

Abschirmungselemente gegen Bodenerschütterungen

Dipl.-Ing. Frank Walther, BAUGRUND DRESDEN Ingenieurgesellschaft mbH

Durch Industrie, Baumaßnahmen und Verkehr werden verschiedene Emissionen verursacht. Von zunehmender Bedeutung sind hierbei Erschütterungen und deren Ausbreitung.

Diese Veröffentlichung umfasst die Ergebnisse von numerischen als auch experimentellen Untersuchungen an verschiedene Abschirmmaterialien und deren Wirkung auf die Ausbreitung von Erschütterungen. Des Weiteren wird auf ein neues unerprobtes Einbauverfahren eingegangen, welches bei den experimentellen Untersuchungen zur Anwendung kam. Einige der untersuchten Abschirmmaterialien sollen an Bahnstrecken zum Einsatz kommen (z.B. bei Ausbaustrecken), um die angrenzende Bebauung vor Erschütterungen zu schützen.

1. Einleitung

Durch das wachsende Bedürfnis des Menschen auf Fortbewegung und nach Gütern werden verschiedene Emissionen verursacht. Eine der zumeist stark unterschätzten Emissionen sind Erschütterungen. Diese breiten sich in Wellenform im Boden aus und können an Schichtgrenzen oder am Grundwasserspiegel Reflektionen und Refraktionen verursachen.

Schutzmaßnahmen gegen Erschütterungen sind u. a. aus diesem Grund sorgfältig zu planen und zu dimensionieren. Entscheidend ist meist bereits der Standort der Schutzmaßnahme (Emissionsort, Immissionsort

As various emissions are caused by industries, construction projects and traffic, vibrations and their propagation become more and more important.

This article summarises the results of numerical and experimental analyses of various screening materials and their effects on the propagation of vibrations. Furthermore, a completely new installation method which was tested for the first time and used for the experimental analyses is described. Some of the tested screening materials are to be used at railway tracks (e.g. for upgraded railway lines) to protect adjacent buildings against vibrations.

oder Übertragungsweg). Denn je nach Standort können unterschiedliche Möglichkeiten zur Ausbildung der Schutzmaßnahme Berücksichtigung finden. In diesem Beitrag sollen wesentliche Ergebnisse aus numerischen und experimentellen Untersuchungen von Schlitzwänden, welche im Übertragungsweg zum Einsatz kommen, vorgestellt werden.

Zunächst soll auf die Standortfindung des Feldversuches sowie die vorgenommenen Erkundungen eingegangen werden. Um die Abminderungswirkung der zu untersuchenden Materialien zu bestimmen, waren numerische Voruntersuchen vorgesehen. Der Feldversuch diente zur Überprüfung der Be-

rechnung und um mit dem Einbauverfahren erste Erfahrungen zu sammeln.

Der Beitrag stützt sich auf meine Diplomarbeit an der Technischen Universität Dresden. Hierbei waren die Unternehmen BAUGRUND DRESDEN Ingenieurgesellschaft mbH und die Keller Holding GmbH beteiligt.

2. Standort des Feldversuchs und Erkundung

Als Erstes musste ein potenzieller Standort für den Feldversuch gefunden werden. Hierbei sollte der Untergrund eine natürliche Lagerung und relativ homogene Verhältnisse aufweisen. Die Abmessungen des Versuchsfelds wurden zunächst aus Erfahrungswerten der BAUGRUND DRESDEN Ingenieurgesellschaft mbH abgeleitet.

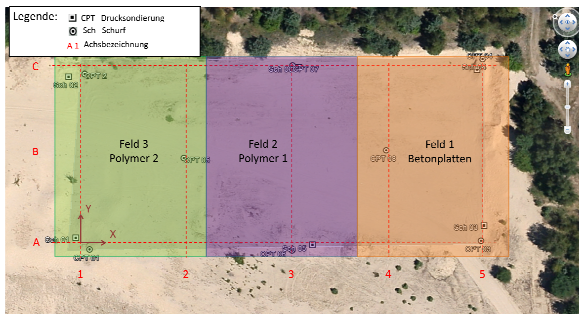


Abbildung 1: Versuchsfield mit Teilfeldern und Aufschlüssen

In Dresden konnte ein Ort mit den genannten Anforderungen auf dem Gelände der SBU Sandwerke Dresden GmbH, Radeberger Straße, gefunden werden.

Die Erkundung anhand von Drucksondierungen (CPT) und Schürfen war notwendig, um die Schichtenverhältnisse bis in größere Tiefen zu klären und um Probenmaterial für die Laborversuche zu gewinnen. Die Auswertung der CPT erfolgte u. a. nach der numerischen Interpretationsmethode nach Cudmani.

In der Abbildung 1 ist das Versuchsfield abgebildet, welche auch die Standorte der durchgeführten Drucksondierungen (CPT) und Schürfe zeigt.

3. Laborversuche

Für die durchgeführten, dynamischen, dreidimensionalen FE-Berechnungen waren zur

Bestimmung von Eingangsparametern auch folgende Laborversuche notwendig:

- Korndichtebestimmungen
- Wassergehaltbestimmungen
- Schlaggabelversuche
- Korndichtebestimmungen
- Kornformbestimmung
- Schüttkegelversuche
- Rahmenscherversuche
- Ödometerversuche
- Triaxialversuche

4. Feldversuche

Der im Folgenden vorgestellte Feldversuch diente dazu, die Abschirmwirkungen im Feld experimentell zu untersuchen und die 3D-FE-Berechnungen zu überprüfen und zu kalibrieren.

Das Unternehmen Keller Holding GmbH hat im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes RIVAS (Railway Induced Vibration Abatement Solutions) ein neues Einbauverfahren zur Herstellung von Schlitzwänden entwickelt. Für das Einbauverfahren gab es zu dem damaligen Zeitpunkt noch keine praktischen Erfahrungen.

Für den Feldversuch mussten zunächst folgende Voraussetzungen geschaffen werden bzw. auf dem Versuchsfield vorhanden sein:

- Baustraße mit Platten
- Müller-Vibrator MS-16 HFV (und Zubehör (Spannvorrichtung/Zangenvorrichtung MS-U 150 AP, Aggregat MS-A320V, Druckschläuche)
- Autokran, 80 Tonnen
- Absenkkasten (Keller Holding GmbH)
- Stahlplatte mit Aufsatz
- Bagger, 16 Tonnen
- Messtechnik (BAUGRUND DRESDEN Ingenieurgesellschaft mbH)

Die Versuchsfläche wurde in drei Teilflächen aufgeteilt. Im Versuchsfield wurde ein Koordinatensystem gelegt, dessen Ursprung im Achsenschnittpunkt A/1 (siehe Abbildung 1) liegt. In den Teilflächen wurden der Ausgangszustand ohne Abschirmwand (Nullver-

such) und der Zustand mit Abschirmwand (Versuch) untersucht.

Tabelle 1: Abmessungen der Teilfelder

	Versuchsfeld 1 GRÜN in Abbildung 1	Versuchsfeld 2 LILA in Abbildung 1	Versuchsfeld 3 ORANGE in Abbildung 1
X_{min} [m]	-10	30	70
X_{max} [m]	30	70	110
Y_{min} [m]	-5		
Y_{max} [m]	55		
Z_{min} [m]	-20		

Für die Untersuchungen standen die drei nachfolgenden Materialien mit unterschiedlichen Steifigkeiten zur Verfügung, wobei jedes Material einem Teilfeld zugeordnet ist:

- Betonplatten (hohe Steifigkeit) [Feld 1]
- Polymer 1 (niedrige Steifigkeit) [Feld 2]
- Polymer 2 (sehr niedrige Steifigkeit) [Feld 3]

Nachfolgend wird das Einbauverfahren grob gemäß der in Abbildung 2 dargestellten Arbeitsphasen beschrieben.

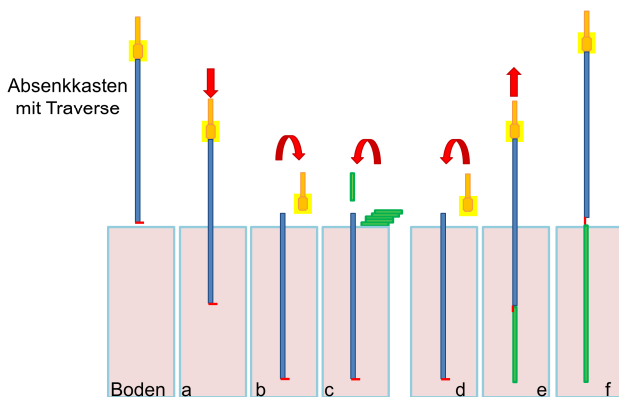


Abbildung 2: Einbauverfahren

Der Absenkkasten (siehe Abbildung 3, links) wird am Müller-Vibrator hängend in den Boden eingerüttelt (a). Anschließend ist die Traverse zu entfernen (b), um das jeweilige Abschirmelement einzubauen (c). Danach ist die Traverse wieder zu befestigen (d). Nachdem die Traverse und der Rüttler wieder am restlichen Absenkkasten angebracht wurde, muss der Absenkkasten gezogen werden. Die Klappe am unteren Ende des Absenkkastens öffnet sich während des Ziehvorganges (e). Das Abschirmmaterial rutscht aus dem Absenkkasten und verbleibt im Boden (f).

Die Großversuche fanden im Zeitraum vom 23.09.2013 bis zum 30.09.2013 statt.

Am Einbauverfahren mussten nach den ersten Rammversuchen kleinere Modifikationen vorgenommen werden, da das Gesamtgewicht des Müller-Vibrators, der Spannvorrichtung und des Absenkkastens nicht ausreichte, um den Spitzenwiderstand des Absenkkastens bei dem vorhandenen Untergrund zu überwinden. Durch eine Auflockerung des Bodens im Einbaubereich mittels Bagger war es möglich, das Einbauverfahren anzuwenden.

Bedingt durch das Einbauverfahren konnte auch keine durchgängige Wand hergestellt werden. Die Abschirmwand wurde mit einem leichten Versatz zwischen einzelnen Wandsegmenten hergestellt, welche sich 10 bis 15 cm überlappten. Der Versatz in der Wand ist wegen der großen Überlappung vernachlässigbar.

In Feld 1 und Feld 2 konnte eine 14 m lange und 3 m tiefe sowie 5 cm dicke Abschirmwand erstellt werden. In Feld 3 belief sich die Länge auf 7,5 m.



Abbildung 3: (links) Absenkkasten (rechts) Erregerquelle

Der Müller-Vibrator MS-16 HFV von ThyssenKrupp diente auch als Erregerquelle (statische Last 50,86 kN), welcher über eine Stahlplatte mit Adapter Frequenzen (< 40 Hz) in den Untergrund einleiten konnte (Abbildung 3, rechts).

Die Wahl der Erschütterungsquelle war naheliegend, da der Müller-Vibrator einen großen Frequenzarbeitsbereich aufweist und bei anderen als Erregerquelle in Frage kommenden Baugeräten meist nur ein oder zwei Arbeitsfrequenzen vorhanden wären.

Für die Durchführung wurden vier verschiedene Abstände (2,5 m, 5,0 m, 7,5 m und 10,0 m) zwischen Abschirmwand und Erregerquelle mit Frequenzen bis 39 zu Hz und zusätzlich jeweils ein Impuls (Stahlplatte mit Adapter wurde aus 1 m Höhe fallen gelassen) untersucht.

Die Schwingungsausbreitung im Boden wurde messtechnisch mittels Geophonen er-

fasst. In Tabelle 2 und Abbildung 4 ist die Lage der auszuwertenden Geophone dargestellt.

Tabelle 2: Lage der Geophone

Knoten	X			Y	Z
	1	2	3		
1	10,0	50,0	90,0	0,0	-0,5
2	10,0	50,0	90,0	10,0	-0,5
3	10,0	50,0	90,0	20,0	-0,5
4	10,0	50,0	90,0	29,0	-0,5
5	10,0	50,0	90,0	31,0	-0,5
6	10,0	50,0	90,0	32,5*	-0,5
				35,0*	
				37,5*	
				40,0*	
7	10,0	50,0	90,0	50,0	-0,5
8	20,0	40,0	80,0	30,0	-0,5
9	10,0	50,0	90,0	30,0	-3,0

*je nach Lage des Anregers
9 und 6 nur in FE-Berechnung

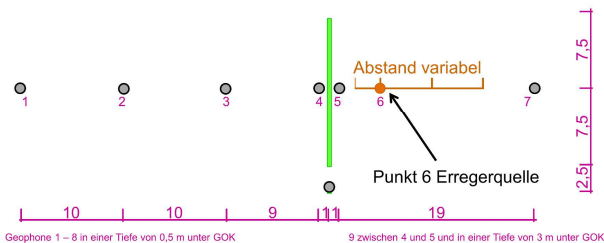


Abbildung 4: Lage Geophone zur Abschirmwand

Es konnten insgesamt 543 Messergebnisse aufgezeichnet werden. Hinzu kommen 16 Messergebnisse aus dem Probedurchgang, als noch keine Auflockerung im Feld 1 vorhanden war. Die Aufzeichnung der Messergebnisse erfolgte mit dem Messprogramm DASyLab.

Um die Auswertung des Feldversuches übersichtlich zu gestalten, wurde eine Auswertung über Verhältniswerte gewählt. Diese bestand darin, Verhältnisse der maßgebenden Geophone 5 (G5) zu 4 (G4) (siehe Tabelle 2 und Abbildung 4) zu bilden. Geophon 5 befand sich zwischen der geplanten bzw. hergestellten Abschirmwand und Erregerquelle. Geophon 4 ist hinter der geplanten bzw. hergestellten Abschirmwand installiert worden. Aus den numerischen Untersuchungen ergab sich, dass die Erschütterungsabnahme auf den Bereich direkt hinter der Wand begrenzt war. Diese Erkenntnis konnte nach Sichtung der Messdaten auch bestätigt werden.

Hierbei basiert die Auswertung auf der Annahme, dass ein linearer Zusammenhang

zwischen dem Abbau der Schwinggeschwindigkeit und den unterschiedlichen Erschütterungsintensitäten vorhanden ist.

In Abbildung 5 sind exemplarisch Verhältniswerte aufgeführt und dem jeweiligen Nullversuch bzw. Versuch sowie der jeweiligen untersuchten Frequenz zugeordnet. In Abbildung 6 sind alle Verhältniswerte für Feld 1 (Betonplatten) in einem Diagramm gegenübergestellt. Die blaue Linie ist die Wirkungsgrenze, wobei alle Punkte über dieser Linie eine Abschirmwirkung besitzen.

Bei den Betonplatten war eine geringe Abschirmwirkung festzustellen, da nur ein Teil der Verhältnispunkte oberhalb der Wirkungsgrenze lag.

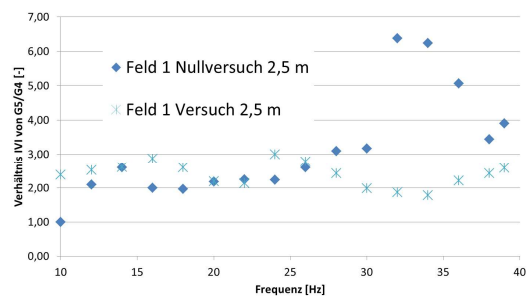


Abbildung 5: Verhältnis G5/G4 Feld 1 (2,5 m)

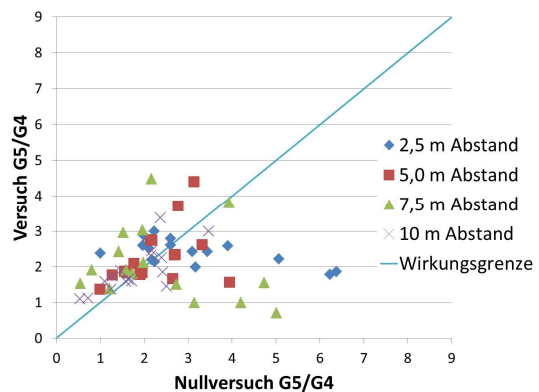


Abbildung 6: Ergebnis Feldversuch Feld 1

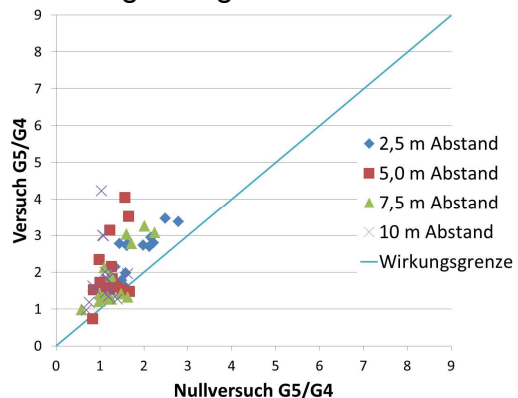


Abbildung 7: Ergebnis Feldversuch Feld 2

In Abbildung 7 sind die Ergebnisse des Polymers 1 in Teilfeld 2 enthalten. Ein Großteil der Verhältnispunkte liegt oberhalb der Wirkungsgrenze. Somit ist hier eine eindeutige Abschirmwirkung vorhanden.

Die Ergebnisse für das Teilfeld 3 bzw. Polymer 2 ist in Abbildung 8 enthalten. Die meisten Verhältnispunkte sind weit über der Wirkungsgrenze. Durch den Feldversuch konnten damit die Ergebnisse aus der numerischen Untersuchung bestätigt werden, dass das Polymer 2 die größte Abschirmwirkung entfaltet.

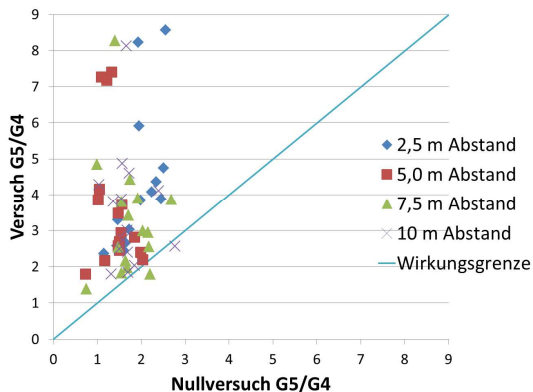


Abbildung 8: Ergebnis Feldversuch Feld 2

Es gab im Feld 1 einen Probelauf vor den ersten Einbauversuchen. Hierbei konnten Messergebnisse ohne Auflockerung aufgezeichnet werden. Eine Gegenüberstellung der Messergebnisse des Nullversuches und des Probelaufes ohne Auflockerung ergab das in der Abbildung 9 dargestellte Ergebnis. Die Auflockerung führt zu einer geringen Abminderung der Erschütterungen im Nullversuch.

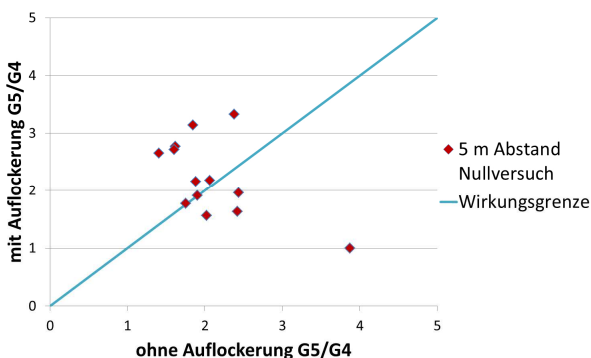


Abbildung 9: Einfluss Auflockerung

5. Numerische Untersuchungen

Die numerischen Untersuchungen waren notwendig, um mögliche Untersuchungsabstände sowie die Wirkung der Abschirmmaterialien abzuschätzen. *Diese erfolgten mit dem Programm Plaxis Version 2012.02.*

Mit dem hypoplastischen Stoffgesetz mit intergranularer Dehnung nach von Wolffersdorff [VWol96] und Niemunis/Herle [NiHe97] kann das Materialverhalten des Sandes bestmöglich wiedergegeben werden, da hierbei kleinste Bewegungen im Boden berücksichtigt werden.

Das hypoplastische Basismodell enthält folgende Materialparameter:

- e_{d0} Porenzahl der dichten Lagerung (Druck ist Null)
- e_{c0} Porenzahl des kritischen Zustandes (Druck ist Null)
- e_{i0} Porenzahl bei lockerster Lagerung (Druck ist Null)
- φ_c kritischer Reibungswinkel
- h_s granulare Härte
- n Exponent des Kompressionsgesetzes
- α Exponent des Dichteeinflusses auf den Reibungs- sowie Dilatanzwinkels
- β Exponent des Dichteeinflusses auf die Steifigkeit

Hinzu kommen die Parameter, aus der Erweiterung des Basismodells mit intergranularer Dehnung:

- R Maximum der intergranularen Dehnung
- m_R Faktor zur Erhöhung der hypoplastischen Steifigkeit
- m_T Faktor zur Erhöhung der hypoplastischen Steifigkeit
- χ Exponent zur Beschreibung des Abbaus von m_R bis zum Wert 1
- β_χ skalarer Exponent

Die intergranulare Dehnung berücksichtigt die Belastungs- bzw. Deformationsgeschichte und somit auch die Effekte einer erhöhten Steifigkeit bei kleinen Dehnungen, wie sie in der Regel bei dynamischen Schwingungsausbreitungsvorgängen auftreten.

Der in Tabelle 3 enthaltene Parametersatz wurde anhand der Laborversuche ermittelt und fand für die FE-Berechnungen Berücksichtigung.

Tabelle 3: Parametersatz für hypoplastisches Stoffgesetz mit intergranularer Dehnung

Parameter	φ_c	h_s	n	e_{d0}	e_{c0}	e_{i0}	α	β
Wert	33°	3,56E+06	0,404	0,4910	0,7650	0,8800	0,1	0,1

Parameter	R	m_R	m_T	χ	β_χ
Wert	0,1E-03	3	3	1,0	0,09

Im Berechnungsmodell wurden die Ergebnisse der CPT-Auswertung berücksichtigt, um die Baugrundsichtung anhand der Potenzzahl abzubilden.

In den 3D-FE-Modellen mit einer Breite von 40 m, einer Länge von 60 m und einer Tiefe von 20 m wurden eine 3 m tiefe Abschirmwand und eine Wanddicke von 5 cm berücksichtigt. Die Breite der Abschirmwände betrug 7,5 m (Polymer 2) bzw. 15 m (Betonplatten und Polymer 1).

In den 3D-FE-Modellen wurde weiterhin die Stahlplatte als Volumenelement nachempfunden und die dynamische Last (max. 90 % der statischen Last) mit der jeweiligen Frequenz initiiert.

Das Abschirmelement wurde ebenfalls mit finiten Volumenelementen modelliert. Die entsprechende Dämpfungsrate des jeweiligen Materials wurde über die Rayleigh-Dämpfungsparameter α und β berücksichtigt. Der Mindestabstand zwischen den einzelnen Verformungsnetzpunkten wurde durch die in [HeWe10] und [Wege11] angegebenen Formeln bestimmt.

Abbildung 10 zeigt beispielhaft ein 3D-FE-Modell

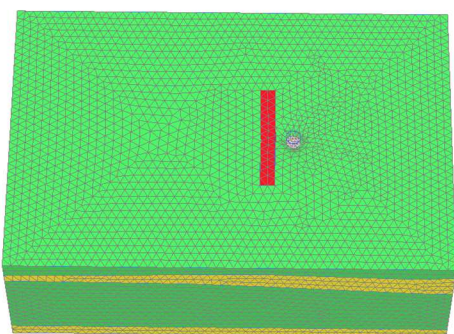


Abbildung 11: FE-Modell mit Anpassung

In den 3D-FE-Modellen wurde Punkte fixiert, die in Tabelle 2 und Abbildung 4 dargestellten Lage der Geophone entsprechen. Die „Geophone“ 6 und 9 sind nur Auswertungspunkte für die numerischen Untersuchungen.

Für die Berechnungsauswertung wurde der Maximalwert der resultierenden Schwinggeschwindigkeit herangezogen. Die maßgeblichen Ergebnisse der numerischen Untersuchungen sind in Abbildung 12 bis Abbildung 15 dargestellt. Bei der Schwinggeschwindigkeit wird nur der Knoten 4 gemäß Abbildung 4 betrachtet.

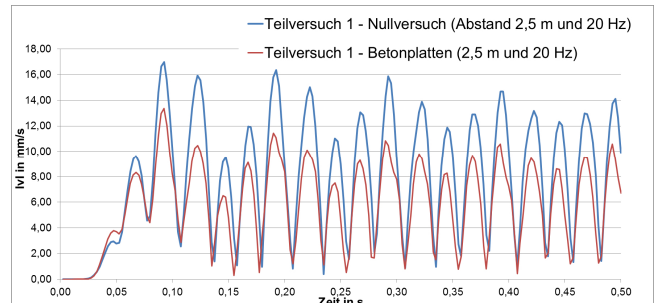


Abbildung 12: Berechnungsergebnis Feld 1

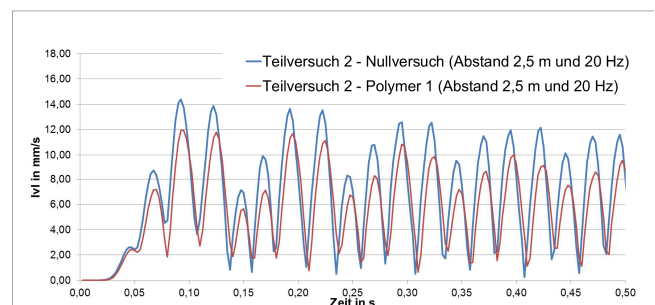


Abbildung 13: Berechnungsergebnis Feld 2

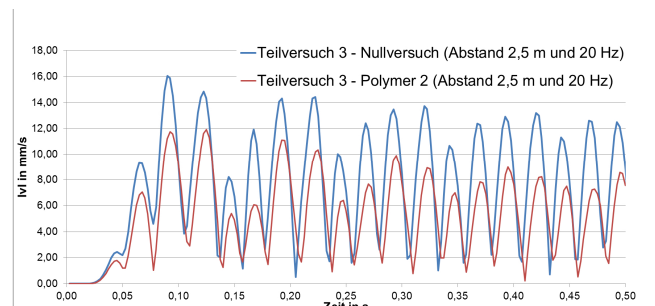


Abbildung 14: Berechnungsergebnis Feld 3

Die Erschütterungswellen werden von der Betonwand reflektiert und die Polymere werden absorbiert. Die größte Abminderung wurde mit dem Polymer 2 im Abstand von 2,5 m zum Emissionsort erzielt.

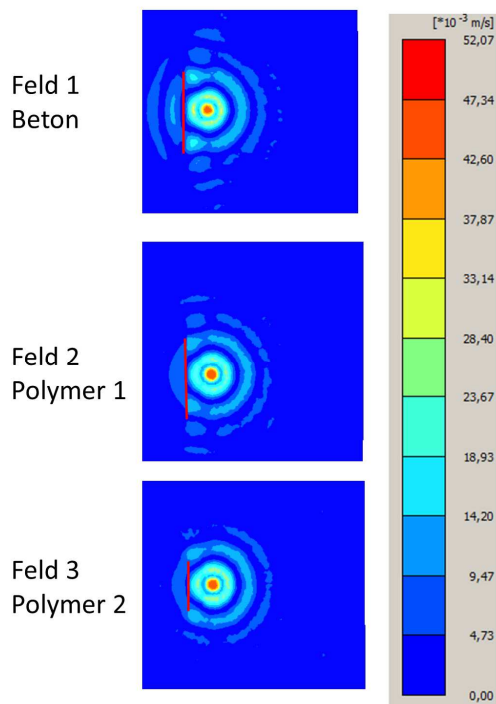


Abbildung 15: Wirkung der Abschirmelemente

6. Vergleich und Kalibrierung des FE-Modells

Durch die Veränderungen des Versuchsaufbaues bzw. durch die vorgenommene Auflockerung war eine Anpassung des FE-Modells notwendig. Die Auflockerung fand bei den Berechnungen für den Nullversuch Berücksichtigung. Dieses geänderte 3D-FE-Modell ist in Abbildung 11 dargestellt.

Für den Versuch konnte angenommen werden, dass der aufgelockerte Bereich bedingt durch das Einbauverfahren verdichtet wurde und keine Abweichung zu den Ergebnissen der numerischen Untersuchungen besteht. Die Auswertung erfolgte anhand der maximal resultierenden Schwinggeschwindigkeit.

Die nachfolgenden vorgestellten Ergebnisse resultieren aus Berechnungen, bei denen eine Anregung von 20 Hz zugrunde gelegt wurde. In Abbildung 16 bis Abbildung 18 werden diese numerischen Ergebnisse den Messergebnissen der jeweiligen Feldversuche gegenübergestellt.

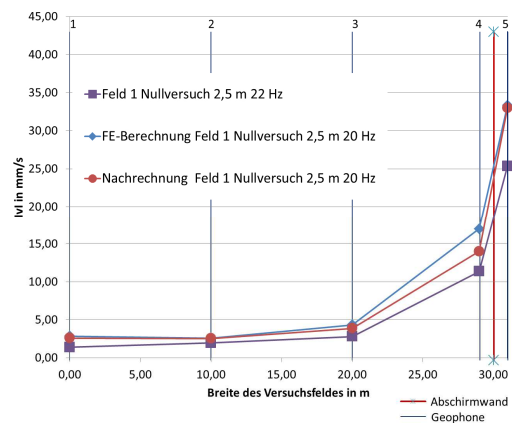


Abbildung 16: Ergebnis Feld 1 Nachrechnung

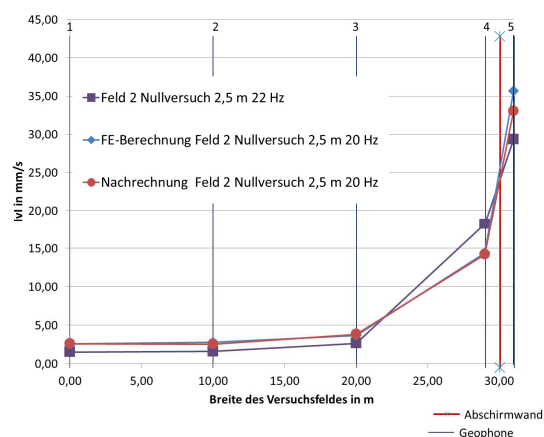


Abbildung 17: Ergebnis Feld 2 Nachrechnung

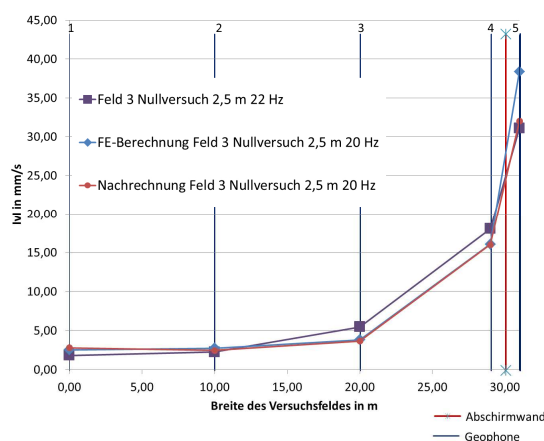


Abbildung 18: Ergebnis Feld 3 Nachrechnung

Durch die Berücksichtigung der Auflockerung bei der Nachrechnung der Nullversuche war eine Annäherung an die Versuchsergebnisse möglich.

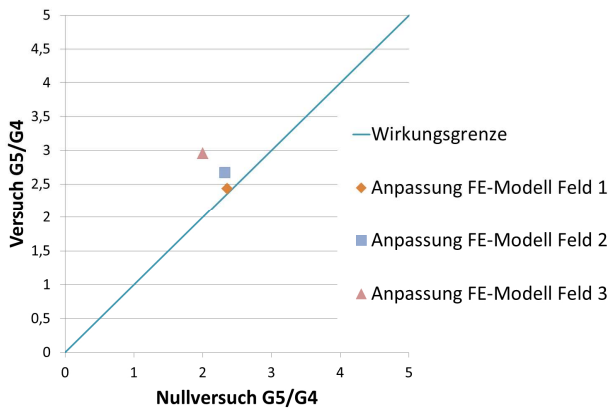


Abbildung 19: Verhältniswert des angepassten FE-Modells

Wie Abbildung 19 zeigt, bestätigen die Berechnungsergebnisse des angepassten 3D-FE-Modells die im Abschnitt 4 gezeigten Versuchsergebnisse anhand der im Abschnitt 4 beschriebenen Auswertemethode mittels Verhältniswerten. Das Polymer 2 (Feld 3) hat die größte Abschirmwirkung. Die Richtigkeit der numerischen Berechnung wurde ebenfalls durch ein anderes Stoffgesetz überprüft. Eine weitere Vergleichsrechnung erfolgte mit dem linear-elastischen Stoffgesetz. Die Ergebnisse sind in Abbildung 20 enthalten.

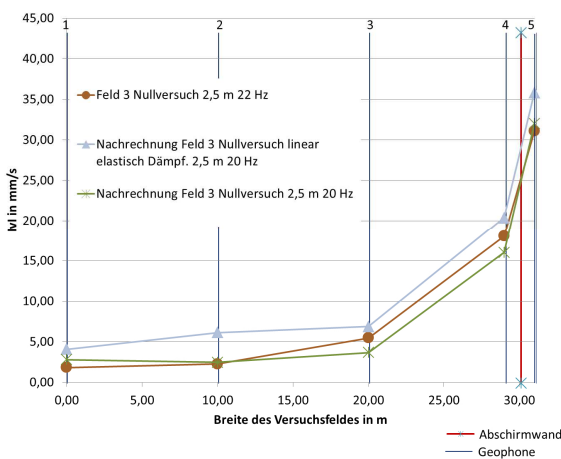


Abbildung 20: Vergleich der Stoffmodelle

7. Schlussfolgerungen

Das neuartige Einbauverfahren mittels Absenkkasten kam erfolgreich zum Einsatz und es konnten erste Erfahrungen in der Anwendung gesammelt. Auf Grundlage des Feldversuches konnten Optimierungsvorschläge für das Einbauverfahren erarbeitet werden.

Die dynamischen numerischen Berechnungen liefern zuverlässige Werte. Die Ergebnisse liegen in der Größenordnung der Ergebnisse des durchgeführten Feldversuches. Auf der Basis der nunmehr vorliegenden Erfahrungen und der Ergebnisse der dynamischen numerischen Untersuchungen ist es möglich, zuverlässige Prognoseverfahren zu erarbeiten und u. a. für die Planung von Abschirmwänden einzusetzen.

Für die drei untersuchten Materialien konnte eine Abschirmwirkung nachgewiesen werden. Die größte Abminderung war bei den vorhandenen Randbedingungen sowohl numerisch als auch experimentell bei Polymer 2 feststellbar.

Quellen

[HeWe10] Dirk Wegener, Ivo Herle, *Zur Ermittlung von Scherdehnungen unterhalb von dynamisch belasteten Flächen*, Geotechnik, 01/2010, S. 12 - 18

[Mei07] Thomas Meier, *Application of Hypoplastic and Viscohypoplastic Constitutive Models for Geotechnical Problems*, Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), 2007

[NiHe97] Andrzej Niemunis, Ivo Herle, *Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range*, Mechanics of Cohesive-Frictional Materials, 2:279-299, 1997

[Stud07] Jost A. Studer, Jan Laue, Martin G. Koller, *Bodendynamik – Grundlagen, Kennziffern, Probleme und Lösungsansätze*, 3. Auflage, Springer-Verlag, 2007

[Wege11] Wolfgang Vogel, Klaus Lieberenz, Thomas Neidhart, Dirk Wegener, *Zur dynamischen Stabilität von Eisenbahnstrecken mit Schotteroberbau auf Weichschichten*, ETR Eisenbahntechnische Rundschau, 09/2011, S. 46 – 54

[Walt13] Frank Walther, „Diplomarbeit“ Abschirmungselemente gegen Bodenerschütterungen, Technische Universität Dresden, 2013

Kartenmaterial Abbildung 1 Google Earth (Version 7.1.2.2041)