

Möglichkeiten und Grenzen bei der Simulation von Bodendynamik-Problemen

1 Einleitung

Seit bald 50 Jahren sind wir in der Lage Schwingungsprobleme im Bauwesen mit Computerprogrammen zu simulieren. Das Geheimnis hinter diesen Simulationen ist die Auflösung der zu untersuchenden Strukturen in einzelne Stäbe, Platten und Würfel. Das Vorgehen ist ähnlich wie beim Ein-Massen-Schwinger. Beim Ein-Massen-Schwinger ist eine Differentialgleichung in der Form von $M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = P(t)$ zu lösen, d.h. mit der Masse, der Dämpfung, der Federsteifigkeit und der Belastung können wir den Schwingungsverlauf bestimmen. Beim FE-Programm wird bereits für ein einfaches Stabelement – anstelle der Federsteifigkeit – eine 6×6 – Steifigkeitsmatrix verwendet. Für ein ganzes Gebäude ergibt sich dann schnell einmal eine Matrixgleichung mit Zehntausenden von Zeilen. Dazu kommt, dass dieses Gleichungssystem nicht nur einmal, sondern für jeden Zeitschritt neu zu lösen ist, sodass z.B. für ein Erdbeben von 20 Sekunden Dauer und einer Schrittlänge von 0.01 Sekunden bereits 2000 Berechnungen durchzuführen sind.

Für Bauwerke lassen sich solche Berechnungen problemlos durchführen. Die heutigen PC's mit ihren leistungsfähigen Prozessoren kommen damit noch nicht an ihre Grenzen. Schwierig wird es erst bei der Simulation von Schwingungsproblemen, bei denen nicht nur das Bauwerk selbst sondern auch der umgebende Boden berücksichtigt werden sollte. Das Bauwerk hat eine begrenzte Ausdehnung und mit etwas Geschick lässt sich die Anzahl Elemente in einem sinnvollen Rahmen halten. Der Boden hingegen ist ein unbegrenztes Medium, weshalb wir eigentlich eine unendliche oder zumindest eine sehr grosse Anzahl von Elementen für eine gute Simulation brauchen.

Das Angebot an kommerziell erhältlichen Computerprogrammen für die Simulation von dynamischen Vorgängen im oder auf dem Boden ist auch heute noch recht beschränkt. Ein recht weit verbreitetes Produkt ist das Programm PLAXIS, das eine 3-D-Simulation von Schwingungsvorgängen von Tragstruktur und Baugrund erlaubt. Im vorliegenden Beitrag versuchen wir die Möglichkeiten und Grenzen dieses Programmes etwas aufzuzeigen.

2 Modellbildung

Die Modellbildung ist das zentrale Thema bei der Beurteilung von FE-Berechnungen. Dabei geht es einerseits um die Modellierung der Geometrie, d.h. um den sichtbaren Teil der zu untersuchenden Struktur, andererseits um die Modellierung des Deformationsverhaltens, d.h. um die Materialgesetze. In beiden Punkten unterscheiden sich FE-Programme für Bauwerke ganz entscheidend von FE-Programmen für den Boden.

2.1 FE-Programme für Tragwerke

Bei Tragwerken wie bei der Fussgängerbrücke über die Verzasca genügt ein klassisches FE-Programm (siehe Bild 2.1 und 2.2). Stahlrohre und Stahlträger werden als Stabelemente und der Fahrweg als Platten modelliert. Das Materialverhalten ist linear-elastisch, sodass sich keine be-

sonderen Probleme bei der Berechnung der Eigenfrequenzen ergeben. Die Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Eigenfrequenzen ist in solchen Fällen in der Regel auch sehr gut. Die Schwierigkeiten liegen vielmehr in der Eingabe der Dämpfung und in der Definition der Belastung. Dies ist allerdings nicht eine Unzulänglichkeit des FE-Programmes, sondern liegt vielmehr am unvollständigen Wissen des Ingenieurs.

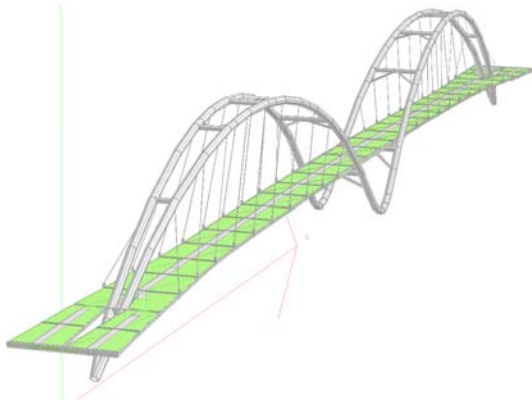


Bild 2.1 FE-Modell der Brücke über die Verzasca (TI)



Bild 2.2 Fertige Brücke

2.2 FE-Programme für den Baugrund

Im Gegensatz zu Tragwerken ist der Boden ein unbegrenztes Medium. Die eingetragene Schwingungsenergie bleibt nicht in der Tragstruktur eingeschlossen sondern wandert in alle Richtungen und verlässt den betrachteten Bereich. Dies ist durch eine entsprechende Modellierung der Ränder zu berücksichtigen. Der zweite Punkt, in welchem sich der Boden doch ganz wesentlich von Tragstrukturen unterscheidet, ist sein Materialverhalten. Während bei Stahl und Beton primär das lineare Verhalten von Bedeutung ist, gelangen wir beim Boden sehr schnell in den nicht-linearen Bereich. Ein FE-Programm für die Simulation von dynamischen Vorgängen im Boden sollte deshalb in der Lage sein, die Unbegrenztheit des Bodens und das nicht-lineare Verhalten nachzubilden. Im Folgenden wird kurz aufgezeigt, wie diese Problematik im Programm PLAXIS angegangen wird.

2.2.1 Dynamische Bewegungsgleichung

PLAXIS verwendet die gleiche Formulierung wie sie auch für Tragwerke verwendet wird, d.h.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = P(t) \quad (2.1)$$

Dabei stellt M die Massenmatrix, C die Dämpfungsmatrix, K die Steifigkeitsmatrix, P den Lastvektor und x den Verschiebungsvektor dar. Die Massenmatrix M umfasst die Masse des Bodens, die Masse des Wassers und falls vorhanden die Masse der Tragstruktur.

Die Matrix C berücksichtigt die Materialdämpfung des Bodens und der Tragstrukturen. PLAXIS verwendet die Rayleigh-Dämpfung, in welcher die Dämpfung als Funktion der Massenmatrix und der Steifigkeitsmatrix angegeben wird. Die dabei verwendeten Parameter lassen sich allerdings nicht experimentell bestimmen. Auf diese Problematik wird weiter unten noch eingegangen.

2.2.2 Bodenmodelle

Für die Simulation von bodendynamischen Vorgängen stehen zwei Bodenmodelle im Vordergrund: das *linear-elastische Modell* und das *nichtlinear-elastische Modell mit dehnungsabhängiger Steifigkeit und Dämpfung*. Steifigkeit und Dämpfung zeigen beim Baugrund – wie in Bild

2.3 und 2.4 dargestellt – ein ausgesprochen nicht-lineares Verhalten. Solange sich die Schubdehnung im Bereich von Promillen bewegt, bleibt die Steifigkeit praktisch unverändert. Dasselbe gilt auch für die Dämpfung. Dies bedeutet, dass in diesem Dehnungsbereich, der übrigens für viele baulastdynamische Aufgaben wie z.B. die Schwingungsberechnung für ein Maschinenfundament, der einzige akzeptierte Bereich ist, von einem linear-elastischen Verhalten des Bodens ausgegangen werden darf. Bei der Untersuchung von „lokalen Bodeneffekten“ im Rahmen von Erdbebeneberechnungen hingegen sind Dehnungen im Promille- bis Prozentbereich durchaus möglich, weshalb hier die Dehnungsabhängigkeit explizit berücksichtigt werden muss.

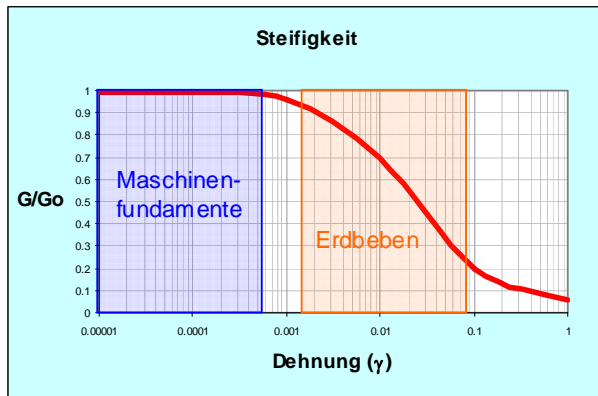


Bild 2.3 Schubsteifigkeit in Funktion der Schubdehnung

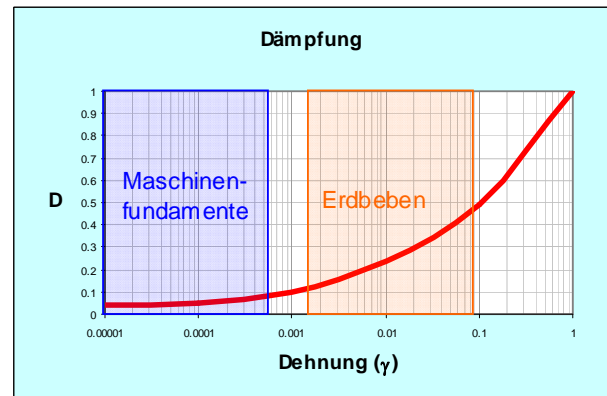


Bild 2.4 Dämpfung in Funktion der Schubdehnung

2.2.3 Viskose Ränder

Bei statischen Problemen des Baugrundes genügt es, die Ränder des betrachteten Bodenbereichs soweit nach aussen zu schieben, bis sie keinen signifikanten Einfluss mehr haben. Bei dynamischen Problemen funktioniert das nicht. Wegen der Reflexion der Wellen an starren Rändern müsste man die Ränder soweit nach aussen schieben, dass der Rechenaufwand für ein solches Modell viel zu gross würde. Man behilft sich deshalb mit sogenannten „absorbierenden“ Rändern, welche die Reflexion von Wellen weitgehend unterdrücken. Anstelle eines starren Randes werden Dämpfungselemente eingebaut. Sobald die Spannung am Rand wächst, bewegt sich das Dämpfungselement und sorgt dafür, dass die Welle nicht reflektiert wird. Kompressionswellen lassen sich auf diese Weise sehr gut absorbieren. Hingegen ist bei Scherwellen immer noch ein gewisser Randeffect zu beobachten.

3 Grundaufgaben

Um die Möglichkeiten und Grenzen eines FE-Programmes auszuloten, wird man sicherlich als erstes einige einfache Grundaufgaben simulieren und die Ergebnisse mit den theoretischen Lösungen vergleichen. Aber da beginnen bereits die Schwierigkeiten. Bereits bei den einfachsten Grundaufgaben fehlen in der Baugrunddynamik oft theoretisch exakte Lösungen. Trotzdem sollen im Folgenden einige Grundaufgaben der Bodendynamik vorgestellt werden. Anhand dieser Grundaufgaben wollen wir sehen, wie weit die Simulation mit dem FE-Programm PLAXIS mit den klassischen Lösungen übereinstimmt.

3.1 Maschinenfundament auf elastischem Halbraum

3.1.1 Klassische Lösung (1-Massenschwinger-Analogie)

Das dynamische Verhalten eines starren Blockfundamentes lässt sich – wie in Bild 3.1a und b dargestellt – durch ein einfaches Feder-Dämpfer-System approximieren. Die Bewegungsgleichung für ein vertikal schwingendes Fundament ist damit identisch mit der Bewegungsgleichung eines Ein-Massen-Schwingers, d.h. es gilt:

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = P(t) \quad (3.1)$$

wobei die Koeffizienten k und c aufgrund der Fundamentgrösse r und der Baugrundparameter G (Schubsteifigkeit), ν (Querdehnungszahl) und ρ (spezifische Masse des Bodens) bestimmt werden.

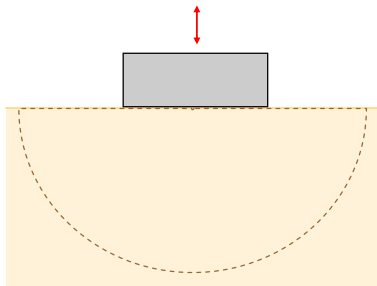


Bild 3.1a Fundamentblock auf elastischem Halbraum

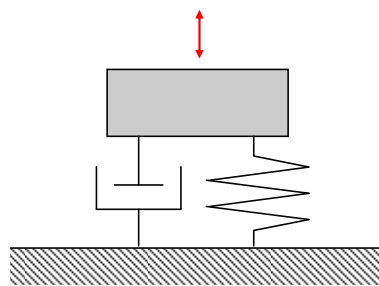


Bild 3.1b Ein-Massen-Schwinger als Ersatzsystem für den Fundamentblock auf elastischem Halbraum

Steifigkeit:	$\frac{4Gr}{1-\nu}$
Massenverhältnis \bar{B} :	$\frac{m(1-\nu)}{4\rho r^3}$
Dämpfungs-Verhältnis D :	$\frac{0.425}{\sqrt{\bar{B}}}$
Fiktive zusätzliche Masse:	$\frac{0.27m}{\bar{B}}$

Bild 3.1c Parameter für die Vertikalschwingung des starren Fundamentes

In Bild 3.1c sind die Parameter für die Vertikalschwingung des starren Fundamentes zusammengestellt. Die Steifigkeit ist dabei identisch mit den Steifigkeiten des statischen Falles, der Koeffizient für die Dämpfung entspricht der Dämpfung im Resonanzbereich. Die effektive Masse m berechnet sich, indem man zur Masse des Fundamentes eine zusätzliche fiktive Masse addiert.

In Tabelle 3.1 sind die wichtigsten Ergebnisse der klassischen Berechnung zusammengestellt. Die Parameter, die sich leicht mit den Ergebnissen von PLAXIS vergleichen lassen, sind die Schwingungsamplitude des Fundamentblockes bei verschiedenen Anregungsfrequenzen und die Wellenlänge der Schwingungen an der Bodenoberfläche.

Tab. 3.1 Maschinenfundament auf elastischem Halbraum

Eigenschaften:		Steifigkeit und Masse:	
$r =$	0.51 m	$K =$	54601 kN/m
$M =$	0.5 t	$M_r =$	0.33418
$r_0 =$	2 t/m ³	$D =$	0.74
$v_s =$	97 m/s	$M_d =$	0.4 t
$\nu =$	0.3	$M_{tot} =$	0.9 t
$G =$	18818 kN/m ²	$f_0 =$	39.1 Hz
Belastung:		Schwingungsamplitude:	
$P =$	8 kN	$d_{dyn} =$	0.14590 mm
$f =$	8 Hz	$d_{stat} =$	0.14652 mm
		$\lambda =$	12.1 m

Die Schwingungsamplitude beträgt – wie man aus Tabelle 3.1 entnehmen kann – 0.15 mm und die Wellenlänge liegt mit Wellengeschwindigkeit von 100 m/s und einer Anregung von 8 Hz bei 12 m.

3.1.2 FE-Berechnung mit PLAXIS

Modelliert wird – wie in Bild 3.2 dargestellt – ein Bodenbereich von 40 m x 40 m mit einer Tiefe von 10 m mit einer kreisförmigen Platte in der Mitte. Da es sich um ein achsensymmetrisches Problem handelt, genügt die Modellierung eines Viertels dieses Bereiches. Die äusseren Begrenzungen, d.h. X_{\max} , Y_{\max} und Z_{\min} , werden als viskose Ränder eingegeben. Die Platte mit einer Stärke von 0.2 m weist einen Radius von 0.5 m auf. Sie wird durch eine gleichmässig verteilte, vertikale harmonische Kraft belastet.

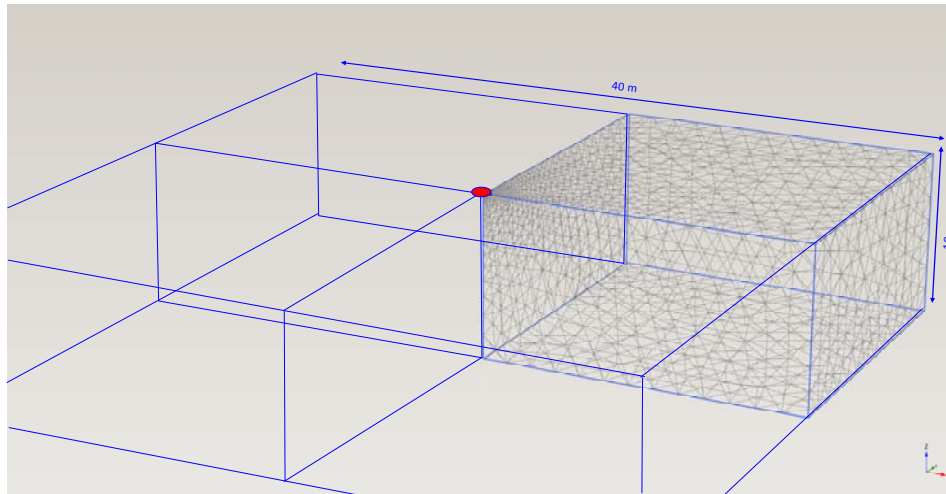


Bild 3.2 FE-Modell für ein starres Fundament auf dem elastischen Halbraum

Die Bilder 3.3 und 3.4 zeigen die Ergebnisse für 8 und 16 Hz Anregung. Die Wellen werden durch das FE-Modell schön abgebildet und auch die Schwingungsverläufe sehen plausibel aus.

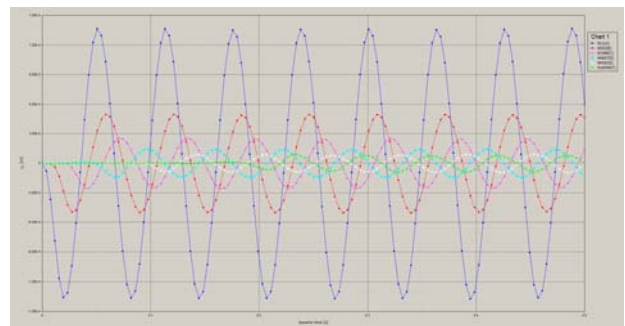
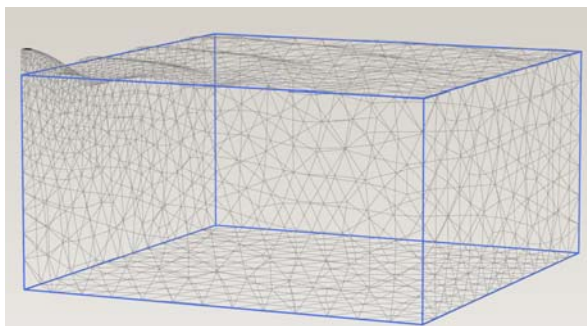
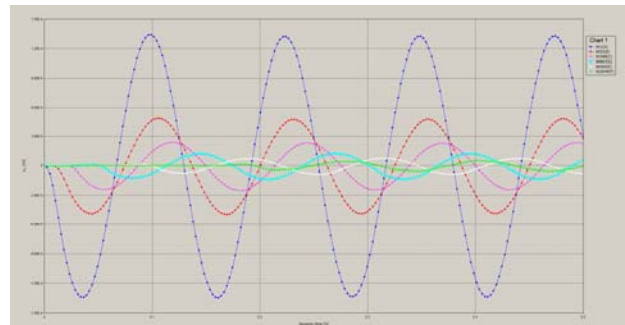
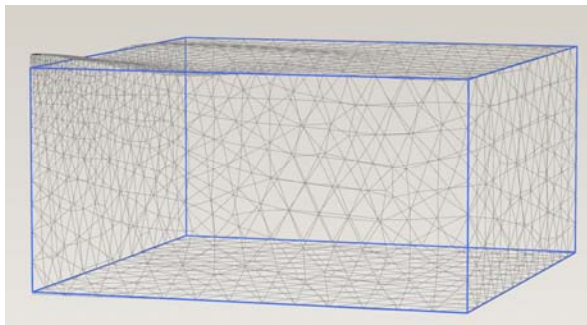


Bild 3.3 FE-Modell bei Anregung mit 8 und 16 Hz

Bild 3.4 Schwingungsverlauf für 6 Punkte auf der X-Achse ($X = 0$ m, 1 m, 2 m, 4 m, 8 m, 16 m)

Für die Berechnung mit einer Anregung von 64 Hz zeigt sich, dass die Standard-Netzeinteilung nicht ausreicht. Es muss – wie in Bild 3.5 dargestellt – auf eine feinere Netzeinteilung gewechselt werden, damit die Wellen noch korrekt erfasst werden. Damit ergeben sich allerdings schon die ersten Überraschungen bei den Wartezeiten. Statt der Rechendauer von 5 Minuten muss man

nun schon eine halbe Stunde auf die Ergebnisse warten. Wählt man noch eine feinere Netzeinteilung, stösst ein PC an seine Grenzen.

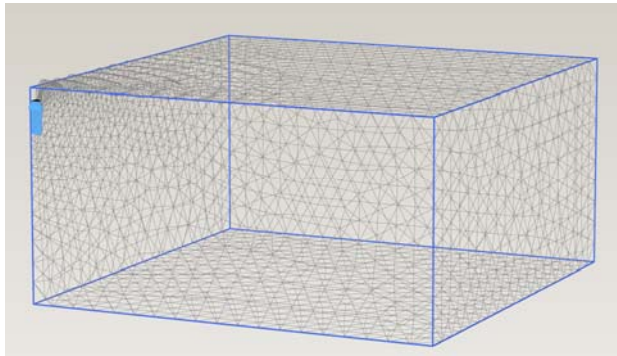


Bild 3.5 FE-Modell mit feinerer Netzeinteilung für Anregung mit 64 Hz

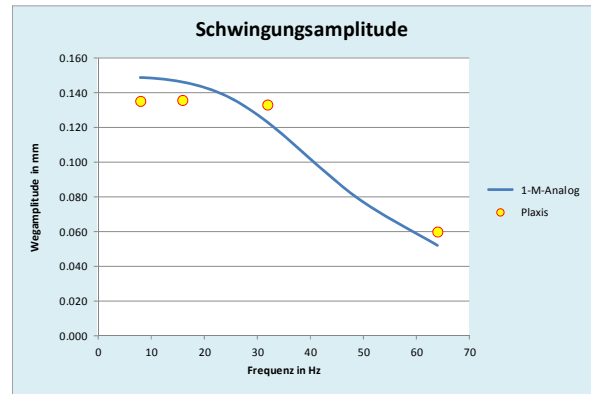


Bild 3.6 Vergleich der Ergebnisse des FE-Modells mit der klassischen Lösung

Die Ergebnisse der FE-Berechnung mit PLAXIS stimmen sehr gut mit den klassischen Berechnungen überein. Wie man in Bild 3.6 sieht, ergibt sich mit der Ein-Massen-Schwinger-Analogie eine maximale Schwingungsamplitude von 0.15 mm, die mit zunehmender Anregungsfrequenz abnimmt und bei 64 Hz noch 0.06 mm beträgt. Die FE-Berechnung mit PLAXIS ergibt praktisch die gleichen Ergebnisse.

3.2 Abminderungsverhalten im Frei-Feld

Mit dem nächsten Beispiel wollen wir das Abminderungsverhalten der Wellen im Frei-Feld untersuchen. Dieses wird bekanntlich einerseits durch die geometrische Dämpfung und andererseits durch die Materialdämpfung des Bodens bestimmt. Als Referenz wählen wir Messungen bei einer Impulsanlage und Messungen neben Eisenbahngleisen.

3.2.1 Messungen

Mit der Impulsanlage von Bild 3.7 kann man eine Masse von 150 kg aus 2 m fallen lassen. Die Messungen (dargestellt in Bild 3.9) zeigen, dass die Abminderung der Schwingungsamplituden einem einfachen exponentiellen Gesetz folgt und dass der Abminderungsexponent zwischen 1.4 und 1.5 liegt. Dabei ist zu beachten, dass die dominanten Frequenzen hier im Bereich von 20 bis 25 Hz lagen.



Bild 3.7 Impulsanlage: M = 150 kg, H = 2 m

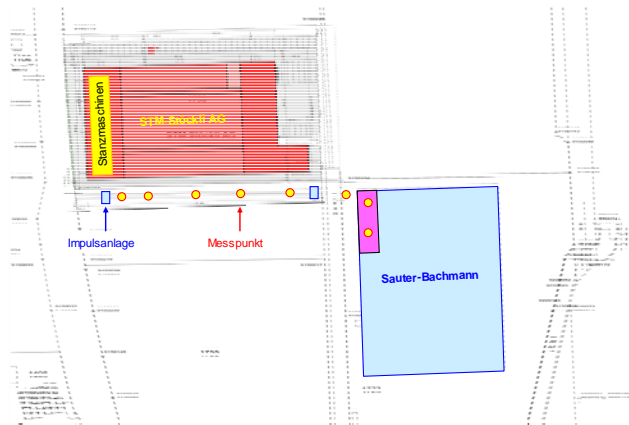


Bild 3.8 Lage der Impulsanlage und der Messpunkte

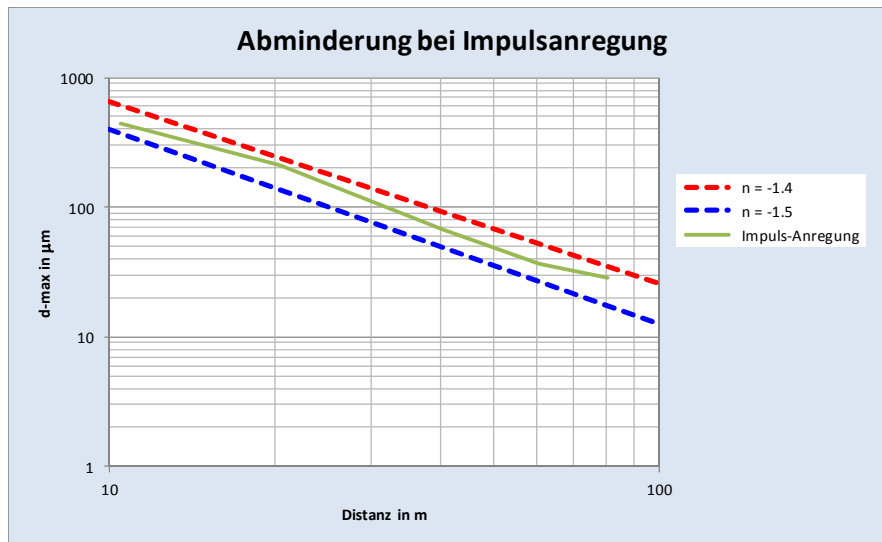


Bild 3.9 Gemessene Abminderung bei Impulsanregung

Bei Linienquellen, wie sie z.B. bei Eisenbahnlinien vorliegen, sind die Abminderungsexponenten kleiner. Messungen zeigen, dass hier die Exponenten zwischen 0.5 und 2 liegen, wobei sich eine starke Frequenzabhängigkeit bemerkbar macht. Diese kommt durch die Materialdämpfung zustande, die gerade bei höheren Frequenzen stärker in Erscheinung tritt.

3.2.2 FE-Berechnung mit PLAXIS

Für die Untersuchung des Abminderungsverhaltens im Boden mit PLAXIS wurde das gleiche Modell verwendet wie in Kapitel 3.1.2. Die Anregung erfolgt als harmonische Anregung auf einer kreisförmigen Platte bei 8, 16, 32 und 64 Hz. In einem ersten Durchgang wurde die Materialdämpfung im Boden zu Null gesetzt, sodass nur geometrische Dämpfung vorhanden war. Erwartungsgemäss lag das Abminderungsverhalten bei allen 4 Frequenzen etwa im gleichen Rahmen und zeigte einen Abminderungsexponenten zwischen 0.7 und 1.0 (siehe Bild 3.12).

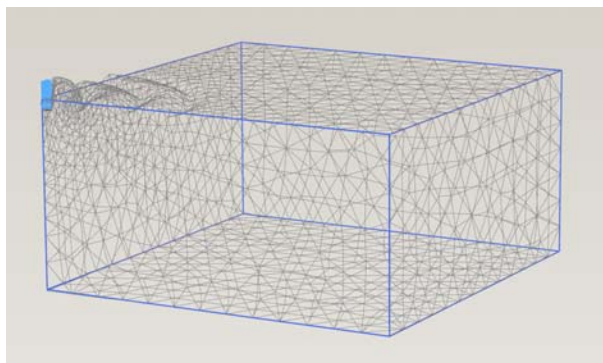


Bild 3.11 FE-Modell bei Anregung mit 32 Hz

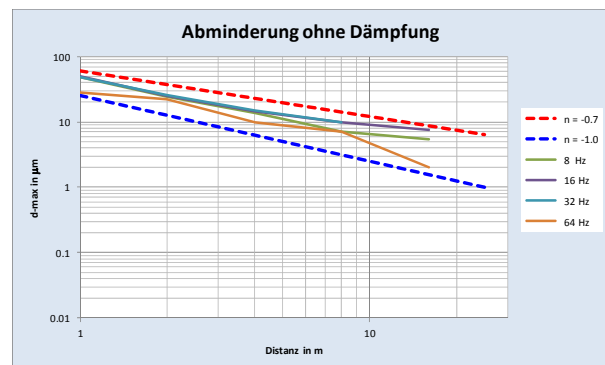


Bild 3.12 Abminderungsverhalten ohne Materialdämpfung bei verschiedenen Frequenzen

Für den zweiten Berechnungsdurchgang wurde die Materialdämpfung eingeführt, was im Fall von PLAXIS so viel bedeutet, dass man an den beiden Dämpfungsparametern der Rayleigh-Dämpfung so lange schraubt, bis die Ergebnisse plausibel aussehen. Eine exakte Bestimmung der Dämpfungsparameter existiert nicht.

In unserem Beispiel haben wir die Dämpfung zwischen 10 und 50 Hz auf 5 bis 15 % eingestellt (siehe Bild 3.13) und damit die Ergebnisse von Bild 3.14 erhalten. Die Ergebnisse sehen nun vernünftig aus mit starker Abminderung bei 64 Hz und geringer Abminderung bei 8 und 16 Hz. Der Weg, der dazu geführt hat, ist allerdings nicht restlos überzeugend.

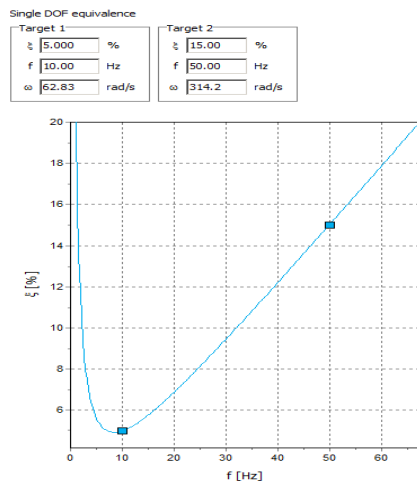


Bild 3.13 Definition der Materialdämpfung im Programm PLAXIS

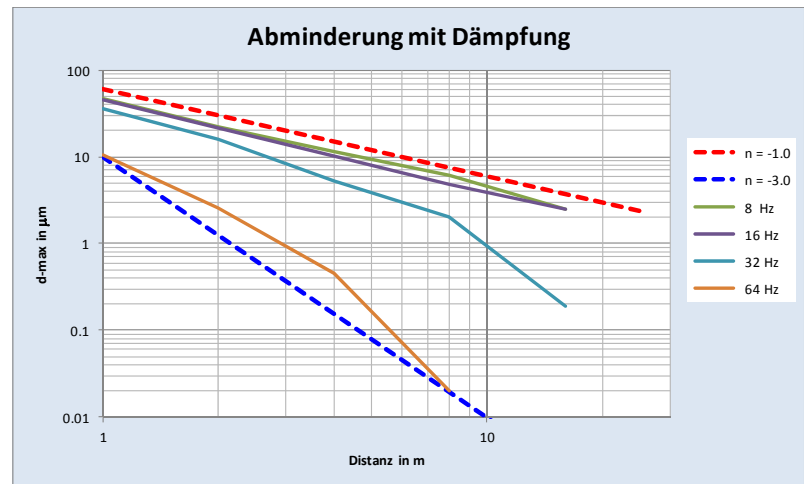


Bild 3.14 Abminderungsverhalten mit Materialdämpfung bei verschiedenen Frequenzen

3.3 Impulsanregung auf elastischem Halbraum

Die Impulsanregung des vorangehenden Beispiels kann natürlich auch dazu verwendet werden, um zu prüfen, ob ein FE-Programm wie PLAXIS in der Lage ist, die von einem Impuls erzeugten Bodenwellen zu simulieren. Als Kenngrösse der Belastung wählen wir die Impulsstärke und als Vergleichskriterium die maximale Schwinggeschwindigkeit.

3.3.1 Messung

Bild 3.15 zeigt die Erschütterungsaufzeichnungen und die zugehörigen Amplitudenspektren an den verschiedenen Messpunkten für einen Schlag der Impuls-Anlage. Der Impuls erzeugt einen Ausschwingvorgang, der nach ca. 0.3 Sekunden abgeklungen ist. Die Hauptfrequenzen liegen zwischen 20 und 25 Hz.

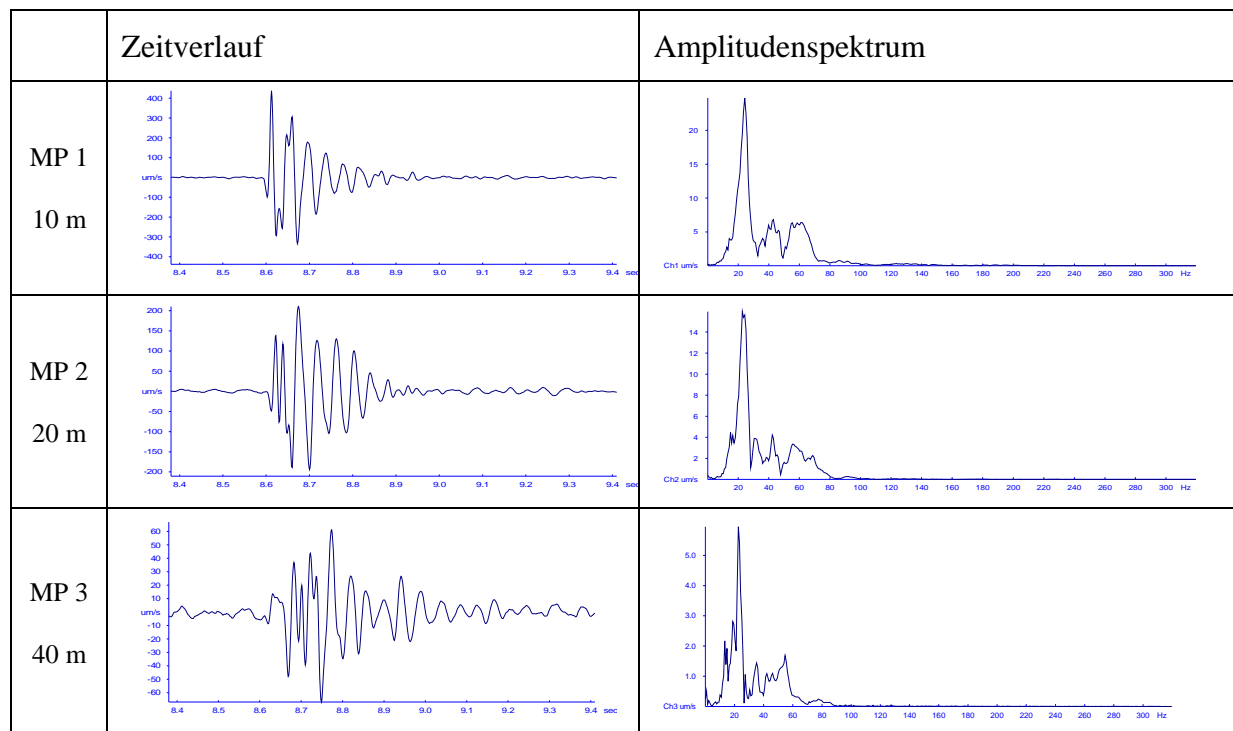


Bild 3.15 Zeitverlauf und Amplitudenspektren bei Impulsanregung

3.3.2 FE-Berechnung mit PLAXIS

Als Impuls wurde eine halbe Sinus-Welle mit 12.5 ms und 25 ms Dauer gewählt (siehe Bild 3.16). Die Wahl dieser Impuls-Form ist sicherlich arbiträr, denn die genaue Form des Impulses in der Versuchsanlage (Bild 3.7) ist nicht bekannt.

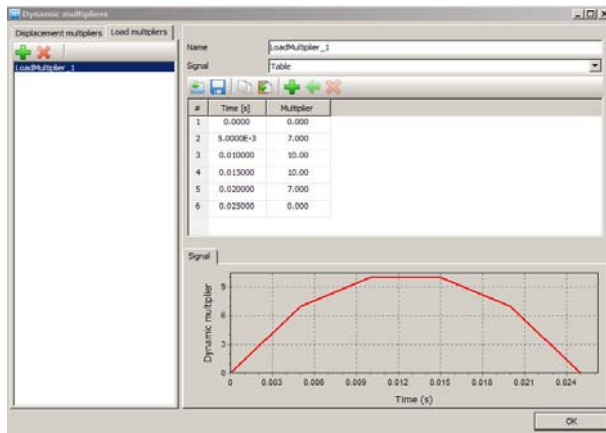


Bild 3.16 Definition der Belastung im Programm PLAXIS

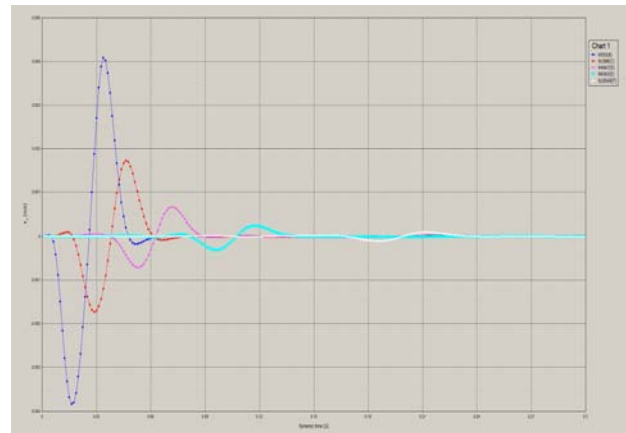


Bild 3.17 Schwingungszeitverlauf an den Punkten mit den Distanzen 1 m, 2 m, 4 m, 8 m und 16 m

In der Berechnung mit PLAXIS wurde mit einem Impuls von 0.175 tm/s (bei $\Delta t = 0.025$ s) und 0.0875 tm/s (bei $\Delta t = 0.0125$ s) gerechnet. Bei der Impulsanlage ergibt sich aufgrund der Fallgeschwindigkeit und der Fallmasse ein Impuls von 0.59 tm/s. Somit liegt die Impulsstärke bei der Impulsanlage um einen Faktor 3 bzw. 6 höher als bei der Simulation mit PLAXIS.

Die Ergebnisse von PLAXIS zeigen einige markante Unterschiede gegenüber den Messungen. Das Nachschwingen des Bodens, das bei den Messungen (siehe Bild 3.15) deutlich vorhanden ist, findet man im PLAXIS-Modell nicht. Die von PLAXIS berechneten maximalen Schwinggeschwindigkeiten sind einiges höher als die gemessenen. Das Abminderungsverhalten hingegen ist ähnlich wie bei der Versuchsanlage. Interessant ist überdies, dass die Belastung mit der kürzeren Stossdauer ($\Delta t = 0.0125$ s) zu stärkeren Erschütterungen führt als die Belastung mit der längeren Stossdauer, obwohl doch die längere Stossdauer einen stärkeren Impuls darstellt.

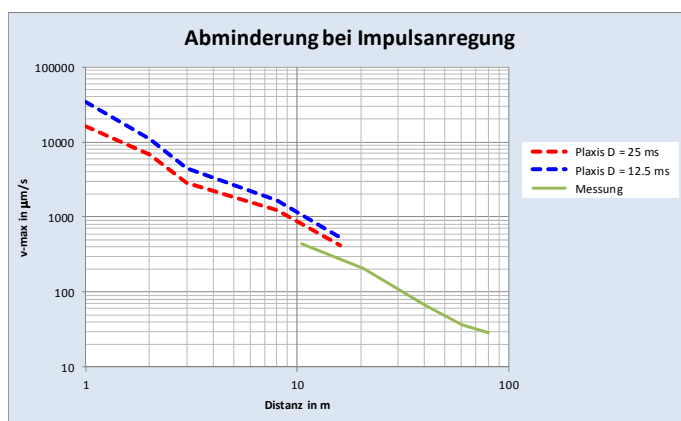


Bild 3.17 Abminderungsverhalten für v_{max} nach PLAXIS im Vergleich mit Messungen

4 Simulation von Erdbeben

Für die Simulation von Erdbeben und insbesondere für die Bestimmung der Boden-Bauwerks-Interaktion scheint das Programm PLAXIS sehr gut geeignet zu sein. Mit geringem Aufwand lassen sich die Daten für Boden und Gebäude eingeben. Für diesen Beitrag wurde die Beeinflussung der Eigenfrequenz des Gebäudes durch den Boden untersucht.

4.1 Gebäude-Eigenfrequenzen

Das Gebäude, ein längliches 5-stöckiges Wohnhaus mit einem Untergeschoss, wurde als 2-D-Modell eingegeben. Auch der Boden wurde im Prinzip als 2-D-Model simuliert. In Bild 4.1 sieht man das gesamte Modell, in Bild 4.2 das Gebäude mit einem Untergeschoss und fünf Obergeschossen.

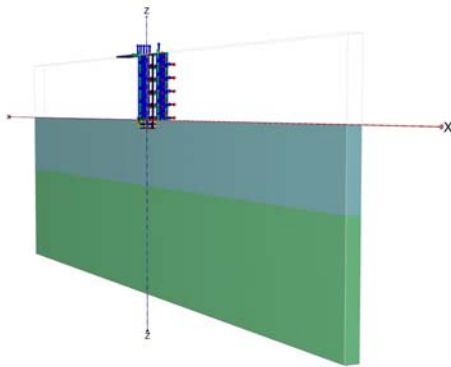


Bild 4.1 2-D-Modell für ein längliches Gebäude eingebettet im Boden

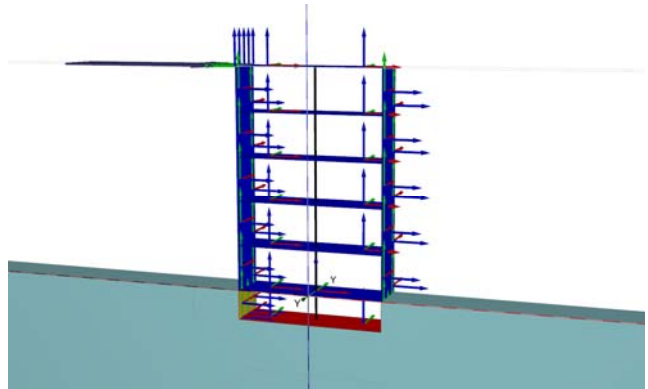


Bild 4.2 Detail-Darstellung des Gebäudes

Zur Untersuchung des Bodeneinflusses auf die Eigenfrequenz des Gebäudes wurde eine horizontale Last auf der Höhe der obersten Decke aufgebracht und anschliessend das freie Ausschlagen berechnet. Für die Variante „starre Einspannung“, d.h. ohne Bodeneinfluss, wurde die Steifigkeit des Bodens sehr hoch gesetzt. Für die Variante „Einbettung in Boden“ wurde ein nicht-lineares Bodenmodell mit dehnungsabhängiger Steifigkeit verwendet. Das unterschiedliche Verhalten zeigt sich sehr schön in den Bildern 4.3 und 4.4. Die weiche Einspannung im Boden ergibt eine Verformung der Bodenplatte, was zu grösseren Schwingungsamplituden und zu einer tieferen Eigenfrequenz führt. Die Eigenfrequenz sinkt – wegen der weichen Einspannung im Boden – von 1.18 Hz auf 1.05 Hz (siehe Bild 4.5).

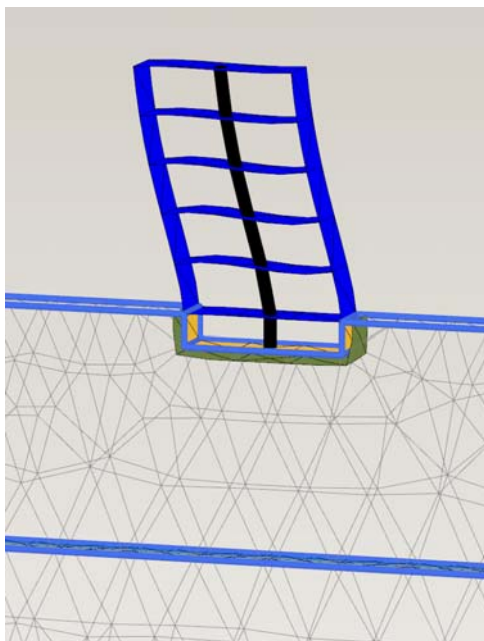


Bild 4.3 Schwingung eines Gebäudes mit Einspannung in einem starren Boden

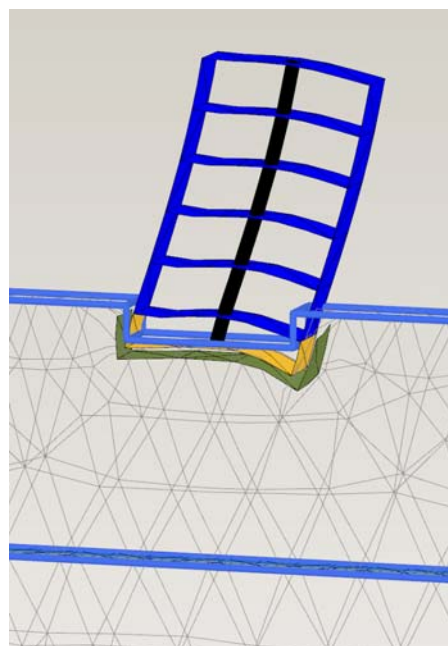


Bild 4.5 Schwingung eines Gebäudes mit Einspannung in einem weichen Boden

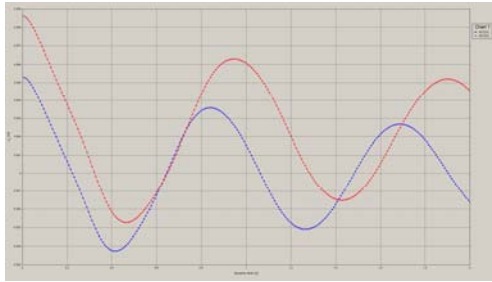


Bild 4.5 Ausschwingverhalten bei starrer Einspannung (blaue Linie) und bei weicher Einspannung im Boden (rote Linie)

5 Simulation von Eisenbahnerschütterungen

Die Simulation der Ausbreitung von Eisenbahnerschütterungen mit Hilfe von FE-Programmen ist seit Jahren der Wunschtraum jedes Baudynamikers. Damit könnten die Immissionen von Eisenbahntunnels, der Einfluss von elastischer Gebäudelagerung oder auch die Wirkung von Bodenschlitten im Voraus berechnet werden. Stattdessen begnügen wir uns doch noch mehrheitlich mit empirischen Modellen, die quasi mit Analogieschlüssen das Schwingungsverhalten des Bodens und die Übertragung auf die Gebäude berechnen.

5.1 Frei-Feld-Ausbreitung

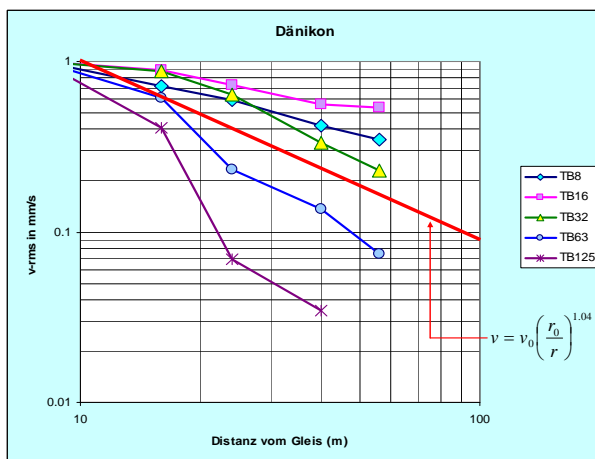
Mit dem einfachen Ansatz der exponentiellen Abminderungsfunktion von Gleichung (5.1)

$$v = v_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^{n(f)} \quad (5.1)$$

erhält man eine recht gute Approximation der realen Ausbreitungsverhältnisse im Frei-Feld. Dabei sind im frequenz-abhängigen Abminderungsexponenten $n(f)$ beide Anteile, die geometrische Dämpfung und die Materialdämpfung enthalten. Selbstverständlich existieren physikalisch korrektere und entsprechend kompliziertere Formulierungen, die uns aber wegen der ungenügenden Datenlage auch nicht weiter helfen als Gleichung (5.1).

5.1.1 Messdaten

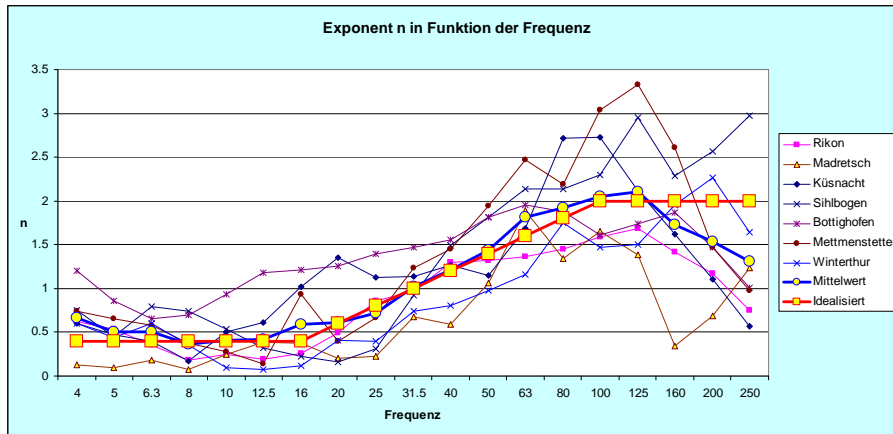
Bild 5.1 zeigt die starke Frequenz-Abhängigkeit der Wellenausbreitung am Beispiel einer Messung neben einer Bahnlinie. Der Exponent $n(f)$ in Gleichung (5.1) ist stark frequenz-abhängig und variiert zwischen 0.31 und 2.17. Der für den Peak-Wert bestimmte Exponent von $n = 1.04$ liegt erwartungsgemäss im Mittelfeld der frequenz-abhängigen Exponenten (Bild 5.1).



Freq. Hz	$n(f)$
8	0.54
16	0.31
32	0.76
64	1.34
128	2.17

Bild 5.1 Frequenz-abhängige Ausbreitung im realen Boden

In Bild 5.2 ist das Ergebnis der statistischen Auswertung von 7 Frei-Feld-Messungen zusammengefasst. Der Mittelwert, dargestellt als blaue Linie, lässt sich durch die idealisierte rote Linie approximieren. Nach dieser Auswertung liegt der Exponent $n(f)$ im tiefen Frequenzbereich, d.h. zwischen 4 und 16 Hz, bei 0.4 und im hohen Frequenzbereich, d.h. zwischen 125 Hz und 250 Hz, bei 2.2. Dazwischen kann ein linearer Anstieg angenommen werden. Nicht vergessen werden darf dabei, dass hier – wie Bild 5.2 deutlich zeigt – eine erhebliche Streuung vorliegt.



Freq	n(f)	Freq	n(f)
4	0.4	32	1
5	0.4	40	1.2
6.3	0.4	50	1.4
8	0.4	63	1.6
10	0.4	80	1.8
12	0.4	100	2.0
16	0.4	125	2.0
20	0.6	160	2.0
25	0.8	200	2.0

Bild 5.2 Frequenz-abhängige Exponenten für Frei-Feld-Abminderung

5.1.2 FE-Berechnung mit PLAXIS

Für die Simulation der Eisenbahnerschütterung wurde in der Berechnung mit PLAXIS ein Bodenbereich von 20 m x 20 m x 10 m modelliert. Der untere Rand (Z_{\min}) und der seitlich Rand (X_{\max}) sind als viskose (absorbierende) Ränder definiert. Die Eisenbahn wurde als Streifenlast (Bild 5.3) mit harmonischer Anregung (Bild 5.4) eingeführt. An sich könnte man anstelle der harmonischen Anregung direkt den effektiv gemessenen Schwingungs-Zeitverlauf der Eisenbahnerschütterung einführen, doch damit verpasst man die Chance die Arbeitsweise von PLAXIS zu verfolgen.

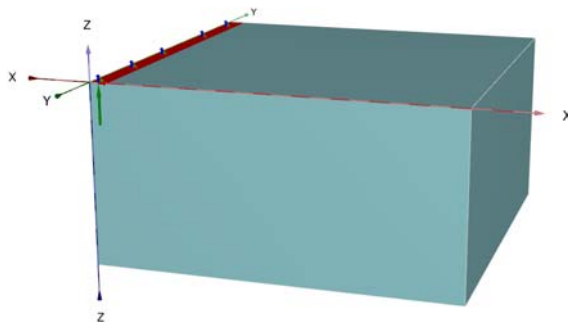


Bild 5.3 3-D-Model für eine Linienquelle mit harmonischer Anregung

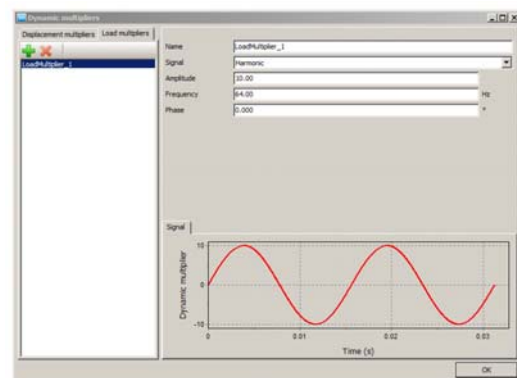


Bild 5.4 Eingabe der harmonischen Anregung in PLAXIS

Bilder 5.5 und 5.6 zeigen die Wellenbilder für eine Anregung mit 16 Hz bzw. mit 64 Hz. Während bei der Anregung mit 16 Hz sich noch ein schön geordnetes Wellenbild ergibt, (was uns die Sicherheit gibt, dass die Elementgröße richtig gewählt ist in Bezug auf die Wellenlänge) ergibt sich bei der Anregung mit 64 Hz trotz der feineren Netzeinteilung kein schönes Wellenbild. Dies bedeutet, dass man für die höheren Frequenzen, wie sie bei der Eisenbahn gerade für die Prognose des Körperschalls wichtig sind, eine noch feinere Netzeinteilung wählen muss.

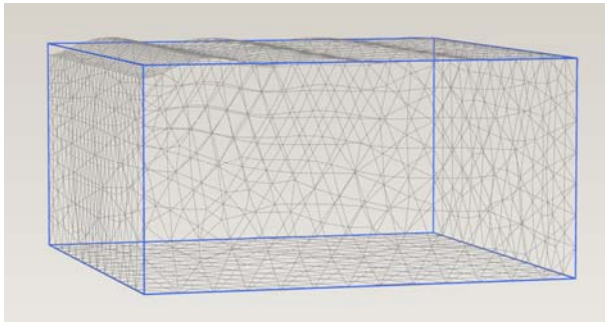


Bild 5.5 Wellenbild bei Anregung mit 16 Hz

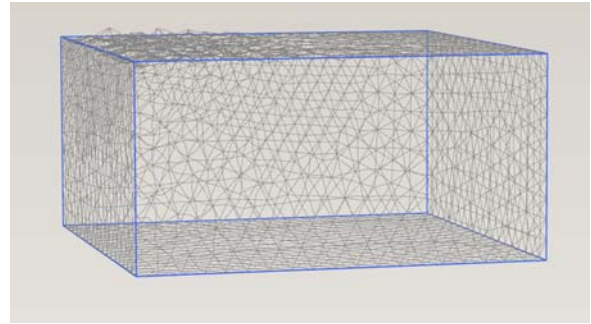


Bild 5.6 Wellenbild bei Anregung mit 64 Hz

Die Berechnungen wurden für einen Boden *mit* und *ohne* Dämpfung durchgeführt, wobei diejenigen Dämpfungsparameter eingesetzt wurden, die in Kapitel 3.2.2 ermittelt worden sind (Bild 3.13). Damit sollte im ersten Fall die reine geometrische Dämpfung sichtbar werden, die ja frequenz-unabhängig ist, und im zweiten Fall die stark frequenz-abhängige Materialdämpfung. Tatsächlich ergibt sich beim Boden ohne Dämpfung (vgl. Bild 5.7) eine praktisch frequenz-unabhängige Abminderung mit Exponenten zwischen 0.2 und 0.5 während beim Boden mit Dämpfung (vgl. Bild 5.8) die Abminderung bei hohen Frequenzen stark zunehmen mit Exponenten zwischen 0.5 und 3.0.

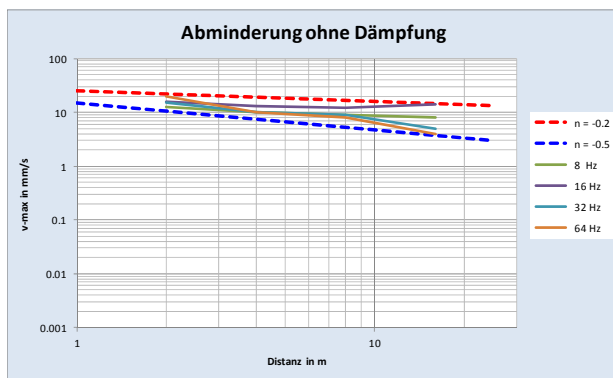


Bild 5.7 Abminderungskurven ohne Dämpfung

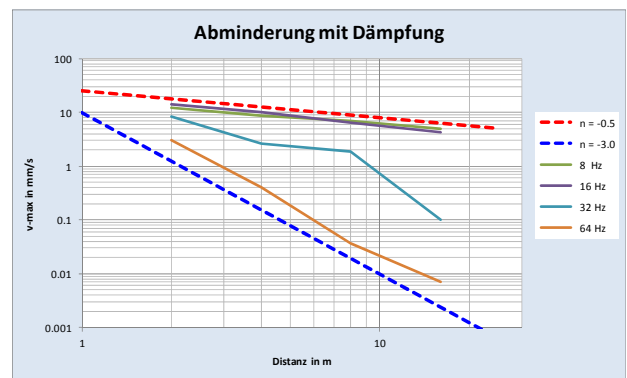


Bild 5.8 Abminderungskurven mit Dämpfung

5.2 Ankopplungseffekt

Beim Übergang vom Baugrund auf das Gebäude werden die Erschütterungen in der Regel abgemindert. Dies hängt einerseits mit der trägen Masse des Gebäudes andererseits mit der aussteifenden Wirkung der Fundamentplatte zusammen.

5.2.1 Messungen

In den Bildern 5.9 und 5.10 sind die Ankopplungsspektren für 30 Einfamilienhäuser bzw. für 30 Mehrfamilienhäuser zusammengestellt. Die Streuung unter den einzelnen Messungen ist relativ gross. Die Mittelwerte zeigen jedoch ein recht einheitliches Bild, mit einer Abschwächung von ca. 60 % im Frequenzbereich zwischen 32 und 60 Hz. Darunter und darüber werden die Erschütterungen wesentlich weniger reduziert.

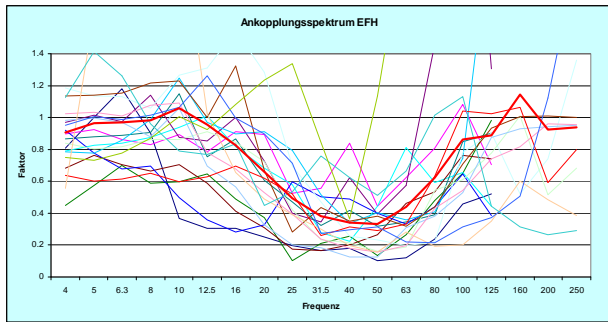


Bild 5.9 Ankopplungsspektren für EFH

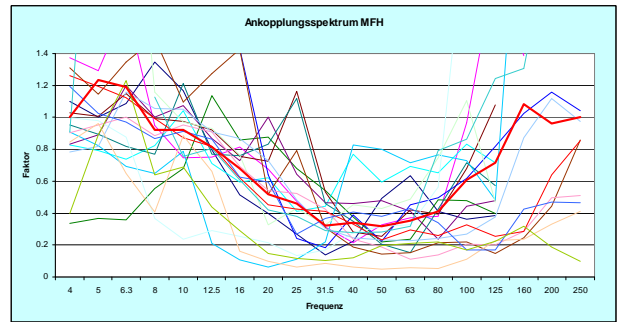


Bild 5.10 Ankopplungsspektren für MFH

Aus den Mittelwertspektren von Bild 5.9 und 5.10 wurden die beiden idealisierten Ankopplungsspektren in Bild 5.11 gebildet. Diese sollen nun mit den Ergebnissen einer PLAXIS-Simulation verglichen werden.

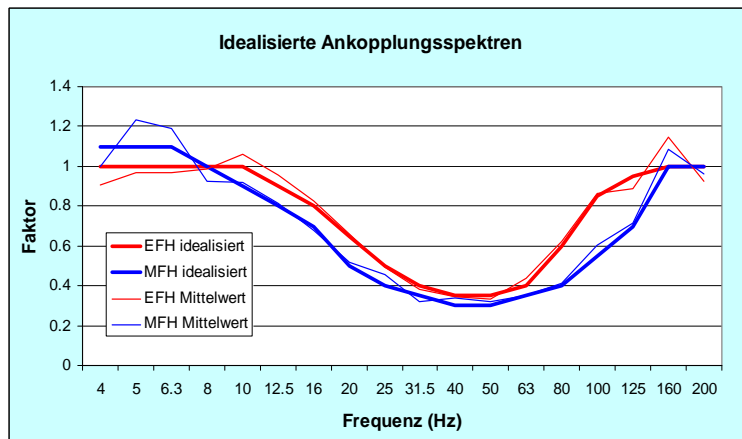


Bild 5.11 Idealisierte Ankopplungsspektren

Freq.	EFH	MFH	Freq.	EFH	MFH
4	1.00	1.10	31.5	0.40	0.35
5	1.00	1.10	40	0.35	0.30
6.3	1.00	1.10	50	0.35	0.30
8	1.00	1.00	63	0.40	0.35
10	1.00	0.90	80	0.60	0.40
12.5	0.90	0.80	100	0.85	0.55
16	0.80	0.70	125	0.95	0.70
20	0.65	0.50	160	1.00	1.00
25	0.50	0.40	200	1.00	1.00

5.2.2 FE-Berechnung mit PLAXIS

Für die Simulation des Ankopplungseffekts wurde in der Berechnung mit PLAXIS wiederum ein Bodenbereich von 20 m x 20 m x 10 m modelliert. Die Eisenbahn wurde als Streifenlast (Bild 5.12) mit harmonischer Anregung (Bild 5.13) eingeführt. Das Gebäude wird durch eine starre Platte mit den Abmessungen 6 m x 8 m dargestellt.

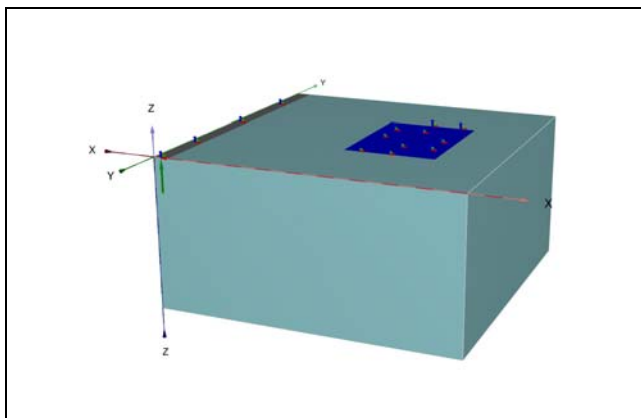


Bild 5.12 3-D-Modell für eine starre Platte neben einer Linienquelle mit harmonischer Anregung

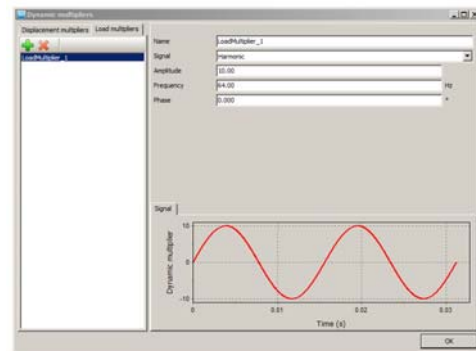


Bild 5.13 Eingabe der harmonischen Anregung in PLAXIS

Bilder 5.14 und 5.15 zeigen die Wellenbilder für eine Anregung mit 16 Hz bzw. mit 64 Hz. Während bei der Anregung mit 16 Hz sich noch ein schön geordnetes Wellenbild ergibt, (was uns die Sicherheit gibt, dass die Elementgröße in Bezug auf die Wellenlänge richtig gewählt ist) ergibt sich bei der Anregung mit 64 Hz trotz der feineren Netzeinteilung kein schönes Wellen-

bild. Dies bedeutet, dass man für die höheren Frequenzen, wie sie bei der Eisenbahn gerade für die Prognose des Körperschalls wichtig sind, eine noch feinere Netzeinteilung wählen müsste.

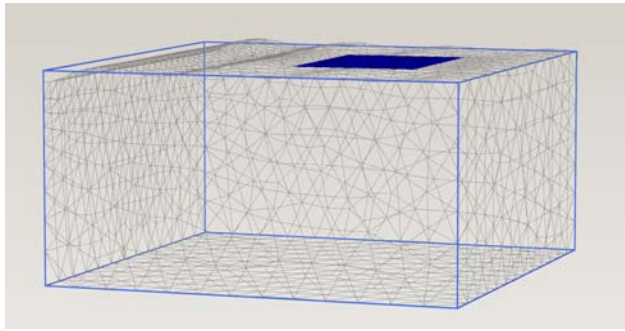


Bild 5.14 Wellenbild bei harmonischer Anregung mit 16 Hz

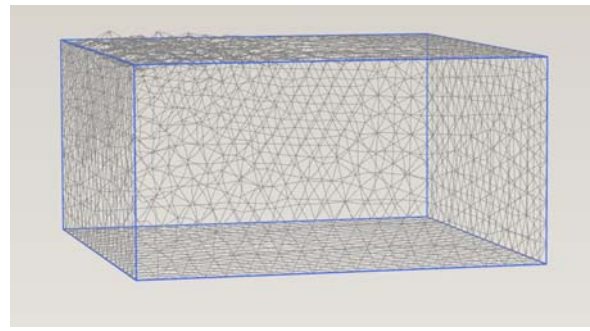


Bild 5.15 Wellenbild bei harmonischer Anregung mit 64 Hz

Das Ergebnis der PLAXIS-Berechnungen ist in Bild 5.16 mit dem empirisch bestimmten Ankopplungsspektrum verglichen. Es überrascht, dass die mit PLAXIS ermittelten Ankopplungsfaktoren so viel tiefer liegen als die empirisch bestimmten. Offensichtlich wird mit dem in PLAXIS verwendeten Modell nicht alles berücksichtigt. Gerade im höheren Frequenzbereich, der für den sekundär abgestrahlten Schall (sog. Körperschall) von ausschlaggebender Bedeutung ist, scheint die Modellierung mit PLAXIS problematisch zu sein.

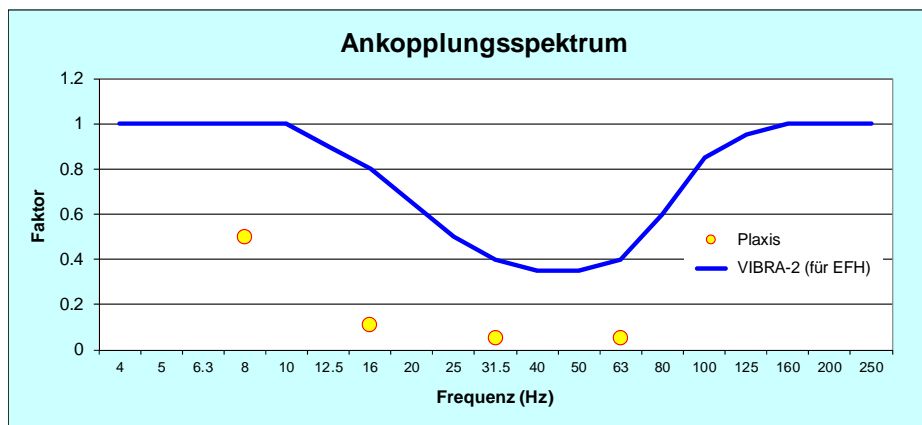


Bild 5.16 Vergleich des empirisch bestimmten Ankopplungsspektrums mit den Ergebnissen aus der FE-Berechnung

5.3 Gebäudeschwingungen

Das Schwingungsverhalten der Geschossdecken bildet zumeist den wichtigsten Einflussfaktor in der gesamten Übertragungskette vom Eisenbahngleis bis ins Wohnzimmer. Bei bekannter Anregung des Gebäudefundamentes und mit Hilfe eines genügend detaillierten FE-Modelles für das Gebäude sollte der zuverlässigen Berechnung der Gebäudeschwingungen nichts im Wege stehen. Allerdings ist die Wirklichkeit immer etwas komplizierter als die Theorie. Fürs erste ist die Dämpfung im Gebäude in den wenigsten Fällen genügend genau bekannt und gerade diese Größe hat einen entscheidenden Einfluss auf das Schwingverhalten. Dazu kommt, dass die Eigenfrequenzen bei unregelmässigen Grundrissen, wie sie im Wohnungsbau vorkommen, nicht sehr genau bestimmt werden können.

5.3.1 Messungen

In den Bildern 5.17 und 5.18 sind die Transferspektren für Betondecken mit 25 bis 35 Hz bzw. 35 bis 45 Hz zusammengestellt. Die Streuung unter den einzelnen Messungen ist auch hier relativ gross. Im Mittel liegt die spektrale Verstärkung bei einem Faktor von 8 bis 10, in Extremfällen kann er aber auch auf 20 oder noch höher ansteigen.

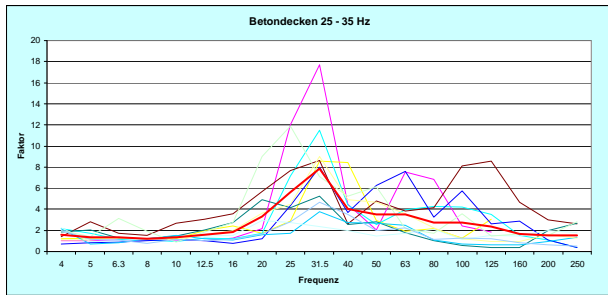


Bild 5.17 Transferspektren für 10 Betondecken mit Eigenfrequenzen von 25 – 35 Hz

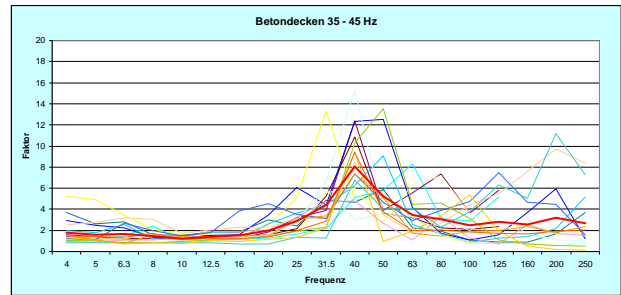


Bild 5.18 Transferspektren für 18 Betondecken mit Eigenfrequenzen von 35 – 45 Hz

5.3.2 FE-Berechnung mit PLAXIS

Für die Simulation mit PLAXIS wurde im Prinzip das gleiche Modell verwendet wie in Kapitel 4 für die Simulation des Erdbebens. Es wurde angenommen, dass das Gebäude sehr lang ist und da auch die Erschütterungsquelle, d.h. die Eisenbahn, einer Linienlast entspricht, kann man davon ausgehen, dass eine 2-D-Modellierung zulässig ist. Der Baugrund wurde als homogene Schicht von 10 m Tiefe mit linear-elastischem Materialverhalten und einer Scherwellengeschwindigkeit von 100 m modelliert. Die untere (Z_{\min}) und die seitliche Begrenzung (X_{\max}) wurden als viskose Ränder definiert. Die Anregung durch die Eisenbahn wurde bewusst nicht als realistischer Zeitverlauf einer Eisenbahnerschütterung eingegeben, sondern als Folge von diskreten harmonischen Anregungen von 8 Hz bis 64 Hz.

In den Bildern 5.19 und 5.20 sind die Wellenbilder für die Anregung mit 8 Hz bzw. für 64 Hz dargestellt. Man beachte, dass für die Berechnung mit 64 Hz eine wesentlich feinere Netzeinteilung gewählt wurde als für die tieferen Frequenzen. Nur so konnten die hohen Frequenzen richtig abgebildet werden. Die Rechenzeiten für einen einzelnen Lauf wurden auch entsprechend lang.

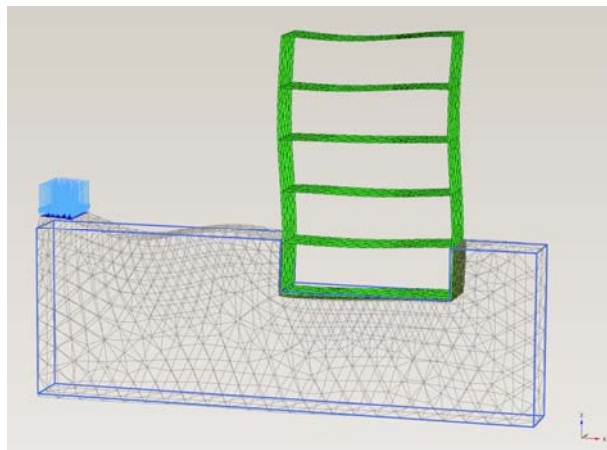


Bild 5.19 Wellenbild bei harmonischer Anregung mit 8 Hz

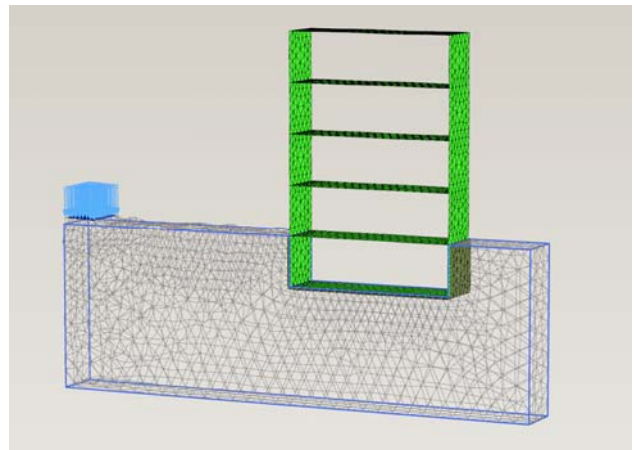


Bild 5.20 Wellenbild bei harmonischer Anregung mit 64 Hz

In den Bildern 5.21 und 5.22 sind die mit dem FE-Modell bestimmten Transferspektren mit den empirisch bestimmten verglichen. Beim Ankopplungsspektrum ergibt sich das gleiche Bild wie bereits bei der 3-D-Simulation (vgl. Bild 5.16): Bei höheren Frequenzen, d.h. über 50 Hz stellt man bei Messungen stets einen Anstieg des Transferspektrums fest, was gerade für die Prognose des sekundär abgestrahlten Schalls (sog. Körperschall) von Bedeutung ist. Im FE-Modell lässt sich dieser Anstieg nicht erkennen.

Der Vergleich des Decken-Transferspektrums in Bild 5.22 zeigt, dass mit dem FE-Modell die Verstärkung im Bereich der Eigenfrequenz von 9 Hz der Geschosdecke sichtbar wird, bei realen

Messungen ist sie allerdings wesentlich stärker. Diese Diskrepanz hängt allerdings weniger mit der Modellbildung als mit der Wahl der Dämpfung und mit der Anregungsdauer zusammen.

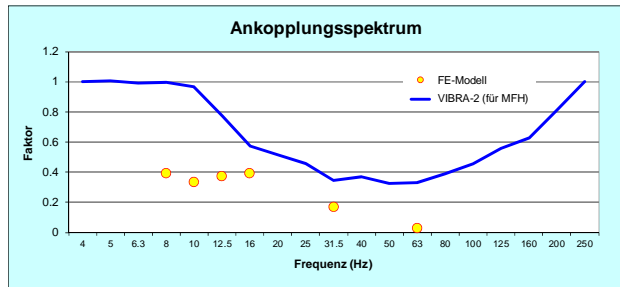


Bild 5.21 Vergleich des empirisch bestimmten Ankopplungsspektrums mit den Ergebnissen aus der FE-Berechnung

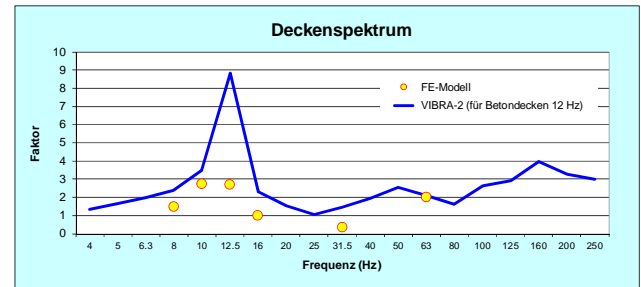


Bild 5.22 Vergleich des empirisch bestimmten Deckenspektrums mit den Ergebnissen aus der FE-Berechnung

6 Schlussfolgerungen

Gebäude und Boden bilden ein äusserst komplexes und schwierig zu berechnendes Zusammenspiel, wenn es um das dynamische Verhalten geht. Deshalb ist es auch verlockend dieses Zusammenspiel in einem einzigen FE-Modell, das beide Bereiche in einem einzigen Modell vereint, berechnen zu lassen. Bevor wir aber einer solchen Berechnung mit zu viel Vertrauen begegnen, sollten wir uns mit Hilfe von einigen einfacheren Berechnungen von der Tauglichkeit dieses Werkzeuges versichern.

Die für diesen Beitrag durchgeführten Berechnungen mit PLAXIS haben viele positive Resultate ergeben. Sie haben aber auch gezeigt, dass in gewissen Bereichen – insbesondere bei der Modellierung von Eisenbahnerschütterungen – erhebliche Unterschiede zwischen der FE-Berechnung und der Wirklichkeit vorliegen. Die Ergebnisse – die wir vorderhand unbedingt als *vorläufige Ergebnisse* verstanden haben möchten – lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Modellierung von dynamischen Boden-Bauwerk-Interaktionsproblemen gelingt mit PLAXIS auf sehr elegante und benutzerfreundliche Weise.
- Die Grundaufgaben wie „Maschinenfundament auf elastischem Halbraum“, die „Erschütterungsabminderung im Frei-Feld“ oder die „Interaktion zwischen Boden und Bauwerk bei Erdbebenanregung“ werden überzeugend gelöst und ergeben eine gute Übereinstimmung mit klassischen Lösungen.
- Bei der Simulation von Eisenbahnerschütterungen gelingt die Erschütterungsausbreitung im Frei-Feld sehr gut. Hingegen bleiben beim Übergang der Frei-Feld-Erschütterungen auf das Gebäudefundament doch einige Fragen offen. Es scheint uns, dass die Übertragung der höheren Frequenzen im Bereich von 50 bis 100 Hz nicht realistisch modelliert wird. Und gerade dieser Bereich ist für die Prognose von sekundär abgestrahltem Schall (sog. Körperschall) von grosser Bedeutung.

Für eine abschliessende Beurteilung bedarf es sicherlich einer viel grösseren Anzahl von Vergleichs-Berechnungen. Wichtig scheint uns, dass – bevor wir uns an komplexe Aufgabenstellungen wagen – wir uns mit vereinfachten Aufgabenstellungen und einfachen Belastungsfunktionen von der Richtigkeit der verwendeten FE-Berechnung selbst überzeugen.