

Eine Schlitzwand als Erschütterungsbarriere: Wie viel darf man erwarten?

Daniel Gsell, ZIEGLER CONSULTANTS, Zürich, CH

1 Einleitung

Wirksame Massnahmen um die Ausbreitung von Erschütterungen im Boden, insbesondere in der Nähe der Oberfläche, zu behindern sind speziell entlang von Eisenbahnschienen gesucht um die Immissionen vom Schienenverkehr auf die angrenzenden Gebäude zu kontrollieren. Neben offenen Bodenschlitzen mit begrenzter Tiefe wurden in der Literatur auch Schlitze mit verschiedenen Füllmaterialien untersucht, dies mit unterschiedlichen Resultaten. Innerhalb eines Projekts, welches in unmittelbarer Nähe zum Gleis 3 in Oerlikon (ZH) realisiert wird, haben wir die Möglichkeit die Wirkung einer 1m starken, hocharmierten, bis 40m tiefen und 75m langen Schlitzwand zu untersuchen. Dazu wurden vorgängig zwei Bohrungen auf der vom Gleis abgewandten Seite mit Beschleunigungssensoren bestückt und mehrere hundert Zugdurchfahrten auf den 6 angrenzenden Gleisen aufgezeichnet. In Simulationsrechnungen mit zwei unterschiedlichen numerischen Verfahren sind in einem ersten Schritt die Ausbreitung der Erschütterungen in der Tiefe und darauf aufbauend die Wirkung der Schlitzwand untersucht worden. Folgende Verfahren kommen zur Anwendung: (1) Finite Element Methode mit Plaxis3D und (2) eigener Finite Differenzen Code. Die Ergebnisse der Tiefenausbreitung werden qualitativ mit den Messungen verglichen, während der Vergleich mit / ohne Schlitzwand erst numerisch erfolgt ist, da die Schlitzwand zurzeit erst gebaut wird.

2 Projekt

Die SBB als Bauherr, realisiert in Oerlikon den Andreasturm. Geplant wird das Gebäude von Annette Gigon / Mike Guyer Architekten mit der Unterstützung von WaltGalmarini AG als Bauingenieur. Die Implenia als GU ist mit der Ausführung beauftragt.

Das Gebäude, ein Hochhaus mit 19 Obergeschossen und 4 Untergeschossen, ist auf Pfählen gegründet, was durch den Baugrund bedingt ist. Bis ca. 45 m ab Oberkante Gleislage findet man sandig-siltige Seeablagerungen vor, welche auf der Süsswassermolasse liegen. Die Nähe zur Bahn, die Fassade des Gebäudes liegt in einem Abstand von ca. 7 m zur Gleisachse des Gleises 3, der anstehende Baugrund sowie die geplante Tiefe der Baugrube bedingen einen steifen Baugrubenabschluss. Eine teilweise permanent rückverankerte und mit Decken gespriesste, 1 m kräftige Schlitzwand wurde als Baugrubenabschluss gewählt (Bild 2.1). Diese Wand ist in der Lage den hohen Erddruckkräften zu widerstehen und stellt sicher, dass sich die Gleise nicht unnötig stark verschieben während der Bauphase. Im Rahmen der Prognose der zu erwartenden Erschütterungen und des Körperschalls im geplanten Gebäude wurde aufgrund der speziellen Situation (Nähe zur Bahn und Tiefe der Gründung) entschieden dass vorgängig zwei mit je 3 Beschleunigungssensoren bestückte Bohrlöcher erstellt werden um die Erschütterungen zu messen. Basierend auf diesen verbesserten Kenntnissen wird die Prognoseberechnung aufgebaut. Diese fast einmalige Situation wurde nun genutzt, um mit Messungen die Wirksamkeit einer Schlitzwand als Erschütterungsbarriere zu untersuchen. Im Folgenden werden sämtliche Untersuchungen am Beispiel dieses Projektes gemacht.

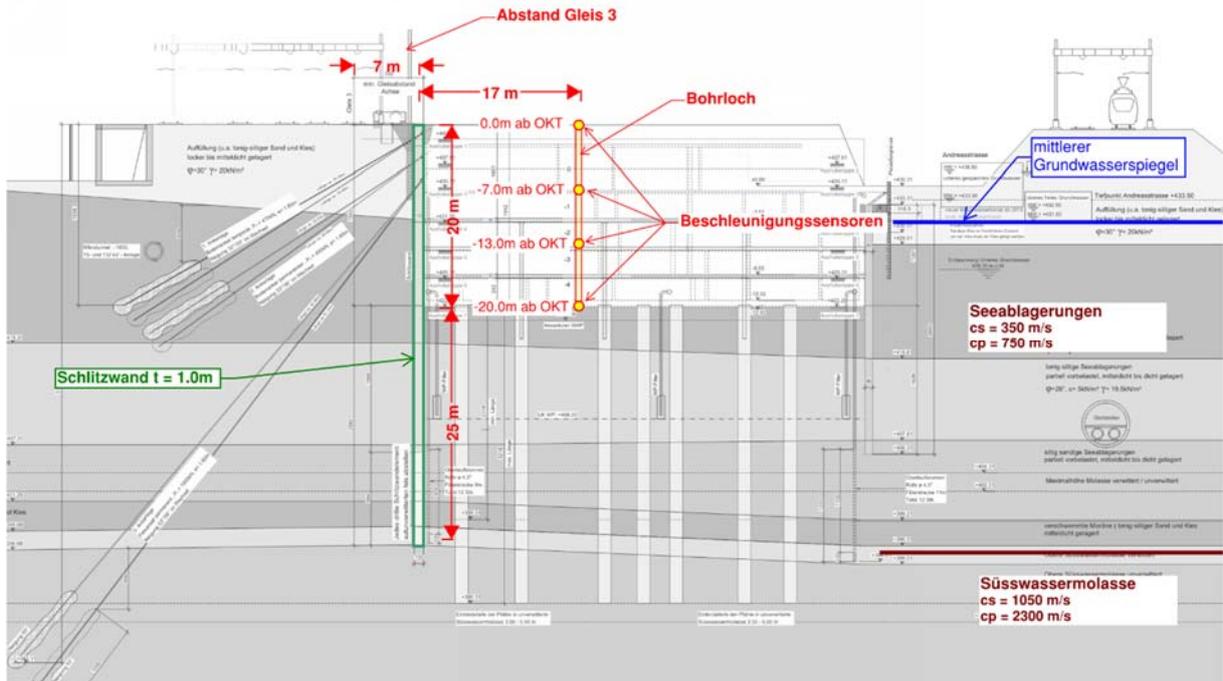


Bild 2.1 Schnitt durch die Baugrube mit der Schlitzwand und den in den beiden Bohrlochern eingebauten Sensoren. Plan: WaltGalmarini AG, Submissionsplan.

3 Messungen im Bohrloch

Die Erschütterungen infolge der Zugdurchfahrten wurden in vier unterschiedlichen Tiefen (0.0 m / -7.0 m / -13.0 m / -20.0 m) während 24 Stunden erfasst. Dazu wurden wasserdichte Beschleunigungsaufnehmer (PCB Modell 608A11) in 25m tiefe, verrohrte Bohrlocher eingebracht. Während dem Ziehen der Verrohrung wurde das Bohrloch mit Sand verfüllt und verdichtet. Spezielle Beachtung bedurfte der untere, stark gespannte Grundwasserspiegel als auch die vertikale Ausrichtung des Sensors im Bohrloch. Zudem musste die eingesetzte Technik so zuverlässig sein, dass sie mehr als 2 Jahre einwandfrei funktioniert. Dies ist die Zeitspanne zwischen Prognoseberechnung und Erstellung der Schlitzwand.

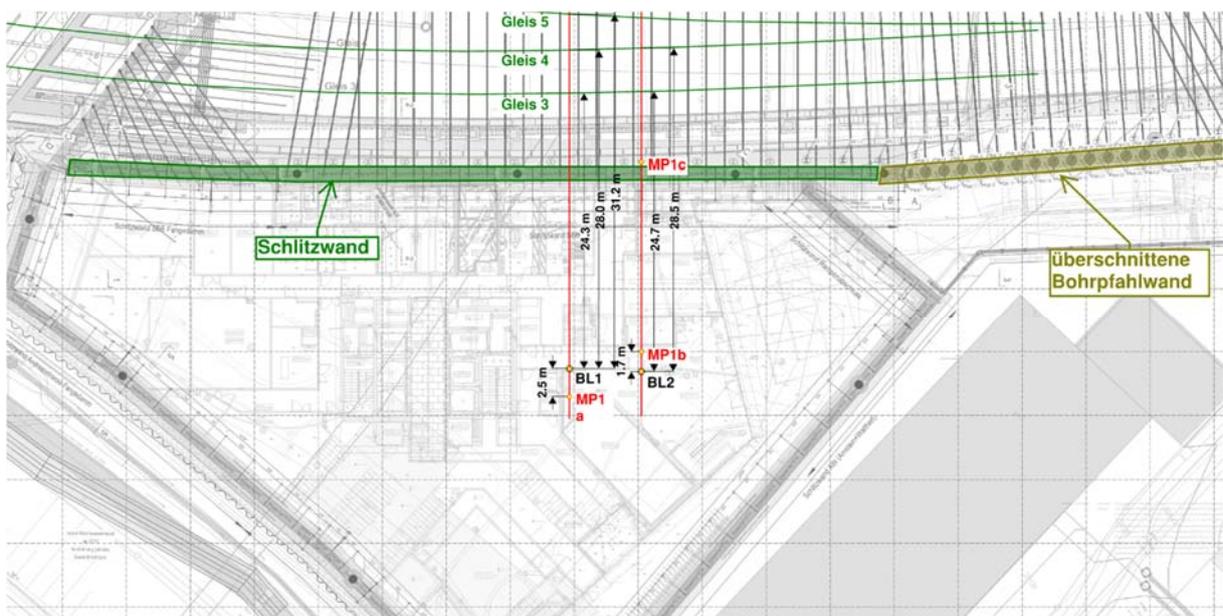


Bild 3.1 Situation der Baugrube mit den abgeteufte Bohrlochern und der Gleisanlage
Plan: WaltGalmarini AG, Submissionsplan.

Es interessiert unter anderem, wie die Erschütterungsamplituden bei unterschiedlichen Wellenlängen bzw. Frequenzen, mit unterschiedlicher Distanz Quelle – Empfänger und mit unterschiedlicher Tiefe im Boden sich verhalten. Dazu werden in einem ersten Schritt die einzelnen aufgezeichneten Zugfahrten den unterschiedlichen Gleisen zugeordnet und Gruppen gebildet. Diese Zuordnung erfolgt durch die zu den Erschütterungssignalen parallel aufgezeichneten Videos der vorbeifahrenden Züge. Von den einzelnen Gleisgruppen werden die über alle Züge gemittelten Terzbandspektren gebildet. In Bild 3.2 sind diese Spektren für die Gleise 3 und 6 abgebildet. Je Gleis konnten zwischen 60 und 120 Züge aufgezeichnet werden, womit sichergestellt ist, dass die gemittelten Spektren repräsentativ sind.

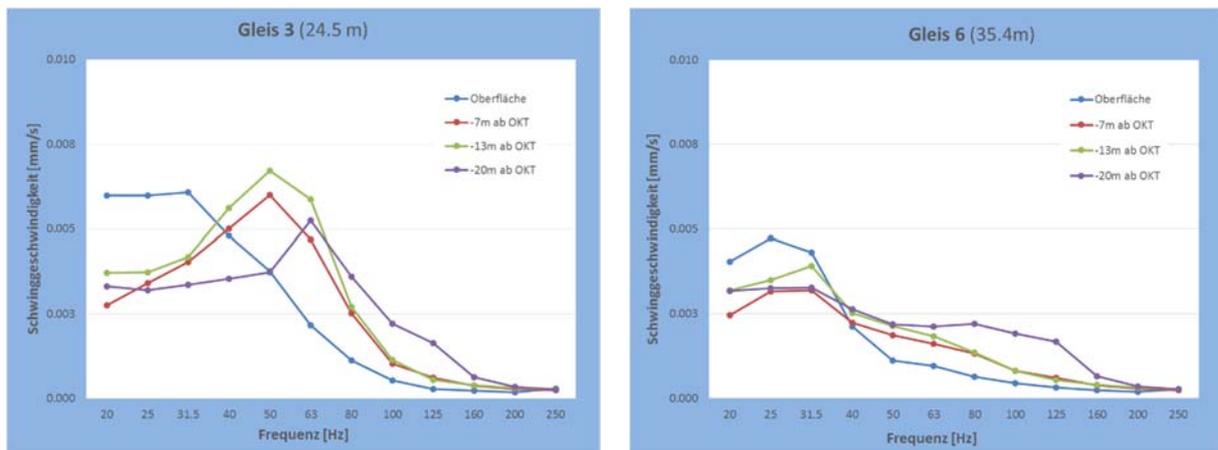


Bild 3.2 Gemittelte Terzbandspektren in den vier unterschiedlichen Tiefen.

Links: Mit Gleis 3 als Quelle, der horizontale Abstand zum Bohrloch beträgt 24.5 m.

Rechts: Mit Gleis 6 als Quelle, der horizontale Abstand zum Bohrloch beträgt 35.4m.

Da nicht davon auszugehen ist, dass auf allen Gleisen der gleiche Zugmix fährt und somit das gleiche Quellspektrum vorhanden ist, ist ein Vergleich nur innerhalb der in Bild 3.2 gezeigten Diagramme zulässig. Klar zu erkennen ist, dass Wellen mit tiefer Frequenz und somit entsprechend langen Wellenlängen an der Oberfläche im Vergleich zur Tiefe die höchsten Geschwindigkeitsamplituden aufweisen. Zwischen 40 Hz und 60 Hz kehrt dieses Verhältnis aber insofern um, dass die grössten Geschwindigkeitsamplituden in 20 m Tiefe registriert werden und an der Oberfläche die kleinsten Erschütterungsgeschwindigkeiten gemessen werden. Die Werte oberhalb von 100 Hz sind nicht aussagekräftig, da der Energieinhalt in den Signalen beschränkt ist.

Eine Interpretation dieser Messdaten im vorliegenden Fall ist nicht einfach. Folgende Gedanken dazu:

- In einem homogenen Halbraum erwartet man, dass sich der Grossteil der Energie der Wellen an der Oberfläche konzentriert (Rayleighwelle).
- Der vorliegende Baugrund ist jedoch stark geschichtet (wie typischerweise in der Schweiz), wobei die Unterschiede der Wellengeschwindigkeiten der oberen 40 m Seebodenlehm und der darunter liegenden Molasse erheblich sind. Daraus folgen Reflexionen an der Schichtgrenze und das Wellenbild wird durch Interferenzen geprägt. Zudem sind die sogenannten Schichtgrenzen keine scharfen Grenzen sondern verlaufen kontinuierlich.
- Eine Zugdurchfahrt dauert typischerweise mehrere Sekunden. Zudem werden die Wellen nicht von einem Punkt in den Boden ausgestrahlt, sondern von einer sich bewegenden Linienquelle. Dies und die oben erwähnten konstruktiven und destruktiven Interferenzen resultieren in einem kaum mehr nachvollziehbaren Wellenbild.

- Mit einem Abstand von 23 m – 35 m von der Quelle befinden wir uns für tiefe Frequenzen immer noch im Nahfeld der Erschütterungsquelle. Die Wellenbilder sind noch nicht so ausgeprägt, wie man dies aus der einfachen Theorie kennt.

Die somit einzig gesicherte Erkenntnis aus den Messungen ist, dass man an der Oberfläche nicht zwingend die höchsten Amplituden über alle Frequenzen erfasst. Um der ganzen Thematik etwas auf den Grund zu gehen, werden im folgenden Kapitel stark vereinfachte numerische Modelle der Wellenausbreitung vorgestellt. Diese Methodik wird im Folgenden auch angewandt um die Wirkung einer langen Schlitzwand zu quantifizieren.

4 Wellen im elastischen Boden

Wesentliche Aspekte zur Wellenausbreitung in elastischen Medien können zum Beispiel dem Beitrag von *Marcel Birchmeier* am 18. *Symposium für Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen, 2015 Dübendorf* entnommen werden. Die theoretischen Grundlagen sind in *Wave Motion in Elastic Solids* von *Karl F. Graff* ausführlich dokumentiert. Für komplexere, analytisch nicht mehr geschlossen lösbare Problemstellungen bedient man sich numerischer Methoden wie der Methode der Finiten Elemente, Randelement Methode oder der Methode der Finiten Differenzen. Im vorliegenden Beispiel kommt das Finite Element Packet *Plaxis3D* sowie ein eigens entwickelter Finite Differenzen Ansatz zur Anwendung.

Numerische Methoden zur Behandlung von Wellenausbreitungsphänomenen, wie die Methode der Finiten Differenzen, lösen die an Gitterpunkten linearisierten, dreidimensionalen Bewegungsgleichungen und die kinematischen Relationen in Verbindung mit den Stoffgesetzen auf einem engmaschigen Raum- und Zeitgitter (mit den Diskretisierungsparametern Δx und Δt). Zusammen mit Anfangs-, Rand- und Übergangsbedingungen wird ein (grosses) lineares Gleichungssystem zu einem Zeitpunkt $t = t_0$ aufgebaut. Die Lösung dieses Gleichungssystems stellt den Zustand des betrachteten Systems zu einem zukünftigen Zeitpunkt $t_1 = t_0 + \Delta t$ dar.

In der Anwendung numerischer Methoden sind stets Stabilitätsbedingungen zu berücksichtigen um hinreichend genaue Resultate zu erzeugen. In der örtlichen Diskretisierung stellt man fest, dass eine örtliche Abtastung von nur wenigen Gitterpunkten pro Wellenlänge eine grosse numerische Dispersion zur Folge haben kann, das heisst, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Wellen nicht korrekt abgebildet werden. Eine 20ig-fache Abtastung der kleinsten Wellenlänge ist empfehlenswert um einen hinreichend genauen Algorithmus zu erzeugen. Der andere kritische Wert ist die Grösse des Zeitschrittes Δt . Der maximale Zeitschritt ist abhängig von den elastischen Materialdaten, der Geometrie und den örtlichen Diskretisierungsparametern. Als anschauliches Kriterium für die Grösse des Zeitschrittes kann davon ausgegangen werden, dass die maximale „numerische“ Wellengeschwindigkeit grösser sein muss als die maximale physikalische Wellengeschwindigkeit.

$$\Delta t \leq \frac{\max(\|\Delta x\|)}{c_{\max}}$$

Wobei $\max(\|\Delta x\|)$ die Diagonale der grössten Gitterzelle darstellt und c_{\max} in der Regel die P-Wellengeschwindigkeit ist.

Die im Folgenden gezeigten Simulationen basieren auf zahlreichen Vereinfachungen. Dies sind insbesondere:

- Die Modelle sind 2 dimensional aufgebaut, dies aufgrund des sehr grossen Rechenaufwandes bei 3 dimensional Problemstellungen.

- Es wird von einem ebenen Verformungszustand ausgegangen. Die Erschütterungsquelle entspricht somit einer Linienquelle.
- Auf die Implementierung einer Materialdämpfung wurde verzichtet, da es nicht um einen Vergleich Realität – Simulation geht. Die Simulationen werden primär dazu verwendet, die Einflüsse von Einbauten in den Boden sichtbar und quantifizierbar zu machen.

Die folgenden Beispiele in Kapitel 4 sind mit der Geometrie und den Materialparametern aus Bild 2.1a berechnet, wobei der Molassefels auf -20m unter OK Terrain angeordnet ist. Als Anregung ist im 2D eine Punktquelle angesetzt, die dadurch realisiert wird in dem, dem Kontinuum in der Mitte der Oberfläche mechanische Spannungen oder Verschiebungen aufgezwungen werden. In den ersten Simulationen werden sogenannte Hansin-Pulse angesetzt. Es handelt sich dabei um monofrequente Sinusschwingungen mit 5 vollen Zyklen welche mit einem Hanning-Fenster überlagert ist. Der Vorteil solcher Pulse ist, dass die mechanische Energie in einem relativ engen Frequenzband konzentriert ist, was die Interpretation der Resultate doch erheblich vereinfacht. In Bild 4.1 ist ein solcher Puls und dessen Frequenzspektrum dargestellt.

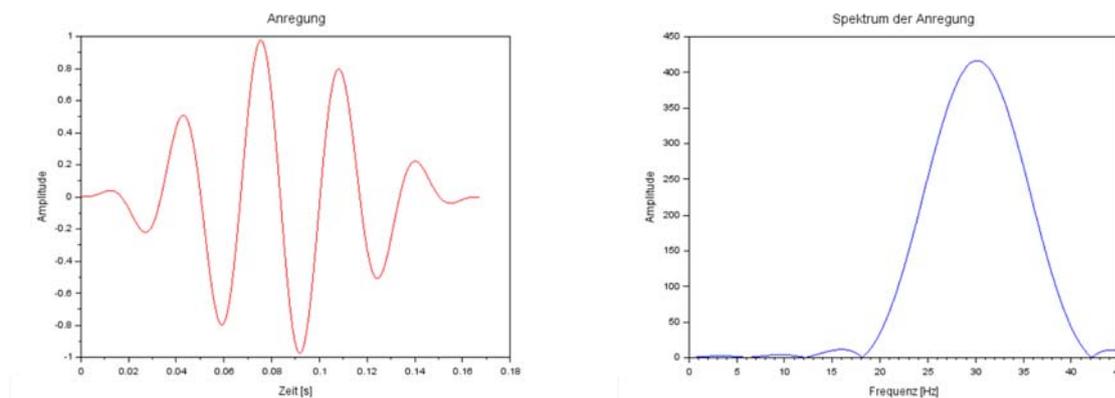


Bild 4.1 Links: Verwendeter Hansin-Puls mit einer zentralen Frequenz von 30 Hz.
Rechts: Frequenzspektrum des Hansin-Pulses.

Die Spannungen und Verschiebungen können in die unterschiedlichen Raumrichtungen und auch in unterschiedlicher örtlicher Variation aufgebracht werden. Um den Einfluss der Anregungsrichtung darzustellen, sind in den Bilder 4.2 bis 4.4 die Wellenbilder (Absolut-Betrag der Verschiebungen) nach 100 ms und 200 ms für reine vertikale Normal-Spannungsanregung, ein Schubspannungsanregung und eine vertikale Verschiebungsanregung auf der Oberfläche in der Mitte des simulierten Bereiches bei einer Mittelfrequenz von 30 Hz abgebildet.

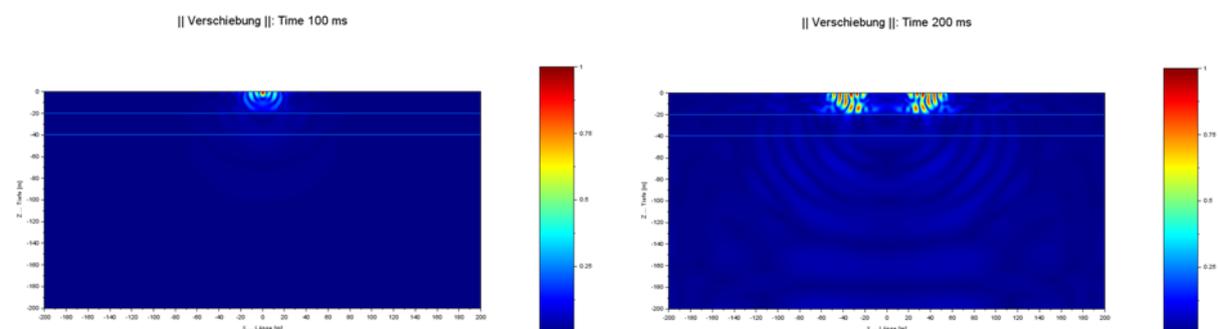


Bild 4.2 Verschiebungsbilder für eine vertikale Spannungsanregung bei 30 Hz.
Links: nach 100 ms. Rechts: nach 200 ms.

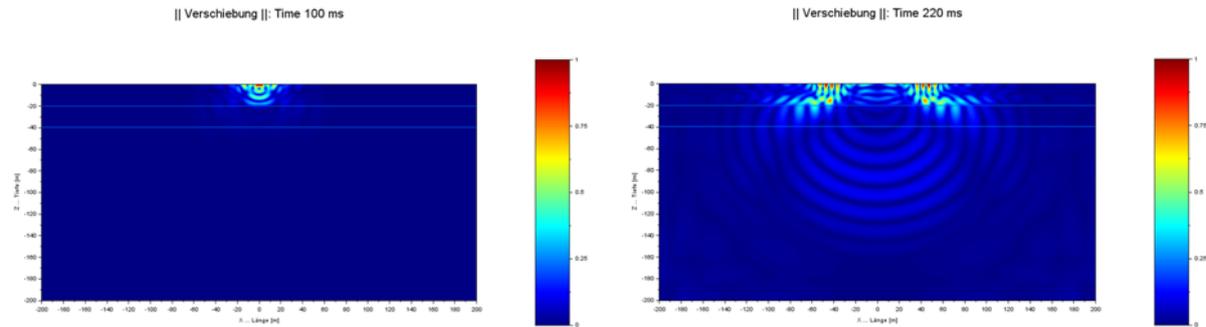


Bild 4.3 Verschiebungsbilder für eine Schubspannungsanregung bei 30 Hz.
Links: nach 100 ms. Rechts: nach 200 ms.

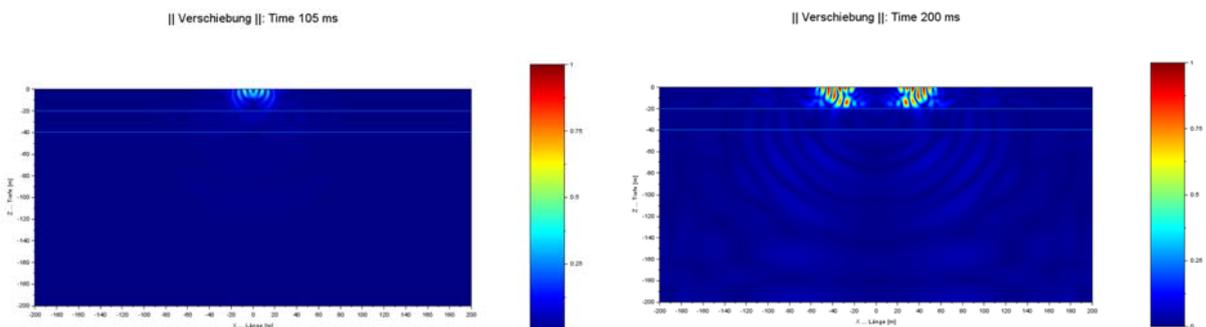


Bild 4.4 Verschiebungsbilder für eine vertikale Verschiebungsanregung bei 30 Hz.
Links: nach 100 ms. Rechts: nach 200 ms.

Die Bilder zeigen, was auch zu erwarten ist: Die Art der Einleitung der Erschütterungen in der Boden hat einen erheblichen Einfluss auf die Energieverteilung im Boden. In den Bildern sind die unterschiedlichen Wellenmoden (P-Welle, S-Welle und die Oberflächenwelle welche der Rayleigh-Welle entspricht) zu erkennen. Ausserdem kann die Reflexion an Schichtgrenzen und auch die Umwandlung der Moden an diesen Grenzen gut beobachtet werden. Diese Bilder zeigen die Komplexität der Wellenausbreitungsphänomene selbst in sehr einfachen Geometrien.

5 Simulationen mit Schlitzwand

Im Folgenden wird die in Bild 2.1 gezeigte Schlitzwand mit einer Stärke von 1.0 m und einer Tiefe von 40 m ins vorhergehende Modell eingefügt, die Schichtung des Bodens entspricht dem Bild 2.1.

5.1 Engbandige Anregung

Der Vergleich mit / ohne Schlitzwand wird gemacht indem Hansing-Pulse unterschiedlicher Frequenzen mit einer vertikalen Oberflächenspannung angeregt werden. Die Quelle ist, wie das Gleis 3 in Bild 2.1, in 7 m Distanz zur Schlitzwand angeordnet. Die Daten werden im Modell an den Punkten aufgezeichnet, wo die Sensoren der Messungen im Bohrloch lokalisiert sind, und somit im Kern des künftigen Gebäudes. Der horizontale Abstand zur Schlitzwand beträgt 24.5 m, die Zeitsignale der Simulationen werden auf den Tiefen - 0.0 m / - 7.0 m / - 13.0 m / - 20.0 m aufgezeichnet. Um einen ersten, qualitativen Eindruck zu erhalten ist in Bild 5.1 das Wellenbild auf der linken Seite mit Schlitzwand und auf der rechten Seite ohne Schlitzwand dargestellt. Der Einfluss der massiven Betonwand auf das Wellenbild ist in den Bildern qualitativ gut erkennbar.

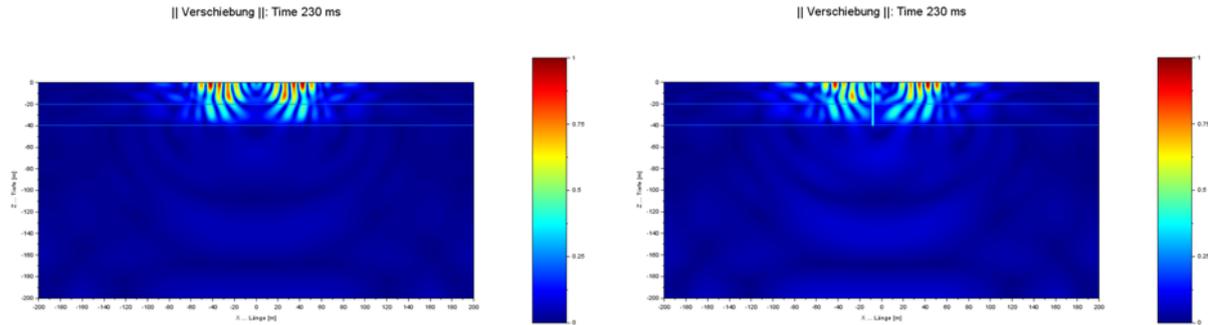


Bild 5.1 Verschiebungsbilder für eine vertikale Spannungsanregung bei 20 Hz.
Links: ohne Schlitzwand nach 230 ms.
Rechts: mit Schlitzwand nach 230 ms (die Schlitzwand ist als hellblauer vertikaler Strich dargestellt).

Um einen einfachen quantitativen Vergleich zu erhalten, werden bei den Messpunkten im Modell, die RMS-Werte der vertikalen Schwinggeschwindigkeiten über die aufgezeichneten Zeitsignale gebildet. In Bild 5.2 sind diese RMS-Werte für die einzelnen Frequenzen und die unterschiedlichen Tiefen für die beiden Situationen mit und ohne Schlitzwand abgebildet.

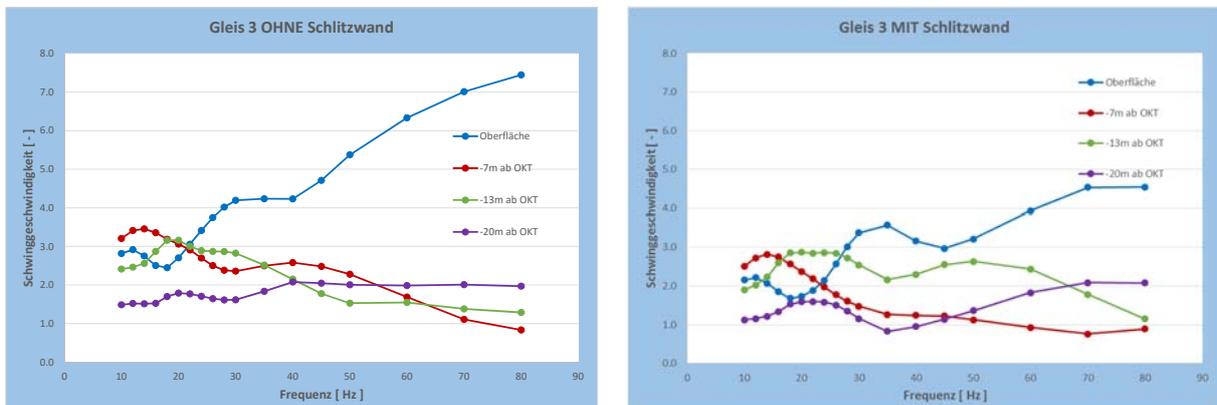


Bild 5.2 RMS-Werte der vertikalen Geschwindigkeiten aufgetragen über die simulierten Mittelfrequenzen für die unterschiedlichen Tiefen.
Links: ohne Schlitzwand. Rechts: mit Schlitzwand.

Beim Vergleich der beiden Diagramme ist zu erkennen, dass meist eine Abnahme der Schwinggeschwindigkeiten infolge der Schlitzwand zu verzeichnen ist. In gewissen Tiefen und bei einigen Frequenzen ist jedoch auch eine Zunahme der Schwinggeschwindigkeiten zu beobachten. In Tabelle 5.1 sind dazu die relativen Abnahmen / Zunahmen aufgelistet. Obwohl die Geometrie des untersuchten Bereiches als auch die eingetragene Anregungsfunktion einfach gehalten wurden, führt das Verhalten der Wellenfelder mit allen Interferenzen zu einem sehr komplexen Bild. Zu bemerken ist, dass die vier hier gewählten Punkte das Verhalten nur sehr lokal abbilden und somit nur einen Hinweis geben können wie das globale Verhalten effektiv ist.

Tabelle 5.1 Relative Abnahme (Zunahme) der RMS-Werte der Erschütterungen

	Oberfläche	-7m ab OKT	-13m ab OKT	-20m ab OKT
10 Hz	-23 %	-22 %	-21 %	-24 %
30 Hz	-19 %	-38 %	-10 %	-28 %
50 Hz	-40 %	-51 %	72 %	-32 %
70 Hz	-35 %	-32 %	29 %	4 %

5.2 Breitbandige Anregung

Eine typische Zugdurchfahrt dauert mehrere Sekunden und der Frequenzinhalt der Erschütterungen ist breitbandig. Die Dauer des Ereignisses bewirkt dass die Interferenzmuster noch komplexer und ausgeprägter sind, als im vorangegangenen Beispiel. Um einen Hinweis zu erhalten wie dies aussehen könnte und wie in diesem Falle der Einfluss einer Schlitzwand ist, wird der gemessene Zeitverlauf der vertikalen Schwinggeschwindigkeiten einer Zugdurchfahrt als Anregung des numerischen Modelles angesetzt.

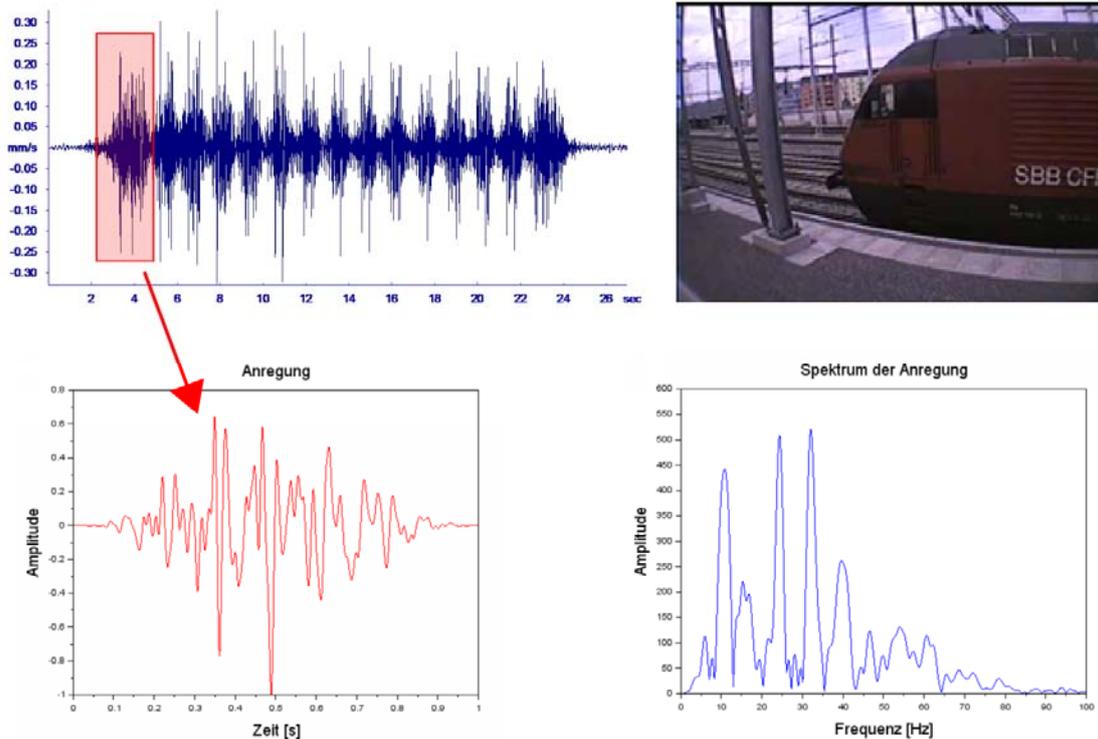


Bild 5.3 Aufbereitung des gemessenen Zeitsignales der Schwinggeschwindigkeiten infolge einer Zugdurchfahrt.

Da das Simulationsgebiet begrenzt ist und wir im Finite Differenzen Code keine nicht reflektierende Randbedingungen implementiert haben, wurde das Zeitsignal auf die Durchfahrt der Lokomotive, was einer Zeitdauer von einer Sekunde entspricht gekürzt. In Bild 5.2 ist das Vorgehen gezeigt, wobei das ausgeschnittene Signal mit einem Hanning-Fenster multipliziert wird. In Bild 5.4 sind die Wellenbilder für die beiden Situationen mit und ohne Schlitzwand zu einem Zeitpunkt 0.7 s nach Beginn der Anregung dargestellt.

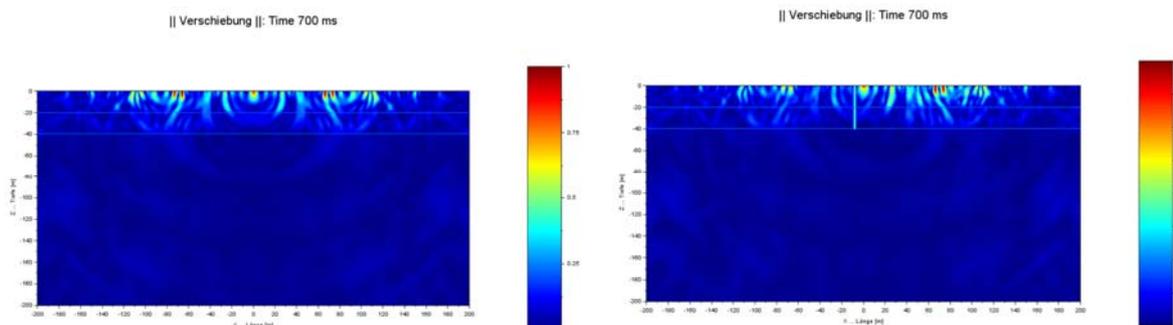


Bild 5.4 Verschiebungsbilder für eine vertikale Spannungsanregung für eine Zugdurchfahrt.
Links: ohne Schlitzwand nach 700 ms.
Rechts: mit Schlitzwand nach 700 ms.

Wie zu erwarten ist, sind in einem grösseren Abstand zur Quelle, die massgebenden Amplituden der Wellen an der Oberfläche konzentriert. Zu erwähnen ist auch, dass massgebende Amplituden bis in über 10 m Tiefe, vorhanden sind. Für erschütterungsdämmende Massnahmen, wie Bodenschlitze, bedeutet dies, dass sie bis in erhebliche Tiefen abgeteuft werden müssen, um neben der Reduktion des Körperschalls auch für tieffrequente Erschütterungen absorbierend zu wirken.

Neben der Implementierung im Finite Differenzen Modell ist das vorliegende Problem auch mit dem Finite Elemente Paket Plaxis3D modelliert worden. In Plaxis3D ist die Schlitzwand als Platte implementiert, also als ebene Struktur mit entsprechenden Steifigkeiten. Zudem sind die kürzesten Wellenlängen im Ort mit deutlich weniger als 20 Gitterpunkten abgetastet.

Bilder 5.5 und 5.6 zeigen die aufgezeichneten Schwinggeschwindigkeiten in vertikaler Richtung in einem Abstand von 24m zur Schlitzwand an der Oberfläche bzw. in einer Tiefe von -13 m ab OK-Terrain für die beiden Situationen (mit / ohne Schlitzwand) für die beiden numerischen Verfahren.

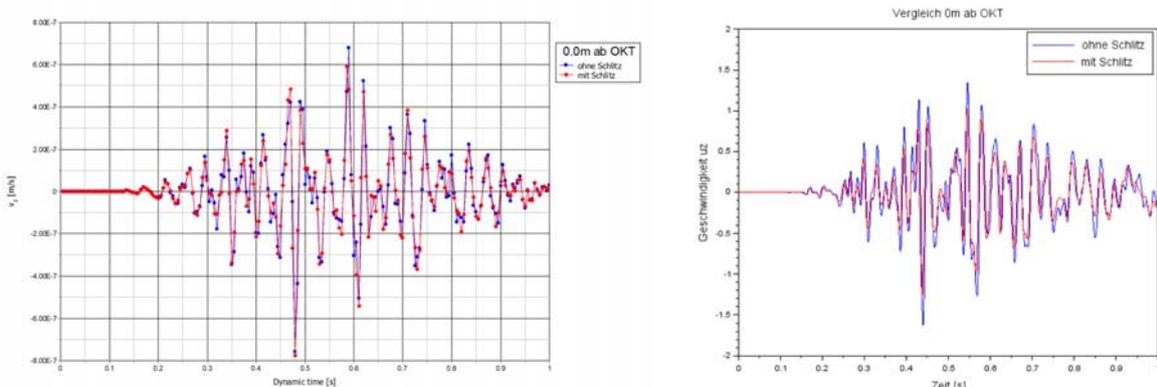


Bild 5.5 Simulierte vertikale Schwinggeschwindigkeiten an der Oberfläche, 24m von der Schlitzwand entfernt, während einer Zugdurchfahrt. Blau: ohne Schlitzwand. Rot: mit Schlitzwand. Links: Plaxis3D. Rechts: Finite Differenzen.

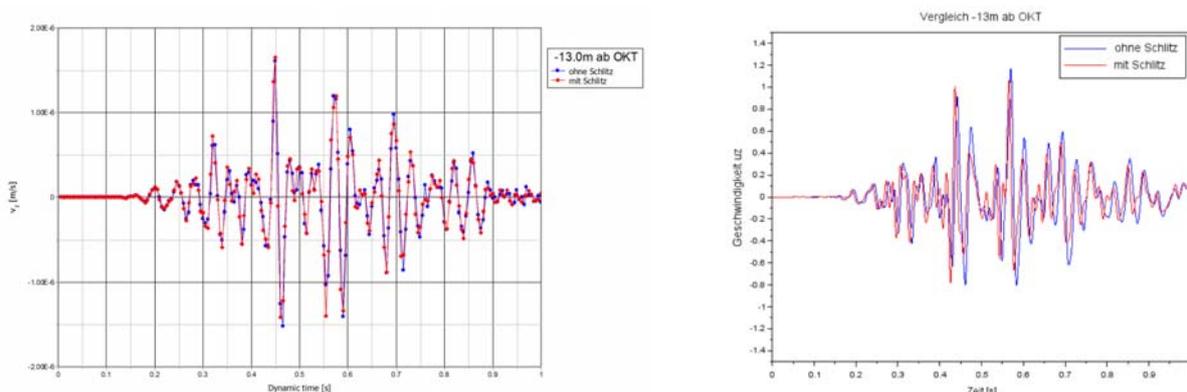


Bild 5.6 Simulierte vertikale Schwinggeschwindigkeiten -13m unter der Terrainoberfläche und 24m von der Schlitzwand entfernt, während einer Zugdurchfahrt. Blau: ohne Schlitzwand. Rot: mit Schlitzwand. Links: Plaxis3D. Rechts: Finite Differenzen.

Qualitativ sind die gezeigten Zeitsignale der beiden Simulationsarten ähnlich. Man stellt bei der Situation mit Schlitzwand eine Reduktion der Schwinggeschwindigkeiten fest. Die Reduktion ist etwas ausgeprägter im Falle der Finiten Differenzen Methode. In dieser Simulation ist auch zu beobachten, dass die Wellenpulse in der Situation mit Schlitzwand etwas früher ankommen als in der Situation ohne Schlitzwand. Dies ist auf die höhere Wellengeschwindigkeit

im Beton gegenüber dem anstehenden Boden zurück zu führen. In Tabelle 5.2 sind die Resultate in tabellarischer Form zusammen gefasst.

Tabelle 5.2 Relative Abnahme der RMS-Werte der Erschütterungen

	Oberfläche	-7m ab OKT	-13m ab OKT	-20m ab OKT
Plaxis3D	-4.3 %	-3.1 %	-2.7 %	-1.4 %
Finite Differenzen	-21.0 %	-23.8 %	-20.0 %	-4.7 %

Die Zahlen zeigen, dass mit einer leichten Reduktion der vertikalen Schwinggeschwindigkeiten gerechnet werden kann. In Plaxis3D beträgt die Reduktion maximal knapp 5 % während in Algorithmus der Finiten Differenzen dieser Reduktion etwa 20 % beträgt.

6 Zusammenfassung

Folgende Schlussfolgerungen können aus den oben beschriebenen Untersuchungen gezogen werden:

- Die Messungen der Erschütterungen infolge Zugdurchfahrten in den Bohrlöchern zeigen, dass je nach betrachteten Frequenzen und somit Wellenlängen die höchsten Schwinggeschwindigkeiten nicht zwingend an der Oberfläche auftreten müssen. Dies ist im Wesentlichen darauf zurück zu führen, dass es in geschichteten Böden (wie sie in der Schweiz typischerweise vorliegen) zu komplexen Interferenzmustern in den Wellenbildern kommt. Zudem befinden sich die, für die Erschütterungsproblematik relevanten Gebäude an Eisenbahnanlagen, für die tiefen Frequenzanteile noch im Nahfeld der Wellen emittierenden Quelle.
- Die numerischen Untersuchungen zeigen, dass die Wellenfelder im Boden sehr komplex sind und somit die an einzelnen Punkten gemessenen Erschütterungsamplituden, je nach Lage des Messpunktes, variieren. Im Wesentlichen resultieren diese Unterschiede aus der effektiven Art der Anregung (die bei jeder Zugdurchfahrt stark unterschiedlich ist) und aus den Überlagerungen von reflektierenden Wellen. Dies ist ein weiterer Hinweis darauf, dass Prognoseberechnungen von Erschütterungen in bahnnahe Gebäuden mit numerischen Methoden, auch mit sehr hohem Rechenaufwand, kaum vernünftig abgebildet werden können, da die Unbekannten in der Problemstellung schlicht zu gross sind. Zielführend ist hier der empirische Ansatz, welcher auf sehr vielen Messungen beruht, so dass auch die zu erwartenden Unsicherheiten quantitativ abgebildet werden können.
- Die numerische Untersuchung der Barriere-Wirkung einer massiven, tiefen und langen Schlitzwand auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Boden wurde in vereinfachten Modellen untersucht. Die Untersuchungen geben Hinweise darauf, dass verglichen mit der Situation ohne Schlitzwand lediglich Amplitudenreduktionen im Bereich von 20 % zu erwarten sind. Gesicherte Resultate, basierend auf reellen Messungen, erwarten wir in kurzer Zeit, nach Fertigstellung der hier untersuchten Wand.