

Prognose von Bauwerkserschütterungen infolge Ramm- und Vibrationsverdichtungsarbeiten

M. Achmus, J. Kaiser

Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Universität Hannover, Deutschland

KURZFASSUNG

Beim Einbringen von Pfählen oder Spundbohlen und beim Vibrationsverdichten von Böden entstehen Erschütterungen, die auf umliegende Gebäude übertragen werden und dort Schäden hervorrufen können. Für eine Risikobewertung ist eine Prognose der entstehenden Erschütterungsintensität notwendig. In diesem Aufsatz werden die Ergebnisse einer Auswertung umfangreicher Messdaten dargestellt und es werden auf dieser Grundlage Prognosegleichungen für Fundamentalschwinggeschwindigkeiten abgeleitet. Abschließend werden Empfehlungen zur Prognose gegeben. Die Anwendung der Gleichungen im Rahmen einer Schadensrisikobewertung wird an einem Beispiel erläutert.

Schlüsselwörter: Erschütterungsprognose, Rammarbeiten, Vibrationsverdichtung, Schadensrisikobewertung

1 EINFÜHRUNG

Bei vielen Verfahren des Tiefbaus wird gezielt dynamisch auf den Baugrund eingewirkt, beispielsweise um Bodenwiderstände gegen das Eindringen von Pfählen oder Spundbohlen zu überwinden und um vor allem nichtbindige Böden effektiv zu verdichten. Bei diesen Bauverfahren werden Erschütterungen durch den Baugrund auf benachbarte bauliche Anlagen übertragen und können dort Schäden verursachen. Im Zuge einer Bauplanung gilt es daher, mögliche Erschütterungseinwirkungen und daraus resultierende Risiken abzuschätzen und die Baugeräte so auszuwählen, dass eine Beeinträchtigung benachbarter Bauwerke vermieden oder zumindest minimiert wird.

Durch ein Baugerät verursachte Erschütterungen breiten sich im Untergrund als elastische Wellen aus. Zu unterscheiden sind im Wesentlichen Kompressions-, Scher- und Oberflächenwellen, wobei letztere im „Fernfeld“, d. h. etwa ab einem Abstand von der halben Wellenlänge von der Erschütterungsquelle, dominiert. Mit zunehmendem Abstand von der Erschütterungsquelle nimmt die Erschütterungsintensität – üblicherweise durch die Amplitude der Schwinggeschwindigkeit beschrieben – infolge geometrischer sowie

hysteretischer Dämpfung ab. Idealisiert man den Baugrund als elastischen Halbraum, so ergibt sich folgende Gesetzmäßigkeit für die Amplitudenabnahme der Schwinggeschwindigkeit v einer harmonischen Schwingung mit dem Abstand r von der Erschütterungsquelle:

$$v(r) = v(r_0) \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-n} e^{-\alpha_R(r-r_0)} \quad (1)$$

Der Faktor n ergibt sich dabei für das Fernfeld (Oberflächenwelle) zu 0,5. Der Koeffizient α_R berücksichtigt die hysteretische (Material-) Dämpfung und ist im allgemeinen frequenzabhängig.

Liegt für Erschütterungsprognosen kein Referenzwert $v(r_0)$ vor, so kann die eingeleitete Erschütterungsenergie E als Bezugswert verwendet werden:

$$v(r) = k \frac{\sqrt{E}}{r^n} e^{-\alpha_R r} \quad (2)$$

Vielfach wird folgende vereinfachte Gleichung für die Auswertung von Messungen oder Erschütterungsprognosen verwendet:

$$v(r) = K \frac{\sqrt{E}}{r^{n^*}} \quad (3)$$

Der Koeffizient n^* erfasst somit die gemeinsame Wirkung von geometrischer Dämpfung und

Materialdämpfung. Der Faktor K hängt von den Systembedingungen (u. a. Baugrundaufbau, Art der Erschütterungsquelle, gegebenenfalls Erschütterungsfrequenz) ab.

In der Tabelle 1 sind einige in der Praxis verwendete Prognoseformeln für Bodenschwinggeschwindigkeiten angegeben.

Tabelle 1. Prognosegleichungen für Bodenschwinggeschwindigkeiten.

Eurocode 3, Teil 5:	$v = K\sqrt{E} / r$ Schlagrammung: $K = 15,8-31,6$, Vibrationsrammung: $K = 23,7$
Hiller & Crabb (2000):	$v = k_{sr} \sqrt{E} / r_F^{1,3}$ Schlagrammung in Lockergestein: $k_{sr} = 31,6-94,6$, r_F = Fußpunktabstand Rammgut
Hiller & Crabb (2000):	$v = k_s [A_0 / (r + w)]^{1,5}$ Vibrationswalzen, stationär: $k_s = 75$ (Mittelwert, $P = 50\%$) bzw. 276 ($P = 5\%$), A_0 = Schwingamplitude in mm, w = Bandagenbreite in m
Wheeler (1990):	$v = 100\sqrt{W / f} / r$ Vibrationswalzen: W = Nennleistung in kW, f = Betriebsfrequenz in Hz
v in mm/s, E in kNm, r bzw. r_F in m	

Für die Prognose möglicher Bauwerksschäden dient nicht die Boden-, sondern die Fundamentalschwinggeschwindigkeit als Basiswert. Bei der Übertragung auf das Fundament ändert sich die maximale Schwinggeschwindigkeit. In aller Regel kommt es zu einer Reduktion, nur im Resonanzfall kann es auch zu einer – meist aber geringfügigen – Erhöhung kommen.

Wegen der Unsicherheit bezüglich der Übertragungsfaktoren ist es vorteilhaft, direkte Prognosegleichungen für die maximale Komponente der Fundamentalschwinggeschwindigkeiten zur Verfügung zu haben. Dies ist auch insofern zweckmäßig, als bei Erschütterungsmessungen in aller Regel die Messgeräte an den Fundamenten und nicht im Boden angeordnet werden und somit derartige Gleichungen einfach kalibriert werden können.

Solche Prognosegleichungen sind allerdings wenig verbreitet. In Tabelle 2 sind von Wieck (2003) angegebene Gleichungen wiedergegeben. Diese basieren wohl auf Erfahrungen, die Datengrundlage ist allerdings nicht genau dokumentiert. Da für Vibrationsverdichtungsgeräte die abgestrahlte Erschütterungsenergie nur schwer abzuschätzen ist, verwendet Wieck als maßgebenden Parameter das Betriebsgewicht G des Geräts.

Tabelle 2. Prognosegleichungen von Wieck (2003) für Fundamentalschwinggeschwindigkeiten.

$v_{Fi,max} = 11,07\sqrt{E} / r^{1,3}$	Schlagrammung
$v_{Fi,max} = 6,8 / r^{0,8}$	Vibrationsrammung
$v_{Fi,max} = 1,1\sqrt{G} / r^{0,7}$	Vibrationswalzen
$v_{Fi,max} = 1,7 / r^{0,5}$	Vibrationsplatten
v in mm/s, E in kNm, r in m, G in t	

2 AUSWERTUNG VON ERSCHÜTTERUNGSMESSUNGEN

2.1 Datenbasis

Zur Auswertung lagen insgesamt 288 Datensätze von Erschütterungsmessungen im Zuge von Ramm- und Vibrationsverdichtungsarbeiten vor, bei denen jeweils alle drei Komponenten der Fundamentalschwinggeschwindigkeiten gemessen worden waren. Die Messungen wurden überwiegend im süddeutschen Raum vorgenommen und sind insofern durch die dort vorherrschenden Baugrundverhältnisse geprägt. In vielen Fällen – aber natürlich keinesfalls verallgemeinerbar – steht dort unter Lockergesteinen von einigen Metern Mächtigkeit klüftiger Fels an.

Ziel der Auswertung war die Ableitung von Prognosegleichungen für die maximale Komponente der Fundamentalschwinggeschwindigkeit. Entsprechend wurde jeweils nur der gemessene Maximalwert der Auswertung zugrunde gelegt.

2.2 Vibrationsverdichtung

Für Vibrationswalzen lagen insgesamt 68 Datensätze vor. Die gemessenen maximalen Schwinggeschwindigkeiten sind abhängig vom Abstand des betrachteten Fundaments von der Walze in Bild 1 dargestellt. Abhängig vom Gewicht wurden die Geräte dabei vier Gewichtsklassen (Gwk) zugeordnet. Aus Bild 1 ergibt sich klar die erwartete Tendenz, dass Geräte mit höherem Gewicht und entsprechend höherer Verdichtungsenergie auch höhere Erschütterungsintensität bewirken.

Für die Gewichtsklassen 1 und 4 lagen nur Messwerte für jeweils einen Abstand r vor. Für die Gewichtsklassen 2 ($G = 6,5$ bis $7,7$ t) und 3 ($G = 10,6$ bis $12,6$ t) lagen Werte für verschiedene Abstände vor, was die Ableitung abstandsabhängiger Prognosegleichungen ermöglicht.

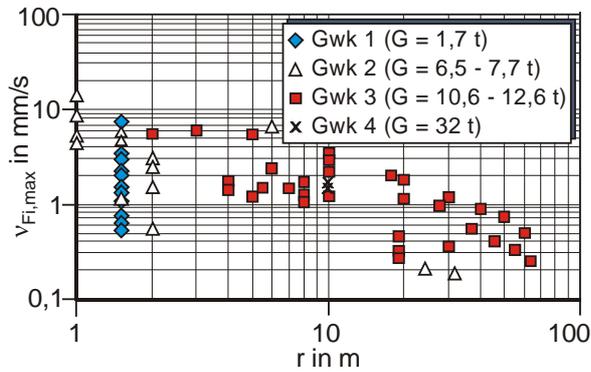


Bild 1. Messwerte für durch Vibrationswalzen verursachte Fundamentschwinggeschwindigkeiten.

Als die eingeleitete Erschütterungsenergie repräsentierender Parameter wurde das Betriebsgewicht G angesetzt. Grundlage der Auswertung sind somit die folgenden Gleichungen:

$$v_{Fi,max} = \tilde{K} \frac{\sqrt{G}}{r^{n^*}} \quad (4)$$

bzw.

$$v_{Fi,max} = K \frac{\sqrt{G}}{r} \quad (5)$$

Darin ist jeweils G in t, r in m und v in mm/s zu setzen.

Anhand einer Regressionsanalyse wurden jeweils die zu bestimmten Überschreitungswahrscheinlichkeiten gehörigen Koeffizienten K bzw. \tilde{K} ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengestellt. In Bild 2 sind die Prognoseformeln für 50%-ige und für 2,25%-ige Überschreitungswahrscheinlichkeit den Messwerten gegenübergestellt.

Tabelle 3. Ergebnisse der Auswertungen für Vibrationswalzen (Gwk 2 und Gwk 3).

Ansatz	Überschreitungswahrscheinlichkeit		
	P = 50%	P = 5%	P = 2,25%
Gl. (4);	$\tilde{K} = 2,30$	6,07	7,47
	$n^* = 0,724$	0,724	0,724
Gl. (5);	$K = 4,31$	9,72	10,87

Für Vibrationsplatten lagen insgesamt 36 Datensätze vor (Bild 3). Für Betriebsgewichte von 0,45 bis 0,6 t (Gwk 2) lagen Messwerte für verschiedene Abstände zum Fundament vor, sodass analog zur Vorgehensweise bei Vibrationswalzen eine Ableitung von Prognosegleichungen möglich war. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 angegeben, die Prognoselinien sind auch in Bild 3 eingetragen.

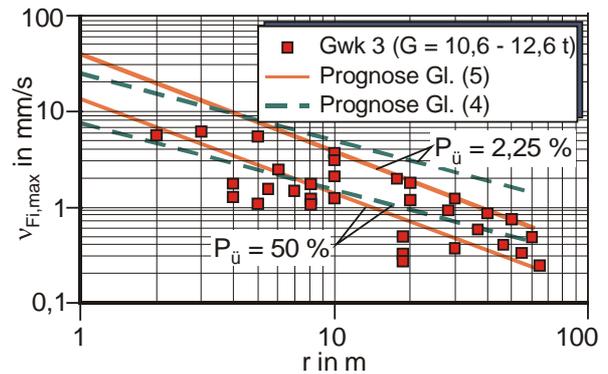
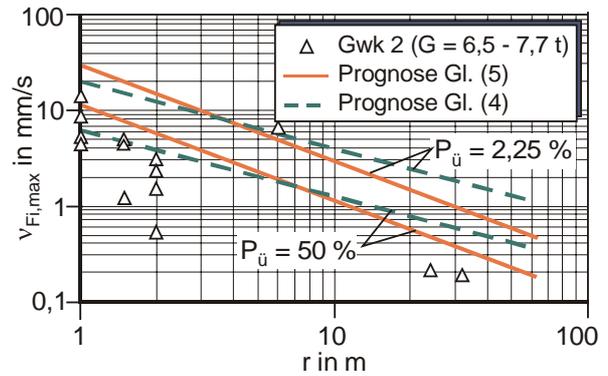


Bild 2. Gegenüberstellung von Mess- und Prognosewerten für Vibrationswalzen.

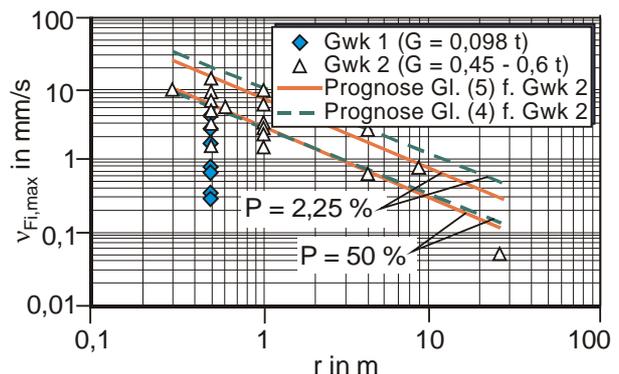


Bild 3. Gegenüberstellung von Mess- und Prognosewerten für Vibrationsplatten.

Tabelle 4. Ergebnisse der Auswertungen für Vibrationsplatten (Gwk 2, $G = 0,45$ bis $0,6$ t).

Ansatz	Überschreitungswahrscheinlichkeit		
	P = 50%	P = 5%	P = 2,25%
Gl. (4);	$\tilde{K} = 4,12$	11,82	14,83
	$n^* = 0,942$	0,942	0,942
Gl. (5);	$K = 4,28$	9,67	10,82

Der Parameter n^* gemäß Gl. (4) ergibt sich nahezu zu 1,0, sodass die Unterschiede der Prognoseformeln nach Gl. (4) und (5) hier gering sind. Interessant ist, dass die K -Werte für Vibrationsplatten nahezu identisch mit denen für Vibrati-

onswalzen sind. Trotz des erheblich geringeren Gewichts der Vibrationsplatten kann somit dieselbe Prognosegleichung (5) wie für Vibrationswalzen verwendet werden.

2.3 Vibrationsrammung

Für Vibrationsrammungen konnten insgesamt 155 Messdatensätze ausgewertet werden.

Die emittierte Energie bei Vibrationsrammungen (pro Schwingperiode) wird üblicherweise durch den Quotienten aus hydraulischer Geräteleistung W und Betriebsfrequenz f beschrieben:

$$E = \frac{W}{f} \quad (6)$$

Geräte mit vergleichbaren Energien wurden fünf Energieklassen (Enk) zugeordnet. In Bild 4 sind die Messwerte für die Fundamentalschwinggeschwindigkeit abhängig vom Abstand sowie von der Energieklasse dargestellt.

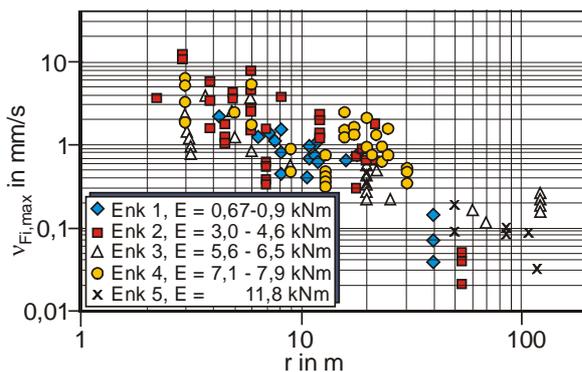


Bild 4. Messwerte für durch Vibrationsrammen verursachte Fundamentalschwinggeschwindigkeiten.

Auffällig ist, dass Geräte der Energieklasse 2 bei kleinen Abständen zum Gebäude zum Teil höhere Erschütterungsintensitäten verursachen als Geräte höherer Energieklassen. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass schwerere Geräte im Nahbereich zu Gebäuden nicht mit der vollen Nennleistung betrieben werden. Gegebenenfalls waren auch die kleineren Geräte etwas unterbemessen, sodass nur ein geringer Rammfortschritt erreicht wurde, was mit einer relativ hohen Energieemission einhergeht.

Eine Regressionsanalyse wurde zunächst für die Geräte der Energieklasse 2 unter Ansatz einer mittleren Energie pro Schwingungsperiode von 4 kNm durchgeführt. Grundlage der Auswertung waren folgende Gleichungen (vgl. Gl. 3):

$$v_{Fi,max} = \tilde{K} \frac{\sqrt{E}}{r^{n^*}} \quad (7)$$

$$v_{Fi,max} = K \frac{\sqrt{E}}{r} \quad (8)$$

Ergänzend wurde auch eine quadratische Regressionsanalyse zur Bestimmung der Parameter a , m und n gemäß der folgenden Gleichung vorgenommen:

$$\log v_{Fi,max} = a + m \log(r) + n(\log(r))^2 \quad (9)$$

Als Ergebnis der Analysen sind die zu bestimmten Überschreitungswahrscheinlichkeiten gehörenden Parameter in Tabelle 5 zusammengestellt.

Tabelle 5. Ergebnisse der Auswertungen für Vibrationsrammen (Enk 2, $E = 3,0$ bis $4,6$ kNm).

Ansatz	Überschreitungswahrscheinlichkeit			
	P = 50%	P = 5%	P = 2,25%	
Gl. (7);	$\tilde{K} =$	13,5	52,4	70,5
	$n^* =$	1,40	1,40	1,40
Gl. (8);	$K =$	7,90	16,66	18,52
Gl. (9);	$a =$	0,68	1,24	1,36
	$m =$	0,23	0,23	0,23
	$n =$	-0,78	-0,78	-0,78

In Bild 5 sind die Ergebnisse der Prognoseformeln für 50%-ige und 2,25%-ige Überschreitungswahrscheinlichkeit den Messwerten gegenübergestellt. Mittlere und maximal zu erwartende Schwinggeschwindigkeiten lassen sich bei Abständen bis rd. 20 bis 30 m mit allen drei Ansätzen recht gut abschätzen. Bei größeren Abständen werden die Werte durch die Prognosen gemäß Gl. (7) und (8) überschätzt.

In Bild 6 sind schließlich die Messergebnisse für die Energieklassen 3 und 4 den Prognosewerten (ermittelt gemäß Gl. (7) und (8) mit jeweils mittleren Energiewerten) gegenübergestellt. Die grundsätzliche Eignung der Prognoseformeln für Abstände bis rd. 30 m bestätigt sich auch hier.

2.4 Schlagrammung

Für Schlagrammungen wurden insgesamt 29 Messdatensätze ausgewertet. Erfasst wurden aber nur zwei Geräte, und zwar jeweils Diesellären mit maximalen Schlagenergien von 31,275 kNm (Delmag D12) und 67,1 kNm (Delmag D22/23).

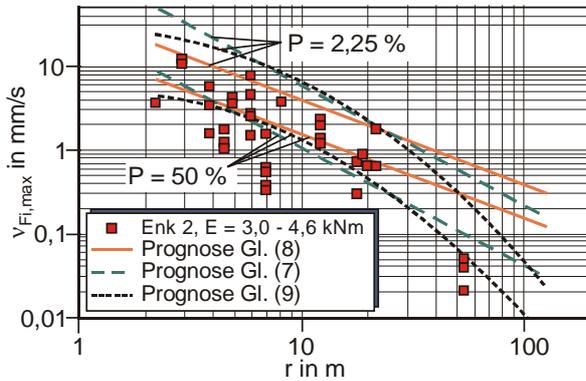


Bild 5. Gegenüberstellung von Mess- und Prognosewerten für Vibrationsrammen (Enk 2, $E = 3,0$ bis $4,6$ kNm).

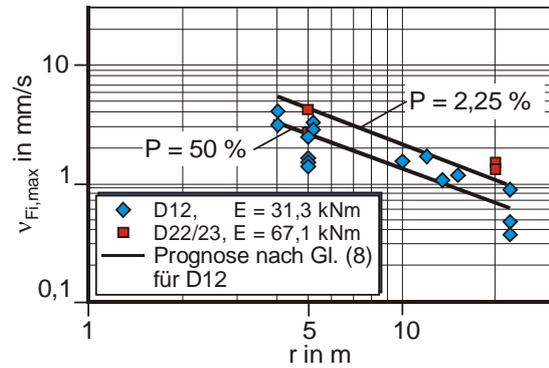


Bild 7. Gegenüberstellung von Mess- und Prognosewerten für Dieselbären D12 und D22/23.

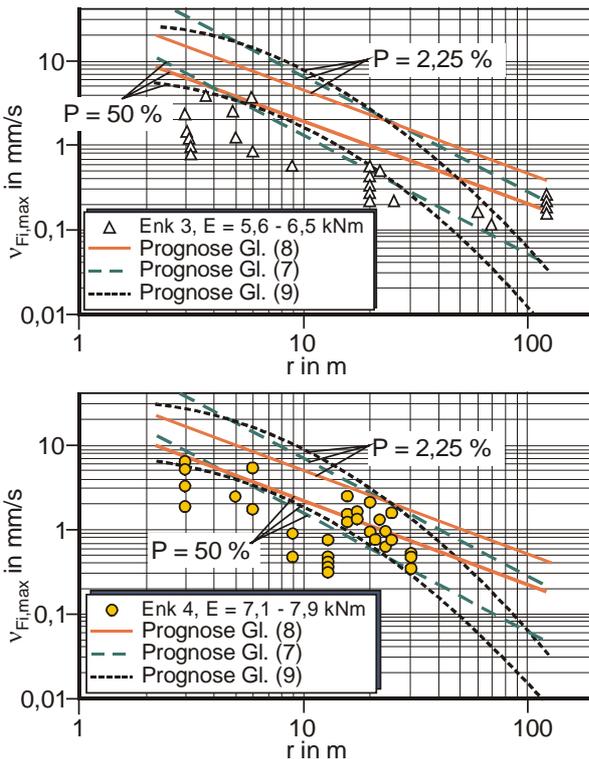


Bild 6. Gegenüberstellung von Mess- und Prognosewerten für Vibrationsrammen (Enk 3 und Enk 4).

In Bild 7 sind die Messwerte abhängig vom Abstand zum betrachteten Fundament dargestellt. Für den Dieselbären D12 konnten aufgrund der ausreichenden Zahl von Daten mittels Regressionsanalysen Prognosegleichungen abgeleitet werden. Basis waren wiederum die Gleichungen (7) und (8). Die ermittelten K -Werte sind in Tabelle 6 angegeben. Die entsprechenden Prognoselinien sind in Bild 7 eingetragen.

Tabelle 6. Ergebnisse der Auswertungen für Dieselbären D12 ($E = 31,275$ kNm).

Ansatz	Überschreitungswahrscheinlichkeit		
	$P = 50\%$	$P = 5\%$	$P = 2,25\%$
Gl. (7);	$\tilde{K} = 2,15$	3,40	3,73
	$n^* = 0,95$	0,95	0,95
Gl. (8);	$K = 2,45$	3,58	3,82

3 EMPFEHLUNGEN ZUR RISIKOABSCHÄTZUNG

Prognosewerte für Fundamentalschwinggeschwindigkeiten sind die Grundlage für die Abschätzung einer möglichen Gebäudeschädigung durch Erschütterungen. In den einschlägigen Richtlinien – in Deutschland die DIN 4150 Teil 3 – wird eine Beurteilung anhand der maximalen Schwinggeschwindigkeiten an den Fundamenten und an Bauteilen im obersten Geschoss des Gebäudes sowie anhand vertikaler Deckenschwinggeschwindigkeiten vorgenommen.

Wie sich Fundamentalschwingungen auf Bauteile übertragen, hängt von den Eigenfrequenzen der Bauteile und damit von den Eigenschaften des Gebäudes und seiner Gründung ab. Die Veränderung der Schwinggeschwindigkeitsamplitude wird durch Übertragungsfaktoren beschrieben:

$$v_{\text{Bauteil}} = k_{\text{Bauteil}} v_F \quad (10)$$

Eine Übersicht bezüglich der Abschätzung von Übertragungsfaktoren wird in Achmus et al. (2005) gegeben. Durch Resonanzeffekte kann es vor allem bei vertikalen Deckenschwingungen zu deutlichen Erhöhungen der Schwinggeschwindigkeit kommen. Erfahrungsgemäß können im Reso-

nanzfall Übertragungsfaktoren von $k_{z,Decke} \leq 10$ für Stahlbetondecken und von $k_{z,Decke} \leq 15$ für Holzbalken-, Stahlstein- und Stahlträgerdecken auftreten (Funk 1996). Bei transients Erregung, z. B. infolge Schlagrammung, sind die Faktoren geringer, da nur ein Teil der Erschütterung die Resonanzfrequenz aufweist. Bei nichtresonanter Anregung gilt nach Funk (1996) $k_{z,Decke} \leq 1,5$.

Für horizontale Bauteilschwingungen spielen Resonanzen meist keine Rolle. Nur bei Gebäuden auf weichem Untergrund können gegebenenfalls leichte Amplitudenerhöhungen gegenüber der Fundamentalschwingung auftreten.

Für die Abschätzung der Fundamentalschwinggeschwindigkeit im Rahmen einer Risikobewertung wird empfohlen, einen mittleren (wahrscheinlichen) Wert sowie einen ungünstigen Wert zu ermitteln. In Tabelle 7 sind die empfohlenen, aus den unter Kapitel 3 beschriebenen Auswertungen ermittelten Prognosegleichungen zusammengestellt. Es werden dabei jeweils die Ansätze mit $n^* = 1$ angegeben, vgl. Gl. (4) bzw. (7). Als ungünstiger Wert wird hier der Prognosewert für 2,25% Überschreitungswahrscheinlichkeit herangezogen. Bei Vibrationsrammung ist gegebenenfalls zu berücksichtigen, dass sich für Abstände größer als rd. 30 m zu große Werte ergeben.

Tabelle 7. Empfohlene Prognosegleichungen für Fundamentalschwinggeschwindigkeiten.

Vibrationsrammung:	$v_{Fi,max} = K_{VR} \frac{\sqrt{W/f}}{r}$
	$K_{VR} = 7,90$ (wahrscheinlicher Wert)
	$K_{VR} = 18,52$ (ungünstiger Wert)
Schlagrammung (Dieselbär):	$v_{Fi,max} = K_{SR} \frac{\sqrt{E}}{r}$
	$K_{SR} = 2,45$ (wahrscheinlicher Wert)
	$K_{SR} = 3,82$ (ungünstiger Wert)
Vibrationsverdichtung:	$v_{Fi,max} = K_{Verd} \frac{\sqrt{G}}{r}$
	$K_{Verd} = 4,31$ (wahrscheinlicher Wert)
	$K_{Verd} = 10,87$ (ungünstiger Wert)
W in kW, f in 1/s, r in m, G in t, v in mm/s	

Die Vorgehensweise bei der Risikobewertung sei abschließend an einem Beispiel erläutert. In einem Abstand von minimal rd. 15 m von Wohngebäuden sollen Verdichtungsarbeiten mit einer Vibrationswalze vorgenommen werden. Die vor-

gesehene Walze hat ein Betriebsgewicht von 6 t und arbeitet mit einer Frequenz von 25 Hz.

Mit den Gleichungen der Tabelle 7 ergibt sich ein wahrscheinlicher Wert der Fundamentalschwinggeschwindigkeit von $v_{Fi,max} = 0,70$ mm/s und ein ungünstiger Wert von $v_{Fi,max} = 1,78$ mm/s.

In der DIN 4150 Teil 3 ist ein Anhaltswert von 5 mm/s für horizontale Schwinggeschwindigkeiten von Bauteilen angegeben, bei dessen Unterschreitung nicht mit Schäden zu rechnen ist. Unter der Annahme, dass die Gebäude auf gut tragfähigem Untergrund gegründet sind, kann eine Amplitudenerhöhung für horizontale Bauteilschwingungen im obersten Geschoss ausgeschlossen werden. Selbst der ungünstige Wert bleibt somit deutlich unter dem genannten Anhaltswert.

Für vertikale Deckenschwinggeschwindigkeiten gibt die DIN 4150 Teil 3 für Wohngebäude einen Anhaltswert von 10 mm/s an. Bei der Betriebsfrequenz der Walze von 25 Hz kann zumindest für Stahlbetondecken Resonanz nicht ausgeschlossen werden. Schätzt man den Übertragungsfaktor zu $k_{z,Decke} \approx 10$, so ergibt sich ein wahrscheinlicher Prognosewert von 7,0 mm/s und ein ungünstiger Wert von 17,8 mm/s.

Dies bedeutet, dass eine Überschreitung des Anhaltswertes der DIN 4150 Teil 3 im ungünstigen Fall möglich ist. Eine Überschreitung bedeutet nicht, dass eine Gebäudeschädigung zwingend eintritt. Sofern aber keine kleinere Walze zum Einsatz kommen kann, empfiehlt sich eine Beweissicherung der betroffenen Gebäude und eventuell auch die Durchführung baubegleitender Schwingungsmessungen.

LITERATUR

- M. Achmus, J. Kaiser, F. tom Wörden, Bauwerksererschütterungen durch Tiefbauarbeiten. Berichtsheft 20 des Instituts für Bauforschung e. V., Hannover, 2005.
- K. Funk, Expertensystem für Lärm- und Erschütterungsprognosen beim Einbringen von Spundbohlen. Mitteilungen des Curt-Risch-Instituts für Dynamik, Schall- und Messtechnik der Universität Hannover, 1996.
- D.M. Hiller, G.I. Crabb, Groundborne vibration caused by mechanised construction works. Transport Research Laboratory, TRL report 429, Crowthorne, 2000.
- A.B.S. Wheeler, The attenuation of ground vibrations caused by vibratory rollers. M.Sc. thesis, University of Durham, UK, 1990.
- J. Wieck, Erschütterungen im Bauwesen. In: Die vorsorgliche Beweissicherung im Bauwesen, Schadenfreies Bauen, Bd. 31, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2003.