

LO 2025 P4 4.3

Systemführerschaft Interaktion Fahrzeug/Fahrweg Meterspur
 Projekt: 4 Fahrbahnsteifigkeit
 Modul 2: Dynamisches Fahrbahnmodell

Empfehlungen zum optimalen Fahrbahnaufbau



ID:	RAILplusSF-00059	LO in BAV Detailziel
Datum / Status:	01.12.2025 / Freigegeben	Seitenanzahl 32
Öffentlichkeitsgrad	Öffentlich	
Verfasser:	Peter Güldenapfel / Track Expert GmbH	
Geprüft:	Dr. Matthias Landgraf / evias rail consulting	
Freigegeben:	Martin Siegen / MGBahn	

Zitierweise: Güldenapfel Peter, RAILplus / Track Expert GmbH: Empfehlungen zum optimalen Fahrbahnaufbau Technischer Bericht, ID RAILplusSF-00059, 01.12.2025

Änderungsverzeichnis

Version	Datum	Verantwortlich	Beschreibung
1.0	01.12.2025	Peter Güldenapfel	Definitive Version

Freigabe durch die Systemführerschaft

Version	Datum	Verantwortlich
1.0	02.12.2025	Technical Board
1.0	11.12.2025	Management Board

Management Summary

Ausgangslage

Im Projekt P4 Fahrbahnsteifigkeit der Systemführerschaft Fahrzeug/Fahrweg Meterspur soll mit gezielten Untersuchungen zur Fahrbahn die Gesamtwirtschaftlichkeit des Systems Fahrbahn/Fahrzeug gesteigert werden. Der Unterbau als wesentliches Element der Fahrbahn stellt dabei einen wichtigen Kostenfaktor dar. Der Zustand des Unterbaus und des darunterliegenden Untergrundes beeinflussen massgeblich die Entwicklung der Gleislage und damit die Nutzungsdauer der Fahrbahn.

Es wurde deshalb im Rahmen dieses Lieferobjektes eine Kooperation mit BAUGRUND DRESDEN abgeschlossen, mit Hilfe eines FE-Modells die gesamte Fahrbahn (Oberbau, Unterbau und Untergrund) zu modellieren und dem Ziel daraus Empfehlungen zum optimalen Fahrbahnaufbau für die Meterspur zu formulieren.

Die Untersuchungen wurden durch BAUGRUND DRESDEN in zwei Modulen durchgeführt und in zwei Berichten dokumentiert.

Hauptergebnisse und Fazit

Bei mittelgutem Untergrund für $V = 100 \text{ km/h}$ und bei schlechtem Untergrund generell wird der Nachweis der dynamischen Stabilität nicht erbracht. Es ist deshalb aufgrund kumulativer Setzungen mit erhöhtem Unterhaltsaufwand (Stopfen) und entsprechenden Unterhaltskosten zu rechnen.

Die Oberbau- und Unterbauvariationen haben ab einer Tiefe von ca. 3 m ab Oberkante Schotter praktisch keinen Einfluss auf die resultierenden Bodenpressungen im Untergrund. Allerdings ist bei schlechtem Untergrund mit einer Reduktion der Nutzungsdauer des Gleises zu rechnen.

Die Änderung von Zugtyp (Änderung der Achslast) und / oder der Zuggeschwindigkeit ändern gemäss den Ergebnissen im Modul 1 die Beanspruchung des Untergrundes signifikant.

Bei schlechtem Baugrund kann zwar mit Reduktion der Achslasten und / oder der Geschwindigkeit die Scherdehnung reduziert werden. Das reicht aber nicht, um den Nachweis zu erfüllen.

Die Wahl der Zwischenlagen und der Besohlung führen in Bezug auf den Bettungsmodul zu einer um einen Faktor 2 grösseren Schotterbeanspruchung und beeinflussen damit massgeblich die Dauerhaftigkeit der Fahrbahn.

Die Art des Unterbaus hat einen Einfluss auf die Lastverteilung im Untergrund. AC Rail und PSS haben in Bezug auf die vertikalen Spannungsspitzen eine vergleichbare Wirkung. AC Rail zeigt aber eine günstigere Lastverteilung, die zu geringeren Beanspruchungen des Untergrundes führt.

Die Zuggeschwindigkeit und Achsabstände haben aufgrund der Art des im Modul 2 entwickelten 3D-FE-Modells keinen nennenswerten Einfluss auf die Ergebnisse. Allerdings ergeben sich durch die Änderung des Zugtyps durch niedrigere Achslasten signifikant niedrigere Beanspruchungen auf Schotter und Unterbau

Empfehlungen

Ein schlechter Untergrund (statischer Bettungsmodul $C_{\text{stat}} = 0.05 \text{ N/mm}^3$) sollte bei einer Fahrbahnerneuerung mit geeigneten Massnahmen verbessert werden. Alternativ wäre zu prüfen, ob sich die hohen Investitionskosten einer teuren Bodenverbesserungsmassnahme (z.B. Rüttelstopfsäulen) gegenüber dem Inkaufnehmen einer kürzeren Nutzungsdauer und höheren Unterhaltskosten wirtschaftlich rechnen.

Elastisch abgestimmte Zwischenlagen und tragfähige Unterbauschichten sind entscheidend für eine homogene Lastverteilung.

Zu hohe lokale Steifigkeiten (z.B. harte Zwischenlagen oder unbesohlte Schwellen) führen zu erhöhter Kornzertrümmerung des Schotters, Setzungsdifferenzen, einer schlechtem Gleislageentwicklung und damit zu reduzierter Lebensdauer.

Der Fahrbahnaufbau Betonschwellen weich gedämpft und tragfähig homogen (z.B. Besohlung und AC Rail und mit leichten Abstrichen auch PSS) liefert die günstigsten Ergebnisse hinsichtlich Dauerhaftigkeit und Erhaltung.

Inhalt

1	Ausgangslage.....	7
2	Grundlagen und Vorgehen	8
3	Nachweis dynamische Stabilität	9
3.1	Vorgehen	9
3.2	Untersuchte Berechnungsvarianten	10
3.3	Ergebnisse Last-Zeit-Verläufe	12
3.3.1	<i>Mittelguter Baugrund</i>	12
3.3.2	<i>Schlechter Baugrund</i>	12
3.4	FE-Analysen Nachweis dynamische Stabilität	13
3.4.1	<i>Mittelguter Baugrund</i>	13
3.4.2	<i>Schlechter Baugrund</i>	14
4	3-dimensionale bahndynamische Finite-Elemente-Analyse	16
4.1	Vorgehen	16
4.2	Untersuchte Berechnungsvarianten 3D-FE-Modell	18
4.3	Ergebnisse Vertikalspannungs-Zeitverläufe	19
4.4	Effektive Vertikalspannung über die Tiefe	21
4.5	Deviatorspannungs-Zeitverläufe	23
4.6	Verteilung der Deviatorspannung	24
4.7	Setzungs- / Spannungs- / Bettungsverteilung	25
4.8	Lastabtrag	27
5	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	28
5.1	Ergebnisse Modul 1:	28
5.2	Empfehlungen Modul 1	28
5.3	Ergebnisse Modul 2:	28
5.4	Empfehlungen Modul 2	28
6	Ausblick	30
7	Verzeichnisse	31
7.1	Referenzen	31
7.2	Abbildungen	31

Abkürzungsverzeichnis

FEM	Finite Elemente Modell
OK	Oberkante
PSS	Planumsschutzschicht
UK	Unterkante
ZW	Zwischenlage

Glossar

Bettungsverteilung	Bettungssteifigkeit z.B. unter der Schwelle, entspricht dem Verhältnis von aufgebrachtter Spannung zu resultierender Setzung.
Deviatorspannung	Grösse für die Beurteilung der Scherbeanspruchung in Lockergesteinsschichten
FE-Modell	Computergestützte Simulation, die komplexe Strukturen in kleinere, einfachere Teile, die sogenannten finiten Elemente, unterteilt, um deren Verhalten unter bestimmten Bedingungen zu simulieren. Die Komponenten sind als Kontinuumelemente abgebildet. Diese sind elastisch und mittels Elastizitätsmoduln hinterlegt.
Scherdehnung	Grösse für die Beurteilung der dynamischen Beanspruchung des Untergrundes
Vertikalspannungsverlauf	Zeitliche Entwicklung der vertikalen Spannung an einem bestimmten Punkt, typischerweise an der Schwellenunterseite oder im Unterbau, während eine Radlast (z.B. eines darüberfahrenden Fahrzeugs) überrollt.
Vertikalverschiebung	Setzung infolge der Radlast

1 Ausgangslage

Im Projekt P4 Fahrbahnsteifigkeit der Systemführerschaft Fahrzeug/Fahrweg Meterspur soll mit gezielten Untersuchungen zur Fahrbahn die Gesamtwirtschaftlichkeit des Systems Fahrbahn/Fahrzeug gesteigert werden. Der Unterbau als wesentliches Element der Fahrbahn stellt dabei einen wichtigen Kostenfaktor dar. Der Zustand des Unterbaus und des darunterliegenden Untergrundes beeinflussen massgeblich die Entwicklung der Gleislage und damit die Nutzungsdauer der Fahrbahn.

Es wurde deshalb im Rahmen dieses Lieferobjektes eine Kooperation mit BAUGRUND DRESDEN abgeschlossen, mit Hilfe eines FE-Modells die gesamte Fahrbahn (Oberbau, Unterbau und Untergrund) zu modellieren und dem Ziel daraus Empfehlungen zum optimalen Fahrbahnaufbau für die Meterspur zu formulieren.

Auf Basis von 2- und 3-dimensionalen FE-Analysen sollen aufgrund von Parameterstudien die langfristige Lagestabilität sowie die Bettungsverteilungen für unterschiedliche Unterbauformen ermittelt und verglichen werden.

Aus der Studie sollen Aussagen zu folgenden Fragestellungen gemacht werden:

- Was ist der Mehrwert einer Unterbausanierung gegenüber dem anstehenden Untergrund und unter welchen Randbedingungen macht es Sinn, eine Unterbausanierung vorzunehmen?
- Welche elastischen Oberbaukomponenten können die Last auf das Planum reduzieren?
- Gibt es Unterschiede in der Wirkungsweise der Unterbauformen AC Rail und PSS, die im FE-Modell nachgewiesen werden können?
- Hat der Achsabstand des Rollmaterials einen Einfluss auf den Lastabtrag der Fahrbahn?

Die Beantwortung dieser Fragestellungen bilden die Grundlage für die Empfehlungen zum optimalen Fahrbahnaufbau für die Meterspur.

2 Grundlagen und Vorgehen

Die Basis für die in diesem Bericht formulierten Empfehlungen bilden die beiden im Auftrag von RAILplus durch BAUGRUND DRESDEN erstellten Berichte:

- 1) Ergebnisbericht zu rechnerischen Untersuchungen der dynamischen Stabilität von Eisenbahngleisen der schweizerischen Meterspurbahnen [1]
- 2) Ergebnisbericht zu 3-dimensionalen bahndynamischen Finite-Elemente-Analysen für schweizerische Meterspurbahnen [2]

Die Untersuchungen wurden durch BAUGRUND DRESDEN in zwei Modulen durchgeführt. Im Modul 1 wurden mittels des Nachweises der dynamischen Stabilität im Sinne der Planungshilfe DB InfraGO AG [4] für einen mittelharten Baugrund und einen schlechten Baugrund Parametervariationen der Fahrbahn berechnet und in Bezug auf die Einhaltung des Grenzwertes der dynamischen Stabilität analysiert, vgl. Kapitel 3.

Im Modul 2 wurde mittels 3-dimensionaler FE-Analyse die Variation von verschiedenen Oberbau- und Unterbaukombinationen berechnet und die Normalspannungsverteilungen in den verschiedenen Komponenten analysiert und bewertet, vgl. Kapitel 4

3 Nachweis dynamische Stabilität

3.1 Vorgehen

Der Nachweis der dynamischen Stabilität wurde im Sinne der Planungshilfe von DB InfraGO zur Untersuchung der dynamischen Stabilität [4] durchgeführt. Eine detailliertere Beschreibung des Modul 1 ist im Lieferobjekt 2024 P4 2.3 [3] aufgeführt

In einem ersten Schritt wurde ein 2-dimensionales Modell eines relevanten Querschnittes erstellt vgl. Abb. 1

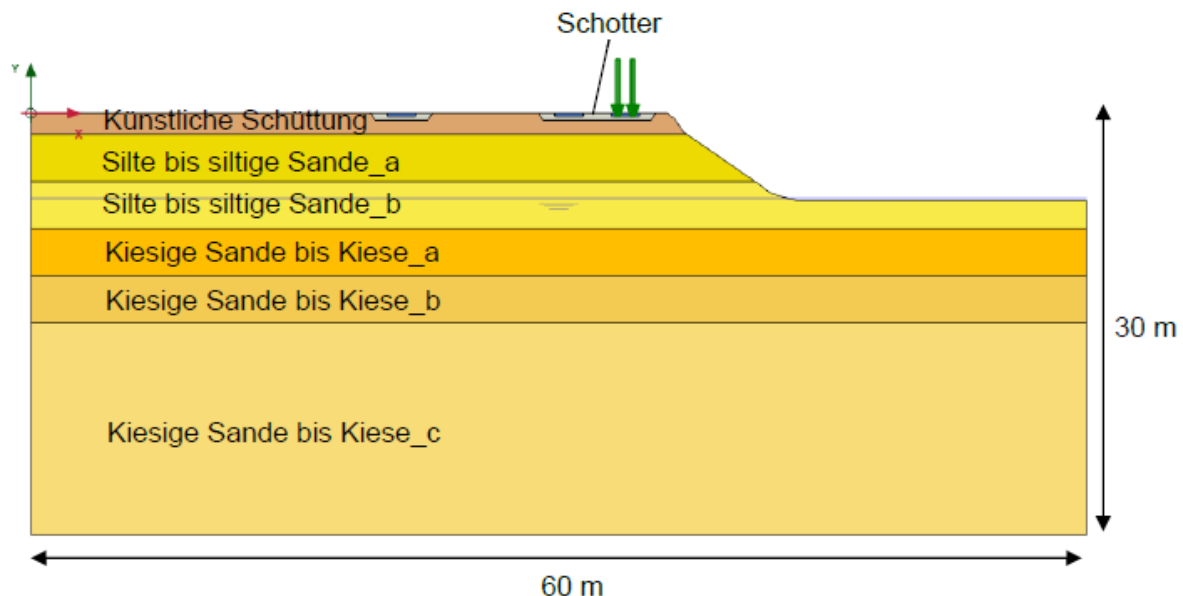


Abbildung 1: Berechnungsmodell mit Baugrundsichten für mittelguten Baugrund [1]

Im zweiten Schritt wird der zeitliche Verlauf der dynamischen Beanspruchung an der Schwellenunterseite infolge Zugüberfahrt auf der Grundlage eines analytischen Modells von Frýba [5] bestimmt vgl. Abb. 2.

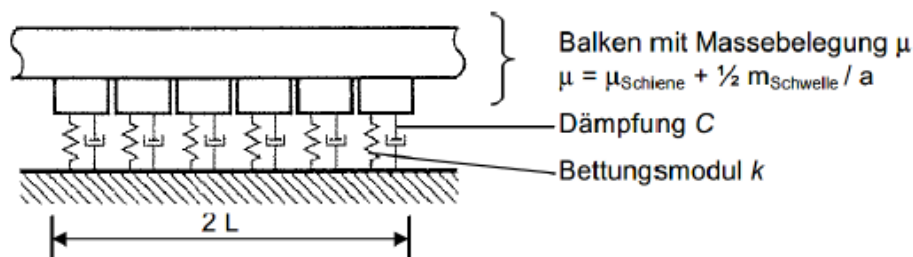


Abbildung 2: Ersatzmodell mit kontinuierlich gebettetem Balken auf Federn und Dämpfern [5]

Im dritten Schritt wird die eigentliche FE-Analyse mit der dynamischen Anregung infolge Zugüberfahrt durchgeführt. Anschliessend werden die Scherdehnungen unter Belastung für jedes relevante Bodenmaterial ausgewertet und die Berechnungen iteriert, bis eine Konvergenz erreicht ist.

Die aus dem Modell berechneten Werte für die Scherdehnung werden für jede Schicht ermittelt und mit der Scherdehnungsgrenze verglichen. Wird diese Grenze eingehalten, kann davon ausgegangen werden, dass die Schichten den Nachweis der dynamischen Stabilität erfüllen.

3.2 Untersuchte Berechnungsvarianten

Für die Analyse wurde je eine Parametervariation auf mittelgutem und auf schlechtem Baugrund durchgeführt vgl. Abb. 3 und 4 sowie Tab. 1 und 2. Ein schlechter Baugrund hat einen statischen Bettungsmodul von 0.05 N/mm^3 . Von einem mittelguten Baugrund spricht man bei einem statischen Bettungsmodul von 0.1 bis 0.15 N/mm^3 .

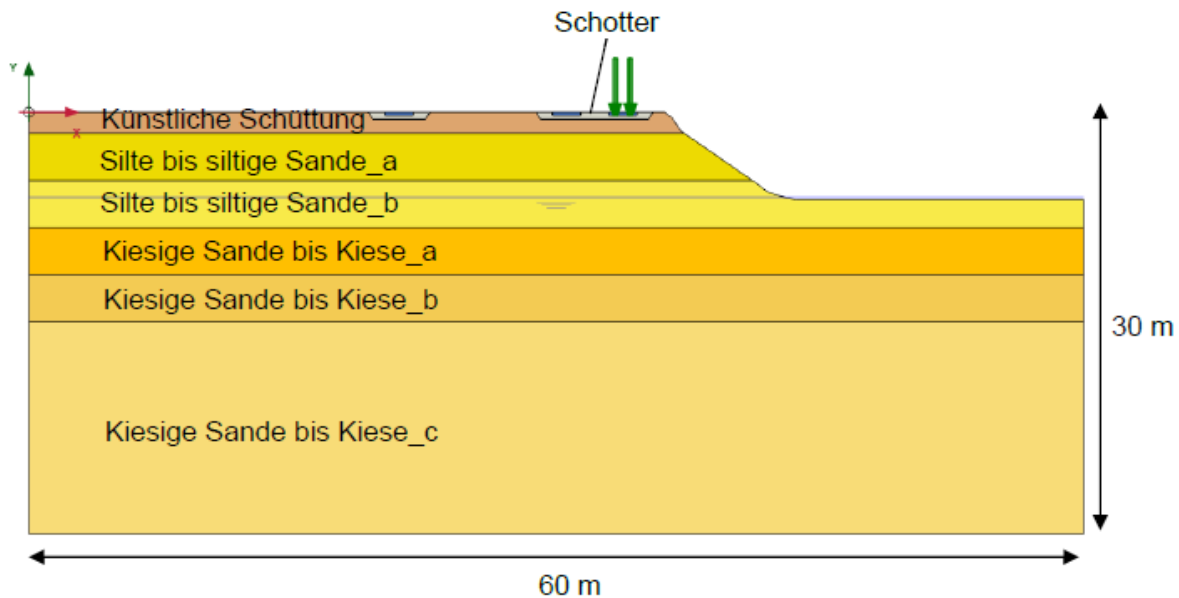


Abbildung 3: Berechnungsmodell mit Baugrundsichten für mittelguten Baugrund [1]

Baugrund-fall	Zugtyp	Schienen-profil	Zuggeschwin-digkeit in km/h	Steifigkeit Zwischenlage in kN/mm	Schwelle	Unter-bau	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 3 m Tiefe	p-t, NW dynStab
mittelgut	MGB „Komet“	46 E1	100	200	Beton, besohlt	ohne	ab etwa 5 m Tiefe	p-t, NW dynStab
mittelgut	MGB „Komet“	46 E1	100	200	Beton, besohlt	ohne	ab etwa 7 m Tiefe	p-t, NW dynStab

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

Tabelle 1: Berechnungsvarianten für mittelguten Baugrund [1]

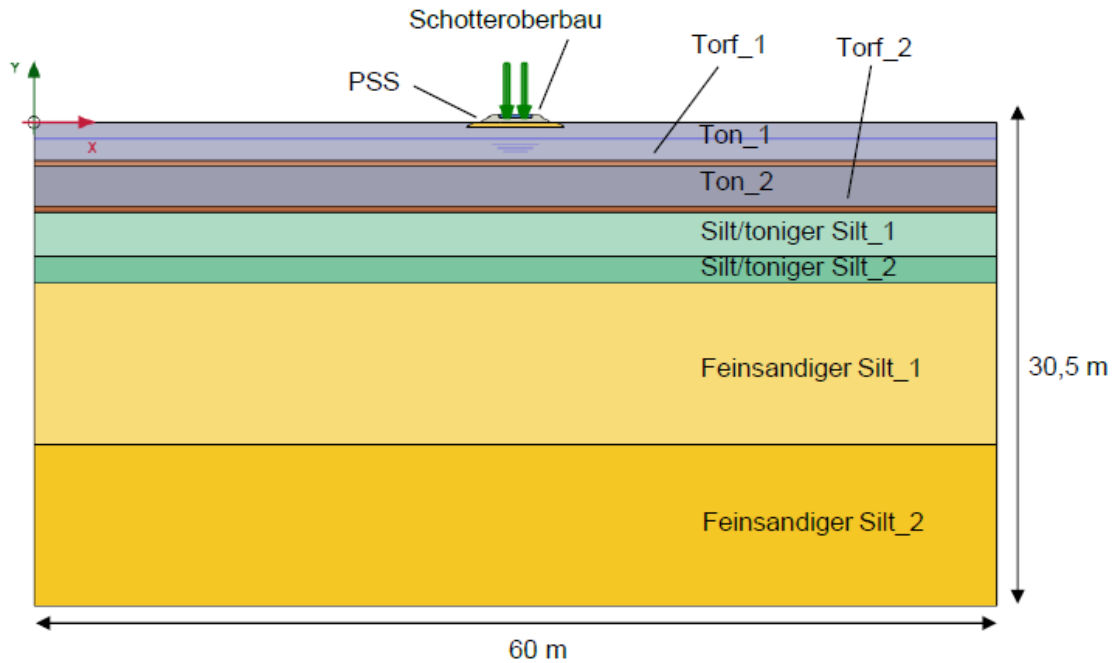


Abbildung 4: Berechnungsmodell mit Baugrundsichten für schlechten Baugrund mit PSS [1]

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“	46 E1	50	200	Beton, besohlt	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

Tabelle 2: Berechnungsvarianten für schlechten Baugrund [1]

Die Beschreibung des Baugrundes und der verschiedenen Schichten wurde für beide Baugrundfälle auf Basis von durchgeführten geotechnischen Untersuchungen der MGBahn vorgenommen.

3.3 Ergebnisse Last-Zeit-Verläufe

3.3.1 Mittelmutter Baugrund

Bei der Auswertung der Last-Zeitverläufe für den mittelmutter Baugrund zeigte sich, dass der Unterbau bei den untersuchten Oberbauvarianten praktisch keinen Einfluss auf den Last-Zeitverlauf hat, vgl. Abb. 5.

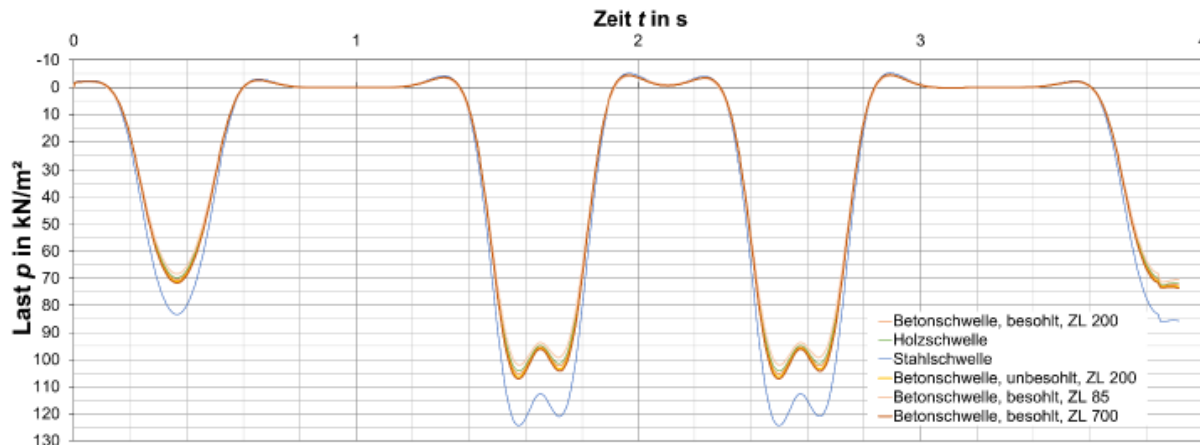


Abbildung 5: Last-Zeitverläufe für alle untersuchten Oberbauvarianten, MGB «Komet», Zuggeschwindigkeit 50 km/h, ohne PSS, mittelmutter Baugrund mit PSS [1]

Die Abweichung der Spitzenlast bei der Stahlschwelle liegt hauptsächlich in der unterschiedlichen Geometrie und der Steifigkeit zwischen Stahl- und Betonschwelle begründet.

Für die Variante mit einer Zuggeschwindigkeit von 100 km/h ergibt sich gegenüber der Variante mit 50 km/h nur eine geringfügig höhere Spitzenlast. Da sich aber wegen der erhöhten Geschwindigkeit der Abstand der Peaks verkürzt entsteht eine andere Belastungssituation [1].

3.3.2 Schlechter Baugrund

Bei der Auswertung der Last-Zeitverläufe für den schlechten Baugrund zeigen sich die gleichen Ergebnisse wie für den mittelmutter Baugrund, vgl. Abb. 6.

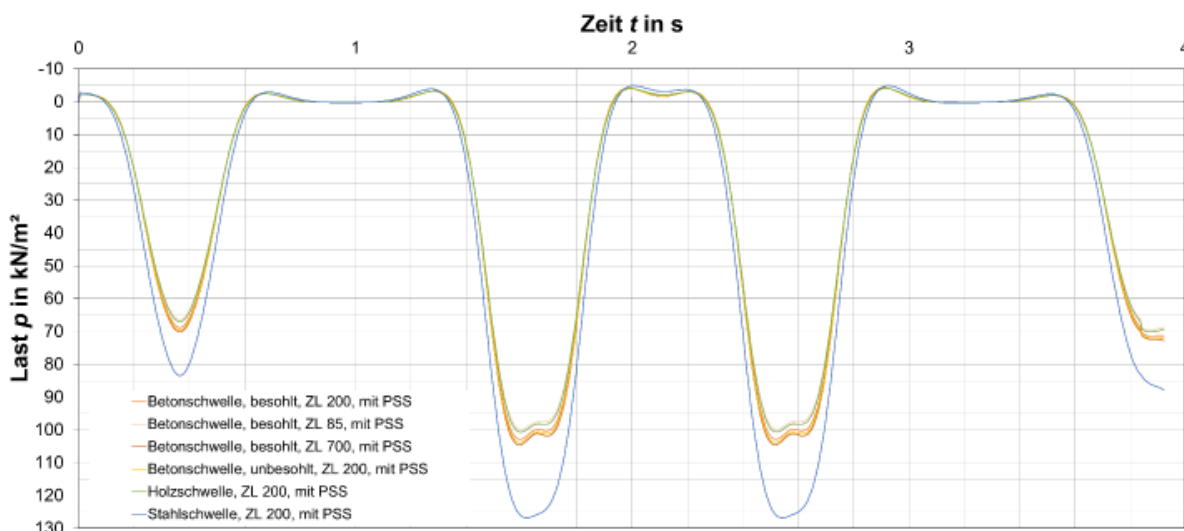


Abbildung 6: Last-Zeitverläufe für alle untersuchten Oberbauvarianten, MGB «Komet», Zuggeschwindigkeit 50 km/h, mit PSS, schlechter Baugrund mit PSS [1]

Auch hier zeigt sich, dass sich der Unterbau praktisch keinen Einfluss auf die Last-Zeitverläufe der untersuchten Oberbauvarianten hat.

3.4 FE-Analysen Nachweis dynamische Stabilität

3.4.1 Mittulguter Baugrund

Die Variation Oberbau mit Beton- und Stahlschwellen zeigt, dass die Schwellenart nur einen geringfügigen Einfluss auf den Nachweis der dynamischen Stabilität hat, vgl. Abb. 7.

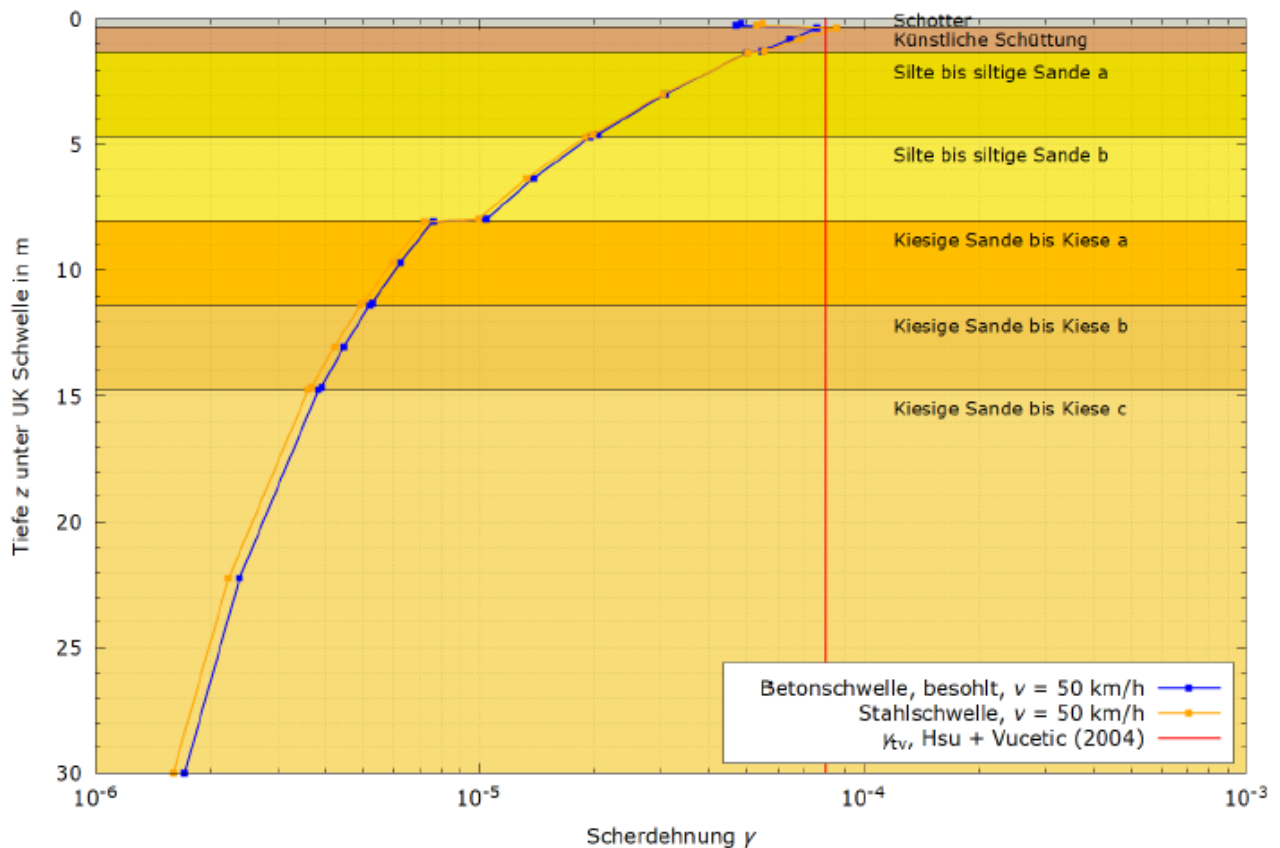


Abbildung 7: Scherdehnung über die Tiefe, Modell mit besohlter Betonschwelle und mit Stahlschwelle, ohne PSS, mittulguter Baugrund [1]

Die ermittelten Scherdehnungen sind in allen Schichten kleiner als der Grenzwert (rote Linie).

Die Variation von Fahrzeugtyp und Zuggeschwindigkeit zeigt für den mittulguten Baugrund, dass der Nachweis der dynamischen Stabilität für beide Fahrzeuge für $V = 50 \text{ km/h}$ erbracht wird. Für $V = 100 \text{ km/h}$ wird jedoch der Grenzwert im Bereich der künstlichen Schüttung überschritten, vgl. Abb. 8.

Die Scherdehnung bei $V = 50 \text{ km/h}$ ist in der Schicht der künstlichen Schüttung beim TPF «ABe 100» im Vergleich zum MGB «Komet» ca. 11 % geringer.

Die Erhöhung von $V = 50 \text{ km/h}$ auf 100 km/h verursacht eine Zunahme der Scherdehnung von ca. 96% beim MGB «Komet» und ca. 98 % beim TPF «ABe 100».

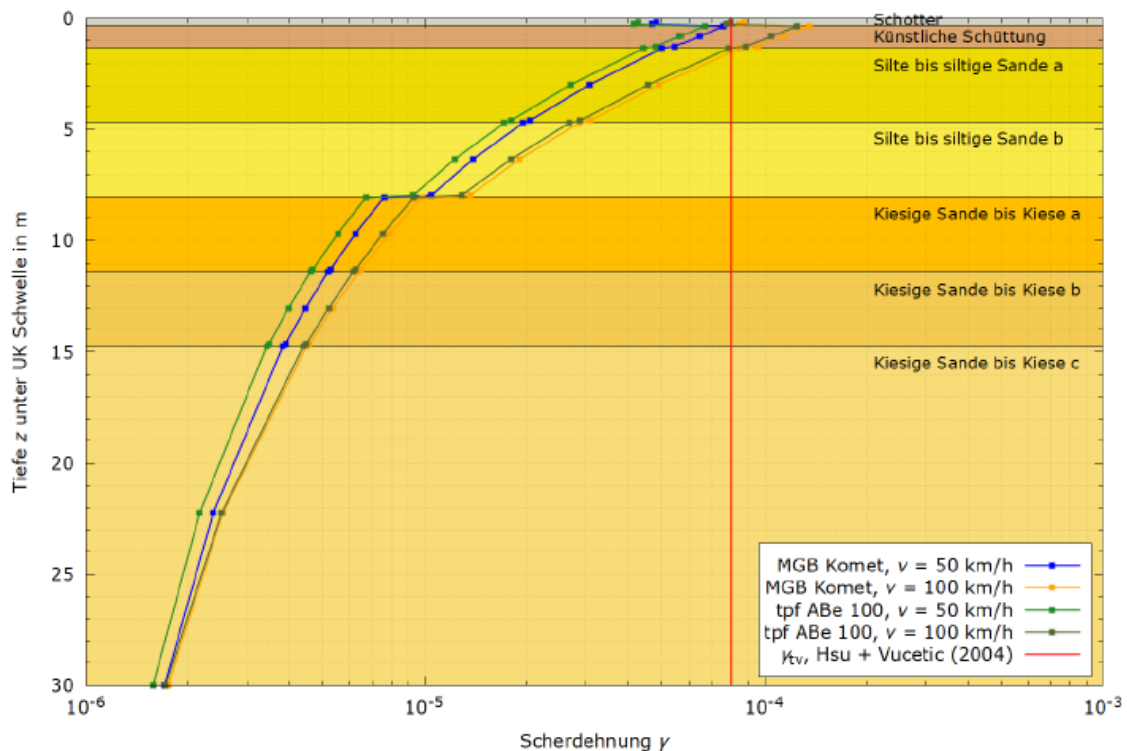


Abbildung 8: Scherdehnung über die Tiefe, Modell mit besohlter Betonschwelle, ohne PSS, Variation Zuggeschwindigkeit und Zugtyp, mittelguter Baugrund [1]

3.4.2 Schlechter Baugrund

Die Variation des Unterbaus für schlechten Baugrund mit bzw. ohne PSS und mit besohlter Betonschwelle zeigt, dass der Nachweis der dynamischen Stabilität bis in eine Tiefe von 3 m für beide Varianten nicht erfüllt wird, vgl. Abb. 9.

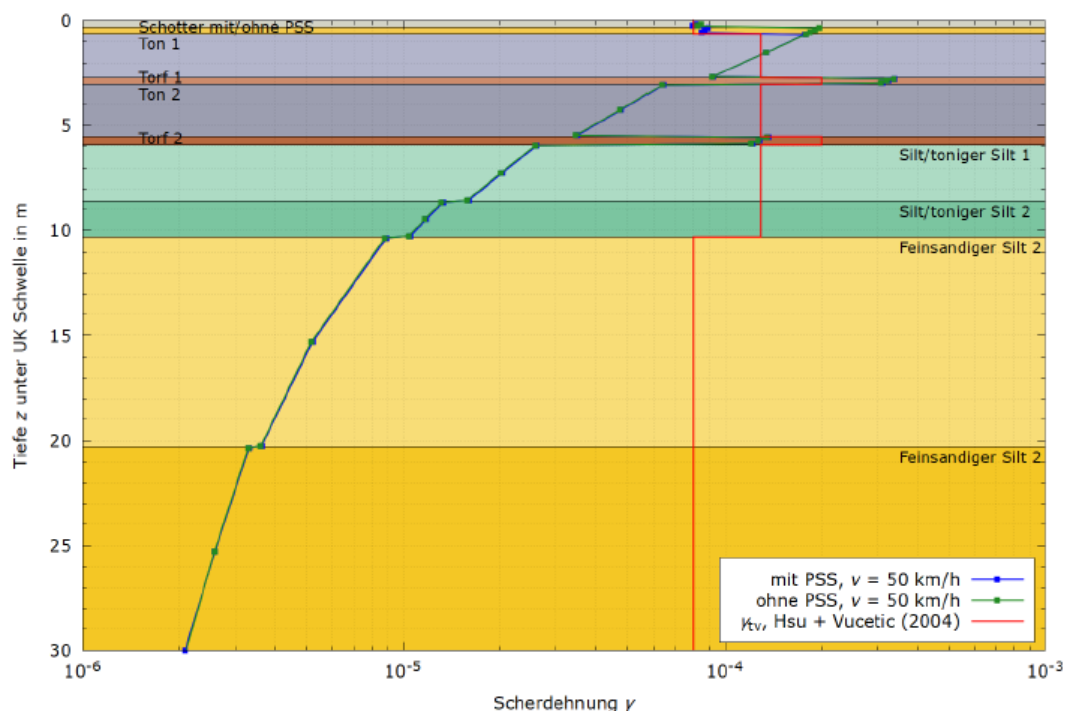


Abbildung 9: Scherdehnung über die Tiefe, Modell mit besohlter Betonschwelle, mit und ohne PSS, schlechter Baugrund [1]

Die PSS bewirkt nur im Tiefenbereich der PSS selbst eine Reduktion der Scherdehnung. Auf die Scherdehnungen des darunter liegenden Bodens hat die PSS keinen nennenswerten Einfluss. Das Gleiche lässt sich auch auf AC-Rail übertragen.

Bei der Variation des Fahrzeugtyps und der Zuggeschwindigkeit zeigt sich, dass für beide Fahrzeugtypen bei $V = 50 \text{ km/h}$ bis zu einer Tiefe von 3.0 m und bei $V = 100 \text{ km/h}$ die Scherdehnungen grösser sind als der Grenzwert.

Auch hier zeigt sich, wie beim mittulguten Baugrund, dass die Scherdehnungen beim TPF «ABe 100» geringer sind als beim MGB «Komet».

Daraus folgt, dass durch Reduktion der Zuggeschwindigkeit und / oder Einsatz eines leichteren Fahrzeugtyps die auftretenden Scherdehnungen markant reduziert werden können. Trotzdem reichen diese Massnahmen aber nicht aus, um den Nachweis der dynamischen Stabilität zu erbringen. Damit sind weitere Massnahmen erforderlich, um den Untergrund zu ertüchtigen.

4 3-dimensionale bahndynamische Finite-Elemente-Analyse

4.1 Vorgehen

Mit der 3-dimensionalen Finite-Elemente-Analyse soll eine Reduktion der Beanspruchung des Untergrundes durch die Wahl entsprechender Komponenten des Oberbaus, der Ausbildung des Unterbaus und der Zugtypen (Fokus Achsabstände) untersucht werden.

In einem ersten Schritt musste ein zuverlässiges 3D-Modell gebildet werden, vgl. Abb. 10.

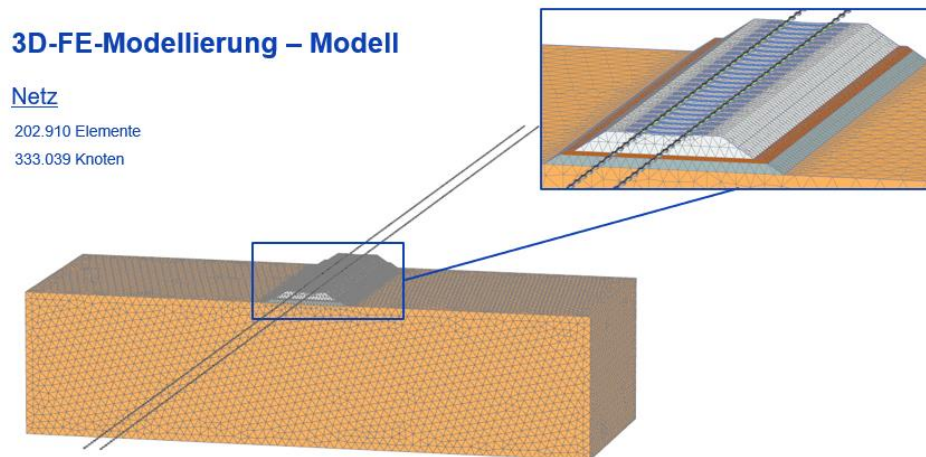


Abbildung 10: 3-dimensionales FE-Modell [2]

Das Netz umfasst 202'910 Elemente und 333'039 Knoten. Mit diesem Modell wurde ein gerader Streckenabschnitt abgebildet. Der Einfluss der Fliehkräfte im Bogen und entsprechender Überhöhung wurde in diesem Modell nicht berücksichtigt.

Für die Auswertung des 3D-FE-Modells wurden die resultierenden vertikalen Spannungsverteilungen an definierten Auswertepunkten berechnet und in verschiedener Weise unter Berücksichtigung der Variationsgrößen und der resultierenden Beanspruchungen infolge Zugüberfahrten ausgewertet und analysiert.

Die Auswertepunkte wurden derart gewählt, dass einerseits die Vertikalspannungen an verschiedenen Punkten an der Schwellenunterkante (Abb. 11) ausgewertet werden konnten und andererseits die Lastabtragung in den verschiedenen Ebenen des Ober- und Unterbaus (Schotteroberkante, Schotterunterkante, Unterbau Unterkante etc.) analysiert werden konnte, vgl. Abb. 12.

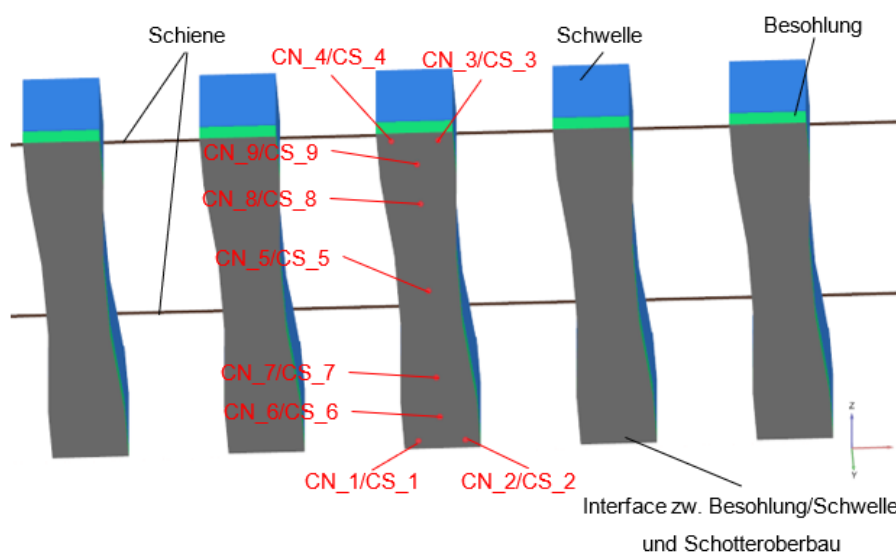


Abbildung 11: Auswertepunkte an OK Schotteroberbau [2]



Abbildung 12: Tiefenlage der Auswertepunkte [2]

Damit wurden die Vertikalspannungen an insgesamt 63 Auswertepunkten berechnet. Zusätzlich wurden noch je ein Längsschnitt in Gleislängsrichtung und Querschnitt durch die ausgewertete Schwelle und durch beide Schienenaullager definiert und ausgewertet, vgl. Abb. 13.

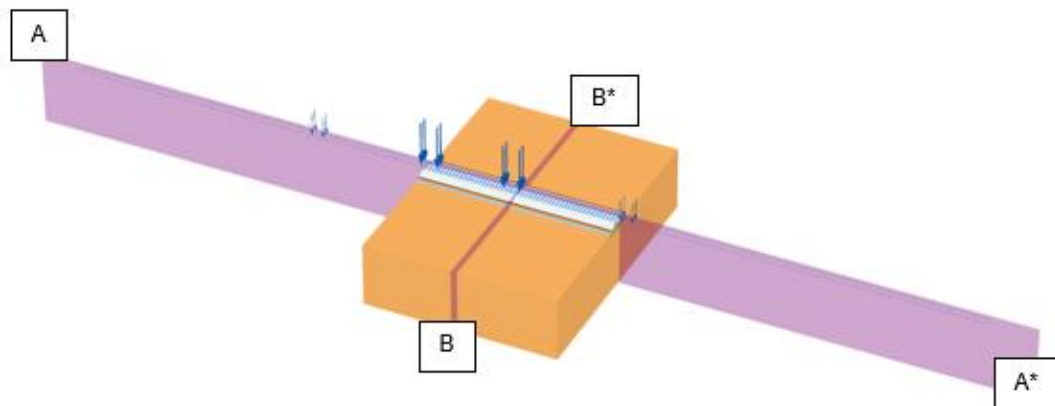


Abbildung 13: Lage der Schnitte im Modell [2]

4.2 Untersuchte Berechnungsvarianten 3D-FE-Modell

Es wurden insgesamt 14 Parametervariationen für die Berechnungen definiert, vgl. Abb. 14.

fertig	in Bearbeitung	offen	Bestätigung RAILplus ausstehend	Variation im Vgl. zu Nr. 1						
Nr.	Untergrund	Schotteroberbau	Unterbau	Besohlung	Steifigkeit Zwischenlage in kN/mm	Achslasten	Geschwindigkeit in km/h	Achsabstände	Schwelle	Kommentar
1	Sand (mittelgut)	Neuschotter	AC-Rail mit KG	SLB 3007G	85	MGB "Komet"	50	MGB "Komet"	Beton	Referenz, "weich"
2	Sand (mittelgut)	Neuschotter	AC-Rail mit KG	unbesohlt	700	MGB "Komet"	50	MGB "Komet"	Beton	"steif"
3	Sand (mittelgut)	Neuschotter	AC-Rail mit KG	SLB 3007G	700	MGB "Komet"	50	MGB "Komet"	Beton	
4	Sand (mittelgut)	Neuschotter	AC-Rail mit KG	M02	85	MGB "Komet"	50	MGB "Komet"	Beton	
5	Sand (mittelgut)	Altschotter	AC-Rail mit KG	SLB 3007G	85	MGB "Komet"	50	MGB "Komet"	Beton	
6	Sand (mittelgut)	Altschotter	AC-Rail mit KG	unbesohlt	85	MGB "Komet"	50	MGB "Komet"	Beton	
7	Sand (mittelgut)	Neuschotter	PSS	SLB 3007G	85	MGB "Komet"	50	MGB "Komet"	Beton	KG statt AC-Rail
8	Sand (schlecht)	Neuschotter	AC-Rail mit KG	SLB 3007G	85	MGB "Komet"	50	MGB "Komet"	Beton	S, lo-sl
9	Sand (mittelgut)	Neuschotter	AC-Rail mit KG	SLB 3007G	85	MGB "Komet"	100	MGB "Komet"	Beton	
10	Sand (mittelgut)	Neuschotter	AC-Rail mit KG	SLB 3007G	85	TPF "ABe 100"	50	TPF "ABe 100"	Beton	
11	Sand (mittelgut)	Neuschotter	AC-Rail mit KG	SLB 3007G	85	TPF "ABe 100"	100	TPF "ABe 100"	Beton	
12	Sand (mittelgut)	Neuschotter	AC-Rail mit KG	SLB 3007G	85	MGB "Komet"	50	TPF "ABe 100"	Beton	
13	Sand (mittelgut)	Neuschotter	AC-Rail mit KG	SLB 3007G	200	MGB "Komet"	50	MGB "Komet"	Beton	
14	Sand (mittelgut)	Neuschotter	ohne	SLB 3007G	85	MGB "Komet"	50	MGB "Komet"	Beton	
15	Sand (mittelgut)	Neuschotter	AC-Rail mit KG	unbesohlt	85	MGB "Komet"	50	MGB "Komet"	Stahl	ggf. Phase 2

Abbildung 14: Untersuchte Parametervariationen [2]

Die Berechnungsvariante 1 wurde als Referenz definiert. Sie besteht aus den Elementen:

- mittelguter Untergrund
- Neuschotter
- Unterbau: AC Rail mit Kiesgemisch
- Besohlte Betonschwellen (Besohlung SLB 3007G)
- Weiche Zwischenlage (85 kN/mm)
- Achslasten des MGB «Komet»
- Geschwindigkeit $V = 50$ km/h
- Achsabstände des MGB «Komet»

Die Berechnungsvariante 15 mit Stahlschwellen wurde erst im Laufe der Untersuchungen dazu genommen und soll in einer 2. Phase ausgewertet werden. Die Modellierung der Stahlschwelle ist aufgrund ihrer Geometrie etwas anspruchsvoller als die Betonschwelle.

Es wurden folgende Auswertungen gemacht:

- Vertikalspannungs-Zeitverläufe (Kap. 4.3)
- Effektive Vertikalspannung über die Tiefe (Kap. 4.4)
- Deviatorspannungs-Zeitverläufe (Kap. 4.5)
- Verteilung der Deviatorspannung (Kap. 4.6)
- Setzungs-/Spannungs-/Bettungsverteilung (Kap. 4.7)
- Lastabtrag (Kap. 4.8)

4.3 Ergebnisse Vertikalspannungs-Zeitverläufe

Für jede Variante wurden die Vertikalspannungen-Zeitverläufe in der Tiefenlage OK Schotteroberbau ausgewertet. Für die Referenz-Variante (01) ergibt sich folgender Verlauf, vgl. Abb. 15.

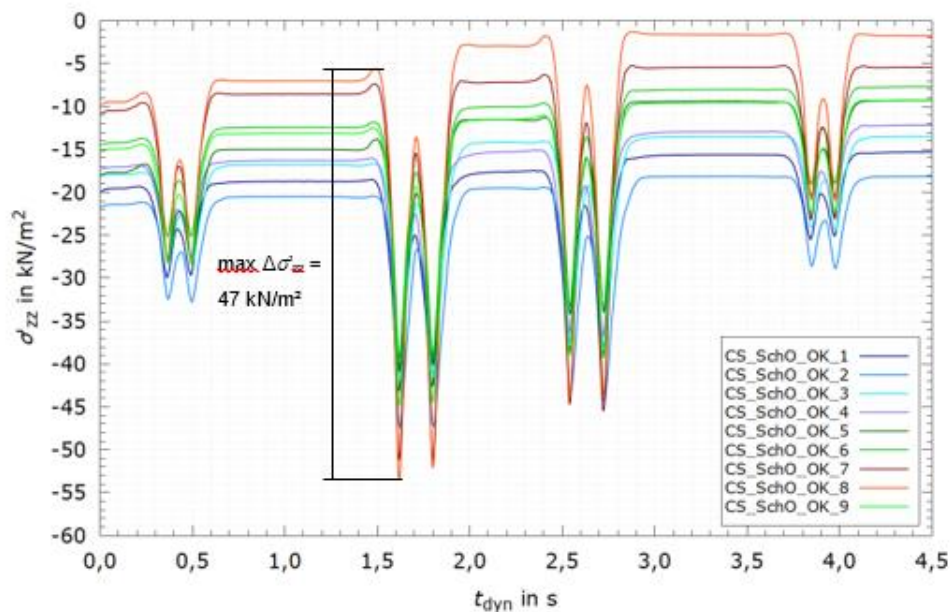


Abbildung 15: Variante 01 – Vertikalspannungs-Zeitverlauf Tiefenlage OK Schotteroberbau [2]

Diese Verläufe wurden für alle 14 Varianten ermittelt und die Ergebnisse tabellarisch zusammengestellt, vgl. Tab. 3.

Variante	Variationsgröße	$\max \Delta \sigma'_{zz}$ in kN/m ²	F
01	Referenz (SLB 3007G; ZW 85; Neuschotter; AC-Rail; Sand, mitteldicht; MGB „Komet“; $v_{Zug} = 50$ km/h)	47	1,00
02	<u>unbesohlt</u> , ZW 700	126	2,68
03	ZW 700	74	1,57
04	Besohlung M02	24	0,51
05	Altschotter	52	1,11
06	Altschotter, <u>unbesohlt</u>	84	1,79
07	PSS	43	0,91
08	Sand, locker (schlecht)	43	0,91
09	$v_{Zug} = 100$ km/h	47	1,00
10	<u>tpf „Abe 100“</u>	31	0,66
11	<u>tpf „Abe 100“</u> , $v_{Zug} = 100$ km/h	31	0,66
12	Achsabstände <u>tpf „Abe 100“</u>	45	0,96
13	ZW 200	61	1,30
14	ohne Unterbau	47	1,00

Tabelle 3: Ergebnisse effektive Vertikalspannungs-Zeitverläufe [2] OK Schotteroberbau

Der Faktor F ist das Verhältnis zwischen der maximalen Vertikalspannung der einzelnen Varianten bezogen auf die Referenzvariante 01.

Dabei zeigt sich, dass die Variante 02 unbesohlt und mit 8,2-mal steiferer Zwischenlage mit einem Faktor 2.68 gegenüber der Referenz die höchsten Vertikalspannungen auf OK Schotteroberbau erzeugt. Die Variante 13 mit der gegenüber der Referenz 2.4-mal steiferen ZW 200 ergibt einen Spannungszuwachs von 30%.

Der Zusammenhang zwischen Steifigkeit der Zwischenlage und den maximalen Vertikalspannungen ist nichtlinear, vgl. Abb. 16. Allerdings müsste die interpolierte Funktion noch mit zusätzlichen Berechnungspunkten validiert werden.

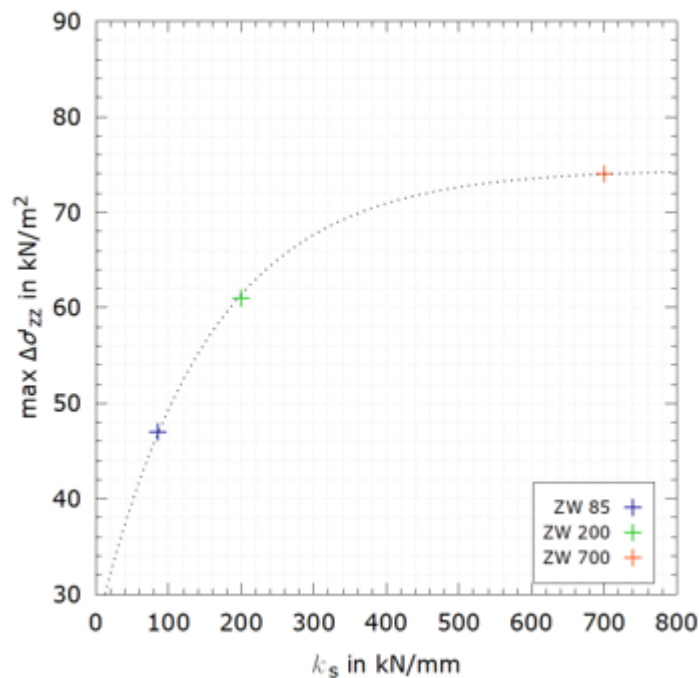


Abbildung 16: Maximale Vertikalspannungen in Abhängigkeit der Steifigkeit der Zwischenlage [2]

Bei der Besohlung M02 ergibt sich eine um 49% niedrigere Vertikalspannung als die Referenz mit der SLB 3007G. Allerdings handelt es sich bei M02 um eine elastischere Besohlung. Die SLB 3007G hat einen statischen Bettungsmodul $C_{\text{stat}} = 0.4 \text{ N/mm}^3$, die M02 einen $C_{\text{stat}} = 0.24 \text{ N/mm}^3$.

Bei den Varianten mit Altschotter, PSS, schlechtem Untergrund, ohne Unterbau, höherer Zuggeschwindigkeit und veränderten Achsabständen ergaben sich keine wesentlichen Änderungen. Einzig die Varianten mit dem anderen Fahrzeugtyp TPF «ABe100» mit 25% niedrigeren maximalen Achslasten ergeben eine Reduktion der maximalen Vertikalspannungen von 34%.

4.4 Effektive Vertikalspannung über die Tiefe

Aus den Ergebnissen der Vertikalspannungen über die Zeit aller Ebenen wurde für jede Variante die maximale effektive Vertikalspannung ermittelt und als Funktion der Tiefe dargestellt vgl. Abb. 17 als Beispiel der Referenzvariante.

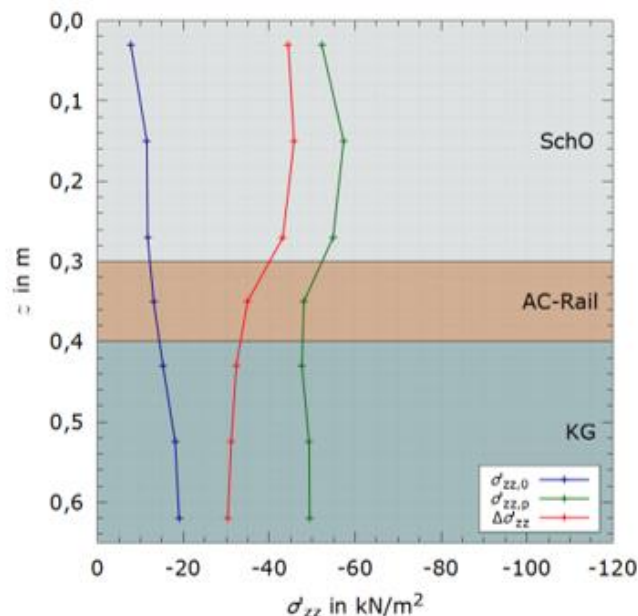


Abbildung 17: Variante 01 (Referenz)- Maximale Vertikalspannung als Funktion der Tiefe [2]

Die blaue Linie zeigt den Verlauf der Spannungen im unbelasteten Zustand, die grüne Linie entspricht der effektiven Vertikalspannung unter maximaler Achslast, rot entspricht der Differenz zwischen unbelastetem Zustand und effektivem Zustand unter maximaler Achslast.

Um alle Varianten miteinander vergleichen zu können wurden die Kurven der Differenzen der effektiven Vertikalspannungen einander gegenübergestellt, vgl. Abb. 18.

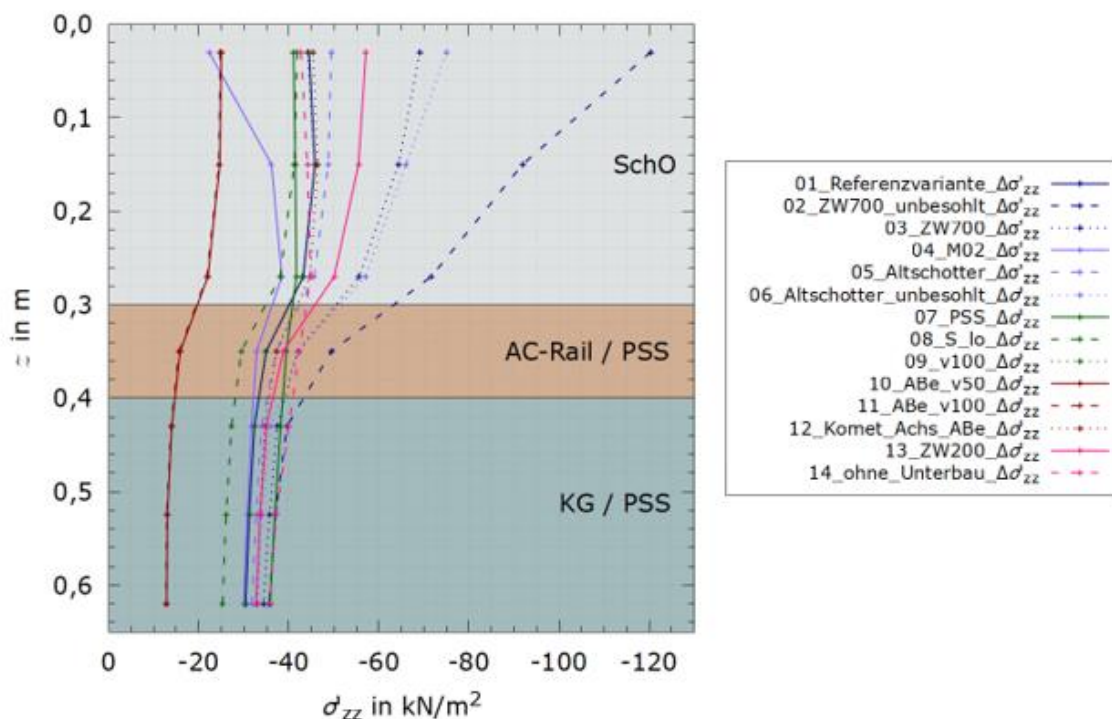


Abbildung 18: Vergleich der Varianten – Differenzen der effektiven Vertikalspannungen [2]

Auffällig ist, dass die steiferen Varianten (steifere Zwischenlagen und / oder unbesohlte Schwelle) im oberen Bereich des Schotter höhere Vertikalspannungen im Schotter ergeben und sich diese im Unterbau ab der Tiefe AC-Rail / PSS vergleichmässigen. D.h. die steiferen Varianten führen zu einer stärkeren Beanspruchung des Schotter. Dieser Effekt wird auch durch entsprechende Erfahrungen der Bahnen bestätigt.

Die abweichenden Varianten 10 und 11 sind durch die niedrigeren Achslasten des TPF «ABe100» begründet.

4.5 Deviatorspannungs-Zeitverläufe

Für die drei Tiefenlagen OK Schotteroberbau, UK Schotteroberbau und UK Kiesgemisch / PSS wurden für alle Varianten die Deviatorspannungen als Mass für die Scherbeanspruchung über die Zeit aufgetragen, vgl. Abb. 19.

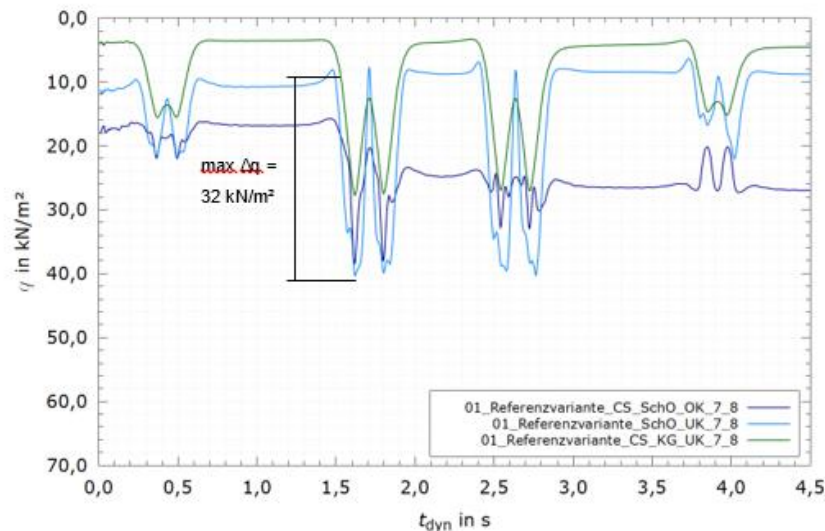


Abbildung 19: Deviatorspannung-Zeitverlauf – Variante 01 (Referenz) [2]

Die Ergebnisse aller Varianten sind in der Tabelle 4 zusammengefasst

Variante	Variationsgröße	max $\Delta\sigma_d$ in kN/m²	F
01	Referenz (SLB 3007G; ZW 85; Neuschotter; AC-Rail; Sand, mitteldicht; MGB „Komet“; $v_{Zug} = 50$ km/h)	32	1,00
02	unbesohlt, ZW 700	49	1,53
03	ZW 700	40	1,25
04	Besohlung M02	30	0,94
05	Altschotter	34	1,06
06	Altschotter, <u>unbesohlt</u>	42	1,31
07	PSS	27	0,84
08	Sand, locker (schlecht)	28	0,88
09	$v_{Zug} = 100$ km/h	32	1,00
10	<u>tpf</u> „Abe 100“	22	0,69
11	<u>tpf</u> „Abe 100“, $v_{Zug} = 100$ km/h	22	0,69
12	Achsabstände <u>tpf</u> „Abe 100“	32	1,00
13	ZW 200	36	1,13
14	ohne Unterbau	32	1,00

Tabelle 4: Ergebnisse Deviatorspannungs-Zeitverläufe [2]

Die Ergebnisse sind in der Tendenz vergleichbar mit den Ergebnissen in Tab. 3. Die steife Variante 02 unbesohlt und steifer Zwischenlage ergibt gegenüber der Referenz eine um 53% höhere Deviatorspannung.

4.6 Verteilung der Deviatorspannung

Die Verteilung der Deviatorspannung wurde für die Varianten AC-Rail (01), PSS (07) und ohne Unterbau (14) ausgewertet und in einem Längs- und Querschnitt ausgewertet, vgl. Abb. 20 und 21.

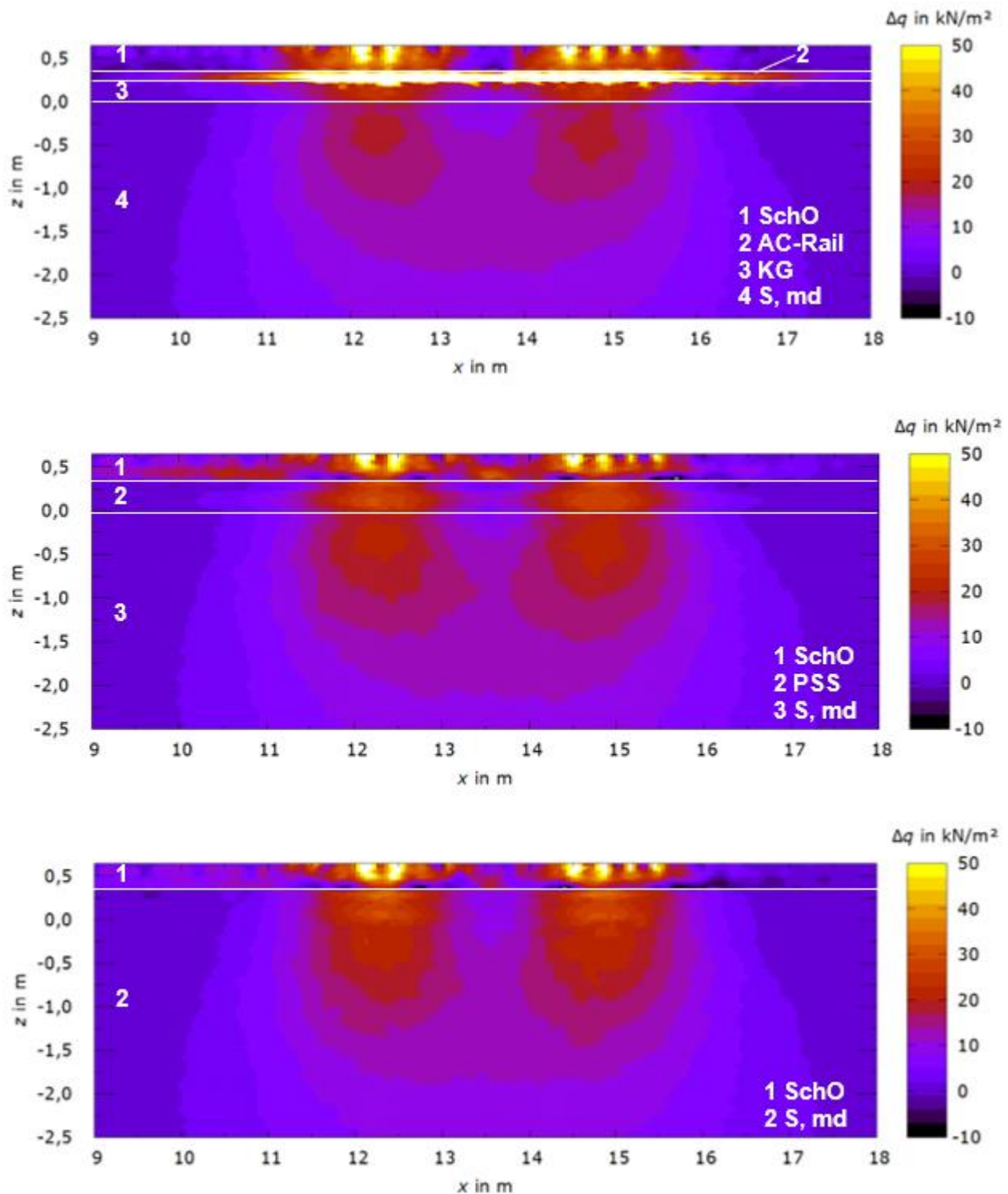


Abbildung 20: Längsschnitt Verteilung Deviatorspannung in Funktion der Tiefe [2]

Dabei zeigt sich, dass nur der Unterbau mit AC-Rail eine lastverteilende Wirkung entfaltet. Dementsprechend ist einzig bei der Referenzvariante mit AC-Rail eine Reduktion der Deviatorspannung und damit der Scherbeanspruchung zu erwarten.

4.7 Setzungs- / Spannungs- / Bettungsverteilung

Die Auswertung auf Ebene OK Schotteroberbau ermöglicht die Darstellung der Setzungs- / Spannungs- und Bettungsverteilung für die einzelnen Varianten. Abb. 21 zeigt die Auswertung der Referenzvariante 01 und Abb. 22 die steife Variante 02.

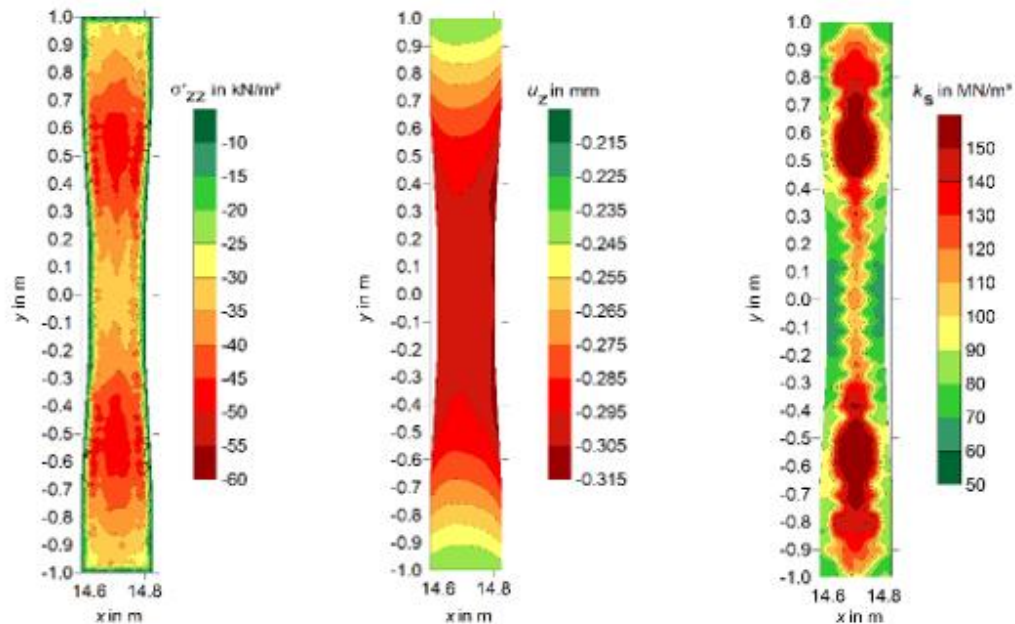


Abbildung 21: Variante 01 (Referenz) – Verteilung der Vertikalspannung (links), der Vertikalverschiebungen (Mitte), des Bettungsmoduls (rechts) [2]

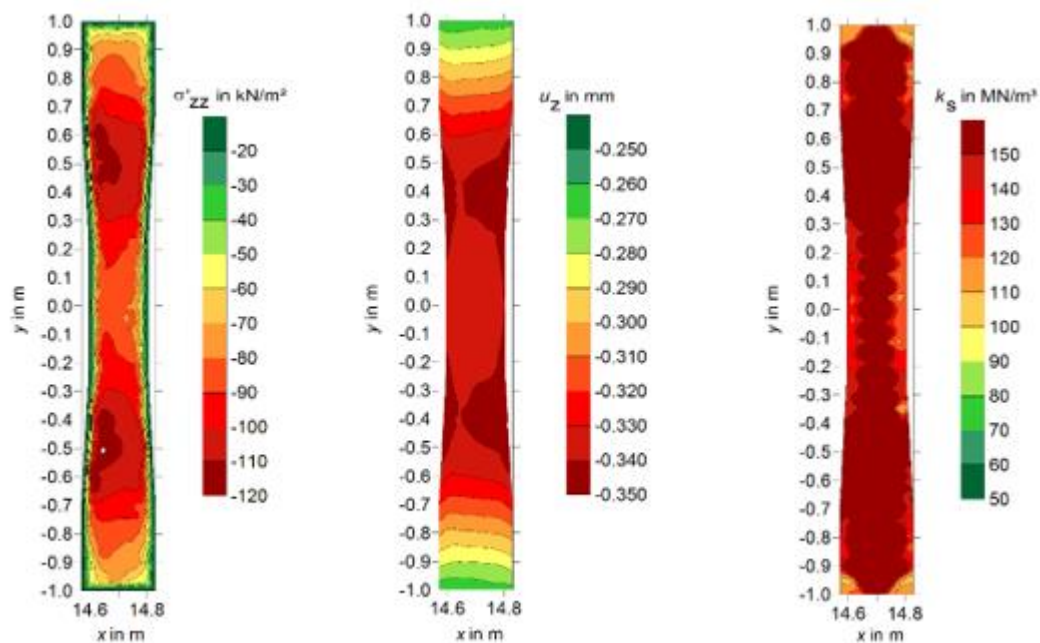


Abbildung 22: Variante 02 (Variation unbesohlt, ZW 700) – Verteilung der Vertikalspannung (links), der Vertikalverschiebungen (Mitte), des Bettungsmoduls (rechts) [2]

Auch hier zeigt sich, dass die steifere Variante 02 auf Schwellenunterseite eine ungünstigere Lastverteilung aufweist und damit zu einer höheren Schotterbeanspruchung führt.

Die Ergebnisse aller Varianten sind in Tabelle 5 dargestellt.

Variante	Variationsgröße	mittl k_s in MN/m ³	F
01	Referenz (SLB 3007G; ZW 85; Neuschotter; AC-Rail; Sand, mitteldicht; MGB „Komet“; $v_{Zug} = 50$ km/h)	117	1,00
02	<u>unbesohlt</u> , ZW 700	231	1,97
03	ZW 700	155	1,32
04	Besohlung M02	78	0,66
05	Altschotter	128	1,09
06	Altschotter, <u>unbesohlt</u>	196	1,67
07	PSS	90	0,77
08	Sand, locker (schlecht)	64	0,55
09	<u>$v_{Zug} = 100$ km/h</u>	117	1,00
10	<u>tpf „Abe 100“</u>	125	1,07
11	<u>tpf „Abe 100“</u> , <u>$v_{Zug} = 100$ km/h</u>	125	1,07
12	Achsabstände <u>tpf „Abe 100“</u>	103	0,88
13	ZW 200	136	1,16
14	ohne Unterbau	116	0,99

Tabelle 5: Ergebnisse Bettungsmodul [2] (OK Schotteroberbau)

Im Allgemeinen zeigt sich, dass der Bettungsmodul und damit der Faktor F steigen, wenn steifere Oberbaukomponenten (harte Zwischenlagen, keine Besohlung) eingesetzt werden.

4.8 Lastabtrag

Zur Beurteilung der Lastverteilung unter den Schwellen wurden die maximalen Vertikalspannungen und Setzungen für jede Schwelle ermittelt und ausgewertet. Damit kann für jede Variante die Anzahl Schwellen ermittelt werden, die durch die Vertikalspannungen und die damit verbundenen Setzung beeinflusst werden, vgl. Abb. 23.

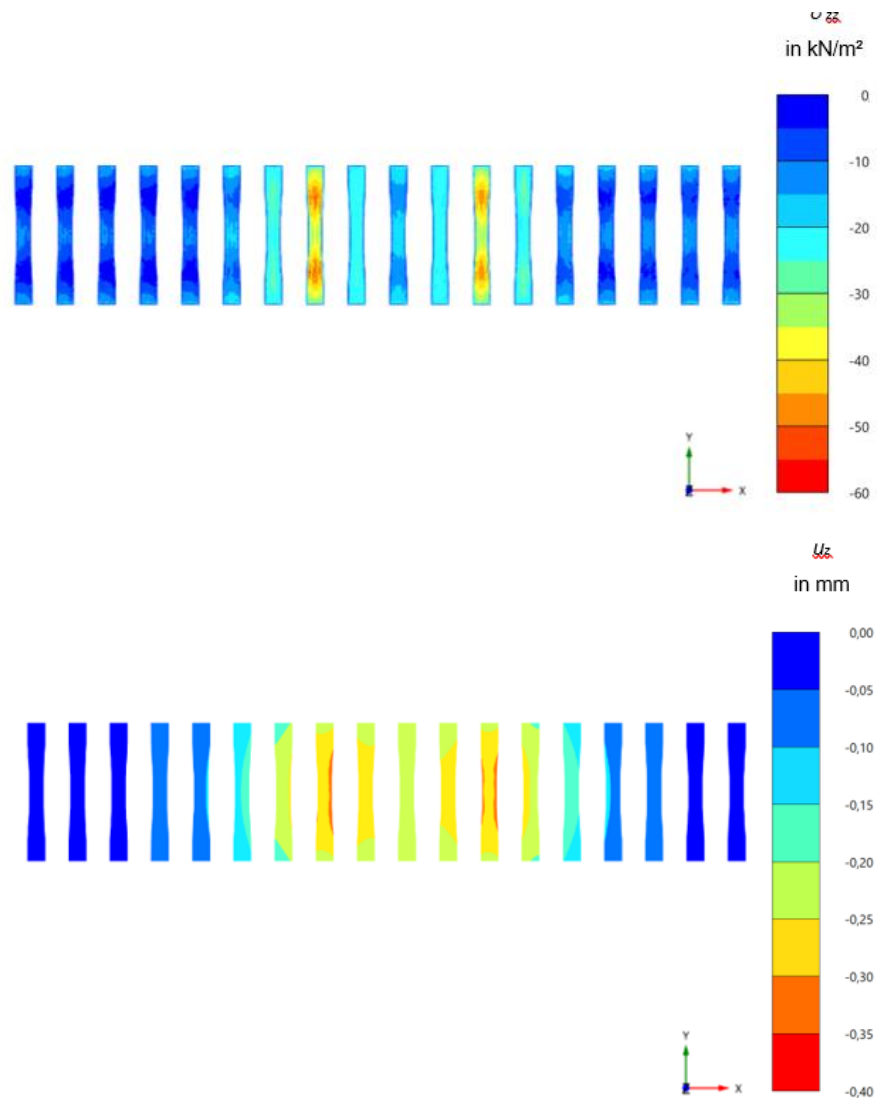


Abbildung 23: Variante 01 – Verteilung der Vertikalspannung (oben) und Setzung (unten) [2]

Grundsätzlich zeigen die Auswertung der verschiedenen Varianten ein vergleichbares Verhalten. Steifere Varianten beeinflussen weniger Schwellen als die Referenz.

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

5.1 Ergebnisse Modul 1:

Bei mittelgutem Untergrund (Bettungsmodul $C_{\text{stat}} = 0.1$ bis 0.15 N/mm^3) für $V = 100 \text{ km/h}$ und bei schlechtem Untergrund ($C_{\text{stat}} = 0.05 \text{ N/mm}^3$) generell wird der Nachweis der dynamischen Stabilität nicht erbracht. Es ist deshalb aufgrund kumulativer Setzungen mit erhöhtem Unterhaltsaufwand (Stopfen) und entsprechenden Unterhaltskosten zu rechnen.

Die Oberbau- und Unterbauvariationen haben praktisch keinen Einfluss auf die resultierenden Bodenpressungen.

Die Änderung von Zugtyp (Änderung der Achslast) und / oder der Zuggeschwindigkeit ändern die Beanspruchung des Untergrunds signifikant.

AC Rail und PSS bewirken nur im Tiefenbereich selbst eine Reduktion der Scherdehnung, ein Einfluss auf den darunter anstehenden Boden konnte nicht nachgewiesen werden.

Für mittelguten Baugrund wurde der Nachweis der dynamischen Stabilität für $V = 50 \text{ km/h}$ erbracht, für $V = 100 \text{ km/h}$ nicht. Dort sind allenfalls Massnahmen am Baugrund erforderlich, um langfristig kumulative Setzungen ausschliessen zu können.

Bei schlechtem Baugrund kann zwar mit Reduktion der Achslasten und / oder der Geschwindigkeit die Scherdehnung reduziert werden. Das reicht aber nicht um den Nachweis zu erfüllen.

5.2 Empfehlungen Modul 1

Ein schlechter Untergrund sollte bei einer Fahrbahnerneuerung mit geeigneten Massnahmen verbessert werden. Alternativ wäre zu prüfen, ob sich die hohen Investitionskosten einer teuren Bodenverbesserungsmassnahme (z.B. Rüttelstopfsäulen) gegenüber dem Inkaufnehmen einer kürzeren Nutzungsdauer und höheren Unterhaltskosten wirtschaftlich rechnen.

Bei einem mittelguten Untergrund sind für höhere Geschwindigkeiten ($50 - 100 \text{ km/h}$) die gleichen Massnahmen wie für schlechten Untergrund zu prüfen.

5.3 Ergebnisse Modul 2:

Die Wahl der Zwischenlagen und der Besohlung haben einen grossen Einfluss auf die Schotterbeanspruchung und damit auf die Dauerhaftigkeit der Fahrbahn.

Die Art des Unterbaus hat einen Einfluss auf die Lastverteilung im Untergrund. AC Rail und PSS haben in Bezug auf die vertikalen Spannungsspitzen eine vergleichbare Wirkung. AC Rail zeigt aber eine günstigere Lastverteilung, die zu geringeren Beanspruchungen des Untergrundes führt.

Die Zuggeschwindigkeit und Achsabstände haben aufgrund der Art des Modells keinen nennenswerten Einfluss auf die Ergebnisse. Allerdings ergeben sich durch die Änderung des Zugtyps durch niedrigere Achslasten signifikant niedrigere Beanspruchungen auf Schotter und Unterbau.

5.4 Empfehlungen Modul 2

Elastisch abgestimmte Zwischenlagen und tragfähige Unterbauschichten sind entscheidend für eine homogene Lastverteilung.

Zu hohe lokale Steifigkeiten (z.B. harte Zwischenlagen oder unbesohlte Schwellen) führen zu erhöhter Kornzertrümmerung des Schotters, Setzungsdifferenzen und damit zu reduzierter Lebensdauer.

Der Fahrbahnaufbau Betonschwellen weich gedämpft und tragfähig homogen (z.B. Besohlung und AC Rail und mit leichten Abstrichen auch PSS) liefert die günstigsten Ergebnisse hinsichtlich Dauerhaftigkeit und Erhaltung.

Folgende Einschränkungen sind zu beachten:

Die hohe Elastizität der Zwischenlagen führt zu zwei Effekten, die zu berücksichtigen sind. Die weiche Zwischenlage führt einerseits zu höherem Lärm und andererseits fördert sie je nach Schienenbefestigung zum Kippen der bogenäusseren Schiene nach aussen.

Deshalb sind die Auswirkungen in Bögen entsprechend zu berücksichtigen (Optimierung der Schienenbefestigung in engen Bögen). Als Alternative in lärmsensiblen Gebieten wäre die ZW 200 eine Alternative. Die gegenüber der ZW 85 höhere Steifigkeit könnte allenfalls durch den Einsatz der mittelsteifen Besohlung SLB2210G kompensiert werden.

Der Einbau von AC Rail im Flachland und / oder bei hohen Belastungen (z.B. Zahnradfahrzeuge) ist in der Regel zu empfehlen.

In schwer zugänglichen Gebieten führt die Logistik unter Umständen zu weiteren Kostensprüngen. In diesen Verhältnissen reicht unter Umständen der Einbau einer PSS. Wenn aufgrund der bisherigen Erfahrungen die Entwässerung bei bestehendem Untergrund kein Problem verursacht hat und die ME-Werte für das Planum eingehalten kann auch der Verzicht auf eine Unterbausanierung geprüft werden. Es empfiehlt sich in diesem Fall eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung vorzunehmen, bei der die zu erwartende reduzierte Nutzungsdauer und die zusätzlichen Stopfarbeiten den Einsparungen einer Unterbausanierung gegenübergestellt werden.

Zur Beurteilung des Untergrundes sind in jedem Falle geotechnische Untersuchungen vor der Fahrbahnerneuerung zu empfehlen.

6 Ausblick

Das durch BAUGRUND DRESDEN aufgebaute 3-D-Modell der Fahrbahn eröffnet die Möglichkeit, neue Variationen von Komponenten der Fahrbahn zu untersuchen. Insbesondere soll die Wirkung der Stahlschwelle gegenüber der Betonschwelle miteinander verglichen werden. Die Stahlschwelle ist weniger stark belasteten Gleisen eine valable Alternative zur Betonschwelle.

Im Weiteren soll als zusätzliche Variation die mittelsteife Besohlung SLB2210G mit der Zwischenlage ZW 200 kN/mm gegenüber der Referenz geprüft werden. Damit soll die Lärmausbreitung gegenüber der Referenz verringert und die Elastizität ebenfalls verringert werden.

Von Interesse dürfte auch die Verteilung der Vertikalspannungen im Bogen sein.

7 Verzeichnisse

7.1 Referenzen

- [1] Meier Thomas / Schäl Valentin, BAUGRUND DRESDEN: *Ergebnisbericht zu rechnerischen Untersuchungen der dynamischen Stabilität von Eisenbahngleisen der schweizerischen Meterspurbahnen (Modul 1)*. Technischer Bericht, 13.12.2024
- [2] Meier Thomas / Schäl Valentin, BAUGRUND DRESDEN: *Ergebnisbericht zu 3-dimensionalen bahndynamischen Finite-Elemente-Analysen für schweizerische Meterspurbahnen (Modul 2)*. Technischer Bericht, 21.11.2025
- [3] Landgraf Matthias, RAILplus: *Beschreibung der Eingangsparameter und Darstellung der Fahrbahn in den dynamischen Modellen*. Technischer Bericht, RAILplusSF-00048, 25.Nov. 2024
- [4] Planungshilfe – Eisenbahnstrecken mit Schotteroberbau auf Weichschichten – UNTERSUCHUNG ZUR DYNAMISCHEN STABILITÄT, RECHNERISCHES VERFAHREN, DB InfraGO AG, 3. Ausgabe, März 2018
- [5] Frýba L, *Vibrations of Solids and Structures under Moving Loads*, 3. Auflage, Thomas Telford House, London, 1999

7.2 Abbildungen

Abbildung 1: Berechnungsmodell mit Baugrundsichten für mittelguten Baugrund [1]	9
Abbildung 2: Ersatzmodell mit kontinuierlich gebettetem Balken auf Federn und Dämpfern [5].....	9
Abbildung 3: Berechnungsmodell mit Baugrundsichten für mittelguten Baugrund [1]	10
Abbildung 4: Berechnungsmodell mit Baugrundsichten für schlechten Baugrund mit PSS [1]	11
Abbildung 5: Last-Zeitverläufe für alle untersuchten Oberbauvarianten, MGB «Komet», Zuggeschwindigkeit 50 km/h, ohne PSS, mittelguter Baugrund mit PSS [1].....	12
Abbildung 6: Last-Zeitverläufe für alle untersuchten Oberbauvarianten, MGB «Komet», Zuggeschwindigkeit 50 km/h, mit PSS, schlechter Baugrund mit PSS [1]	12
Abbildung 7: Scherdehnung über die Tiefe, Modell mit besohlter Betonschwelle und mit Stahlschwelle, ohne PSS, mittelguter Baugrund [1]	13
Abbildung 8: Scherdehnung über die Tiefe, Modell mit besohlter Betonschwelle, ohne PSS, Variation Zuggeschwindigkeit und Zugtyp, mittelguter Baugrund [1]	14
Abbildung 9: Scherdehnung über die Tiefe, Modell mit besohlter Betonschwelle, mit und ohne PSS, schlechter Baugrund [1]	14
Abbildung 10: 3-dimensionales FE-Modell [2]	16
Abbildung 11: Auswertepunkte an OK Schotteroberbau [2].....	16
Abbildung 12: Tiefenlage der Auswertepunkte [2]	17
Abbildung 13: Lage der Schnitte im Modell [2]	17
Abbildung 14: Untersuchte Parametervariationen [2]	18
Abbildung 15: Variante 01 – Vertikalspannungs-Zeitverlauf Tiefenlage OK Schotteroberbau [2].....	19
Abbildung 16: Maximale Vertikalspannungen in Abhängigkeit der Steifigkeit der Zwischenlage [2].....	20
Abbildung 17: Variante 01 (Referenz)- Maximale Vertikalspannung als Funktion der Tiefe [2]	21
Abbildung 18: Vergleich der Varianten – Differenzen der effektiven Vertikalspannungen [2]	21
Abbildung 19: Deviatorspannung-Zeitverlauf – Variante 01 (Referenz) [2]	23
Abbildung 20: Längsschnitt Verteilung Deviatorspannung in Funktion der Tiefe [2].....	24
Abbildung 21: Variante 01 (Referenz) – Verteilung der Vertikalspannung (links), der Vertikalverschiebungen (Mitte), des Bettungsmoduls (rechts) [2]	25
Abbildung 22: Variante 02 (Variation unbesohlt, ZW 700) – Verteilung der Vertikalspannung (links), der Vertikalverschiebungen (Mitte), des Bettungsmoduls (rechts) [2]	25
Abbildung 23: Variante 01 – Verteilung der Vertikalspannung (oben) und Setzung (unten) [2].....	27
Tabelle 1: Berechnungsvarianten für mittelguten Baugrund [1]	10
Tabelle 2: Berechnungsvarianten für schlechten Baugrund [1].....	11

Tabelle 3: Ergebnisse effektive Vertikalspannungs-Zeitverläufe [2] OK Schotteroberbau.....	19
Tabelle 4: Ergebnisse Deviatorspannungs-Zeitverläufe [2]	23
Tabelle 5: Ergebnisse Bettungsmodul [2] (OK Schotteroberbau)	26