,6	4,5
0,5 - 22,4	≤ 1,0	0,9	0,6	0,4	0,5	0,7	0,8
< 0,063	≤ 1,0	0,8	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3

Die Abbildung 79 bis Abbildung 81 zeigen die Verläufe sowie die Grenzwerte der Siebdurchgänge. Die Verläufe der Siebdurchgänge der Schwelle B70 und B07 So weisen keinen deutlichen Unterschied zwischen vor und nach der Beanspruchung auf. Der Verlauf nach dem Einsatz des DGS der Schwelle B90 verläuft nahe der unteren Begrenzung der Anforderungen. Typischerweise würde gebrauchter Schotter allerdings die Anforderung der oberen Grenze überschreiten. Dieses eher untypische Schotterverhalten weist auf die Streuung der Schotterproben im Labor hin.

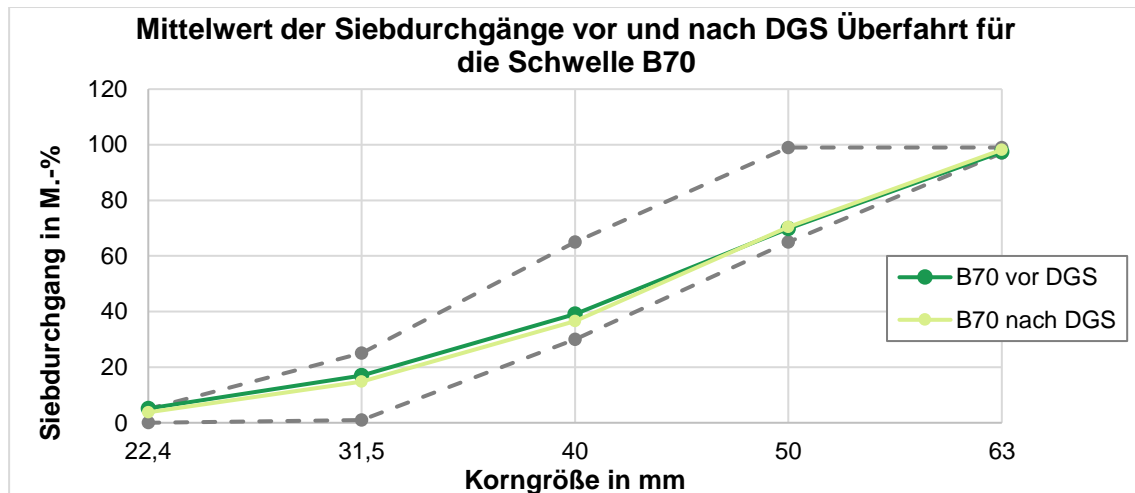


Abbildung 79: Gegenüberstellung der Siebdurchgänge vor und nach dem DGS im Labor – B70

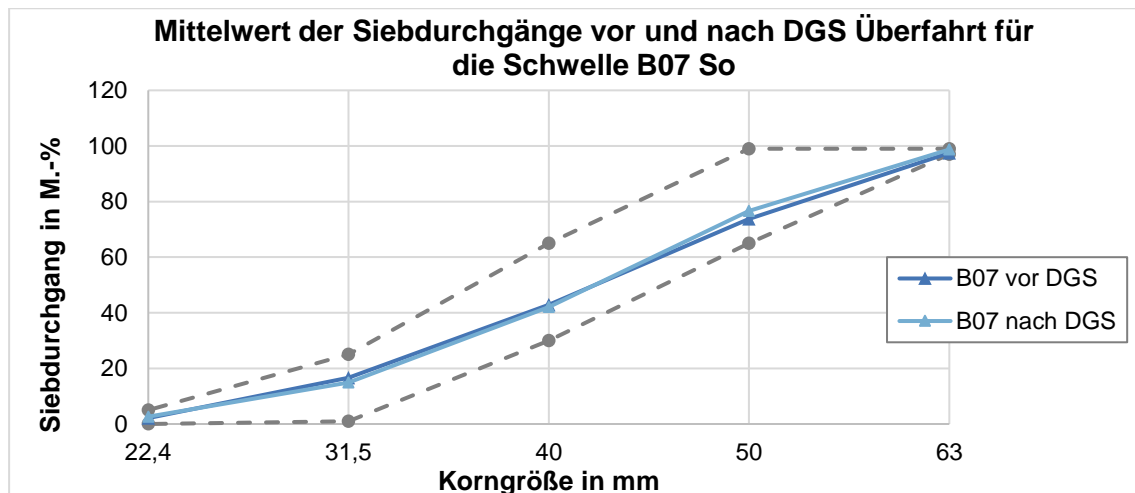


Abbildung 80: Gegenüberstellung der Siebdurchgänge vor und nach dem DGS im Labor – B07 So

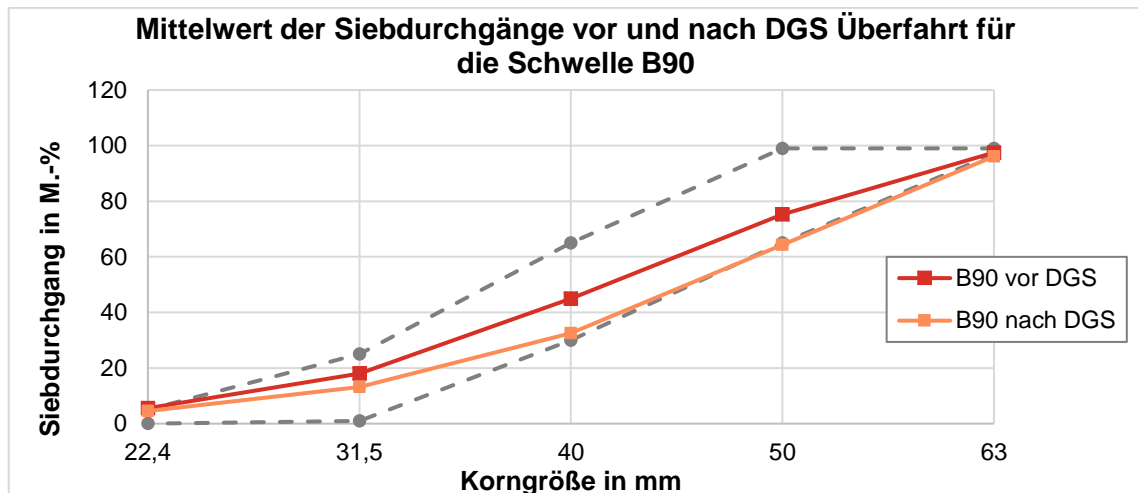


Abbildung 81: Gegenüberstellung der Siebdurchgänge vor und nach dem DGS im Labor – B90

Die Tabelle 37 zeigt die Mittelwerte der Kornform- und Plattigkeitskennzahl der Schotterproben für die einzelnen Schwellentypen unterteilt in die relevanten Kornklassen.

Der zugelassene Höchstwert der Plattigkeitskennzahl von 35 Massenprozent (M.-%) wird bei keiner Schotterprobe überschritten [35]. Ebenso die in der Richtlinie geforderten Kategorie SI5/30 der Kornformkennzahl wird durchgehend vor und nach der Versuchsreihe mit dem DGS eingehalten [34, 35]. Eine Schotterveränderung durch den DGS zeigt sich durch die Ergebnisse der Kornformkennzahl und der Plattigkeitskennzahl. Alle Ergebnisse nach dem DGS liegen in den erforderlichen Grenzen. Jedoch haben sie im direkten Vergleich zu den Kennzahlen vor dem DGS abgenommen. Daraus lässt sich schließen, dass die länglichen und flachen Schotterkörner durch den DGS gebrochen wurden und daher die prozentuale Masse abnimmt.

Tabelle 37: Mittelwerte der Kornformkennzahl und der Plattigkeitskennzahl

Kornklasse [mm]	Kornformkennzahl SI [M.-%]			Plattigkeitskennzahl FI [M.-%]		
	40 - 50	31,5 - 40	31,5 - 50	40 - 50	31,5 - 40	31,5 - 50
Soll [M.-%]	5 - 30	5 - 30	5 - 30	< 35	< 35	< 35
B70 vor DGS	bei diesen Proben wurde keine Prüfung hinsichtlich Kornformkennzahl und Plattigkeitskennzahl durchgeführt					
B70 nach DGS						
B07 So vor DGS	15,8	23,1	19,0	11,7	14,2	13,0
B07 So nach DGS	14,6	22,8	18,0	10,2	15,1	12,2
B90 vor DGS	12,6	25,5	17,5	10,1	16,3	12,9
B90 nach DGS	11,8	20,4	15,0	7,7	12,6	9,6

Insgesamt können die Schotterproben positiv in Bezug auf den Verschleiß durch den DGS bewertet werden, da die Veränderungen der Ergebnisse der Siebdurchgänge und der Kornformkennzahl sowie der Plattigkeitskennzahl nur geringfügig sind.

Die Deutsche Bahn fordert Gleisschotter, der gebrochen, unregelmäßig geformt und aus scharfkantigen Körnern besteht [35]. Diese Eigenschaften behält der Gleisschotter nach der Anwendung des DGS und des Handstopfens weiterhin. Folgende Erkenntnisse können aus der Untersuchung der Schotterproben festgehalten werden:

- Die Schotterproben nach den Versuchsreihen erfüllen die Anforderungen hinsichtlich der Siebdurchgänge [34, 35]. Einzig bei der Schwelle B90 gibt es eine leichte Überschreitung.
- Die Anforderungen an den Fein- und Feinstkornanteil werden bei allen Schotterproben eingehalten [34, 35].
- Der prozentuale Massenanteil der Kornformkennzahl und der Plattigkeitskennzahl nimmt innerhalb der Anforderungen leicht ab [35, 34]. Die länglichen und flachen Schotterkörner werden bei dem Verdichtungsprozess mit den Handstopfern und dem DGS teilweise gebrochen.

5.5.2.5 Steifigkeit der Zwischenlagen

Die Auswertung der statischen und niederfrequenten dynamischen vertikalen Steifigkeit der Zwischenlage findet nach DIN EN 13146-9 statt und wird für die statische und für die niederfrequente dynamische Steifigkeit mit Hilfe folgender Formeln bestimmt [38]:

$$k_{SP} = \frac{F_{SP2} - F_{SP1}}{d_{SP}} \left[\frac{MN}{m} \right] \quad 5.4$$

Legende:

k_{SP} = statische Steifigkeit der Zw [MN/m]

F_{SP1} = theoretisch angenommene Kraft des Spannelementes zur Messung der statischen Steifigkeit der Zw [kN]

F_{SPmax} = auf die Zw wirkende Kraft zur Messung der statischen Steifigkeit der Zw [kN]

$F_{SP2} = 0,8 \cdot F_{SPmax}$ [kN]

d_{SP} = Mittelwert der vertikalen Einsenkung der Zw [mm]

$$k_{LFPf} = \frac{F_{LFP2} - F_{LFP1}}{d_{LFP}} \left[\frac{MN}{m} \right] \quad 5.5$$

Legende:

k_{LFPf} = niederfrequente dynamische Steifigkeit der Zwischenlage/Zwischenplatte bei einer festgelegten Frequenz [MN/m]

F_{LFP1} = theoretische angenommene Kraft der Spannelement zur Messung der dynamischen niederfrequenten Steifigkeit der Zw [kN]

F_{LFPmax} = Referenzkraft für die Messung der dynamischen niederfrequenten Steifigkeit der Zwischenlage/Zwischenplatte,

$F_{LFP2} = 0,8 \cdot F_{LFPmax}$ [kN]

d_{LFP} = Einsenkung der Zw bei der Messung niederfrequenter dynamischer Steifigkeit der Zw [mm]

Abgeleitet aus der Gleiskategorie, wie in Kapitel 5.5.1.3 beschrieben, ergibt sich für die vorliegenden Messungen für F_{SP1} bzw. F_{LFP1} ein Wert von 18 kN und für F_{SP2} bzw. F_{LFP2} von 85 kN. Daraus ergibt sich für F_{SP2} bzw. F_{LFP2} eine Kraft von 68 kN. Die Parameter d_{SP} bzw. d_P sind die Mittelwerte der vertikalen Einsenkung der Zwischenlage, die mittels Induktivwegaufnehmer während der Prüfung gemessen werden.

Unabhängig von der Steifigkeit der Zwischenlage sind die Werte der statischen kontinuierlich geringer als die der dynamischen Steifigkeiten, dies ist typisch für Elastomere. Weiterhin zeigt sich, dass eine Zunahme der dynamischen Steifigkeit mit der Erhöhung der Prüffrequenz einhergeht. Die geringste statische sowie dynamische Steifigkeit wurde bei der Zw 1000 gemessen. Die größte Steifigkeit im Gegensatz wurde bei der Zw 687a gemessen. Die detaillierten Ergebnisse der statischen Steifigkeit sind in Tabelle 38 aufgeführt. Hier wird zusätzlich die Änderung oder auch die Versteifung der Zwischenlage zwischen den beiden Messungen vor und nach der Belastung angegeben.

Tabelle 38: Ergebnisse der vertikalen statischen Steifigkeit der Zwischenlagen

	Prüfung vor Belastung (02.11.2018) stat. Steifigkeit [kN/mm]	Prüfung nach Belastung (26.07.2019) stat. Steifigkeit [kN/mm]	Änderung der stat. Steifigkeit [%]
Zw 687a 08	663	761	15
Zw 687a 08	661	738	12
Zw 687a 09	651	745	15
Zw 1000 04	43	45	5
Zw 1000 05	43	46	7
Zw 1000 06	42	45	5
Zw 900b 01	79	73	8
Zw 900b 01	75	72	4
Zw 900b 01	72	72	0

Ergebnisse der dynamischen niederfrequenten Steifigkeit finden sich in Tabelle 39. Für diesen Wert wird keine Grenze in der Deutschen Industrienorm bzw. in der Europäischen Norm festgelegt.

Tabelle 39: Ergebnisse der vertikalen dynamischen niederfrequenten Steifigkeit der Zwischenlagen

	Prüfung vor Belastung (02.11.2018)			Prüfung nach Belastung (26.07.2019)		
	dyn. Steifigkeit [kN/mm]			dyn. Steifigkeit [kN/mm]		
	5Hz	10Hz	20Hz	5Hz	10Hz	20Hz
Zw 687a 08	668	678	801	885	922	920
Zw 687a 08	747	796	846	803	792	846
Zw 687a 09	1139	1192	1245	816	859	897
Zw 1000 04	47	48	48	47	49	48
Zw 1000 05	48	48	48	42	49	49
Zw 1000 06	47	47	47	46	48	47
Zw 900b 01	85	87	88	79	80	81
Zw 900b 01	82	83	81	76	77	78
Zw 900b 01	78	79	77	75	76	76

Die Auswertung der Versuche zu der Steifigkeit der Zwischenlagen hat ergeben:

- Die Zwischenlagen weisen nach den Laborversuchen keine offensichtlichen Schäden auf.
- Die statische vertikale Steifigkeit erhöhte sich um maximal 15 % im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen.

6 Bewertung der Feldmessung und Laborversuche

6.1 Beschleunigung

Die Schwellenbeschleunigungen wurden bei zahlreichen Feldmessungen sowie bei den Laborversuchen gemessen. Die Ergebnisse der Schwellenbeschleunigungen geben Aufschluss über die Anregung der Schwelle durch den DGS. Bereits die qualitative Auswertung zeigt, dass die aufgestellten Thesen durch die umfangreichen Laborversuche bestätigt werden. Bei einer Gegenüberstellung der Labor- und Feldergebnisse bei gleichen Maschinenparametern und Oberbausystemen zeigen sich kleinere Ergebnisse bei den Laborversuchen. Ein direkter Vergleich der Absolutwerte aus den Feldmessungen mit den Laborversuchen ist nicht möglich. Die Differenz der Ergebnisse entsteht durch die unterschiedlichen Randbedingungen, wie beispielsweise Lagerung der Schiene, unterschiedliche Stopfarten und Lagerung des Schotter. Jedoch ist eine qualitative Beurteilung der Tendenzen möglich.

Bei einer Arbeitsfrequenz von 34 Hz (im Fließbereich) konnte für die Schwelle B07 So bei der Feldmessung Nörten-Hardenberg und den Laborversuchen festgestellt werden, dass zwischen einer Auflast von 40 bar bis 80 bar die Schwellenbeschleunigung abnimmt. Die Laborergebnisse zeigen eine Abnahme von 29 % und die Ergebnisse aus der Feldmessung von 23 %. Die Messungen der B70 Schwelle in Hildesheim und die vergleichbare österreichische Schwelle (L2) zeigen ebenfalls den Zusammenhang, dass bei einer steigenden Auflast von 70 bar auf 90 bar im Fließbereich die Schwellenbeschleunigung sinkt.

Der Einfluss der Steifigkeit des Befestigungssystems im Fließbereich kann zum einen bei der Feldmessung in Neudsiedl a. See durch die L2 mit Kunststoffwinkelführungsplatte (weicherer Oberbausystem) und die 19a mit Stahlwinkelführungsplatte (steiferer Oberbausystem) sowie im Labor durch den Vergleich der B70 (steiferer Oberbausystem) und der B07 (weicherer Oberbausystem) gezeigt werden. Bei einem steiferen Oberbausystem treten größere Beschleunigungen, bei einem weicheren Oberbausystem treten kleinere Beschleunigungen bei der Bearbeitung mit gleichen Maschinenparametern auf.

Der Einfluss der Auflast im Fließbereich des Schotter kann in zwei Abschnitte gegliedert werden. Bei einer geringen Auflast bis ca. 70 bar besteht nur leichter Kontakt zwischen Schwellenunterseite und Schotter. Daher wird die Schwellenbeschleunigung maßgeblich durch die Eigenschaft der Schwelle, wie das Schwellengewicht und die Steifigkeit des Systems, beeinflusst. Bei einer Auflast ab ca. 70 bar wird durch den höheren Kontaktdruck zwischen Schwellenunterseite und Schotter, der Schotter als

Einflussgröße der Beschleunigung zunehmend aktiviert und wirkt sich damit dämpfend auf die Schwellenbeschleunigung aus.

Zum Einfluss der Frequenz lässt sich abschließend aus den Ergebnissen der Feldmessungen vorerst keine Aussage treffen, da bei den Feldmessungen in den Betriebsgleisen der Deutschen Bahn nach Regelwerk ausschließlich mit Frequenzen innerhalb des Fließbereichs des Schotters gearbeitet wurde. Hier sollten weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen Maschinenparametern innerhalb und außerhalb des Fließbereichs Aufschluss geben.

6.2 Querverschiebewiderstand

Für die Gleislagestabilität ist der Querverschiebewiderstand (QVW) eine charakteristische Größe. In der Richtlinie 824 „Oberbauarbeiten durchführen“ werden Höchstgeschwindigkeiten nach einer Durcharbeitung bzw. nach der 2. Stabilisierung (Stopfvorgang) festgelegt [16]. Diese Geschwindigkeiten können abhängig von der Betriebsbelastung wieder heraufgesetzt werden. Nach einer Betriebsbelastung von 100.000 Lt kann wieder die zulässige Höchstgeschwindigkeit der Strecke gefahren werden. Betriebliche Einschränkungen bestehen bei den „übrigen Oberbauformen“ im Zuge eines Umbaus bzw. einer Durcharbeitung in annähernd jeder Geschwindigkeitskategorie. Für Betonschwellen (mit $l \geq 2,60$ m) ergeben sich bei dem Einsatz des DGS nach einer Durcharbeitung keine betrieblichen Einschränkungen. Nach einem Umbau kann nur ein geringer Teil der Geschwindigkeitsreduzierung durch den DGS aufgehoben werden. Die Tabellen aus der Richtlinie mit den genauen Angaben finden sich in Kapitel 2.1.

Anhand der Feldmessungen wurde die Qualität des Querverschiebewiderstandes nach dem Umbau in Bezug auf den DGS geprüft und festgehalten. Ein weiterer Fokus lag in der Analyse der Einflussparameter im System Schotteroberbau, um den QVW nach dem Umbau direkt zu erhöhen und somit den regulären Bahnverkehr ohne Verzögerung nach der Umbaumaßnahme wieder aufnehmen zu können.

Weiterhin konnte anhand der Messung in Hildesheim festgehalten werden, dass bereits durch ein höheres Schwellengewicht, die Schwellenform und eine Schwellenbesohlung der QVW positiv beeinflusst wird. Der direkte Vergleich einer Schwelle B70 mit einem Gewicht von ca. 290 kg und einer besohnten Schwelle B07 So mit ca. 346 kg zeigt nach dem Stopfen einen höheren QVW bei der B07 So von 39,7 %. Diese unterschiedlichen Spezifikationen spiegeln sich ebenfalls im Anstieg des QVW durch den DGS wider. Der DGS führt bei allen Schwellentypen zu einem relativen Anstieg des QVW. Bei den Feldmessungen ergibt sich ein Anstieg für die Schwelle B70 um 27,6 % und für die Schwelle B07 So um 9,9 %.

Die Feldmessungen mit den Schwellentypen B70 und B07 So haben bestätigt, dass der DGS eine Konsolidierung äquivalent zu ca. 100.000 Lt Verkehrsbelastung vorwegnimmt, vorausgesetzt, dass der DGS nach jedem Stopfdurchgang eingesetzt wird.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden die Laborversuche geplant und durchgeführt. Die Vorwegnahme einer äquivalenten Verkehrsbelastung von ca. 100.000 Lt konnte bei den Laborergebnissen für die Schwelle B07 So ebenfalls bestätigt werden. Durch die Versuche im Labor mit den Schwellentypen B70, B07 So und B90 konnte der Zuwachs des QVW durch die Spezifika der Schwelle zu 50 % dem Schwellengewicht und zu 50 % der Schwellenbesohlung zugeordnet werden. Der QVW der Schwelle B07 So steigt nach dem Stopfvorgang ohne DGS im Vergleich zu der Schwelle B70 um 39,7 % (Feldmessung Hildesheim). Dieser Zuwachs (39,7 %) besteht nach den Ergebnissen aus den Laborversuchen zu 20 % aus dem Einfluss des Gewichtes der Schwelle und zu 20 % aus dem Einfluss der Sohle.

Durch die Parametervariation konnte für jeden Schwellentyp eine Kombination aus Auflast und Frequenz identifiziert werden, die zu einem maximalen Zuwachs des QVW im Labor führen:

- B90 34 Hz 70 bar
- B07 So 34 Hz 130 bar
- B70 30 Hz 70 bar

6.3 Schotterproben

Die technischen Lieferbedingungen der DB Netz AG [35] fordern einen Gleisschotter, der aus gebrochenen, unregelmäßig geformten und scharfkantigen Schotterkörnern besteht. Zur Feststellung dieser Eigenschaften wurde bei den Schotterproben der Feldmessung Wiesloch und den Laborversuchen die Plattigkeitskennzahl sowie die Kornformkennzahl bestimmt. Weiterhin wurde anhand der Auswertung der Sieblinie und der Bestimmung des Feinkorns bzw. des Feinstkorns überprüft, inwieweit ein Schotterverschleiß auftritt. In der Feldmessung wurde der neu eingebaute Schotter durch drei Stopfgänge und zusätzlich durch eine einmalige bzw. dreimalige Überfahrt des DGS beansprucht. Im Laborversuch wurde der neue Schotter durch viermaliges Handstopfen und durch den DGS anhand von drei simulierten Überfahrten sowie einer Dauerbeanspruchung durch den Vorversuch bearbeitet. Als Referenz stand jeweils eine Schotterprobe zur Verfügung, die ausschließlich durch die Stopfarbeiten beansprucht wurde.

Gemäß der Ergebnisse aus den Feldmessung Wiesloch in Kapitel 4.1.2.3 und den Ergebnissen der Laborversuchen in Kapitel 5.5.2.4 führt der DGS zu keinen signifikanten Einfluss auf den Schotterverschleiß.

7 Fazit

Das Ziel des Forschungsprojektes „DynaTrack“ ist die Validierung der Wirksamkeit des DGS und weiterhin optimale Regelungsparameter in Bezug auf die Auflast und die Schwingfrequenz des DGS für die unterschiedlichen Schotteroberbauformen in Deutschland zu finden. Dazu wurden in vier Feldmessungen, drei in Betriebsgleisen der DB und eine bei der ÖBB durchgeführt. Es wurden jeweils mehrere Oberbausysteme und unterschiedliche Durcharbeitungsprozesse untersucht. Auf Basis deren wurde anschließend das Programm der Laborversuche konzipiert. Die insgesamt elf Laborversuche wurden mit aufwändiger Messtechnik instrumentiert. Dabei wurden relevante Oberbausysteme untersucht und die Maschinenparameter spezifisch variiert.

Dabei ist die zentrale Frage welche Konsolidierung äquivalent zu Verkehrsbelastungen der DGS vorwegnehmen kann und einhergehend damit inwieweit sich der Querverschiebewiderstand erhöhen lässt. Weiterhin soll geklärt werden, ob durch die zusätzlichen Beanspruchungen Schädigungen am Oberbau oder einzelnen Komponenten entstehen. Zur Beantwortung der Frage, welche Einfluss der DGS im Hinblick auf den QVW hat, wurden vier Feldversuche messtechnisch umfangreich begleitet. Die Wirksamkeit des DGS in Bezug auf den QVW hängt auch von der Oberbauform ab. Daraus resultiert ein Potential für variierende Regelungsparameter zu Optimierung des Stabilisierungsergebnisses. Für die detaillierte Untersuchung der Wirkung von unterschiedlichen Regelungsparametern des DGS auf die unterschiedlichen Oberbauformen wurden elf Laborversuche im Maßstab 1:1 durchgeführt.

Zentrale Parameter zur Bewertung der Fragestellungen des Forschungsprojekts waren in erster Linie der Querverschiebewiderstand der Schwelle, die Beschleunigung der Schwelle sowie des Schotters und die Gleislage. Um etwaige negative Einflüsse durch den DGS an den einzelnen Gleiskomponenten zu erfassen, wurden weiterhin die Schwellenbiegung, die Schotterbeanspruchung und die Beanspruchung der Zwischenlage untersucht. Eine Schädigung der Zwischenlage sowie der Schwelle durch den DGS konnte nicht festgestellt werden. Ferner zeigt sich kein zusätzlicher Verschleiß des Schotters durch den Einsatz des DGS.

Die Beschleunigungsmessungen lassen ein besseres Verständnis des Gesamtsystems Schiene, Schwelle und Schotter zu. Eine der wichtigsten Erkenntnisse ist, dass sich bei einer Anregung im Fließbereich des Schotters (ab ca. 30 Hz) das Gesamtsystem anders verhält als außerhalb des Fließbereichs. Außerhalb des Fließbereichs bei beispielsweise 27 Hz nimmt die Schwellenbeschleunigung bis 80 bar/ 90 bar (ca. 126 kN/ 141 kN) zu und nimmt dann bis 130 bar (ca. 204 kN) ab. Im Fließbereich hingegen nimmt die Schwellenbeschleunigung bis 80 bar/ 90 bar (ca. 126 kN/ 141 kN) leicht ab und steigt dann bis 130 bar (ca. 204 kN) an. Dadurch wird deutlich, dass der Schotter durch die Fließeigenschaft auch bei einer vertikalen Auflast von 130 bar (ca. 204 kN) keine

Bewegungseinschränkung erfährt, anders als bei einer Anregungsfrequenz von 27 Hz. Weiterhin wird die Schwellenbeschleunigung vom Schwellentyp, maßgeblich hier vom Gewicht und der Besohlung, von der Systemsteifigkeit und vom Konsolidierungsgrad des Schotters beeinflusst. Allgemein führen ein geringeres Schwellengewicht und ein steiferes Befestigungssystem zu höheren Beschleunigungen.

Anhand der zweifachen Integration der vertikalen Schwellenbeschleunigungen, die durch den DGS hervorgerufen werden, zeigt sich, dass die vertikalen Amplituden bei jedem Stopfvorgang mit DGS geringer werden. Die sinkenden vertikalen Amplituden weisen darauf hin, dass der Konsolidierungsgrad nach jedem Stopfvorgang mit DGS ansteigt und so immer weniger vertikale Bewegung möglich ist.

Die Schwellenbesohlung erzeugt eine Dämpfung der Beschleunigung. Nach den vorliegenden Ergebnissen der Laborversuche liegt die Dämpfung bei ca. 2 Hz. Das heißt, um bei einer besohnten Schwelle B07 So die gleiche Schwellenbeschleunigung wie bei der baugleichen Schwelle B90 ohne Sohle zu erreichen, müsste die Schwingfrequenz des DGS 2 Hz höher eingestellt werden.

Es zeigt sich, dass die Schwingungen unter synchroner Unwucht sinusförmig verlaufen und unter asynchroner Anregung ein Rauschen in der sinusförmigen Schwingung auftritt. Weiterhin wird bei gleichen Regelungsparametern eine größere Schwellenbeschleunigung bei asynchronen Schwingungen festgestellt. Inwieweit sich diese Feststellungen auf den Querverschiebewiderstand und somit auf die Qualität des Stabilisierungsvorgangs auswirken ist noch nicht abschließend geklärt.

Bei den Feldmessungen konnte bereits festgestellt werden, dass bei dem Einsatz des DGS ca. 100.000 Lt vorweggenommen werden können. Es zeigen sich jedoch Unterschiede in der Wirksamkeit. Der Querverschiebewiderstand zeigt eine starke Abhängigkeit vom Schwellentyp. Die Schwelle B07 So erreicht durch das Mehrgewicht und durch die Besohlung einen knapp 40 % höheren QVW als die Schwelle B70. Dieser Trend spiegelt sich auch im Zuwachs des QVW durch den DGS wider. Bei gleichen Parametereinstellungen in situ wächst der QVW der Schwelle B70 dreimal mehr an als der QVW der Schwelle B07 So.

Durch eine Optimierung der Parameter kann die Vorwegnahme der Konsolidierung gezielt erhöht werden. In den Feldmessungen Wiesloch und Hildesheim konnte nach dem Einsatz des DGS durch die folgenden Verkehrsbelastungen geringere Setzungen im Gegensatz zu den Abschnitten indem kein DGS eingesetzt wurde festgestellt werden. Aufgrund der geringeren Setzungen unter Verkehrsbelastung kann von einer geringeren Schotterbewegung ausgegangen werden, wodurch tendenziell weniger Gleislagefehler entstehen können.

Eine zentrale Erkenntnis nach den vorliegenden Ergebnissen aus den Laborversuchen ist eine optimierte Parametereinstellung des DGS für die untersuchten Schwellentypen.

Für die Schwelle B90 werden 34 Hz und 70 bar, für die Schwelle B70 30 Hz und 70 bar und für die Schwelle B07 So 34 Hz und 130 bar ermittelt. Aus den optimierten Parametervariation lässt sich ableiten, dass der DGS im Fließbereich des Schotter ein besseres Arbeitsergebnis im Hinblick auf den QVW erzielt.

Bei einem einfachen Aggregat sollte eine Mindestauflast von 110 kN entsprechend 70 bar und bei einem Standard Doppelaggregat von 260 kN eingestellt werden, um neben einem kraftschlüssigen Verbund auch den Schotter als Schwungmasse zu aktivieren.

Eine abschließende Verifizierung dieser Erkenntnisse sollte durch weitere Feldversuche erfolgen.

Die durchgeführten Feldmessungen und Laborversuche zeigen, dass der DGS im Hinblick auf einen verbesserten QVW sinnvoll ist und darüber hinaus keinen negativen Einfluss auf die untersuchten Komponenten hat (Schwelle, Zwischenlage, Schotter). Bereits ohne verbesserte Parametereinstellungen wird durch den DGS ein QVW erreicht, der einem Gleis nach einer Stopfung und einer Verkehrsbelastung von ca. 100.000 Lt entspricht. Durch optimierte Regelungsparameter kann eine höhere Anfangskonsolidierung erzielt werden. Der höhere QVW stellt somit im Hinblick auf die Langsamfahrstellen nach einem Neu- bzw. Umbau oder einer Durcharbeitung eine größere Sicherheitsmarge dar. Diese Aspekte dürften sich positiv auf die Kapazität des Gleises auswirken.

Aus den Vorversuchen geht hervor, dass die Ergebnisse der Schwellenbeschleunigung zwischen der Schwelle B90 und der beschl. B07 So um ca. 2 Hz parallel verschoben sind. Auf Grundlage dieser Erkenntnis sollte eine Kombination bei der Schwelle B07 So mit 36 Hz und 70 bar im Feld zusätzlich untersucht werden. Diese Kombination, B07 So (36 Hz 70 bar), könnte eine Alternative zu den Maschinenparametern 34 Hz und 130 bar darstellen, zumal der Regelungsbereich der Auflast bei den aktuellen DGS nur bis 100 bar reicht.

Zur Bestätigung der Erhöhung des QVW durch angepasste Regelungsparameter abhängig von der Oberbauform sollten die vorgestellten Parameter aus den Laborversuchen mit Hilfe von Feldversuchen überprüft werden. Wie bereits festgestellt wurde, ist der QVW von vielen Faktoren abhängig. Daher ist es sinnvoll die optimierten Regelungsparameter immer in Relation zu den Standardeinstellungen und zu einem Abschnitt indem kein DGS eingesetzt wird zu messen. Weiterhin gilt es, das Verständnis für das Schotterverhalten unter synchronen und asynchronen Einwirkungen von horizontalen und vertikalen Schwingungen zu vertiefen. Es konnte bereits festgestellt werden, dass durch eine synchrone bzw. asynchrone Einwirkung unterschiedliche Intensitäten an Schwellenbeschleunigung erreicht werden. Außerdem zeigte sich durch die Feldmessung in Neusiedl a. See, dass eine asynchrone Einwirkung die harmonische

Anregung an der Schwelle durch ein Rauschen überlagert. Es ist zu klären, welchen Einfluss diese unterschiedlichen Anregungen auf den Querverschiebewiderstand haben.

8 Literaturverzeichnis

- [1] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 13306:2018-02: Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung; Dreisprachige Fassung EN 13306:2017.
- [2] *Hansmann, F.; Nemetz, W.:* Der Gleislage auf der Spur. PMC Media House GmbH, Leverkusen, 2019.
- [3] Deutsche Bahn AG: Untersuchungsbericht Technische und wirtschaftliche Bewertung des Verfahrens zur dynamischen Gleisstabilisierung (DGS). Deutsche Bahn AG, Systemverbund Bahn, Fahrwegdynamik und Bewertung, München Ausgabe März 2008.
- [4] Plasser und Theurer: Die Technologie des dynamischen Gleisstabilisierens (1993), S. 2-5.
- [5] *Rießberger, K.; Wenty, R.:* 40 Jahre "dynamische Gleisstabilisation". In: Eisenbahningenieurkalender-Jahrbuch für Schienenverkehr und Technik (2015), S.55–76.
- [6] *Kaess, G.:* Erfahrungen und Ergebnisse aus dem Einsatz des dynamischen Gleisstabilisators. In: Eisenbahntechnische Rundschau 36 (1987), Heft 10, S. 663–667.
- [7] *Lichtberger, B.:* Der Querverschiebewiderstand der Gleise. In: Eisenbahningenieurkalender-Jahrbuch für Schienenverkehr und Technik (2007), S.61–76.
- [8] *Schubert, E.:* Die räumliche Wirkung der Verdichtung des Gleisschotters. In: Eisenbahntechnische Rundschau 37 (1988), 1/2, S.71–74.
- [9] FRANZ PLASSER BAHNBAUMASCHINEN-INDUSTRIEGESELLSCHAFT MBH, : Verfahren und Maschine zum Stabilisieren eines Gleises. Erfinder: J. THEURER UND E. MATZINGER. Anmeldung: 20. Juli 2006. International, WO 2008/009314 A1.
- [10] *Lichtberger, B.:* Der Dynamische Gleisstabilisator – Einfluss der Betriebsparameter, Empirische Stabilisatorformel, kontinuierliche QVW-Messung, Linz Ausgabe April 2004.
- [11] FRANZ PLASSER BAHNBAUMASCHINEN- INDUSTRIEGESELLSCHAFT MBH, : Maschine zum Stabilisieren eines Gleises. Erfinder: J. THEURER UND B. LICHTBERGER. Anmeldung: 15. Juli 1996. Europa, EP 0 748 898 B1.
- [12] *Massafra, Y.:* Reduzierung von Langsamfahrstellen durch den optimierten Einsatz des dynamischen Gleisstabilisator (DGS) bei der DB Netz AG im Regionalbereich Nord. Hildesheim, Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst, Bachelorthesis, 2018.
- [13] Deutsche Bahn: Richtlinie DS 820 03 15: Dynamische Stabilisierung von Gleisen und Weichen.

- [14] ÖBB-Infrastruktur AG 01.2014: Dynamische Gleisstabilisation - Einsatz des "dynamischen Gleisstabilisators". TECHNISCHE ANWEISUNG, Ausgabe August 2014.
- [15] ÖBB-Infrastruktur AG 07.02.01: Schotteroberbau-Gleise, Planung und konstruktive Ausführung. Ausgabe Januar 2015.
- [16] DB Netz AG: Richtlinie 824: Oberbauarbeiten durchführen. Ausgabe September 2018.
- [17] DB Netz AG: Richtlinie 820.2010: Ausrüstungsstandard Schotteroberbau für Gleise und Weichen. Ausgabe Februar 2018.
- [18] ORE: Frage D 117 - Optimale Anpassung des klassischen Oberbaus an den künftigen Verkehr – Bericht Nr. 12 Dynamische Stabilisierung des Schotterbettes. D 117/RP 12. ORE, Utrecht Ausgabe April 1979.
- [19] Erprobung des dynamischen Gleisstabilisator (DGS) 62 N. Ausgabe Oktober 1985.
- [20] Ripke, B.; Jovanovic, M.: Technische und wirtschaftliche Bewertung des Verfahrens zur dynamischen Gleisstabilisierung (DGS) – Dokument 06-9-1139-VTZ116-TWBewDGS-Abschlussbericht, München Ausgabe März 2008.
- [21] ORE: Frage D 117 - Optimale Anpassung des klassischen Oberbaus an den künftigen Verkehr – Bericht Nr. 20 - Die Effektivität dynamischer Gleisstabilisierung unter Verwendung des DTS. D 117/RP 20. ORE, Utrecht Ausgabe September 1981.
- [22] Lichtberger, B.: Kostensenkung durch Qualitätsvorrat in der Fahrweginstandhaltung. In: Der Eisenbahningenieur 50 (1999), Heft 1, S. 39-42.
- [23] Hering, H.: Einsatz und Erprobung des dynamischen Gleisstabilisators auf Neubaustrecken. In: Der Eisenbahningenieur 39 (1988), Heft 39, S. 104-108.
- [24] Konstruktiver Straßenbau im Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Universität Hannover: Zur Eignung des Schotteroberbaus für die Neubaustrecken der Deutschen Bundesbahn – Heft 10, Hannover, Zweite Auflage Ausgabe 1991.
- [25] Forschungsbericht über Messungen an Oberbauabschnitten mit und ohne Gleisstabilisator-Einwirkungen. Ausgabe Juni 1976.
- [26] Ripke, B.: Fachtechnische Stellungnahme - Dynamische Gleisstabilisierung nach DS 820 03 15. Fax, 2005.
- [27] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 13848-5: Bahnanwendung-Oberbau-Qualität der Gleisgeometrie-Teil 5: Geometrische Qualitätsstufen-Gleise, Weichen und Kreuzungen.
- [28] Lichtberger, B.: Handbuch Gleis – Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. Tetzlaff, Hamburg, 2004.
- [29] Lichtberger, B.: Die dynamische Gleisstabilisation und die optimale Instandhaltungstechnologie. In: Eisenbahningenieurkalender (1998), S. 129–142.

- [30] International Union of Railways (UIC): Lateral Track Resistance (LTR). Ausgabe 2019.
- [31] Lehrstuhl und Prüfamts für Bau von Landverkehrswegen, Technische Universität München: Differenzierung des Querverschiebewiderstandes von Schwellen nach Sohl-, Flanken- und Vorkopfwiderstand -Betriebsgleis mit hoher Verkehrsbelastung – Bericht Nr. 2069 (nicht veröffentlicht), München Ausgabe Dezember 2003.
- [32] Trimble: GEDO CE 2.0 – Für Gleisstopfarbeiten. Technische Daten, o.J., https://trimble-railway.com/wp-content/uploads/2014/06/022543-556A-DEU_GedoCE_2.0_Tamping_TS_0313_LR1.pdf [Zugriff am: 10.12.2019].
- [33] *Paul, A.*: Einsatz des dynamischen Gleisstabilisators zur Optimierung von Langsamfahrstellen nach dem Umbau. Frankfurt am Main, Technische Hochschule Mittelhessen, Master Thesis, 2017.
- [34] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 13450:2003-06, Gesteinskörnungen für Gleisschotter.
- [35] DB Netz AG: DBS 918 061, 2006: Technische Lieferbedingungen Gleisschotter.
- [36] *Parthier, R.*: Messtechnik – Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016.
- [37] *Hoffmann, K.*: Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmeßstreifen. Hottinger Baldwin Meßtechnik, Darmstadt, 1987.
- [38] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 13146-9:2011-12: Bahnanwendungen - Oberbau - Prüfverfahren für Schienenbefestigungssysteme - Teil 9: Bestimmung der Steifigkeiten; Deutsche Fassung EN 13146-9:2009+A1:2011.
- [39] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 13481-2:2017-05: Bahnanwendungen - Oberbau - Leistungsanforderungen für Schienenbefestigungssysteme - Teil 2: Befestigungssysteme für Betonschwellen; Deutsche Fassung EN 13481-2:2012+A1:2017.
- [40] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 13481-1:2012: Bahnanwendungen - Oberbau - Leistungsanforderungen für Schienenbefestigungssysteme - Teil 1: Definitionen; Deutsche Fassung EN 13481-1:2012.
- [41] *Vormann, C.*: Querverschiebewiderstandsmessungen an Schwellen mit und ohne DGS Einsatz in Wiesloch-Walldorf (Deutschland). DB Systemtechnik GmbH Ausgabe Juli 2017.
- [42] *Iliev, D.*: Die horizontale Gleislagestabilität des Schotterbaus mit konventionellen und elastisch beschlten Schwellen. München, Technische Universität München, Dissertation, 2012.
- [43] Plasser & Theurer G.m.b.H.: DGS: Die Technologie des dynamischen Gleisstabilisierens. Allgemeine Einführung, Funktionsprinzip, Arbeitsanleitung, Erstversion Ausgabe April 2010.

- [44] *Stommel, M.; Stojek, M.; Korte, W.*: FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen. Carl Hanser Verlag, München, 2011.
- [45] Lehrstuhl und Prüfamf für Verkehrswegebau, Technische Universität München: Bestimmung des statischen und dynamischen Querverschiebewiderstands – Bericht Nr. 3706, München Ausgabe Mai 2018.
- [46] *Kienzer, K.*: Das Scherverhalten von Oberbausotter bei Stossbelastung, Graz Ausgabe Mai 1983.
- [47] DB Netz AG: Betonschwelle B 07 W-60 – log 60.15.0006, 2007.
- [48] Kreitm. *Betonschwelle B 70 W-54. log 54.15.0003*. DB Netz AG, 2003.
- [49] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 13230-1:2016:11: Bahnanwendung - Oberbau - Gleis- und Weichenschwellen aus Beton - Teil: Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung EN 13230-1:2016.
- [50] DB Netz AG: DBS 918 143: Gleis – und Weichenschwellen aus Beton für Schotteroberbau (Scho) und Feste Fahrbahn (FF). Ausgabe Dezember 2015.
- [51] *Gerber, U.; Kowaltschuk, W.; Sysyn, M.*: Einfluss der Stopfverfahren auf die Tragfähigkeit der Schotterbettung. *In: Der Eisenbahningenieur Sonderheft (2019)*, S. 34–39.
- [52] *Eisenmann, J.; Leykauf, G.; Mattner, L.*: Zukunftsperspektiven zum Eisenbahnoberbau. *In: Der Eisenbahningenieur 43 (1992)*, Heft 3, S. 130–140.
- [53] *Leykauf, G.; Mattner, L.; Steinbeißer, L.*: Schwingungsmessungen mittels Schotter-Meßsteinen. *In: Eisenbahntechnische Rundschau 47 (1998)*, Heft 1, S. 37-41.
- [54] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 932-1:1996-11: Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Probenahmeverfahren; Deutsche Fassung EN 932-1:1996.
- [55] *Kusser, J.*: Leistungserklärung – Kennnr. 13450-2019-1-A, 2019, <https://kusser.com/de/schotterwerke/produkte/sortenverzeichnisse-und-referenzbilder> [Zugriff am: 27.08.2019].
- [56] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 933-1:2012-03: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren; Deutsche Fassung EN 933-1:2012.
- [57] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 933-3:2012-04: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 3: Bestimmung der Kornform - Plattigkeitskennzahl; Deutsche Fassung EN 933-3:2012.
- [58] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 933-4:2015-01: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 4: Bestimmung der Kornform - Kornformkennzahl; Deutsche Fassung EN 933-4:2008.
- [59] *Leykauf, G.; Mattner, L.; Steinbeißer, L.*: Erprobung und Anwendung des Messverfahrens zur Ermittlung der Schotterschwingung-Messungen bei Burgsinn und Waghäusel, Heft 71, München Ausgabe 1997.

[60] DB Netz AG: Betonschwelle B 90 W-60 – log 60.15.0002, 2006.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ausschnitt einer Stopfmaschine.....	10
Abbildung 2: links - Stopfpickel über dem Gleis vor dem Eindringen; rechts - Stopfpickel sind eingetaucht und im Beistellvorgang	10
Abbildung 3: Gleisbaumaschine 09-3X-Dynamic, links - vorderer Teil Stopfmaschine; rechts - hinterer Teil DGS.....	12
Abbildung 4: Ausschnitt des DGS 09-3X-Dynamic	13
Abbildung 5: Schematische Seitenansicht eines DGS [9].....	13
Abbildung 6: Querschnitt der Maschine gemäß Schnitt II aus Abbildung 5 (links) und Unwucht im Detail (rechts) [9] [11].....	14
Abbildung 7: Schematisierte Draufsicht auf zwei Stabilisationsaggregaten [11].....	15
Abbildung 8: QVW-Messung im Feld.....	29
Abbildung 9: QVW-Messung im Labor.....	29
Abbildung 10: Dynamische QVW-Messung	29
Abbildung 11: Exemplarische Kraft-Verformungslinie einer QVW-Messung	31
Abbildung 12: Bezeichnung der Messrichtung.....	32
Abbildung 13: Sensor Bruel&Kjaer 4397A (Feld).....	33
Abbildung 14: Sensor Bruel&Kjaer 4370 (Labor)	33
Abbildung 15: verschiedene Typen von Schottermessstein.....	33
Abbildung 16: gemessenes laterales Beschleunigungssignal im Zeitbereich der Betonschwelle 1 bei Neusiedl.....	35
Abbildung 17: Gleitender Effektivwert des gemessenen lateralen Beschleunigungssignals im Zeitbereich der Betonschwelle 1 bei Neusiedl.....	35
Abbildung 18: Prüfanordnung für Zwischenlagen [38]	40
Abbildung 19: Wiesloch - gemittelte Kraftverformungsverläufe der statischen QVW der Nullmessung	45
Abbildung 20: Wiesloch - gemittelte Kraftverformungsverläufe der statischen QVW nach einer Betriebsbelastung von 100.000 Lt.....	45
Abbildung 21: Wiesloch - gemittelte Kraftverformungsverläufe der statischen QVW nach einer Betriebsbelastung von 1,5 Mio. Lt.....	46
Abbildung 22: Zusammenfassung der statischen QVW-Werte in Abhängigkeit der Lasttonnen der Feldmessungen	47
Abbildung 23: Feldmessung Wiesloch - Durchschnittliche Setzungen des Gleises gegenüber der Ausgangslage vor Zugverkehr.....	49
Abbildung 24: DGS über Messsensoren.....	52
Abbildung 25: Übersicht Messschwellen	52
Abbildung 26: Exemplarischer Verlauf der Schwinggeschwindigkeit [mm/s] bei einer Auflast von 300 kN	54
Abbildung 27: Spektrale Auswertung der Schwellenbeschleunigung, exemplarisch an der Schwelle B07 So.....	54

Abbildung 28: Visualisierung der ersten vier Schwingungsformen unter der horizontalen Anregung des DGS	55
Abbildung 29: Horizontale Schwingungsformen bei einer Frequenz zwischen 59 Hz bis 61 Hz.....	56
Abbildung 30: Schematische Darstellung der Versuchsabschnitte - Hildesheim.....	57
Abbildung 31: Skizze der gemessenen Schwellen.....	59
Abbildung 32: Lage der Schwellen in den Versuchsabschnitten	60
Abbildung 33: Hildesheim - gemittelte Kraftverformungsverläufe der statischen QVW Nullmessung	62
Abbildung 34: Hildesheim - gemittelte Kraftverformungsverläufe der statischen QVW nach 100.000 Lt	62
Abbildung 35: Hildesheim - gemittelte Kraftverformungsverläufe der statischen QVW nach 1,5 Mio. Lt.....	63
Abbildung 36: Zusammenfassung der statischen QVW-Werte in Abhängigkeit der Lasttonnen der Feldmessungen Hildesheim.....	64
Abbildung 37: Zusammenfassung der dynamischen QVW-Werte in Abhängigkeit der Lasttonnen	65
Abbildung 38: Feldmessung Hildesheim - Durchschnittliche Setzungen des Gleises gegenüber der Ausgangslage vor Zugverkehr.....	67
Abbildung 39: Spektrale Auswertung der Schwellenbeschleunigung, exemplarisch an der Schwelle B07 So	69
Abbildung 40: Exemplarischer Verlauf der Schwinggeschwindigkeit [mm/s] bei einer Auflast von 260 kN	70
Abbildung 41: Verlauf der Schwinggeschwindigkeit der Schwelle, links - Nörten-Hardenberg, rechts – Hildesheim	71
Abbildung 42: Oberbauformen: links - Holzschwelle mit Pandrol; mitte - Betonschwelle L2 mit Kst Wfp; rechts - Betonschwelle 19a mit Stahl-Wfp	72
Abbildung 43: links - Beschleunigungssensor; rechts - Schutz der Messtechnik	73
Abbildung 44: Exemplarisches Frequenzspektrum der Betonschwelle 19a unter asynchroner Anregung	74
Abbildung 45: Exemplarischer Verlauf der Schwinggeschwindigkeit der Holzschwelle unter synchroner Anregung durch den DGS.....	75
Abbildung 46: Exemplarischer Verlauf der Schwinggeschwindigkeit der Betonschwelle L2 unter synchroner Anregung durch den DGS.....	75
Abbildung 47: Exemplarischer Verlauf der Schwinggeschwindigkeit der Betonschwelle 19a unter asynchroner Anregung durch den DGS	76
Abbildung 48: Messung Neusiedl, Betonschwelle L2, Ausschnitt der horizontalen Schwellenbeschleunigung bei synchroner Anregung.....	76
Abbildung 49: Messung Neusiedl, Betonschwelle 19a, Ausschnitt der horizontalen Schwellenbeschleunigung bei asynchroner Anregung.....	77

Abbildung 50: Beschleunigungsaufnehmer links: Bruel&Kjaer 4370, rechts: Bruel&Kjaer 4397A.....	78
Abbildung 51: Exemplarisches Frequenzspektrum der Schwellenbeschleunigung - Langenschwarz	79
Abbildung 52: Exemplarischer Verlauf der Schwinggeschwindigkeit der Schwelle unter synchroner Anregung durch den DGS.....	80
Abbildung 53: Ablauf einer Versuchsreihe am Beispiel der Schwelle B70	84
Abbildung 54: Querschnitt des Laborversuchsaufbaus (Maße in mm)	85
Abbildung 55: Längsschnitt des Laborversuchsaufbaus	85
Abbildung 56: DGS im Labor	86
Abbildung 57: Belastungsrahmen für Verkehrsbelastung	87
Abbildung 58: Nomenklatur der Messsensorik.....	88
Abbildung 59: Messtechnik bei den Laborversuchen.....	89
Abbildung 60: Laborversuch mit applizierter Messtechnik	89
Abbildung 61: Anordnung der QVW-Messung.....	90
Abbildung 62: Nach Versuchsende gelagerte B90 Schwellen mit vergrößerter Darstellung des verklebten DMS	91
Abbildung 63: Versuchsaufbau für den Kalibrierungsversuch des negativen Biegemoments nach [47].....	92
Abbildung 64: Aufbau des Kalibrierungsversuchs.....	92
Abbildung 65: Ablaufschema der Vorversuche	95
Abbildung 66: Die Beschleunigungen in Abhängigkeit der Einwirkungsdauer des DGS	96
Abbildung 67: Maximaler horizontaler gleitender Effektivwert der Beschleunigung der Schwelle bei 70bar in Abh. der Frequenz	97
Abbildung 68: Maximaler horizontaler Effektivwert der Beschleunigung der Schwellen B70, B07 So und B90 bei unterschiedlichen Frequenzen in Abhängigkeit der Auflast ..99	
Abbildung 69: Maximaler horizontaler Effektivwert der Beschleunigung der B07 So und B90 Schwelle bei unterschiedlichen Frequenzen in Abh. der Auflast.....	100
Abbildung 70: Maximaler horizontaler Effektivwert der Beschleunigung der B07 So und B90 Schwelle in Abh. der Auflast.....	101
Abbildung 71: Exemplarische Auswertung der Feldversuche für die Definition der Rampe für die Unwuchtaussteuerung bei den Laborversuchen.....	103
Abbildung 72: Belastung des Gleisrostes auf Position 1 bzw. Position 2 durch vertikale Auflast des DGS.....	105
Abbildung 73: Dehnungsverhalten der Schwelle 4 unter statischer vertikaler Auflast	106
Abbildung 74: Schotterprobeentnahme vor der Versuchsreihe B70.....	108
Abbildung 75: Beschleunigungswerte in der Tiefe, Mittelwerte aus Position 1/2 sowie Schottermessstein (SMS) links/rechts	110
Abbildung 76: Prozentuale Abnahme der Beschleunigung des Schotters mit zunehmender Tiefe	111

Abbildung 77: Mittelwert der maximalen vertikalen Setzung der Schwelle 6 und 7 (Sw 6/7).....	112
Abbildung 78: Zuwachs des QVW auf Basis des QVW nach dem Stopfen.....	118
Abbildung 79: Gegenüberstellung der Siebdurchgänge vor und nach dem DGS im Labor – B70.....	126
Abbildung 80: Gegenüberstellung der Siebdurchgänge vor und nach dem DGS im Labor – B07 So	126
Abbildung 81: Gegenüberstellung der Siebdurchgänge vor und nach dem DGS im Labor – B90.....	127
Abbildung 82: Regelzeichnung der Betonschwelle B70 W-54 (log 54.15.0003).....	154
Abbildung 83: Regelzeichnung der Betonschwelle B90 W-60 (log 60.15.0002).....	154
Abbildung 84: Regelzeichnung der Betonschwelle B07 So W-60 (log 60.15.0006)...	155
Abbildung 85: B70 - mit PSS - DGS bei allen Stopfgängen (V1).....	156
Abbildung 86: Gemittelte Kraftverformungsverläufe der statischen QVW-Messung Nullmessung	167
Abbildung 87: Gemittelte Kraftverformungsverläufe der dynamischen QVW-Messung Nullmessung	172
Abbildung 88: Gemittelte Kraftverformungsverläufe der statischen QVW-Messung nach 100.000 Lt.....	176
Abbildung 89: Gemittelte Kraftverformungsverläufe der dynamischen QVW-Messung nach 100.000 Lt	180
Abbildung 90: Gemittelte Kraftverformungsverläufe der statischen QVW-Messung nach 1,5 Mio. Lt	184
Abbildung 91: Gemittelte Kraftverformungsverläufe der dynamischen QVW-Messung nach 1,5 Mio. Lt.....	189
Abbildung 92: B90 - horizontale Beschleunigung der Schwelle bei 70 bar in Abh. der Frequenz.....	194
Abbildung 93: B70 laterale Schwellenbeschleunigung bei 70 bar in Abh. der Frequenz	195
Abbildung 94: B70 vertikale Schwellenbeschleunigung bei 70 bar in Abh. der Frequenz	195
Abbildung 95: B70 Schotterbeschleunigung in Schwellenlängsrichtung bei 70 bar in Abh. der Frequenz.....	195
Abbildung 96: B70 laterale Schotterbeschleunigung bei 70 bar in Abh. der Frequenz	196
Abbildung 97: B70 vertikale Schwellenbeschleunigung bei 30 Hz in Abh. der Auflast.....	196
Abbildung 98: B70 Schwellenbeschleunigung bei 30 Hz in Abh. der Auflast.....	197
Abbildung 99: B70 laterale Schotterbeschleunigung in Schienenlängsachse bei 30 Hz in Abh. der Auflast.....	197
Abbildung 100: B70 laterale Schotterbeschleunigung bei 30 Hz in Abh. der Auflast .	198

Abbildung 101: B70 laterale Schotterbeschleunigung in Schienenlängsachse bei 30 Hz in Abh. der Auflast.....	198
Abbildung 102: B07 So laterale Schwellenbeschleunigung bei 70 bar in Abh. der Frequenz.....	199
Abbildung 103: B07 So vertikale Schwellenbeschleunigung bei 70 bar in Abh. der Frequenz.....	199
Abbildung 104: B07 So laterale Schotterbeschleunigung der triaxialen SMS 1 und 3 bei 70 bar in Abh. der Frequenz.....	200
Abbildung 105: B07 So laterale Schotterbeschleunigung der einaxialen SMS 4 bis 6 bei 70 bar in Abh. der Frequenz.....	200
Abbildung 106: B07 So Schotterbeschleunigung in Schienenlängsachse bei 70 bar in Abh. der Frequenz.....	201
Abbildung 107: B07 So vertikale Schotterbeschleunigung bei 70 bar in Abh. der Frequenz.....	201
Abbildung 108: B07 So laterale Schwellenbeschleunigung bei 27 Hz und 34 Hz in Abh. der Auflast.....	202
Abbildung 109: B07 So laterale Schwellenbeschleunigung bei 27 Hz und 34 Hz in Abh. der Auflast.....	202
Abbildung 110: B07 So vertikale Schwellenbeschleunigung bei 27 Hz und 34 Hz in Abh. der Auflast.....	203
Abbildung 111: B07 So vertikale Schwellenbeschleunigung bei 27 Hz und 34 Hz in Abh. der Auflast.....	203
Abbildung 112: B07 So Schotterbeschleunigung in Schienenlängsachse bei 27 Hz und 34 Hz in Abh. der Auflast.....	204
Abbildung 113: B07 So laterale Schotterbeschleunigung bei 27 Hz und 34 Hz in Abh. der Auflast.....	204
Abbildung 114: B07 So laterale Schotterbeschleunigung bei 34 Hz in Abh. der Auflast	205
Abbildung 115: B07 So laterale Schotterbeschleunigung bei 27 Hz in Abh. der Auflast	205
Abbildung 116: B07 So laterale Schotterbeschleunigung bei 27 Hz in Abh. der Auflast	205
Abbildung 117: B07 So vertikale Schotterbeschleunigung bei 27 Hz und 34 Hz in Abh. der Auflast.....	206
Abbildung 118: B90 laterale Schwellenbeschleunigung bei 70 bar in Abh. der Frequenz	206
Abbildung 119: B90 vertikale Schwellenbeschleunigung bei 70 bar in Abh. der Frequenz.....	207
Abbildung 120: B90 Schotterbeschleunigung in Schienenlängsachse bei 70 bar in Abh. der Frequenz.....	207

Abbildung 121: B90 laterale Schotterbeschleunigung bei 70 bar in Abh. der Frequenz	208
Abbildung 122: B90 laterale Schotterbeschleunigung bei 70 bar in Abh. der Frequenz	208
Abbildung 123: B90 vertikale Schotterbeschleunigung bei 70 bar in Abh. der Frequenz	209
Abbildung 124: B90 laterale Schwellenbeschleunigung bei 34 Hz in Abh. der Auflast	209
Abbildung 125: B90 laterale Schwellenbeschleunigung bei 27 Hz in Abh. der Auflast	210
Abbildung 126: B90 laterale Schwellenbeschleunigung bei 32 Hz und 39 Hz in Abh. der Auflast	210
Abbildung 127: B90 vertikale Schwellenbeschleunigung bei 34 Hz in Abh. der Auflast	211
Abbildung 128: B90 vertikale Schwellenbeschleunigung bei 27 Hz in Abh. der Auflast	211
Abbildung 129: B90 vertikale Schwellenbeschleunigung bei 32 Hz in Abh. der Auflast	212
Abbildung 130: B90 Schotterbeschleunigung in Schienenlängsachse bei 34 Hz in Abh. der Auflast	212
Abbildung 131: B90 Schotterbeschleunigung in Schienenlängsachse bei 27 Hz und 32 Hz in Abh. der Auflast	213
Abbildung 132: B90 laterale Schotterbeschleunigung bei 34 Hz in Abh. der Auflast	213
Abbildung 133: B90 laterale Schotterbeschleunigung bei 34 Hz in Abh. der Auflast	214
Abbildung 134: B90 laterale Schotterbeschleunigung bei 27 Hz und 32 Hz in Abh. der Auflast	214
Abbildung 135: B90 laterale Schotterbeschleunigung bei 27 Hz in Abh. der Auflast	215
Abbildung 136: B90 laterale Schotterbeschleunigung bei 32 Hz in Abh. der Auflast	215
Abbildung 137: B90 vertikale Schotterbeschleunigung bei 34 Hz in Abh. der Auflast	216
Abbildung 138: B90 vertikale Schotterbeschleunigung bei 27 Hz und 32 Hz in Abh. der Auflast	216
Abbildung 139: Mittelwert der maximalen vertikalen Setzung der Schwelle 3 und 4 (Sw 3/4)	221

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick über die Hebewerte und Anzahl der Eingriffe bei den DACH-Staaten [2].....	11
Tabelle 2: Zusammenstellung der Vorgaben zum Einsatz des DGS [13] [14].....	17
Tabelle 3: Zulässige Höchstgeschwindigkeit nach 2. Stabilisierung [16].....	19
Tabelle 4: Zulässige Höchstgeschwindigkeit nach der Durcharbeitung [16].....	20
Tabelle 5: Bezeichnung der Eingriffsschwellen bei den DACH-Staaten [2].....	25
Tabelle 6: Beschleunigungssensoren mit Einsatzgebiet	32
Tabelle 7: Anforderung der Korngrößenverteilung	38
Tabelle 8: Spezifikationen der Oberbauformen.....	42
Tabelle 9: Schematische Darstellung der Versuchsabschnitte mit PSS - Wiesloch	43
Tabelle 10: Schematische Darstellung der Versuchsabschnitte ohne PSS - Wiesloch	43
Tabelle 11: Mittelwerte der statischen QVW-Messungen bei 2 mm Verschiebeweg [41]	44
Tabelle 12: Ergebnisse der Siebdurchgänge sowie Feinkornanteil und Feinstkornanteil	50
Tabelle 13: Ergebnisse der Kornformkennzahl, der Plattigkeitskennzahl und der Kornlänge.....	50
Tabelle 14: Zusammenstellung der Mittelwerte der maximalen effektiven Gleitwerte der Beschleunigung und der maximalen Wegamplituden aus der Feldmessung Nörten-Hardenberg	53
Tabelle 15: Aufteilung der Versuchsabschnitte bei der Feldmessung Hildesheim	58
Tabelle 16: Mittelwerte der statischen QVW-Messungen bei 2 mm Verschiebeweg [41, 45].....	61
Tabelle 17: Mittelwerte der dynamischen QVW-Werte bei 2 mm Verschiebeweg	65
Tabelle 18: Zusammenstellung der maximalen effektiven Gleitwerte der Beschleunigung und der maximalen Wegamplituden aus der Feldmessung Hildesheim	68
Tabelle 19: Übersicht der Oberbauformen und Maschineneinstellung des DGS der Versuchsabschnitte	72
Tabelle 20: Zusammenstellung der maximalen effektiven Gleitwerte der Beschleunigung und der maximalen Wegamplituden aus der Feldmessung Neusiedl a. See	73
Tabelle 21: Zusammenstellung der maximalen effektiven Gleitwerte der Beschleunigung und der maximalen Wegamplituden aus der Feldmessung Langenschwarz	79
Tabelle 22: Maximalwert des gleitenden Effektivwerts der Beschleunigung [m/s ²] der drei Oberbauformen	98

Tabelle 23: Korrekturfaktor aus der Schwellendehnung der B07 So auf unkonsolidiertem Schotter zu den Schwellendehnungen auf konsolidiertem Schotter	107
Tabelle 24: Spezifische Prüfkräfte des Kalibrierungsversuchs für die Schwellentypen	107
Tabelle 25: Prozentuale laterale Schotterbeschleunigung bezogen auf die Schwellenbeschleunigung (100 %).....	111
Tabelle 26: Mittelwerte der maximalen lateralen Wegamplitude der Schwellen 3, 4 und 6, 7	114
Tabelle 27: Gegenüberstellung der maximalen Wegamplituden und der Mittelwerte des maximalen effektiven Gleitwert der Beschleunigung.....	114
Tabelle 28: Mittelwerte der Querverschiebewiderstände	117
Tabelle 29: Querverschiebewiderstände und der Zuwachs durch DGS bzw. Verkehrsbelastung	119
Tabelle 30: Superponierte (Position 1 + 2) Ergebnisse der Dehnungsmessung unter horizontaler dynamischer Belastung (Schlagkraft).....	121
Tabelle 31: Ergebnisse Dehnungsmessung unter vertikaler Auflast durch den Belastungsrahmen aufgebracht.....	122
Tabelle 32: Korrekturfaktor für die Schwellen in Abhängigkeit der Belastung	122
Tabelle 33: Gesamtdehnung der Schwelle durch die Beanspruchung des DGS.....	123
Tabelle 34: Ergebnisse des Kalibrierungsversuch	123
Tabelle 35: Schwellenauslastung der B70 Schwelle durch den DGS bezogen auf die charakteristische Prüfkraft und die Mindestprüfkraft zur Erstrissbildung	124
Tabelle 36: Ergebnisse - Mittelwerte der Sieblinie sowie Feinkornanteil und Feinstkornanteil.....	125
Tabelle 37: Mittelwerte der Kornformkennzahl und der Plattigkeitskennzahl.....	127
Tabelle 38: Ergebnisse der vertikalen statischen Steifigkeit der Zwischenlagen.....	129
Tabelle 39: Ergebnisse der vertikalen dynamischen niederfrequenten Steifigkeit der Zwischenlagen	130
Tabelle 40: Statischer QVW der Feldmessung Wiesloch - B70 - mit PSS - DGS bei allen Stopfgängen (V1) [41].....	156
Tabelle 41: Statischer QVW der Feldmessung Wiesloch - B70 - mit PSS - DGS nur nach der 1. Stabi (V2) [41].....	157
Tabelle 42: Statischer QVW der Feldmessung Wiesloch - B70 - mit PSS - ohne DGS (V3) [41]	158
Tabelle 43: Statischer QVW der Feldmessung Wiesloch - B70 - ohne PSS - DGS bei allen Stopfgängen (V4) [41].....	159
Tabelle 44: Statischer QVW der Feldmessung Wiesloch - B70 - ohne PSS - DGS nur nach der 1. Stabi (V5) [41].....	160
Tabelle 45: Statischer QVW der Feldmessung Wiesloch - B70 - ohne PSS - ohne DGS (V6) [41]	161

Tabelle 46: statischer QVW – Schwellen B 07 So ohne DGS nach Umbau (V1) – gemessene Werte	164
Tabelle 47: statischer QVW - Schwellen B 07 So mit DGS nach Umbau (V2) - gemessene Werte	165
Tabelle 48: statischer QVW - Schwelle B 70 mit DGS nach Umbau (V 3) - gemessene Werte	166
Tabelle 49: statischer QVW - Schwelle B 70 ohne DGS nach Umbau (V 4) - gemessene Werte	167
Tabelle 50: statischer QVW - Schwellen B 07 So mit DGS auf der Brücke nach Umbau (V2) – gemessene Werte.....	168
Tabelle 51: statischer QVW - Schwellen B 90 mit DGS nach Umbau (V2) – gemessene Werte	168
Tabelle 52: dynamischer QVW – Schwellen B 07 So ohne DGS nach Umbau (V1) – gemessene Werte	169
Tabelle 53: dynamischer QVW – Schwellen B 07 So mit DGS nach Umbau (V2) – gemessene Werte	170
Tabelle 54: dynamischer QVW – Schwellen B 70 mit DGS nach Umbau (V3) – gemessene Werte	171
Tabelle 55: dynamischer QVW – Schwellen B 70 ohne DGS nach Umbau (V4) – gemessene Werte	172
Tabelle 56: statischer QVW – Schwellen B 07 So ohne DGS nach 100.000 Lt (V1) – gemessene Werte	173
Tabelle 57: statischer QVW – Schwellen B 07 So mit DGS nach 100.000 Lt (V2) – gemessene Werte	174
Tabelle 58: statischer QVW – Schwellen B 70 mit DGS nach 100.000 Lt (V3) – gemessene Werte	175
Tabelle 59: statischer QVW – Schwellen B 70 ohne DGS nach 100.000 Lt (V4) – gemessene Werte	176
Tabelle 60: statischer QVW - Schwellen B 07 So auf der Brücke mit DGS nach 100.000 Lt (V2) – gemessene Werte.....	177
Tabelle 61: statischer QVW - Schwellen B 90 mit DGS nach 100.000 Lt (V2) - gemessene Werte	177
Tabelle 62: dynamischer QVW – Schwellen B 07 So ohne DGS nach 100.000 Lt (V1) – gemessene Werte	178
Tabelle 63: dynamischer QVW – Schwellen B 07 So mit DGS nach 100.000 Lt (V2) – gemessene Werte	178
Tabelle 64: dynamischer QVW – Schwellen B 70 mit DGS nach 100.000 Lt (V3) – gemessene Werte	179
Tabelle 65: dynamischer QVW – Schwellen B 70 ohne DGS nach 100.000 Lt (V4) – gemessene Werte	180

Tabelle 66: statischer QVW – Schwellen B 07 So ohne DGS nach 1,5 Mio. Lt (V1) – gemessene Werte	181
Tabelle 67: statischer QVW - Schwellen B 07 So mit DGS nach 1,5 Mio. Lt (V2) - gemessene Werte	182
Tabelle 68: statischer QVW - Schwelle B 70 mit DGS nach 1,5 Mio. Lt (V 3) - gemessene Werte	183
Tabelle 69: statischer QVW - Schwelle B 70 ohne DGS nach 1,5 Mio. Lt (V 4) - gemessene Werte	184
Tabelle 70: statischer QVW - Schwellen B 07 So mit DGS auf der Brücke nach 1,5 Mio. Lt (V2) – gemessene Werte.....	185
Tabelle 71: statischer QVW - Schwellen B 90 mit DGS nach 1,5 Mio. Lt (V2) – gemessene Werte	185
Tabelle 72: dynamischer QVW – Schwellen B 07 So ohne DGS nach 1,5 Mio. Lt (V1) – gemessene Werte	186
Tabelle 73: dynamischer QVW – Schwellen B 07 So mit DGS nach 1,5 Mio. Lt (V2) – gemessene Werte	187
Tabelle 74: dynamischer QVW – Schwellen B 70 mit DGS nach 1,5 Mio. Lt (V3) – gemessene Werte	188
Tabelle 75: dynamischer QVW – Schwellen B 70 ohne DGS nach 1,5 Mio. Lt (V4) – gemessene Werte	189
Tabelle 76: Korrekturfaktor aus der Schwellendehnung auf unkonsolidiertem Schotter zu den Schwellendehnungen auf konsolidiertem Schotter.....	217
Tabelle 77: maximale Dehnung aus der horizontalen dynamischen Beanspruchung	217
Tabelle 78: Ergebnisse des Kalibrierungsversuchs der einzelnen B70 Schwellen	218
Tabelle 79: Ergebnisse des Kalibrierungsversuchs der einzelnen B07 So Schwellen	218
Tabelle 80: Ergebnisse des Kalibrierungsversuchs der einzelnen B90 Schwellen	218
Tabelle 81: Schwellenauslastung der B70 Schwelle durch den DGS bezogen auf die charakteristische Prüfkraft und die Mindestprüfkraft zur Erstrissbildung	218
Tabelle 82: Schwellenauslastung der B07 So Schwelle durch den DGS bezogen auf die charakteristische Prüfkraft und die Mindestprüfkraft zur Erstrissbildung.....	219
Tabelle 83: Schwellenauslastung der B90 Schwelle durch den DGS bezogen auf die charakteristische Prüfkraft und die Mindestprüfkraft zur Erstrissbildung	219
Tabelle 84: Werte des maximalen gleitenden Effektivwert des Schottermesssteins 8 cm unter der Schwellenunterkante in Schwellenmitte der Schwelle-Nr. 6.....	220
Tabelle 85: Werte des maximalen gleitenden Effektivwert im Schwellenfach der Schwelle-Nr. 5 und 6 unterhalb der Schiene.....	220
Tabelle 86: Werte des maximalen gleitenden Effektivwert im Schotter vor Kopf.....	220

Anlagenverzeichnis

A.1	Regelzeichnungen der Betonschwellen von der DB Netz AG	154
A.2	Feldmessung Wiesloch – tabellarische und grafische Ergebniszusammenstellung der QVW-Messung	156
A.3	Nörten Hardenberg - Ergebnisse der Beschleunigungsmessung	162
A.4	Feldmessung Hildesheim - Lageplan mit Systemskizze zum Aufbau der Versuchsabschnitte	163
A.5	Feldmessung Hildesheim – tabellarische und grafische Ergebniszusammenstellung der QVW-Messung	164
A.6	Zusammenfassung der Anhebung bzw. Einsenkung der Schwelle während der QVW-Messung unter 2 mm horizontaler Verschiebeweg	190
A.7	Hildesheim - Ergebnisse der Beschleunigungsmessung	191
A.8	Neusiedl - Ergebnisse der Beschleunigungsmessung	192
A.9	Langenschwarz - Ergebnisse der Beschleunigungsmessung	193
A.10	Maximale Werte des gleitenden Effektivwerts der Schwellenbeschleunigung und Schotterbeschleunigung der Vorversuche	194
A.11	Ergebnisse aus der Dehnungsmessung im Labor	217
A.12	Ergebnisse der Simulation der Überfahrt des DGS	220

Anlagen

A.1 Regelzeichnungen der Betonschwellen von der DB Netz AG

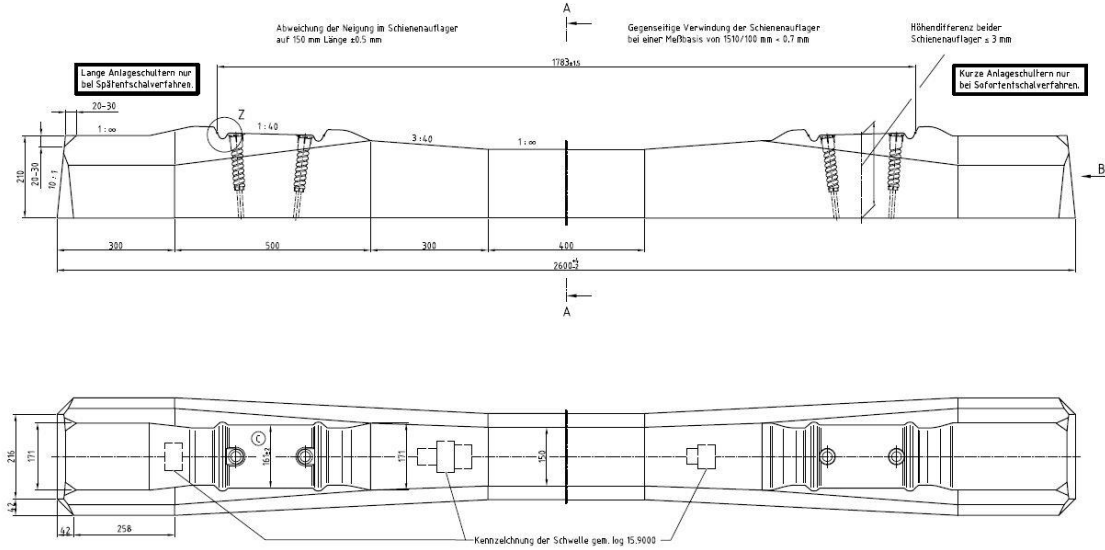


Abbildung 82: Regelzeichnung der Betonschwelle B70 W-54 (log 54.15.0003)

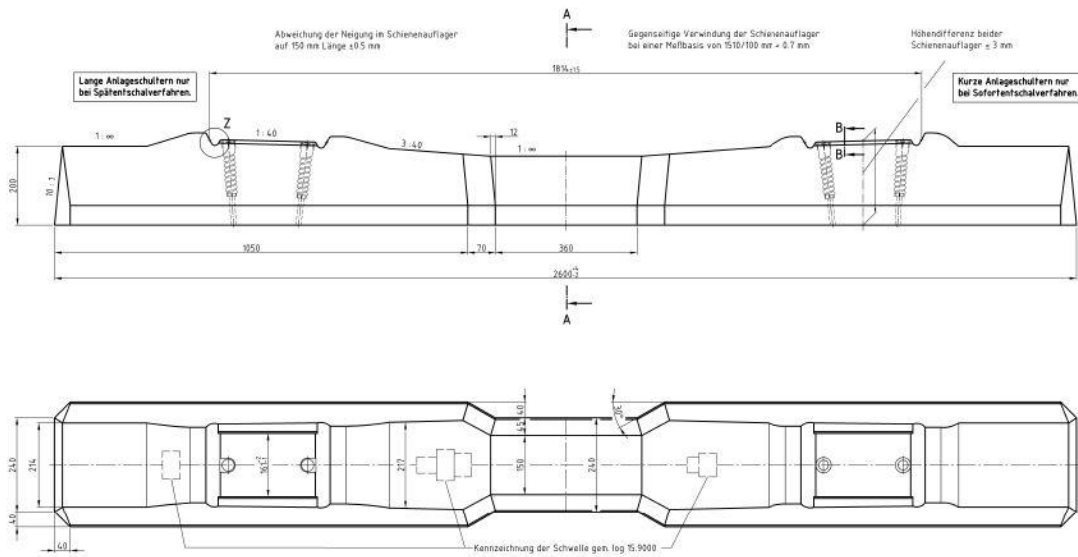


Abbildung 83: Regelzeichnung der Betonschwelle B90 W-60 (log 60.15.0002)

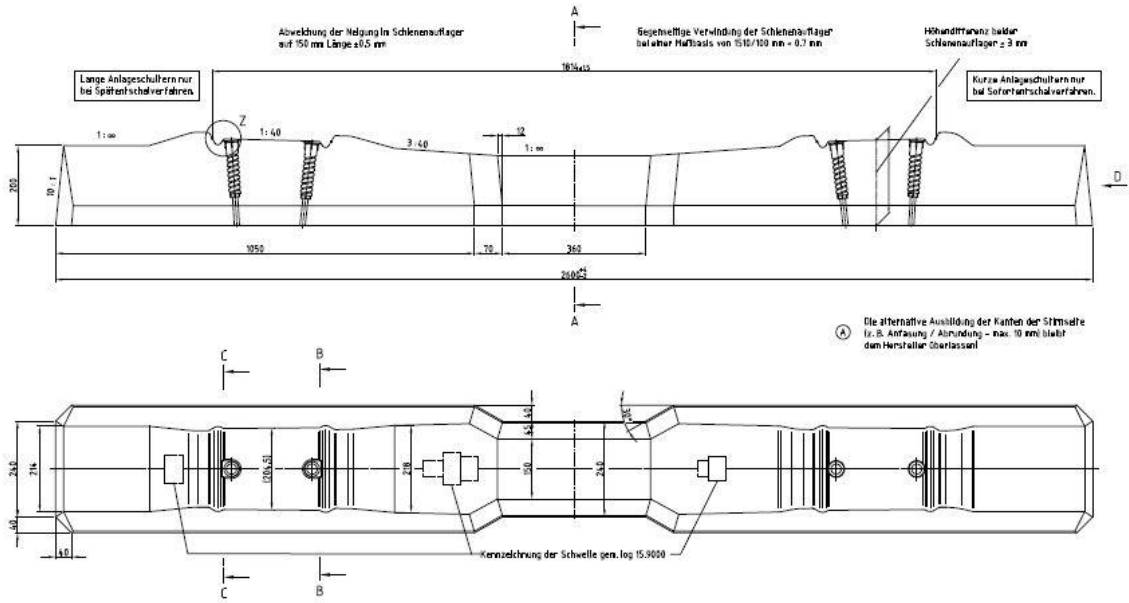


Abbildung 84: Regelzeichnung der Betonschwelle B07 So W-60 (log 60.15.0006)

A.2 Feldmessung Wiesloch – tabellarische und grafische Ergebniszusammenstellung der QVW-Messung

Tabelle 40: Statischer QVW der Feldmessung Wiesloch - B70 - mit PSS - DGS bei allen Stopfgängen (V1) [41]

B70 - mit PSS - DGS bei allen Stopfgängen (V1)													
Verschiebeweg [mm]	0,25	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00
Nullmessung													
Mittelwert [kN]	4,6	5,5	6,5	7,1	7,4	7,7	7,9	8,0	8,0	8,1	8,2	8,2	8,2
Mittelwert [N/mm]	7,6	9,1	10,9	11,8	12,4	12,8	13,1	13,3	13,4	13,5	13,6	13,7	13,7
Standardabweichung [kN]	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,7
Variationskoeffizient [%]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1
Nach 100.000 Lt													
Mittelwert [kN]	5,2	6,2	7,1	7,6	7,9	8,1	8,3	8,4	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8
Mittelwert [N/mm]	8,7	10,3	11,9	12,7	13,2	13,5	13,8	14,0	14,0	14,2	14,3	14,5	14,6
Standardabweichung [kN]	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8
Variationskoeffizient [%]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Nach 1,5 Mio. Lt													
Mittelwert [kN]	6,1	7,4	8,3	8,8	9,0	9,1	9,2	9,2	9,3	9,4	9,3	9,4	9,3
Mittelwert [N/mm]	10,2	12,3	13,9	14,6	15,0	15,2	15,3	15,4	15,4	15,6	15,6	15,6	15,5
Standardabweichung [kN]	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Variationskoeffizient [%]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

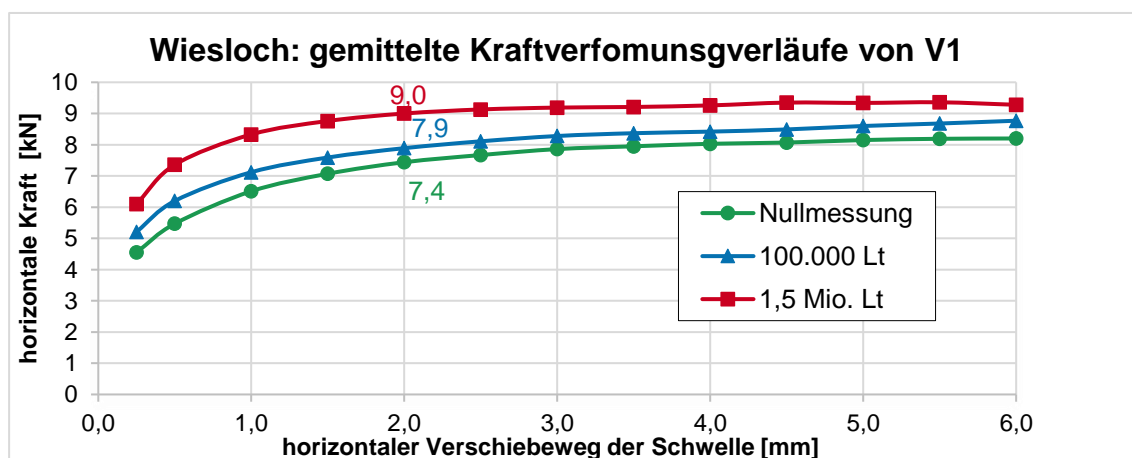


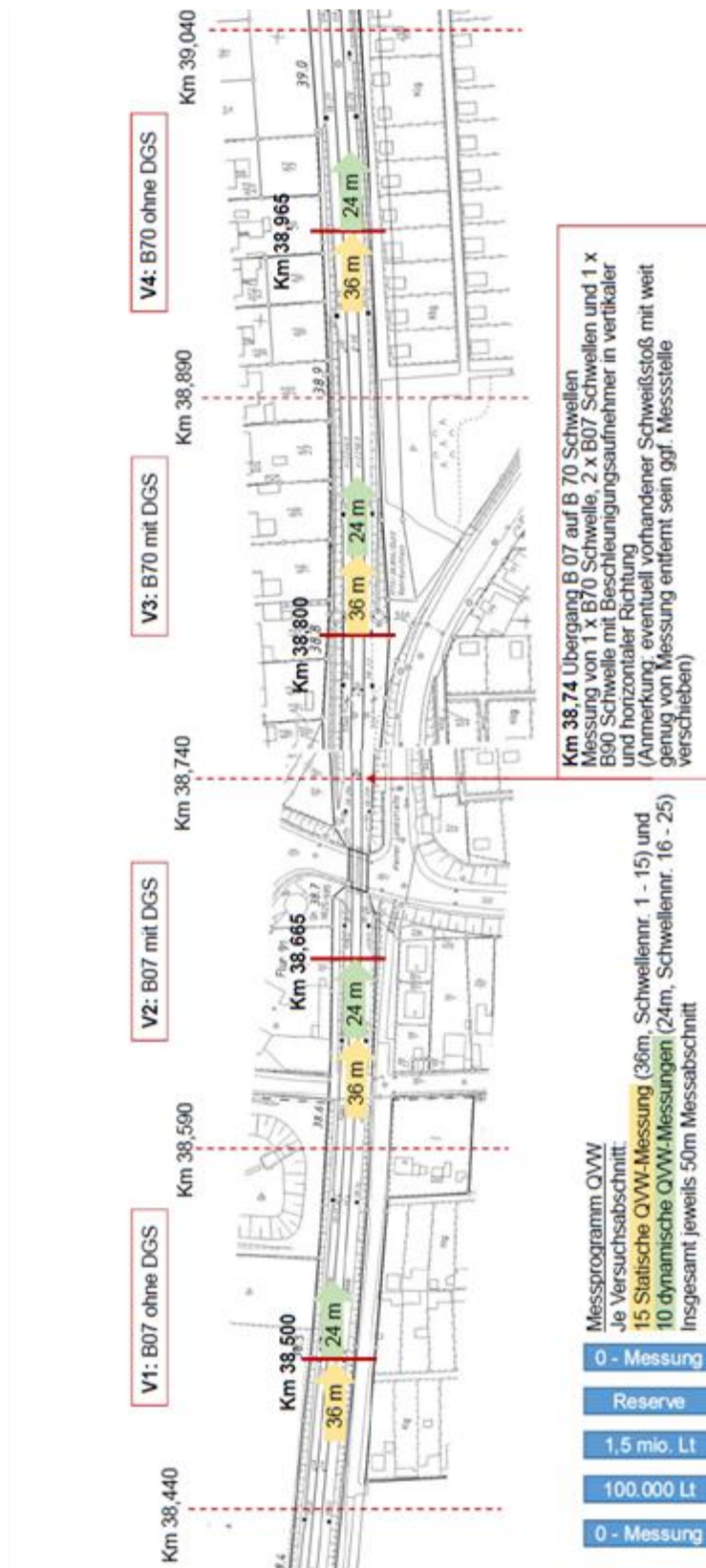
Abbildung 85: B70 - mit PSS - DGS bei allen Stopfgängen (V1)

A.3 Nörten Hardenberg - Ergebnisse der Beschleunigungsmessung

Die folgenden Ergebnisse wurden an einer Schwelle B07 So, die 360 kg wiegt, bei einer Schwingfrequenz von 34 Hz gemessen. Die Unwuchten liefen synchron.

Nörten-Hardenberg	Auflast	max. effektiver Gleitwert der Beschleunigung		max. effektiver Gleitwert der Schwinggeschwindigkeit		Wegamplitude	
		horizontal [m/s ²]	vertikal [m/s ²]	horizontal [mm/s]	vertikal [mm/s]	horizontal [mm]	vertikal [mm]
B07 - Mittelwert Gesamt (83 bar)	83 bar	38,1	20,6	176,2	77,4	1,1	0,6
B07 - 1. Überfahrt - Mittelwert	83 bar	39,7	21,4	183,9	81,2	1,2	0,6
Schwelle Nr. 1	83 bar	24,6	12,9	109,6	45,7	0,7	0,3
Schwelle Nr. 2	83 bar	41,2	21,2	184,1	79,3	1,2	0,6
Schwelle Nr. 3	83 bar	54,8	35,0	245,2	137,3	1,6	0,9
Schwelle Nr. 4	83 bar	44,6	25,1	196,8	102,6	1,3	0,6
B07 - 2. Überfahrt - Mittelwert	83 bar	37,9	20,7	174,7	76,8	1,1	0,6
Schwelle Nr. 1	83 bar	23,4	13,1	103,5	45,2	0,7	0,3
Schwelle Nr. 2	83 bar	40,0	20,0	178,1	74,3	1,2	0,6
Schwelle Nr. 3	83 bar	51,9	31,4	226,5	121,4	1,6	0,8
Schwelle Nr. 4	83 bar	42,9	24,6	190,6	100,7	1,3	0,6
B07 - 3. statisch an/aus - Mittelwert	83 bar	36,8	20,7	170,0	74,3	1,1	0,5
Schwelle Nr. 1	83 bar	22,7	13,1	101,8	46,1	0,6	0,3
Schwelle Nr. 2	83 bar	38,6	19,3	173,8	69,6	1,2	0,5
Schwelle Nr. 3	83 bar	48,2	28,8	215,5	112,6	1,4	0,7
Schwelle Nr. 4	83 bar	42,1	23,7	188,9	97,4	1,3	0,6
B07 - 4. Überfahrt - Mittelwert	43 bar	49,4	38,3	216,4	132,5	1,4	1,0
Schwelle Nr. 1	43 bar	29,8	20,5	131,3	61,2	0,8	0,4
Schwelle Nr. 2	43 bar	47,7	36,3	210,7	144,8	1,3	1,0
Schwelle Nr. 3	43 bar	68,8	52,8	307,3	220,7	2,0	1,6
Schwelle Nr. 4	43 bar	51,3	43,6	Störung	177,8	1,5	1,2

A.4 Feldmessung Hildesheim - Lageplan mit Systemskizze zum Aufbau der Versuchsabschnitte



A.5 Feldmessung Hildesheim – tabellarische und grafische Ergebniszusammenstellung der QVW-Messung

Tabelle 46: statischer QVW – Schwellen B 07 So ohne DGS nach Umbau (V1) – gemessene Werte

statischer QVW [kN] - Schwellen B07So ohne DGS - Nullmessung (V1)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V 1 .1	0,0	6,1	7,2	7,8	8,2	8,9	9,4	9,6	10,3	10,2	13,7
V 1 .2	0,0	6,2	7,1	7,6	8,0	8,6	9,0	9,3	10,2	10,1	13,3
V 1 .3	0,4	6,6	7,9	8,4	8,9	9,4	9,8	10,1	10,3	10,3	14,8
V 1 .4	0,9	6,2	7,2	7,9	8,2	8,9	9,3	9,4	9,7	9,7	13,7
V 1 .5	0,1	6,3	7,4	8,0	8,3	8,9	9,3	9,6	10,1	10,2	13,8
V 1 .6	0,0	5,9	7,1	7,8	8,0	8,6	9,0	9,2	9,9	9,8	13,4
V 1 .7	0,0	5,8	6,8	7,3	7,7	8,2	8,6	8,8	9,2	9,1	12,8
V 1 .8	0,0	5,7	6,8	7,3	7,6	8,0	8,4	8,5	8,8	8,8	12,7
V 1 .9	0,1	6,1	7,4	8,0	8,5	9,1	9,4	9,6	9,8	9,9	14,2
V 1 .10	0,0	5,9	7,0	7,5	7,9	8,3	8,6	8,8	9,0	9,0	13,2
V 1 .11	0,3	6,0	7,0	7,4	7,7	8,3	8,6	8,9	9,1	9,1	12,9
V 1 .12	0,0	6,2	7,3	7,9	8,3	8,7	9,0	9,2	9,4	9,6	13,8
V 1 .13	0,0	6,0	6,8	7,5	7,9	8,4	8,6	8,8	9,0	9,1	13,1
V 1 .14	0,0	6,0	6,9	7,3	7,6	7,9	8,1	8,2	8,7	8,6	12,6
V 1 .15	0,0	6,3	7,3	7,9	8,2	8,7	9,1	9,3	9,7	9,8	13,7
Mittelwert [kN]	0,1	6,1	7,1	7,7	8,1	8,6	8,9	9,2	9,5	9,6	
Mittelwert [N/mm]	0,2	10,1	11,9	12,8	13,5	14,3	14,9	15,3	15,9	15,9	13,4
Standard- abweichung [kN]	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6	0,5	
Variations- koeffizient [%]	2,17	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	

Tabelle 47: statischer QVW - Schwellen B 07 So mit DGS nach Umbau (V2) - gemessene Werte

statischer QVW [kN] - Schwellen B07So mit DGS – Nullmessung (V2)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V 2.1	0,3	7,1	8,5	9,0	9,4	9,9	10,3	10,5	10,8	10,9	15,6
V 2.2	0,0	6,3	7,8	8,4	8,9	9,5	9,9	10,1	10,7	10,7	14,8
V 2.3	0,0	6,0	7,1	7,7	8,1	8,6	9,0	9,3	9,7	9,7	13,6
V 2.4	0,0	6,8	8,3	8,9	9,3	9,9	10,3	10,5	11,0	11,2	15,5
V 2.5	0,0	6,1	7,5	8,3	8,8	9,3	9,6	9,8	10,5	10,5	14,7
V 2.6	0,0	6,5	7,8	8,8	9,3	10,0	10,7	11,0	10,8	10,9	15,5
V 2.7	0,0	6,4	8,0	9,0	9,6	10,2	10,4	10,6	11,0	11,0	15,9
V 2.8	0,0	6,4	7,6	8,1	8,6	9,0	9,5	9,8	10,0	10,1	14,3
V 2.9	0,0	6,3	7,6	8,5	9,0	9,8	10,2	10,7	10,9	10,9	14,9
V 2.10	0,0	6,2	7,8	8,6	9,0	9,6	10,0	10,2	10,2	10,1	14,9
V 2.11	0,0	6,5	8,1	9,0	9,5	10,2	10,8	11,1	11,4	11,0	15,8
V 2.12	0,0	6,1	7,5	8,0	8,5	9,0	9,6	10,0	10,2	10,3	14,1
V 2.13	0,0	6,1	7,6	8,2	8,6	9,3	9,6	9,9	10,2	10,2	14,4
V 2.14	0,2	6,4	7,8	8,3	8,8	9,2	9,5	10,0	11,6	11,8	14,7
V 2.15	0,0	5,4	7,1	7,9	8,5	9,1	9,5	9,7	10,0	10,1	14,1
Mittelwert [kN]	0,0	6,3	7,7	8,4	8,9	9,5	9,9	10,2	10,6	10,6	
Mittelwert [N/mm]	0,1	10,5	12,9	14,1	14,9	15,8	16,5	17,0	17,7	17,7	14,9
Standard- abweichung [kN]	0,1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	
Variations- koeffizient [%]	2,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	

Tabelle 48: statischer QVW - Schwelle B 70 mit DGS nach Umbau (V 3) - gemessene Werte

statischer QVW [kN] - Schwellen B70 mit DGS - Nullmessung (V3)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V 3.1	0,0	5,9	6,8	7,2	7,3	7,4	7,2	7,4	8,1	8,2	12,2
V 3.2	0,0	6,3	7,4	7,8	8,3	8,5	8,6	8,5	8,9	9,0	13,8
V 3.3	0,0	6,0	7,3	7,7	7,9	8,3	8,5	8,5	8,9	8,9	13,1
V 3.4	0,0	6,0	7,0	7,4	7,5	7,6	7,8	7,5	7,0	7,2	12,6
V 3.5	0,0	5,9	6,9	7,2	7,3	7,7	7,9	7,9	8,4	9,1	12,2
V 3.6	0,0	6,2	7,1	7,5	7,8	8,0	8,1	8,0	7,8	8,0	13,0
V 3.7	0,0	5,9	7,1	7,5	7,7	7,8	7,9	8,2	8,8	9,7	12,9
V 3.8	0,0	5,9	6,8	7,3	7,4	7,7	7,9	7,8	8,3	9,5	12,4
V 3.9	0,0	6,3	7,4	7,8	8,1	8,5	8,6	8,8	8,9	8,5	13,6
V 3.10	0,0	5,7	6,8	7,2	7,2	7,5	7,8	8,1	7,9	8,2	12,1
V 3.11	0,0	5,7	6,9	7,5	7,7	7,9	8,2	8,4	8,7	8,7	12,8
V 3.12	0,0	5,9	7,4	7,9	8,2	8,4	8,5	8,6	8,4	8,5	13,7
V 3.13	0,0	6,0	6,9	7,3	7,6	7,8	8,1	8,3	8,6	8,7	12,7
V 3.14	0,0	5,9	7,2	7,7	7,7	7,5	7,8	7,6	7,7	7,8	12,8
V 3.15	0,1	6,1	7,3	7,8	8,1	8,6	8,6	8,7	9,0	9,2	13,5
Mittelwert [kN]	0,0	6,0	7,1	7,5	7,7	7,9	8,1	8,2	8,4	8,6	
Mittelwert [N/mm]	0,0	10,0	11,8	12,5	12,9	13,2	13,5	13,6	13,9	14,3	12,9
Standard- abweichung [kN]	0,0	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,6	0,7	
Variations- koeffizient [%]	0,00	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,07	0,08	

Tabelle 49: statischer QVW - Schwelle B 70 ohne DGS nach Umbau (V 4) - gemessene Werte

statischer QVW [kN] - Schwellen B70 ohne DGS - Nullmessung (V4)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V 4.1	0,0	5,6	6,3	6,5	6,6	7,0	7,0	6,8	7,3	7,4	11,0
V 4.2	0,0	5,3	6,1	6,3	6,3	6,6	6,7	6,8	6,9	6,9	10,6
V 4.3	0,0	5,3	6,0	6,3	6,6	6,9	7,2	7,4			11,0
V 4.4	0,0	5,2	5,8	6,1	6,3	6,7	6,8	7,0	7,1	7,1	10,6
V 4.5	0,0	5,8	6,5	6,7	6,9	7,0	7,2	7,3	7,7	7,8	11,4
V 4.6	0,0	4,8	5,5	5,8	5,9	6,2	6,5	6,8	7,6	7,6	9,9
V 4.7	0,0	5,1	5,6	5,8	6,0	6,3	6,4	6,6	6,9	6,9	10,0
V 4.8	0,0	5,0	5,6	6,0	6,1	6,5	6,4	6,6	7,1	7,1	10,2
V 4.9	0,0	5,1	5,9	6,1	6,3	6,5	6,8	6,8	7,8	8,1	10,5
V 4.10	0,0	5,1	6,0	6,3	6,5	6,9	7,1	7,5	8,6	9,2	10,9
V 4.11	0,0	4,9	5,5	5,6	5,9	6,0	6,5	6,8	7,0	7,2	9,8
V 4.12	0,0	5,1	5,8	6,0	6,2	6,4	6,5	6,5	6,8	6,9	10,4
V 4.13	0,0	5,6	6,1	6,3	6,4	6,3	6,6	6,5	6,6	6,5	10,6
V 4.14	0,0	5,3	6,0	6,3	6,6	7,0	7,1	7,2	7,7	7,6	11,1
V 4.15	0,0	4,8	5,2	5,4	5,5	5,8	5,9	6,2	6,3	6,4	9,1
Mittelwert [kN]	0,0	5,2	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,8	7,3	7,3	
Mittelwert [N/mm]	0,0	8,7	9,8	10,2	10,5	10,9	11,2	11,4	12,1	12,2	10,5
Standardabweichung [kN]	0,0	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,7	
Variationskoeffizient [%]	0,00	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,08	0,10	

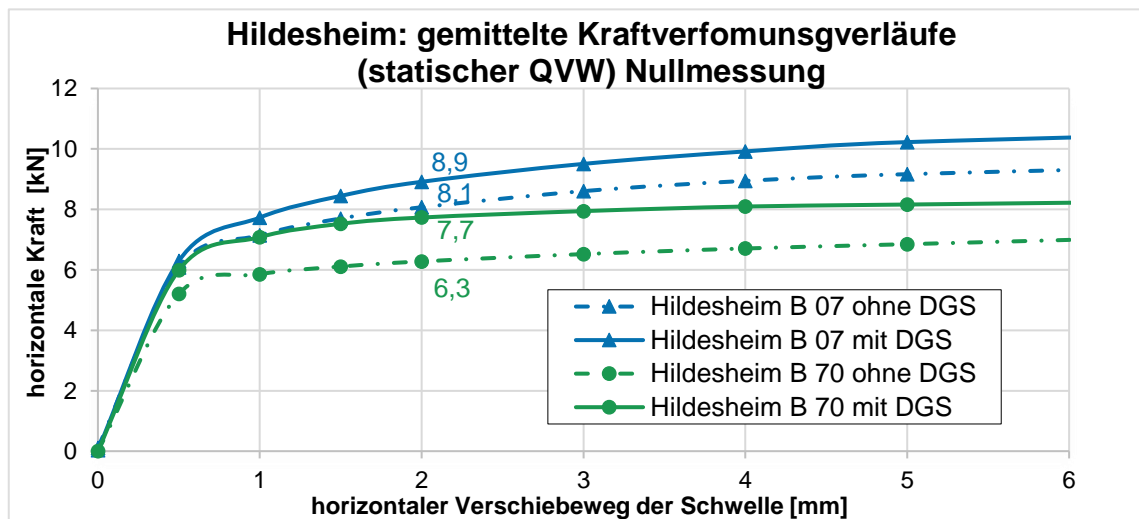


Abbildung 86: Gemittelte Kraftverformungsverläufe der statischen QVW-Messung Nullmessung

Tabelle 50: statischer QVW - Schwellen B 07 So mit DGS auf der Brücke nach Umbau (V2) – gemessene Werte

statischer QVW [kN] - Schwellen B07So auf der Brücke mit DGS -											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	Nullmessung (V2)										
	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V B.1	0,0	6,8	9,0	10,0	10,7	11,8	12,1	12,5	13,8	13,8	17,8
V B.2	0,0	6,9	9,1	10,6	11,4	12,4	12,8	12,9	13,7	13,8	18,9
Mittelwert [kN]	0,0	6,8	9,0	10,3	11,0	12,1	12,5	12,7	13,8	13,8	
Mittelwert [N/mm]	0,0	11,4	15,0	17,2	18,4	20,1	20,8	21,2	22,9	23,0	18,4
Standard- abweichung [kN]	0,0	0,1	0,1	0,4	0,5	0,4	0,5	0,3	0,0	0,0	
Variations- koeffizient [%]	0,04	0,01	0,01	0,04	0,04	0,03	0,04	0,02	0,00	0,00	

Tabelle 51: statischer QVW - Schwellen B 90 mit DGS nach Umbau (V2) – gemessene Werte

statischer QVW [kN] - Schwellen B90 im Übergangsbereich mit DGS -											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	Nullmessung (V2)										
	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V B90.1	0,0	6,3	7,5	8,0	8,3	8,6	8,5	8,7	9,4	4,1	13,8
V B90.2	0,0	6,5	7,8	8,0	8,1	8,3	8,6	8,8	9,8	9,9	13,6
V B90.3	0,8	5,5	7,2	8,4	9,2	10,1	9,9	10,2	10,0	9,7	15,3
Mittelwert [kN]	0,3	6,1	7,5	8,1	8,5	9,0	9,0	9,2	9,7	7,9	
Mittelwert [N/mm]	0,4	10,1	12,5	13,6	14,2	15,0	15,0	15,4	16,2	13,1	14,2
Standard- abweichung [kN]	0,0	0,1	0,2	0,0	0,1	0,2	0,0	0,1	0,3	4,1	
Variations- koeffizient [%]	0,03	0,02	0,02	0,00	0,01	0,02	0,00	0,01	0,03	0,52	

Tabelle 52: dynamischer QVW – Schwellen B 07 So ohne DGS nach Umbau (V1) – gemessene Werte

dynamischer QVW - Schwellen B07So ohne DGS - Nullmessung (V1)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V 1 .16	0,0	3,3	4,0	4,5	4,9	5,3	5,5	5,8	6,1	6,3	8,1
V 1 .17	0,1	3,2	4,3	5,0	5,6	6,0	6,4	6,8	0,0	0,0	9,3
V 1 .18	0,0	3,9	4,6	5,4	6,2	7,0	7,3	7,4	7,7	7,7	10,3
V 1 .19	0,0	3,8	5,0	5,6	5,6	6,0	6,2	6,5	6,4	6,4	9,3
V 1 .20	0,3	3,3	4,3	4,8	4,9	5,2	5,4	5,5	6,0	6,5	8,2
V 1 .21	0,0	3,9	4,5	4,6	4,8	5,3	5,5	5,7	5,9	6,0	8,0
V 1 .22	0,0	3,0	3,5	3,7	3,9	4,2	4,5	4,8	5,3	5,7	6,5
V 1 .23	0,0	3,4	3,7	4,3	4,6	5,0	5,1	5,2	5,5	5,6	7,6
V 1 .24	0,0	3,0	4,3	4,5	4,7	5,1	5,3	5,5	6,0	6,1	7,8
V 1 .25	0,0	3,3	4,6	4,9	5,3	5,6	5,9	6,0	6,1	6,2	8,8
Mittelwert [kN]	0,0	3,4	4,3	4,7	5,0	5,5	5,7	5,9	5,5	5,7	
Mittelwert [N/mm]	0,1	5,7	7,1	7,9	8,4	9,1	9,5	9,9	9,2	9,4	8,4
Standard- abweichung [kN]	0,1	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	2,0	2,1	
Variations- koeffizient [%]	0,00	0,10	0,11	0,11	0,13	0,14	0,14	0,13	0,37	0,37	

Tabelle 53: dynamischer QVW – Schwellen B 07 So mit DGS nach Umbau (V2) – gemessene Werte

dynamischer QVW - Schwellen B07So mit DGS - Nullmessung (V2)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V 2.16	0,0	3,2	4,0	4,4	5,0	5,5	5,6	5,7	6,1	6,1	8,35
V 2.17	0,0	3,7	4,8	5,4	5,8	6,4	7,0	7,4	0,0	0,0	9,69
V 2.18	0,0	3,0	3,5	3,8	4,0	4,4	5,1	5,5	6,2	6,4	6,66
V 2.19	0,0	3,3	3,9	4,3	4,5	4,9	5,1	5,3	5,8	6,2	7,43
V 2.20	0,0	2,8	4,0	4,8	5,3	5,7	6,1	6,3	6,6	6,7	8,77
V 2.21	0,1	3,0	4,1	4,8	5,1	5,4	6,2	6,9	7,9	8,0	8,56
V 2.22	0,0	2,8	4,1	4,8	5,3	6,3	6,8	7,1	7,2	7,2	8,85
V 2.23	0,0	3,6	5,3	6,2	6,8	7,9	8,6	9,2	9,8	9,8	11,3
V 2.24	0,0	3,6	4,4	4,7	5,6	6,9	7,4	8,1	8,6	8,8	9,38
V 2.25	0,0	5,1	5,7	5,9	6,1	6,4	6,7	6,8	7,1	7,1	10,1
Mittelwert [kN]	0,0	3,4	4,4	4,9	5,3	6,0	6,4	6,8	6,5	6,6	
Mittelwert [N/mm]	0,0	5,7	7,3	8,2	8,9	9,9	10,7	11,4	10,9	11,0	8,9
Standard- abweichung [kN]	0,0	0,7	0,7	0,7	0,8	1,0	1,1	1,2	2,6	2,6	
Variations- koeffizient [%]	0,00	0,20	0,16	0,15	0,15	0,17	0,17	0,18	0,40	0,39	

Tabelle 54: dynamischer QVW – Schwellen B 70 mit DGS nach Umbau (V3) – gemessene Werte

dynamischer QVW - Schwellen B70 mit DGS - Nullmessung (V3)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V 3.16	0,2	2,2	3,2	3,9	3,9	4,0	4,1	4,2	4,1	4,2	6,5
V 3.17	0,0	2,6	4,1	4,5	4,8	5,3	5,4	5,4	5,8	6,0	8,0
V 3.18	0,0	2,4	3,1	3,3	3,3	3,5	3,9	4,1	4,2	4,1	5,5
V 3.19	0,0	2,7	3,5	3,8	4,1	4,2	4,5	4,6	4,9	5,0	6,8
V 3.20	0,0	2,1	2,6	2,7	2,8	2,8	2,9	2,9	3,2	3,2	4,7
V 3.21	0,0	2,5	3,3	3,8	4,1	4,9	5,4	5,4	5,7	5,6	6,9
V 3.22	0,0	2,5	3,3	3,7	4,0	4,5	5,1	5,3	5,5	5,6	6,6
V 3.23	0,1	2,5	3,4	3,8	3,9	4,3	4,9	5,1	5,3	5,6	6,6
V 3.24	0,1	2,6	3,8	4,4	4,7	4,9	5,2	5,4	5,8	5,6	7,9
V 3.25	0,1	2,4	3,6	4,4	4,6	4,6	4,7	4,7	5,1	5,6	7,7
Mittelwert [kN]	0,0	2,4	3,4	3,8	4,0	4,3	4,6	4,7	4,9	5,1	
Mittelwert [N/mm]	0,1	4,1	5,6	6,4	6,7	7,2	7,7	7,9	8,2	8,4	6,7
Standard- abweichung [kN]	0,1	0,2	0,4	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	
Variations- koeffizient [%]	0,00	0,08	0,12	0,15	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	

Tabelle 55: dynamischer QVW – Schwellen B 70 ohne DGS nach Umbau (V4) – gemessene Werte

dynamischer QVW - Schwellen B70 ohne DGS - Nullmessung (V4)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V 4.16	0,0	2,8	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	3,9	3,8	4,0	6,2
V 4.17	0,0	2,7	3,3	3,4	3,6	3,8	3,9	4,2	4,2	4,2	5,9
V 4.18	0,0	1,6	2,2	2,6	3,0	3,3	3,5	3,6	3,9	4,0	4,9
V 4.19	0,6	1,8	2,4	2,5	2,7	2,9	2,9	3,0	3,2	3,2	4,4
V 4.20	0,0	2,0	2,3	2,5	2,7	2,8	3,0	3,1	3,6	3,7	4,5
V 4.21	0,0	1,9	3,2	4,1	4,5	4,6	4,8	4,8	5,1	5,1	7,5
V 4.22	0,0	1,9	2,5	2,8	3,1	3,8	4,1	4,1	4,3	4,2	5,2
V 4.23	0,0	2,4	3,3	3,5	3,7	3,8	3,9	3,9	4,1	4,1	6,2
V 4.24	0,0	1,9	2,6	2,9	3,2	3,4	4,1	4,4	4,9	4,1	5,3
V 4.25	0,0	2,1	3,4	3,9	4,2	4,6	4,9	4,9	5,3	4,1	7,0
Mittelwert [kN]	0,1	2,1	2,9	3,2	3,4	3,7	3,9	4,0	4,2	4,1	
Mittelwert [N/mm]	0,1	3,5	4,8	5,3	5,7	6,1	6,5	6,7	7,1	6,8	5,7
Standard- abweichung [kN]	0,2	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,5	
Variations- koeffizient [%]	0,00	0,19	0,18	0,18	0,18	0,17	0,16	0,16	0,16	0,11	

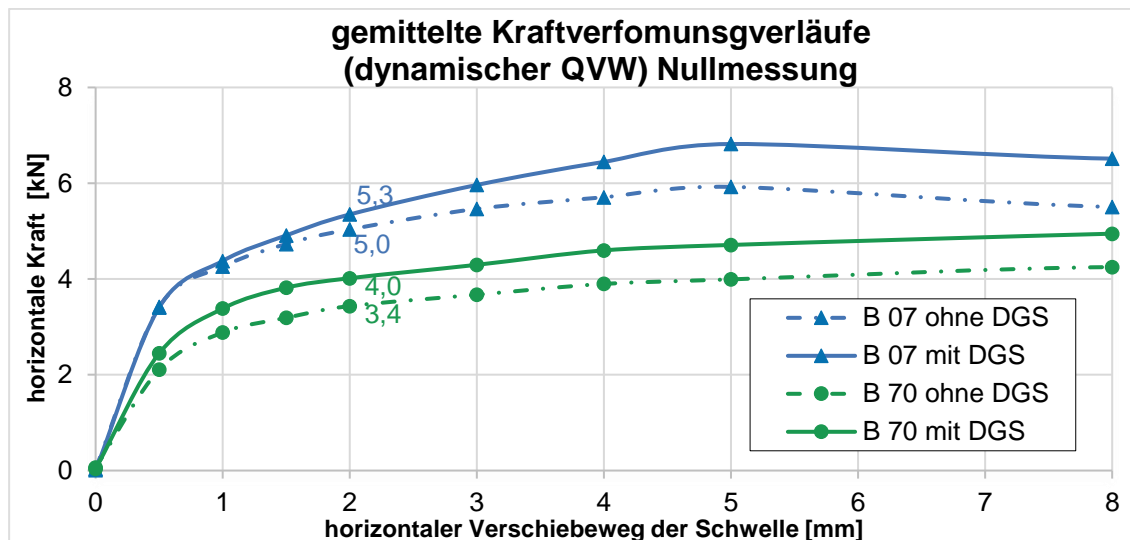


Abbildung 87: Gemittelte Kraftverformungsverläufe der dynamischen QVW-Messung Nullmessung

Tabelle 56: statischer QVW – Schwellen B 07 So ohne DGS nach 100.000 Lt (V1) – gemessene Werte

statischer QVW [kN] - Schwellen B07So ohne DGS nach 100.000 Lt (V1)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V 1 .1	0,0	8,5	9,6	9,9	10,2	10,8	11,3	11,4	11,7	11,7	17,0
V 1 .2	0,3	6,8	8,1	8,8	9,2	9,7	10,1	10,3	10,5	10,4	15,3
V 1 .3	0,0	6,5	7,9	8,3	8,8	9,1	9,3	9,3	9,5	9,5	14,6
V 1 .4	0,2	7,0	8,3	9,0	9,5	10,1	10,5	10,6	10,8	10,8	15,8
V 1 .5	0,0	6,3	7,7	8,4	8,9	9,5	9,9	10,2	10,2	10,2	14,8
V 1 .6	0,5	7,1	8,4	9,1	9,5	10,3	10,5	10,7	11,2	11,2	15,9
V 1 .7	0,2	7,0	8,4	8,9	9,3	9,9	10,1	10,4	10,5	10,6	15,4
V 1 .8	0,0	7,3	8,4	9,3	9,7	10,1	10,5	10,6	11,0	11,0	16,2
V 1 .9	0,2	7,1	8,4	8,9	9,3	9,6	9,9	10,1	10,1	10,0	15,5
V 1 .10	0,0	7,2	8,7	9,6	9,9	10,4	10,6	10,8	11,0	11,0	16,5
V 1 .11	0,4	6,9	8,6	9,2	9,7	10,3	10,9	11,1	11,2	11,3	16,2
V 1 .12	0,0	7,0	8,5	9,5	10,1	10,6	10,9	11,1	11,5	11,5	16,7
V 1 .13	0,0	8,2	9,5	10,2	10,6	10,7	11,0	11,2	-	-	17,6
V 1 .14	0,0	6,8	8,4	9,2	9,5	9,9	10,3	10,6	10,6	10,6	15,8
V 1 .15	0,0	6,4	7,8	8,6	9,2	9,7	10,0	10,2	10,7	10,7	15,3
Mittelwert [kN]	0,1	7,1	8,4	9,1	9,5	10,0	10,4	10,6	10,7	10,7	
Mittelwert [N/mm]	0,2	11,8	14,0	15,2	15,9	16,7	17,3	17,6	17,9	17,9	15,9
Standard- abweichung [kN]	0,2	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	
Variations- koeffizient [%]	1,38	0,08	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	

Tabelle 57: statischer QVW – Schwellen B 07 So mit DGS nach 100.000 Lt (V2) – gemessene Werte

statischer QVW [kN] - Schwellen B07So mit DGS nach 100.000 Lt (V2)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V 2.1	0,0	8,3	10,4	11,5	12,1	13,0	13,5	13,3	14,8	15,4	20,1
V 2.2	0,0	7,2	8,6	9,3	10,0	10,7	11,3	11,6	12,1	12,4	16,6
V 2.3	0,0	7,6	9,1	10,0	10,4	11,0	11,5	11,9	12,0	11,8	17,3
V 2.4	0,2	6,5	7,7	8,6	9,2	9,9	10,4	10,6	10,7	10,7	15,3
V 2.5	0,0	7,1	8,9	9,7	10,3	10,9	11,6	12,0	12,4	12,2	17,1
V 2.6	0,0	6,8	8,6	9,3	9,8	10,6	11,1	11,3	12,5	12,4	16,3
V 2.7	0,0	6,8	8,5	9,3	9,8	10,4	10,8	10,9	11,3	11,3	16,4
V 2.8	0,0	7,6	9,2	10,0	10,4	10,6	11,1	11,3	11,1	11,1	17,3
V 2.9	0,3	7,0	8,7	9,4	9,9	10,3	10,7	10,9	11,1	11,1	16,5
V 2.10	0,0	7,6	9,5	10,4	10,8	11,5	12,2	12,0	12,0	12,0	18,0
V 2.11	0,0	7,2	8,8	9,7	10,3	10,8	11,0	11,3	11,2	11,1	17,1
V 2.12	0,0	7,3	9,1	10,0	10,6	11,3	11,8	12,0	11,9	11,9	17,7
V 2.13	0,7	7,0	8,5	9,3	9,9	10,3	10,8	11,0	11,1	11,1	16,4
V 2.14	0,6	7,3	8,7	9,5	9,8	10,6	11,0	11,4	11,8	11,7	16,3
V 2.15	0,0	7,1	8,6	9,5	10,0	10,7	11,2	11,4	11,5	11,5	16,7
Mittelwert [kN]	0,1	7,2	8,9	9,7	10,2	10,8	11,3	11,5	11,8	11,8	
Mittelwert [N/mm]	0,2	12,1	14,8	16,2	17,0	18,1	18,9	19,2	19,7	19,7	17,01
Standard- abweichung [kN]	0,2	0,4	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6	1,0	1,1	
Variations- koeffizient [%]	1,9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	

Tabelle 58: statischer QVW – Schwellen B 70 mit DGS nach 100.000 Lt (V3) – gemessene Werte

statischer QVW [kN] - Schwellen B70 mit DGS nach 100.000 Lt (V3)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V 3.1	0,1	7,1	8,0	8,4	8,8	9,4	9,6	9,5	10,2	10,3	14,7
V 3.2	0,0	8,6	9,6	10,0	10,0	9,7	10,0	10,6	10,4	11,0	16,6
V 3.3	0,0	7,9	9,3	9,9	10,1	10,2	10,4	10,6	11,2	11,1	16,8
V 3.4	0,0	7,1	8,0	8,4	8,6	9,3	9,4	9,4	9,7	9,0	14,4
V 3.5	0,0	8,0	9,0	9,8	10,1	10,2	10,3	10,3	10,7	10,8	16,9
V 3.6	0,4	7,2	8,5	9,0	9,2	9,4	9,7	9,8	9,8	9,9	15,4
V 3.7	0,0	8,5	9,4	9,6	9,7	9,7	9,7	9,8	9,9	10,4	16,1
V 3.8	0,0	7,9	9,6	10,3	10,7	11,0	11,3	11,4	11,4	11,7	17,8
V 3.9	0,0	7,7	8,7	9,0	9,2	9,3	9,1	9,2	9,8	9,4	15,3
V 3.10	0,0	7,4	8,3	8,9	9,1	9,6	9,5	9,8	10,0	10,3	15,2
V 3.11	0,0	8,6	9,8	10,3	10,7	10,8	11,4	11,6	11,5	11,8	17,8
V 3.12	0,0	8,0	8,6	8,9	9,1	9,4	9,6	9,9	10,7	11,4	15,1
V 3.13	0,1	8,4	9,2	9,5	9,5	9,8	9,4	9,2	9,8	10,5	15,9
V 3.14	0,0	7,0	8,1	8,5	8,6	9,1	9,3	9,5	10,2	10,2	14,4
V 3.15	0,0	7,6	8,5	9,1	9,1	9,3	9,5	9,8	9,7	10,3	15,1
Mittelwert [kN]	0,0	7,8	8,8	9,3	9,5	9,7	9,9	10,0	10,3	10,5	
Mittelwert [N/mm]	0,1	13,0	14,7	15,5	15,8	16,2	16,5	16,7	17,2	17,6	15,8
Standard- abweichung [kN]	0,1	0,6	0,6	0,6	0,7	0,6	0,7	0,7	0,6	0,8	
Variations- koeffizient [%]	0,00	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07	0,06	0,07	

Tabelle 59: statischer QVW – Schwellen B 70 ohne DGS nach 100.000 Lt (V4) – gemessene Werte

statischer QVW [kN] - Schwellen B70 ohne DGS nach 100.000 Lt (V4)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V 4.1	0,0	7,5	8,2	8,6	8,7	8,8	8,7	8,6	8,7	8,6	14,5
V 4.2	0,0	7,7	8,0	8,3	8,1	8,4	8,4	8,3	8,0	7,9	13,5
V 4.3	0,2	8,1	8,8	8,7	8,6	8,2	8,0	8,1	8,0	8,0	14,3
V 4.4	0,0	6,6	7,7	8,2	8,2	8,4	8,5	8,4	8,2	8,6	13,7
V 4.5	0,0	6,9	8,0	8,6	8,8	9,3	9,4	9,6	10,9	11,4	14,6
V 4.6	0,0	6,9	7,6	8,0	8,2	8,4	8,6	8,8	8,7	9,0	13,6
V 4.7	0,0	7,9	8,9	9,2	9,4	9,5	9,2	9,1	9,2	9,7	15,7
V 4.8	0,0	7,4	8,3	8,8	8,8	9,5	9,5	9,5	9,7	10,3	14,7
V 4.9	0,2	8,0	8,5	8,6	8,6	8,3	8,2	8,2	8,5	8,9	14,4
V 4.10	0,0	7,2	8,1	8,5	8,8	9,0	9,3	9,3	9,4	9,5	14,7
V 4.11	0,0	8,2	9,3	9,6	9,7	8,2	8,3	8,4	7,8	7,7	16,1
V 4.12	0,1	8,0	8,6	8,8	9,0	8,8	8,9	8,8	8,6	7,8	15,0
V 4.13	0,0	7,6	8,3	8,5	8,7	9,0	8,9	9,0	8,7	8,7	14,5
V 4.14	0,0	6,7	7,8	8,2	8,5	8,6	8,7	9,0	9,0	10,3	14,1
V 4.15	0,0	7,3	7,6	7,6	7,7	7,9	7,7	7,8	8,2	8,3	12,8
Mittelwert [kN]	0,0	7,5	8,2	8,5	8,6	8,7	8,7	8,7	8,8	9,0	
Mittelwert [N/mm]	0,0	12,4	13,7	14,2	14,4	14,5	14,5	14,5	14,6	15,0	14,4
Standard- abweichung [kN]	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	1,1	
Variations- koeffizient [%]	0,00	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,09	0,12	

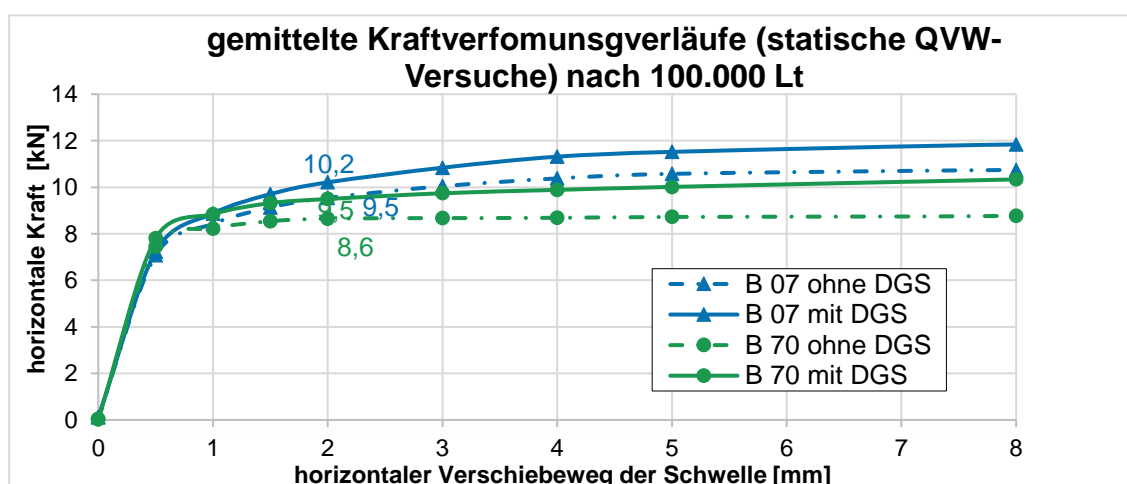


Abbildung 88: Gemittelte Kraftverformungsverläufe der statischen QVW-Messung nach 100.000 Lt

Tabelle 60: statischer QVW - Schwellen B 07 So auf der Brücke mit DGS nach 100.000 Lt (V2) – gemessene Werte

statischer QVW [kN] - Schwellen B07So auf der Brücke mit DGS nach 100.000 Lt (V2)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V B.1	0,0	7,2	9,7	11,5	12,3	12,6	12,8	13,2	13,9	13,7	20,5
V B.2	0,0	6,9	9,3	10,9	11,8	13,5	13,7	14,0	14,5	-	19,7
Mittelwert [kN]	0,0	7,1	9,5	11,2	12,1	13,0	13,2	13,6	14,2	13,7	
Mittelwert [N/mm]	0,0	11,8	15,9	18,7	20,1	21,7	22,1	22,7	23,7	22,9	20,1
Standard-abweichung [kN]	0,0	0,3	0,3	0,5	0,3	0,6	0,7	0,6	0,5		0,6
Variations-koeffizient [%]	0,0	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,05	0,04	0,03		0,03

Tabelle 61: statischer QVW - Schwellen B 90 mit DGS nach 100.000 Lt (V2) - gemessene Werte

statischer QVW [kN] - Schwellen B90 im Übergangsbereich mit DGS nach 100.000 Lt (V2)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	1	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V B90.1	Keine Werte wegen messtechnischem Problem										
V B90.2	0,1	7,3	8,1	8,4	8,5	8,7	9,0	9,1	8,0	9,0	14,2
V B90.3	0,0	7,6	8,7	8,9	9,0	9,3	9,6	9,6	9,9	10,0	15,0
Mittelwert [kN]	0,0	7,5	8,4	8,7	8,8	9,0	9,3	9,4	9,0	9,5	
Mittelwert [N/mm]	0,1	12,4	14,0	14,4	14,6	15,0	15,5	15,6	15,0	15,8	14,6
Standard-abweichung [kN]	0,1	0,2	0,4	0,4	0,3	0,4	0,5	0,4	1,3	0,8	
Variations-koeffizient [%]	1,41	0,03	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,15	0,08	

Tabelle 62: dynamischer QVW – Schwellen B 07 So ohne DGS nach 100.000 Lt (V1) – gemessene Werte

dynamischer QVW - Schwellen B07 So ohne DGS nach 100.000 Lt (V1)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V 1 .16	0,0	4,4	5,8	6,5	6,8	7,1	7,5	7,7	8,3	8,6	11,4
V 1 .17	0,0	4,0	5,2	5,7	5,8	6,1	6,3	6,5	7,2	7,2	9,7
V 1 .18	0,0	3,5	4,3	5,0	5,5	5,9	6,2	6,4	6,7	6,8	9,1
V 1 .19	0,0	3,3	3,9	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,5	6,7	8,2
V 1 .20	0,0	2,8	4,3	5,0	5,4	6,4	6,7	6,9	7,4	7,7	9,0
V 1 .21	0,0	3,3	4,6	5,6	6,1	6,5	6,8	7,1	7,5	7,8	10,2
V 1 .22	0,0	4,3	5,2	5,7	6,0	6,2	6,4	6,7	7,1	7,3	9,9
V 1 .23	0,0	3,0	4,0	4,6	5,1	5,5	5,8	6,1	6,5	6,5	8,4
V 1 .24	0,3	3,1	4,1	4,9	5,2	5,8	6,1	6,1	6,3	6,4	8,7
V 1 .25	0,0	4,1	4,9	5,5	5,8	6,4	6,7	6,8	7,1	7,0	9,7
Mittelwert [kN]	0,0	3,6	4,6	5,3	5,7	6,1	6,4	6,6	7,1	7,2	
Mittelwert [N/mm]	0,0	6,0	7,7	8,8	9,4	10,2	10,7	11,0	11,8	12,0	9,4
Standard- abweichung [kN]	0,1	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	
Variations- koeffizient [%]	0,00	0,16	0,14	0,11	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	

Tabelle 63: dynamischer QVW – Schwellen B 07 So mit DGS nach 100.000 Lt (V2) – gemessene Werte

dynamischer QVW - Schwellen B07 So mit DGS nach 100.000 Lt (V2)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V 2.16	0,0	3,3	4,0	4,3	4,6	5,2	5,3	5,5	6,2	6,6	7,7
V 2.17	0,0	3,3	4,6	5,2	5,3	5,7	6,2	6,6	7,0	7,1	8,9
V 2.18	0,0	3,7	5,0	5,6	5,8	6,5	6,8	7,3	8,2	8,3	9,6
V 2.19	0,0	3,5	5,1	5,6	6,1	6,7	6,9	7,3	7,8	8,4	10,2
V 2.20	0,0	4,2	5,3	5,7	6,0	6,6	7,1	7,3	7,7	7,7	10,0
V 2.21	0,0	4,2	5,0	5,5	5,8	6,1	6,3	6,5	6,9	6,4	9,6
V 2.22	0,0	3,4	4,5	4,9	5,3	5,5	5,6	5,7	6,1	6,2	8,8
V 2.23	0,0	3,6	4,7	5,1	5,3	5,7	5,9	6,2	6,5	6,4	8,8
V 2.24	0,0	3,9	4,5	5,1	5,5	6,2	6,7	7,3	7,9	8,0	9,1
V 2.25	0,0	2,9	4,2	4,7	5,0	5,5	6,0	6,3	6,8	7,1	8,4
Mittelwert [kN]	0,0	3,6	4,7	5,2	5,5	6,0	6,3	6,6	7,1	7,2	
Mittelwert [N/mm]	0,0	6,0	7,8	8,6	9,1	10,0	10,5	11,0	11,8	12,1	9,1
Standard- abweichung [kN]	0,0	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	
Variations- koeffizient [%]	0,00	0,11	0,09	0,09	0,08	0,09	0,09	0,10	0,11	0,12	

Tabelle 64: dynamischer QVW – Schwellen B 70 mit DGS nach 100.000 Lt (V3) – gemessene Werte

dynamischer QVW - Schwellen B70 mit DGS nach 100.000 Lt (V3)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V 3.16	0,0	4,2	4,6	4,8	4,8	5,0	5,4	5,7	5,6	5,5	8,0
V 3.17	0,0	4,0	4,8	5,5	5,8	6,0	6,5	6,5	6,6	6,4	9,7
V 3.18	0,2	4,3	5,1	5,3	5,4	5,7	5,7	5,6	6,0	6,4	8,9
V 3.19	0,0	4,2	5,3	5,6	5,9	6,1	6,3	6,2	5,7	5,7	9,8
V 3.20	0,7	4,0	4,6	5,0	5,0	5,1	5,2	5,2	5,3	5,2	8,3
V 3.21	0,1	4,3	5,1	5,5	5,7	6,0	6,1	6,4	6,2	6,2	9,5
V 3.22	0,0	3,8	4,2	4,5	4,5	4,9	5,0	5,2	5,6	5,7	7,6
V 3.23	0,0	5,3	7,0	7,3	7,5	7,4	7,7	7,6	7,5	7,7	12,5
V 3.24	0,0	4,4	5,2	5,8	6,0	6,1	6,0	5,9	6,1	6,4	10,0
V 3.25	0,0	4,0	4,6	4,9	4,9	4,9	4,9	5,1	5,2	5,4	8,1
Mittelwert [kN]	0,1	4,2	5,1	5,4	5,5	5,7	5,9	5,9	6,0	6,1	
Mittelwert [N/mm]	0,2	7,1	8,4	9,0	9,2	9,5	9,8	9,9	10,0	10,1	9,2
Standard- abweichung [kN]	0,2	0,4	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	
Variations- koeffizient [%]	0,00	0,10	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14	0,13	0,11	0,12	

Tabelle 65: dynamischer QVW – Schwellen B 70 ohne DGS nach 100.000 Lt (V4) – gemessene Werte

dynamischer QVW - Schwellen B70 ohne DGS nach 100.000 Lt (V4)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V 4.16	0,4	4,1	4,8	4,8	5,0	5,2	5,3	5,2	5,2	5,5	8,3
V 4.17	0,0	5,2	5,6	5,7	5,7	6,0	6,1	6,1	6,1	6,3	9,6
V 4.18	0,0	4,3	4,5	4,6	4,8	4,9	4,9	5,0	5,1	5,1	8,0
V 4.19	0,1	2,6	3,3	3,6	3,7	3,9	4,0	4,0	4,2	4,1	6,2
V 4.20	0,6	3,0	3,3	3,6	3,7	3,9	4,0	4,1	4,5	4,8	6,1
V 4.21	0,0	2,4	3,2	4,1	4,2	4,4	4,3	4,4	4,4	4,3	7,0
V 4.22	0,0	2,2	3,0	3,1	3,7	3,6	3,7	3,4	3,6	3,8	6,2
V 4.23	0,0	2,5	2,8	2,9	3,2	3,4	3,4	3,9	4,0	3,8	5,3
V 4.24	0,3	3,0	3,6	3,5	3,7	3,5	3,4	3,8	3,4	3,5	6,1
V 4.25	0,0	3,4	4,0	4,1	4,2	4,4	4,1	4,1	4,4	4,4	7,1
Mittelwert [kN]	0,1	3,3	3,8	4,0	4,2	4,3	4,3	4,4	4,5	4,6	
Mittelwert [N/mm]	0,2	5,5	6,4	6,7	7,0	7,2	7,2	7,3	7,5	7,6	7,0
Standard- abweichung [kN]	0,2	1,0	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9	0,8	0,8	0,9	
Variations- koeffizient [%]	0,00	0,30	0,24	0,21	0,19	0,20	0,20	0,19	0,18	0,19	

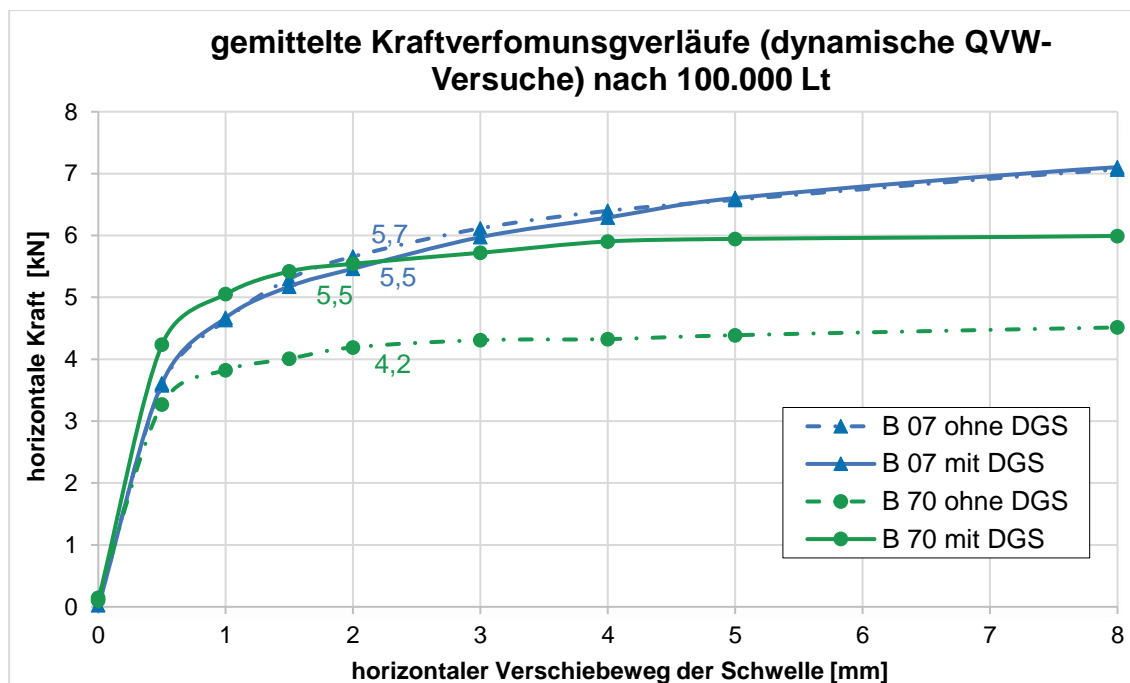


Abbildung 89: Gemittelte Kraftverformungsverläufe der dynamischen QVW-Messung nach 100.000 Lt

Tabelle 66: statischer QVW – Schwellen B 07 So ohne DGS nach 1,5 Mio. Lt (V1) – gemessene Werte

statischer QVW [kN] - Schwellen B07So ohne DGS – nach 1,5 Mio. Lt (Versuchsabschnitt 1)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V 1 .1	0,0	7,2	8,7	9,5	9,7	10,4	10,6	10,7	10,9	10,9	16,2
V 1 .2	0,0	6,9	8,5	9,3	9,9	10,6	10,8	10,9	Störung		16,4
V 1 .3	0,0	7,5	9,0	9,8	10,1	10,6	10,8	10,9	11,0	11,0	16,8
V 1 .4	0,0	7,4	8,9	9,6	10,0	10,2	10,5	10,8	10,9	10,9	16,7
V 1 .5	0,0	6,9	8,2	8,9	9,3	9,8	10,3	10,5	10,7	10,7	15,5
V 1 .6	0,0	7,2	8,9	9,6	10,1	10,8	11,5	11,8	11,7	11,8	16,8
V 1 .7	0,0	7,4	9,1	9,9	10,4	11,2	11,5	11,7	12,4	12,4	17,3
V 1 .8	0,4	7,2	8,5	9,3	9,7	10,3	10,5	10,6	10,7	11,0	16,2
V 1 .9	0,0	7,5	9,2	9,8	10,2	10,8	11,1	11,0	11,3	11,3	17,1
V 1 .10	0,0	7,4	9,1	9,7	10,2	10,9	11,3	11,4	11,5	11,5	17,0
V 1 .11	0,0	7,4	9,1	9,8	10,3	10,9	11,1	11,3	11,7	11,8	17,2
V 1 .12	0,0	7,1	8,8	9,8	10,2	11,0	11,2	11,2	11,4	11,5	17,0
V 1 .13	0,0	7,4	9,4	10,3	10,9	11,6	11,8	12,1	12,0	12,1	18,1
V 1 .14	0,0	7,0	8,8	10,0	10,5	11,3	11,6	11,1	11,5	11,5	17,5
V 1 .15	0,0	7,2	9,0	10,0	10,7	11,2	11,5	11,5	11,6	11,6	17,8
Mittelwert [kN]	0,0	7,2	8,9	9,7	10,1	10,8	11,1	11,2	11,4	11,4	
Mittelwert [N/mm]	0,0	12,1	14,8	16,2	16,9	17,9	18,4	18,6	18,9	19,0	16,9
Standard- abweichung [kN]	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
Variations- koeffizient [%]	3,89	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	

Tabelle 67: statischer QVW - Schwellen B 07 So mit DGS nach 1,5 Mio. Lt (V2) - gemessene Werte

statischer QVW [kN] - Schwellen B07So mit DGS – nach 1,5 Mio. Lt (V2)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V 2.1	0,0	7,3	9,3	10,4	10,8	11,7	12,1	12,2	12,5	12,4	18,1
V 2.2	0,0	7,0	8,7	9,7	10,3	11,1	11,8	11,9	12,3	12,3	17,1
V 2.3	0,0	7,0	8,9	9,7	10,2	11,0	11,3	11,4	12,0	11,9	17,1
V 2.4	0,0	6,9	8,7	9,7	10,2	10,7	11,1	11,6	12,1	12,1	17,0
V 2.5	0,0	7,8	9,4	10,7	11,2	11,5	11,7	11,8	12,0	12,0	18,6
V 2.6	0,0	7,6	8,4	9,2	9,6	10,3	10,8	11,1	11,5	11,6	16,0
V 2.7	0,0	7,3	9,1	10,5	11,1	11,9	12,3	12,5	12,5	12,5	18,6
V 2.8	0,0	6,7	8,4	9,3	10,0	10,7	11,7	11,7	11,9	11,6	16,6
V 2.9	0,0	7,4	8,9	9,8	10,2	10,9	11,1	11,3	11,5	11,5	17,1
V 2.10	0,0	6,7	8,9	9,9	10,7	11,9	12,4	12,6	12,4	12,4	17,8
V 2.11	0,0	6,7	8,8	9,8	10,6	11,4	12,0	12,5	13,2	13,2	17,6
V 2.12	0,0	6,7	8,3	9,3	10,0	10,9	11,4	11,7	12,1	12,2	16,6
V 2.13	0,2	7,0	8,8	9,7	10,4	11,2	11,5	11,8	11,6	11,8	17,3
V 2.14	0,2	6,6	8,2	9,1	9,8	10,6	11,2	11,6	12,0	12,2	16,3
V 2.15	0,0	6,8	8,6	9,6	10,4	11,2	11,8	12,2	13,1	12,7	17,4
Mittelwert [kN]	0,0	7,0	8,8	9,8	10,4	11,1	11,6	11,9	12,2	12,2	
Mittelwert [N/mm]	0,0	11,7	14,6	16,3	17,3	18,5	19,3	19,8	20,3	20,3	17,3
Standard- abweichung [kN]	0,1	0,4	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
Variations- koeffizient [%]	2,7	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Tabelle 68: statischer QVW - Schwelle B 70 mit DGS nach 1,5 Mio. Lt (V 3) - gemessene Werte

statischer QVW [kN] - Schwellen B70 mit DGS – 1,5 Mio. Lt (V3)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V 3.1	0,0	7,4	8,8	9,4	9,8	10,4	10,8	11,2	11,3	12,6	16,3
V 3.2	0,0	6,6	8,0	8,5	8,8	9,6	9,7	10,4	11,3	11,3	14,7
V 3.3	0,0	8,3	10,1	10,6	10,8	10,8	10,9	10,8	11,1	11,5	18,0
V 3.4	0,0	8,1	9,6	10,5	11,4	12,4	12,8	13,0	13,3	14,7	19,1
V 3.5	0,0	6,8	8,3	9,1	9,5	10,5	10,6	10,8	10,7	10,9	15,8
V 3.6	0,0	6,6	8,3	8,8	9,2	9,6	9,9	10,1	9,5	9,0	15,4
V 3.7	0,0	6,9	8,9	9,6	10,1	10,4	10,4	10,3	11,9	15,2	16,9
V 3.8	0,0	7,6	9,2	10,3	10,7	10,8	10,8	11,1	11,0	10,7	17,8
V 3.9	0,0	7,9	9,1	9,5	9,7	9,8	9,7	9,8	9,7	9,7	16,2
V 3.10	0,0	8,6	10,3	10,8	10,9	10,8	10,9	10,8	10,0	9,8	18,2
V 3.11	0,0	7,9	9,2	9,7	9,9	10,0	9,9	10,1	10,0	10,6	16,5
V 3.12	0,0	6,9	8,4	8,9	9,3	9,5	9,1	9,6	9,7	9,1	15,5
V 3.13	0,0	6,7	8,2	8,8	9,3	9,8	9,7	9,8	9,7	9,9	15,4
V 3.14	0,0	5,8	7,2	7,8	8,1	8,3	8,6	8,5	9,3	9,3	13,5
V 3.15	0,0	7,4	9,3	9,9	10,1	9,7	9,9	9,8	9,9	9,5	16,8
Mittelwert [kN]	0,0	7,3	8,9	9,5	9,8	10,2	10,2	10,4	10,6	10,9	
Mittelwert [N/mm]	0,0	12,2	14,8	15,8	16,4	16,9	17,1	17,3	17,6	18,2	16,4
Standard- abweichung [kN]	0,0	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1	1,9	
Variations- koeffizient [%]	0,00	0,11	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,10	0,18	

Tabelle 69: statischer QVW - Schwelle B 70 ohne DGS nach 1,5 Mio. Lt (V 4) - gemessene Werte

statischer QVW [kN] - Schwellen B70 ohne DGS – 1,5 Mio. Lt (V4)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V 4.1	0,2	6,4	7,9	8,7	9,1	9,4	9,4	8,8	10,0	11,0	15,2
V 4.2	0,0	7,8	9,4	9,8	9,9	9,6	9,7	9,9	9,4	9,2	16,6
V 4.3	0,0	7,9	9,6	10,1	10,0	9,9	10,0	9,9	9,2	9,4	16,6
V 4.4	0,0	6,7	8,2	8,5	8,7	8,6	8,9	9,0	8,7	8,8	14,5
V 4.5	0,0	8,0	9,6	10,2	10,6	10,6	10,3	10,3	10,1	10,2	17,7
V 4.6	0,0	7,9	9,3	9,5	9,6	9,5	9,4	9,3	9,2	9,0	16,0
V 4.7	0,0	6,4	8,0	8,5	8,7	8,9	9,0	9,0	9,0	9,4	14,5
V 4.8	0,0	6,4	7,7	8,3	8,8	9,0	9,4	9,5	9,4	9,9	14,6
V 4.9	0,0	7,9	9,3	9,8	9,8	9,9	10,1	10,1	9,8	10,7	16,4
V 4.10	0,0	6,2	8,1	8,6	9,0	10,0	10,7	10,4	10,5	11,3	15,0
V 4.11	0,0	9,6	11,5	9,3	9,7	9,4	9,2	9,1	9,0	8,8	16,1
V 4.12	0,1	7,7	8,9	9,3	9,5	10,2	10,3	10,3	10,3	11,0	15,9
V 4.13	0,0	7,7	8,7	9,0	9,2	9,5	9,5	9,5	9,2	9,3	15,4
V 4.14	0,0	8,1	9,3	9,8	10,1	10,4	10,4	10,0	10,2	10,0	16,9
V 4.15	0,0	7,4	8,8	9,3	9,2	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	15,3
Mittelwert [kN]	0,0	7,5	8,9	9,3	9,5	9,6	9,7	9,6	9,6	9,8	
Mittelwert [N/mm]	0,0	12,5	14,9	15,4	15,8	16,0	16,2	16,0	15,9	16,3	15,8
Standard- abweichung [kN]	0,1	0,9	1,0	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,8	
Variations- koeffizient [%]	0,00	0,12	0,11	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,09	

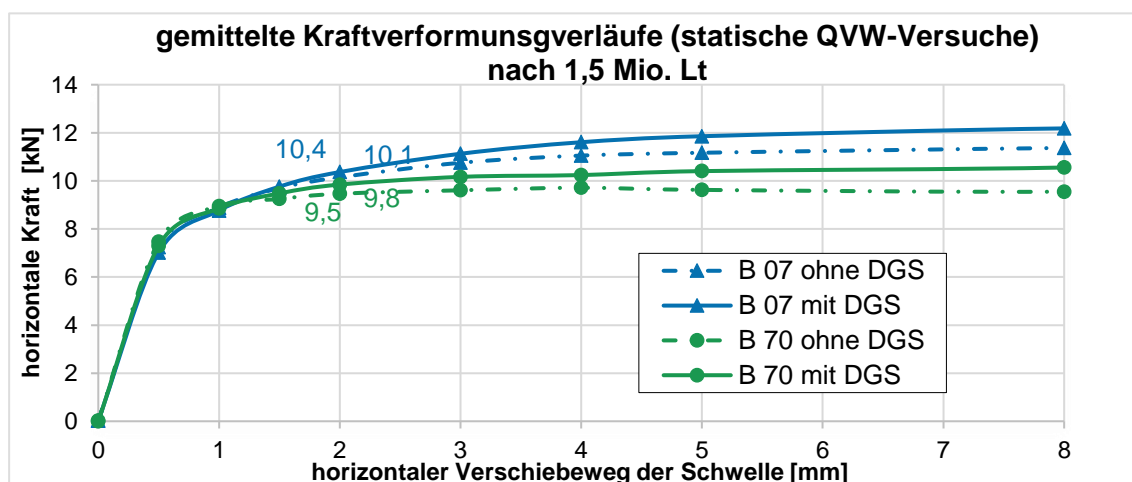


Abbildung 90: Gemittelte Kraftverformungsverläufe der statischen QVW-Messung nach 1,5 Mio. Lt

Tabelle 70: statischer QVW - Schwellen B 07 So mit DGS auf der Brücke nach 1,5 Mio. Lt (V2) – gemessene Werte

statischer QVW [kN] - Schwellen B07So auf der Brücke mit DGS – nach											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	1,5 Mio. Lt (V2)										
	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V B.1	0,3	7,0	9,5	11,3	12,3	13,3	14,1	14,4	14,9	14,9	20,4
V B.2	0,0	6,8	9,6	11,5	12,8	14,6	15,2	16,0	17,1	17,2	21,3
Mittelwert [kN]	0,2	6,9	9,5	11,4	12,5	14,0	14,6	15,2	16,0	16,0	
Mittelwert [N/mm]	0,3	11,5	15,9	19,0	20,8	23,3	24,4	25,4	26,7	26,7	20,9
Standard- abweichung [kN]	0,2	0,1	0,1	0,2	0,4	0,9	0,8	1,1	1,6		
Variations- koeffizient [%]	1,43	0,02	0,01	0,02	0,03	0,07	0,05	0,07	0,10		

Tabelle 71: statischer QVW - Schwellen B 90 mit DGS nach 1,5 Mio. Lt (V2) – gemessene Werte

statischer QVW [kN] - Schwellen B90 im Übergangsbereich mit DGS –											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	1,5 Mio. Lt (V2)										
	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V B90.1	0,0	8,0	9,4	9,9	10,3	10,9	11,1	11,2	11,8	11,7	17,1
V B90.2	0,2	8,9	11,0	12,2	13,0	13,2	13,9	14,1	11,7	11,7	21,6
V B90.3	0,0	8,0	9,2	9,9	10,3	10,7	10,8	11,2	11,1	11,2	17,2
V B90.4	0,0	6,8	8,8	9,5	10,0	10,5	10,9	11,5	12,3	12,3	16,6
Mittelwert [kN]	0,0	7,9	9,6	10,4	10,9	11,3	11,7	12,0	11,7	11,7	
Mittelwert [N/mm]	0,1	13,2	16,0	17,3	18,1	18,9	19,5	20,0	19,6	19,5	18,1
Standard- abweichung [kN]	0,1	0,9	1,0	1,2	1,4	1,3	1,5	1,4	0,5	0,5	
Variations- koeffizient [%]	2,10	0,11	0,10	0,12	0,13	0,11	0,13	0,12	0,04	0,04	

Tabelle 72: dynamischer QVW – Schwellen B 07 So ohne DGS nach 1,5 Mio. Lt (V1) – gemessene Werte

dynamischer QVW - Schwellen B07So ohne DGS – 1,5 Mio. Lt (Versuchsabschnitt 1)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V 1 .16	0,0	9,2	8,6	7,8	7,1	6,9	7,1	7,2	7,4	7,6	11,8
V 1 .17	0,0	4,1	5,2	5,7	6,0	6,6	7,2	7,4	7,7	7,7	10,0
V 1 .18	0,0	4,3	4,7	5,4	5,9	6,3	6,6	6,8	7,1	7,7	9,8
V 1 .19	0,0	2,8	3,4	4,3	4,7	5,5	5,9	6,4	7,0	7,7	7,8
V 1 .20	0,0	3,1	3,7	4,0	4,4	4,9	5,4	5,5	5,9	7,7	7,3
V 1 .21	0,0	4,0	5,7	6,4	6,9	7,2	7,4	7,5	7,4	7,7	11,5
V 1 .22	0,0	3,1	3,6	3,9	4,1	4,5	4,9	5,3	6,1	7,7	6,9
V 1 .23	0,0	3,0	3,6	4,0	4,1	4,3	4,7	4,9	5,3	7,7	6,8
V 1 .24	0,0	3,5	4,0	4,2	4,3	4,8	5,4	6,0	6,5	7,7	7,2
V 1 .25	0,0	3,1	3,9	4,0	4,3	4,8	5,0	5,2	5,7	7,7	7,3
Mittelwert [kN]	0,0	4,0	4,6	5,0	5,2	5,6	6,0	6,2	6,6	7,7	
Mittelwert [N/mm]	0,0	6,7	7,7	8,3	8,6	9,3	9,9	10,3	11,0	12,8	8,6
Standard- abweichung [kN]	0,0	1,9	1,6	1,3	1,2	1,1	1,0	1,0	0,8	0,0	
Variations- koeffizient [%]	0,00	0,47	0,34	0,27	0,23	0,19	0,17	0,16	0,13	0,00	

Tabelle 73: dynamischer QVW – Schwellen B 07 So mit DGS nach 1,5 Mio. Lt (V2) – gemessene Werte

dynamischer QVW - Schwellen B07So mit DGS – 1,5 Mio. Lt (V2)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V 2.16	0,0	3,5	4,0	4,8	5,0	5,8	6,3	6,5	7,0	7,2	8,4
V 2.17	0,0	3,7	5,0	5,6	6,3	7,2	7,8	8,5	8,6	8,6	10,5
V 2.18	0,0	3,4	5,0	5,8	6,6	7,4	8,0	8,2	8,6	8,7	11,0
V 2.19	0,0	3,7	5,2	6,0	6,6	7,5	8,1	8,7	9,5	9,6	11,0
V 2.20	0,0	3,1	4,6	5,7	6,5	7,4	7,7	7,8	8,3	8,3	10,9
V 2.21	0,0	2,9	3,7	4,1	4,5	5,2	5,4	5,7	6,0	6,0	7,4
V 2.22	0,0	2,8	3,9	4,4	4,9	5,5	5,9	6,2	6,4	6,5	8,1
V 2.23	0,0	3,4	4,0	4,4	4,7	5,4	5,8	6,3	7,1	7,3	7,9
V 2.24	0,0	2,9	3,6	4,4	4,8	5,4	5,8	6,0	6,3	6,5	8,1
V 2.25	0,0	3,3	3,8	4,1	4,1	4,6	4,9	5,3	6,1	6,3	7,0
Mittelwert [kN]	0,0	3,3	4,3	4,9	5,4	6,1	6,6	6,9	7,4	7,5	
Mittelwert [N/mm]	0,0	5,4	7,1	8,2	9,0	10,2	11,0	11,5	12,3	12,5	9,0
Standard- abweichung [kN]	0,0	0,3	0,6	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,3	1,2	
Variations- koeffizient [%]	0,00	0,10	0,14	0,16	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17	0,16	

Tabelle 74: dynamischer QVW – Schwellen B 70 mit DGS nach 1,5 Mio. Lt (V3) – gemessene Werte

dynamischer QVW - Schwellen B70 mit DGS – 1,5 Mio. Lt (V3)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V 3.16	0,0	3,5	4,6	5,0	5,3	4,9	Störung				8,8
V 3.17	0,0	2,5	3,1	3,4	3,5	3,7	3,8	3,9	4,0	4,2	5,9
V 3.18	0,0	5,0	5,4	5,4	5,6	5,6	5,5	5,8	5,5	5,3	9,3
V 3.19	0,0	2,9	3,4	3,5	3,5	3,6	3,7	3,6	3,7	3,8	5,8
V 3.20	0,0	3,2	4,2	4,7	4,9	5,1	5,2	5,2	5,2	5,1	8,2
V 3.21	0,0	2,9	4,2	4,3	4,3	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	7,1
V 3.22	0,0	2,8	3,0	3,2	3,4	3,7	3,9	4,0	4,2	4,3	5,6
V 3.23	0,0	3,2	4,2	4,7	4,9	5,1	5,3	5,3	5,3	5,4	8,2
V 3.24	0,0	3,8	4,6	4,9	5,1	5,3	5,6	5,7	5,7	5,7	8,5
V 3.25	0,0	3,8	5,0	5,3	5,6	5,5	5,6	5,7	6,0	6,1	9,3
Mittelwert [kN]	0,0	3,3	4,2	4,4	4,6	4,7	4,8	4,8	4,9	4,9	
Mittelwert [N/mm]	0,0	5,6	7,0	7,4	7,7	7,8	8,0	8,1	8,2	8,2	7,7
Standard- abweichung [kN]	0,0	0,7	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	
Variations- koeffizient [%]	0,00	0,21	0,19	0,18	0,19	0,17	0,17	0,18	0,17	0,16	

Tabelle 75: dynamischer QVW – Schwellen B 70 ohne DGS nach 1,5 Mio. Lt (V4) – gemessene Werte

dynamischer QVW - Schwellen B70 ohne DGS – 1,5 Mio. Lt (V4)											QVW [N/mm]
Verschiebeweg [mm]	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	10	
Schwelle Nr.											
V 4.16	0,9	2,4	2,9	3,1	3,2	3,4	3,7	3,6	3,6	3,7	5,4
V 4.17	0,0	2,8	3,5	3,8	4,0	4,0	4,2	4,2	4,1	4,0	6,7
V 4.18	0,0	3,3	4,1	4,2	4,3	4,2	4,3	4,3	4,2	4,1	7,1
V 4.19	0,0	2,6	3,2	3,8	4,0	4,3	4,4	4,6	5,2	5,4	6,7
V 4.20	0,2	4,0	4,7	5,1	5,2	5,3	5,4	5,4	5,4	5,4	8,7
V 4.21	0,0	2,6	3,4	3,7	4,0	4,0	4,0	4,0	3,9	4,0	6,7
V 4.22	0,0	2,8	3,3	3,6	3,8	3,9	4,0	4,0	4,2	4,3	6,3
V 4.23	0,0	3,3	4,2	4,3	4,3	4,4	4,6	4,7	4,8	4,8	7,2
V 4.24	0,0	3,7	4,5	4,8	5,1	5,3	5,4	5,4	5,4	5,5	8,5
V 4.25	0,0	2,5	2,8	2,8	2,9	3,1	3,0	3,1	3,2	2,9	4,9
Mittelwert [kN]	0,1	3,0	3,7	3,9	4,1	4,2	4,3	4,3	4,4	4,4	
Mittelwert [N/mm]	0,2	5,0	6,1	6,6	6,8	7,0	7,2	7,2	7,3	7,3	6,8
Standard- abweichung [kN]	0,3	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	
Variations- koeffizient [%]	0,00	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	0,19	

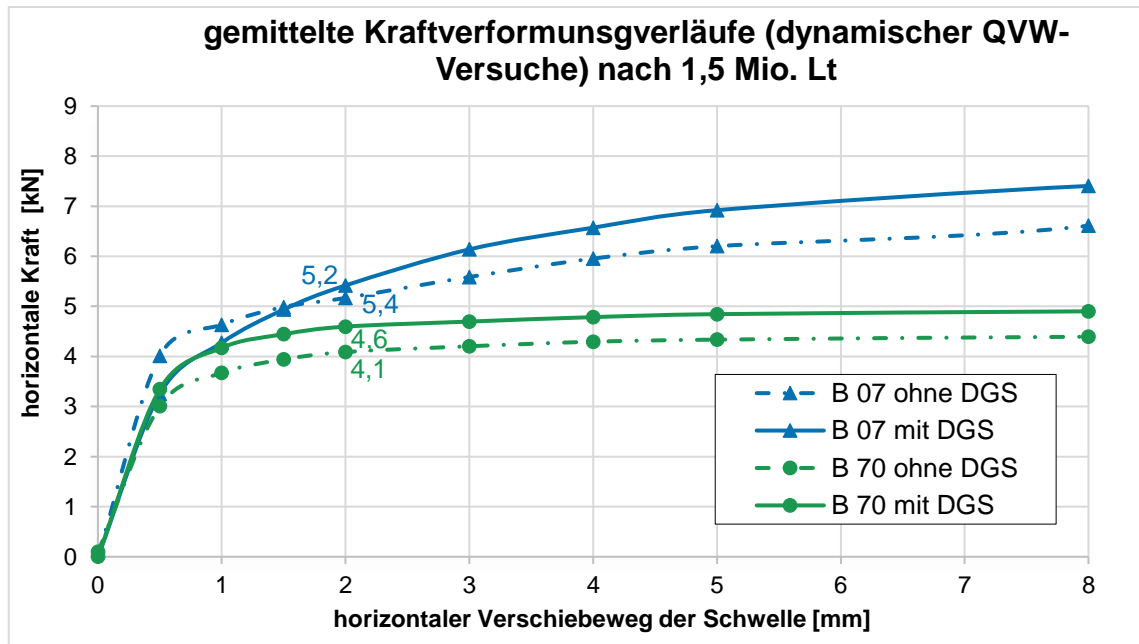


Abbildung 91: Gemittelte Kraftverformungsverläufe der dynamischen QVW-Messung nach 1,5 Mio. Lt

A.6 Zusammenfassung der Anhebung bzw. Einsenkung der Schwelle während der QVW-Messung unter 2 mm horizontaler Verschiebeweg

Anhebung (-)/ Einsenkung (+) der Schwelle [mm] unter 2 mm horizontaler Verschiebeweg [mm]							
B07 So Schwellen ohne DGS		B07 So Schwellen mit DGS		B70 Schwellen mit DGS		B70 Schwellen ohne DGS	
Schwelle Nr.	[mm]	Schwelle Nr.	[mm]	Schwelle Nr.	[mm]	Schwelle Nr.	[mm]
V 1 .1	-0,68	V 2.1	-1,05	V 3.1	-1,01	V 4.1	-0,43
V 1 .2	-0,76	V 2.2	-1,05	V 3.2	-1,43	V 4.2	-0,60
V 1 .3	-0,76	V 2.3	-0,74	V 3.3	-1,16	V 4.3	-0,56
V 1 .4	-0,92	V 2.4	-0,85	V 3.4	-0,89	V 4.4	-0,24
V 1 .5	-0,69	V 2.5	-0,91	V 3.5	-1,13	V 4.5	-0,48
V 1 .6	-0,84	V 2.6	-0,77	V 3.6	-0,78	V 4.6	-0,49
V 1 .7	-0,74	V 2.7	-0,96	V 3.7	-1,20	V 4.7	-0,54
V 1 .8	-0,79	V 2.8	-1,02	V 3.8	-1,23	V 4.8	-0,62
V 1 .9	-1,26	V 2.9	-0,70	V 3.9	-1,18	V 4.9	-0,57
V 1 .10	-0,85	V 2.10	-0,95	V 3.10	-0,98	V 4.10	-0,21
V 1 .11	-0,65	V 2.11	-0,92	V 3.11	-1,04	V 4.11	-0,42
V 1 .12	-1,08	V 2.12	-0,66	V 3.12	-1,19	V 4.12	-0,54
V 1 .13	-0,80	V 2.13	-0,74	V 3.13	-1,07	V 4.13	-0,39
V 1 .14	-0,74	V 2.14	-0,82	V 3.14	-1,03	V 4.14	-0,07
V 1 .15	-0,96	V 2.15	-0,81	V 3.15	-1,09	V 4.15	-0,46
V 1 .16	-0,70	V 2.16	-0,76	V 3.16	-0,71	V 4.16	-0,17
V 1 .17	-0,05	V 2.17	-0,99	V 3.17	-1,89	V 4.17	-0,50
V 1 .18	-0,93	V 2.18	-2,51	V 3.18	-0,95	V 4.18	-3,35
V 1 .19	-0,53	V 2.19	-1,20	V 3.19	-0,43	V 4.19	0,14
V 1 .20	-0,45	V 2.20	-1,13	V 3.20	-0,69	V 4.20	-0,14
V 1 .21	-0,65	V 2.21	-0,86	V 3.21	-0,53	V 4.21	-0,28
V 1 .22	-1,33	V 2.22	-0,33	V 3.22	-0,62	V 4.22	-0,29
V 1 .23	-0,78	V 2.23	-1,01	V 3.23	-0,73	V 4.23	-0,16
V 1 .24	-0,32	V 2.24	-1,51	V 3.24	-0,83	V 4.24	-0,09
V 1 .25	-1,15	V 2.25	-2,41	V 3.25	-0,85	V 4.25	-0,28

A.7 Hildesheim - Ergebnisse der Beschleunigungsmessung

Hildesheim	Schwellen- gewicht			Auflast [bar]		Frequenz [Hz]		Laufrichtung der Unwuchten	max. effektiver Gleitwert der Beschleunigung				max. effektiver Gleitwert der Schwinggeschwin- digkeit				Wegamplitude			
	300 kg	300 kg	300 kg	70	70	31	asynchron		horizontal [m/s ²]		vertikal [m/s ²]		horizontal [mm/s]		vertikal [mm/s]		horizontal [mm]		vertikal [mm]	
									horizontal	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal				
B70 - Mittelwert	300 kg	300 kg	300 kg	70	70	31	asynchron	44,1	16,1	181,4	33,8	1,3	0,3							
B70 - HuV	300 kg	300 kg	300 kg	70	70	31	asynchron	40,1	9,8	185,4	32,4	1,3	0,3							
B70 - verloren	300 kg	300 kg	300 kg	70	70	31	asynchron	37,1	10,4	176,9	40,2	1,3	0,4							
B70 - 1. Stabi	300 kg	300 kg	300 kg	70	70	31	asynchron	51,0	20,1	182,8	31,8	1,3	0,3							
B70 - 2. Stabi	300 kg	300 kg	300 kg	70	70	31	asynchron	48,0	24,3	180,6	30,8	1,3	0,3							
B90 - Mittelwert	355 kg	355 kg	355 kg	70	70	31	asynchron	39,4	22,1	138,8	33,0	1,2	0,3							
B90 - HuV	355 kg	355 kg	355 kg	70	70	31	asynchron	40,89	9,28	182,5	28,8	1,3	0,2							
B90 - verloren	355 kg	355 kg	355 kg	70	70	31	asynchron	37,84	43,8	158,3	-	1,2	-							
B90 - 1. Stabi	355 kg	355 kg	355 kg	70	70	31	asynchron	-	13,12	75,7	30,5	-	0,3							
B90 - 2. Stabi	355 kg	355 kg	355 kg	70	70	31	asynchron	-	22,25	-	39,7	-	0,3							
B07 So - Mittelwert	360 kg	360 kg	360 kg	70	70	31	asynchron	34,1	12,5	151,6	38,9	1,1	0,3							
B07 So_1 - HuV	360 kg	360 kg	360 kg	70	70	31	asynchron	46,13	14,25	195,7	31,9	1,1	0,3							
B07 So_2 - HuV	360 kg	360 kg	360 kg	70	70	31	asynchron	35,22	9,33	164,7	41,0	1,2	0,4							
B07 So_1 - verloren	360 kg	360 kg	360 kg	70	70	31	asynchron	23,36	11,99	109,9	49,2	0,8	0,4							
B07 So_2 - verloren	360 kg	360 kg	360 kg	70	70	31	asynchron	29,80	11,02	144,8	44,6	1,0	0,4							
B07 So_1 - 1. Stabi	360 kg	360 kg	360 kg	70	70	31	asynchron	39,33	16,94	167,4	30,4	1,2	0,3							
B07 So_2 - 1. Stabi	360 kg	360 kg	360 kg	70	70	31	asynchron	34,84	-	129,0	44,4	1,1	0,4							
B07 So_1 - 2. Stabi	360 kg	360 kg	360 kg	70	70	31	asynchron	33,56	9,74	155,8	28,1	1,2	0,2							
B07 So_2 - 2. Stabi	360 kg	360 kg	360 kg	70	70	31	asynchron	30,62	14,19	145,3	41,6	1,0	0,4							

A.8 Neusiedl - Ergebnisse der Beschleunigungsmessung

Neusiedl a. See	Schwellen- gewicht		Auflast [bar]	Frequenz [Hz]	Laufrichtung der Unwuchten	max. effektiver Gleitwert der Beschleunigung		max. effektiver Gleitwert der Schwinggeschwin- digkeit		Wegamplitude	
	horizontal [m/s ²]	vertikal [m/s ²]				horizontal [mm/s]	vertikal [mm/s]	horizontal [mm]	vertikal [mm]		
Holzschwellen	100 kg		90	32	synchron	23,0	26,3	75,8	86,8	0,6	0,4
Schwelle Nr. 1	100 kg		90	32	synchron	27,2	31,1	88,5	82,3	0,6	0,6
Schwelle Nr. 2	100 kg		90	32	synchron	22,4	15,3	87,8	61,9	0,6	0,4
Schwelle Nr. 3	100 kg		90	32	synchron	19,4	32,4	51,2	116,1	0,7	0,2
L2 Betonschwellen	290 kg		90	32	synchron	29,5	17,3	137,7	43,9	0,9	0,2
Schwelle Nr. 1	290 kg		90	32	synchron	27,7	16,4	130,8	43,0	0,9	0,3
Schwelle Nr. 2	290 kg		90	32	synchron	32,1	17,4	149,8	39,3	1,0	0,2
Schwelle Nr. 3	290 kg		90	32	synchron	28,8	18,0	132,5	49,6	0,9	0,3
19a Betonschwellen	290 kg		90	32	asynchron	41,7	42,4	174,9	42,0	1,3	0,3
Schwelle Nr. 1	290 kg		90	32	asynchron	49,4	-	161,2	48,2	1,2	0,4
Schwelle Nr. 2	290 kg		90	32	asynchron	58,5	21,4	188,5	35,8	1,3	0,2
Schwelle Nr. 3	290 kg		90	32	asynchron	17,3	63,4	-	-	1,4	0,2

A.9 Langenschwarz - Ergebnisse der Beschleunigungsmessung

Langenschwarz	Schwellen- gewicht	Auflast [bar]	Frequenz [Hz]	Laufrichtung der Unwuchten	max. effektiver		max. effektiver		Wegamplitude	
					horizontal [m/s ²]	vertikal [m/s ²]	horizontal [mm/s]	vertikal [mm/s]	horizontal [mm]	vertikal [mm]
B07 So- HuV	360 kg	70	32	synchron	87,6	69,2	196,0	260,0	1,4	1,7
Schwelle Nr. 1	360 kg	70	32	synchron	-	67,9	175,5	-	-	1,3
Schwelle Nr. 2	360 kg	70	32	synchron	70,6	76,9	219,5	257,0	1,5	1,9
Schwelle Nr. 3	360 kg	70	32	synchron	46,5	68,5	198,7	282,5	1,4	2,0
Schwelle Nr. 4	360 kg	70	32	synchron	96,3	63,5	180,6	227,4	1,2	1,5
Schwelle Nr. 5	360 kg	70	32	synchron	86,6	66,9	194,3	261,6	1,3	1,6
Schwelle Nr. 6	360 kg	70	32	synchron	137,9	71,6	207,3	268,8	1,4	1,7
B07 So- 1. Stabi	360 kg	60	32	synchron	56,8	69,2	163,5	43,0	1,1	0,2
Schwelle Nr. 1	360 kg	60	32	synchron	-	67,9	-	43,4	-	0,3
Schwelle Nr. 2	360 kg	60	32	synchron	11,0	76,9	-	-	-	-
Schwelle Nr. 3	360 kg	60	32	synchron	-	68,5	-	47,3	-	0,3
Schwelle Nr. 4	360 kg	60	32	synchron	38,4	63,5	175,5	42,1	1,2	0,2
Schwelle Nr. 5	360 kg	60	32	synchron	56,8	66,9	137,6	34,8	1,0	0,1
Schwelle Nr. 6	360 kg	60	32	synchron	120,8	71,6	177,2	47,3	1,2	0,3

A.10 Maximale Werte des gleitenden Effektivwerts der Schwellenbeschleunigung und Schotterbeschleunigung der Vorversuche

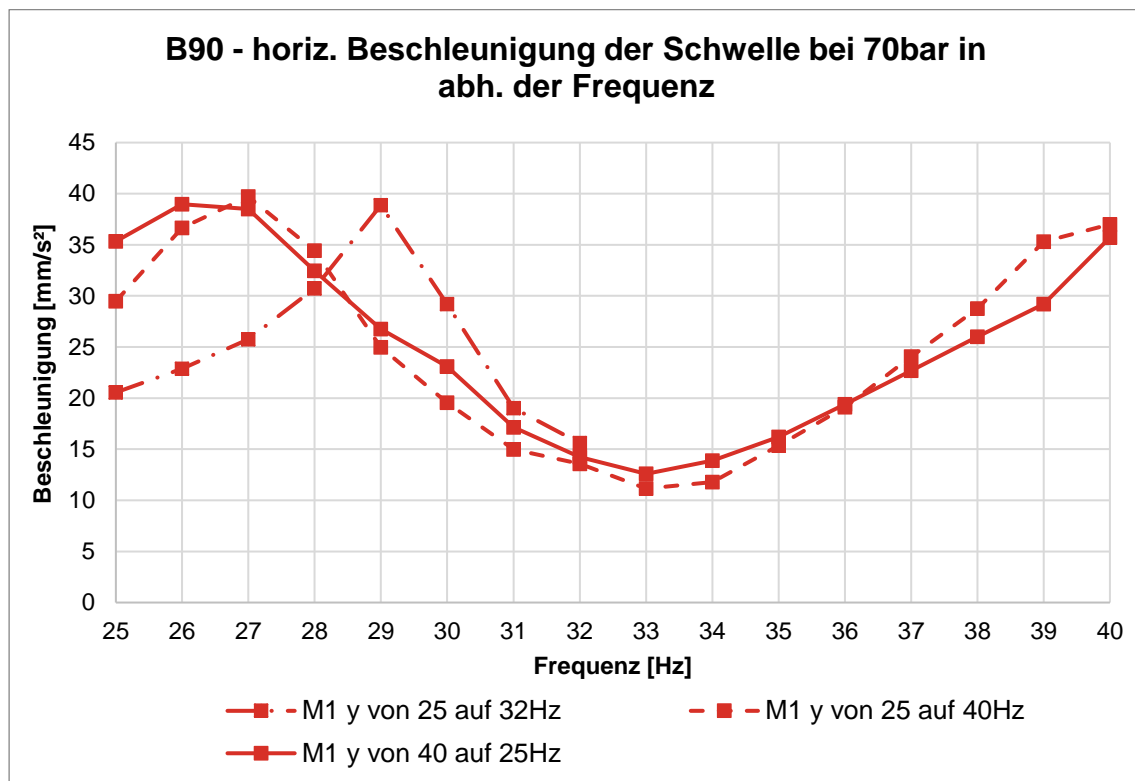


Abbildung 92: B90 - horizontale Beschleunigung der Schwelle bei 70 bar in Abh. der Frequenz

Im Folgenden werden die Ergebnisse der maximal gleitenden Effektivwerte der Schwellenbeschleunigung und der Schotterbeschleunigung grafisch dargestellt. Es ist dabei auf die Nomenklatur zu achten. „M“ steht für den Messpunkt auf der Schwelle und die zugehörige Ziffer für die Entfernung zum Einwirkzentrum. Die Ziffer 1 ist am nächsten wohingegen die Ziffer 3 am weitesten entfernt ist. Die Koordinate x ist in Schienenlängsrichtung, die Koordinate y in Schwellenlängsrichtung (lateral) und die Koordinate z in vertikaler Richtung definiert. „SMS“ steht für Schottermessstein, die Koordinaten sind gleich definiert. Die Schottermesssteine 1 und 3 enthalten die triaxial messenden Sensoren von Bruel&Kjaer (4321) und die SMS 4 bis 6 die einaxial messenden Sensoren von Synotech (PCB-352C41). Die Zusätze „oben“, „mitte“ und „unten“ definieren die Einbauhöhe. Der Schottermessstein oben ist in 8 cm, mitte in 15 cm und unten in 25 cm Tiefe unter der Schwellenunterkante eingebettet.

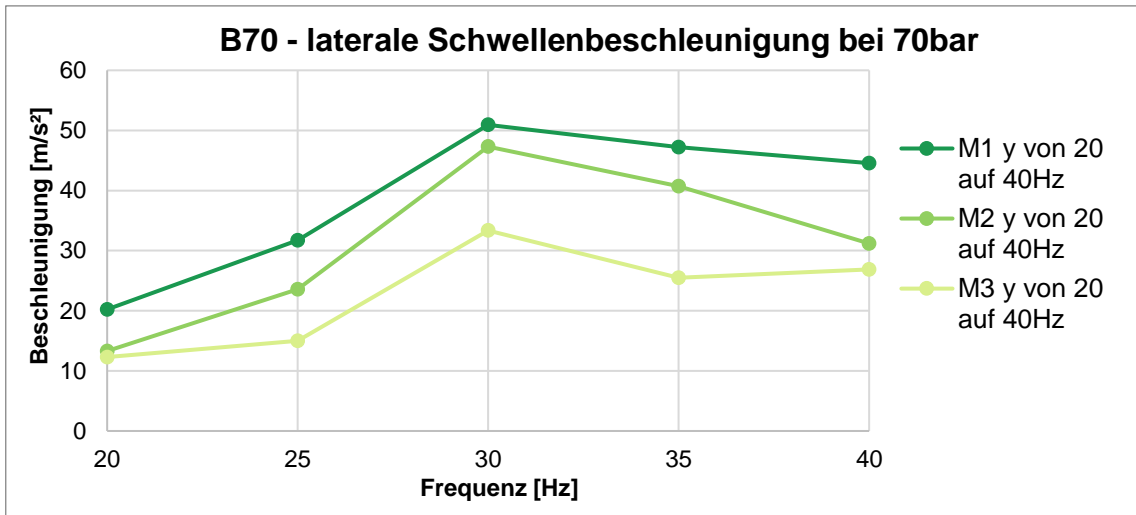


Abbildung 93: B70 laterale Schwellenbeschleunigung bei 70 bar in Abh. der Frequenz

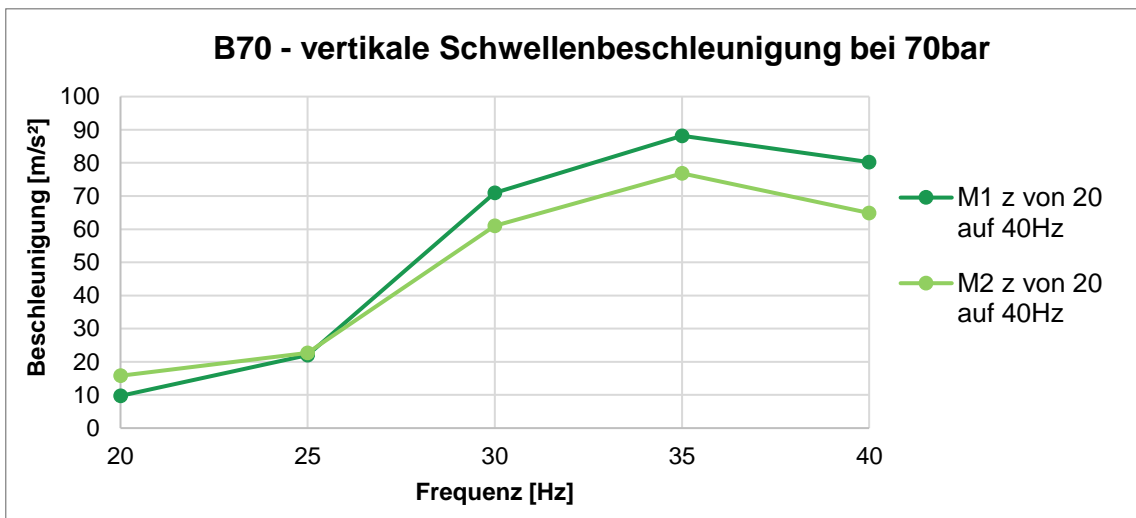


Abbildung 94: B70 vertikale Schwellenbeschleunigung bei 70 bar in Abh. der Frequenz

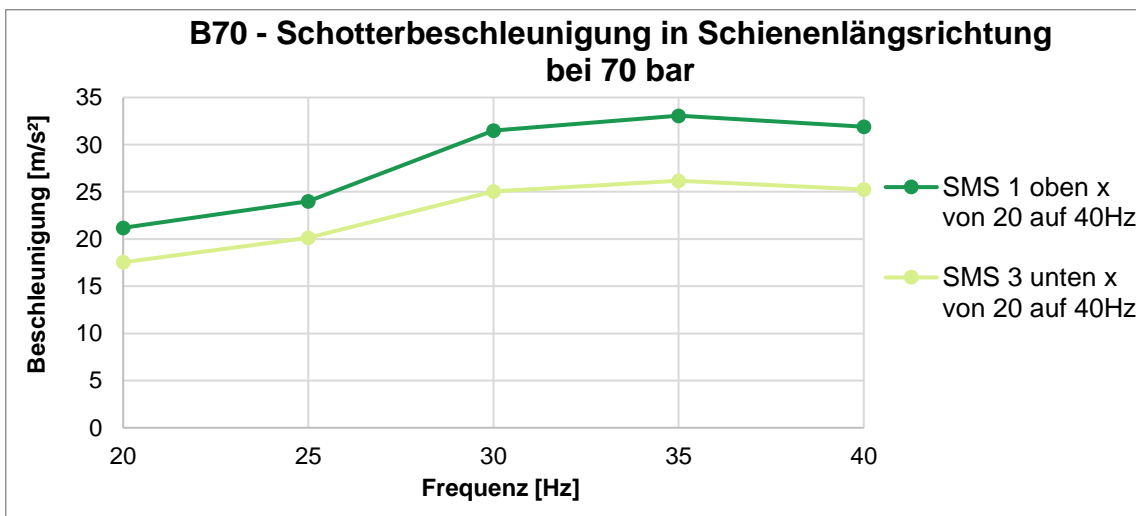


Abbildung 95: B70 Schotterbeschleunigung in Schwellenlängsrichtung bei 70 bar in Abh. der Frequenz

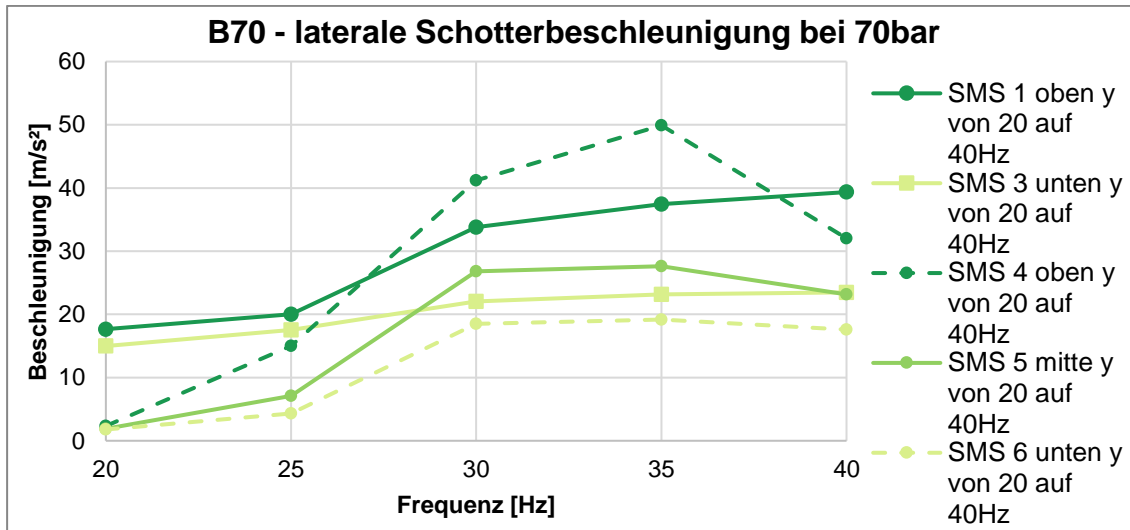


Abbildung 96: B70 laterale Schotterbeschleunigung bei 70 bar in Abh. der Frequenz

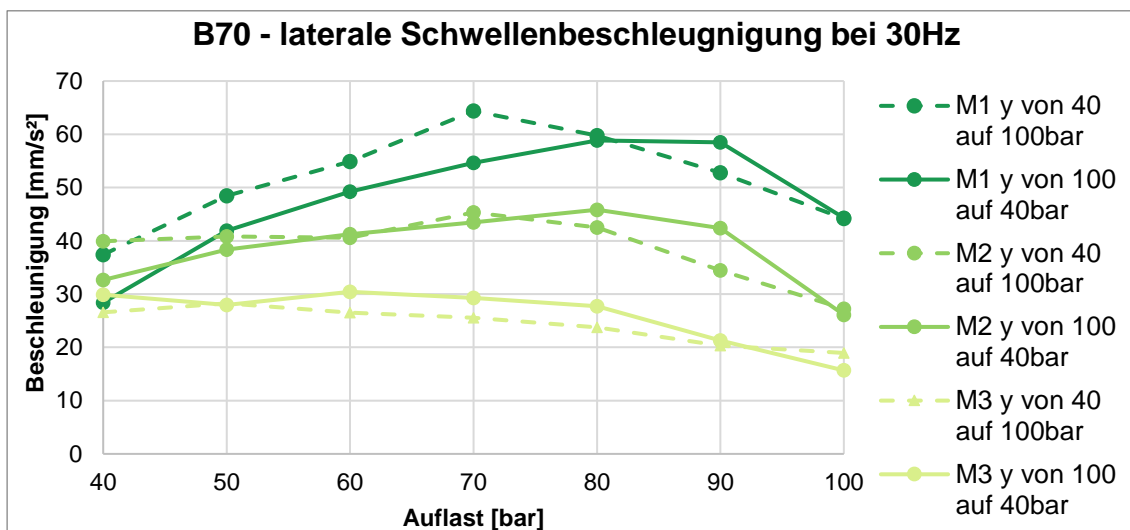


Abbildung 97: B70 vertikale Schwellenbeschleunigung bei 30 Hz in Abh. der Auflast

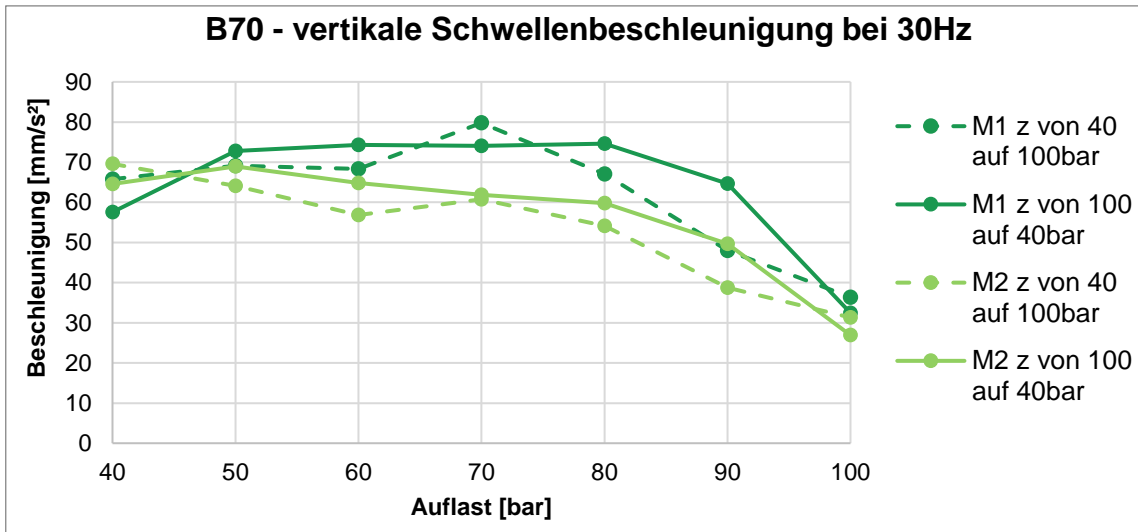


Abbildung 98: B70 Schwellenbeschleunigung bei 30 Hz in Abh. der Auflast

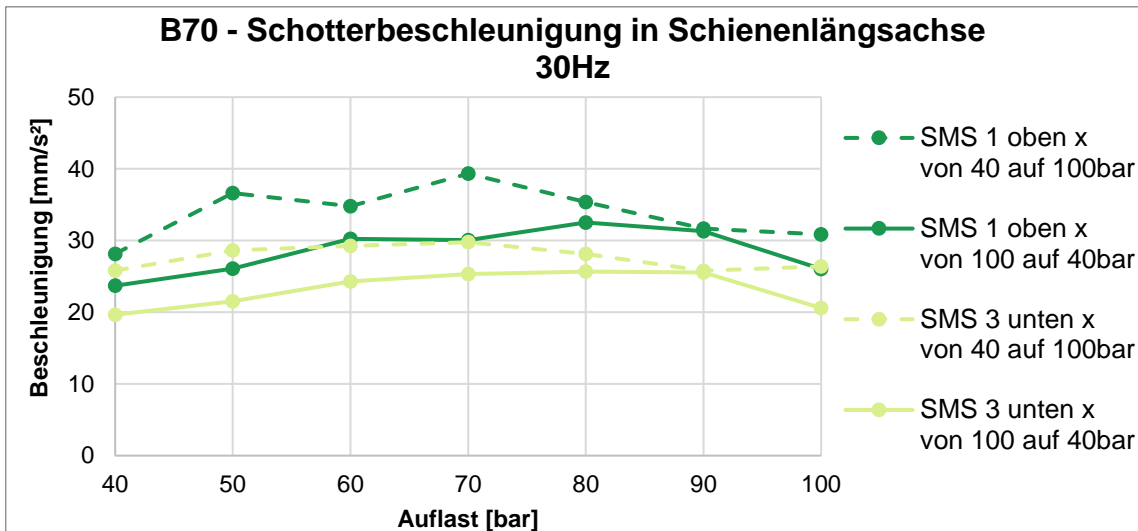


Abbildung 99: B70 laterale Schotterbeschleunigung in Schienenlängsachse bei 30 Hz in Abh. der Auflast

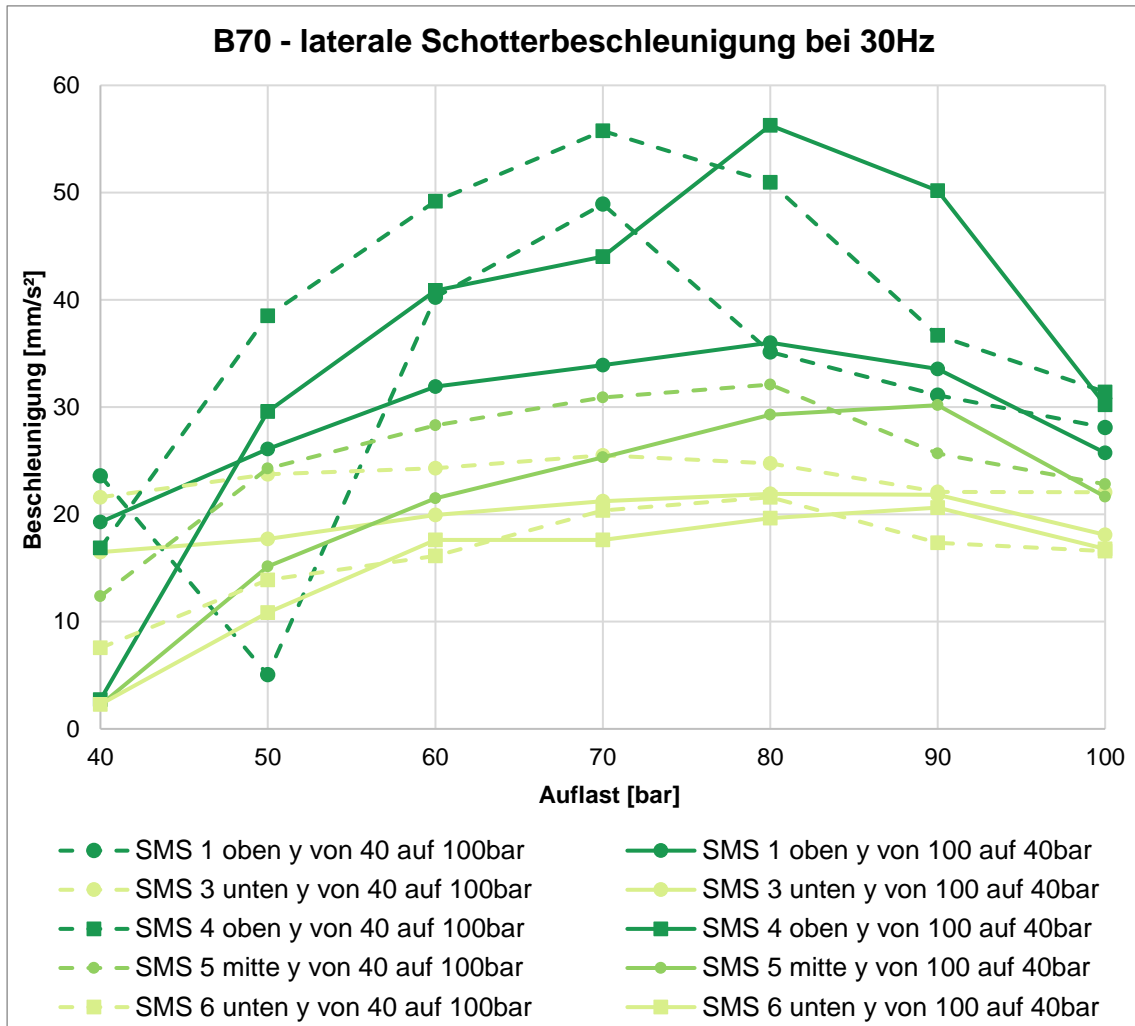


Abbildung 100: B70 laterale Schotterbeschleunigung bei 30 Hz in Abh. der Auflast

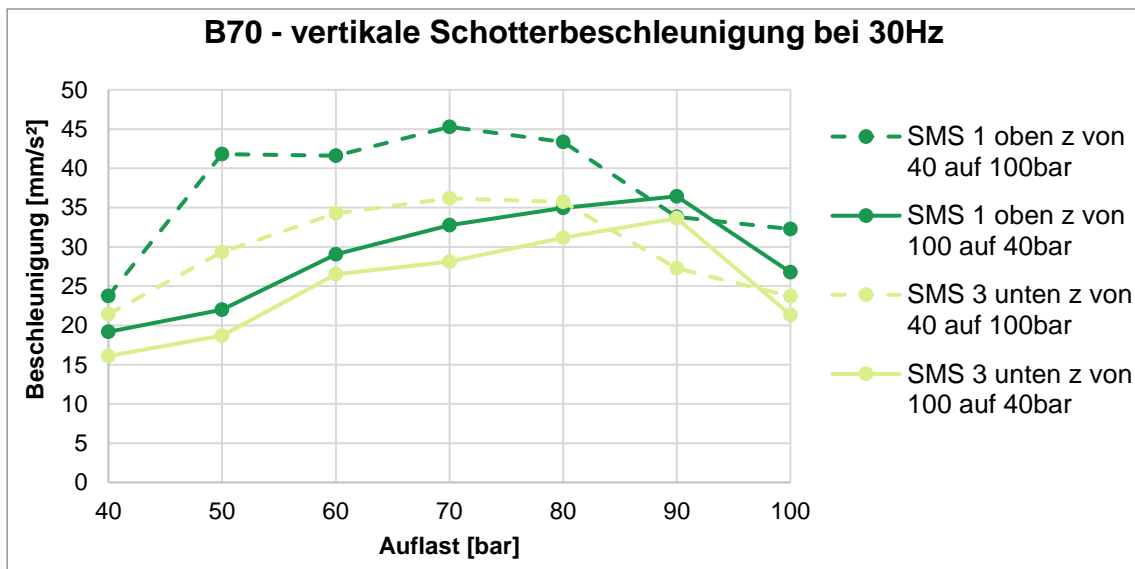


Abbildung 101: B70 laterale Schotterbeschleunigung in Schienenlängsachse bei 30 Hz in Abh. der Auflast

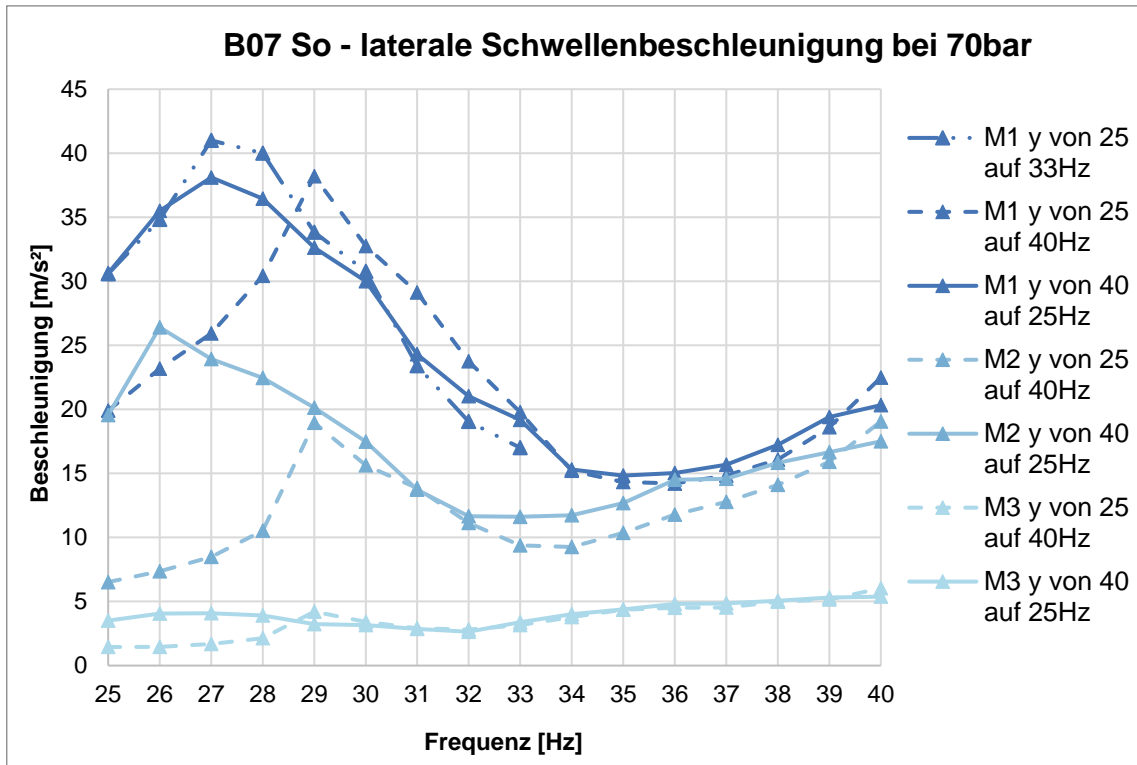


Abbildung 102: B07 So laterale Schwellenbeschleunigung bei 70 bar in Abh. der Frequenz

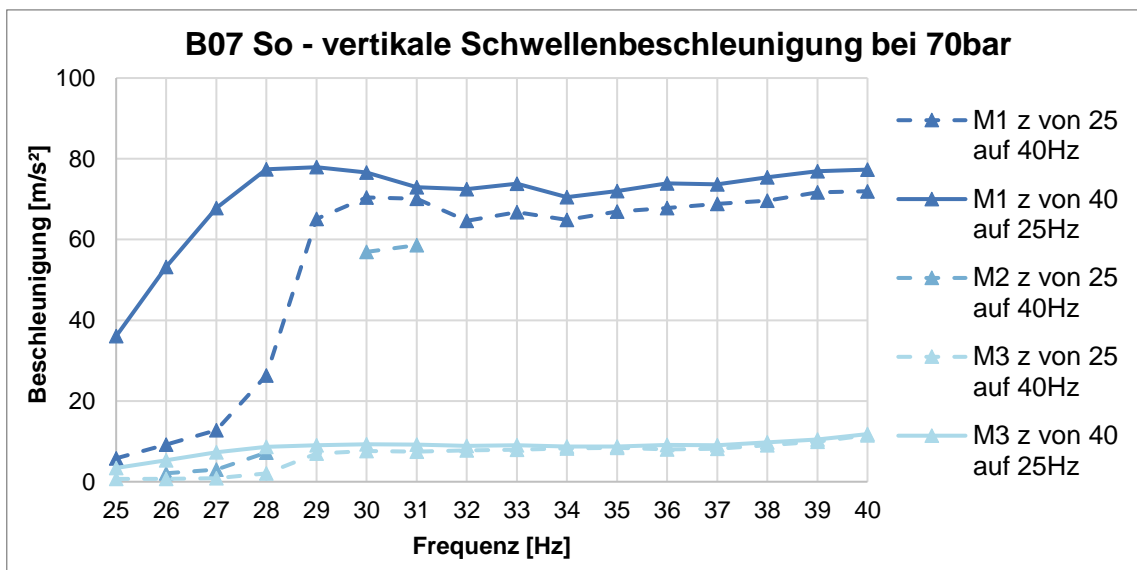


Abbildung 103: B07 So vertikale Schwellenbeschleunigung bei 70 bar in Abh. der Frequenz

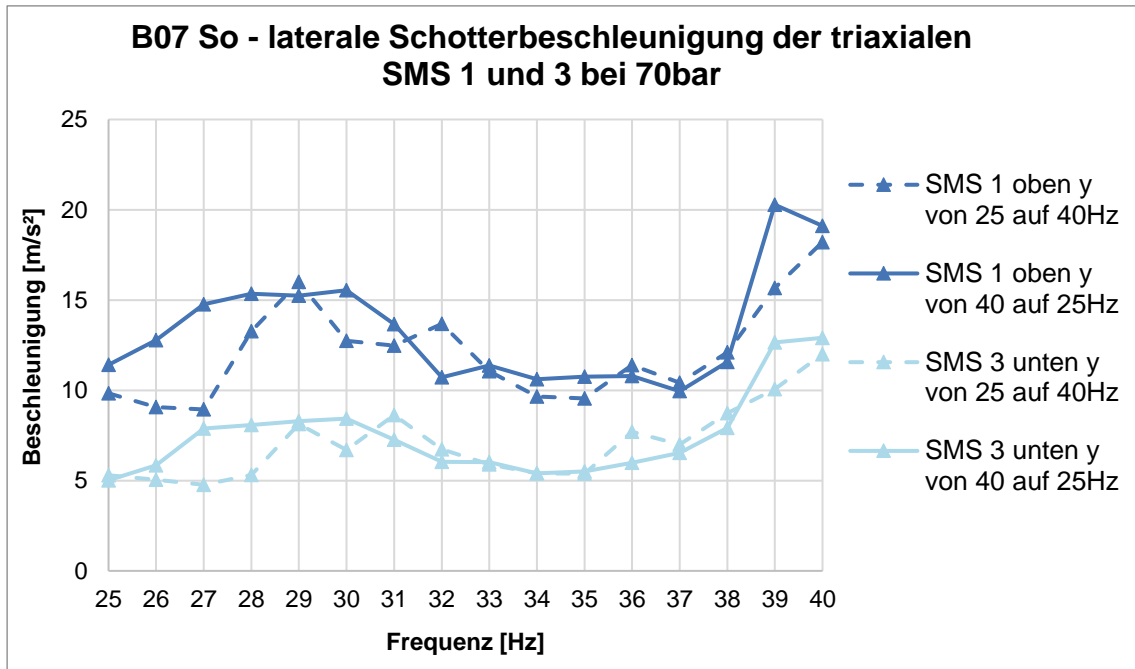


Abbildung 104: B07 So laterale Schotterbeschleunigung der triaxialen SMS 1 und 3 bei 70 bar in Abh. der Frequenz

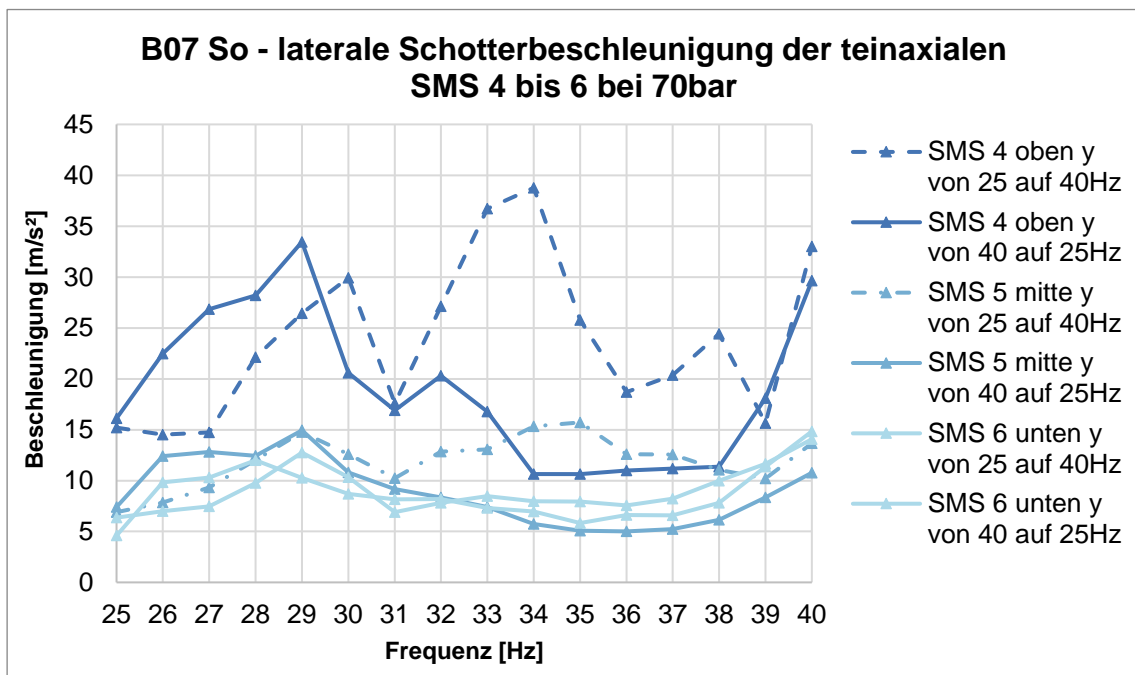


Abbildung 105: B07 So laterale Schotterbeschleunigung der einaxialen SMS 4 bis 6 bei 70 bar in Abh. der Frequenz

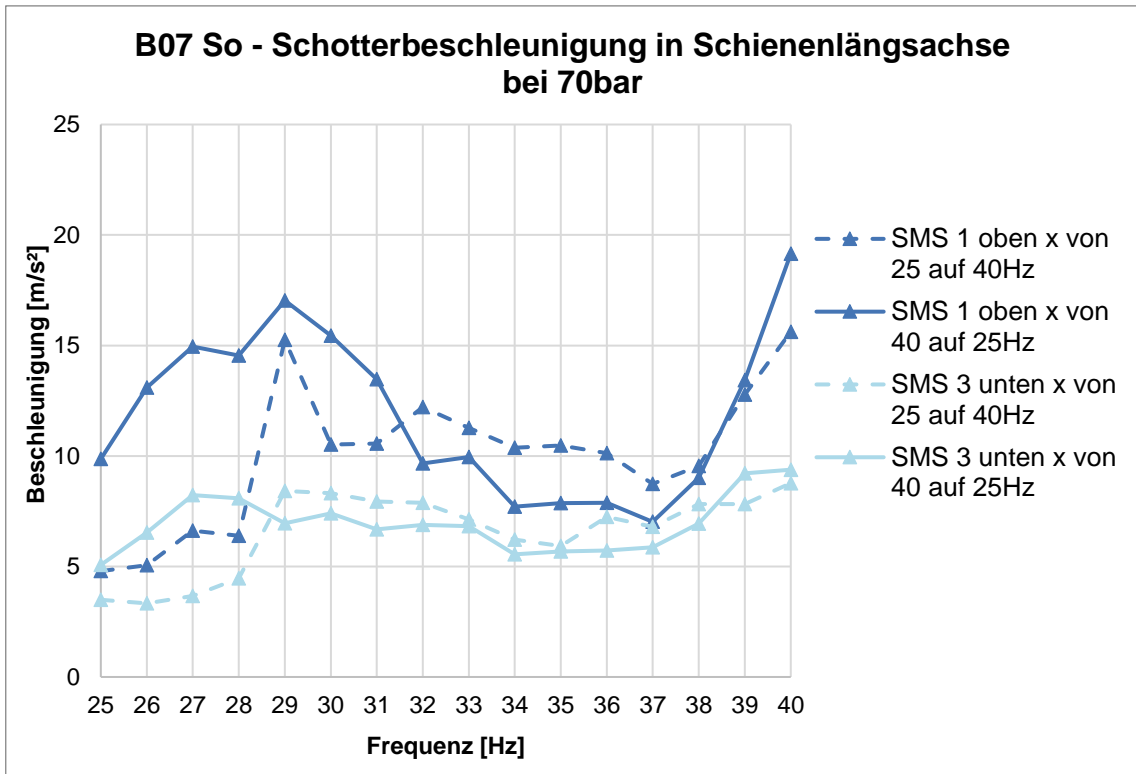


Abbildung 106: B07 So Schotterbeschleunigung in Schienenlängsachse bei 70 bar in Abh. der Frequenz

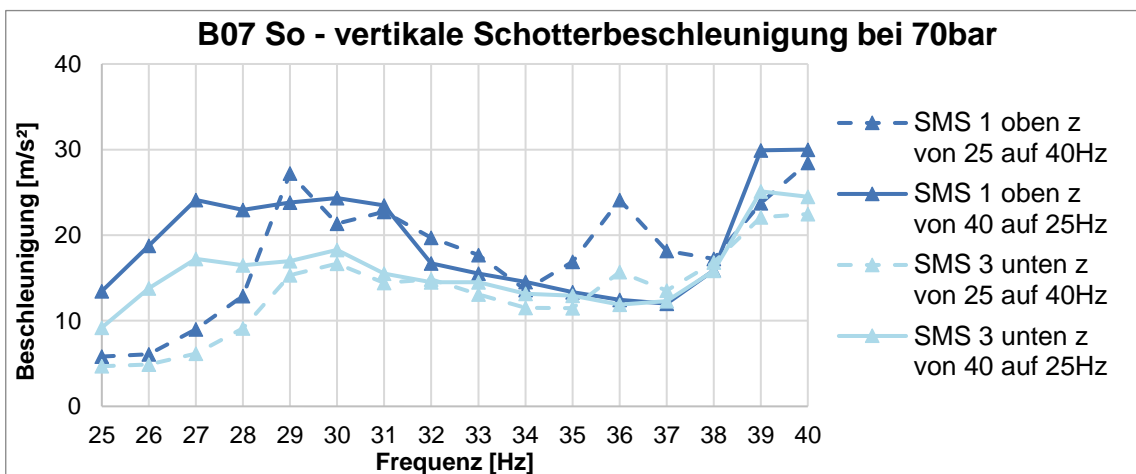


Abbildung 107: B07 So vertikale Schotterbeschleunigung bei 70 bar in Abh. der Frequenz

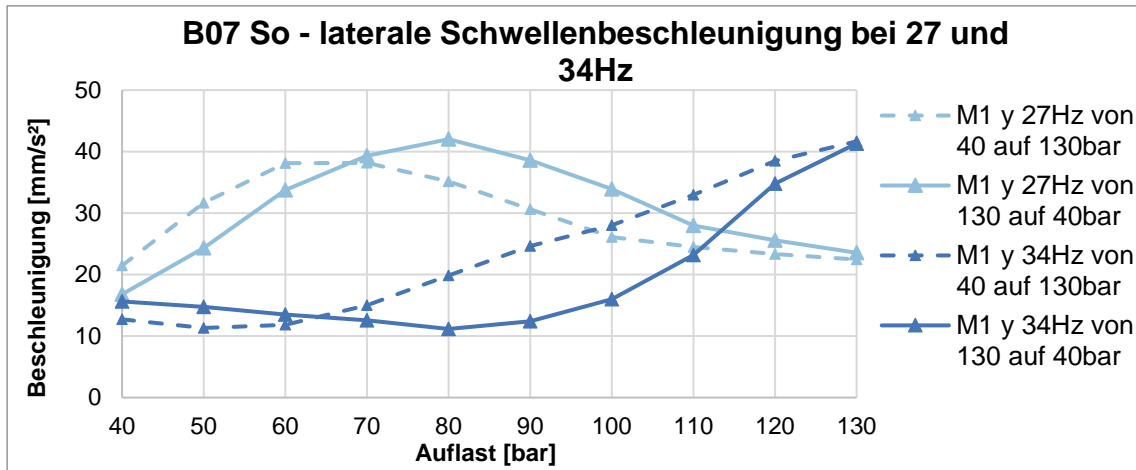


Abbildung 108: B07 So laterale Schwellenbeschleunigung bei 27 Hz und 34 Hz in Abh. der Auflast

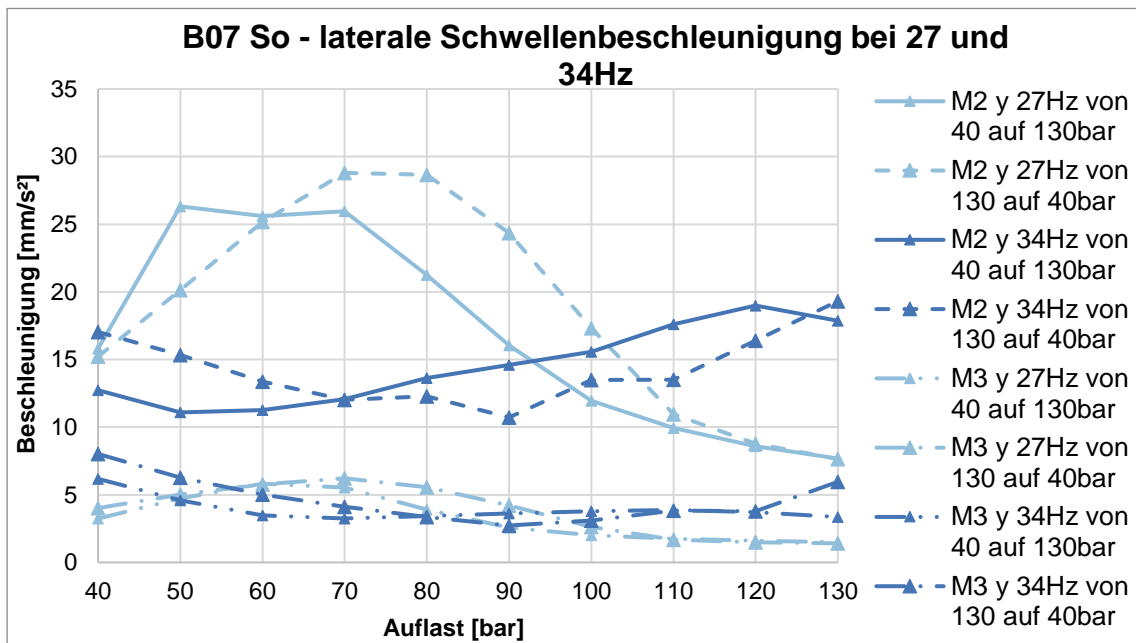


Abbildung 109: B07 So laterale Schwellenbeschleunigung bei 27 Hz und 34 Hz in Abh. der Auflast

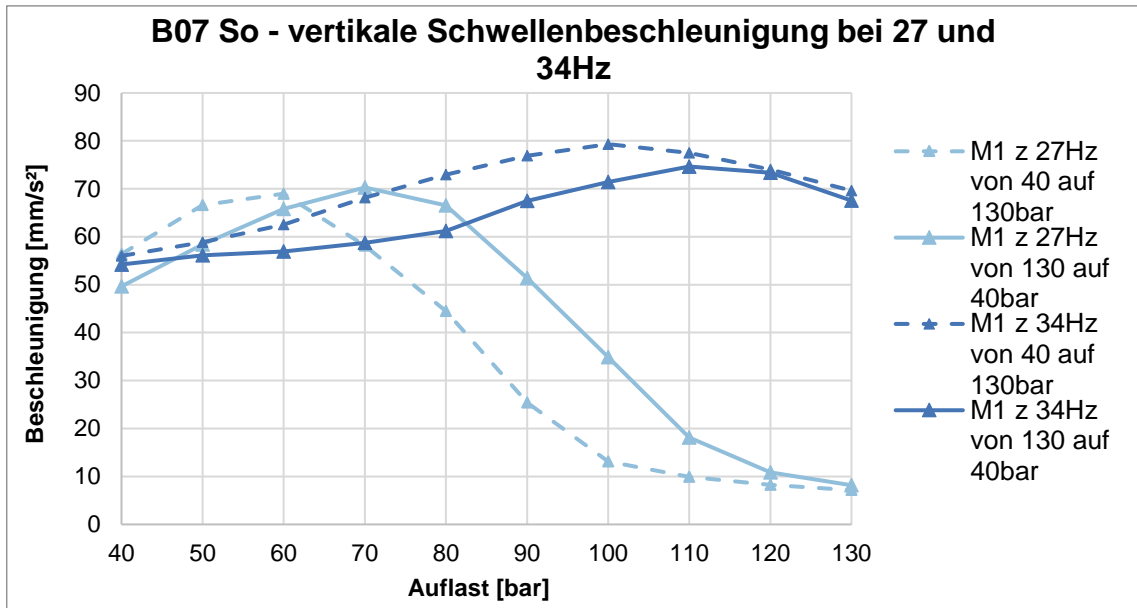


Abbildung 110: B07 So vertikale Schwellenbeschleunigung bei 27 Hz und 34 Hz in Abh. der Auflast

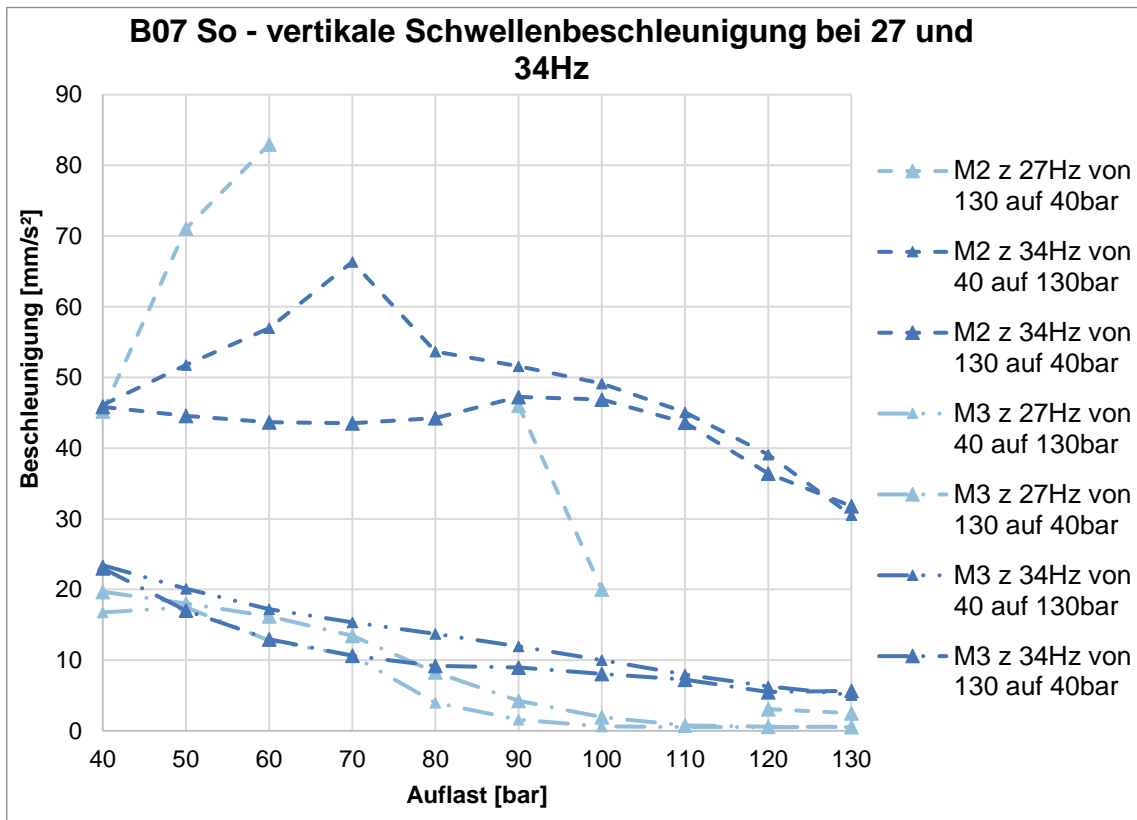


Abbildung 111: B07 So vertikale Schwellenbeschleunigung bei 27 Hz und 34 Hz in Abh. der Auflast

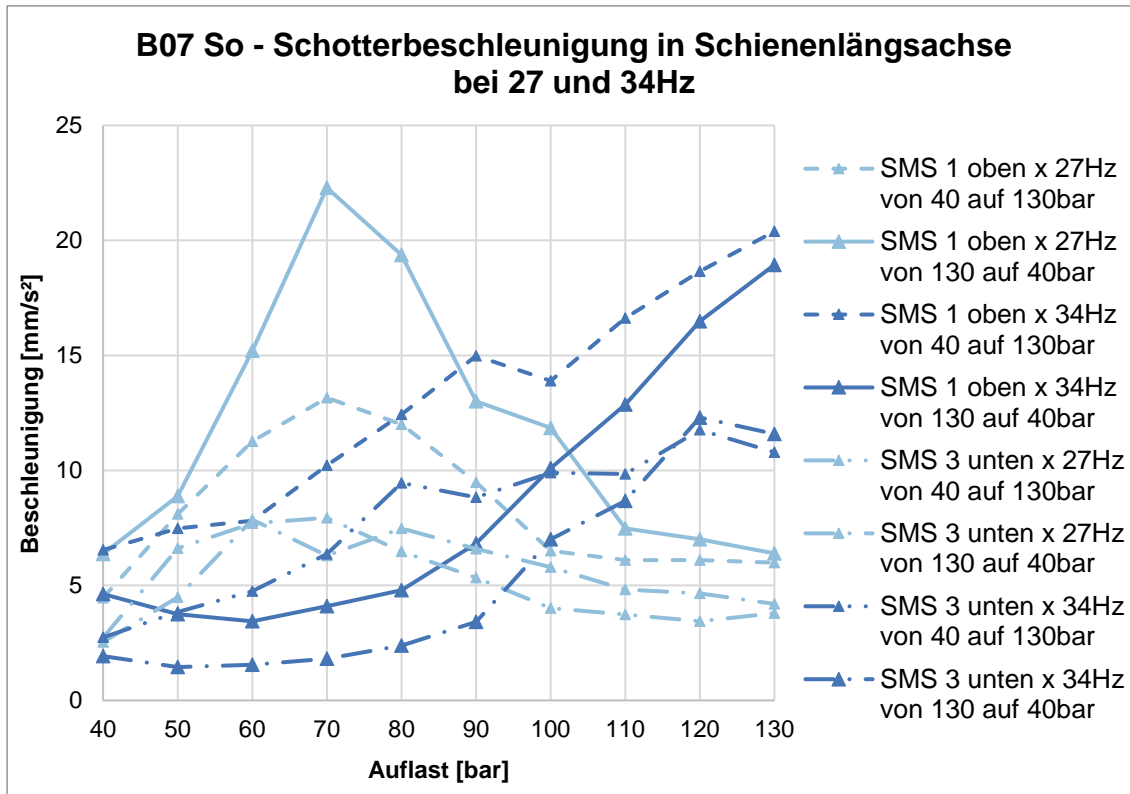


Abbildung 112: B07 So Schotterbeschleunigung in Schienenlängsachse bei 27 Hz und 34 Hz in Abh. der Auflast

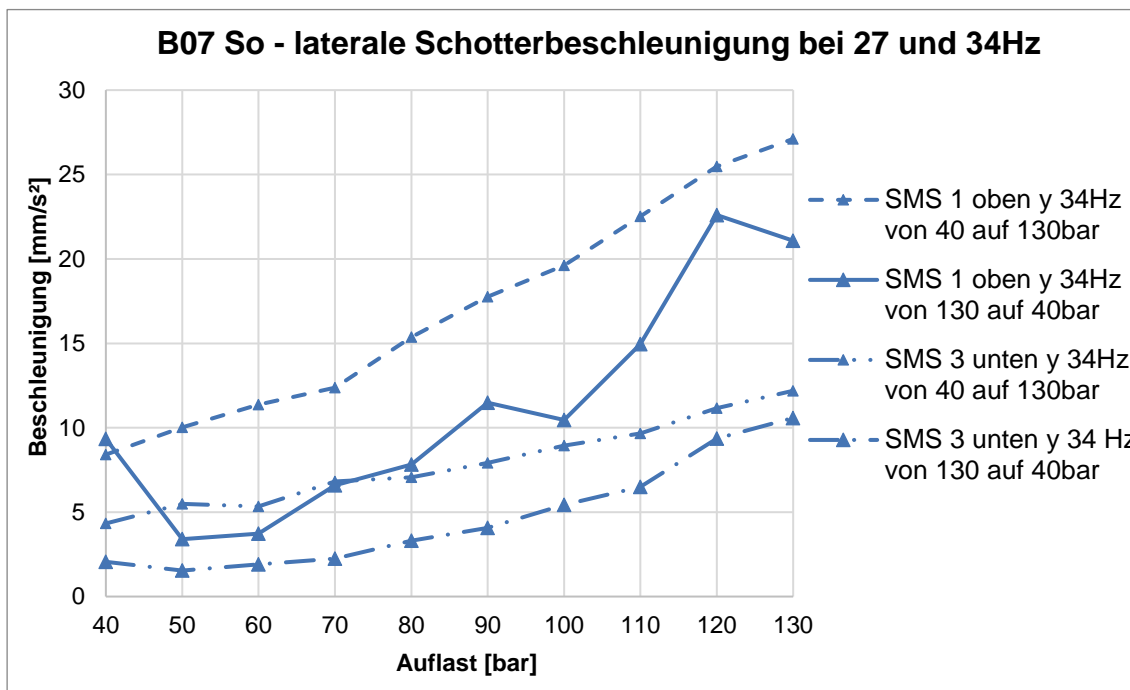


Abbildung 113: B07 So laterale Schotterbeschleunigung bei 27 Hz und 34 Hz in Abh. der Auflast

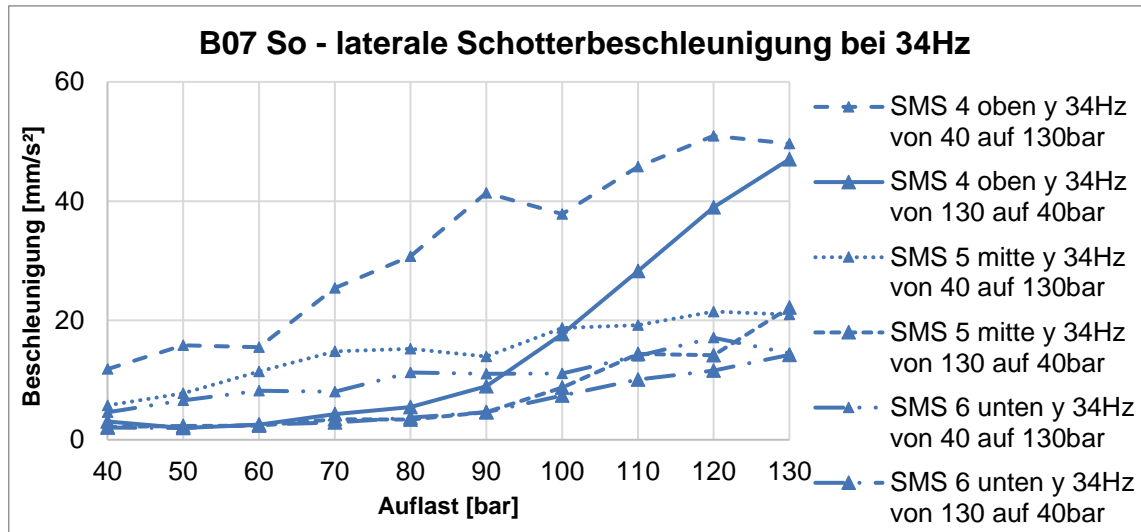


Abbildung 114: B07 So laterale Schotterbeschleunigung bei 34 Hz in Abh. der Auflast

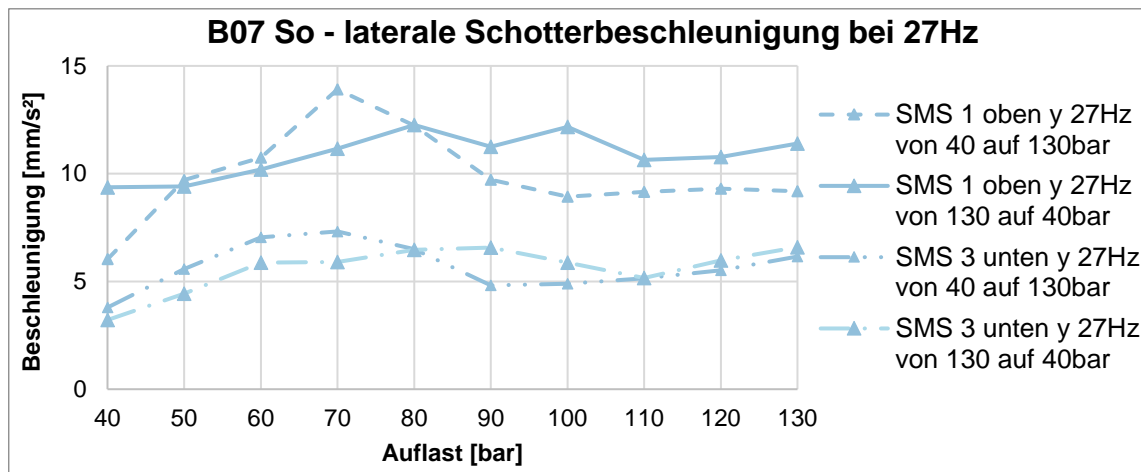


Abbildung 115: B07 So laterale Schotterbeschleunigung bei 27 Hz in Abh. der Auflast

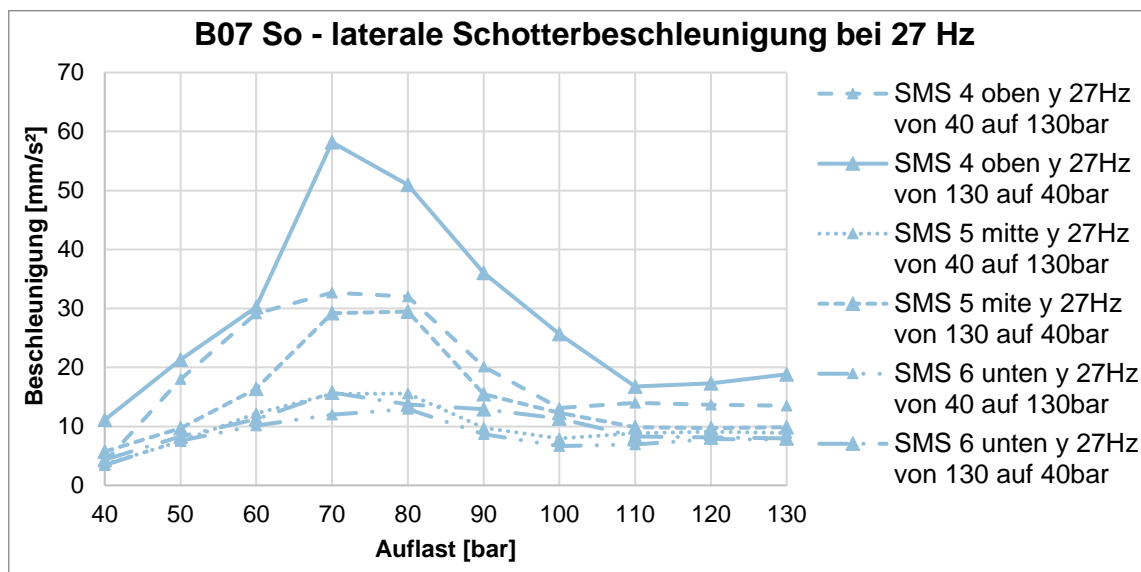


Abbildung 116: B07 So laterale Schotterbeschleunigung bei 27 Hz in Abh. der Auflast

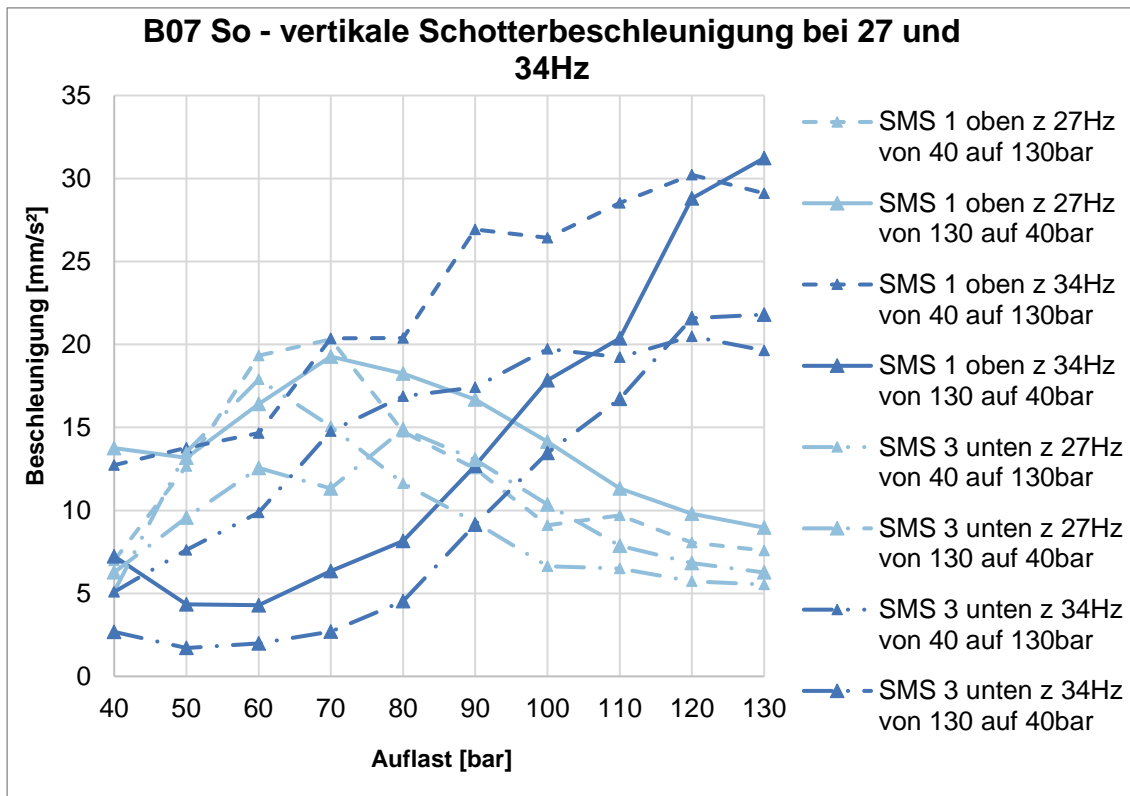


Abbildung 117: B07 So vertikale Schotterbeschleunigung bei 27 Hz und 34 Hz in Abh. der Auflast

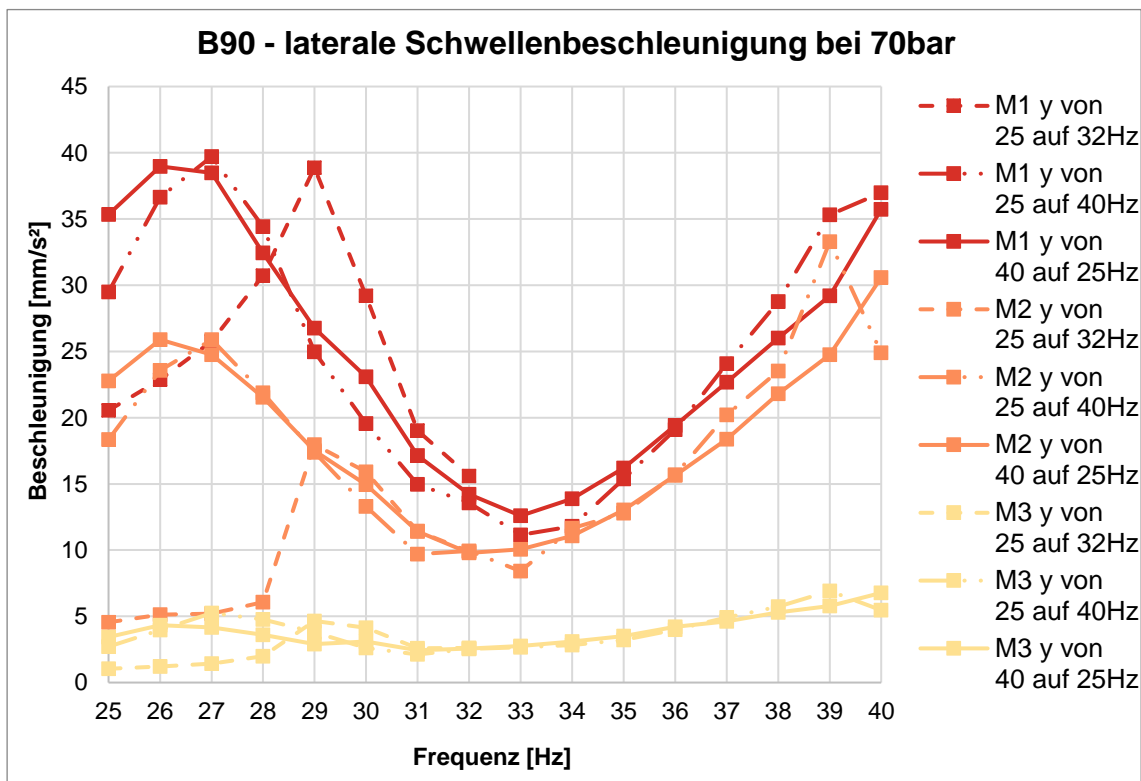


Abbildung 118: B90 laterale Schwellenbeschleunigung bei 70 bar in Abh. der Frequenz

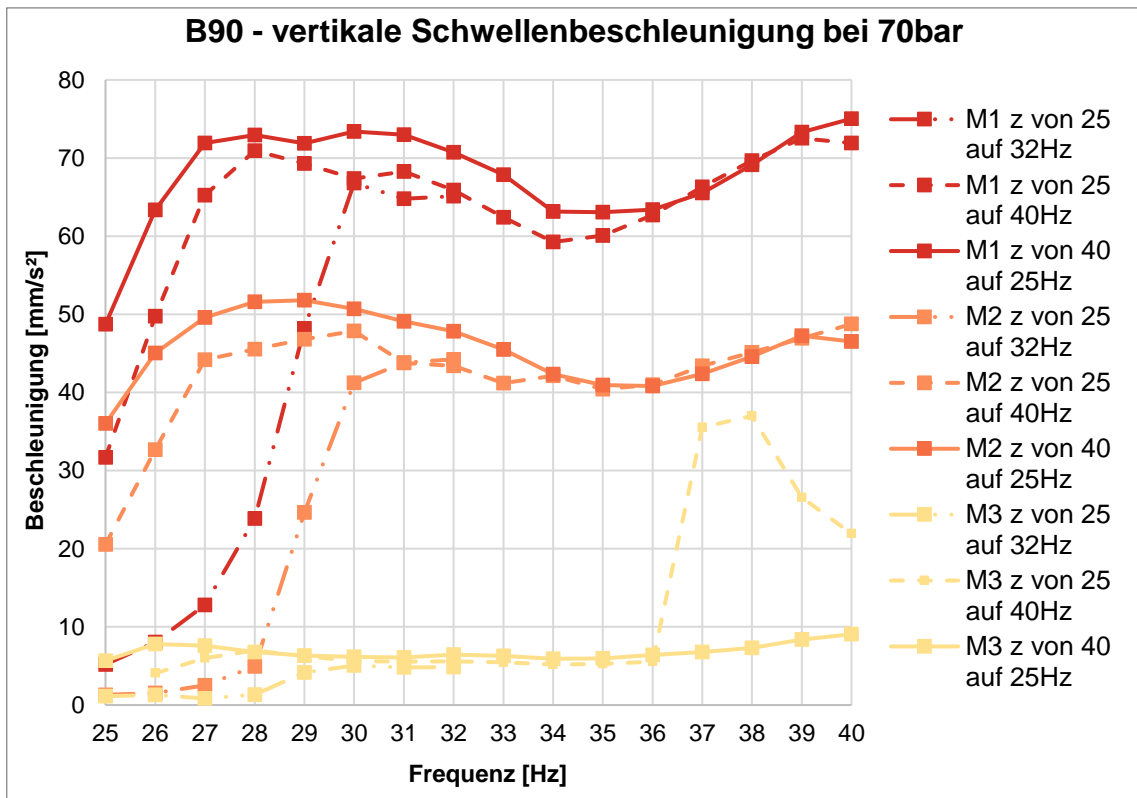


Abbildung 119: B90 vertikale Schwellenbeschleunigung bei 70 bar in Abh. der Frequenz

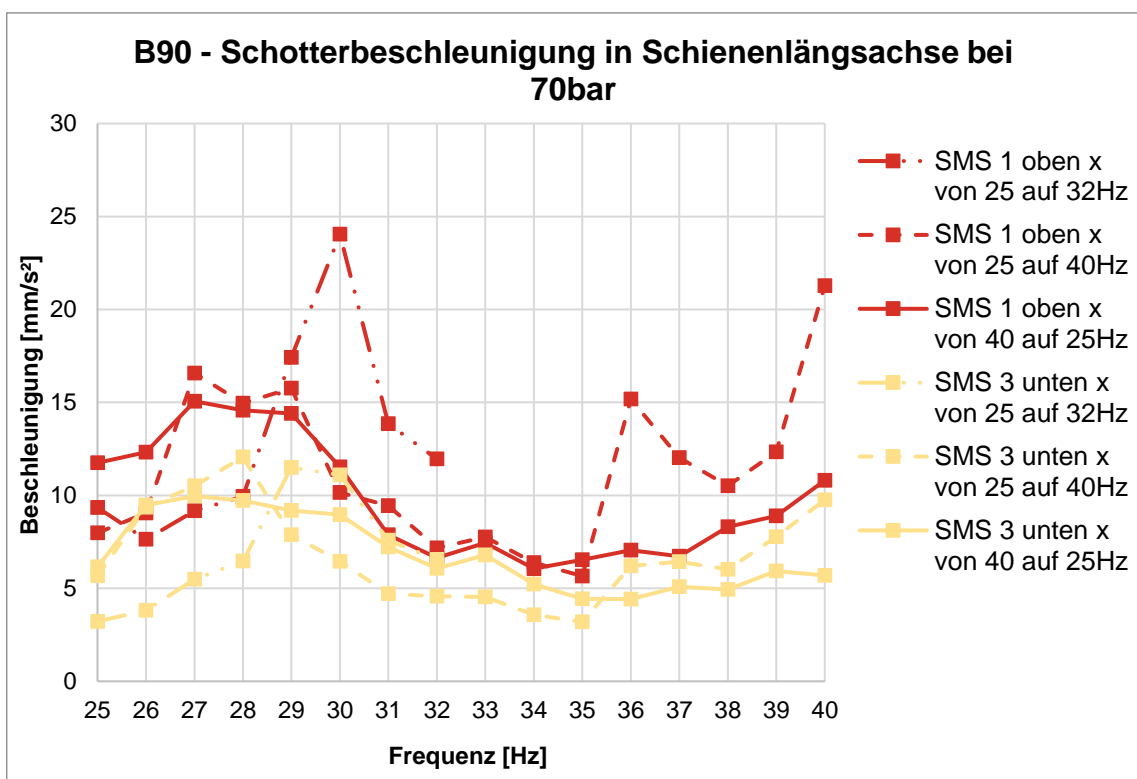


Abbildung 120: B90 Schotterbeschleunigung in Schienenlängsachse bei 70 bar in Abh. der Frequenz

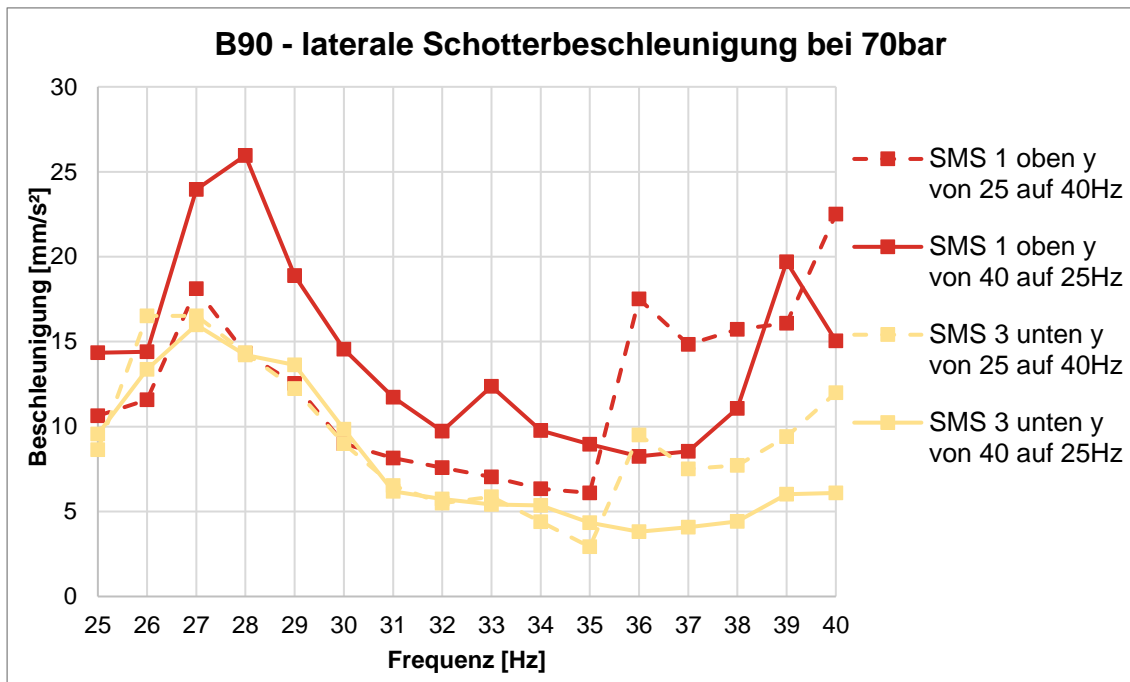


Abbildung 121: B90 laterale Schotterbeschleunigung bei 70 bar in Abh. der Frequenz

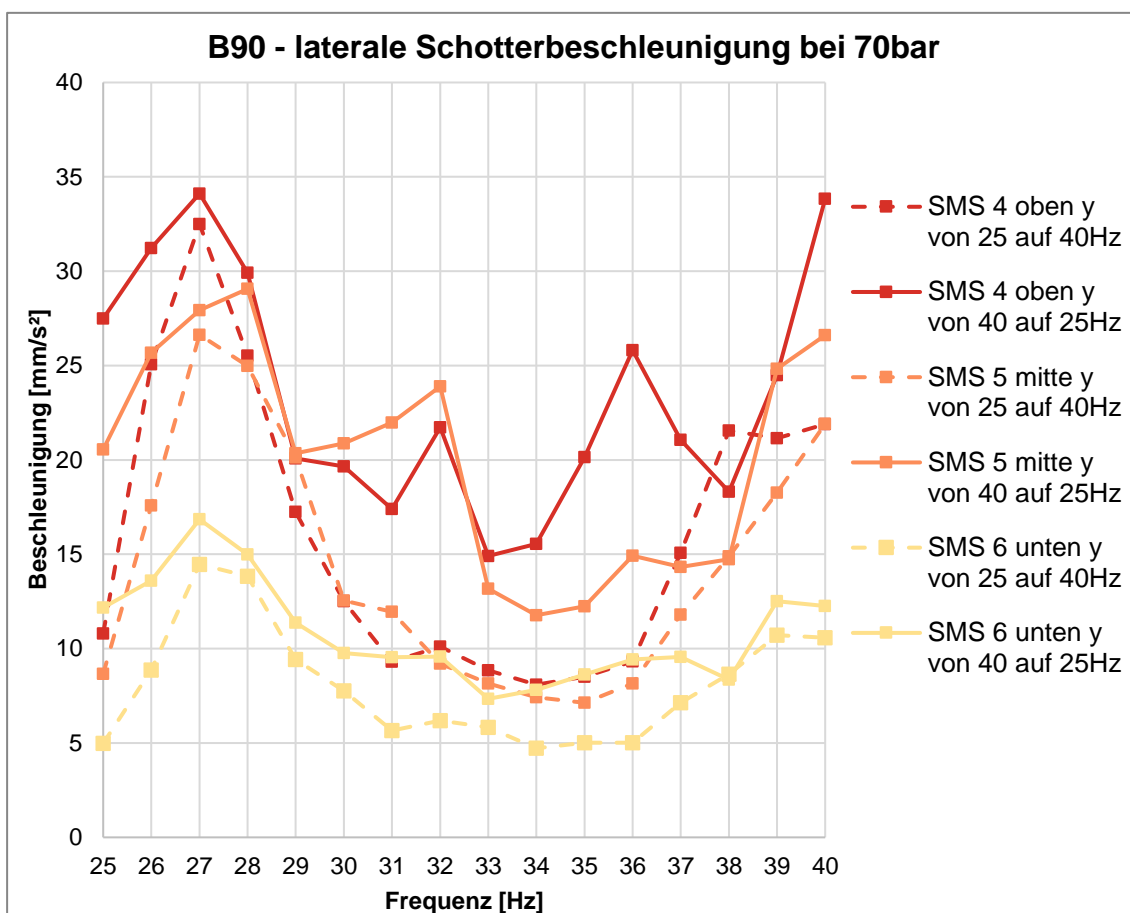


Abbildung 122: B90 laterale Schotterbeschleunigung bei 70 bar in Abh. der Frequenz

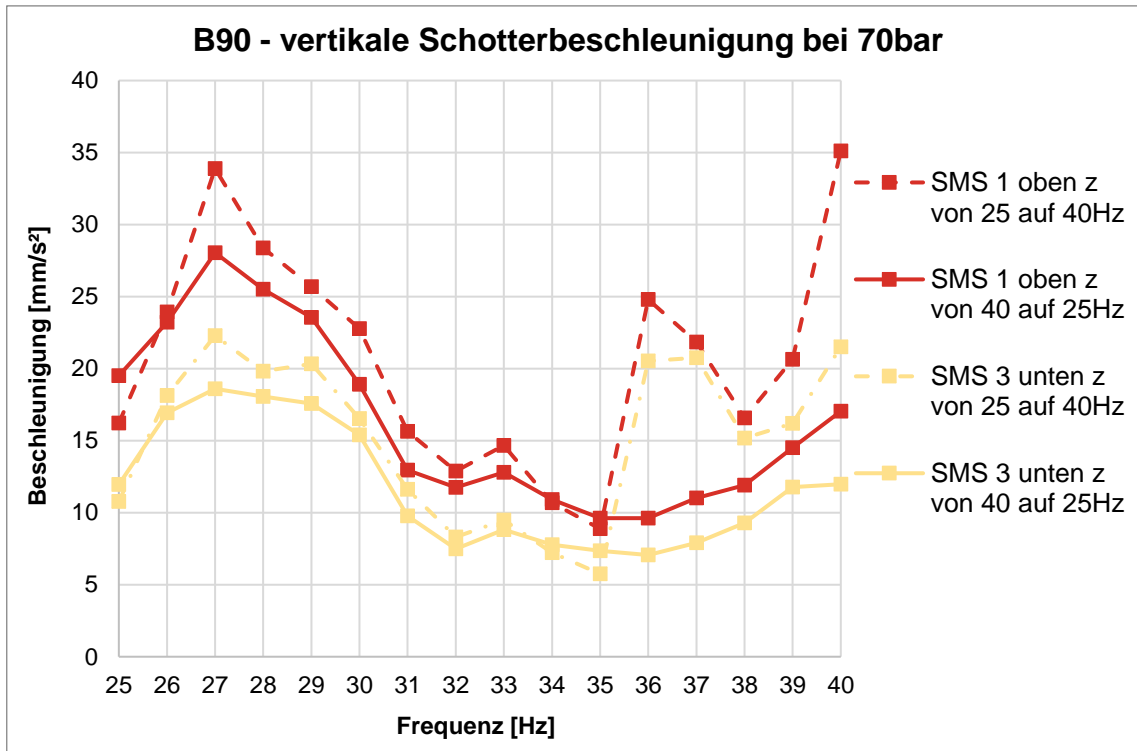


Abbildung 123: B90 vertikale Schotterbeschleunigung bei 70 bar in Abh. der Frequenz

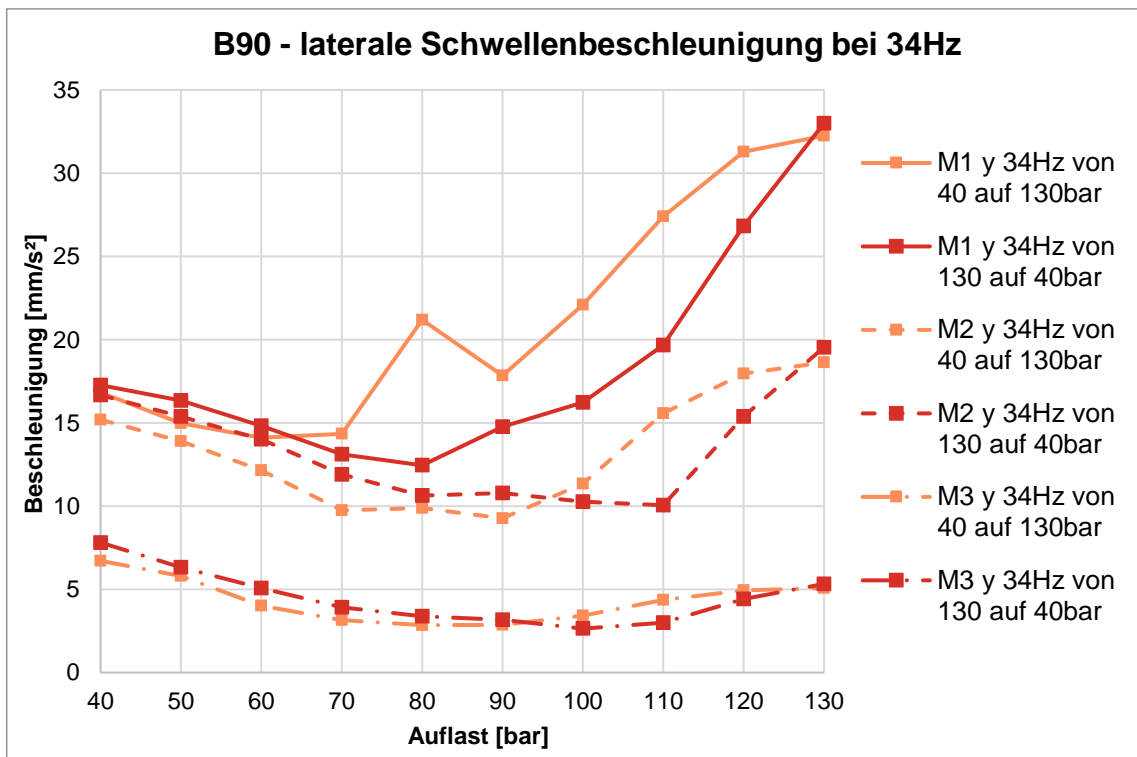


Abbildung 124: B90 laterale Schwellenbeschleunigung bei 34 Hz in Abh. der Auflast

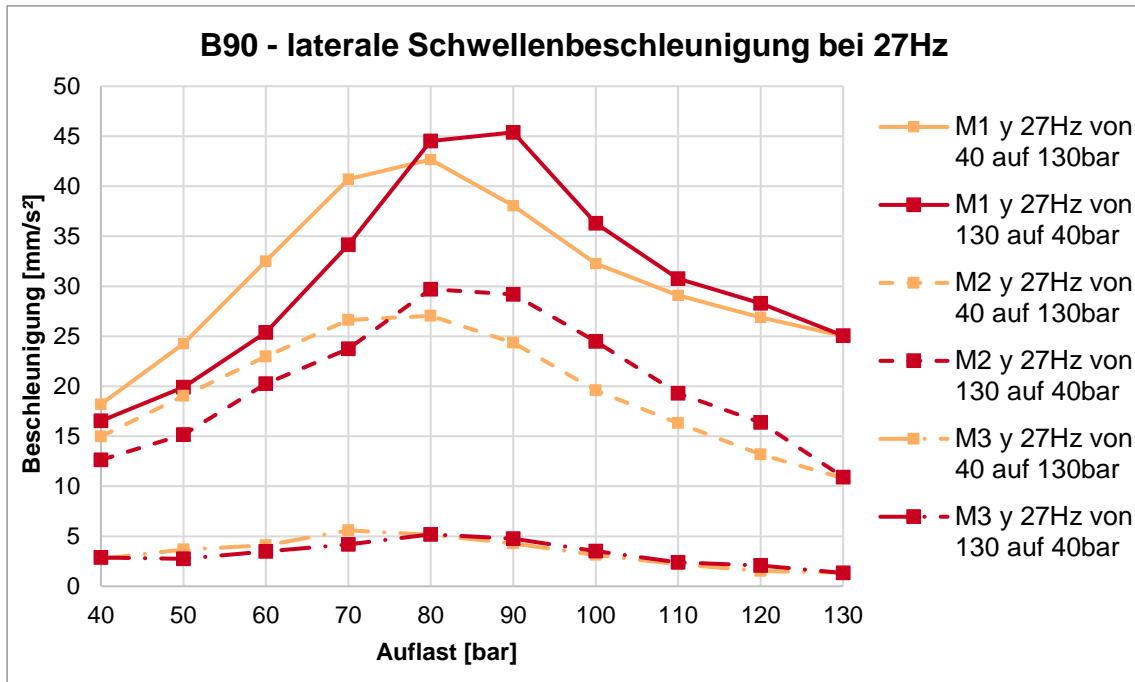


Abbildung 125: B90 laterale Schwellenbeschleunigung bei 27 Hz in Abh. der Auflast

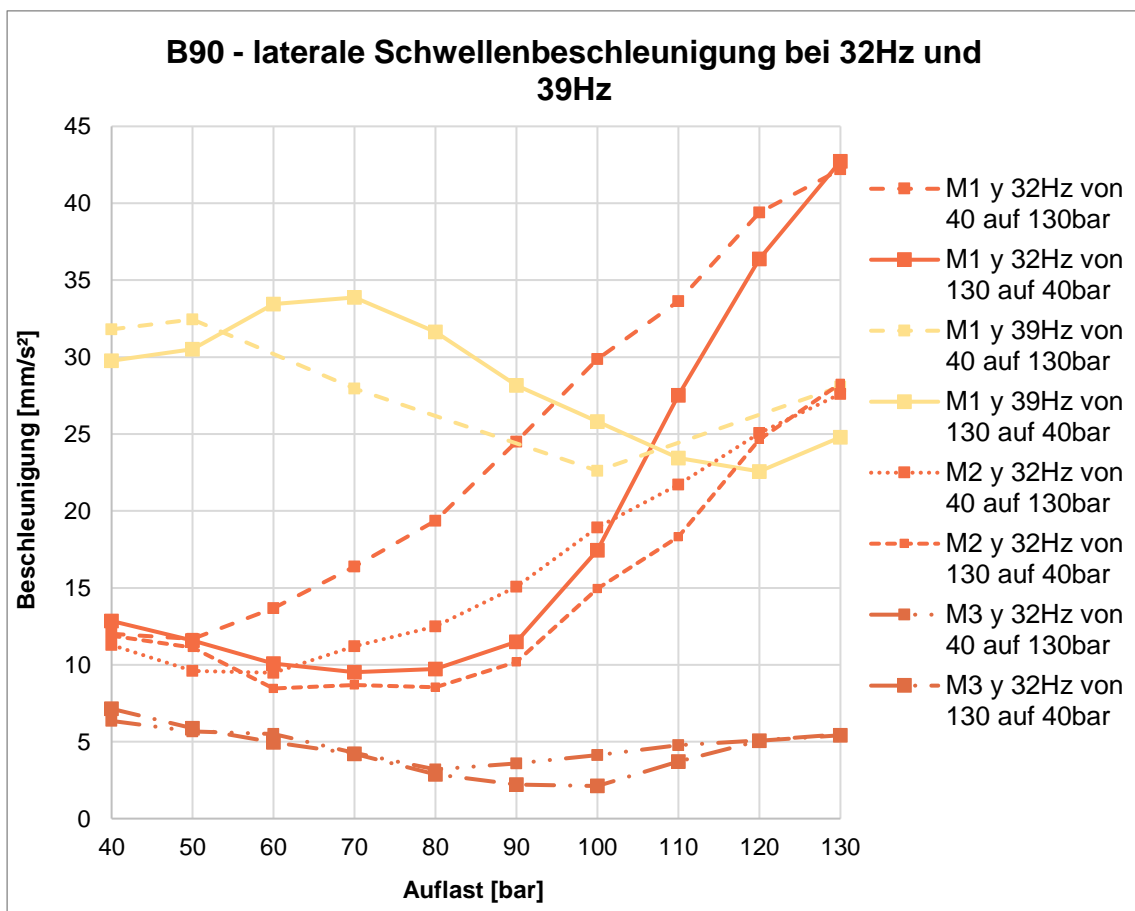


Abbildung 126: B90 laterale Schwellenbeschleunigung bei 32 Hz und 39 Hz in Abh. der Auflast

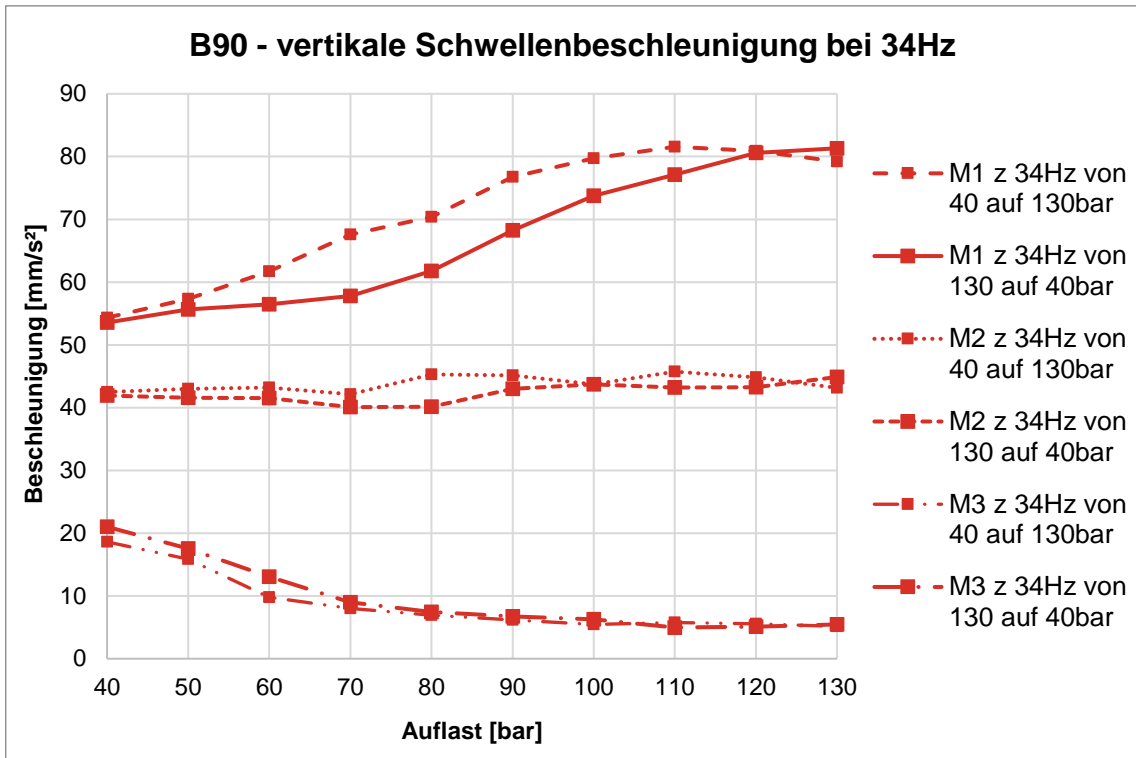


Abbildung 127: B90 vertikale Schwellenbeschleunigung bei 34 Hz in Abh. der Auflast

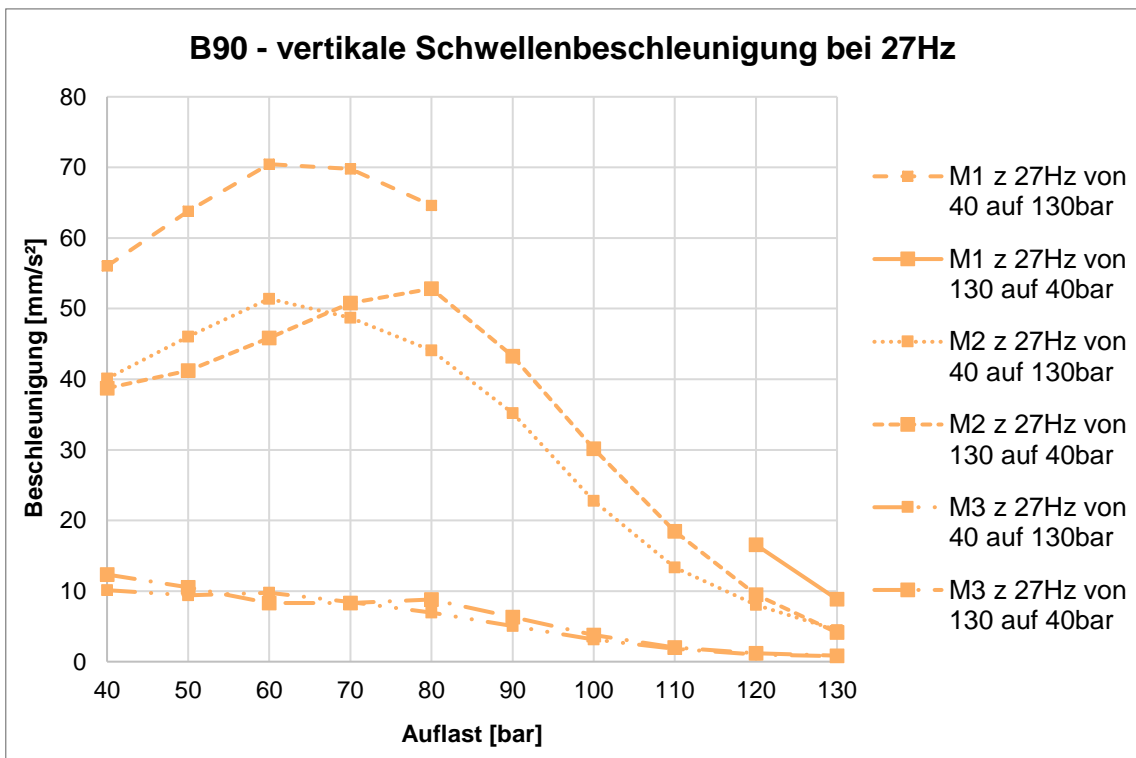


Abbildung 128: B90 vertikale Schwellenbeschleunigung bei 27 Hz in Abh. der Auflast

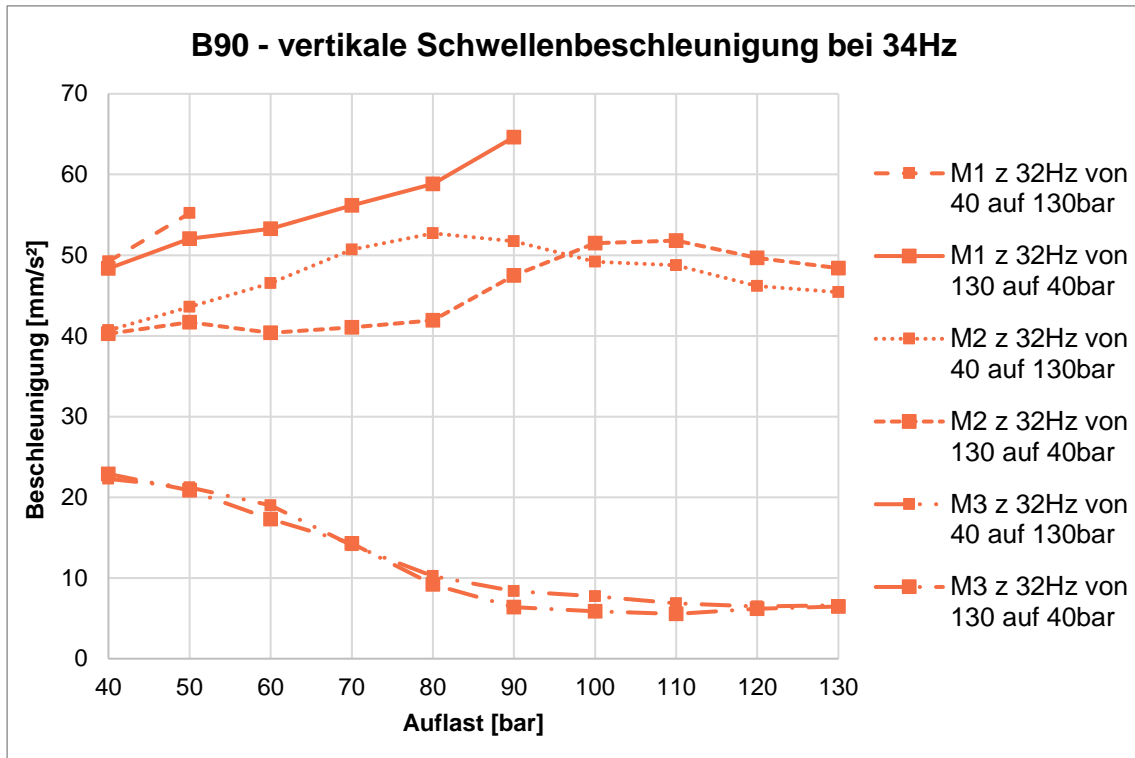


Abbildung 129: B90 vertikale Schwellenbeschleunigung bei 32 Hz in Abh. der Auflast

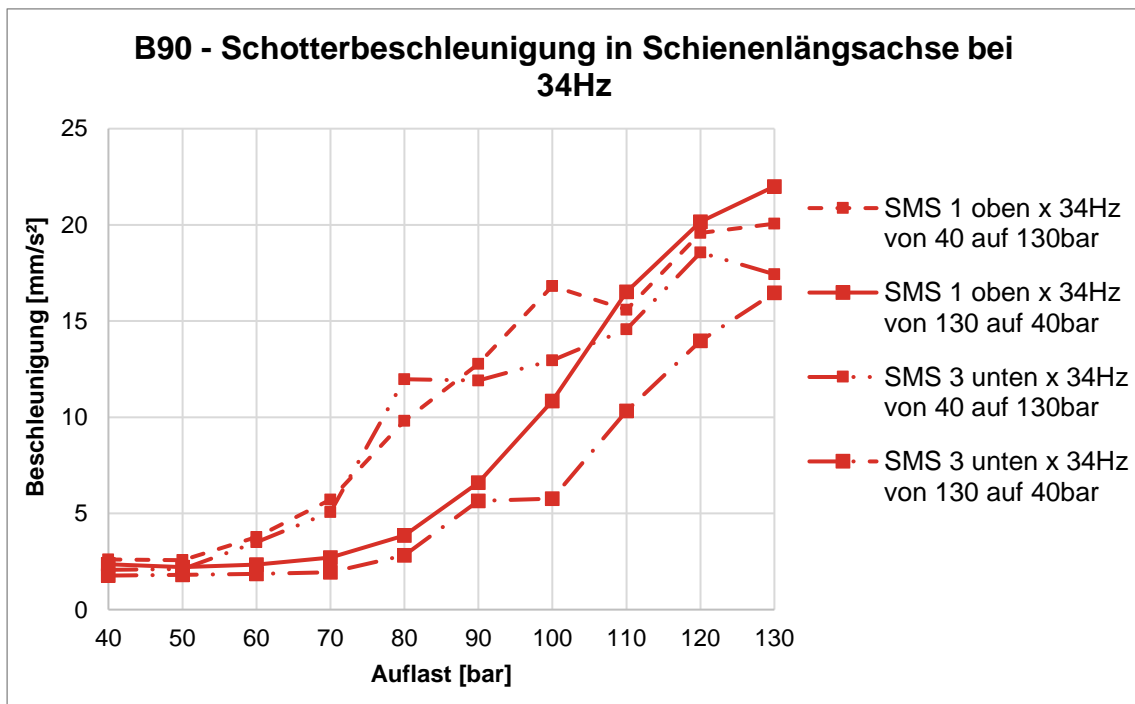


Abbildung 130: B90 Schotterbeschleunigung in Schienenlängsachse bei 34 Hz in Abh. der Auflast

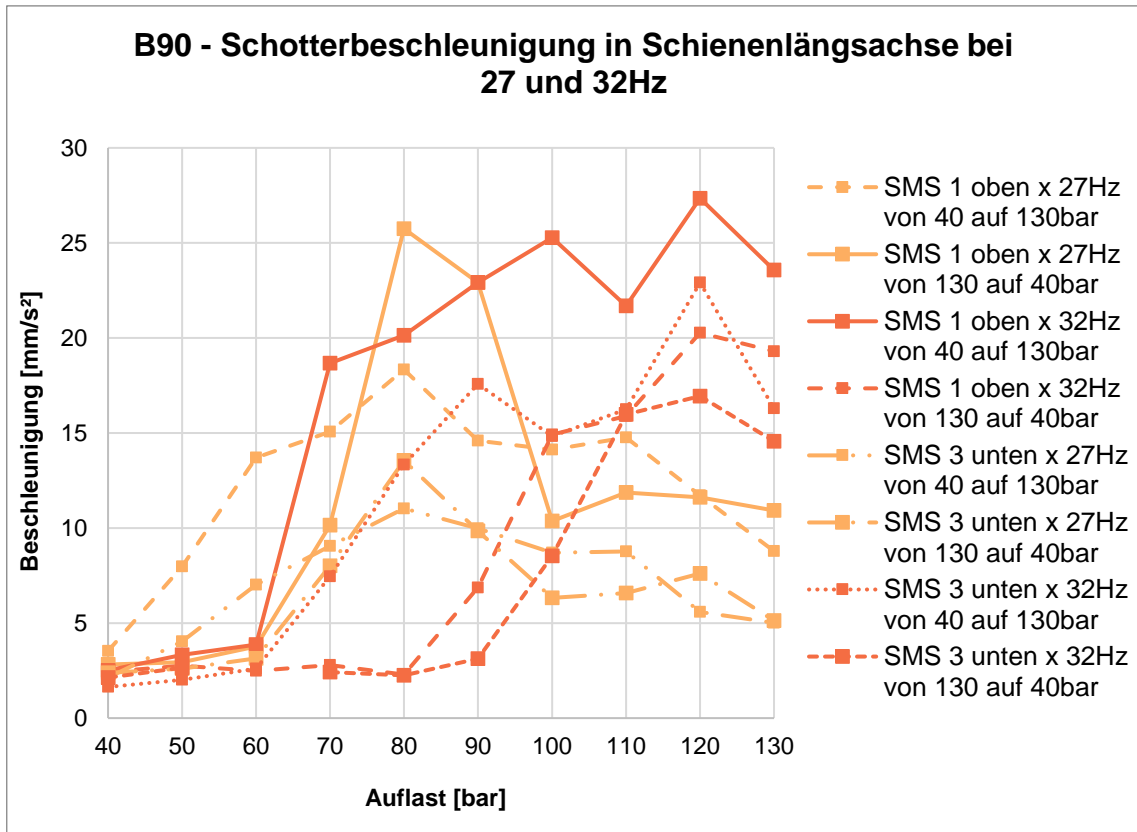


Abbildung 131: B90 Schotterbeschleunigung in Schienenlängsachse bei 27 Hz und 32 Hz in Abh. der Auflast

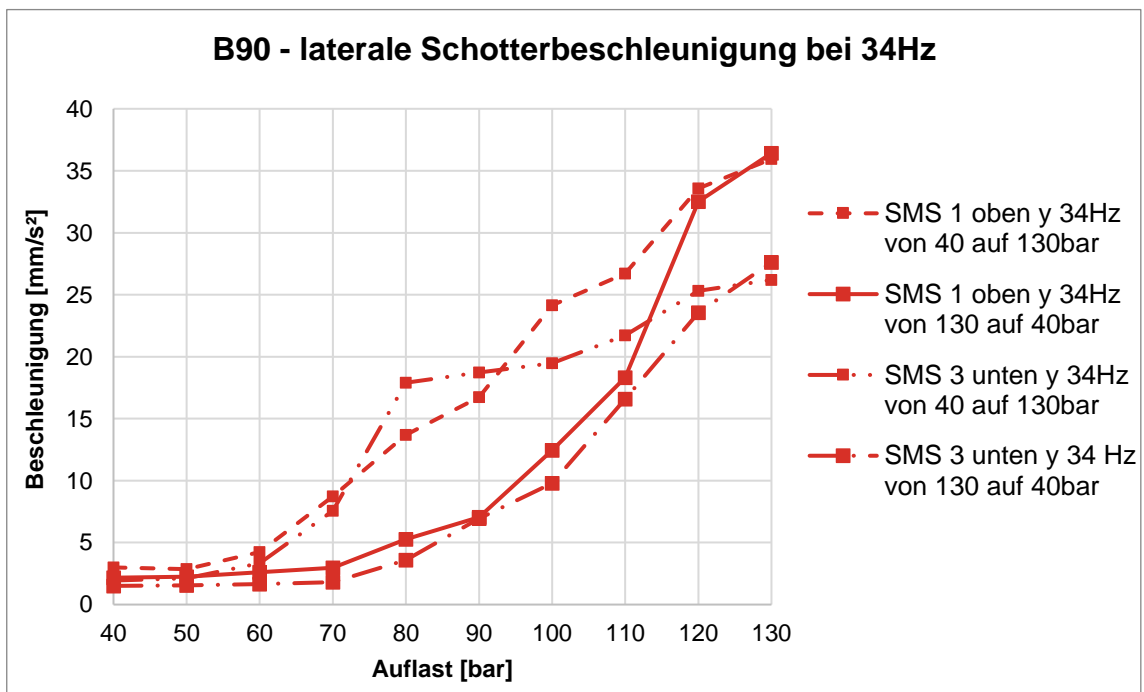


Abbildung 132: B90 laterale Schotterbeschleunigung bei 34 Hz in Abh. der Auflast

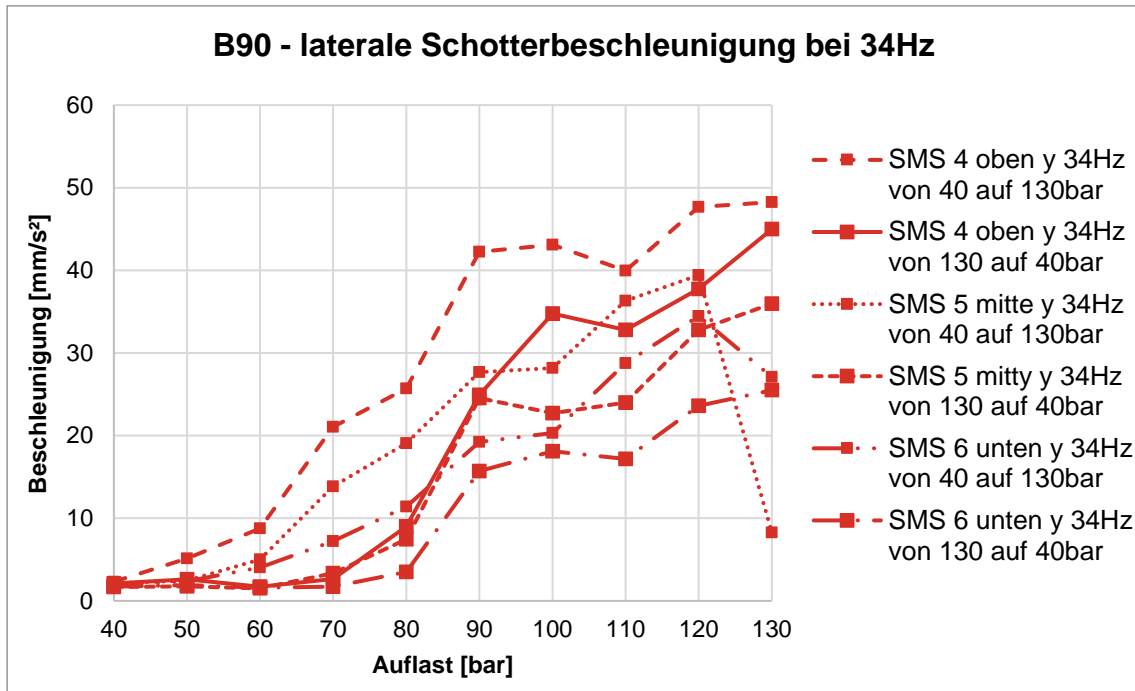


Abbildung 133: B90 laterale Schotterbeschleunigung bei 34 Hz in Abh. der Auflast

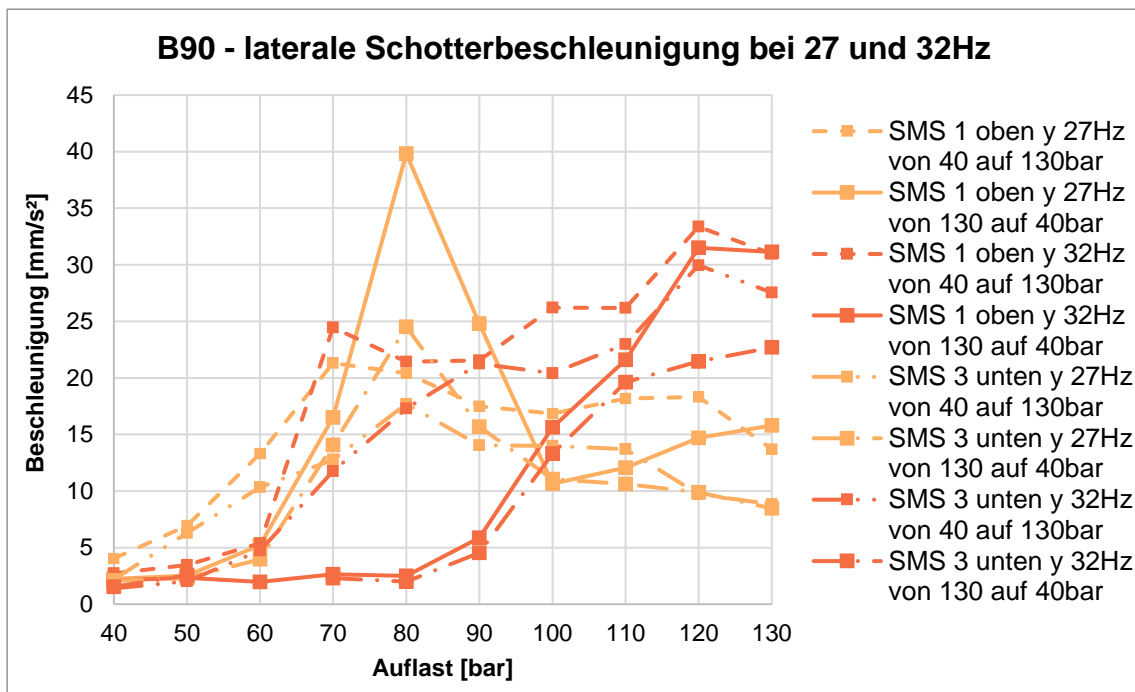


Abbildung 134: B90 laterale Schotterbeschleunigung bei 27 Hz und 32 Hz in Abh. der Auflast

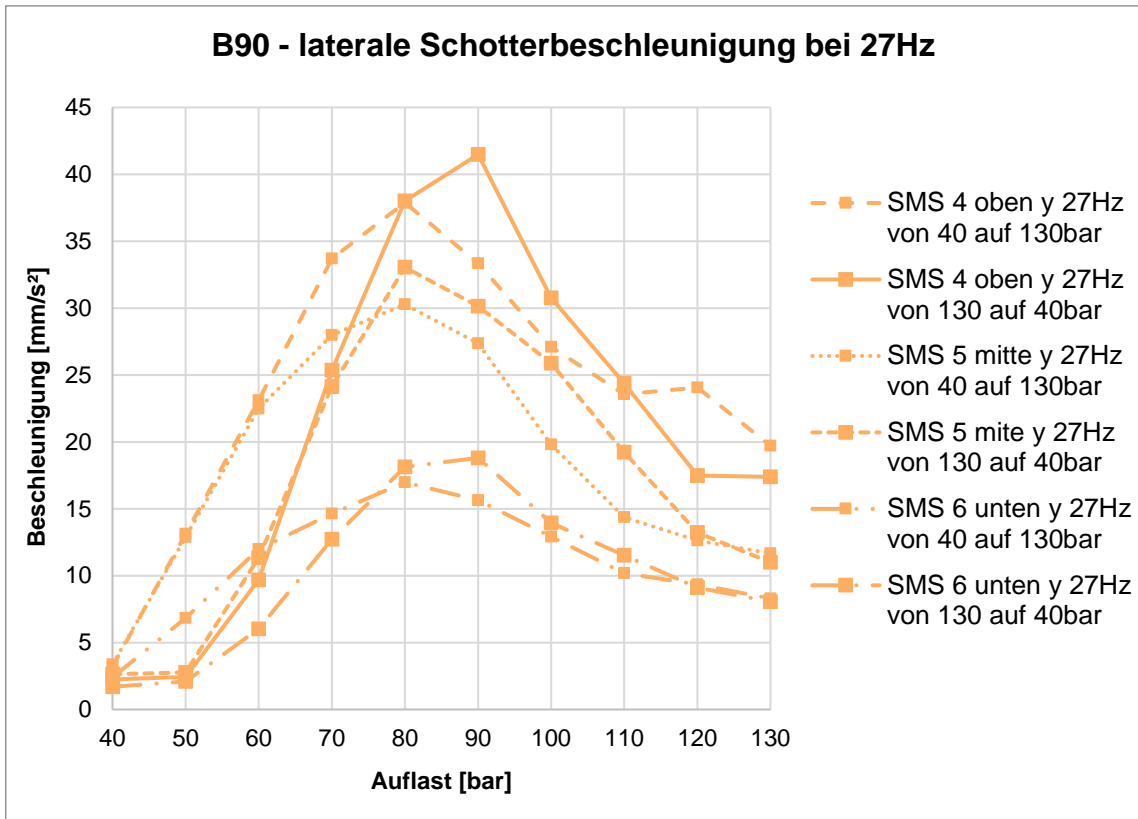


Abbildung 135: B90 laterale Schotterbeschleunigung bei 27 Hz in Abh. der Auflast

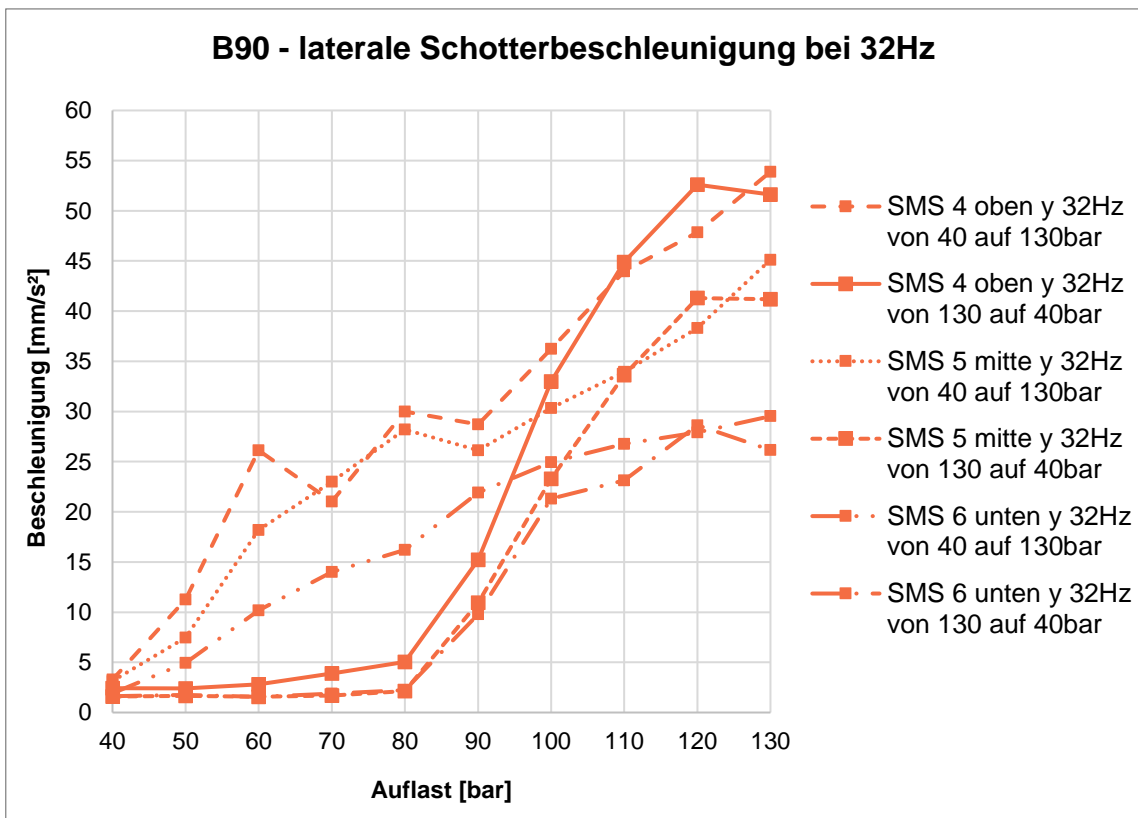


Abbildung 136: B90 laterale Schotterbeschleunigung bei 32 Hz in Abh. der Auflast

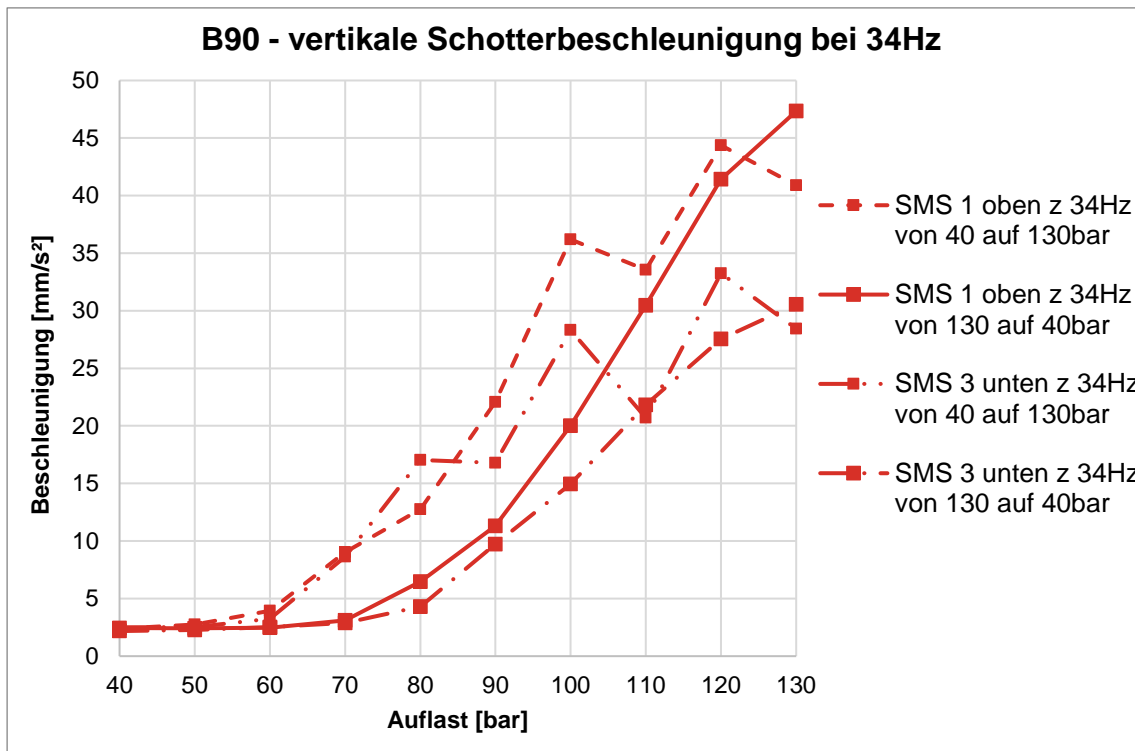


Abbildung 137: B90 vertikale Schotterbeschleunigung bei 34 Hz in Abh. der Auflast

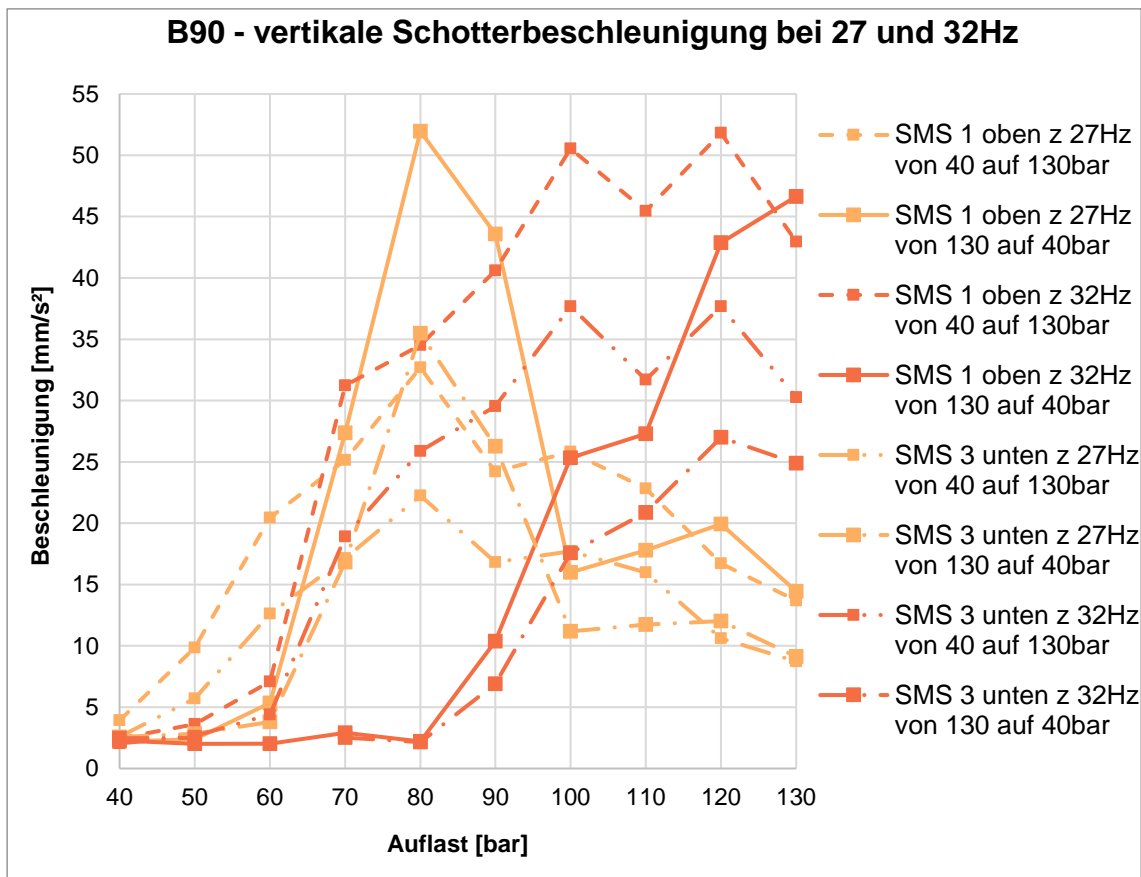


Abbildung 138: B90 vertikale Schotterbeschleunigung bei 27 Hz und 32 Hz in Abh. der Auflast

A.11 Ergebnisse aus der Dehnungsmessung im Labor

Tabelle 76: Korrekturfaktor aus der Schwellendehnung auf unkonsolidiertem Schotter zu den Schwellendehnungen auf konsolidiertem Schotter

Schwellendehnung in [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Schwellen Nr.						
	2	3	4	5	6	7	8
auf unkonsolidiertem Schotter bei 70 bar	36,6	59,8	65,2	68,3	69,9	41,4	28,7
auf unkonsolidiertem Schotter bei 130 bar	39,4	74,1	79,5	77,0	78,1	50,9	32,3
auf konsolidiertem Schotter unter Verkehrsbelastung	10,7	21,4	12,8	9,3	12,9	10,2	4,6
Korrekturfaktor für Auflast 70 bar	3,4	2,8	5,1	7,3	5,4	4,1	6,2
Korrekturfaktor für Auflast 130 bar	3,7	3,5	6,2	8,3	6,0	5,0	6,9

Tabelle 77: maximale Dehnung aus der horizontalen dynamischen Beanspruchung

Versuchsaufbau	Schwelle Nr.	2	3	4	5	6	7	8
B70 34Hz 70bar	Pos1	88,6	24,2	11,0	9,5	94,9	15,5	7,6
	Pos2	189,4	35,7	39,6	17,9	15,4	13,5	20,2
	Pos1+Pos2	278,1	59,9	50,6	27,4	110,3	29,0	27,7
B70 30Hz 70bar	Pos1	9,7	146,2	5,1	2,7	13,1	8,6	14,8
	Pos2	18,3	81,3	13,5	1,6	11,3	56,9	30,9
	Pos1+Pos2	28,0	227,5	18,6	4,3	24,3	65,4	45,8
B07 So 34Hz 70bar	Pos1	18,2	129,9	5,7	8,9	15,1	22,9	3,4
	Pos2	17,4	9,7	22,1	12,0	12,7	38,8	56,8
	Pos1+Pos2	35,6	139,6	27,7	20,9	27,9	61,7	60,2
B07 So 27Hz 70bar	Pos1	20,2	44,6	9,6	6,7	7,2	6,5	6,1
	Pos2	17,7	7,3	6,2	8,7	13,1	77,5	781,9
	Pos1+Pos2	37,8	52,0	15,7	15,4	20,3	83,9	788,0
B07 So 34Hz 130bar	Pos1	11,0	31,8	4,2	4,1	4,1	5,2	2,6
	Pos2	18,4	43,2	58,8	44,4	32,6	11,8	23,6
	Pos1+Pos2	29,4	75,1	62,9	48,5	36,7	16,9	26,1
B90 34Hz 70bar	Pos1	181,8	38,1	29,2	11,7	9,5	7,2	1,7
	Pos2	110,9	29,2	7,1	16,6	32,7	34,3	18,8
	Pos1+Pos2	292,7	67,3	36,3	28,4	42,2	41,5	20,4
B90 27Hz 70bar	Pos1	7,1	7,7	9,7	11,4	14,7	3,5	2,4
	Pos2	8,6	3,8	4,0	9,8	2,3	4,2	10,7
	Pos1+Pos2	15,7	11,5	13,8	21,1	17,0	7,7	13,2
B90 34Hz 130bar	Pos1	17,5	7,7	6,4	3,8	11,6	14,0	2,7
	Pos2	18,2	5,9	9,8	3,9	10,2	14,8	40,8
	Pos1+Pos2	35,6	13,6	16,2	7,7	21,8	28,7	43,4

Tabelle 78: Ergebnisse des Kalibrierungsversuchs der einzelnen B70 Schwellen

Schwellen Nr.:	Dehnung [$\mu\text{m}/\text{m}$] der B70 Schwelle					
	aus Belastungsvorgang			aus Entlastungsvorgang		
	5	6	7	5	6	7
20 kN	185,81	186,21	179,2	187,65	187,53	199,74
F_{Con}	311,7	304,45	294,4	314,36	306,6	296,6
$k_t \times F_{\text{Con}}$	459,82	422,05	438,09	466,7	448,5	439,91

Tabelle 79: Ergebnisse des Kalibrierungsversuchs der einzelnen B07 So Schwellen

Schwellen Nr.:	Dehnung [$\mu\text{m}/\text{m}$] der B07 So Schwelle					
	aus Belastungsvorgang			aus Entlastungsvorgang		
	2	4	5	2	4	5
20 kN	176,8	175,1	180,5	177,6	175,9	181,9
F_{Con}	343,9	331,1	343,1	350,7	337,6	349,2
$k_t \times F_{\text{Con}}$	572,4	585,7	580,1	612,0	608,5	601,0

Tabelle 80: Ergebnisse des Kalibrierungsversuchs der einzelnen B90 Schwellen

Schwellen Nr.:	Dehnung [$\mu\text{m}/\text{m}$] der B90 Schwelle					
	aus Belastungsvorgang			aus Entlastungsvorgang		
	4	5	6	4	5	6
20 kN	170,7	188,8	187,2	172,3	190,3	188,5
F_{Con}	335,5	355,3	343,8	343,5	360,7	346,4
$k_t \times F_{\text{Con}}$	531,8	628,9	658,0	540,0	662,9	675,6

Tabelle 81: Schwellenauslastung der B70 Schwelle durch den DGS bezogen auf die charakteristische Prüfkraft und die Mindestprüfkraft zur Erstrissbildung

Versuchsaufbau	Vergleichskraft	Schwellenauslastung durch dynamische Stabilisation für Schwellen Nr.						
		2	3	4	5	6	7	8
B70 34Hz 70bar	F_{Con} (32 kN)	25%	45%	117%	83%	113%	28%	39%
	$k_t \times F_{\text{Con}}$ (43 kN)	17%	31%	81%	58%	78%	19%	27%
B70 30Hz 70bar	F_{con} (32 kN)	25%	100%	71%	53%	60%	77%	70%
	$k_t \times F_{\text{con}}$ (43 kN)	17%	69%	49%	37%	41%	53%	48%

Tabelle 82: Schwellenauslastung der B07 So Schwelle durch den DGS bezogen auf die charakteristische Prüfkraft und die Mindestprüfkraft zur Erstrissbildung

Versuchsaufbau	Vergleichskraft	Schwellenauslastung durch dynamische Stabilisation für Schwellen Nr.						
		2	3	4	5	6	7	8
B07 So 34Hz 70bar	F _{Con} (35 kN)	31%	59%	73%	38%	73%	31%	27%
	k _i x F _{Con} (49 kN)	18%	34%	43%	22%	43%	18%	16%
B07 So 27Hz 70bar	F _{con} (35 kN)	31%	34%	42%	52%	32%	52%	27%
	k _i x F _{Con} (49 kN)	18%	20%	24%	30%	19%	30%	16%
B07 So 34Hz 130bar	F _{con} (35 kN)	20%	44%	42%	37%	34%	20%	17%
	k _t x F _{con} (49 kN)	12%	26%	25%	22%	20%	12%	10%

Tabelle 83: Schwellenauslastung der B90 Schwelle durch den DGS bezogen auf die charakteristische Prüfkraft und die Mindestprüfkraft zur Erstrissbildung

Versuchsaufbau	Vergleichskraft	Schwellenauslastung durch dynamische Stabilisation für Schwellen Nr.						
		2	3	4	5	6	7	8
B90 34Hz 70bar	F _{Con} (35 kN)	25%	36%	92%	25%	35%	19%	44%
	k _i x F _{Con} (49 kN)	14%	21%	53%	14%	20%	11%	25%
B90 27Hz 70bar	F _{con} (35 kN)	23%	22%	74%	70%	96%	58%	31%
	k _t x F _{con} (49 kN)	13%	12%	42%	40%	55%	33%	17%
B90 34Hz 130bar	F _{con} (35 kN)	49%	42%	61%	28%	20%	60%	61%
	k _t x F _{con} (49 kN)	28%	24%	35%	16%	12%	34%	35%

A.12 Ergebnisse der Simulation der Überfahrt des DGS

Die Koordinate x ist in Schienenlängsrichtung, die Koordinate y in Schwellenlängsrichtung (lateral) und die Koordinate z in vertikaler Richtung definiert.

Tabelle 84: Werte des maximalen gleitenden Effektivwertes des Schottermesssteins 8 cm unter der Schwellenunterkante in Schwellenmitte der Schwelle-Nr. 6

	Max. gleitender Effektivwert [m/s ²] Schwellenmitte der Schwelle-Nr. 6		
	x-Richtung	y-Richtung	z-Richtung
B70 34Hz 70bar	3,7	7,5	4,3
B70 30Hz 70bar	4,8	7,5	6,2
B07 So 34Hz 70bar	3,8	7,5	4,8
B07 So 27Hz 70bar	1,6	3,3	2,0
B07 So 34Hz 130bar	1,9	4,6	2,8
B90 34Hz 70bar	4,0	7,3	5,4
B90 27Hz 70bar	2,3	4,6	3,2
B90 34Hz 130bar	4,7	10,9	5,4

Tabelle 85: Werte des maximalen gleitenden Effektivwertes im Schwellenfach der Schwelle-Nr. 5 und 6 unterhalb der Schiene

	Max. gleitender Effektivwert [m/s ²] im Schwellenfach der Schwelle-Nr. 5 und 6 unterhalb der Schiene		
	x-Richtung	y-Richtung	z-Richtung
B70 34Hz 70bar	4,2	8,5	6,2
B70 30Hz 70bar	3,4	6,7	4,5
B07 So 34Hz 70bar	3,0	5,1	3,6
B07 So 27Hz 70bar	2,1	3,8	1,8
B07 So 34Hz 130bar	2,2	3,9	2,0
B90 34Hz 70bar	4,1	5,4	3,5
B90 27Hz 70bar	1,4	2,6	1,0
B90 34Hz 130bar	2,7	6,5	3,7

Tabelle 86: Werte des maximalen gleitenden Effektivwertes im Schotter vor Kopf

	Max. gleitender Effektivwert [m/s ²] im Schotter vor Kopf		
	x-Richtung	y-Richtung	z-Richtung
B70 34Hz 70bar	4,3	14,7	6,0
B70 30Hz 70bar	3,1	5,7	5,6
B07 So 34Hz 70bar	2,7	5,1	2,9
B07 So 27Hz 70bar	2,3	3,5	3,1
B07 So 34Hz 130bar	3,6	5,5	3,0
B90 34Hz 70bar	4,4	7,2	7,0
B90 27Hz 70bar	2,0	4,4	3,4
B90 34Hz 130bar	1,9	6,0	3,5

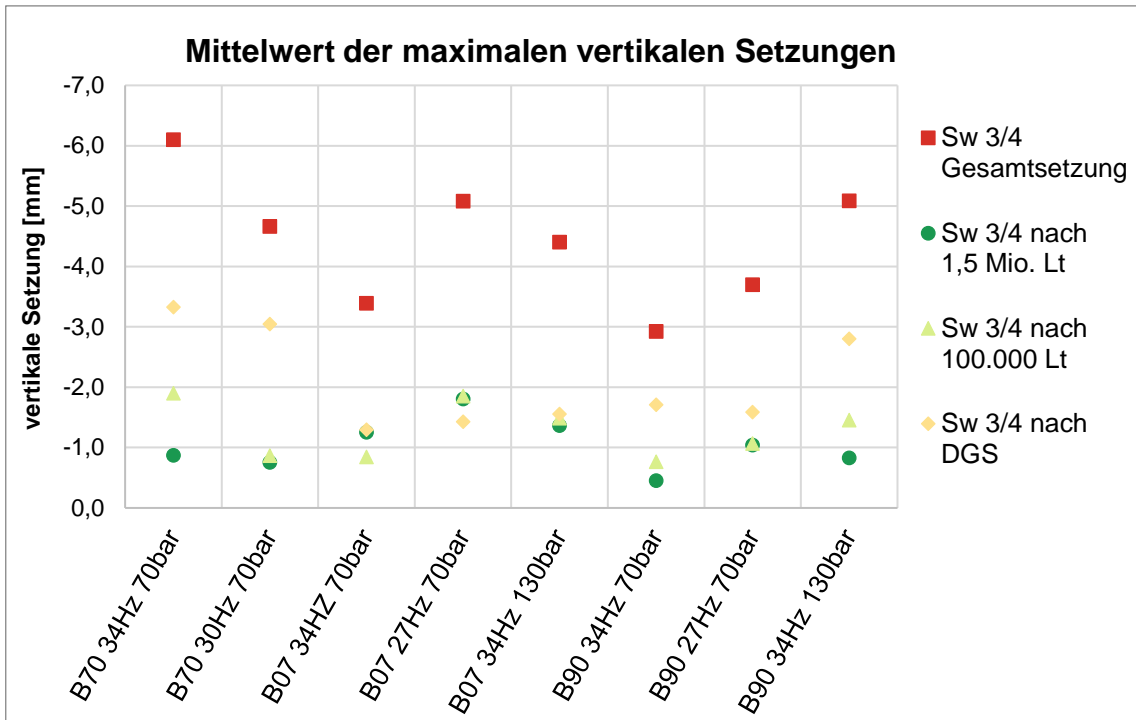


Abbildung 139: Mittelwert der maximalen vertikalen Setzung der Schwelle 3 und 4 (Sw 3/4)