

Gebäudeschäden infolge Erschütterungseinwirkungen aus Tiefbauarbeiten

Martin Achmus

1 Einleitung

Jede Bautätigkeit ist im Grundsatz mit Erschütterungen und Geräusentwicklung verbunden, durch welche das Umfeld einer Baumaßnahme mehr oder weniger stark beeinträchtigt werden kann. Bei vielen Verfahren des Tiefbaus wird gezielt dynamisch auf den Baugrund eingewirkt, beispielsweise um Bodenwiderstände gegen das Eindringen von Konstruktionselementen wie Pfähle oder Spundbohlen zu überwinden oder um vor allem nichtbindige Böden effektiv zu verdichten. Insbesondere bei diesen Bauverfahren werden Erschütterungen durch den Baugrund auf benachbarte bauliche Anlagen übertragen und können dort Schäden verursachen. Solche Schäden können von konstruktiv unschädlichen „architektonischen“ Rissen bis zu erheblichen Rissbildungen mit Beeinträchtigung der Standsicherheit eines Bauteils reichen.

Im Zuge der Planung einer Baumaßnahme gilt es, mögliche Erschütterungseinwirkungen abzuschätzen und die Baugeräte so auszuwählen, dass eine Beeinträchtigung benachbarter Bauwerke vermieden oder zumindest minimiert wird. Sofern Beeinträchtigungen nicht ausgeschlossen werden können, sollte der Zustand der betroffenen Bebauung vorab im Rahmen einer Beweissicherung erfasst werden. Die Erschütterungsprognose kann dann dazu dienen, den durch eine Beweissicherung sinnvollerweise zu erfassenden Bereich um eine Baumaßnahme festzulegen.

Erschütterungsprognosen werden aber häufig auch nachträglich notwendig, wenn von Anwohnern Schäden gemeldet werden und – wie oft der Fall – eine Ursächlichkeit für vorhandene Rissbildungen möglich ist oder zumindest nicht ausgeschlossen werden kann. Bei den in der Praxis Tätigen bestehen häufig Unsicherheiten bei der Einschätzung der möglichen Auswirkungen eines Tiefbauverfahrens. Dies verdeutlicht das in Bild 1 schematisch dargestellte, der Gutachterpraxis des Autors entstammende Beispiel.

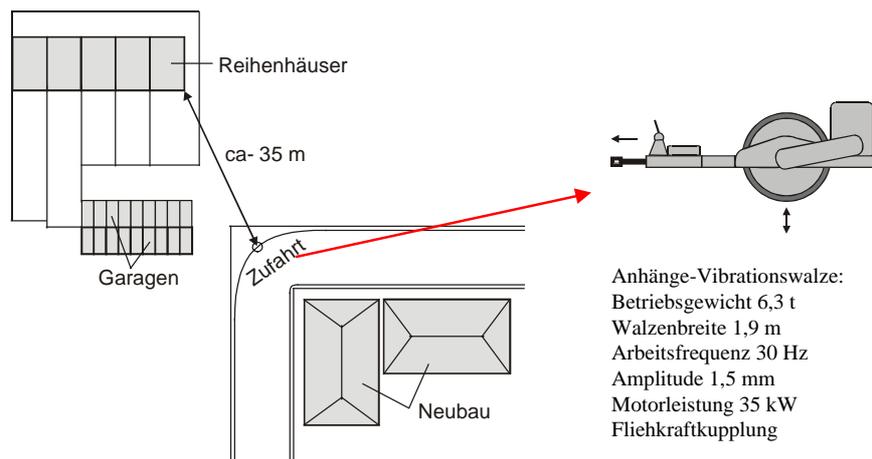


Bild 1: Beispiel für ein Erschütterungsprognoseproblem

Im Abstand von rd. 35 m von einer Reihenhausbebauung (Massivbauweise mit Stahlbetondecken, Baujahr etwa 1970) war eine Anhängewalze eingesetzt worden, was zu merklichen Erschütterungen in den Häusern geführt hatte. Der Baugrund bestand aus mitteldicht gelagertem Sand, Grundwasser stand rd. 4 m unter Geländeoberkante an. Da die Anwohner Risschäden geltend machten, galt es nachträglich zu beurteilen, ob die Gebäude durch die entstandenen Erschütterungen geschädigt worden sein könnten. In drei Gutachten wurden dazu drei unterschiedliche Aussagen getroffen. Im ersten Gutachten hieß es sinngemäß, dass aufgrund des großen Abstands des Einsatzbereichs der Walze von den Gebäuden eine Schadensursächlichkeit auszuschließen sei. Im zweiten Gutachten wurde eine Ursächlichkeit aufgrund des hohen Gewichts der Walze als wahrscheinlich beurteilt. Im dritten Gutachten wurde der Baugrund zwar – auch wegen des anstehenden Grundwassers – als bezüglich Erschütterungsauswirkungen sensibel eingestuft, eine Schadensverursachung wurde aber dennoch als unwahrscheinlich beurteilt. Eine auf Fakten bzw. rechnerischen Abschätzungen basierende und damit nachvollziehbare Beurteilung wurde in keinem der Gutachten gegeben. Nachfolgend werden Möglichkeiten und Verfahren dargestellt, die Intensität von Erschütterungen durch Baugeräte (hier werden Vibrationsverdichtungsgeräte sowie Schlag- und Vibrationsrammen behandelt) zu prognostizieren und auf dieser Grundlage eine Bewertung der Schadensrelevanz vorzunehmen.

2 Erschütterungsprognosen

2.1 Grundlagen

Ausgehend von einer Erschütterungsquelle breiten sich Erschütterungen im Boden in Form von Wellen aus (Bild 2). Wenn dieser Ausbreitungsvorgang nicht von Gebäuden oder anderen Bauwerken gestört bzw. beeinflusst wird, spricht man auch von der Ausbreitung im Freifeld. Die Schwingungsgrößen im Freifeld, d. h. in der Regel die maximale Schwinggeschwindigkeit und gegebenenfalls die Schwingungsfrequenz, dienen als Basiswerte für die Ermittlung von Schwingungsgrößen in einem Bauwerk.

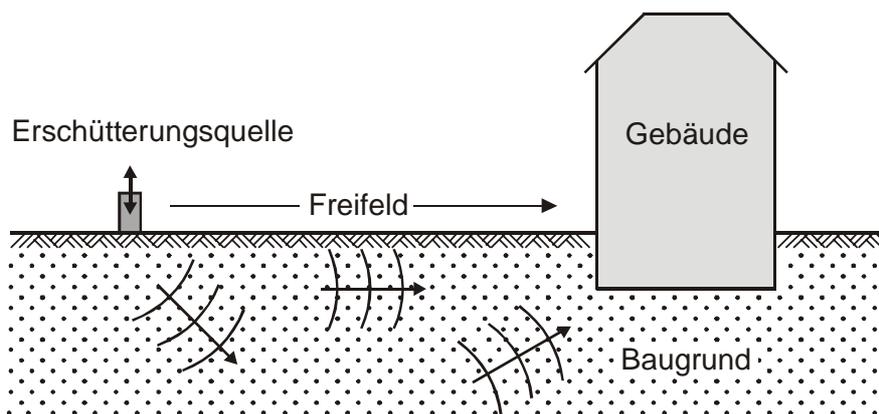


Bild 2: Erschütterungsausbreitung im Boden

Für die hier betrachteten Erschütterungen infolge Verdichtungs-, Ramm- oder Vibrationsrammgeräten kann davon ausgegangen werden, dass zumindest ab einem gewissen, geringen Abstand vom Gerät nur relativ kleine Dehnungen im Boden induziert werden. Das Materialverhalten des Bodens kann dann ausreichend genau durch die lineare Elastizitätstheorie beschrieben werden. Dieses Materialgesetz erfordert zwei Parameter. In der Regel werden der Schubmodul G und die Querkontraktionszahl ν verwendet. Von diesen Parametern hängt die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Erschütterungswellen ab.

Im elastischen Raum existieren für die dynamischen Bewegungsgleichungen zwei Lösungen. Die eine Lösung beschreibt eine Kompressionswelle, auch P-Welle genannt. Die Partikel des elastischen Mediums schwingen dabei in Richtung der Wellenausbreitung (Longitudinalwelle). Die zweite Lösung der Bewegungsgleichungen beschreibt eine Scherwelle, auch S-Welle genannt, unter deren Wirkung die Partikel quer zur Ausbreitungsrichtung schwingen.

Für den elastischen Halbraum existiert eine weitere Lösung der Bewegungsgleichungen. Diese beschreibt eine Oberflächenwelle, deren Einfluss mit zunehmendem Abstand von der Halbraumoberfläche stark abklingt. Diese Welle wird als Rayleighwelle oder R-Welle bezeichnet. In einer Tiefe vom 1,5-fachen der Wellenlänge sinkt die Verschiebungsamplitude auf weniger als 10% von der Amplitude an der Halbraumoberfläche ab. In Bild 3 sind die verschiedenen Wellenformen grafisch veranschaulicht.

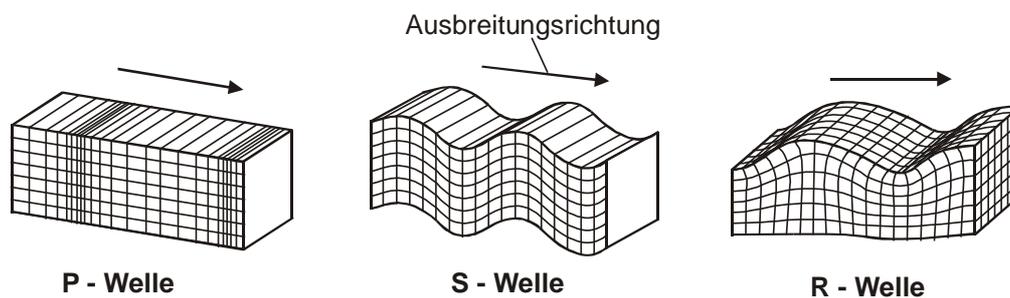


Bild 3: Darstellung von P-, S- und R-Wellen

Von entscheidender Bedeutung für Erschütterungsprognosen ist, dass die Oberflächenwelle das Schwingungsverhalten ab einer gewissen Entfernung von der Quelle nahezu ausschließlich bestimmt. Innerhalb eines „Nahfelds“ wird das Verhalten von allen drei Wellenformen geprägt, im „Fernfeld“ genügt in guter Näherung die Betrachtung allein der R-Welle. Die Grenze zwischen Nah- und Fernfeld liegt etwa bei einem Abstand von der Quelle vom 0,5- bis 1,0-fachen der Wellenlänge der S-Welle, welche wiederum von der Ausbreitungsgeschwindigkeit und der Frequenz der Welle abhängt.

Aus der theoretischen Betrachtung des homogenen elastischen Halbraums ergibt sich für das Fernfeld folgende Gesetzmäßigkeit für die Amplitudenabnahme einer harmonischen Schwingung und damit auch der Schwinggeschwindigkeit v mit dem Abstand von der Erschütterungsquelle:

$$v(r) = v(r_0) \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-n} e^{-\alpha_R (r-r_0)}$$

α_R bezeichnet hierin einen im Allgemeinen frequenzabhängigen Dämpfungskoeffizienten.

Für den Parameter n werden in der DIN 4150-1 abhängig von der Art der Erschütterungsquelle (Punkt- oder Linienquelle) und von der Art der Erschütterung (harmonisch oder impulsförmig) Werte von 0,5 und 1,0 angegeben.

Für Erschütterungsprognosen, bei denen kein Referenzwert $v(r_0)$ vorliegt, kann die von der Erschütterungsquelle eingeleitete Energie als Bezugswert verwendet werden. Diese ist dem Quadrat der Geschwindigkeitsamplitude proportional, d. h. $E \sim v^2$ bzw. $v \sim \sqrt{E}$. Damit ergibt sich:

$$v(r) = k \sqrt{E} r^{-n} e^{-\alpha_R r}$$

Hierin ist k ein dimensionsbehafteter Proportionalitätsfaktor.

Für die Auswertung von Messungen oder auch die Erschütterungsprognose wird vielfach folgende Gleichung verwendet:

$$v(r) = K \frac{\sqrt{E}}{r^{n^*}}$$

Der Koeffizient n^* erfasst somit die gemeinsame Wirkung von geometrischer Dämpfung und Materialdämpfung. Die Konstante K hängt von der Bodenart, der Art der Erschütterungsquelle (Gerätetyp) sowie bei Rammarbeiten auch vom Rammgut ab.

Die letztgenannte Gleichung ist ein üblicher Prognoseansatz für Erschütterungen im Boden infolge Vibrations- und Schlagrammung. Der Koeffizient n^* wird meist zu $n^* = 1$ gesetzt, die Konstante K ist aus Erfahrungen, d. h. Messungen, abgeleitet. Bei Vibrationsverdichtungsgeräten ist es schwierig, den als Erschütterungsenergie abgestrahlten Energieanteil abzuschätzen. Stattdessen kann das Gewicht G des Verdichtungsgeräts als maßgeblicher, die Erschütterungsintensität charakterisierender Parameter herangezogen werden. Die Prognosegleichung lautet dann:

$$v(r) = \tilde{K} \frac{\sqrt{G}}{r^{n^*}}$$

Der homogene elastische Halbraum mit konstanten Bodenparametern ist natürlich ein Modell, das so in der Realität nicht existiert. In aller Regel besteht der Baugrund aus verschiedenen Bodenschichten. Aber auch eine einzelne Bodenschicht ist nicht homogen im Sinne des o. g. Modells, da die Steifigkeit von Böden vom herrschenden Spannungsniveau abhängt und dieses im Allgemeinen mit der Tiefe ansteigt. Daraus resultiert u. a. auch eine frequenzabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit der Erschütterungswellen (Dispersivität). An Schichtgrenzen kommt es zu Wellenreflexion und -refraktion, wodurch das Schwingungsverhalten des Untergrunds wesentlich komplexer als für den Fall des homogenen Halbraums wird.

Grundsätzlich kann es bei geschichtetem Baugrund infolge von Resonanzeffekten auch zu Amplitudenvergrößerungen kommen. Allerdings ist erfahrungsgemäß bei nicht zu stark ausgeprägter Schichtung, d. h. keine sehr großen Steifigkeitsunterschiede, mit allenfalls geringen Amplitudenerhöhungen zu rechnen. Im Allgemeinen spielen daher Resonanzeffekte bei der Erschütterungsausbreitung im Baugrund keine entscheidende Rolle.

Anzumerken ist, dass auch eine Grundwasseroberfläche grundsätzlich wie eine Schichtgrenze wirkt. Da Wasser praktisch inkompressibel ist, ist die (dynamische) Kompressibilität des wassergesättigten Bodens wesentlich geringer als die des Bodens oberhalb des Grundwasserspiegels. Durch diesen Effekt können stark ausgeprägte P-Wellen entstehen. Allerdings bleibt die R-Welle weiter bestimmend für das Schwingungsverhalten im Fernfeld. Diese und die S-Welle sind durch das Grundwasser kaum beeinflusst, da das Wasser keine Scherspannungen übertragen kann. Bei Vorhandensein von Grundwasser ist deshalb im Normalfall nicht von einer signifikanten Vergrößerung der Schwingungsamplituden auszugehen.

2.2 Prognosegleichungen für Boden- und Fundamenterschütterungen

Nachfolgend werden Empfehlungen für zu verwendende Prognosegleichungen gegeben. Für Einzelheiten bzw. bezüglich der Grundlagen dieser Empfehlungen wird auf Achmus et al. (2005) verwiesen.

Für eine Erschütterungsprognose sind zunächst die Parameter bzw. Betriebsdaten des verwendeten Baugeräts zusammenzustellen, welche für die Erschütterungsintensität von maßgebender Bedeutung sind.

Für Vibrations- und Schlagrammgeräte ist die Energie pro Schwingungsperiode bzw. pro Rammschlag der Eingangswert der Erschütterungsprognose. Für Vibratoren wird diese aus

Geräteleistung und Betriebsfrequenz berechnet, für Schlagrammen ist sie in der Regel direkt als Maximalwert im Gerätedatenblatt angegeben.

Für Vibrationsverdichtungsgeräte wird das Betriebsgewicht als der die Erschütterungsintensität repräsentierende Parameter verwendet. Außerdem ist die Betriebsfrequenz von Bedeutung. Für die direkte Prognose von Bodenschwinggrößen infolge Verdichtung mit einer Vibrationswalze wird außerdem die Motorleistung der Walze benötigt.

Für die Ermittlung der resultierenden Bodenschwinggeschwindigkeiten v_R^B werden die in Tabelle 1 zusammengestellten Gleichungen empfohlen.

Sofern erschütterungsinduzierte Bodensackungen zu befürchten sind, kann eine Beurteilung anhand der zu erwartenden Bodenbeschleunigung vorgenommen werden. Die resultierende Bodenbeschleunigung ergibt sich aus

$$a_R^{Boden} = 2\pi f v_R^B$$

Als Frequenz ist hier die Vibrationsfrequenz bzw. bei Schlagrammung die vorherrschende Frequenz der Schwingung einzusetzen. Letztere ist unter anderem abhängig vom Abstand zur Erschütterungsquelle und kann nur aufgrund von Erfahrungen geschätzt werden. Für Böden liegt sie meist zwischen rd. 8 und 15 Hz.

Rammung	Vibration	$v_R^B = K \frac{\sqrt{E}}{r}$ mit $K = 23,7$
	Schlagrammung	$v_R^B = K \frac{\sqrt{E}}{r}$ mit $K = 15,8$ (weicher bzw. lockerer Boden) bis $31,6$ (sehr steifer bzw. dichter Boden)
Verdichtung	Vibrationsplatte	$v_R^B = K \frac{\sqrt{E}}{r}$ mit $K = 100$, $E = W/f$
	Vibrationswalze	

E in kNm, r in m, v in mm/s

Tabelle 1: Prognosegleichungen für die resultierende Bodenschwinggeschwindigkeit

Um Bauwerksschwingungen zu ermitteln, empfiehlt sich die Verwendung von Prognosegleichungen, welche direkt die Fundamentalschwinggrößen v_i^F angeben. Die Anwendung von Boden-Fundament-Übertragungsfaktoren mit den entsprechenden Unsicherheiten wird damit obsolet. Die empfohlenen Gleichungen sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Unterschieden wird hier zwischen wahrscheinlichem Wert (Mittelwert, 50% Überschreitungswahrscheinlichkeit) und ungünstigem Wert (2,25% Überschreitungswahrscheinlichkeit). Die Gleichungen wurden aus eigenen Auswertungen zahlreicher Schwingungsmessungen abgeleitet, s. Achmus et al. (2005). Lediglich für Schlagrammung mit Freifallbären liegen keine Ergebnisse eigener Auswertungen vor. Hier wird daher die Verwendung der angegebenen Prognosegleichung nach Wieck (2003) empfohlen.

		Wahrscheinlicher Wert (50% Überschreitungs- wahrscheinlichkeit)	Ungünstiger Wert (2,25% Überschreitungs- wahrscheinlichkeit)
Rammung	Vibration	$v_{i,\max}^F = 7,9 \frac{\sqrt{W/f}}{r}$	$v_{i,\max}^F = 18,52 \frac{\sqrt{W/f}}{r}$
	Schlagammung (Dieselbär)	$v_{i,\max}^F = 2,45 \frac{\sqrt{E}}{r}$	$v_{i,\max}^F = 3,82 \frac{\sqrt{E}}{r}$
	Schlagammung (Freifallbär)	$v_{i,\max}^F = 11,07 \frac{\sqrt{E}}{r^{1,3}}$	
Verdichtung	Vibrationsplatte	$v_{i,\max}^F = 4,31 \frac{\sqrt{G}}{r}$	$v_{i,\max}^F = 10,87 \frac{\sqrt{G}}{r}$
	Vibrationswalze		

E bzw. W/f in kNm, r in m, G in t, v in mm/s

Tabelle 2: Prognosegleichungen für die maximale Komponente der Fundamentalschwinggeschwindigkeit

2.2 Bauteilerschütterungen

Neben Fundamentalschwinggeschwindigkeiten werden für die Beurteilung der Schadensrelevanz von Erschütterungen auch die Schwinggeschwindigkeiten von Bauteilen, d. h. Wänden und Decken, herangezogen. Das Übertragungsverhalten der Fundamentalschwingungen auf Wände und Decken ist daher zu berücksichtigen. Resonanzeffekte können sich dabei vor allem für Vertikalschwingungen von Stockwerksdecken ergeben.

Die Amplitudenänderungen werden allgemein durch Übertragungsfaktoren beschrieben. Ausgangswerte sind die für den betrachteten Ort bestimmten Amplituden der Komponenten der Fundamentalschwinggeschwindigkeit v_x^F , v_y^F und v_z^F (s. Tab. 2). Übertragungsfaktoren k^{F-D} und k^{F-OG} beschreiben die Übertragung vom Fundament auf eine Decke bzw. auf Bauteile in Obergeschossen.

Für vertikale Deckenschwingungen gilt, dass bei harmonischer Anregung mit der Deckeneigenfrequenz der maximale Übertragungsfaktor $k_{z,\max}^{F-D}$ nach DIN 4150-1 gemäß folgender Gleichung abgeschätzt werden kann:

$$k_{z,\max}^{F-D} = \frac{1}{2D}$$

D ist hierin ein integrales Dämpfungsmaß und kann für Stahlbetondecken mit $0,02 \leq D \leq 0,05$ abgeschätzt werden. Hieraus ergeben sich maximale Übertragungsfaktoren zwischen 10 und 25. Die Resonanzfrequenzen von Deckenkonstruktionen liegen meist zwischen rd. 9 bis 12 Hz (Holzbalkendecken) bzw. zwischen rd. 20 bis 25 Hz (Stahlbetondecken im Wohnungsbau).

Nach Funk (1996) gilt erfahrungsgemäß $k_{z,\max}^{F-D} < 15$ für Holzbalken-, Stahlstein- und Stahlträgerdecken sowie $k_{z,\max}^{F-D} < 10$ für Stahlbetondecken. Bei nichtresonanter Anregung (mindestens 5 Hz oberhalb der Resonanzfrequenz) gilt $k_{z,\max}^{F-D} < 1,5$.

Bei impulsartiger Schwingungsanregung ist der resultierende Übertragungsfaktor vom Frequenzinhalt der Erregung abhängig. Als Anhaltswert für die resultierende

Amplitudenerhöhung bei Spundwanddrummung nennen Funk & Gerasch (1995) einen Wert von $k_z^{F-D} = 2,5$ für ein Einfamilienhaus mit Holzbalkendecke.

Für Horizontalschwingungen im Gebäude spielen Resonanzeffekte in aller Regel kaum eine Rolle. Bei einem relativ „weichen“ Bauwerk-Boden-System, d. h. bei Gründungen auf weichen Böden, können sich Übertragungsfaktoren k_x^{F-OG} bzw. k_y^{F-OG} von maximal rd. 2,0 ergeben, ansonsten sind sie in der Regel kleiner. Für Gebäude auf sehr steifem Untergrund (statischer Steifemodul $E_S \geq 100 \text{ MN/m}^2$) kann nach Funk (1996) $k_x^{F-OG} = k_y^{F-OG} = 0,5$ angesetzt werden. Selbst bei Gebäuden auf weichen Böden sind aber die Amplituden der horizontalen Schwinggeschwindigkeiten in einem Gebäude wegen der deutlichen Reduktion beim Übergang Boden-Fundament gegenüber dem Freifeld in aller Regel reduziert.

3 Erschütterungsbewertung

3.1 Bewertung von Gebäudeerschütterungen

Als Bezugswert für die Beurteilung der möglichen Schädigung eines Gebäudes hat sich aufgrund von Erfahrungen die maximale Schwinggeschwindigkeit eines Bauteils bewährt. In Richtlinien oder Normen werden meist Anhaltswerte für Schwinggeschwindigkeiten festgelegt, bei deren Unterschreitung mit Schäden nicht zu rechnen ist. Solche Werte sind aus der Auswertung zahlreicher Messungen gewonnen worden. In Deutschland sind Anhaltswerte in DIN 4150-3 (Feb. 1999) „Erschütterungen im Bauwesen – Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen“ angegeben.

Zu berücksichtigen ist, dass derartige Grenzwerte implizit auch das übliche Bauqualitätsniveau widerspiegeln. Grundsätzlich gilt auch, dass ein „normaler“ Bauwerkszustand unterstellt wird. Gebäude, die aufgrund baukonstruktiver Mängel sensibel reagieren, können bereits durch vergleichsweise geringe Erschütterungsintensitäten geschädigt werden. Die Erschütterung ist dann zwar Schadensauslöser, aber nicht Hauptschadensursache. Vielfach kann davon ausgegangen werden, dass solche Risse mit der Zeit ohnehin aufgetreten wären und somit durch die Erschütterung nur vorzeitig entstanden sind.

Die DIN 4150-3 unterscheidet kurzzeitige Erschütterungen und Dauererschütterungen und gibt jeweils Anhaltswerte für die Beurteilung der Erschütterung des Gesamtbauwerks und der Decken an. Es werden auch drei Gebäudearten (Gewerblich genutzte Bauten, Wohngebäude, besonders erschütterungsempfindliche Gebäude) unterschieden.

Die Anhaltswerte sind gemäß DIN 4150-3 so festgelegt, dass eine Verminderung des Gebrauchswertes von Gebäuden oder Gebäudeteilen bei deren Unterschreitung nicht zu erwarten ist. Für Wohngebäude und erschütterungsempfindliche Gebäude sind auch leichte Schäden wie Putzrisse, Rissvergrößerungen oder Abriss von Trenn- und Zwischenwänden nicht zu erwarten. Dagegen folgt aus der Überschreitung der Anhaltswerte keinesfalls zwingend, dass Schäden auftreten. Mit zunehmender Schwinggeschwindigkeit nimmt lediglich die Wahrscheinlichkeit einer Rissbildung zu.

In Tabelle 3 sind die Anhaltswerte der DIN 4150-3 zur Beurteilung des Einflusses kurzzeitiger Erschütterungen auf das Gesamtbauwerk angegeben. Zum Einen werden hier frequenzabhängige zulässige Fundamentalschwinggeschwindigkeiten (maßgebend ist hier der größte Wert der drei Einzelkomponenten) und zum anderen zulässige horizontale Bauteilschwinggeschwindigkeiten in der obersten Deckenebene angegeben.

Bezüglich der Beurteilung von Decken gibt die DIN 4150-3 einen Richtwert für die vertikale Schwinggeschwindigkeit in Deckenmitte von $v_z = 20 \text{ mm/s}$ an, bei dessen Unterschreitung keine Gebrauchswertverminderung der Decke zu erwarten ist. Bei besonders empfindlichen Bauten (Zeile 3 der Tabelle) kann eine Abminderung dieses Anhaltswertes notwendig werden.

Gebäudeart	Anhaltswerte für die Schwinggeschwindigkeit v_i in mm/s			
	Fundament			Oberste Deckenebene, horizontal
	$f = 1$ bis 10 Hz	$f = 10$ bis 50 Hz	$f = 50$ bis 100 Hz	alle Frequenzen
Gewerbe-, Industriebauten	20	20 bis 40	40 bis 50	40
Wohngebäude	5	5 bis 15	15 bis 20	15
Besonders empfindliche Bauten	3	3 bis 8	8 bis 10	8

Tabelle 3: Anhaltswerte für die Schwinggeschwindigkeit v_i zur Beurteilung der Wirkung von kurzzeitigen Erschütterungen auf Bauwerke gemäß DIN 4150-3, Tab. 1

Zur Beurteilung der Schadenswirksamkeit von Dauererschütterungen enthält die DIN 4150-3 frequenzunabhängige Anhaltswerte. Herangezogen wird hier nur die maximale horizontale Komponente der Schwinggeschwindigkeit in der obersten Deckenebene des Bauwerks (Tabelle 4). Die Anhaltswerte sind 3 bis 4 mal kleiner als die entsprechenden Werte für kurzzeitige Erschütterung.

Für die maximale vertikale Schwinggeschwindigkeitskomponente von Geschosdecken wird nur für Industriebauten und Wohngebäude (Zeilen 1 und 2 der Tabelle) ein Anhaltswert von $v_z = 10$ mm/s angegeben. Für besonders empfindliche Bauten kann gemäß DIN 4150-3 kein Anhaltswert angegeben werden.

Gebäudeart	Anhaltswerte für die Schwinggeschwindigkeit v_i in mm/s
	Oberste Deckenebene, horizontal, alle Frequenzen
Gewerbe-, Industriebauten	10
Wohngebäude	5
Besonders empfindliche Bauten	2,5

Tabelle 4: Anhaltswerte für die Schwinggeschwindigkeit v_i zur Beurteilung der Wirkung von Dauererschütterungen auf Bauwerke gemäß DIN 4150-3, Tab. 3

3.2 Abschätzung der Gefahr von Bodensackungen

Eine Bauwerksschädigung durch Erschütterung kann indirekt (als Setzungsschaden) erfolgen, wenn durch die Erschütterung eine Veränderung der Struktur des Gründungsbodens erfolgt. In der DIN 4150-3 wird darauf hingewiesen, dass in besonderen Fällen auch diese indirekten Folgen zu beachten sind.

Empfindlich bezüglich derartiger Effekte sind vor allem locker gelagerte Sande unter Grundwasser und Schluffe. Anzumerken ist aber, dass außer ungünstigen

Baugrundbedingungen auch eine erhebliche Erschütterungsintensität erforderlich ist, um Bodensackungen bzw. Setzungen zu verursachen, weshalb solche Effekte allenfalls im Nahbereich um z. B. eine Vibrationsramme zu erwarten sind. Auf dieser Grundlage wird z. B. im Anhang C der DIN 4150-3 ein Mindestabstand einer durch Vibrationsrammung einzubringenden Spundwand gemäß Bild 4 empfohlen.

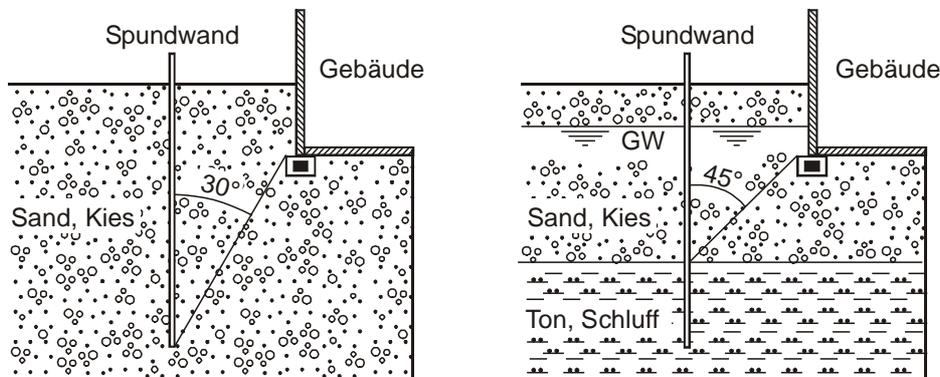


Bild 4: Mindestabstand zwischen Spundwand und Gebäude für Vibrationsrammung (DIN 4150-3 Anhang C)

Bodensackungen können durch eine vibrationsbedingte Reduktion der Scherfestigkeit und dadurch verursachte Kornumlagerungen auftreten. Als diesbezüglich maßgeblicher Parameter wird in der Regel die resultierende Bodenbeschleunigung angesehen. Als Grenzwert für lockere und mitteldichte nichtbindige Böden, bei dessen Überschreitung Kornumlagerungen nicht mehr ausgeschlossen werden können, wird von Funk (1996) ein Drittel der Erdbeschleunigung g vorgeschlagen:

$$a_R^{Boden} \leq \frac{1}{3} g \approx 3,3 m/s^2$$

Die Beschleunigungsamplitude ergibt sich für eine Vibrationserschütterung aus der Arbeitsfrequenz f und der resultierenden Bodenschwinggeschwindigkeitsamplitude zu

$$a_R^{Boden} = 2\pi f v_R^{Boden}$$

Für Rammerschütterungen ist für f hier die dominierende Frequenz der Schwingung einzusetzen, die sowohl von der Bodenart als auch von der Entfernung zur Rammstelle (bei größeren Abständen dominieren tiefere Frequenzen) abhängt. Sie liegt meist im Bereich zwischen 8 Hz (bindige Böden) und 15 Hz (Sand, Kiese) bzw. 30 Hz (Stein), vgl. Funk (1996).

Anzumerken ist aber, dass sich ein erheblicher Verdichtungseffekt erst bei Beschleunigungen ergibt, die den Wert der Erdbeschleunigung g deutlich übersteigen. Die zu erwartende Verdichtung infolge des o. g. Beschleunigungsgrenzwertes ist sehr gering.

4 Anwendungsbeispiel

Auf Grundlage der unter Ziff. 2 und 3 dargestellten Zusammenhänge lässt sich für das eingangs dargestellte Problem (s. Bild 1) eine Erschütterungsbewertung und eine Beurteilung einer möglichen Schadensverursachung vornehmen.

Zunächst wird die resultierende maximale Bodenschwinggeschwindigkeit und die Schwingbeschleunigung für die betroffenen Gebäude abgeschätzt. Die Energie ergibt sich aus dem Quotient von Motorleistung $W = 35 \text{ kW}$ und Arbeitsfrequenz $f = 30 \text{ Hz}$ zu $E = 1,17 \text{ kNm}$ (pro Schwingperiode). Nach der in Tab. 1 angegebenen Gleichung ergibt sich $v_R^B = 3,1 \text{ mm/s}$.

Die resultierende Bodenbeschleunigung ist dann $a_R^B = 2\pi f v_R^B = 0,58 \text{ m/s}^2 \approx g/17$. Dieser Wert ist so gering, dass eine Bodensackung ausgeschlossen werden kann.

Die Fundamentalschwinggeschwindigkeit kann direkt nach den in Tab. 2 angegebenen Gleichungen abgeschätzt werden. Das Gewicht der Walze beträgt $G = 6,3 \text{ t}$. Zu erwarten wäre damit eine maximale Schwinggeschwindigkeit von $v_{i,\max}^F = 4,31\sqrt{G}/r = 0,31 \text{ mm/s}$ (mittlerer Wert) bzw. von $v_{i,\max}^F = 10,87\sqrt{G}/r = 0,78 \text{ mm/s}$ (ungünstiger Wert, 2,25 %

Überschreitungswahrscheinlichkeit). Für Dauererschütterungen enthält die DIN 4150-3 keine Anhaltswerte für Fundamentalschwinggeschwindigkeiten. Es könnte hier die schweizerische Norm SN 640312a herangezogen werden, die einen Grenzwert von 4 mm/s enthält. Der ungünstige Prognosewert von 0,78 mm/s ist deutlich kleiner als dieser Wert.

Die Übertragungsfaktoren k_x^{F-OG} liegen etwa zwischen 0,5 und 2,0. Setzt man den maximalen Übertragungsfaktor und den ungünstigen Prognosewert für die Fundamentalschwingung an, so ergibt sich $v_{x/y}^{OG} \leq 1,56 \text{ mm/s}$. Dieser sehr ungünstig berechnete Wert ist deutlich geringer als der Anhaltswert der DIN 4150-3 (s. Tab. 4) von 5 mm/s.

Bezüglich der Deckenschwingungen kann bei einer Betriebsfrequenz der Anhänger-Vibrationswalze von 30 Hz Resonanz nicht ausgeschlossen werden. Der Übertragungsfaktor kann zu $k_{z,\max}^{F-D} = 10$ abgeschätzt werden. Daraus ergibt sich ein ungünstiger Prognosewert der vertikalen Deckenschwinggeschwindigkeitsamplitude von $v_{z,\max}^D = 7,8 \text{ mm/s}$. Auch dieser Wert ist noch geringer als der Anhaltswert der DIN 4150-3 von 10 mm/s.

Insgesamt lässt sich somit feststellen, dass in dem betrachteten Fall die Erschütterungen durch die Anhänger-Vibrationswalze als Hauptschadensursache für Rissbildungen an den Gebäuden mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden können.

Literatur

Achmus, M., Kaiser, J., tom Würden, F. (2005): Bauwerkserschütterungen durch Tiefbauarbeiten, Grundlagen – Messergebnisse – Prognosen. Bericht 20 der Informationsreihe des Instituts für Bauforschung e. V., Hannover.

Funk, K. (1996): Expertensystem für Lärm- und Erschütterungsprognosen beim Einbringen von Spundbohlen. Mitteilungen des Curt-Risch-Institutes für Dynamik, Schall- und Messtechnik der Universität Hannover, Eigenverlag.

Funk, K., Gerasch, W. (1995): Expertensystem für Lärm- und Erschütterungsprognosen beim Einbringen von Spundbohlen. Pfahl-Symposium 1995, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig.

Wieck, J. (2003): Erschütterungen im Bauwesen. In: Die vorsorgliche Beweissicherung im Bauwesen, Schadenfreies Bauen, Band 31, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.