

LO 2024 P4 2.3

Systemführerschaft Interaktion Fahrzeug – Fahrweg Meterspur

Projekt: 4 Fahrbahnsteifigkeit

Modul: 2: Dynamisches Fahrbahnmodell

Beschreibung der Eingangsparameter und Darstellung der Fahrbahn in den dynamischen Modellen



ID:	RAILPlusSF-00048	
Datum / Status:	25.11.2024 / Freigegeben	Seitenanzahl 54
Verfasser:	Matthias Landgraf / evias	
Mitwirkende	Josef Fuchs, Felix Platzer, Blasius Buchegger (Virtual Vehicle), Thomas Meier, Valentin Schäl (Baugrund Dresden)	
Geprüft:	Peter Güldenapfel / KPZ Fahrbahn, Roland Müller / Gleislauftechnik Müller	
Freigegeben:	Martin Siegen / MGBahn	

Zitierweise: Landgraf, Matthias, RAILplus: *Beschreibung der Eingangsparameter und Darstellung der Fahrbahn in den dynamischen Modellen*. Technischer Bericht, RAILPlusSF-00048, 25. Nov. 2024

Änderungsverzeichnis

Version	Datum	Verantwortlich	Beschreibung
0.1	31.10.2024	M. Landgraf	Erster Entwurf
0.2	20.11.20204	M. Landgraf	Bereinigter Entwurf
0.3	25.11.2024	M. Landgraf	Bericht redigiert und finalisiert
0.4	09.12.2024	M. Landgraf	Bericht inklusive überarbeiteter Management Summary
0.5	15.12.2024	M. Landgraf	Management Summary bereinigt
1.0	20.12.2024	M. Siegen	Schlussbereinigung und Freigabe durch Projektleiter

Freigabe durch die Systemführerschaft

Version	Verantwortlich	Datum
1.0	Technical Board	05.12.2024

Öffentlichkeitsgrad

Öffentlich

Abkürzungsverzeichnis

Abk.	Abkürzung
FBI	Flexible Body Interface
FEM	Finite Elemente Modell/Methode
FMI	Fräss-Misch-Injektion (Verfahren)
LCC	Lebenszykluskosten (Life Cycle Costs)
MGB	Matterhorn-Gotthard-Bahn
MKS	Mehrkörper-Simulation
PSS	Planumsschutzschicht
SID	Standard Input Data
SKK	Schienenkopfkonditionierung
tpf	Transports publics fribourgeois
VÖV	Verband öffentlicher Verkehr

Glossar

Wort	Beschreibung
AC Rail	Bituminöse Sperrschicht zwischen Unterbau und Oberbau (Schotter-schicht)

Management Summary

Im Rahmen von RAILplus werden innerhalb des Teilprojektes «P4 Fahrbahnsteifigkeit» unterschiedliche Modelle erarbeitet, um den Einfluss gewählter Komponenten auf das Fahrbahnverhalten quantifizieren zu können. Das vorliegende Lieferobjekt beschreibt die Simulationsmodelle und dient insbesondere dazu, die erwarteten Ergebnisse seitens der Fahrbahn strukturiert zu dokumentieren und die dafür von P4 notwendigen Eingangsparameter darzustellen. Die Entwicklung der Modelle konnte 2024 abgeschlossen werden, daher umfasst dieses Lieferobjekt auch die finalisierte Abstimmung der 2025 durchzuführenden Parameterkombinationen. Die massgebenden Erkenntnisse sind dementsprechend 2025 zu erwarten, bereits vorliegende Erkenntnisse sind in diesem Dokument angeführt.

Generell kann in Fahrbahnmodelle unterschieden werden, welche den Verschleiss sowie die Lärmentstehung an der Schienenoberfläche simulieren und Modelle, welche das Untergrundverhalten bei unterschiedlicher Baugrundbeschaffenheit bewerten. Dabei werden die Auswirkungen unterschiedlicher Fahrbahnkomponenten auf den Schienenverschleiss, die Lärmentstehung (Fokus Kurvenkreischen) sowie die langfristige Gleislagestabilität untersucht. Abbildung 1 stellt einen Überblick der Modelle dar und geht dabei auf die jeweiligen Ziele, zentralen Fragestellungen sowie getroffene Annahmen bzw. Limitierungen ein.

	Ziele	Zentrale Fragestellungen	Annahmen/ Limitierungen
Statisch Feste Parameter, vereinfachte Annahmen zur Belastung.	 Quasi-statischer Schienenoberflächenverschleiss	Quantitativer Einfluss von <ul style="list-style-type: none"> - Belastung, Radius, - Schienenprofil, Schienengüte, - Spurweite/ Einbauneigung auf Verschleiss. 	<ul style="list-style-type: none"> - Wahl der Schienenstahlgüte - Einfluss der Achslast/ Achsabstand? - Nominalprofil vs. Verschleissprofil? - Spurenerweiterung sinnvoll? Der direkte Einfluss von <ul style="list-style-type: none"> - Zwischenlagen - Schwellentyp - Schotterbett/ Untergrund auf den statischen Verschleiss wird als vernachlässigbar angenommen.
	 Dynamischer Schienenoberflächenverschleiss	Quantitativer Einfluss von <ul style="list-style-type: none"> - Belastung, Radius, - Schienenprofil, Schienengüte, - Zwischenlagen, - Verhalten der (bes.) Betonschwelle, - Spurweite/ Einbauneigung auf die Schlupfwellenentwicklung. 	<ul style="list-style-type: none"> - Wahl der Schienenstahlgüte - Optimale Zwischenlage? - Einfluss der Achslast/ Achsabstand? - Nominalprofil vs. Verschleissprofil? - Spurenerweiterung sinnvoll?
Dynamisch Berücksichtigung zeitabhängiger Belastungen und wechsellwirkende Kräfte.	 Lärmmodell (Fokus Kurvenkreischen)	Quantitativer Einfluss von <ul style="list-style-type: none"> - Belastung, Radius, - Schienengüte, - Zwischenlagen, - Verhalten der Betonschwelle und - Spurweite/ Einbauneigung auf Entstehung des Kurvenkreischen. 	<ul style="list-style-type: none"> - Kann die Fahrbahn das Kurvenkreischen durch Komponentenwahl minimieren? - Wenn ja, welche Komponenten sollten eingesetzt werden? - Spurenerweiterung sinnvoll? <ul style="list-style-type: none"> - Schiene (Profil & Güte), Zwischenlagen und Schwellentyp wird als „Gesamtmobilität“ berücksichtigt und als solche variiert. - Besolung, Schotterbett, Untergrund, Gleislage als nicht relevant definiert.
	 Baugrundmodell	Quantitativer Einfluss von <ul style="list-style-type: none"> - Belastung, - Elastischer Elemente, - unterschiedlicher Schwellentypen - Baugrundqualität auf Scherdehnungen und Spannungsverteilungen im Untergrund. 	<ul style="list-style-type: none"> - Langfristiges Gleislageverhalten bei unterschiedlichem Untergrund? - Unterbausanierung bei tiefliegendem schlechtem Baugrund ausreichend? - Können elastische Oberbauelemente die eingebrachten Spannungen an der Planie verringern?

Abbildung 1: Übersicht der Modelle, Ziele, Fragestellungen und Annahmen/Limitierungen

Im Jahr 2025 sind die Parametervariationen in den einzelnen Modellen seitens Virtual Vehicle vorgesehen, um den Einfluss unterschiedlicher Komponenten und Randbedingungen auf den Verschleiss bzw. die Lärmentwicklung quantifizieren zu können. Abbildung 2 zeigt dabei einen Überblick der in diesem Jahr abgestimmten Parametervariationen. Die ausgewählten Variationen wurden Ende des Jahres noch einer Priorisierung unterzogen, um die Arbeiten auf die wesentlichen Fragestellungen zu fokussieren sowie zu vermeiden, etwaige zeitaufwändige Variationen durchzuführen, bei welchen kein signifikanter Einfluss auf die Erkenntnisse erwartet wird. Oberste Priorität weisen für sämtliche Modelle die Analyse der Belastung, des Radius, der Schienenwahl (Güte und Profil) sowie der Spurweite bzw. Einbauneigung auf. Die Variation der Zwischenlagen und Schwellentypen erfolgt je nach Sinnhaftigkeit in den Modellen.

	Verschleiss statisch	Verschleiss dynamisch	Lärm (Kurvenkreischen)
Belastung ¹	✓ Fahrzeuge Adler und Komet (Oberbaubeanspruchung und fahrdynamisches Verhalten).	✓ Fahrzeuge Adler und Komet (Oberbaubeanspruchung und fahrdynamisches Verhalten).	✓ Fahrzeuge Adler und Komet (fahrdynamisches Verhalten)
Radius ¹	✓ Wird abgebildet. Korrelation Verschleiß ~ Radien.	✓ Wird abgebildet. Korrelation Schlupfwellen ~ Radien.	✓ Radius wird in Modell abgebildet.
Schienenprofil ¹	✓ Variation Nominalprofile vs. Verschleißoptimiertes Profil RAILplus.	✓ Variation Nominalprofile vs. Verschleißoptimiertes Profil RAILplus.	✓ Profil wird in Simulation stationärer Kurvenfahrt variiert.
Schienenegüte ¹	✓ 260 vs. 350 vs. 400	✓ 260 vs. 350 vs. 400	✗ E-Modul gleich, damit Variation nicht sinnvoll
Zwischenlagen	✓ ³ Über Feder/Dämpfung variierbar. Befestigung ist implizit berücksichtigt.	✓ ¹ Über Feder/Dämpfung variierbar. Befestigung ist implizit berücksichtigt.	✗ ¹ Variation möglich, jedoch aufwendig. Vermutlich wenig Relevanz.
Schwellentyp	✗ ³ Messungen Beton, keine Variation geplant. (Möglich: Massenvariation)	✓ ¹ Betonschwelle als flexibler Körper modelliert (Hohlagensimulation). Keine Variation der Materialien.	✓ ¹ Vergleich Übertragungsverhalten Beton/Holz/Stahl.
Beschlung	✗ ³ Beschlung wird als separate Feder im Modell berücksichtigt.	✓ ² Beschlung als separate Feder im Modell. <u>Entscheidung der Umsetzung, sobald „Formationsrichtung“ bekannt.</u>	✗ ³ Keine Relevanz
Schotterbett	✓ ³ Kein Einfluss von Schotter/Untergrund erwartet.	✓ ² Kein Einfluss von Schotter/Untergrund erwartet.	✗ ³ Keine Relevanz
Untergrund	✓ ³ Kein Einfluss von Schotter/Untergrund erwartet.	✓ ² Kein Einfluss von Schotter/Untergrund erwartet.	✗ ³ Keine Relevanz
Spurweite/ Einbauneigung ¹	✓ Variation geplant. 1000mm 1005mm 1010mm	✓ Variation geplant. 1000mm 1005mm 1010mm	✓ Variation geplant. 1000mm 1005mm 1010mm
Gleislage ³	✓ Variation Gleislage wird durchgeführt. GL zu definieren.	✗ Variation (gut, „ruppig“) auf Basis GL möglich.	✗ Vermutlich keine Relevanz

✓ Vorgesehen
 ✓ Variierbar, nicht geplant
 ✗ Variierbar, kein Einfluss (erwartet)
 ✗ Nicht variierbar
 Priorität: 1 2 3

Abbildung 2: Abstimmung Virtual Vehicle und P4 in Hinblick auf Parametervariation in den Simulationsmodellen; Stand 09.12.2024

Im Rahmen des Untergrundmodells wurde 2024 die Nachweisführung der dynamischen Stabilität des Eisenbahnfahrwegs untersucht. Kann diese rechnerisch nicht gewährleistet werden, bedeutet dies, dass akkumulative Setzungen des Untergrunds nicht ausgeschlossen werden können. Dies kann langfristig zu einem erhöhten Instandhaltungsbedarf und etwaiger Nutzungsdauerverkürzung führen. Auf Basis des durch Baugrund Dresden erarbeiteten «2D Finite Elemente Untergrundmodells» konnten bereits in diesem Jahr erste Erkenntnisse gewonnen werden:

- Generell kann nachgewiesen werden, dass eine langfristige dynamische Stabilität bei tiefliegenden Weichschichten nicht ohne tiefgründige Massnahmen (Rüttelstopfen, Ort-betonsäulen, FMI-Verfahren, ...) sichergestellt werden kann. Den Kosten-Nutzen Nachweis derartiger Massnahmen gilt es projektspezifisch zu analysieren.
- Eine Reduktion der Achslasten und eine Verringerung der Zuggeschwindigkeit reduzieren die im Untergrund auftretenden Scherdehnungen merklich. Im Fall des schlechten Baugrunds tritt dieser Effekt noch sehr viel deutlicher auf.
- Der zur Verfügung gestellte schlechte Baugrund weist trotz Einbau einer PSS bereits bei einer Fahrgeschwindigkeit von 50 km/h eine Überschreitung des Grenzwerts der Scherdehnung in den oberen 3 Meter unter Schwellenunterkante auf. Es kann jedoch nachgewiesen werden, dass die PSS eine signifikante Reduktion der Scherdehnung bewirkt.

Das für 2025 geplante Modul 2 «Erstellung eines 3D-FE-Modells» soll ermöglichen, die dynamische Berechnung der Zugsüberfahrt in Form bewegter Radsatzlasten zu integrieren. Damit kann eine Parametervariation der Oberbaukomponenten durchgeführt werden, um zu beantworten, ob und welche Oberbaukomponenten den Spannungsverteilungsverlauf (und damit die Einwirkungen auf die Planie) reduzieren können.

Inhaltsverzeichnis

1	AUSGANGSLAGE	7
2	EINLEITUNG	8
3	FAHRBAHNMODELLE: VERSCHLEISS & LÄRM (VIF)	9
3.1	FAHRBAHNMODELL: VERSCHLEISS	10
3.1.1	<i>Allgemeine Beschreibung des Modells</i>	11
3.1.2	<i>Detaillierung und Kalibrierung des Modells</i>	12
3.2	FAHRBAHNMODELL: LÄRM - KURVENKREISCHEN	15
3.2.1	<i>Allgemeine Beschreibung des Modells</i>	16
3.2.2	<i>Detaillierung und Kalibrierung des Modells</i>	17
4	FAHRBAHNMODELL: UNTERGRUND	20
4.1	ALLGEMEINE BESCHREIBUNG DES MODELLS.....	21
4.1.1	<i>Überblick über die Nachweisführung</i>	22
4.1.2	<i>Fryba Model</i>	22
4.1.3	<i>Einschätzung der Scherdehnungen</i>	25
4.1.4	<i>Reduktion der dynamischen Schubmoduln</i>	26
4.1.5	<i>Grenzwert der Scherdehnung</i>	26
4.2	UNTERSUCHUNGSPROGRAMM	27
4.3	EINGANGSDATEN UND BERECHNUNGSGRUNDLAGEN MODELLERSTELLUNG.....	28
4.3.1	<i>Oberbau</i>	28
4.3.2	<i>Zugtyp und Geschwindigkeit</i>	28
4.3.3	<i>Baugrundfälle</i>	29
4.4	2D-FE-MODELLIERUNG.....	33
4.4.1	<i>Aufbau und Randbedingungen des 2D-FE Modells</i>	33
4.4.2	<i>Berechnungsablauf</i>	36
4.4.3	<i>Untersuchungsprogramm</i>	38
4.4.4	<i>Last-Zeit-Verläufe</i>	38
4.4.5	<i>FE-Analysen, Nachweis der dynamischen Stabilität</i>	43
5	AKTUELLER STAND UND AUSBLICK	49
5.1	FAHRBAHNMODELL LÄRM UND SCHIENENVERSCHLEISS	49
5.2	FAHRBAHNMODELL UNTERGRUND.....	51
6	VERZEICHNISSE	52
6.1	REFERENZEN.....	52
6.2	ABBILDUNGEN.....	53
6.3	TABELLEN.....	54

1 Ausgangslage

Im Rahmen von RAILplus werden innerhalb P4 Fahrbahnsteifigkeit unterschiedliche Modelle erstellt, um den Einfluss unterschiedlicher Komponenten auf das Fahrverhalten quantifizieren zu können. Dabei werden insbesondere die Auswirkungen unterschiedlicher Fahrbahnkomponenten auf den Schienenverschleiss, die Lärmentstehung (Fokus Kurvenkreischen) sowie die langfristige Gleislagestabilität untersucht. Aufgrund der unterschiedlichen Frequenzen, welche für die spezifischen Auswirkungen von Relevanz sind, können diese Simulationen nur auf Basis verschiedener Teilmodelle abgebildet werden. Darüber hinaus ergeben sich in den Modellen zur Simulation von Schienenverschleiss und Lärm signifikante Abhängigkeiten zu den Teilprojekten P2, P3 und P5. Darüber hinaus werden auch Messungen und Simulationen seitens DB Systemtechnik durchgeführt, um Optimierungen der Spurweite (und damit auch im Bereich der Spannmittel, Einspannung, etc.) voranzutreiben, wodurch eine optimale Berührgeometrie von Rad und Schiene gewährleistet werden soll. Diese Untersuchungen sind nicht Teil dieses Lieferobjektes und können detailliert in den jeweiligen Lieferobjekten von P3 eingesehen werden.

Das vorliegende Lieferobjekt soll die Simulationsmodelle aus Sicht der Fahrbahn beschreiben und insbesondere dazu dienen, die erwarteten Ergebnisse seitens der Fahrbahn strukturiert zu dokumentieren und die dafür notwendigen Eingangsparameter seitens P4 darzustellen. Als Beschreibung und Spezifikation des Virtual Vehicle Simulationsmodells mit dem Fokus auf Fahrzeuge und Fahrzeugentwicklung wird an dieser Stelle an das «LO 1.6 Spezifikation und Beschreibung eines Simulationsmodells zur Analyse und Nachweis von Rad-Schienen-Verschleiss» von Teilprojekt P5 verwiesen.

2 Einleitung

Generell kann in zwei unterschiedliche Herangehensweisen der Fahrbahnmodelle unterschieden werden: (1) Modelle, welche Verschleiss sowie Lärmentstehung an der Schienenoberfläche behandeln und (2) Modelle, welche den Untergrund bis in 30 Meter Tiefe und dessen Einfluss auf die langfristige Gleislage bewerten können. Abbildung 3 soll dabei die Abgrenzung zwischen den beiden Modellen darstellen. Die beiden Modelle ergänzen sich insofern, dass die Verschleiss- und Lärmmodelle Komponenten unter Schwellenunterkante nur als holistische «Black-Box-Feder» berücksichtigen können, da ein Einfluss auf den Schienenverschleiss und die Lärmentstehung als untergeordnet angesehen werden. Das Fahrbahnmodell Untergrund hingegen kann den Einfluss tiefliegender Schichten auf die langfristige Baugrund- und damit Gleislagestabilität beschreiben, welche einen wesentlichen Treiber der LCC darstellen können.

Das Modell zur Simulation des Schienenverschleiss' sowie der Lärmentstehung in Hinblick auf Kurvenkreischen wird durch das Virtual Vehicle erarbeitet. Aus Sicht der Fahrbahn ist es hier insbesondere relevant, inwieweit die Komposition unterschiedlicher Fahrbahnkomponenten einen Einfluss auf den Schienenverschleiss darstellen, um dies in der Fahrbahngestaltung zukünftig mitberücksichtigen zu können. Im Rahmen dieses Projektes wurden bisher einerseits die Simulationsmodelle seitens Virtual Vehicle aufgebaut sowie in Abstimmung mit P4 die Parametervariation in den Modellen als Task für 2025 finalisiert.

Die Simulation und Beurteilung der dynamischen Stabilität des Untergrundes wurde bei dem Ingenieurbüro Baugrund Dresden beauftragt. Hierbei gilt es im Jahr 2024 insbesondere zu prüfen, welche Auswirkungen tiefgründige Untergrundverhältnisse auf das langfristige Gleislageverhalten aufweisen. Darüber hinaus auch, welche Massnahmen bei tiefliegenden Weichschichten zu treffen sind und, ob hier Abänderungen am Oberbausystem sowie der Einbau einer PSS oder AC Rail eine ausreichend nachhaltige Wirkung erzielen können. Dabei wird im ersten Schritt ein 2D-FE-Modell erstellt, um den Nachweis der dynamischen Stabilität bei unterschiedlichen Baugrundverhältnissen (gut, mittel, schlecht) führen zu können. Dabei werden auch Fahrzeugtypen, Fahrgeschwindigkeiten, Oberbaukomponenten und Unterbaubeschaffenheit variiert, um deren Einfluss auf die Baugrundstabilität analysieren zu können.



Abbildung 3: Übersicht Fahrbahnmodelle Virtual Vehicle und Baugrund Dresden

Als Ausblick ist im Untergrundmodell für 2025 auch eine 3D-FE-Modellierung angedacht, um insbesondere die Auswirkungen der dynamischen Anregung durch die Zugsüberfahrt in Bezug auf Oberbaukomponenten und Unterbauformen darstellen zu können. Diese sollten es dann auch ermöglichen, eine Interpretation der Erkenntnisse in den Verschleissmodellen des Virtual Vehicle an der Schnittstelle Schwellenunterkante vornehmen zu können.

3 Fahrbahnmodelle: Verschleiss & Lärm (vif)

Um den vermehrt auftretenden Verschleisserscheinungen an Schienen und Rädern, sowie Lärm und Erschütterungen in engen Bögen diverser Meterspurbahnen entgegenzuwirken, bieten sich eine Vielzahl von Gegenmassnahmen an. Zur Bewertung deren Wirksamkeit können vor allem Simulationsmodelle erarbeitet werden, welche jedenfalls auf Basis von Feldversuchen und Betriebserprobungen aufgebaut und anhand derer kalibriert werden sollten. Diese Simulationsmodelle müssen diverse Anforderungen erfüllen, welche stark von den abzubildenden Phänomenen abhängen. Aus diesem Grund werden innerhalb des Projekts «Verbesserte Fahrzeug-Fahrweg Interaktion im Bereich Meterspurbahnen (FFI Opt)» unterschiedliche Modelle zur Simulation von Verschleiss sowie Lärm entwickelt, welche auf die Anforderungen des jeweiligen Themengebiets zugeschnitten sind. Trotz der unterschiedlichen Modellierungsansätze wird jedoch darauf geachtet, alle möglichen Synergien Innerhalb des Projekts FFI-Opt auszunutzen. Eine Projektübersicht, sowie der Zusammenhang der behandelten Bereiche, ist in Abbildung 4 ersichtlich.

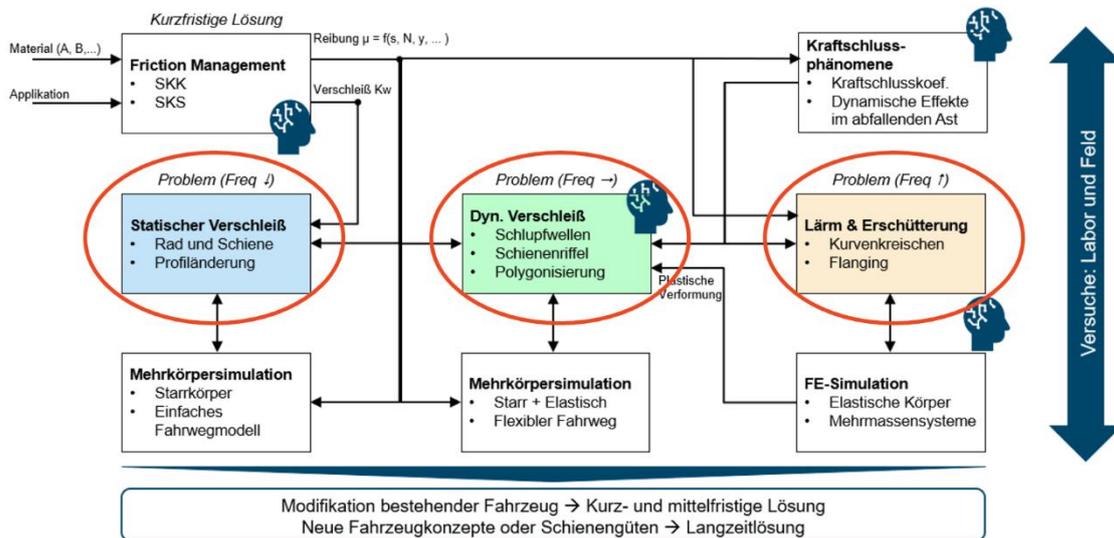


Abbildung 4: Relevante Modelle des Vif aus Sicht von P4

Tab. 1: Überblick Fahrbahnmodelle virtuelles Fahrzeug

	Statischer Verschleiss	Dynamischer Verschleiss	Lärmmodell
Ziel	Simulation Schienerverschleiss.	Simulation der Entstehung und Entwicklung der Schlupfwellen bzw. Polygonisierung der Räder.	FE-Simulation in Bezug auf Kurvenkreischen. Diese soll die Entstehung des Kurvenkreischen auf Basis von Messungen und Simulation untersuchen und die Auswirkung von Gegenmassnahmen quantifizieren.
Darstellung Fahrbahn	Die Komponenten Schiene, Zwischenlagen, Schwelle und Schotterbett/Untergrund werden als Masse-Feder-System abgebildet. Dabei können sämtliche Parameter variiert werden. Darüber hinaus wird auch die Spurweite berücksichtigt.	Die Komponenten Schiene, Zwischenlagen, Schwelle und Schotterbett/Untergrund werden als Masse-Feder-System aus starren und flexiblen Körpern abgebildet. Die Schienen werden als vereinfachte flexible Körper dargestellt. Auch die Betonschwelle wird als flexibler Körper modelliert, um eine Hohllagensimulation vornehmen zu können. Darüber hinaus wird auch die Spurweite berücksichtigt. Variierbar: Steifigkeit und Dämpfung der Kraftelemente	Schienen und Schwellen sind als vereinfachte flexible Körper dargestellt. Zwischenlage mit unterschiedlichen Steifigkeiten könnten im Modell hinterlegt werden – Einfluss in Hinblick auf Kurvenkreischen jedoch fragwürdig, da Frequenzbereich bis zu 5 kHz. Schienenprofil und Radius wird berücksichtigt. Aktuell aufgrund der Messungen auf Betonschwellen ausgelegt, andere Schwellentypen theoretisch möglich, jedoch Aufwand

<i>Relevanz Fahrbahn</i>	Die relevanten Frequenzbereiche sind bei rund 30Hz, damit ist jedenfalls ein Einfluss der Fahrbahnkomponenten gegeben.	(Zwischenlagen & Schienenbefestigung als ein Parameter und Oberbausteifigkeit/-dämpfung als ein Parameter). Zusätzlich Massen und Trägheiten (Geometrie) von Schiene und Schwelle. Die relevanten Frequenzbereiche sind bei rund 100/200Hz, damit ist jedenfalls ein wesentlicher Einfluss der Fahrbahnkomponenten gegeben – insbesondere in Bezug auf Schiene und Zwischenlagen. Eventuell auch Schwelle und Schwellenbesohlung.	(zusätzliche Messungen/Kalibrierungen) hoch, erwarteter Einfluss sehr gering. Feldmessungen aus 09/2024 sollen Aufschluss geben, ob die Variation sinnvoll ist oder nicht. Relevante Frequenzbereiche bis zu 5kHz, damit ist kein signifikanter Einfluss der Fahrbahnkomponenten auf das Kurvenkreischen zu erwarten. Konnex zum Thema „Spurerweiterung“? Konnex zur Schleifstrategie «nur bogeninnen Schleifen»?
<i>Status (10/2024)</i>	Modell Baseline (Modellierung auf Basis bisheriger Messungen und State-of-the-art Parameter) in Fertigstellung. Variationen für 2025 geplant.	Modell Baseline (Modellierung auf Basis bisheriger Messungen und State-of-the-art Parameter) soll bis Ende 2024 fertiggestellt werden. Variationen für 2025 geplant.	Messungen für einen Bogen durchgeführt, Modell in Entstehung. Aktuell weitere Messungen zur Validierung angedacht. Aktuell keine Daten seitens P4 benötigt.

3.1 Fahrbahnmodell: Verschleiss

Verschleissbedingte Schadensbilder werden innerhalb des Projekts FFI-Opt in quasi-statischen Verschleiss, der verschleissbedingten Profiländerung von Rad und Schiene, und dynamischen Verschleiss, der Polygonisierung der Räder und Schlupfwellenbildung in engen Bögen, unterteilt. Ein Simulationsmodell zur Berechnung des statischen Verschleisses wird in dem Bericht „Spezifikation und Beschreibung eines Simulationsmodells zur Analyse und Nachweis von Rad-Schienen-Verschleiss“ [1] basierend auf Lieferobjekt 1.6 beschrieben. Dabei erfolgt die Berechnung des statischen Verschleisses mittels einer iterativen Simulationsschleife. Diese besteht aus drei Hauptmodulen, einer Mehrkörper-Simulation (MKS), einem Verschleissmodell und einem Profilgenerator, siehe Abbildung 5.

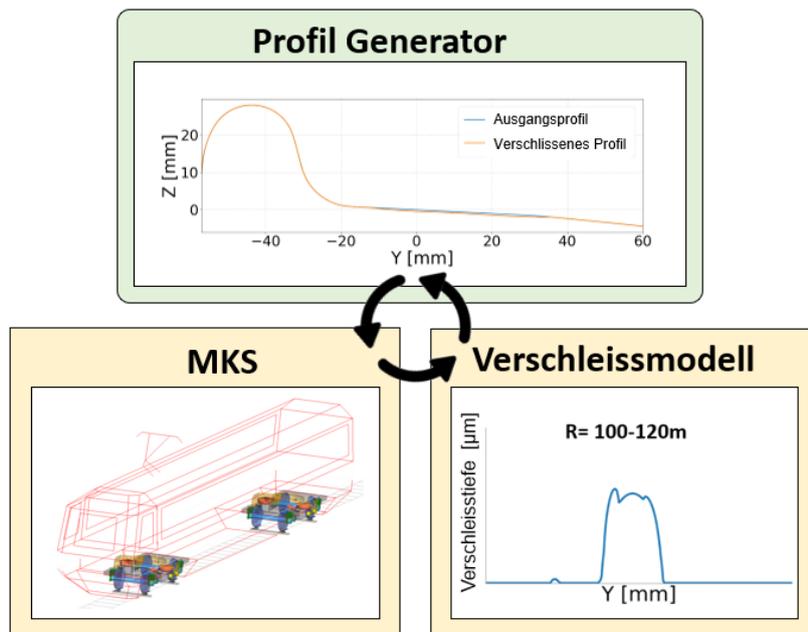


Abbildung 5: Simulationsschleife zur Berechnung von quasi-statischem Verschleiss

Als Ausblick wird in diesem Bericht bereits auf die Notwendigkeit komplexerer Radsatz- und Fahrbahnmodelle verwiesen, um die Initiierung und das Wachstum von dynamischem

Verschleiss abbilden zu können. Dieser Bericht knüpft an dieser Stelle an und beschreibt die Erweiterung des Fahrbahnmodells der Mehrkörpersimulation mittels elastischer Komponenten.

Eine wichtige Rolle bei der Entstehung von Radpolygonen und Schlupfwellen spielt die Anregung von Eigenfrequenzen der Radsätze und der Fahrbahn. Aus diesem Grund muss das dynamische Verhalten dieser Komponenten entsprechend genau in der Simulation wiedergegeben werden können.

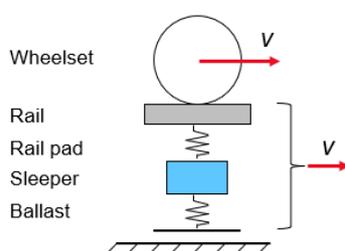
3.1.1 Allgemeine Beschreibung des Modells

Wie bereits erwähnt, ist eine Mehrkörper-Simulation eines der Hauptmodule in der Simulationsschleife zur Berechnung der Verschleissentwicklung. Dafür wird das Modul „Rail“ der Simulationssoftware SIMPACK verwendet, in dem die Fahrbahn in unterschiedlichen Detaillierungsgraden abgebildet werden kann. Standardmässig wird die Fahrbahn dabei entweder als starre Schienen oder als vereinfachte Mehrmassenschwinger modelliert, welche unter jedem Radsatz mitgeführt werden. Diese Arten der Modellierung der Fahrbahn haben jedoch neben den Vorteilen des einfachen Aufbaus und entsprechender Recheneffizienz auch erhebliche Einschränkungen gegenüber Modellen, in denen die Fahrbahn mittels deformierbarer Komponenten abgebildet wird. Dabei sind vor allem folgende Vorteile eines dynamischen Fahrbahnmodells hervorzuheben:

- Es erlaubt die Interaktion mehrerer Radsätze über die Schiene.
- Es kann das dynamische Verhalten der Fahrbahn bis zu einer gewünschten Frequenz abbilden. (Alle anderen Bausteine des Simulationsmodells, wie z.B. das Rad-Schiene Kontaktmodell, müssen entsprechend auch für diesen Frequenzbereich ausgelegt sein!)

Da eine möglichst genaue Abbildung des dynamischen Verhaltens der Fahrbahn für die Modellierung von dynamischem Verschleiss essenziell ist, wird ein dynamisches Fahrbahnmodell benötigt. Eine vereinfachte Darstellung eines Standard MKS-Fahrbahnmodells und eines dynamischen Fahrbahnmodells mit flexiblen Schienen ist in Abbildung 6 ersichtlich.

a) Standard- MKS Oberbaummodell



b) Dynamisches Fahrbahnmodell

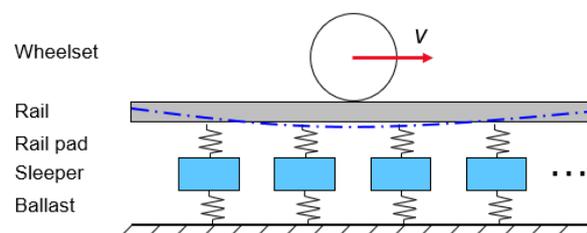


Abbildung 6: Vereinfachte Darstellung eines Standard MKS- Fahrbahnmodells a) und eines dynamischen Fahrbahnmodells mit flexiblen Schienen b)

Die Berücksichtigung deformierbarer Körper kann in SIMPACK auf unterschiedliche Arten erfolgen. In diesem Projekt erfolgt sie anhand der «FlexModal» Toolbox. Diese erlaubt die Beschreibung der Verformung von Körper durch eine begrenzte Anzahl von deformierten

Zuständen, was die Rechenzeit erheblich verkürzt. In diesem Kapitel wird der Ablauf der Erzeugung linear flexibler Fahrbahnkomponenten aufgezeigt, welche anschliessend in der «FlexModal» Toolbox verwendet werden können.

Der erste Schritt ist die Modellierung der 3D Geometrie der Komponente mittels einer CAD-Software. Dabei ist darauf zu achten, dass die Komponente für spätere Meshing-Vorgänge möglichst vereinfacht dargestellt wird. Das bedeutet, dass konstruktive Designelemente, wie Fasen und Bohrungen, welche keinen grossen Einfluss auf das dynamische Verhalten des gesamten Körpers haben, weggelassen werden. Als nächster Schritt erfolgt das Meshing der Geometrie in einer Mesh-Software oder direkt in einem FEM-Programm¹. Wurde das Mesh erzeugt, wird eine modale Analyse mittels einer FEM-Software durchgeführt, welche die Massen- und Steifigkeitsmatrizen des Körpers, sowie dessen Eigenwerte und Eigenvektoren berechnet. An diesem Punkt hat das Modell jedoch noch zu viel Freiheitsgrade, um es in einer Mehrkörper-Simulation verwenden zu können, weshalb als letzter Schritt eine modale Reduktion der Ergebnisse der Modalanalyse erfolgt. Die Ergebnisse dieser Reduktion können anschliessend von SIMPACK als Flexible Body Interface (FBI) oder Standard Input Data (SID) gelesen werden. Dieser Prozess der Erzeugung flexibler Körper und deren Integration in SIMPACK ist in Abbildung 7 anhand des Beispiels einer Schiene dargestellt.

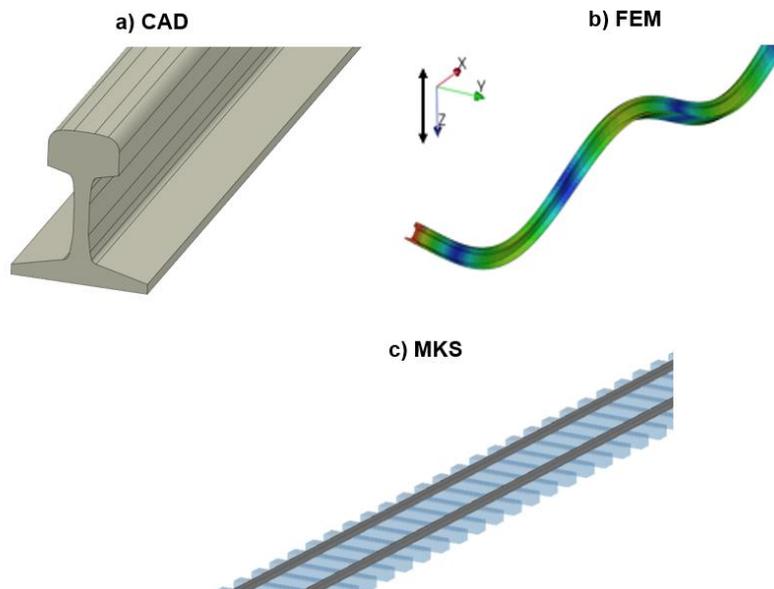


Abbildung 7: Schritte für die Erzeugung eines flexiblen Körpers: Modellierung der Komponente in einer CAD-Software a), Meshing und Modalanalyse mittels FEM b) und nach anschliessender modaler Reduktion Implementierung in SIMPACK

Für den Fall, dass mehrere Szenarien simuliert werden, bei denen unterschiedliche Bogenradien, Schienenprofile, etc., abgebildet werden, kann dieser Vorgang automatisiert werden, da diese einzelnen Prozesse einiges an Zeit in Anspruch nehmen.

3.1.2 **Detaillierung und Kalibrierung des Modells**

¹ Anmerkung: Die Wahl der Mesh-Element Grösse hat einen erheblichen Einfluss auf die Rechenzeit der folgenden Modalanalyse und modalen Reduktion, jedoch nicht auf die Rechenzeit späterer SIMPACK Simulationen. Aus diesem Grund ist es besser, die Mesh- Element-Grösse im Zweifelsfall ein wenig feiner anzusetzen.

Da eine Erhöhung des Detaillierungsgrades nicht automatisch in einem besseren Ergebnis, aber garantiert in einem erhöhten Modellierungsaufwand und Rechenzeit resultiert, ist dieser mit Bedacht zu wählen. Da für die Entstehung von Radpolygonen und Schlupfwellen die Dynamik der Radsätze und der Fahrbahn während Bogenfahrten im tief- bis mittelfrequenten Bereich (50-500Hz) von Interesse ist, werden ausschliesslich Teile des Oberbaus in einem Vollbogen in dem Fahrbahnmodell berücksichtigt. Eine vereinfachte Übersicht über die modellierten Komponenten ist in Abbildung 8 gegeben.

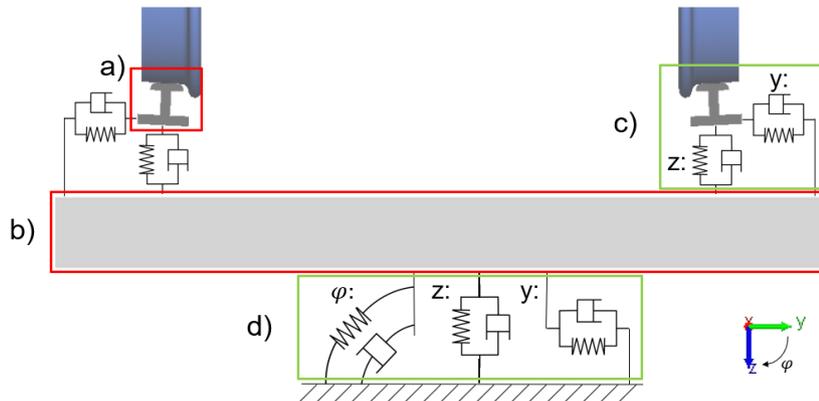


Abbildung 8: Vereinfachte Darstellung der modellierten Oberbaukomponenten unterteilt in Körpern (rot), wie Schienen a) und Schwellen b), und Krafterelemente (grün) wie Schienenbefestigung und Zwischenlagen c) und Schotter d)

Unterschiedliche Oberbaukomponenten können als Körper oder Krafterelemente modelliert werden. Körper, in Abbildung 8 rot hervorgehoben, können als flexibel oder starr modelliert werden. Da der Modellierungs- und Rechenaufwand stark mit der Anzahl der deformierbaren Körper ansteigt, werden die Schwellen vorerst als starr und nur die Schiene als flexibel modelliert. Es ist geplant, zum späteren Zeitpunkt die Betonschwellen auch als flexible Körper zu modellieren, um damit Hohllagen simulieren zu können. Zur Berücksichtigung der Schienenbefestigungen, Zwischenlagen, Schwellenbesohlung und des Schotters werden Krafterelemente eingesetzt. Diese berücksichtigen entsprechend nur die Steifigkeit und Dämpfungseigenschaften dieser Komponenten und nicht deren Massen und Massenträgheitsmomente. In Abbildung 8 sind die als Krafterelemente modellierten Komponenten grün hervorgehoben, sowie die berücksichtigten Freiheitsgrade angegeben.

Die Auswahl, welche Komponenten in dem Fahrbahnmodell berücksichtigt werden und deren Detaillierungsgrad legt entsprechend fest, welche Parameter bei einer Parameterstudie variiert werden können. Folgende Komponenten und deren Parameter können dabei für einen simulierten Bogen variiert werden:

- Schienenprofil (siehe Abbildung 8a). Dies erfordert eine neue Generierung der Schiene als flexibler Körper, was mit einem entsprechenden Zeitaufwand verbunden ist.
- Schwellentyp (siehe Abbildung 8b). Unterschiedliche Schwellentypen können durch Änderung der Masse und Massenträgheit des Starrkörpers berücksichtigt werden. Schwellen können, falls erforderlich, ebenfalls als flexibel modelliert werden. Dies ist für Betonschwellen auch vorgesehen, um Schwellenhohllagen simulieren zu können.
- Schienenbefestigung und Zwischenlagen (siehe Abbildung 8c). Diese Komponenten werden in der Simulation als Feder-Dämpfer Krafterelemente abgebildet. Eine Änderung z.B. der Zwischenlagen kann entsprechend durch qualitative Änderungen der Steifigkeit abgebildet werden, nicht aber durch die Eingabe der physikalischen Parameter der Komponente.

- Schotter (siehe Abbildung 8d). Wie auch Schienenbefestigung und Zwischenlage wird der Schotter ebenfalls durch Feder-Dämpfer Elemente modelliert. Entsprechend können auch hier Einflussfaktoren wie z.B. Partikelgrößen, Material, Schwellenbesohlung etc. nicht direkt eingegeben werden. Einzig der Einfluss der Steifigkeitsänderung bzw. Dämpfungseigenschaften aller gesammelten Komponenten unter der Schwelle kann mit diesem Modell bei einer Parametervariation abgebildet werden.

Dadurch ergeben sich die in Tab. 2 aufgelisteten Parameter, welche in einer zukünftigen Parameterstudie variiert, werden können (siehe Körper und Krafterelemente in Abbildung 8).

Tab. 2: Variierbare Parameter des dynamischen Fahrbahnmodells

Parameter	Einheit	Beschreibung
-	[-]	Schienenprofil der deformierbaren Schiene - beeinflusst deren Masse, Steifigkeit, etc.
s	[mm]	Spurweite
R	[m]	Bogenhalbmesser
n	[-]	Einbauneigung der Schiene (1/n)
u	[mm]	Überhöhung
h	[mm]	Längsneigung
m_S	[kg]	Masse der Schwelle in Abhängigkeit des Schwellentyps
I_S	[kg*m ²]	Trägheitsmoment der Schwelle in Abhängigkeit des Schwellentyps
c_SR_z	[N/mm]	Summensteifigkeit von Schienenbefestigung und Zwischenlage in vertikale Richtung
d_SR_z	[N*s/mm]	Summendämpfung von Schienenbefestigung und Zwischenlage in vertikale Richtung
c_SR_y	[N/mm]	Summensteifigkeit von Schienenbefestigung und Zwischenlage in laterale Richtung
d_SR_y	[N*s/mm]	Summendämpfung von Schienenbefestigung und Zwischenlage in laterale Richtung
c_SR_alpha	[N/rad]	Summensteifigkeit von Schienenbefestigung und Zwischenlage rotatorisch
d_SR_alpha	[N*s/rad]	Summendämpfung von Schienenbefestigung und Zwischenlage rotatorisch
c_BO_z	[N/mm]	Summensteifigkeit von Schotter und weiteren Oberbaukomponenten in vertikale Richtung
d_BO_z	[N*s/mm]	Summendämpfung von Schotter und weiteren Oberbaukomponenten in vertikale Richtung
c_BO_y	[N/mm]	Summensteifigkeit von Schotter und weiteren Oberbaukomponenten in laterale Richtung
d_BO_y	[N*s/mm]	Summendämpfung von Schotter und weiteren Oberbaukomponenten in laterale Richtung
c_BO_alpha	[N/rad]	Summensteifigkeit von Schotter und weiteren Oberbaukomponenten rotatorisch
d_BO_alpha	[N*s/rad]	Summendämpfung von Schotter und weiteren Oberbaukomponenten rotatorisch

Da das Fahrbahnmodell das dynamische Verhalten des physischen Oberbaus möglichst genau wiedergeben soll wird dieses entsprechend kalibriert. Wie beschrieben, werden dafür keine physikalischen Parameter der einzelnen Komponenten herangezogen, sondern Ergebnisse von Messungen. Bei diesen Messungen wird die Reaktion eines Systems (meist die Beschleunigung) durch eine Anregung mittels eines Hammers gemessen (Hammermessungen). Dadurch kann eine Übertragungsfunktion abgeleitet werden, welche beispielsweise als Rezeptanz (Nachgiebigkeit / Kraftereinheit) oder Inertanz (Beschleunigung / Kraftereinheit) des Systems in einem bestimmten Frequenzbereich angegeben wird. In Abbildung 9 ist als Beispiel die Inertanz der Fahrbahn zwischen zwei Schwellen in laterale Richtung angegeben. Diese wurde mittels Hammermessungen im Oktober 2023 an der Matterhorn-Gotthard-Bahn (MGB) in einem Bogen mit 110m Bogenhalbmesser, ohne Zahnstange und mit Betonschwellen erfasst. Diese Messung, sowie weitere Ergebnisse von Hammermessungen sind in dem Bericht «Verlängerung Betriebserprobung SKK auf der Strecke Täsch - Zermatt» [2] enthalten.

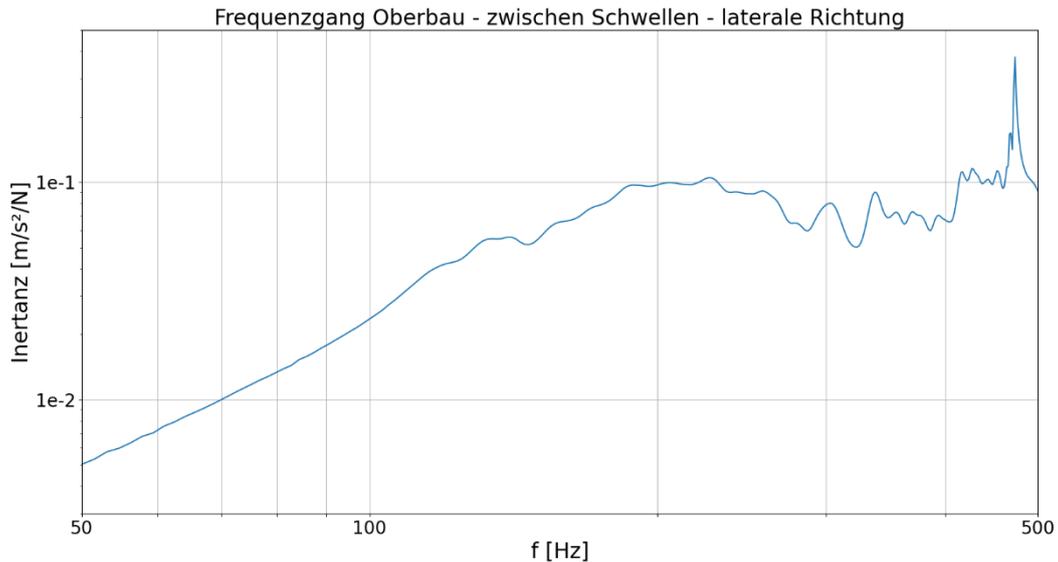


Abbildung 9: Inertanz der Fahrbahn zwischen zwei Schwellen in laterale Richtung

3.2 Fahrbahnmodell: Lärm - Kurvenkreischen

Um die Entwicklung des Kurvenkreischen in Eisenbahnsystemen zu vermindern oder möglichst zu beseitigen, können einige bekannte Gegenmassnahmen ergriffen werden. Um deren Wirksamkeit im speziellen Anwendungsfall der Meterspurbahnen zu bewerten, wird ein Simulationsmodell entwickelt. Der konzeptionelle Rahmen basiert auf dem neuesten Stand der Technik und stützt sich auf die neuesten technologischen Fortschritte und die besten Praktiken der Industrie.

In diesem Kapitel werden die Teilmodelle und die erforderlichen Messkampagnen beschrieben, die zusammen das gesamte Modellierungskonzept für das Thema Kurvenkreischen bilden. Darüber hinaus ist es unerlässlich, alle Schnittstellen zu den anderen Projektthemen, nämlich Reibungsmanagement und Verschleiss, zu berücksichtigen, um ein umfassendes Verständnis der Problemstellung zu erreichen.

Im Folgenden wird ein allgemeiner Überblick über die Schnittstellen zwischen den Modellierungs- und Versuchskonzepten zum Kurvenkreischen gegeben, sowie die Überschneidungen zu den Themenbereichen Lärm & Erschütterung und Verschleiss (siehe Abbildung 10) aufgezeigt.

Es werden Massnahmen zur Verringerung des Kurvenkreischen festgelegt. Dabei handelt es sich um die Anwendung von Reibungsmodifikatoren

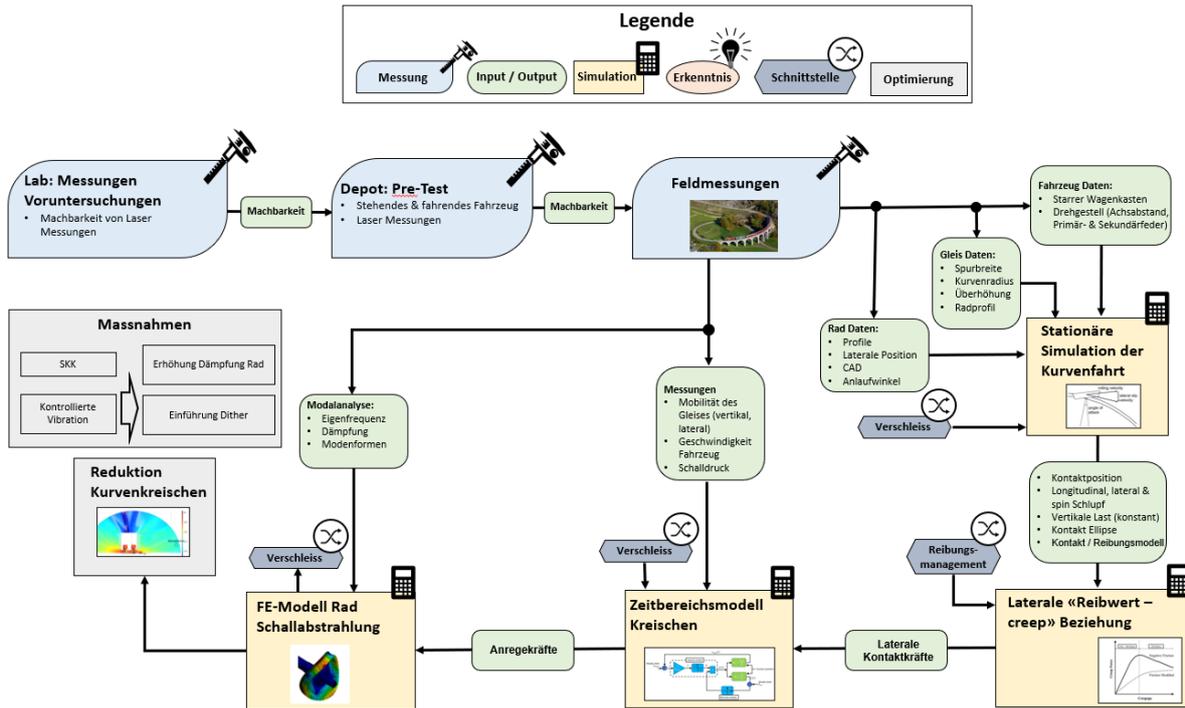


Abbildung 10: Überblick über das Modellierungs- und Versuchskonzept Lärm – Kurvenkreischen

3.2.1 Allgemeine Beschreibung des Modells

Das Kurvenkreischen wird durch die Schallabstrahlung des Rades bestimmt. Zur Berechnung dieser Schallabstrahlung wird ein Radabstrahlungsmodell auf der Grundlage der Finite-Elemente-Methode entwickelt. Dieses Modell kann auch für das Thema Verschleiss verwendet werden, insbesondere für die Modellierung von periodischen Rundheitsabweichungen (Polygone). Grundlegend sind die Eingangsdaten von Feldmessungen sowie die Anregungskräfte, die durch den Rad-Schiene-Kontakt verursacht werden.

Diese Anregungskräfte werden mit Hilfe eines Zustandsraummodells im Zeitbereich berechnet, das die laterale Reibungskoeffizient-Schlupfbeziehung enthält und die Berechnung der Stick-Slip-Anregung in einer Rückkopplungsschleife ermöglicht. Zu diesem Zweck sind mehrere Messgrößen aus Feldmessungen erforderlich.

Die Beziehung zwischen dem lateralen Reibungskoeffizienten und dem Schlupfverhalten wird auf der Grundlage von Messungen im Labor und im Feld ermittelt. Der negative Reibwertverlauf (siehe Abbildung 11) wird nach dem Stand der Technik häufig als Hauptgrund für das Kurvenkreischen genannt. Bislang sind die aus Laborversuchen verfügbaren Reibungsmessungen in der Regel quasi-statisch. Das dynamische Verhalten bei kleinen Amplituden und hohen Frequenzen kann sich von diesem messbaren quasi-statischen Verhalten deutlich unterscheiden und sogar überhaupt keine negative Steigung aufweisen. Dies muss vor allem in der Praxis im Bereich der Meterspurbahnen überprüft werden.

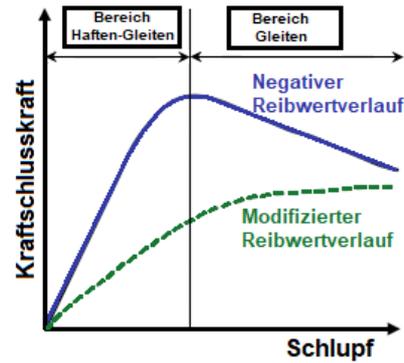


Abbildung 11: Kraftschlusskräfte für positive und negative Steigung [3]

Auf der Grundlage von dynamischen Mehrkörper-Simulationen (MKS) eines Fahrzeugs, das einen wohldefinierten Bogen durchfährt, wird eine quasistatische Simulation für die Fahrt im Bogen entwickelt. Das Ergebnis dieses Modells ist unter anderem die Kontaktposition von Rad und Schiene sowie der Schlupf. Letzteres kann zur Berechnung der Anfangsbedingungen für die Beziehung zwischen dem lateralen Reibungskoeffizienten und dem Schlupfverhalten verwendet werden. Dieses MKS-Modell ist dasselbe, wie es auch für das Thema Verschleiß verwendet wird.

Es wurden Feldmessungen durchgeführt, um die erforderlichen Daten für die Modelle zu ermitteln. Dies ist ein grundlegender Schritt, um die Modelle zu kalibrieren und zu validieren und um zu prüfen, ob die Annahmen der Normalspur [4] auch auf die Meterspur transferierbar sind.

3.2.2 *Detaillierung und Kalibrierung des Modells*

Um dynamische Modelle für die Fahrbahn zu erstellen, sind Hammermessungen an der Fahrbahn notwendig. Ein Beispiel hierzu ist in Abbildung 12 dargestellt. Diese Messungen können direkt im Modell für Kurvenkreischen verwendet werden, oder es kann ein eigenständiges Fahrbahnmodell erstellt werden. Im Rahmen dessen werden Komponenten der Fahrbahn mit einem Impulshammer angeregt und die resultierende Beschleunigung gemessen.



Abbildung 12: Hammermessungen an der Fahrbahn im Bogen „Biel“ der MGB

Im Rahmen dieser Messkampagne wurde u.a. auch direkt die Schiene angeregt, dargestellt in Abbildung 13. Der schwarze Pfeil zeigt die Anregung, die Beschleunigung wurde über der Schwelle (blau) und zwischen zwei Schwellen (rot) gemessen. Die zugehörigen Ergebnisse sind in Abbildung 14 für die Intertanz ersichtlich. Oben ist die Magnitude, Mitte die Phase und unten die Kohärenz. Moden sind ab 400 Hz klar ersichtliche, ebenso eine Anti-Resonanz, die sich bei ca. 159 Hz ausbildet.

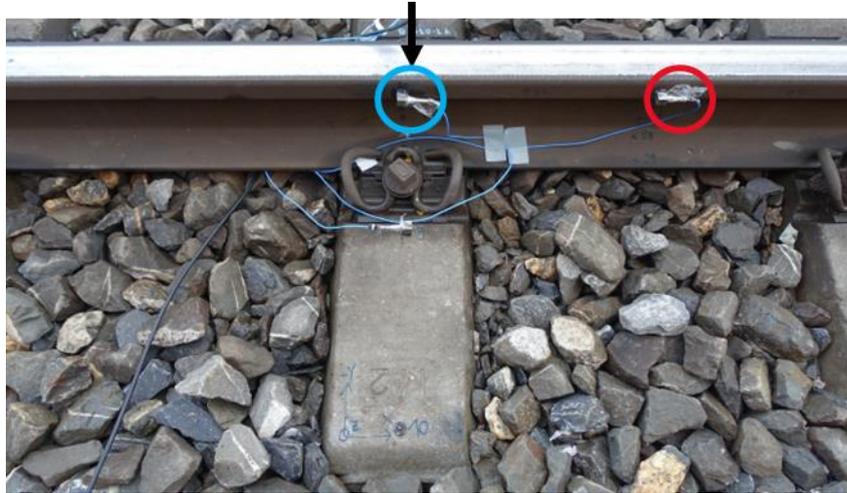


Abbildung 13: Hammermessungen an der Schiene im Bogen „Biel“ der MGB

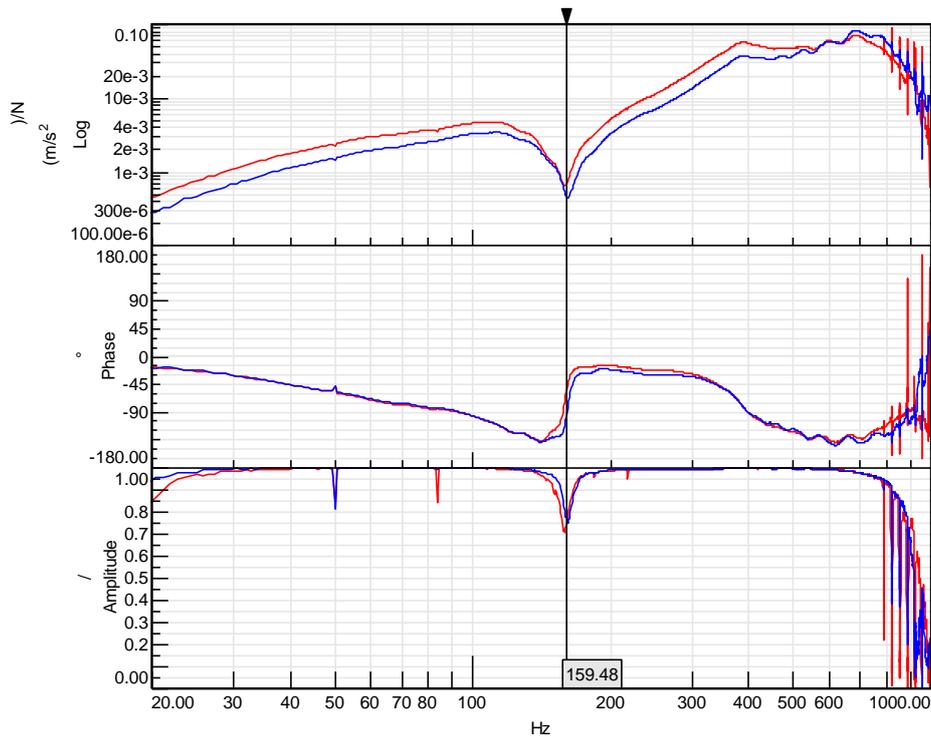


Abbildung 14: Ergebnisse von Hammermessungen an der Schiene im Bogen „Biel“ der MGB

Bisher wird im Stand der Technik vorwiegenden folgende Einflussgrößen auf das Kurvenkreischen genannt:

- Bogenradius
- Primäre (zwischen Radsatz und Drehgestellrahmen) und Sekundäre Steifigkeiten (zwischen Drehgestellrahmen und Wagenkasten)
- Vertikale Last
- Schlupf bzw. Anlaufwinkel
- Kraftschlusskurve (Abbildung 11)
- Modale Eigenschaften des Rades, besonders die Dämpfung
- Lateraler Kontaktpunkt Rad/Schiene
- Kraftschlussverlauf, abhängig u.a. von: Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Oberflächenbedingungen

Im Stand der Technik wurde bisher vielfach die Fahrbahn in der Modellierung als starr angenommen und somit nicht direkt berücksichtigt, da die Mobilität (Schwingfähigkeit) des Rades insbesondere bei dem Mode, bei welchem das Rad kreischt, um ein Vielfaches höher liegt als bei jenen der Fahrbahn.

Bisher wurde im Rahmen des vorliegenden Projektes ein ähnlicher Ansatz gewählt, dass die Fahrbahn als starr angenommen werden kann. Neuere Publikationen befassen sich jedoch vermehrt auch mit Modellierung der Fahrbahn. Daher wird aktuell das Simulationsmodell um die dynamischen Eigenschaften der Fahrbahn erweitert. Das Fahrbahnmodell besteht hierbei aus einem System von Masse-Feder Schwingern, welche mit Hammermessungen kalibriert werden. Hierzu werden zunächst Hammermessungen an der Fahrbahn mit Betonschwelle herangezogen. Um einen Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Fahrbahnaufbauten auf das Kurvenkreischen zu ermöglichen, wurden zwischenzeitlich auf Wunsch von P4 auch Messungen an Fahrbahnen mit Holzschwelle (Abbildung 15) und mit Stahlschwelle durchgeführt. Es ist vorgesehen, auch hierfür entsprechende Fahrbahnmodelle zu erstellen, um die Unterschiede im Kreischen durch Variation der Fahrbahn untersuchen zu können.



Abbildung 15: Hammermessung an Fahrbahn mit Holzschwelle

4 Fahrbahnmodell: Untergrund

Die Komponenten Schwelle, Schotter und Untergrund können in den Modellen zur Betrachtung des Schienenverschleisses nur sehr vereinfacht modelliert werden. Insbesondere Schotter und Unterbau sowie Untergrund sind lediglich über eine vereinfachte «Black-Box-Feder» berücksichtigbar. Ein unzureichender Untergrund sowie eine falsche Dimensionierung im Hinblick auf das Zusammenspiel der Komponenten Schiene, Zwischenlage/Befestigung, Schwelle, Schotter und Untergrund führen zu einem beginnenden Komponentenversagen, welches sich letztendlich in einer erhöhten Instandhaltungsintensität sowie verringerten Nutzungsdauer des Fahrwegs widerspiegelt. Dementsprechend können insbesondere die Komponenten Schotter und des darunter liegenden Untergrundes die Lebenszykluskosten eines Fahrwegs wesentlich beeinflussen. Wird bei sehr schlechtem Untergrund im Rahmen einer Oberbauerneuerung auf eine geeignete Verbesserungsmaßnahme verzichtet, kann dies im schlimmsten Fall zu einer Erhöhung der Lebenszykluskosten um den Faktor 3 bzw. der Instandhaltungskosten um Faktor 7 führen [5].

Aus diesem Grund ist es essentiell, die optimale Abstimmung der Komponenten vorzunehmen, um die optimale Abstimmung der Oberbaukomponenten unter den spezifischen Randbedingungen zu identifizieren sowie die Langlebigkeit der Komponenten durch die optimale Ausgestaltung des Unterbaus zu gewährleisten. Da eine Unterbauverbesserungsmaßnahme eine kostenintensive Tätigkeit im Rahmen einer Gleiserneuerung darstellt, muss zuallererst ermittelt werden, ob eine Unterbausanierung aufgrund der vorliegenden Verhältnisse notwendig ist. Ist dies der Fall, gilt es zu untersuchen, welche Verbesserungsmaßnahme für die jeweiligen Randbedingungen das Optimum darstellt.

Diese Fragen können beantwortet werden, indem die dynamische Stabilität des Eisenbahnfahrwegs bei Zugüberfahrten beurteilt wird. Auf dieser Basis können die Einflüsse unterschiedlicher Parameterkombinationen qualitativ beurteilt werden, um das Zusammenspiel unterschiedlicher Komponenten und Ausführungsvarianten zu analysieren. Die durch die Firma Baugrund Dresden durchzuführenden Analysen basieren auf dementsprechenden Planungshilfen der Deutschen Bahn [6],[7].

Dabei wird ein Eisenbahnfahrweg als dynamisch stabil im geotechnischen Sinn bezeichnet, wenn

- keine kurz- oder langwelligen Schwingungen im Unterbau des Fahrwegs auftreten, die zu Verformungen des Unterbaus führen, welche über diejenigen aus einer quasistatischen Belastung durch den Eisenbahnverkehr in relevantem Umfang hinausgehen,
- keine kurz- oder langwelligen Schwingungen auftreten, die zu Entfestigungen des Schotterbettes („Schotterfließen“) führen und
- keine langwelligen Schwingungen am Gleis auftreten, die zu einer instabilen Fahrlage von Fahrzeugen führen.

Die dynamische Stabilität wird wegen des inkrementellen Anwachsens von Verformungen bei einzelnen Überfahrten und wegen der Beeinflussbarkeit durch den Fahrbetrieb (Geschwindigkeitsabhängigkeit) der Gebrauchstauglichkeit von Fahrwegen zugeordnet. Die wesentlichen Einflussgrößen stellen dabei der Zustand des Fahrwegs, die Belastung durch den Bahnverkehr sowie die vorliegenden Unterbau- und Untergrundeigenschaften dar. Ersterer bezieht sich dabei massgebend auf die Gleislage und Bettung. Unregelmässigkeiten in der Gleislage sowie Entfestigungen des Schotterbettes oder des Auflagers können zu erhöhten Schwingungseinwirkungen führen. Diese Schwingungen können die dynamische Stabilität beeinträchtigen und zu einer progressiven Verschlechterung der Gleislage und der Schotterstabilität

führen. Hinsichtlich der Belastung durch den Bahnverkehr führen höhere Geschwindigkeiten und Radsatzlasten zu stärkeren Schwingungseinwirkungen und können die dynamische Stabilität verringern. Darüber hinaus bedingen häufigere Zugüberfahrten eine höhere Belastung und können so Verformungen akkumulieren. Eine wesentliche Eingangsgrösse stellen die Unterbau- und Untergrundeigenschaften dar. Weiche Böden mit geringer Steifigkeit und hoher Dicke können dynamisch instabil sein. Dabei ist insbesondere die Frage nach einer ausreichenden und stabilen Überdeckung über den Weichschichten von äusserster Relevanz. Ein günstiges Verhältnis zwischen Dicke der Weichschicht und Dicke der Überdeckung kann die dynamische Stabilität signifikant verbessern.

4.1 Allgemeine Beschreibung des Modells

Zur Bewertung der dynamischen Stabilität des Bodens unter einer Gleis gegenüber der Belastung durch Eisenbahnräder bei der Durchfahrt eines Zuges ist es zweckdienlich, Boden-Bauwerk-Interaktions-Analysen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode durchzuführen. Für diese Analysen bezieht sich die dynamische Stabilität auf das permanente Setzungs-Potential innerhalb des Oberbaus und des darunter liegenden Baugrundes, das aus wiederholten Zyklen der Radbelastung resultiert. Mit den Analysen wird gezeigt, ob die durch die Radlasten verursachten Scherdehnungen unterhalb festgelegter Grenzwerte liegen, sodass auch die sich ergebenden kumulierten Setzungen unterhalb einer Auslegungsgrenze liegen.

Für den Neubau von Bahntrassen in Deutschland fordert die Ril 836 [8] solche Boden-Bauwerk-Interaktions-Analysen für Zuggeschwindigkeiten ≥ 200 km/h und auch für geringere Zuggeschwindigkeiten für Strecken auf erschütterungsempfindlichen Böden (Sande mit einem Homogenitätskoeffizienten $C_u \leq 2,0$ und einem Dichteindex $I_D < 0,5$, bindige Böden mit einem Konsistenzindex $I_c < 0,6$ und verschiedene organische Böden).

BAUGRUND DRESDEN wurde seitens RAILplus beauftragt, Boden-Bauwerk-Interaktions-Analysen in Anlehnung an der deutschen Planungshilfe zur Untersuchung der Dynamischen Stabilität der DB InfraGO AG [9], im Folgenden als Planungshilfe bezeichnet, durchzuführen. Hierbei sollten in einem ersten Schritt (Modul 1) die dynamische Stabilität für verschiedene Baugrundverhältnisse (Baugrund verschiedener als repräsentativ eingestufte Bestandsprojekte) und variierte Ober- als auch Unterbaukombinationen mittels 2D-Finite-Elemente-Analysen untersucht werden. Dieser Kurzbericht fasst die Ergebnisse der dynamischen Boden-Bauwerk-Interaktions-Analysen zusammen, die von BAUGRUND DRESDEN im Rahmen des Moduls 1 durchgeführt wurden. Die mittels 3D-Finite-Elemente-Analysen im Rahmen des Moduls 2 durchgeführten vertieften Untersuchungen werden 2025 durchgeführt.

4.1.1 Überblick über die Nachweisführung

Das Berechnungsverfahren umfasst folgende Arbeitsschritte:

1. Erstellung eines 2-D-FE-Modells eines relevanten Querschnitts mit einem ausreichend feinen Netz und geeigneten Randbedingungen.
2. Bestimmung des zeitlichen Verlaufs der dynamischen Beanspruchung an der Unterseite der Schwellen infolge der Zugdurchfahrt auf der Grundlage eines analytischen Modells von Frýba [10].
3. Durchführung einer dynamischen FE-Analyse mit der instationären Beanspruchung infolge der Zugdurchfahrt.
4. Bewertung der Scherdehnungen unter dem belasteten Gleis für jedes relevante Bodenmaterial (d.h. Dammmaterial, Schichten aus gewachsenem Boden) auf der Grundlage der effektiven Schwinggeschwindigkeiten an den Mittelpunkten der relevanten Boden-/Böschungsschichten.
5. Reduktion der „dynamischen“ Schubmoduln für kleine Dehnungen im FE-Modell auf der Grundlage der Scherdehnungen unter Verwendung einer Formel von Vretos [11].

Die Schritte 2. bis 5. werden im Iterationsverfahren so oft wiederholt, bis die Änderung der dynamischen Schubmoduln konvergiert. Als Konvergenzkriterium wurde definiert, dass die Änderung des Schubmoduls relativ zum Schubmodul des aktuellen Iterationsschritts weniger als 5 % ($\Delta G/G_i \leq 5\%$) vom aktuellen Schritt bis zum potenziellen nächsten Schritt beträgt. Die Scherdehnungen werden später für zwei zusätzliche Punkte an der Ober- und Unterseite jeder Schicht ausgewertet, um die endgültige Verteilung der Scherdehnungen mit der Tiefe für den Vergleich mit den Schwellenwerten für jede Schicht zu erhalten.

Die Planungshilfe schlägt vor, den zeitlichen Verlauf der Schwellenverformung aus der dynamischen FE-Analyse mit dem Verlauf aus dem quasi-statischen Frýba-Modell [10] zu vergleichen. Wenn eine vernünftige Übereinstimmung erreicht wird, wird dies als Kriterium für die Beendigung des iterativen Prozesses herangezogen. Dies ist ein Manko der Planungshilfe, da die Reaktion des dynamisch angeregten Systems in den FE-Analysen nicht unbedingt mit dem quasistatischen Ergebnis von Frýba übereinstimmt, was insbesondere für hohe und sehr hohe Zuggeschwindigkeiten gilt. Aus diesem Grund wird in diesem Projekt stattdessen das oben genannte objektivere iterative Kriterium verwendet. In den folgenden Unterkapiteln werden die Hauptkomponenten der iterativen Bewertung der dynamischen Stabilität näher beschrieben.

4.1.2 Frýba Model

Frýba hat ein bekanntes und bewährtes Ersatzbalkenverfahren für einen Balken mit durchgehender Bettung von Zimmermann [12] für dynamische Beanspruchung und dämpfende Reaktionen erweitert, wie es hier in Anlehnung an die Planungshilfe zusammengefasst ist. Das Modell mit Dämpfung ist in Abbildung 16 dargestellt.

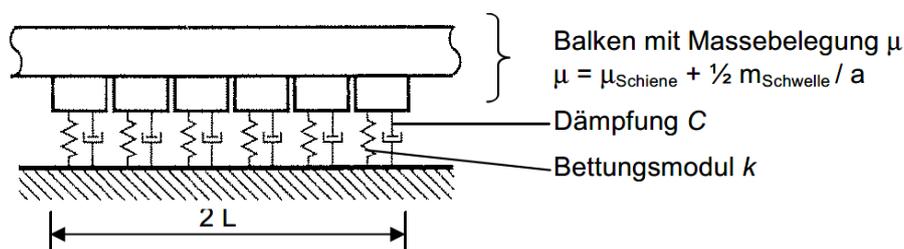


Abbildung 16: Ersatzmodell mit kontinuierlich gebettetem Balken mit Feder und Dämpfer [13]

Der zeitliche Verlauf der Vertikalspannung unter den Schwellen ergibt sich aus den folgenden Gleichungen in Abhängigkeit von der Radlast Q , dem Abstand x von der Radlast Q und der Zeit t :

$$p_{(x,t)} = \frac{Q}{2 \cdot b_L \cdot L} \cdot \left[\frac{2}{a_1(D_1^2 + D_2^2)} e^{-a_0 \frac{x}{L}} \cdot (D_1 \cos a_1 \frac{x}{L} + D_2 \sin a_1 \frac{x}{L}) \right] \text{ für } x \geq 0 \text{ und}$$

$$p_{(x,t)} = \frac{Q}{2 \cdot b_L \cdot L} \cdot \left[\frac{2}{a_2(D_3^2 + D_4^2)} e^{a_0 \frac{x}{L}} \cdot (D_3 \cos a_2 \frac{x}{L} - D_4 \sin a_2 \frac{x}{L}) \right] \text{ für } x < 0.$$

mit Q Radlast,
 x Abstand zwischen Beobachtungspunkt und Radlast Q ,

L elastische Länge, wobei $L = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_r \cdot I_r}{k \cdot b_L}}$

mit E_r, I_r Biegesteifigkeit der Schiene,

k Bettungsmodul, wobei $k = \frac{1}{1/k_{rp} + 1/k_s + 1/k_b}$

mit: k_{rp} Bettungsmodul der Zwischenlage
 k_s Bettungsmodul der Schwelle einschliesslich Schwellensole
 k_b Bettungsmodul des Schotter, Unterbaus und Untergrunds

b_L Verteilungsbreite (Breite des Ersatzbalkens, halbe Schwellenfläche bezogen auf Schwellenabstand)

Abbildung 17 veranschaulicht die genannten Grössen.

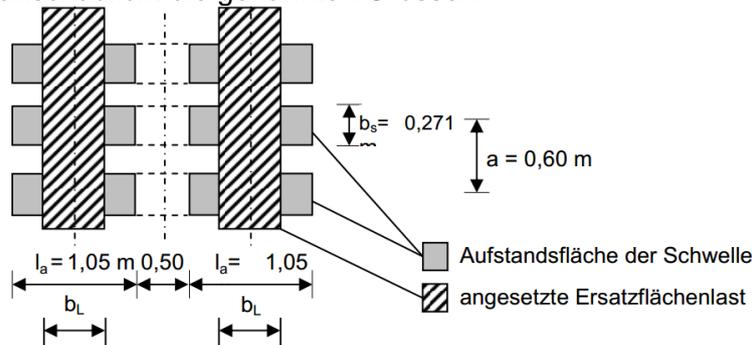


Abbildung 17: Ermittlung der Verteilungsbreite [13]

Weitere Gleichungsparameter: D_1, D_2, D_3, D_4 Dämpfungsfaktoren, abh. von a_0, a_1 und a_2 :

$$D_1 = a_0 a_1; D_2 = a_0^2 - 1/4 (a_1^2 - a_2^2);$$

$$D_3 = a_0 a_2; D_4 = a_0^2 + 1/4 (a_1^2 - a_2^2)$$

mit a_0, a_1 und a_2 als Funktionen des dynamischen Falls (hier: leichte Dämpfung [16]) und $\alpha < 1$ und $\beta < 1$, welche wie folgt definiert sind:

$$a_0 = \sqrt{1 - \alpha^2} \text{ und } a_{1,2} = \sqrt{1 + \alpha^2 \pm 2 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \sqrt{\frac{1}{1 - \alpha^2}}}$$

mit:

α Verhältnis der Zuggeschwindigkeit zur kritischen Geschwindigkeit bzw. Rayleighwellengeschwindigkeit des Unterbaus und Untergrundes,

$$\alpha = v_{\text{Zug}} / c_R \text{ mit } c_R \approx \frac{0,87 + 1,12 \cdot v_m}{1 + v_m} \cdot \sqrt{G_m / \rho_m}$$

β Verhältnis vorhandener zu kritischer Dämpfung,

$$\beta = C_b / C_{\text{krit}} \leq 0.5 \text{ mit: } C_b = 3,4 \cdot r_0^2 / (1 - \nu_m) \cdot \sqrt{\rho_m \cdot G_m}$$

$$C_{\text{krit}} = 2 \cdot \sqrt{K_b \cdot m} = 2 \cdot \sqrt{K_b \cdot \mu \cdot 2 \cdot L} = 4 \cdot L \cdot \sqrt{k_b \cdot b_L \cdot \mu}$$

mit den mittleren Werten des Schubmoduls G , der Dichte

ρ , der Poissonzahl ν und dem äquivalenten Radius r_0 einer äquivalenten rechteckigen Fläche.

Da es sich bei der Bestimmung der Faktoren a_1 bis a_2 und D_1 bis D_4 um ein Näherungsverfahren handelt und die Näherung bei β nahe 1 und hohem α z.T. deutlich von der exakten Lösung abweicht, sollte $\beta \leq 0,50$ angesetzt werden, auch wenn sich rechnerisch ein höherer Wert ergibt [13].

4.1.3 **Einschätzung der Scherdehnungen**

Die Scherdehnungen unter dem Gleis infolge einer Zugdurchfahrt werden aus den Schwinggeschwindigkeiten an diskreten Punkten wie folgt bestimmt [13]:

1. Bestimmung der effektiven Schwinggeschwindigkeit über der Zeit

$$v_{eff}(t) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{\xi}^t e^{-(t-\xi)/\tau} \cdot v^2(\xi) d\xi}$$

- mit: v Absolutwert der Schwinggeschwindigkeit aus dyn. 2D-FE-Analyse
- ξ Zeitvariable,
- t Beobachtungszeit,
- e Eulerzahl und
- $\tau = 0.125$ s; Zeitintegrationskonstante, FAST-Bewertung DIN 45672-2 [14]

2. Berechnung der maximalen Scherdehnung

$$\gamma = \hat{v}_{F,max} / c_s$$

mit Schwinggeschwindigkeit definiert als: $\hat{v}_{F,max} = \max\{v_{eff}(t)\}$

und Scherwellengeschwindigkeit (c_s) des beobachteten Bodenmaterials

3. Anwendung eines Reduktionsfaktors RF auf die Scherdehnungen γ aus (2.) unter Berücksichtigung der geometrischen Dämpfung:

$$RF = \frac{L}{L + \tan(14,04^\circ) \cdot h_t}$$

mit: L Länge der äquivalenten Grundfläche

Hinweis: der Lasteinleitungswinkel wird in den vorliegenden Untersuchungen gemäss Günther [15] und abweichend von der Planungshilfe mit 14,04° angenommen

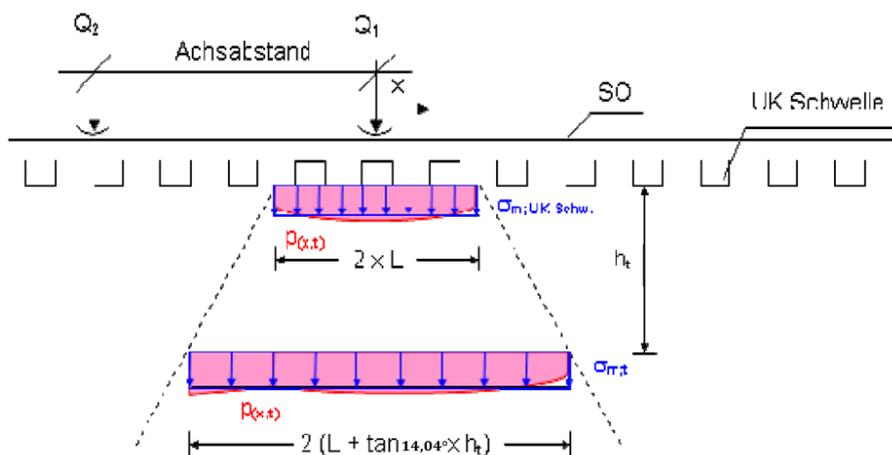


Abbildung 18: Bestimmung des Reduktionsfaktors für die geometrische Dämpfung

4.1.4 Reduktion der dynamischen Schubmoduln

Die dynamischen Schubmoduln G werden auf der Grundlage der Auswertung der Scherdehnungen an den Mittelpunkten der relevanten Böden (einschliesslich Schotter, Unterbau, Auf-füllungen und gewachsener Bodenschichten) aus dem aktuellen Iterationsschritt unter Ver-wendung der folgenden Formel von Vrettos [11] reduziert:

$$\frac{G(\gamma)}{G_0} \approx \frac{1,03}{1 + \frac{19}{1 + (I_p / 15)^{1,3}} \cdot \gamma^{0,8}} \leq 1,00$$

mit I_p konventioneller Plastizitätsindex ($I_p = 0$ für nicht-kohäsive Materialien, I_p und γ in %)

4.1.5 Grenzwert der Scherdehnung

In Abbildung 19 ist die an die an die Forschungsergebnisse von Vucetic [16] und von Hsu und Vucetic [17] angelehnte volumetrische zyklische Scherdehnungsschwelle γ_{tv} in Abhängigkeit vom konventionellen Plastizitätsindex I_p dargestellt.

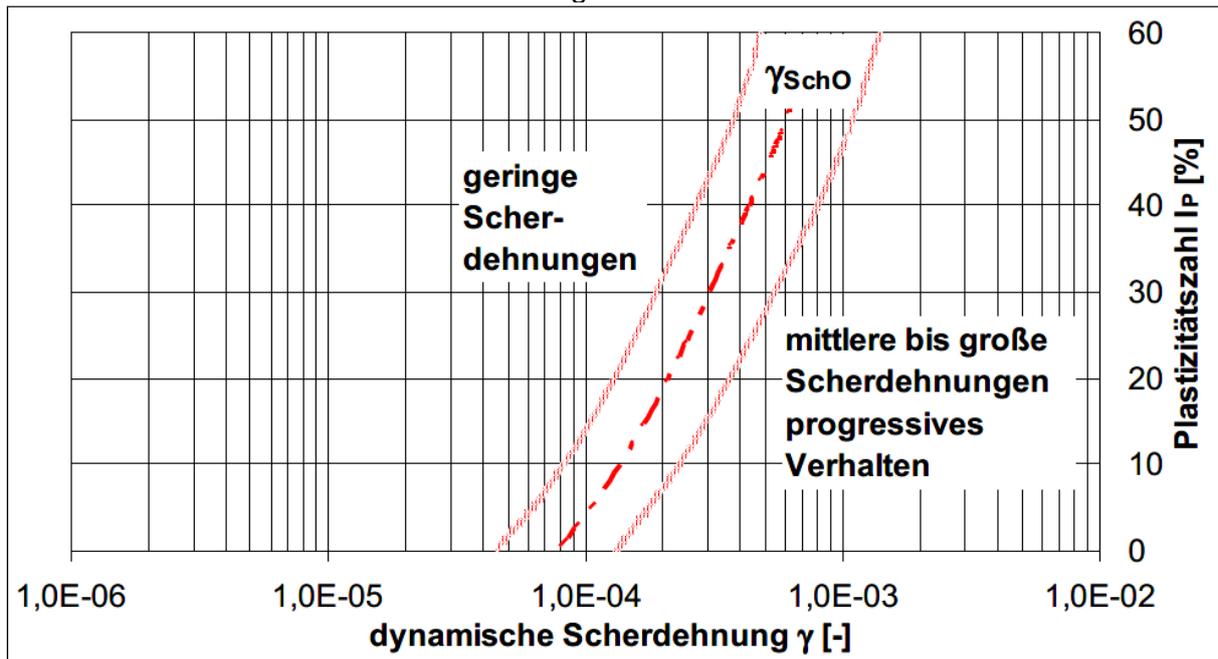


Abbildung 19: Scherdehnungsgrenzen für mineralische Böden in Anlehnung an HSU und Vucetic [17]
 Erhöhungsfaktor zur Berücksichtigung der hochfrequenten Beanspruchung

Um hochfrequente Einwirkungen aufgrund von Schienenunregelmässigkeiten, Unrundheiten (d. h. Flachstellen) an den Rädern der Züge und den Einfluss des Schwellenabstands zu be-rücksichtigen, wurde ein konstanter Multiplikationsfaktor von 1,24 auf die endgültige Scher-dehnungsverteilung mit der Tiefe angewendet, bevor sie mit dem Schwellenwert γ_{tv} verglichen wurde [13]. Der Multiplikationsfaktor geht von einem sehr guten bis guten Zustand des Gleises und der Räder aus.

Sehr gut $f = 1.15,$
 Gut $f = 1.33$ und

Mässig

 $f = 1.50.$

4.2 Untersuchungsprogramm

Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungs-Projekts sollte der Einfluss der nachfolgend aufgeführten Variationsgrössen auf Beanspruchung des Untergrunds und damit die Langzeitgleislagestabilität (dynamische Stabilität) untersucht werden.

In einem ersten Schritt wurden zunächst lediglich die rechnerischen Last-Zeitverläufe (analytisches Fryba-Balkenmodell) für die zu untersuchenden Varianten berechnet. Die Ergebnisse der Untersuchungen der Last-Zeitverläufe finden sich in Kapitel 4.4.4. Da sich hierbei zeigte, dass vor allem die Oberbau-Variationsgrössen (Steifigkeit der Zwischenlage und Schwellenbesohlung) keinen nennenswerten Einfluss auf die Zeitverläufe haben, wurden nur für ausgewählte Fälle auch die iterativen dynamischen FE-Analysen durchgeführt.

Die erstellten Berechnungsvarianten sind in Tab. 3 und Tab. 4 in für den mittelguten und den schlechten Baugrundfall zusammenfassend aufgeführt.

Tab. 3: Untersuchungsprogramm mittelguter Baugrund

Baugrundfall	Zugtyp	Schienenprofil	Zuggeschwindigkeit in km/h	Steifigkeit Zwischenlage in kN/mm	Schwelle	Unterbau	Felstiefe	¹⁾ Berechnungsart
mittelgut	MGB „Komet“	46 E1	50	85	Beton, besohlt	ohne	unendlicher Boden	p-t
mittelgut	MGB „Komet“	46 E1	50	200	Beton, besohlt	ohne	unendlicher Boden	p-t, NW dynStab
mittelgut	MGB „Komet“	46 E1	50	700	Beton, besohlt	ohne	unendlicher Boden	p-t
mittelgut	MGB „Komet“	46 E1	50	200	Beton, unbesohlt	ohne	unendlicher Boden	p-t
mittelgut	MGB „Komet“	46 E1	50	700	Holz	ohne	unendlicher Boden	p-t
mittelgut	MGB „Komet“	46 E1	50	700	Stahl	ohne	unendlicher Boden	p-t, NW dynStab
mittelgut	MGB „Komet“	46 E1	50	200	Beton, besohlt	AC-Rail	unendlicher Boden	p-t
mittelgut	MGB „Komet“	46 E1	100	200	Beton, besohlt	ohne	unendlicher Boden	p-t, NW dynStab
mittelgut	tpf „Abe 100“	46 E1	50	200	Beton, besohlt	ohne	unendlicher Boden	p-t, NW dynStab
mittelgut	tpf „Abe 100“	46 E1	100	200	Beton, besohlt	ohne	unendlicher Boden	p-t, NW dynStab
mittelgut	MGB „Komet“	46 E1	100	200	Beton, besohlt	ohne	ab etwa 5 m Tiefe	p-t, NW dynStab

¹⁾ p-t: Ermittlung Last-Zeitverlauf, NW dynStab: Führung des Nachweises der dynamischen Stabilität

Tab. 4: Untersuchungsprogramm schlechter Baugrund

Baugrundfall	Zugtyp	Schienenprofil	Zuggeschwindigkeit in km/h	Steifigkeit Zwischenlage in kN/mm	Schwelle	Unterbau	Felstiefe	¹⁾ Berechnungsart
schlecht	MGB „Komet“	52 E2 R350HT	50	85	Beton, besohlt	PSS	unendlicher Boden	p-t
schlecht	MGB „Komet“	52 E2 R350HT	50	200	Beton, besohlt	PSS	unendlicher Boden	p-t, NW dynStab
schlecht	MGB „Komet“	52 E2 R350HT	50	700	Beton, besohlt	PSS	unendlicher Boden	p-t
schlecht	MGB „Komet“	52 E2 R350HT	50	200	Beton, unbesohlt	PSS	unendlicher Boden	p-t
schlecht	MGB „Komet“	52 E2 R350HT	50	200	Beton, besohlt	ohne	unendlicher Boden	p-t, NW dynStab
schlecht	MGB „Komet“	52 E2 R350HT	50	700	Holz	PSS	unendlicher Boden	p-t
schlecht	MGB „Komet“	52 E2 R350HT	50	700	Stahl	PSS	unendlicher Boden	p-t
schlecht	MGB „Komet“	52 E2 R350HT	100	200	Beton, besohlt	PSS	unendlicher Boden	p-t, NW dynStab
schlecht	tpf „Abe 100“	52 E2 R350HT	50	200	Beton, besohlt	PSS	unendlicher Boden	p-t, NW dynStab
schlecht	tpf „Abe 100“	52 E2 R350HT	100	200	Beton, besohlt	PSS	unendlicher Boden	p-t, NW dynStab

¹⁾ p-t: Ermittlung Last-Zeitverlauf, NW dynStab: Führung des Nachweises der dynamischen Stabilität

4.3 Eingangsdaten und Berechnungsgrundlagen Modellerstellung

4.3.1 Oberbau

Als Material für die Gleisbettung wurde Schotter mit einer Dicke von 30 cm gewählt. Für die Schienen wurden die Eigenschaften einer Schiene 54 E2 R350T für den „schlechten“ Untergrund und einer Schiene 46 E1 R260 für den „mittelguten“ Baugrund angesetzt. Der Schwelentyp wurde in der Ermittlung der Last-Zeit-Verläufe für verschiedene Oberbauvarianten variiert. Hierbei wurden Betonschwellen Typ VÖV-E M2/M4 mit und ohne Besohlung mit unterschiedlich steifen Zwischenlagen (85 kN/m, 200 kN/m und 700 kN/m), Stahlschwellen Profiltyp TN25 und Holzschwellen (Länge x Breite x Höhe: 2000 mm x 260 mm x 150 mm) untersucht. In den 2D-FE-Analysen wurden lediglich besohlte Betonschwellen Typ VÖV-E M2/M4 gewählt.

4.3.2 Zugtyp und Geschwindigkeit

Das Frýba-Modell wurde gemäss Kick-off-Besprechung zur Unterbau- und Untergrundmodellierung an den Zugtyp MGB „Komet“ angepasst, wie in Abbildung 20 dargestellt. Die vorliegenden Analysen wurden für eine Zuggeschwindigkeit von 50 km/h bzw. 100 km/h durchgeführt.

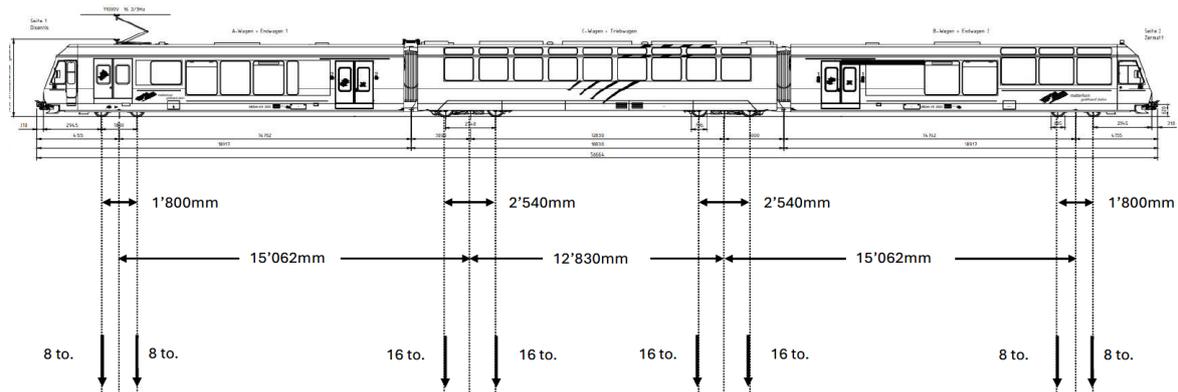


Abbildung 20: Zugtyp MGB „Komet“ mit Achsabständen und -lasten

4.3.3 Baugrundfälle

Es wurden drei unterschiedliche Qualitätsstufen des Untergrunds gewählt: „guter“, „mittelguter“ und „schlechter“ Untergrund. Da sich Untergrundverhältnisse nur schlecht verallgemeinern lassen, wurden drei konkreten Beispiele ausgewählt, welche die verschiedenen Qualitätsstufen repräsentieren. Als „guter“ Untergrund wurde Bahnhof Randa ausgewählt, da dort ein „kiesiger“ Boden herrscht. Die Erfahrung zeigt, dass dieser Baugrund wenig Probleme auslöst. Der gute Untergrund wurde im Rahmen des Projektes nicht im Detail nachgewiesen, da bereits erste Berechnungen zeigten, dass hier der Nachweis der dynamischen Stabilität jedenfalls erbracht werden kann. Als „mittelguter“ Untergrund wurde Bahnhof Oberalpass gewählt, da hier Silt bzw. siltiger Sand vorherrscht. Als Beispiel für „schlechten“ Untergrund wurde der Abschnitt Obergesteln – Oberwald übermittelt, da die Bahnstrecke hier direkt über Ton und Torf trassiert ist.

Mittelguter Baugrund

Die Baugrundsichtung der FE-Analysen mit mittelgutem Baugrund (Tab. 5) wurde dem übergebenen geologisch-geotechnischer Bericht für die Station Oberalpass, Strecke Brig – Disentis (km 77,307 bis km 77,760) entnommen. Die Sondierbohrung 2 („SB2“), ca. km 77.615, wurde als massgebender Aufschluss angesetzt. Die charakteristischen bodenmechanischen Kennwerte (Tab. 6) für die Ableitung der Stoffmodellparameter für die FE-Analyse wurden ebenfalls dem geologisch-geotechnischen Bericht für die Station Oberalpass entnommen. In einer Zusatzvariante wurden der untere Teil der Schicht Silte bis siltige Sande sowie die Schicht kiesige Sande bis Kiese ab 4,85 m unter GOK durch Fels ersetzt.

Tab. 5: Baugrundmodell

Baugrundschiicht	Oberkante in m ü. NHN	Unterkante in m ü. NHN	Schichtdicke in m
Schotter	2033,0	2032,5	¹⁾ 0,5
Künstliche Schüttung	2032,5	2031,5	1,0
Silte bis siltige Sande	2031,5	2024,8	6,7
Kiesige Sande bis Kiese	2024,8	-	-
²⁾ Fels	2028,15		

¹⁾ 0,3 m Mächtigkeit Schotter unterhalb der Schwelle

²⁾ Sondervariante auf Basis des mittelguten Baugrundmodells (Fels ersetzt unteren Bereich der Schichten Silte bis siltige Sande und Kiesige Sande bis Kiese)

Tab. 6: Charakteristische bodenmechanische Kennwerte

Baugrundschiicht	Wichte des feuch- ten Bodens	Wichte des Bo- dens unter Auf- trieb	Statischer Steifemodul
Benennung	γ in kN/m ³	γ' in kN/m ³	E_s in MN/m ²
Schotter	18,0	10,0	48
Künstliche Schüttung	20,0	10,0	15
Silte bis siltige Sande	19,5	9,5	15
Kiesige Sande bis Kiese	21,5	11,5	35
Fels	27,5	17,5	300

Der Grundwasserstand wurde korrespondierend mit dem Pegel des Oberalpsees mit 2027 m ü.M. angenommen. Es wurden die in Tab. 7 aufgeführten Grenzwerte der Scherdehnungen γ_v mit $I_p = 0\%$ als massgeblicher Schwellenwert in diesem Projekt gewählt. Die Annahme von $I_p = 0\%$ für nicht kohäsive Materialien ist konservativ im Hinblick auf γ_v . Der Fels wird im Rahmen des Nachweises nicht näher betrachtet. Da es im Fels nicht zu Kornumlagerungen / Verdichtung kommen kann ist entsprechend auch keine Scherdehnungsgrenze angegeben.

Tab. 7: Grenzwerte der Scherdehnung

Baugrundschrift Benennung	Grenzwert der Scherdehnung γ_w
Schotter	$8 \cdot 10^{-5}$
Künstliche Schüttung	$8 \cdot 10^{-5}$
Silte bis siltige Sande	$2 \cdot 10^{-5}$
Kiesige Sande bis Kiese	$8 \cdot 10^{-5}$

Schlechter Baugrund

Die Baugrundschriftung der FE-Analysen mit schlechtem Baugrund (Tab. 8) wurde dem übergebenen geologisch-geotechnischer Bericht für den Totalumbau Obergesteln - Oberwald (km 39,237 bis km 40,974) entnommen. Die Drucksondage 1 („DS01“), ca. km 40,980, wurde als massgebender Aufschluss angesetzt. Die charakteristischen bodenmechanischen Kennwerte (Tab. 9) für die Ableitung der Stoffmodellparameter für die FE-Analyse wurden ebenfalls dem geologisch-geotechnischer Bericht, MGBahn, Totalumbau Obergesteln-Oberwald entnommen.

Tab. 8: Baugrundmodell, schlechter Baugrund

Baugrundschrift	Oberkante in m ü. NHN	Unterkante in m ü. NHN	Schichtdicke in m
Schotteroberbau	1361,5	1361,0	0,5 ¹⁾
PSS	1361,0	1360,7	0,3
Ton 1	1360,7	1358,6	2,1
Torf 1	1358,6	1358,3	0,3
Ton 2	1358,3	1355,8	2,5
Torf	1355,8	1355,4	0,4
Silt / toniger Silt 1	1355,4	1352,7	2,7
Silt / toniger Silt 2	1352,7	1351,0	1,7
Feinsandiger Silt 1	1351,0	1341,0	10,0
Feinsandiger Silt 2	1341,0	-	-

¹⁾ 0,3 m Mächtigkeit Schotter unterhalb der Schwelle

Tab. 9: Charakteristische bodenmechanische Kennwerte, schlechter Untergrund

Baugrundsicht Benennung	Wichte des feuchten Bodens γ in kN/m ³	Wichte des Bodens unter Auftrieb γ' in kN/m ³	statischer Steifemodul E_s in MN/m ²
Schotter	18,0	10,0	48
PSS	21,0	11,0	40
Ton 1	19,0	9,0	3,5
Ton 2	19,0	9,0	4
Torf	15,0	5,0	2
Silt / toniger Silt 1	19,0	9,0	8
Silt / toniger Silt 2	19,0	9,0	10
Feinsandiger Silt 1	19,0	9,0	17,5
Feinsandiger Silt 2	19,0	9,0	20

Der Grundwasserstand wurde korrespondierend mit dem gemessenen Höchststand des Grundwasserspiegels mit 1361 m ü.M. angenommen.

Es wurden die in Tab. 10 aufgeführten Grenzwerte der Scherdehnungen γ_{tv} mit $I_p = 0\%$ als massgeblicher Schwellenwert in diesem Projekt gewählt. Die Annahme von $I_p = 0\%$ für nicht kohäsive Materialien ist konservativ im Hinblick auf γ_{tv} .

Tab. 10: Grenzwerte der Scherdehnung, schlechter Untergrund

Baugrundsicht Benennung	Grenzwert der Scherdehnung γ_{tv}
Schotter	$8 \cdot 10^{-5}$
PSS	$8 \cdot 10^{-5}$

Baugrundsicht	Grenzwert der Scherdehnung
Ton 1	$2 \cdot 10^{-5}$
Ton 2	$2 \cdot 10^{-5}$
Torf	$2 \cdot 10^{-5}$
Silt / toniger Silt 1	$8 \cdot 10^{-5}$
Silt / toniger Silt 2	$8 \cdot 10^{-5}$
Feinsandiger Silt 1	$8 \cdot 10^{-5}$
Feinsandiger Silt 2	$8 \cdot 10^{-5}$

4.4 2D-FE-Modellierung

Die Berechnungen erfolgten mit dem Programmpaket Plaxis 2D in der aktuellen Version 2024.2.

4.4.1 *Aufbau und Randbedingungen des 2D-FE Modells*

Die Berechnungsdomäne des Gesamtmodells für den mittelguten Baugrund zeigt Abbildung 21, für mittelguten Baugrund mit Fels Abbildung 22 und für den schlechten Baugrund zeigt Abbildung 23.

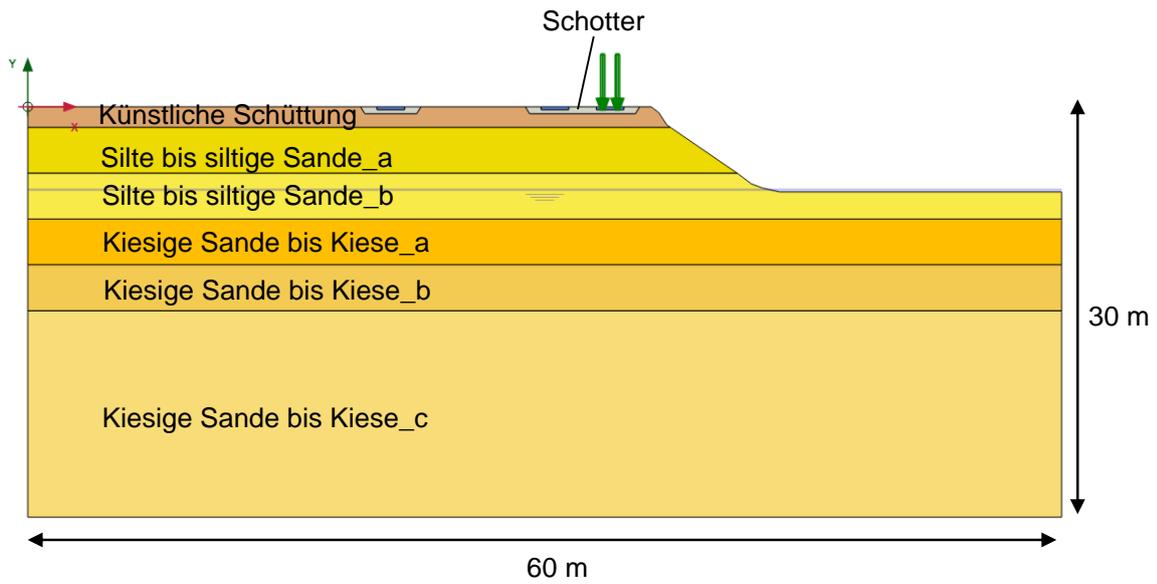


Abbildung 21: Berechnungsmodell mit Baugrundsichten und Abmessungen für den mittelguten Bau-
 grund

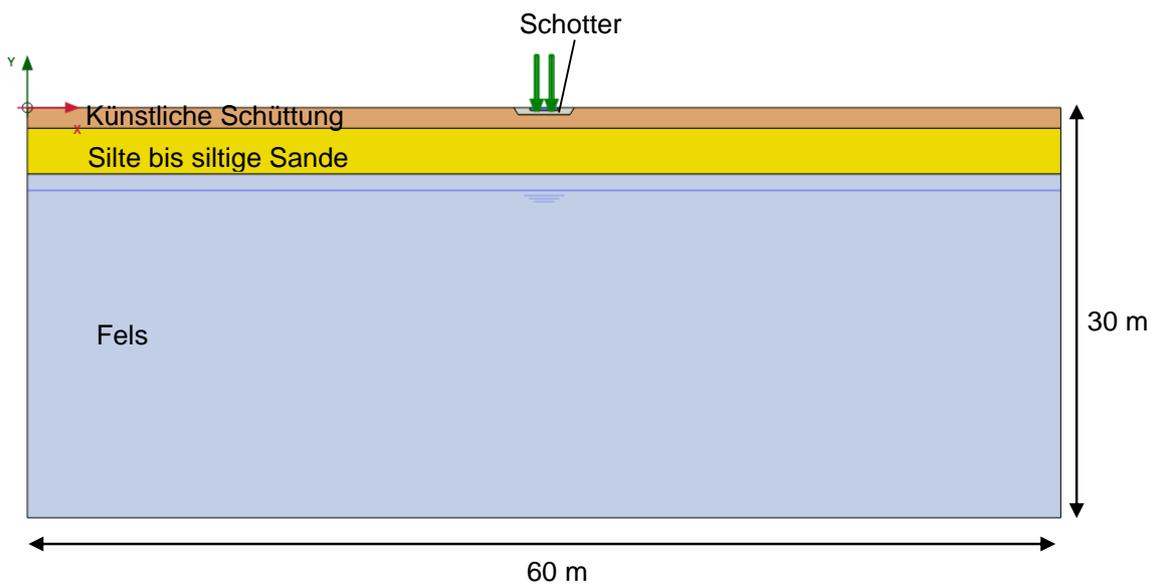


Abbildung 22: Berechnungsmodell mit Baugrundsichten und Abmessungen für den mittelguten Bau-
 grund mit Fels

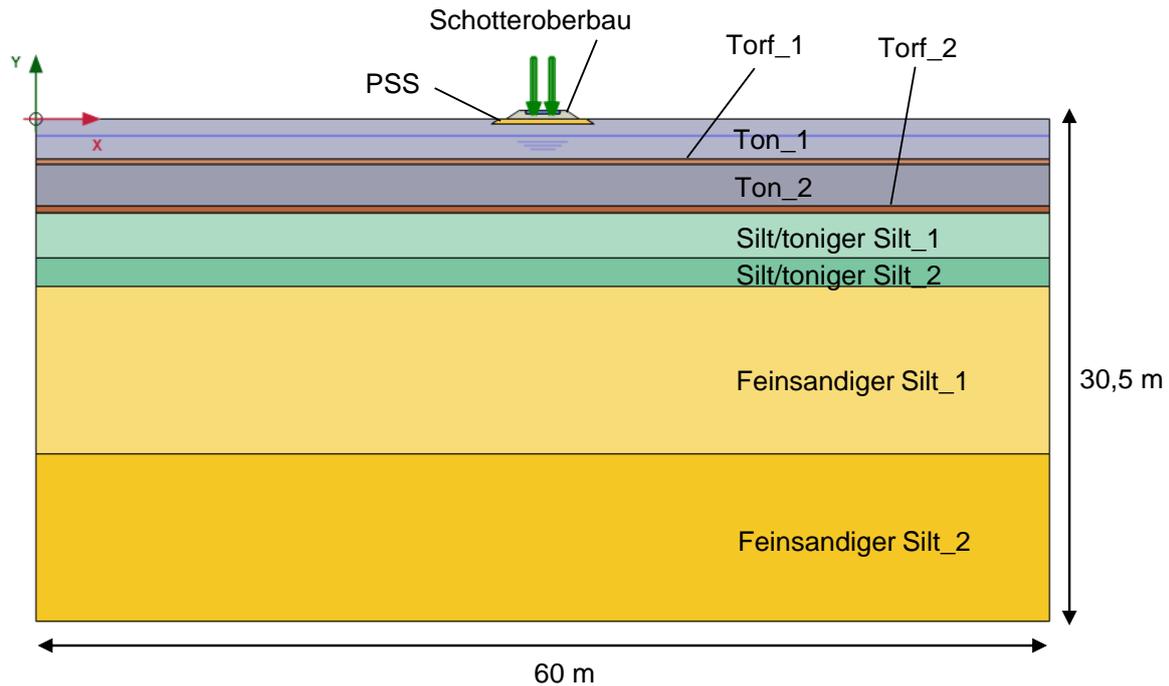


Abbildung 23: Berechnungsmodell mit Baugrundsichten und Abmessungen für den schlechten Baugrund mit PSS

Für alle Materialien in den Modellen wurde das linear-elastische Stoffgesetz verwendet. An den seitlichen Begrenzungen sowie am Boden des Modells wurden viskose Randbedingungen verwendet, um sich ausbreitende dynamische Wellen zu absorbieren. Um den Effekt der Absorption zu verbessern, wurden in den Modellen, die gemäss dem Plaxis Scientific Manual empfohlenen Werte für die Relaxationskoeffizienten C_1 und C_2 verwendet ($C_1 = 1,00$ und $C_2 = 0,25$).

Um ein ausreichend feines Netz und einen konstanten Integrationszeitschritt sicherzustellen, der klein genug ist, um eine realistische Wiedergabe der dynamischen Wellen in den dynamischen 2-D-FE-Analysen zu gewährleisten, gibt die Planungshilfe [13] die folgenden Richtlinien vor:

- Der Zeitschritt Δt sollte klein genug sein, um Längen von $1/10$ bis $1/5$ der charakteristischen Längen im Modell zu erfassen. In diesem Fall der Achsabstand der Schwellen von $0,6$ m. Es ergibt sich exemplarisch für das Modell mit schlechtem Baugrund für den gewählten Zeitschritt $\Delta t = 0,0043$ s und mit einer Zuggeschwindigkeit von 50 km/h = $13,9$ m/s:

$$\Delta t = 0,0043 \text{ s} \leq 1/10 \cdot 0,6 \text{ m} / 13,9 \text{ m/s} = 0,0043 \text{ s}$$

- Die Abstände zwischen den Integrationspunkten im FE-Netz müssen klein genug sein, um die relevanten Wellenlängen zu erfassen, was erfüllt ist, wenn $l_c \leq v_s \Delta t$ gilt (v_s - charakteristische Scherwellengeschwindigkeit, l_c - kürzester Abstand zwischen zwei Integrationspunkten). Es ergibt sich exemplarisch für das Modell mit schlechtem Baugrund:

$$28,6 \text{ m/s} \cdot 0,0043 \text{ s} = 0,1232 \text{ m}$$

Es werden Plaxis 2D-Elemente mit 15 Knoten verwendet, weshalb die von Plaxis angegebene Elementgröße durch 4 geteilt werden muss, um den tatsächlichen Abstand zu erhalten, wie in Abbildung 24 dargestellt.

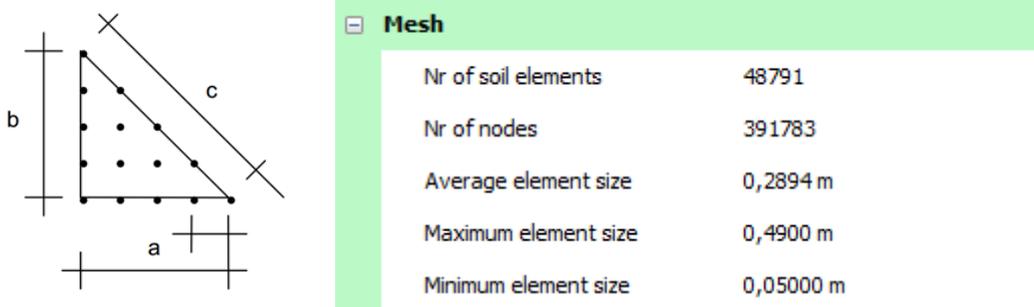


Abbildung 24: 2D-FE-Element mit 15 Knoten und Netzeigenschaften des 2D-FE-Modells

Plaxis verwendet die Rayleigh-Dämpfung, um die Materialdämpfung in den linear-elastischen dynamischen FE-Analysen zu berücksichtigen. Der Nachteil dieses Ansatzes ist seine Abhängigkeit von der Frequenz. Die Parameter $\alpha = 0,3648$ und $\beta = 0,3080 \cdot 10^{-3}$ wurden so gewählt, dass in Übereinstimmung mit der Planungshilfe [13], wie in Abbildung 25 exemplarisch für die Schicht Ton im Modell mit schlechtem Baugrund dargestellt, im relevanten Frequenzbereich von 1 bis 40 Hz ein minimales mittleres Materialdämpfungsverhältnis D_R (bzw. ξ in Plaxis) von ca. 2 % auftritt. Diese Parameter wurden für alle Materialien verwendet.

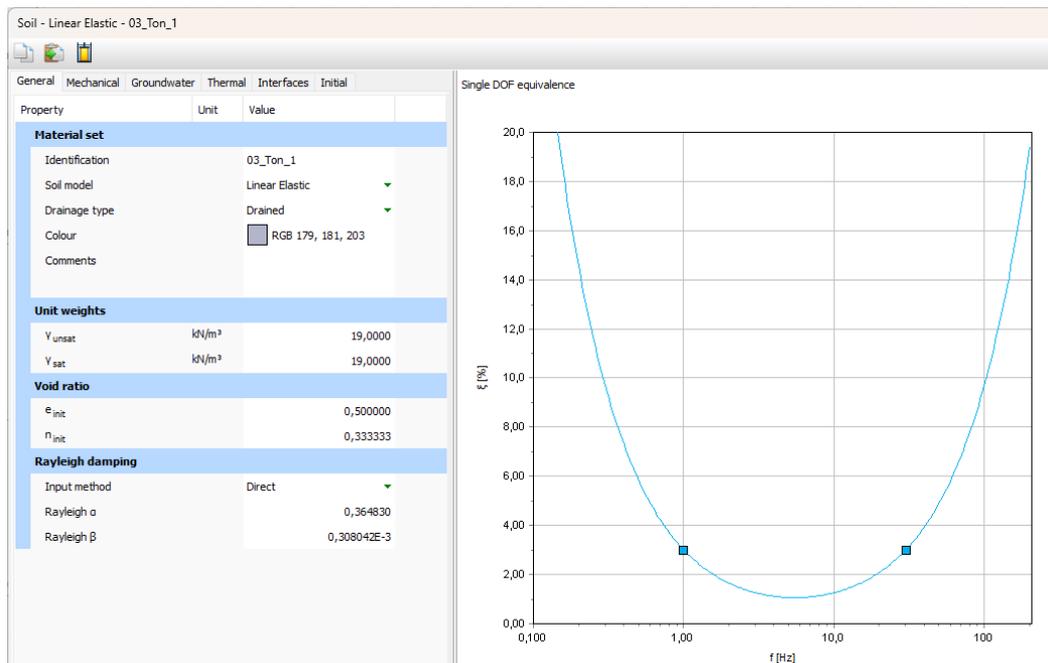


Abbildung 25: Bestimmung der Rayleigh-Parameter α und β

4.4.2 Berechnungsablauf

Die FE-Analysen gliedern sich unter Berücksichtigung des Bauablaufs in folgende Phasen (Abbildung 26):

Generierung des Anfangsspannungszustandes mittels K_0 -Prozedur und anschliessendem plastischen Null-Schritt (InitialPhase + Phase_1); Statische Belastung zur Ermittlung des Bet-
 tungsmoduls (Phase_2); Dynamische Belastung unter Ansatz des Last-Zeitverlaufs
 (Phase_3).

ID	Calculation type	Loading type (D)	Pore pressure calculation type	Time interval	Updated mesh (D)	Max steps (D)	First step	Last step
 Initial phase [InitialPhase]				00000 day		1000	0	0
 Nil Phase [Phase_1]				,00000 day		1000	1	2
 Statische Belastung [Phase_2]				,00000 day		1000	3	4
 Dynamische Belastung [Phase_3]				3,92040 s		912	5	916

Abbildung 26 Berechnungsphasen

4.4.3 **Untersuchungsprogramm**

Im Rahmen der vorliegenden Modellbildung sollte der Einfluss der nachfolgend aufgeführten Variationsgrößen auf die Langzeitlagesstabilität (dynamische Stabilität) untersucht werden. In einem ersten Schritt wurden zunächst lediglich die rechnerischen Last-Zeitverläufe für die zu untersuchenden Varianten berechnet. Da sich hierbei zeigt, dass viele Variationsgrößen im Rahmen des rechnerischen Nachweises der dynamischen Stabilität keinen nennenswerten Einfluss auf die Zeitverläufe haben, wurden nur für ausgewählte Fälle auch die iterativen dynamischen FE-Analysen durchgeführt.

1. Oberbauvarianten mit Last-Zeitverläufen (für mittelguten Baugrund ohne PSS und schlechten Baugrundfall mit PSS)
 - Betonschwelle mit Besohlung (Zwischenlage 200 kN/m), Zuggeschwindigkeit 50 km/h
 - Betonschwelle ohne Besohlung (Zwischenlage 200 kN/m), Zuggeschwindigkeit 50 km/h
 - Betonschwelle mit Besohlung (Zwischenlage 85 kN/m), Zuggeschwindigkeit 50 km/h
 - Betonschwelle mit Besohlung (Zwischenlage 700 kN/m), Zuggeschwindigkeit 50 km/h
 - Holzschwelle, Zuggeschwindigkeit 50 km/h
 - Stahlschwelle, Zuggeschwindigkeit 50 km/h
 - Betonschwelle mit Besohlung (Zwischenlage 200 kN/m), Zuggeschwindigkeit 100 km/h
 - mit / ohne PSS / AC-Rail (nur für schlechten Baugrund)

2. 2D-FE-Analysen für mittelguten Baugrund und schlechten Baugrund
 - Mittelguter Baugrund ohne PSS, Betonschwelle mit Besohlung (Zwischenlage 200 kN/m), Zuggeschwindigkeit 50 km/h
 - Mittelguter Baugrund ohne PSS, Stahlschwelle (Zwischenlage 200 kN/m), Zuggeschwindigkeit 50 km/h
 - Mittelguter Baugrund ohne PSS, Betonschwelle mit Besohlung (Zwischenlage 200 kN/m), Zuggeschwindigkeit 100 km/h
 - Schlechter Baugrund mit PSS, Betonschwelle mit Besohlung (Zwischenlage 200 kN/m), Zuggeschwindigkeit 50 km/h
 - Schlechter Baugrund ohne PSS, Betonschwelle mit Besohlung (Zwischenlage 200 kN/m), Zuggeschwindigkeit 50 km/h

4.4.4 **Last-Zeit-Verläufe**

Mittelguter Baugrund

Für den mittelguten Baugrund (ohne PSS, MGB „Komet“) wurden die Last-Zeitverläufe für verschiedene Oberbauvarianten (Abbildung 27) ermittelt. Weiterhin wurden eine Variante mit AC-Rail (Abbildung 28) und Variationen der Zuggeschwindigkeiten (Abbildung 29) untersucht.

Es zeigt sich, dass sich die Peaks in den Last-Zeitverläufen für alle untersuchten Oberbauvarianten bis auf die Variante mit der Stahlschwelle nicht signifikant unterscheiden. Es ergeben sich bezogen auf die Variante mit besohlter Stahlschwelle und Zwischenlagen mit einer Steifigkeit von 200 kN/mm maximale Abweichungen der Spitzenlasten von bis zu etwa -3 % für die Variante mit 85 kN/mm Steifigkeit der Zwischenlage.

Für die Variante mit Stahlschwelle ergeben sich bezogen auf die Variante mit besohlter Betonschwelle und Zwischenlagen mit einer Steifigkeit von 200 kN/mm maximale Abweichungen von etwa +19 %. Diese Abweichung der Spitzenlast liegt hauptsächlich in der gegenüber der Beton- und Stahlschwelle abweichenden Geometrie und in der Steifigkeit der Schwelle begründet. Aufgrund der Abweichung der Spitzenlast zwischen der Beton- und der Stahlschwelle wurde für diese beide Varianten der Nachweis der dynamischen Stabilität geführt.

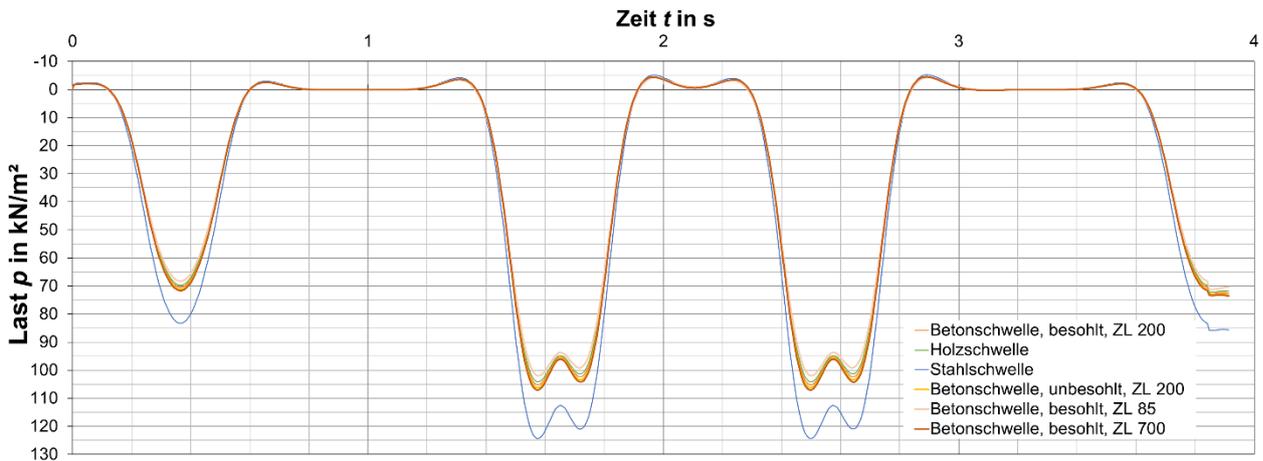


Abbildung 27: Last-Zeitverläufe für alle untersuchten Oberbauvarianten, MGB „Komet“, Zuggeschwindigkeit 50 km/h, ohne PSS, mittelguter Baugrund

Für die Variante mit AC-Rail ergab sich eine im Vergleich zur Variante ohne PSS / AC-Rail um weniger als 1 % höhere Spitzenlast. Der Unterbau hat praktisch keinen Einfluss auf den Last-Zeitverlauf.



Abbildung 28: Last-Zeitverläufe für untersuchte Unterbauvarianten mit und ohne AC-Rail, MGB „Komet“, Zuggeschwindigkeit 50 km/h, mittelguter Baugrund

Für die Variante mit einer Zuggeschwindigkeit von 100 km/h ergibt sich gegenüber der Variante mit einer Zuggeschwindigkeit von 50 km/h nur geringfügig höhere Spitzenlast (etwa +3 %). Wie Abbildung 29 zeigt, verkürzt sich jedoch wegen der erhöhten Zuggeschwindigkeit

der zeitliche Abstand zwischen den Peaks im Last-Zeitverlauf, womit sich eine andere Belastungssituation einstellt. Daher wurde für die Variante mit einer Zuggeschwindigkeit von 100 km/h der Nachweis der dynamischen Stabilität geführt.

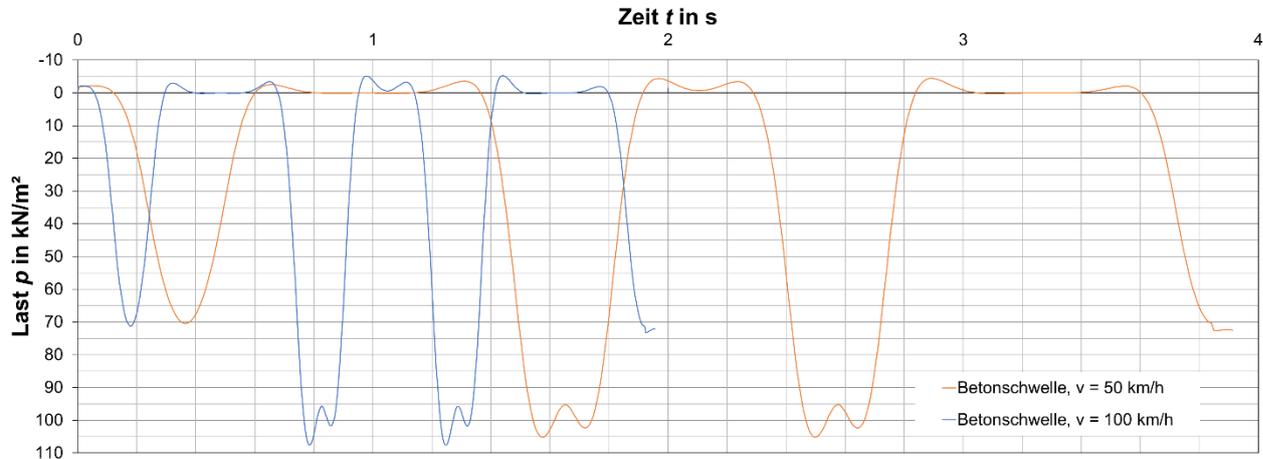


Abbildung 29: Last-Zeitverläufe für Zuggeschwindigkeiten 50 km/h und 100 km/h, Betonschwelle beschlitt, ohne PSS, MGB „Komet“, mittelguter Baugrund

Für den Zugtyp „ABe 100“ ergibt sich bei einer Zuggeschwindigkeit von 50 km/h, wie Abbildung 30 zeigt, eine um etwa 8 % geringere Spitzenlast im Vergleich zum MGB „Komet“. Der Last-Zeitverlauf für den tpf „ABe 100“ bei einer Zuggeschwindigkeit von 100 km/h (nicht dargestellt) liefert, wie beim MGB „Komet“ gezeigt, gegenüber der Variante mit 50 km/h eine ähnliche Spitzenlast, wobei die zeitlichen Abstände zwischen den Peaks sich verkürzen. Auf Basis der Last-Zeitverläufe wurde wegen der daraus resultierenden veränderten Belastungssituation der Nachweis der dynamischen Stabilität auch für die Varianten mit dem tpf „ABe 100“ für die Zuggeschwindigkeiten 50 km/h und 100 km/h geführt.



Abbildung 30: Last-Zeitverläufe für Zugtypen MGB „Komet“ und tpf „ABe 100“, Zuggeschwindigkeit 50 km/h, Betonschwelle beschlitt, ohne PSS, mittelguter Baugrund

Für die Variante mit Fels bei einer Zuggeschwindigkeit von 100 km/h ergibt sich aufgrund des deutlich höheren Bettungsmoduls gegenüber der Variante ohne Fels eine um etwa 12 % höhere Spitzenlast (Abbildung 31). Auch für die Variante mit Fels wurde der Nachweis der dynamischen Stabilität geführt.

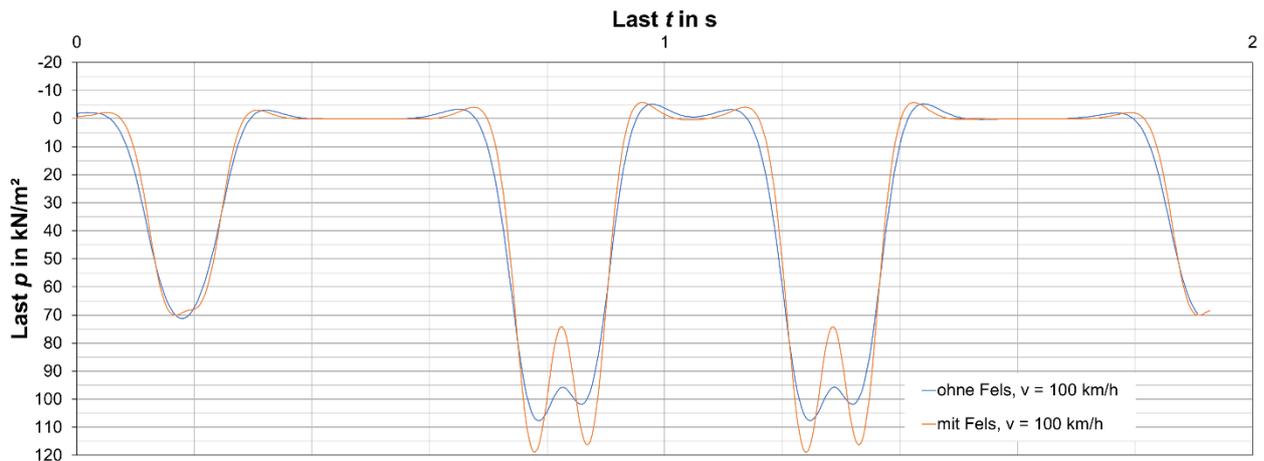


Abbildung 31: Last-Zeitverläufe für mittelguten Baugrund mit und ohne Fels, MGB „Komet“, Zuggeschwindigkeit 100 km/h, Betonschwelle besohlt, ohne PSS

Schlechter Baugrund

Auch für den schlechten Baugrund (mit PSS) wurden die Last-Zeitverläufe für verschiedene Oberbauvarianten (Abbildung 32) und für eine Variante ohne PSS (Abbildung 33) ermittelt. Weiterhin wurden Variationen der Zuggeschwindigkeiten (Abbildung 34) und des Zugtyps (Abbildung 35) untersucht.

Es zeigt sich, dass sich die Spitzenlast in den Last-Zeitverläufen für alle untersuchten Oberbauvarianten nicht signifikant unterscheidet. Es ergeben sich bezogen auf die Variante mit besohlter Stahlschwelle und Zwischenlagen mit einer Steifigkeit von 200 kN/mm maximale Abweichungen der Spitzenlasten von bis zu etwa -3 % für die Variante mit 85 kN/mm Steifigkeit der Zwischenlage.

Für die Variante mit Stahlschwelle ergeben sich bezogen auf die Variante mit besohlter Betonschwelle und Zwischenlagen mit einer Steifigkeit von 200 kN/mm maximale Abweichungen von etwa +23 %. Ähnlich wie beim mittelguten Baugrund liegt die hohe Abweichung der Spitzenlast hauptsächlich in der gegenüber der Beton- und Stahlschwelle abweichenden Geometrie und in der Steifigkeit der Schwelle begründet. Für die Variante mit Stahlschwelle wurde auf Basis der Ergebnisse der Berechnungen mit mittelgutem Baugrund nicht der Nachweis der dynamischen Stabilität geführt.

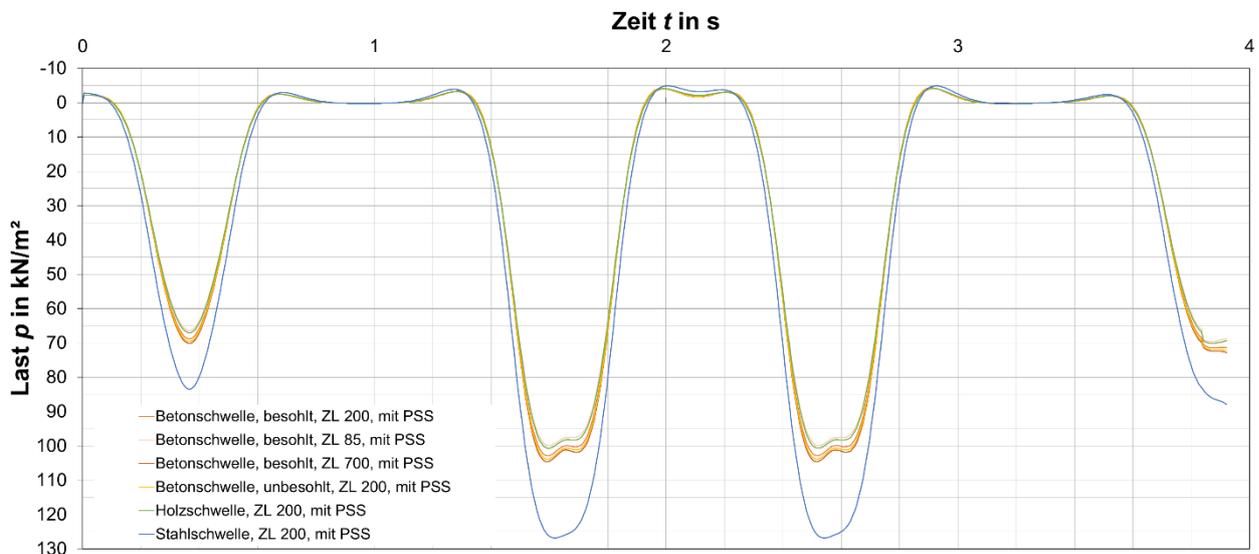


Abbildung 32: Last-Zeitverläufe für alle untersuchten Oberbauvarianten, Zuggeschwindigkeit 50 km/h,
mit PSS, schlechter Baugrund

Um zu untersuchen, ob der Unterbau einen signifikanten Einfluss auf den Nachweis der dynamischen Stabilität hat, wurde dieser für die Variante ohne PSS geführt, auch wenn die Unterschiede in den Last-Setzungsverläufen gering sind (Variante ohne PSS etwa 2 % geringere Spitzenlast als Variante mit PSS).

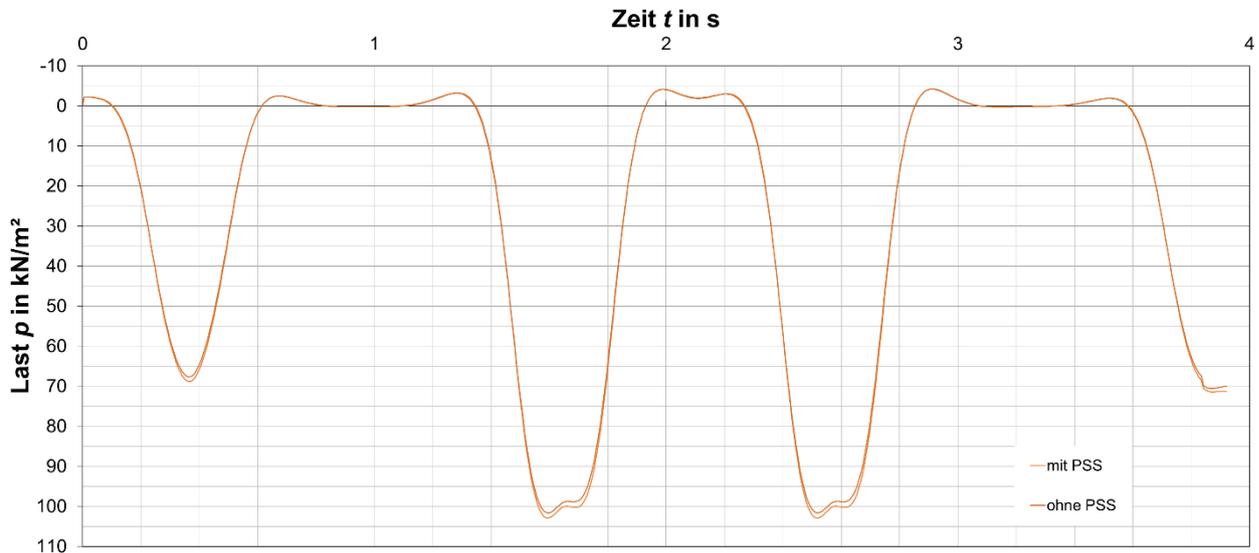


Abbildung 33: Last-Zeitverläufe für Varianten mit und ohne PSS, Zuggeschwindigkeit 50 km/h,
schlechter Baugrund

Für die Variante mit einer Zuggeschwindigkeit von 100 km/h ergibt sich gegenüber der Variante mit einer Zuggeschwindigkeit von 50 km/h eine annähernd gleiche Spitzenlast. Wie Abbildung 34 zeigt, verkürzt sich jedoch wegen der erhöhten Zuggeschwindigkeit, der zeitliche Abstand zwischen den Peaks im Last-Zeitverlauf (Drehgestelle des MGB „Komet“), womit sich eine andere Belastungssituation einstellt. Daher wurde für die Variante mit einer Zuggeschwindigkeit von 100 km/h der Nachweis der dynamischen Stabilität geführt.

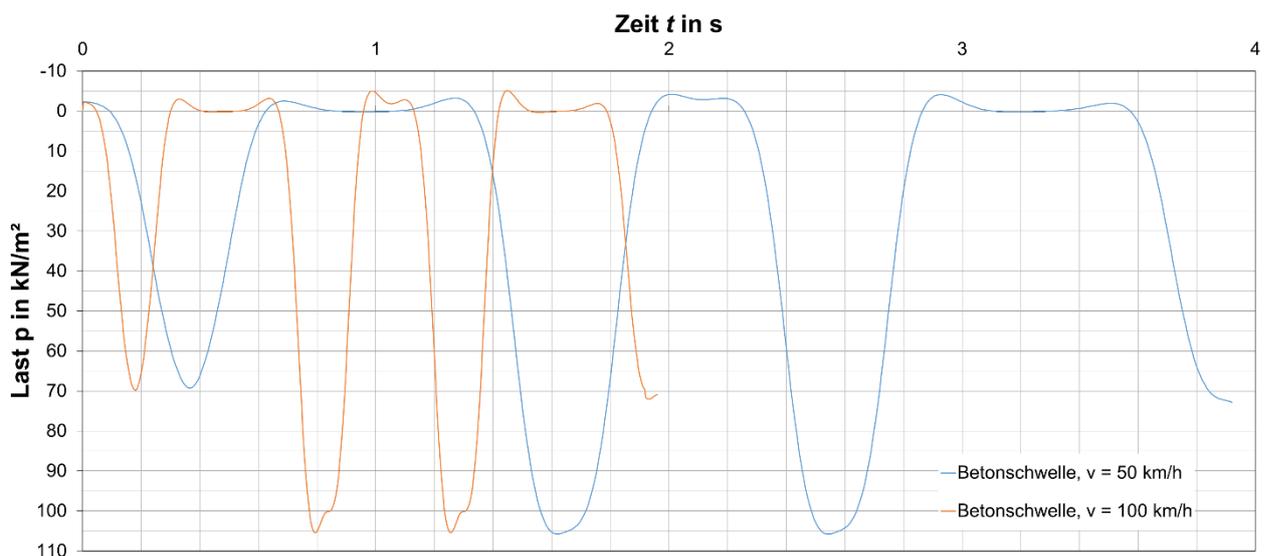


Abbildung 34: Last-Zeitverläufe für Zuggeschwindigkeiten 50 km/h und 100 km/h, Betonschwelle bescholt, mit PSS, MGB „Komet“, schlechter Baugrund

Für den Zugtyp „ABe 100“ ergibt sich bei einer Zuggeschwindigkeit von 50 km/h, wie Abbildung 35 zeigt, eine um etwa 8 % geringere Spitzenlast. Der Last-Zeitverlauf für den tpf „ABe 100“ bei einer Zuggeschwindigkeit von 100 km/h (nicht dargestellt) liefert, wie beim MGB „Komet“ gezeigt, gegenüber der Variante mit 50 km/h eine ähnliche Spitzenlast, wobei die zeitlichen Abstände zwischen den Peaks sich verkürzen. Auf Basis der Last-Zeitverläufe wurde deshalb der Nachweis der dynamischen Stabilität auch für die Varianten mit dem tpf „ABe 100“ für die Zuggeschwindigkeiten 50 km/h und 100 km/h geführt.

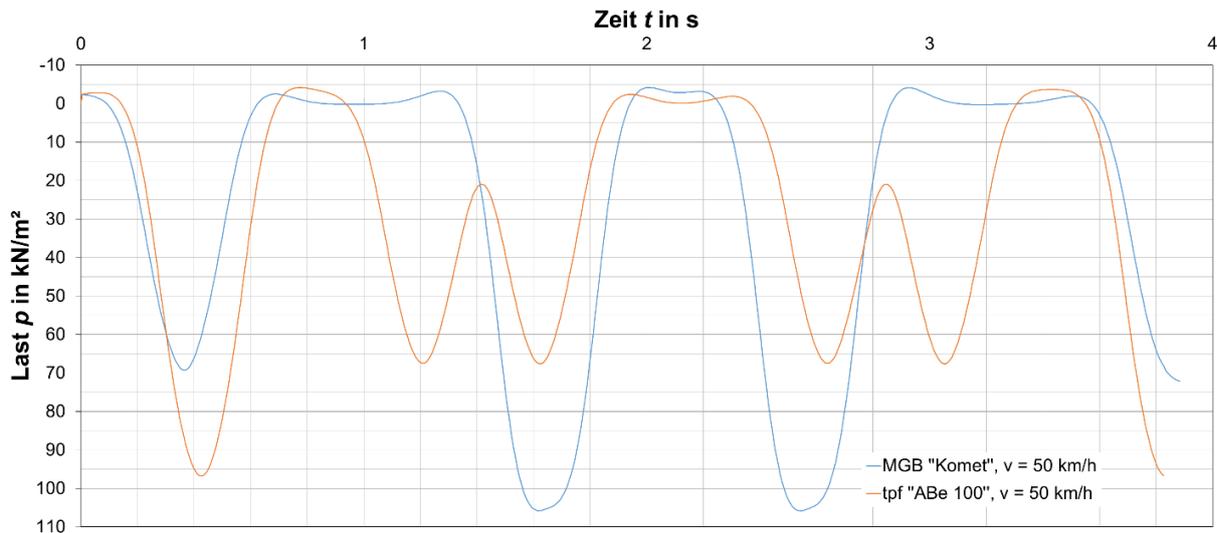


Abbildung 35: Last-Zeitverläufe für Zugtypen MGB „Komet“ und tpf „ABe 100“, Zuggeschwindigkeit 50 km/h, Betonschwelle besohlt, ohne PSS, mittelguter Baugrund

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die einzelnen Oberbaukomponenten Besohlung und Steifigkeit der Zwischenlagen praktisch keinen Einfluss auf den Last-Zeitverlauf bzw. auf die resultierenden Bodenpressungen an der Unterkante der Schwelle haben. Lediglich für die Stahlschwelle ergibt sich für den mittelguten Baugrund eine um etwa 19 % und für den schlechten Baugrund eine um etwa 23 % höhere Spitzenlast. Dies ist allerdings auf die Grösse der Aufstandsfläche (Geometrie der Schwelle) bzw. die Ersatzsteifigkeit der Schwelle und des darin verspannten Schotters zurückzuführen, wobei hierfür im Rahmen des verwendeten Modells Annahmen getroffen werden mussten. Auch der Unterbau hat einen geringen Einfluss auf den Last-Zeit-Verlauf.

Im Gegensatz dazu beeinflussen der Fahrzeugtyp (Grösse der Achslasten) und die Zuggeschwindigkeit den Last-Zeitverlauf wesentlich.

4.4.5 FE-Analysen, Nachweis der dynamischen Stabilität

Mittelguter Baugrund

Abbildung 36 zeigt für den mittelguten Baugrund ohne PSS mit besohlter Betonschwelle bzw. Stahlschwelle die endgültige Scherdehnungsverteilung in Abhängigkeit von der Tiefe unter dem dynamisch belasteten Gleis zusammen mit dem Grenzwert der Scherdehnung für jede Schicht nach Vucetic [16] und Hsu und Vucetic [17]. Die Scherdehnungen sind für alle

Schichten kleiner als der Grenzwert γ_{tv} , d.h. die dynamische Stabilität konnte für diesen Fall auf Basis der hier vorgestellten numerischen Analysen nachgewiesen werden. Für die Variante mit Stahlschwelle ergibt sich lediglich für den Schichtgrenzbereich zwischen Schotter und künstlicher Schüttung eine geringfügige Überschreitung der Scherdehnungsgrenze. Ansonsten sind die ermittelten Scherdehnungswerte über die Tiefe annähernd gleich, d.h. die Schwellenart hat nur einen geringfügigen Einfluss auf den Nachweis der dynamischen Stabilität.

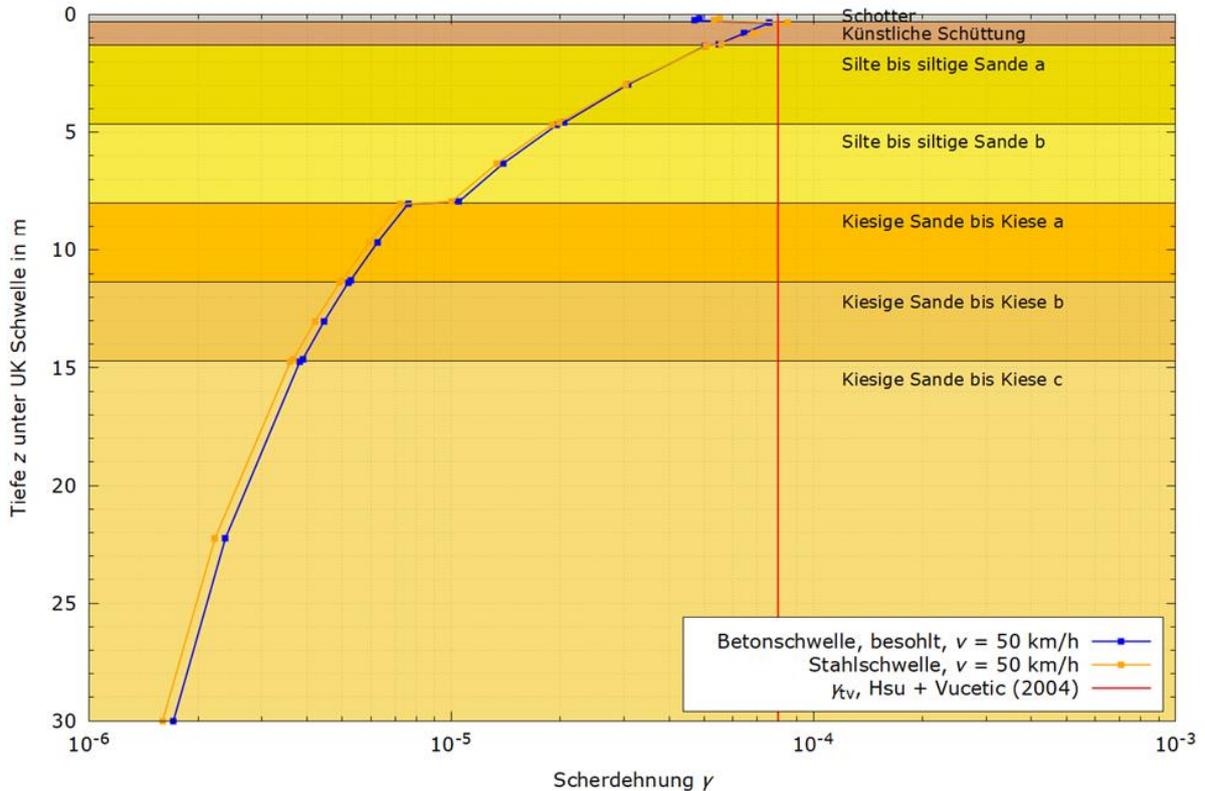


Abbildung 36: Scherdehnung über die Tiefe, Modell mit besohlter Betonschwelle und mit Stahlschwelle, ohne PSS, mittelguter Baugrund

Abbildung 37 zeigt für den mittelguten Baugrund als Varianten ohne PSS mit dem MGB „Komet“ und mit dem tpf „ABe 100“ für die Zuggeschwindigkeiten 50 km/h und 100 km/h die rechnerisch resultierende Scherdehnungsverteilung über die Tiefe unter dem dynamisch belasteten Gleis zusammen mit dem Grenzwert der Scherdehnung für jede Schicht. Die Scherdehnungen überschreiten für die Varianten mit dem MGB „Komet“ und den tpf „ABe 100“ bei einer Zuggeschwindigkeit von 100 km/h für die Schicht Künstliche Schüttung den Grenzwert γ_{tv} , d.h. die dynamische Stabilität konnte für beide Zugtypen bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h auf Basis der hier vorgestellten numerischen Analysen nicht nachgewiesen werden. Für die Varianten mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h wurde der Nachweis erbracht. Aufgrund der geringeren Achslasten ist die Scherdehnung für den tpf „ABe 100“ geringer als für den MGB „Komet“. Die Scherdehnungen in der Schicht künstliche Schüttung sind bei einer Zuggeschwindigkeit von 50 km/h im Mittel durch Wechsel vom MGB „Komet“ zum tpf „ABe 100“ um etwa 11 % geringer. Eine Erhöhung der Zuggeschwindigkeit auf 100 km/h verursacht eine Steigerung der Scherdehnung um etwa 96 % beim MGB „Komet“ und um etwa 98 % beim tpf „ABe 100“.

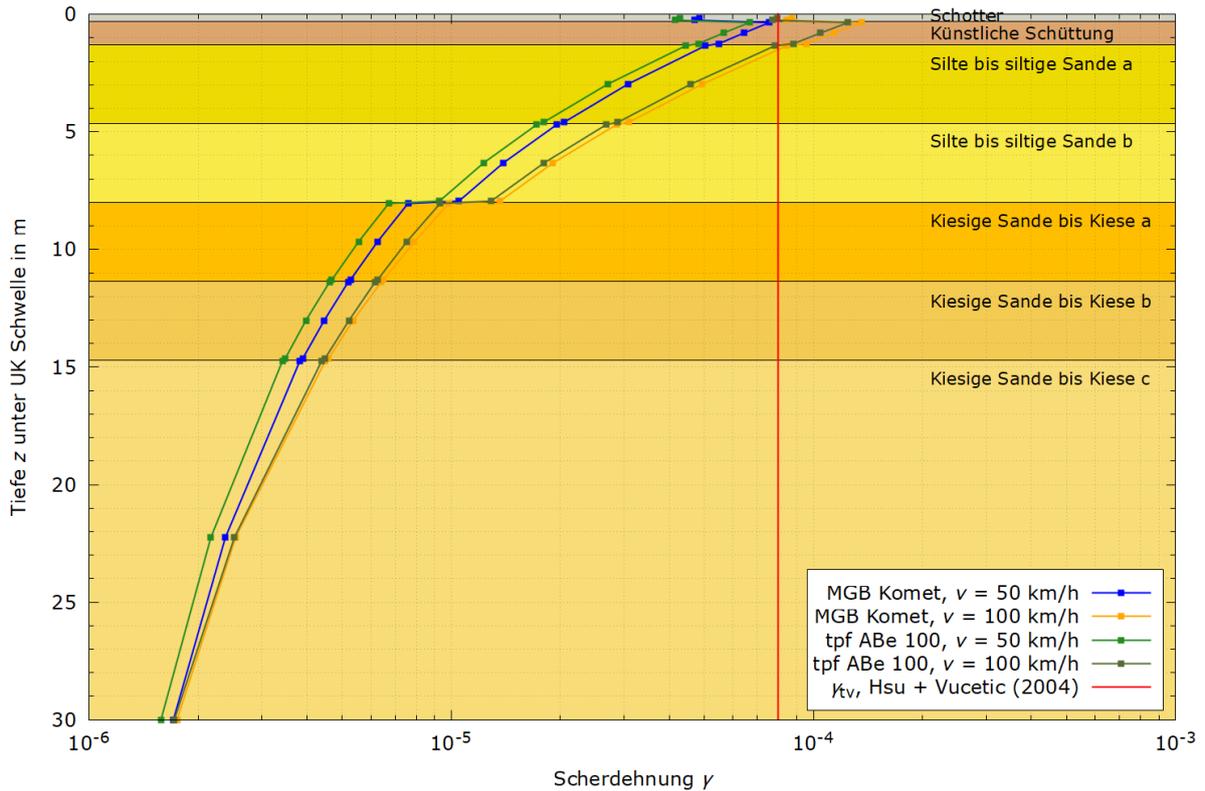


Abbildung 37: Scherdehnung über die Tiefe, Modell mit besohlter Betonschwelle, ohne PSS, Variation der Zuggeschwindigkeit und des Zugtyps, mittelguter Baugrund

Abbildung 38 zeigt für den mittelguten Baugrund ohne PSS mit Fels ab einer Tiefe von 4,65 m unter Unterkante Schwelle mit dem MGB „Komet“ und einer Zuggeschwindigkeit von 100 km/h die rechnerisch resultierende Scherdehnungsverteilung über die Tiefe. Die Scherdehnungen überschreiten für die Schichten Schotter und Künstliche Schüttung sowie für den oberen Bereich der Schicht Silte bis siltige Sande den Grenzwert γ_{tv} , d.h. die dynamische Stabilität konnte für die Variante mit im Untergrund anstehendem Fels bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h auf Basis der hier vorgestellten numerischen Analysen nicht nachgewiesen werden. Vergleicht man die rechnerisch auftretenden Scherdehnungen der Varianten mit und ohne Fels, so zeigt sich, dass die Scherdehnungen in der Variante mit Fels bis in den oberen Bereich der Schicht Silte bis siltige Sande a (bis etwa 2,3 m Tiefe unter UK Schwelle) um bis zu 52 % grösser sind. Dieser signifikante Unterschied liegt im rechnerisch um 150 % höheren Bettungsmodul der Schienen durch das Vorhandensein des Fels begründet. Es wird vermutet, dass der anstehende Fels zu einer Wellenreflexion führt, wodurch die erhöhte Scherdehnung im Bereich der künstlichen Schüttung begründet werden kann.

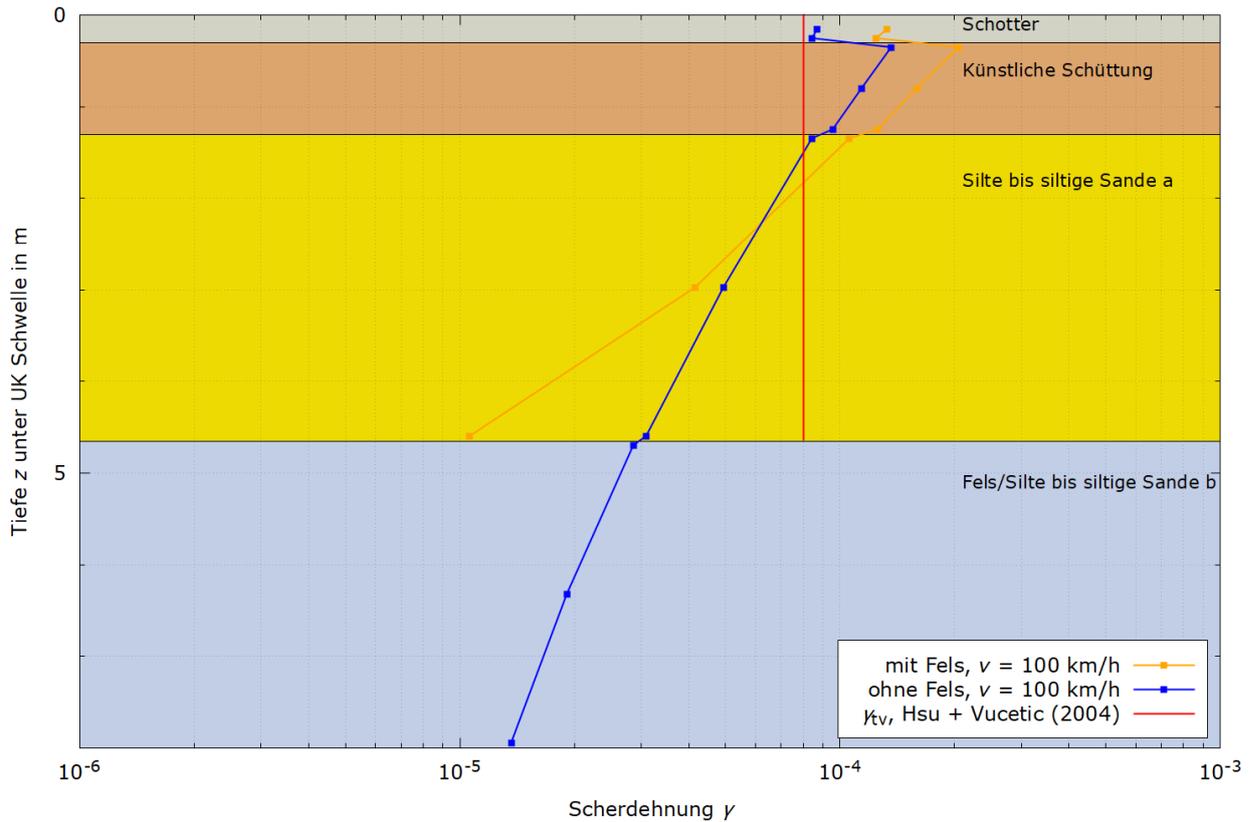


Abbildung 38: Scherdehnung über die Tiefe, Modell mit besohlter Betonschwelle, ohne PSS, mittelguter Baugrund mit / ohne Fels

Schlechter Baugrund

Abbildung 39 zeigt für den schlechten Baugrund mit bzw. ohne PSS und besohlter Betonschwelle die rechnerisch resultierende Scherdehnungsverteilung über die Tiefe unter dem dynamisch belasteten Gleis zusammen mit dem Grenzwert der Scherdehnung für jede Schicht. Die Scherdehnungen sind bis zu einer Tiefe von etwa 3,0 m unter Unterkante Schwelle (ausgenommen Bereich von etwa 1,5 m bis 2,7 m unter UK Schwelle) grösser als der Grenzwert γ_{tv} , d.h. die dynamische Stabilität konnte für diese Varianten nicht nachgewiesen werden. Die PSS bewirkt im Tiefenbereich der PSS selbst eine signifikante Reduktion der Scherdehnung, auf die Scherdehnungen des darunter anstehenden Bodens hat die PSS keinen nennenswerten Einfluss. Dieses Ergebnis lässt sich auch so auf die Verwendung von AC-Rail übertragen. Die Ergebnisse für den schlechten Baugrundfall decken sich mit den Beschreibungen im zugehörigen Baugrundgutachten, wonach im Projektgebiet wiederholt (Differenz-) Setzungen der Schienen bzw. Gleislagefehler aufgetreten sind, was in damit einhergehenden erhöhten Streckenunterhaltungskosten resultierte.

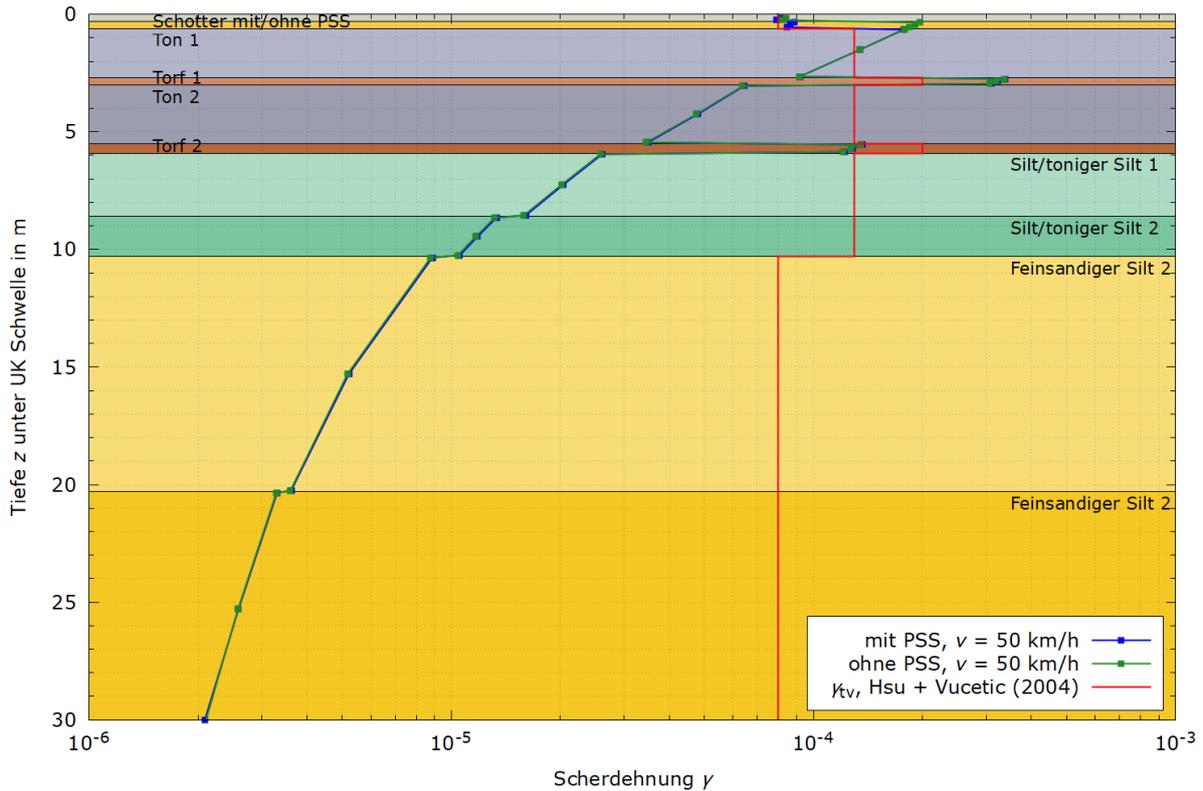


Abbildung 39: Scherdehnung über die Tiefe, Modell mit besohlter Betonschwelle, mit und ohne PSS, schlechter Baugrund

Abbildung 40 zeigt für die Variation des Fahrzeugtyps und der Zuggeschwindigkeit für den schlechten Baugrund mit PSS bei besohlter Betonschwelle die rechnerisch resultierende Scherdehnungsverteilung über die Tiefe. Die Scherdehnungen sind für beide Fahrzeugtypen bei einer Zuggeschwindigkeit von 50 km/h bis zu einer Tiefe von etwa 3,0 m (ausgenommen Bereich von etwa 1,5 m bis 2,7 m unter UK Schwelle) und bei einer Zuggeschwindigkeit von 100 km/h bis zu einer Tiefe von fast 6,0 m (ausgenommen Bereich von etwa 4,0 m bis 5,5 m unter Unterkante Schwelle) unter Unterkante Schwelle grösser als der Grenzwert γ_{tv} . D.h. die dynamische Stabilität konnte für diese Varianten auf Basis der hier vorgestellten numerischen Analysen nicht nachgewiesen werden. Insbesondere die beiden Torfschichten erhöhen die Scherdehnungen, wohingegen festgestellt werden kann, dass die installierte PSS eine wesentliche Reduktion dieser bewirkt.

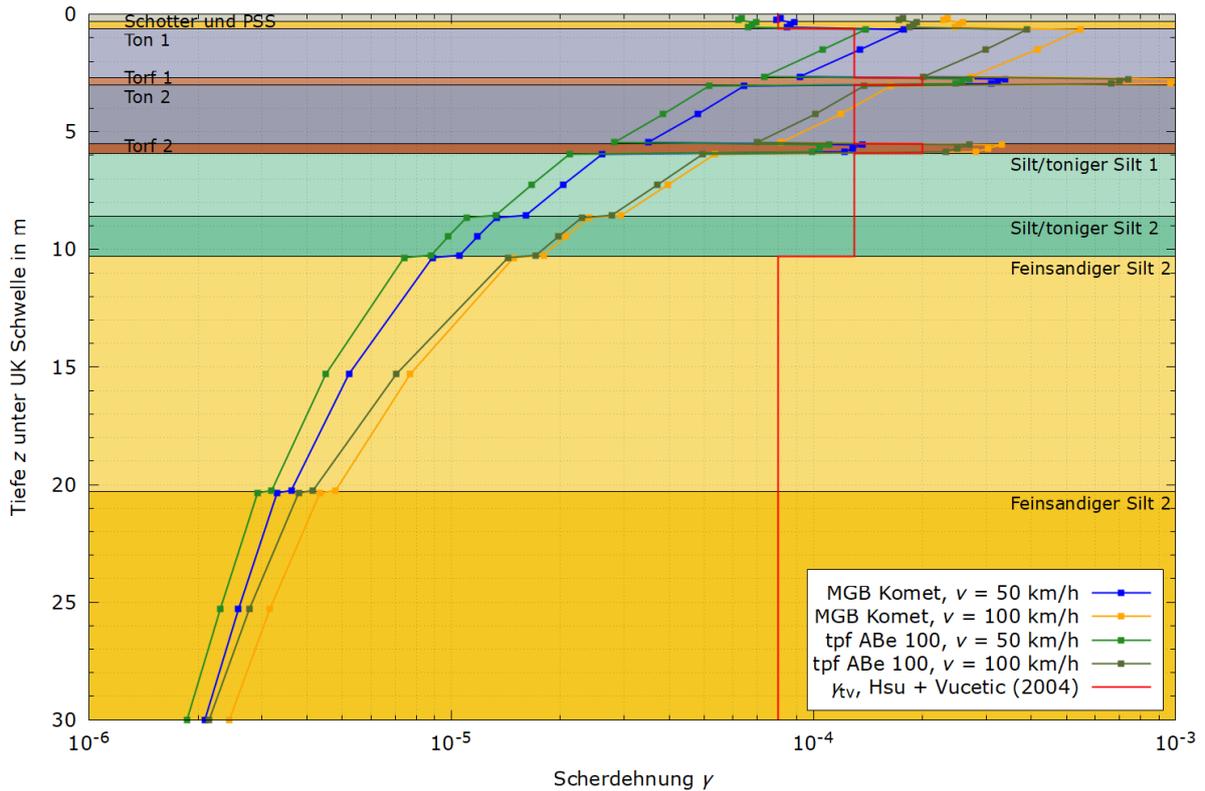


Abbildung 40: Scherdehnung über die Tiefe, Modell mit besohlter Betonschwelle, mit PSS, Variation der Zuggeschwindigkeit und des Zugtyps, schlechter Baugrund

Generell sind die Scherdehnungen beim tpf „ABe 100“ geringer als beim MGB „Komet“ und die Scherdehnungen bei 50 km/h geringer als die bei 100 km/h. Die Scherdehnungen in der Schicht Ton (Ton 1 + Ton 2) sind bei einer Zuggeschwindigkeit von 50 km/h im Mittel durch Wechsel vom MGB „Komet“ zum tpf „ABe 100“ um etwa 22 % und in der Schicht Torf (Torf 1 + Torf 2) um etwa 20 % geringer. Eine Erhöhung der Zuggeschwindigkeit auf 100 km/h verursacht in der Schicht Ton eine Steigerung der Scherdehnung um etwa 238 % beim MGB „Komet“ und um etwa 189 % beim tpf „ABe 100“. Während eine Erhöhung der Zuggeschwindigkeit auf 100 km/h in der Schicht Torf eine Steigerung der Scherdehnung um etwa 194 % beim MGB „Komet“ und um etwa 162 % beim tpf „ABe 100“ verursacht.

Daraus folgt, dass durch Reduktion der Zuggeschwindigkeit und / oder Einsatz eines leichteren Fahrzeugtyps die auftretenden Scherdehnungen signifikant reduziert werden können. Im vorliegenden Baugrundfall reichen aber diese beiden Massnahmen nicht aus, um den Nachweis der dynamischen Stabilität zu erbringen, d.h. es sind weitere Massnahmen erforderlich, um den Untergrund, beispielsweise mittels Bodenverbesserung, zu ertüchtigen.

5 Aktueller Stand und Ausblick

5.1 Fahrbahnmodell Lärm und Schienenverschleiss

Zu dem Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts wurden bereits erste Versuche mit dynamischen Fahrbahnmodellen durchgeführt. Dabei wurden gerade Streckenabschnitte erzeugt, wobei die Generierung der Schienen als flexible Komponenten und deren Integration in SIMPACK noch manuell erfolgt. Weiters wurden bereits erste Versuche mit der automatischen Generierung von gebogenen Schienen für die Simulation von Bogenfahrten durchgeführt.

Bis zur Fertigstellung eines dynamischen Fahrbahnmodells, welches für die Simulation von Radpolygonen und Schlupfwellen angewendet werden kann, sind noch mehrere Schritte notwendig. Die wichtigsten sind in den folgenden Punkten zusammengefasst:

- Aufgrund der Komplexität der Erzeugung von dynamischen Fahrbahnmodellen in Bögen nimmt diese einiges an Zeit in Anspruch. Damit dieser Vorgang in Zukunft so schnell und einfach wie möglich abläuft, wird die Generierung des dynamischen Fahrbahnmodells in SIMPACK inklusive der Erzeugung der flexiblen Körper automatisiert. Dadurch kann durch die Vorgabe von wenigen Inputparametern wie Bogenhalbmesser, Überhöhung, Schienenneigung, Steigung, etc., ein dynamisches Fahrbahnmodell erzeugt werden. Dies ist vor allem mit dem Ausblick auf zukünftige Parameterstudien vorteilhaft.
- Die Kalibrierung der ersten Modelle erfolgt anhand von Hammermessungen, welche in Bögen mit unterschiedlichen Halbmessern und Oberbaukomponenten durchgeführt wurden. Dabei wird darauf geachtet, dass das dynamische Verhalten der Fahrbahn im Frequenzbereich von 50-500Hz möglichst genau abgebildet wird
- Ist das dynamische Fahrbahnmodell entsprechend kalibriert erfolgt die Kopplung mit dem Modell des Fahrzeuges innerhalb von SIMPACK und damit in die Simulationsschleife zur Berechnung des dynamischen Verschleisses.
- Als letzter Schritt erfolgt eine Parameterstudie zur Untersuchung, welche Parameter der Fahrbahn die Initiierung und das Wachstum von Radpolygonen und Schlupfwellen positiv oder negativ beeinflussen. Die definierten zu variierenden Parameter können Abbildung 41 entnommen werden.

Bis zur Fertigstellung eines dynamischen Fahrbahnmodells, welches für die Simulation von Kurvenkreischen angewendet werden kann, sind noch mehrere Schritte notwendig. Die wichtigsten sind in den folgenden Punkten zusammengefasst:

- Laufend: Erweiterung des bestehenden Modells mit starrer Fahrbahn mit Masse-Feder Schwingern für die dynamische Fahrbahn.
- Auswertung bereits durchgeführter Hammermessungen für Betonschwelle
- Kalibrierung der Modelle mit Hammermessungen
- Vergleich starrer und flexibler Fahrbahn bezogen auf Kurvenkreischen
- Wiederholung Schritte b) und c) für Fahrbahnen mit Holz und Stahlschwelle
- Vergleich von Fahrbahnen mit Beton-, Holz- und Stahlschwelle bezogen auf Kurvenkreischen

Im Jahr 2025 sind insbesondere die Parametervariationen in den einzelnen Modellen vorgesehen, um den Einfluss unterschiedlicher Komponenten und Randbedingungen auf den Verschleiss bzw. die Lärmentwicklung quantifizieren zu können. Abbildung 41 zeigt einen Überblick der geplanten Parametervariationen einzelner im System hinterlegter Komponenten. Dabei werden die Parametervariationen in folgende Charakteristika unterschieden:

- «Vorgesehen». Die Variation wird im jeweiligen Modell 2025 umgesetzt, um den spezifischen Einfluss auf Schienenverschleiss und Lärm (Kurvenkreischen) simulieren zu können.
- «Variierbar, nicht vorgesehen»: Dieser Parameter könnte in den Modellen variiert werden. Aufgrund des Aufwandes wurde in Abstimmung zwischen Virtual Vehicle und P4 dagegen entschieden.
- «Variierbar, kein Einfluss (erwartet)»: Dieser Parameter könnte in den Modellen variiert werden. In Abstimmung zwischen Virtual Vehicle und P4 dagegen entschieden, da von diesem Parameter aus bisheriger Erfahrung oder Literatur kein Einfluss im Modell erwartet wird.
- «Nicht variierbar»: Parameter kann im Modell nicht variiert werden.

	Verschleiss statisch	Verschleiss dynamisch	Lärm (Kurvenkreischen)
Belastung ¹	Fahrzeuge Adler und Komet (Oberbaubeanspruchung und fahrdynamisches Verhalten).	Fahrzeuge Adler und Komet (Oberbaubeanspruchung und fahrdynamisches Verhalten).	Fahrzeuge Adler und Komet (fahrdynamisches Verhalten)
Radius ¹	Wird abgebildet. Korrelation Verschleiß ~ Radien.	Wird abgebildet. Korrelation Schlupfwellen ~ Radien.	Radius wird in Modell abgebildet.
Schienenprofil ¹	Variation Nominalprofile vs. Verschleißoptimiertes Profil RAILplus.	Variation Nominalprofile vs. Verschleißoptimiertes Profil RAILplus.	Profil wird in Simulation stationärer Kurvenfahrt variiert.
Schienenlänge ¹	260 vs. 350 vs. 400	260 vs. 350 vs. 400	E-Modul gleich, damit Variation nicht sinnvoll
Zwischenlagen	³ Über Feder/Dämpfung variierbar. Befestigung ist implizit berücksichtigt.	¹ Über Feder/Dämpfung variierbar. Befestigung ist implizit berücksichtigt.	¹ Variation möglich, jedoch aufwendig. Vermutlich wenig Relevanz.
Schwellentyp	³ Messungen Beton, keine Variation geplant. (Möglich: Massenvariation)	¹ Betonschwelle als flexibler Körper modelliert (Hohltagensimulation). Keine Variation der Materialien.	¹ Vergleich Übertragungsverhalten Beton/Holz/Stahl.
Beschlung	³ Beschlung wird als separate Feder im Modell berücksichtigt.	² Beschlung als separate Feder im Modell. Entscheidung der Umsetzung, sobald „Formationsrichtung“ bekannt.	³ Keine Relevanz
Schotterbett	³ Kein Einfluss von Schotter/Untergrund erwartet.	² Kein Einfluss von Schotter/Untergrund erwartet.	³ Keine Relevanz
Spurweite/ Einbauneigung ¹	Variation geplant. 1000mm 1005mm 1010mm	Variation geplant. 1000mm 1005mm 1010mm	Variation geplant. 1000mm 1005mm 1010mm
Gleislage ³	Variation Gleislage wird durchgeführt. GL zu definieren.	Variation (gut, „ruppig“) auf Basis GL möglich.	Vermutlich keine Relevanz

Vorgesehen
 Variierbar, nicht geplant
 Variierbar, kein Einfluss (erwartet)
 Nicht variierbar
 Priorität: ¹ ² ³

Abbildung 41: Abstimmung Virtual Vehicle und P4 in Hinblick auf Parametervariation in den Simulationsmodellen; Stand 09.12.2024

Die Liste der betrachteten Parameter bezieht sich dabei auf jene Komponenten und Randbedingungen, die aus Sicht der Fahrbahn beeinflusst werden können. Die Parameter Achslast und Fahrgeschwindigkeit sind daher nicht separat ausgewiesen, da diese bereits in der Modellerstellung seitens P2 und P3 berücksichtigt werden. Es wird explizit darauf hingewiesen, dass diese beiden Parameter im Sinne der Interaktion einen wesentlichen Einfluss auf die Komponenten der Fahrbahn ausüben. Daher müssen die dementsprechenden Erkenntnisse aus den Modellbildungen der beiden weiteren Teilprojekte jedenfalls auch in die 2025 vorgenommenen Ausarbeitungen bezüglich P4 einfließen.

Auf Basis der im September 2024 durchgeführten Feldmessungen wurde auch eine Priorisierung der durchzuführenden Parameterkombinationen vorgenommen, um die Durchführung der weiteren Arbeiten auf die wesentlichen Fragestellungen zu fokussieren.

5.2 Fahrbahnmodell Untergrund

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts befindet sich Modul 1 «2D Modellierung und Untersuchung der dynamischen Stabilität des Untergrunds» in Fertigstellung, welche Ende 2024 geplant ist. Dabei wurde die Scherdehnung der tiefliegenden Bodenschichten bis hin zum Oberbau modelliert und den jeweiligen Grenzwerten gegenübergestellt. Der Bodenaufbau wurde dabei als mittelguter Baugrund und schlechter Baugrund auf Basis geotechnischer Berichte im Netz der MGB modelliert. Zusätzlich wurden unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten von 50 km/h und 100 km/h auf Basis des Fahrzeugs «Komet» simuliert.

Die Erkenntnisse stellen sich zum aktuellen Zeitpunkt der Kooperation wie folgt dar:

- Bei dem zur Verfügung gestellten mittelguten Baugrund kann der Nachweis der dynamischen Stabilität bei 50 km/h Fahrgeschwindigkeit für sämtliche Varianten nachgewiesen werden. Die Berechnungen für eine Fahrgeschwindigkeiten von 100 km/h führen zu einer geringfügigen Überschreitung der Grenzwerte. Dies bedeutet, dass hier akkumulative Setzungen des Untergrunds nicht ausgeschlossen werden können und damit langfristig ein erhöhter Instandhaltungsbedarf zu erwarten ist.
- Der zur Verfügung gestellte schlechte Baugrund weist trotz Einbau einer PSS bereits bei einer Fahrgeschwindigkeit von 50 km/h eine Überschreitung des Grenzwerts der Scherdehnung in den oberen 3 Meter unter Schwellenunterkante auf. Es kann jedoch nachgewiesen werden, dass die PSS-Schicht eine signifikante Reduktion der Scherdehnung bewirkt. Dies bedeutet, dass es hier langfristig zu einem erhöhten Instandhaltungsintervall und etwaiger Nutzungsdauerverkürzung aufgrund dynamischer Instabilität des Untergrundes kommen kann. Aus technischer Sicht wird für derartige Verhältnisse eine tiefgründige Verbesserungsmassnahme empfohlen. Den Kosten-Nutzen Nachweis einer derartigen Massnahme gilt es projektspezifisch zu analysieren.
- Generell kann nachgewiesen werden, dass die langfristige dynamische Stabilität tiefliegender Weichschichten nicht ohne tiefgründige Massnahmen (Rüttelstopfen, Ortbetonsäulen, FMI-Verfahren, ...) sichergestellt werden kann.
- Eine Reduktion der Achslasten und eine Verringerung der Zuggeschwindigkeit reduzieren die im Untergrund auftretenden Scherdehnungen merklich. Im Fall des schlechten Baugrunds tritt dieser Effekt noch sehr viel deutlicher auf.

Als offene Punkte im Rahmen der 2D-Modellierung ist noch der Einfluss durch die Änderung eines Fahrzeuges zu berechnen. Dafür ist es geplant, das Fahrzeug «ABe 100» der TPF heranzuziehen, da sich dieses Fahrzeug insbesondere durch die geringeren Achslasten der angetriebenen Achsen vom bisher verwendeten Fahrzeug «Komet» unterscheidet. Diese Erkenntnisse sowie die Finalisierung von Modul 1 sind planmässig für Ende 2024 zu erwarten.

Das angedachte Modul 2 «Erstellung eines 3D-FE-Modells» und dessen Spezifikationen steht aktuell gerade in Abklärung, um die Schritte und Erkenntnisse für 2025 zu definieren. Dabei sind zum jetzigen Zeitpunkt folgende Modellierungen geplant:

- Erstellung eines 3D FE-Modells, um die dynamische Berechnung der Zugsüberfahrt in Form bewegter Radsatzlatzlasten integrieren zu können.
- Berücksichtigung der Abhängigkeit der Steifigkeit von der Deformation im Untergrund und Auswertung der transienten Bettungsverteilung an Schwellenunterkante.
- Parametervariationen der Oberbaukomponenten sowie der gewählten Unterbauform (anstehender Boden, PSS, ACRail). Damit soll auch beantwortet werden, welche Oberbaukomponenten die Einwirkung auf die Planie reduzieren können.

6 Verzeichnisse

6.1 Referenzen

- [1] Platzer Felix, RAILplus / Virtual Vehicle: Spezifikation und Beschreibung eines Simulationsmodelles zur Analyse und Nachweis von Rad-Schienen-Verschleiss. Technischer Bericht, RAILPlusSF-00044, 24.07.2024
- [2] R. Müller / A. Seeberger, Railplus: Schlussbericht zur Verlängerung Betriebserprobung SKK auf der Strecke Täsch – Zermatt. Technischer Bericht, RAILPlusSF-00038, 28.03.2024
- [3] Kim, J. C., Yun, Y. S., & Noh, H. M. (2019). Analysis of wheel squeal and flanging on curved railway tracks. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 20, 2077-2087
- [4] Thompson, D. J., Squicciarini, G., Ding, B., & Baeza, L. (2018). A state-of-the-art review of curve squeal noise: phenomena, mechanisms, modelling and mitigation. Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems, 3-41.
- [5] Marschnig, S. 2021, iTAC – innovative Track Access Charges. <http://dx.doi.org/10.3217/978-3-85125-493-8>
- [6] DB Netz AG, Planungshilfe «Qualitative Beurteilung der dynamischen Stabilität des Eisenbahnfahrwegs bei Zugüberfahrt», 2013
- [7] DB Netz AG, Planungshilfe «Rechnerisches Verfahren zur Bewertung der dynamischen Stabilität», 2018
- [8] Ril 836 „Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instand halten“, 8. Aktualisierung, 01.05.2022
- [9] Planungshilfe – Eisenbahnstrecken mit Schotteroberbau auf Weichschichten - UNTERSUCHUNG ZUR DYNAMISCHEN STA-BILITÄT, RECHNERISCHES VERFAHREN, DB InfraGO AG, 3. Ausgabe, März 2018
- [10] Frýba, L., Vibrations of Solids and Structures under Moving Loads, 3. Auflage, Thomas Telford House, London, 1999
- [11] Vrettos, C., „Bodendynamik“ in: Grundbau-Taschenbuch, Teil 1: Geotechnische Grundlagen, 7. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin, 2008, S. 451-500
- [12] Zimmermann, H., Die Berechnung des Eisenbahnoberbaus, Verlag von Ernst & Korn (Wilhelm Ernst), Berlin, 1888
- [13] Planungshilfe – Eisenbahnstrecken mit Schotteroberbau auf Weichschichten - UNTERSUCHUNG ZUR DYNAMISCHEN STA-BILITÄT, RECHNERISCHES VERFAHREN, DB InfraGO AG, 3. Ausgabe, März 2018
- [14] DIN 45672-2: Schwingungsmessung an Schienenverkehrswegen - Teil 2: Auswerteverfahren
- [15] Günther, F., Diplomarbeit: „Finite element analyses of railway lines under horizontal and vertical dynamic loads from rail traffic“, TU Bergakademie Freiberg, 19. April 2019
- [16] Vucetic, M., „Cyclic threshold shear strains in soils“ in: Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Ausgabe 120, Nr. 12, 1994, S. 2208-2228
- [17] Hsu, C.-C. and M. Vucetic, „Volumetric Threshold Shear Strain for Cyclic Settlement“ in: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Januar 2004, S. 58-66

6.2 Abbildungen

Abbildung 1: Übersicht der Modelle, Ziele, Fragestellungen und Annahmen/Limitierungen	4
Abbildung 2: Abstimmung Virtual Vehicle und P4 in Hinblick auf Parametervariation in den Simulationsmodellen; Stand 09.12.2024.....	5
Abbildung 3: Übersicht Fahrbahnmodelle Virtual Vehicle und Baugrund Dresden.....	8
Abbildung 4: Relevante Modelle des ViF aus Sicht von P4	9
Abbildung 5: Simulationsschleife zur Berechnung von quasi-statischem Verschleiss.....	10
Abbildung 6: Vereinfachte Darstellung eines Standard MKS- Fahrbahnmodells a) und eines dynamischen Fahrbahnmodells mit flexiblen Schienen b)	11
Abbildung 7: Schritte für die Erzeugung eines flexiblen Körpers: Modellierung der Komponente in einer CAD-Software a), Meshing und Modalanalyse mittels FEM b) und nach anschliessender modaler Reduktion Implementierung in SIMPACK	12
Abbildung 8: Vereinfachte Darstellung der modellierten Oberbaukomponenten unterteilt in Körpern (rot), wie Schienen a) und Schwellen b), und Kraftelemente (grün) wie Schienenbefestigung und Zwischenlage c) und Schotter d).....	13
Abbildung 9: Inertanz der Fahrbahn zwischen zwei Schwellen in laterale Richtung	15
Abbildung 10: Überblick über das Modellierungs- und Versuchskonzept Lärm – Kurvenkreischen.....	16
Abbildung 11: Kraftschlusskräfte für positive und negative Steigung [3]	17
Abbildung 12: Hammermessungen an der Fahrbahn im Bogen „Biel“ der MGB	17
Abbildung 13: Hammermessungen an der Schiene im Bogen „Biel“ der MGB	18
Abbildung 14: Ergebnisse von Hammermessungen an der Schiene im Bogen „Biel“ der MGB	18
Abbildung 15: Hammermessung an Fahrbahn mit Holzschwelle	19
Abbildung 16: Ersatzmodell mit kontinuierlich gebettetem Balken mit Feder und Dämpfer [13]	23
Abbildung 17: Ermittlung der Verteilungsbreite [13].....	23
Abbildung 18: Bestimmung des Reduktionsfaktors für die geometrische Dämpfung	25
Abbildung 19: Scherdehnungsgrenzen für mineralische Böden in Anlehnung an HSU und Vucetic [17] Erhöhungsfaktor zur Berücksichtigung der hochfrequenten Beanspruchung.....	26
Abbildung 20: Zugtyp MGB „Komet“ mit Achsabständen und -lasten.....	29
Abbildung 21: Berechnungsmodell mit Baugrundsichten und Abmessungen für den mittelguten Baugrund	34
Abbildung 22: Berechnungsmodell mit Baugrundsichten und Abmessungen für den mittelguten Baugrund mit Fels	34
Abbildung 23: Berechnungsmodell mit Baugrundsichten und Abmessungen für den schlechten Baugrund mit PSS	35
Abbildung 24: 2D-FE-Element mit 15 Knoten und Netzeigenschaften des 2D-FE-Modells	36
Abbildung 25: Bestimmung der Rayleigh-Parameter α und β	36
Abbildung 26 Berechnungsphasen	37
Abbildung 27: Last-Zeitverläufe für alle untersuchten Oberbauvarianten, MGB „Komet“, Zuggeschwindigkeit 50 km/h, ohne PSS, mittelguter Baugrund	39
Abbildung 28: Last-Zeitverläufe für untersuchte Unterbauvarianten mit und ohne AC-Rail, MGB „Komet“, Zuggeschwindigkeit 50 km/h, mittelguter Baugrund.....	39
Abbildung 29: Last-Zeitverläufe für Zuggeschwindigkeiten 50 km/h und 100 km/h, Betonschwelle besohlt, ohne PSS, MGB „Komet“, mittelguter Baugrund	40
Abbildung 30: Last-Zeitverläufe für Zugtypen MGB „Komet“ und tpf „ABe 100“, Zuggeschwindigkeit 50 km/h, Betonschwelle besohlt, ohne PSS, mittelguter Baugrund.....	40
Abbildung 31: Last-Zeitverläufe für mittelguten Baugrund mit und ohne Fels, MGB „Komet“, Zuggeschwindigkeit 100 km/h, Betonschwelle besohlt, ohne PSS.....	41
Abbildung 32: Last-Zeitverläufe für alle untersuchten Oberbauvarianten, Zuggeschwindigkeit 50 km/h, mit PSS, schlechter Baugrund	42
Abbildung 33: Last-Zeitverläufe für Varianten mit und ohne PSS, Zuggeschwindigkeit 50 km/h, schlechter Baugrund.....	42

Abbildung 34: Last-Zeitverläufe für Zuggeschwindigkeiten 50 km/h und 100 km/h, Betonschwelle besohlt, mit PSS, MGB „Komet“, schlechter Baugrund.....	42
Abbildung 35: Last-Zeitverläufe für Zugtypen MGB „Komet“ und tpf „ABe 100“, Zuggeschwindigkeit 50 km/h, Betonschwelle besohlt, ohne PSS, mittelmittler Baugrund.....	43
Abbildung 36: Scherdehnung über die Tiefe, Modell mit besohlter Betonschwelle und mit Stahlschwelle, ohne PSS, mittelmittler Baugrund.....	44
Abbildung 37: Scherdehnung über die Tiefe, Modell mit besohlter Betonschwelle, ohne PSS, Variation der Zuggeschwindigkeit und des Zugtyps, mittelmittler Baugrund	45
Abbildung 38: Scherdehnung über die Tiefe, Modell mit besohlter Betonschwelle, ohne PSS, mittelmittler Baugrund mit / ohne Fels	46
Abbildung 39: Scherdehnung über die Tiefe, Modell mit besohlter Betonschwelle, mit und ohne PSS, schlechter Baugrund.....	47
Abbildung 40: Scherdehnung über die Tiefe, Modell mit besohlter Betonschwelle, mit PSS, Variation der Zuggeschwindigkeit und des Zugtyps, schlechter Baugrund.....	48
Abbildung 41: Abstimmung Virtual Vehicle und P4 in Hinblick auf Parametervariation in den Simulationsmodellen; Stand 09.12.2024.....	50

6.3 Tabellen

Tab. 1: Überblick Fahrbahnmodelle virtuelles Fahrzeug.....	9
Tab. 2: Variierbare Parameter des dynamischen Fahrbahnmodells.....	14
Tab. 3: Untersuchungsprogramm mittelmittler Baugrund	27
Tab. 4: Untersuchungsprogramm schlechter Baugrund	28
Tab. 5: Baugrundmodell	30
Tab. 6: Charakteristische bodenmechanische Kennwerte.....	30
Tab. 7: Grenzwerte der Scherdehnung	31
Tab. 8: Baugrundmodell, schlechter Baugrund	31
Tab. 9: Charakteristische bodenmechanische Kennwerte, schlechter Untergrund	32
Tab. 10: Grenzwerte der Scherdehnung, schlechter Untergrund	32