

Ermittlung von Scherdehnungen durch Schwingungsmessungen und numerische Berechnungen

Determination of Shear Strain by Vibration Measurements and Numerical Calculations

Dipl.-Ing. Dirk Wegener, GEPRO Ingenieurgesellschaft GmbH Dresden/Technische Universität Dresden; Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle, Technische Universität Dresden

Die Scherdehnung γ ist eine wesentliche Größe für die Beurteilung der dynamischen Beanspruchung. Mit zunehmendem γ nimmt einerseits die Steifigkeit des Bodens ab und andererseits die Akkumulation bleibender Dehnungen bzw. die Porenwasserdrücke zu. Für die einwirkenden Scherdehnungen wird dabei häufig der Quotient aus Schwingungsmessungen ermittelten Schwinggeschwindigkeiten und in situ ermittelten Scherwellengeschwindigkeiten verwendet und dieser mit laborativ ermittelten Scherdehnungsgrenzen unter definierten Randbedingungen verglichen.

Im Artikel wird gezeigt, wie eine Scherdehnungsvariante definiert werden sollte, die der Scherdehnung unter den Randbedingungen der Laborversuche entspricht. Weiterhin werden numerische Berechnungen zur Wellenausbreitung im elastischen Halbraum geführt. Anhand der Berechnungsergebnisse wird überprüft und gezeigt, dass die Beziehung $\gamma = v/c_s$ nicht allgemein gültig ist und insbesondere im Nahbereich der Belastung nicht angewendet werden kann. Außerdem werden Ergebnisse von Schwingungsmessungen an einer Bahnstrecke vorgestellt und angegeben, wie man auch im Nahbereich der Belastung die Scherdehnungsamplitude ermitteln kann und wie groß der Unterschied zum Quotient aus Schwinggeschwindigkeit zur Scherwellengeschwindigkeit ist.

The shear strain γ is an essential parameter for assessing dynamic loads. As the shear strain increases, the stiffness of the soil decreases while at the same time there is an increase in the accumulation of permanent strain and in the pore water pressure. The shear strain is frequently taken as the quotient of the vibration velocities derived from vibration measurements and the velocities of the shear waves determined in situ and compared with the shear strain li-

mits determined under defined boundary conditions in the laboratory.

In this article it is shown how a shear strain invariant corresponding to the shear strain under the boundary conditions in the laboratory tests is defined. Numerical calculations of the wave propagation in the elastic half space are also performed. On the basis of the results of the calculations it is demonstrated that the relationship $\gamma = v/c_s$ is not generally valid and cannot be applied, in particular close to the load. In addition, results of vibration measurements performed on a railway track are presented and it is shown how the shear strain amplitude can be determined close to the load and to what extent it differs from the quotient of the vibration velocity and the shear wave velocity.

1 Bedeutung der Scherdehnung γ *Significance of shear strain γ*

Die Scherdehnung γ ist eine wesentliche Größe für die Beurteilung der dynamischen Beanspruchung. Mit zunehmendem γ nimmt einerseits die Steifigkeit des Bodens ab und andererseits die Akkumulation bleibender Dehnungen bzw. Porenwasserdrücke zu. Man unterscheidet drei Bereiche mit unterschiedlichem charakteristischem Bodenverhalten, wie in Bild 1 veranschaulicht ist.

Zur Einteilung, ob es sich um sehr kleine Dehnungen, kleine bis mittlere Dehnungen oder mittlere bis große Dehnungen gemäß Bild 1 handelt, dienen die lineare, zyklische Scherdehnungsgrenze γ_{tl} und die volumetrische, zyklische Scherdehnungsgrenze γ_{tv} . Die Einteilung entsprechend dieser Grenzen geht auf Ladd & Dutko (1985) zurück, wie detaillierter in Jamiolkowski et. al. (1991) auf Grundlage von RC-Versuchen von

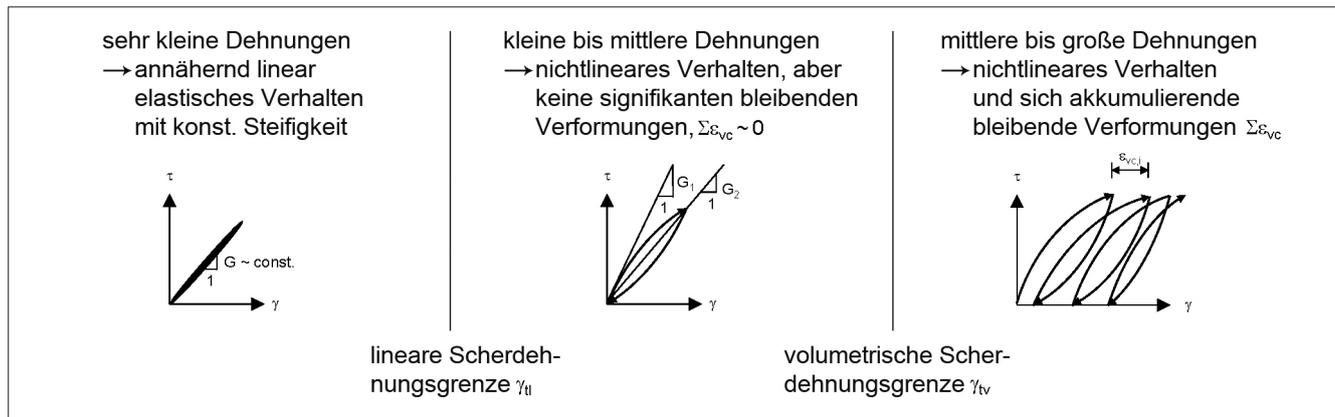


Bild 1: Typisches Bodenverhalten in den 3 Bereichen infolge zyklischer Schwellbelastung
 Figure 1: Typical soil behaviour in three areas due to cyclic pulsating loads

Lo Presti (1989) beschrieben ist. In Vucetic (1994) wurden diese Grenzen in Abhängigkeit von der Plastizität für verschiedene Sande und Tone angegeben.

Die lineare, zyklische Scherdehnungsgrenze γ_{tl} stellt das Ende des elastischen Bereiches dar und wird z. B. nach Vucetic (1994) und Wichtmann & Triantafyllidis (2009) so definiert, dass $G(\gamma)/G_0 = 0,99$ beträgt. Die volumetrische Scherdehnungsgrenze γ_{tv} beschreibt nach Vucetic (1994) die Grenze, ab deren Überschreitung in undrainierten Versuchen ein deutlicher Anstieg des Porenwasserdruckes und in drainierten Versuchen eine messbare Akkumulation von bleibenden Verformungen eintritt.

2 Definition der Scherdehnung

Definition of shear strain

In der Kontinuumsmechanik ist die aus einer Schubbeanspruchung resultierende volumenkonstante Winkelverformung als Scherdehnung bezeichnet. Allgemein kön-

nen die Gesamtdehnungen in einen isotropen Anteil zur Kennzeichnung einer volumetrischen Dehnung bzw. Stauchung und einen volumenkonstanten, deviatorischen Anteil für die Scherdehnung zerlegt werden. In Bild 2 ist diese Aufteilung für die Gesamtverformungen in einer Ebene veranschaulicht, siehe auch Wegener & Herle (2010a).

Da die einzelnen Komponenten des deviatorischen Dehnungstensors von der Drehung des Koordinatensystems abhängen, ist es notwendig, als charakteristische Größe eine Invariante dieses Dehnungstensors zu verwenden. Gewählt wird dafür die zweite Invariante des deviatorischen Dehnungstensors II_e . Dreht man das Koordinatensystem in die Richtung der Hauptdehnungen 1, 2 und 3 mit den Hauptdehnungskomponenten ϵ_1 , ϵ_2 und ϵ_3 erhält man:

$$II_e = 1/2 e_{ij} e_{ij} = 1/6 [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2] \quad (1)$$

Bei reiner Scherbeanspruchung bleibt das Volumen konstant und die 2. Invariante des deviatorischen

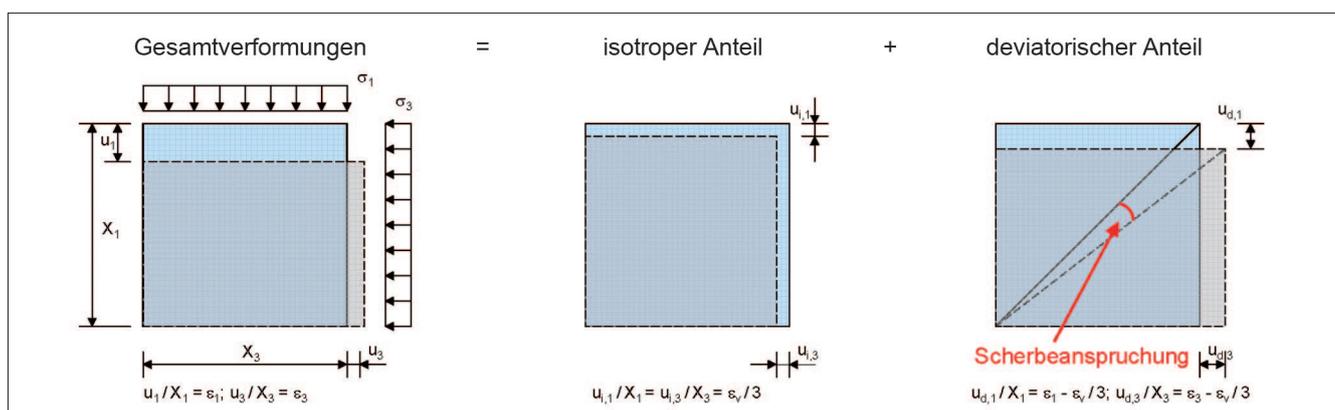


Bild 2: Aufteilung der Gesamtverformungen in isotropen und deviatorischen Anteil in einer Ebene mit $u_2 = 0$ bzw. $\epsilon_2 = 0$
 Figure 2: Division of the overall deformations into isotropic and deviatoric components in a plane with $u_2 = 0$ and $\epsilon_2 = 0$

Dehnungstensors nach Gleichung (2) ergibt sich mit $\gamma_{13} = 2 \cdot \epsilon_{13}$ zu:

$$II_e = 1/2 \epsilon_{13}^2 = 1/4 \gamma_{13}^2 \quad (2)$$

Der volumenkonstante, deviatorische Dehnungsanteil eines beliebigen ebenen Verformungszustandes kann durch Drehung des Koordinatensystems auch auf einen Dehnungszustand wie bei reiner Scherbeanspruchung zurückgeführt werden. Die Scherdehnungsinvariante γ , die der Scherdehnung γ_{12} bei reiner Scherbeanspruchung entspricht, ergibt sich damit nach Gleichung (2) zu:

$$\gamma = \gamma_{13} = 2 \cdot \sqrt{II_e} \quad (3)$$

3 Ermittlung der Scherdehnung γ durch numerische Berechnungen und Vergleich mit dem Quotienten v/c_s *Determination of the shear strain γ by numerical calculations and comparison with the quotient v/c_s*

Im Folgenden werden numerische Berechnungen im linear elastischen, isotropen Halbraum mit einer dynamischen Belastung auf einer Lastfläche geführt. Dazu

wird das in Bild 3 dargestellte axialsymmetrische Modell verwendet.

Die Größe des FE-Netzes wurde so groß gewählt, dass Reflektionen an den Rändern keinen Einfluss auf den Zeitverlauf in den betrachteten Punkten haben. Der rechte Rand ist so weit entfernt, dass die Laufzeit der Kompressionswellen bzw. P-Wellen nach der Reflexion am Rand und wieder zurück bis zum betrachteten Punkt größer als der betrachtete Zeitraum ist. Der untere Rand absorbiert vollständig die P-Wellen und ist so weit entfernt, dass die Laufzeit der Scherwellen und Rayleighwellen nach der Reflexion am Rand und wieder zurück bis zum betrachteten Punkt größer als der betrachtete Zeitraum ist. Die Berechnungen wurden mit den in Tabelle 1 enthaltenen Bodenkennwerten geführt.

Für die FE-Modellierung wurden lineare quadratische Elemente mit dem Knotenabstand $l_c = 0,20$ m und einem Zeitschritt von $\Delta t = 0,001$ s verwendet. Damit ergibt sich für die verwendete P-Wellengeschwindigkeit $c_p = 200$ m/s ein β_p -Wert nach Gleichung (4) von

$$\beta_p = \Delta t \cdot c_p / l_c = 1,0 \quad (4)$$

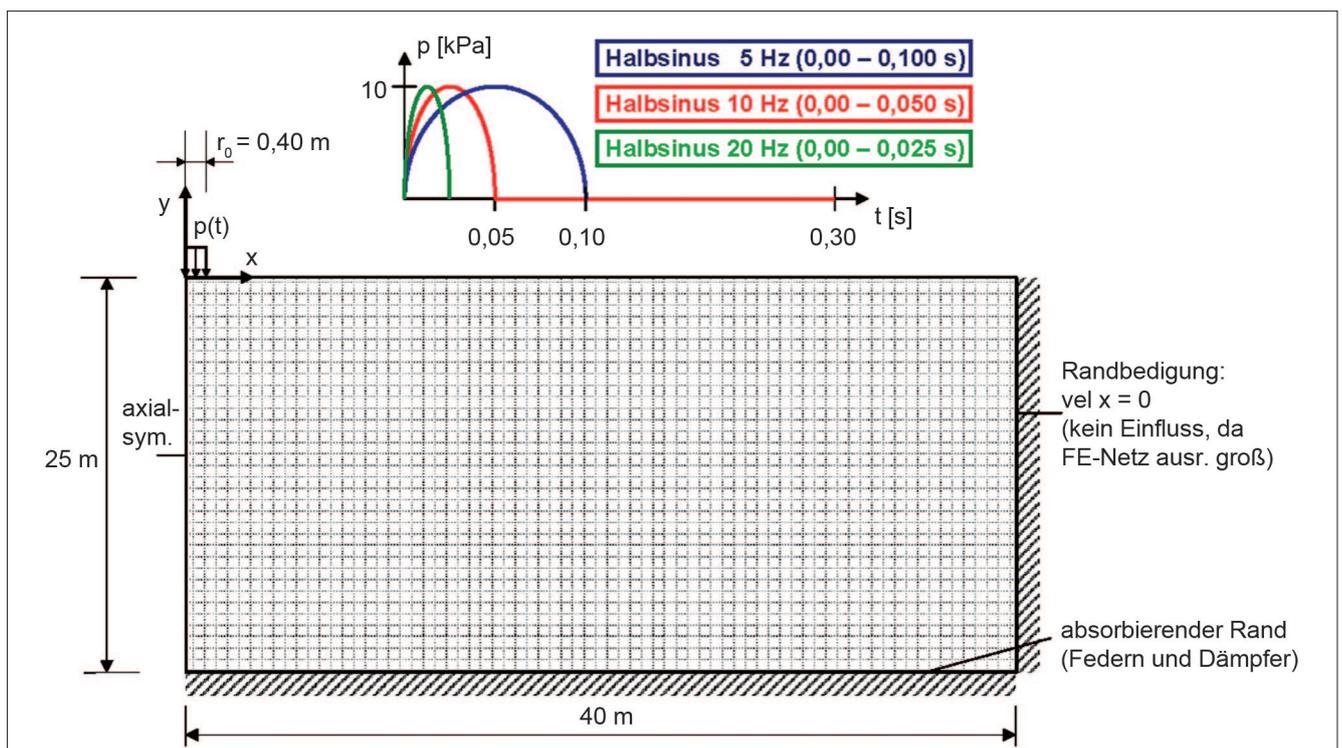


Bild 3: Geometrie und Belastung für die numerische Berechnung der Wellenausbreitung im Halbraum
Figure 3: Geometry and loads for the numerical calculations of the wave propagation in the half space

Formelzeichen	E_s	ν	E	G	ρ	c_p	c_s	c_r
Einheit	MPa	-	MPa	MPa	g/cm ³	m/s	m/s	m/s
Wert	72	0,25	60	24	1,8	200	115,5	106,2

Tabelle 1: Eingangparameter für das linear elastische Stoffgesetz
 Table 1: Input parameters for the linear elastic constitutive law

der damit den Empfehlungen in Manolis et. al. (1985), Triantafillidis (1989) und Neidhart (1994) zur Wahl der optimalen Zeitschrittlänge Δt entspricht. Die Größe der Lastfläche entspricht mit $r_0 = 2 \cdot l_c = 0,40$ m ebenfalls der Empfehlung von Neidhart (1994).

In Bild 4 sind die Ergebnisse der berechneten Scherdehnungen γ sowie vergleichend dazu die Quotienten v_{res}/c_s in unterschiedlichem Abstand von der dynamisch belasteten Fläche für die halbsinusförmigen Anregungen mit 5 Hz, 10 Hz und 20 Hz dargestellt.

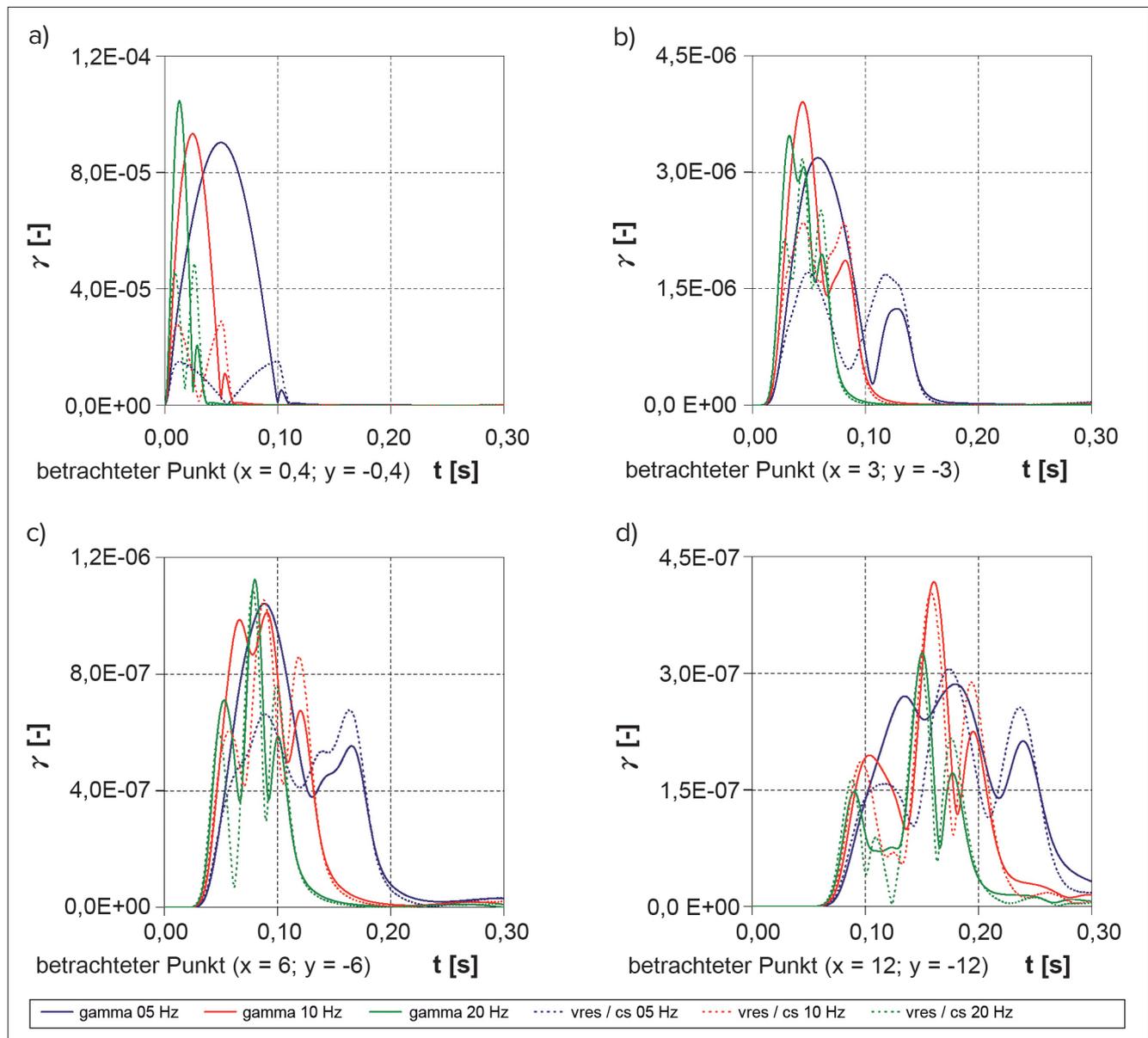


Bild 4: Scherdehnungen in jeweils 0,4 m, 3 m, 6 m und 12 m horizontalem und vertikalem Abstand von der dynamisch belasteten Fläche für halbsinusförmige Anregungen mit 5, 10 und 20 Hz entsprechend Bild 3

Figure 4: Shear strain at distances of 0.4 m, 3 m, 6 m and 12 m from the dynamically loaded surface in the horizontal and vertical directions for half-sinusoidal excitations with 5, 10 and 20 Hz as shown in figure 3

Der Quotient aus der resultierenden Schwinggeschwindigkeit $v_{res} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$ und der Scherwellengeschwindigkeit c_s wird in der Praxis häufig für die Ermittlung der Scherdehnungsamplitude $\gamma = v_{res}/c_s$ gleichgesetzt. So ist diese vereinfachte Berechnung beispielsweise auch in der DIN 45672-1 (2009) für die Auswertung von Schwingungsmessungen angegeben.

In Bild 4 a) ist für den betrachteten Punkt ($x = 0,4 \text{ m}$; $y = -0,4 \text{ m}$) zu sehen, dass die Scherdehnungen γ bei $f = 5 \text{ Hz}$, 10 Hz und 20 Hz annähernd gleich groß sind. Hingegen ist der Quotient v_{res}/c_s auf Grund der annähernd doppelten Anregungsfrequenz bei 20 Hz annähernd doppelt so groß wie bei 10 Hz und bei 10 Hz wiederum annähernd doppelt so groß wie bei 5 Hz .

Das Verhalten in diesem lastnahen Bereich, im Weiteren als Nahbereich bezeichnet, ist ähnlich einem zyklischen Triaxialversuch, bei dem die Scherdehnung hauptsächlich von der Lastamplitude und kaum von der Anregungsfrequenz abhängt. Eine Verdoppelung der Anregungsfrequenz bei gleicher Lastamplitude führt dabei zu einer annähernd doppelt so großen Schwinggeschwindigkeit, während die Scherdehnungsampli-

tude in etwa gleich groß bleibt. Folglich gilt in diesem Nahbereich die Gleichung $\gamma = v_{res}/c_s$ nicht, siehe auch Wegener & Herle (2010a).

Für die Berechnungen mit einer Frequenz von $f = 20 \text{ Hz}$ gibt es für alle drei betrachteten Punkte ($x = 3 \text{ m}$; $y = -3 \text{ m}$), ($x = 6 \text{ m}$; $y = -6 \text{ m}$) und ($x = 12 \text{ m}$; $y = -12 \text{ m}$) eine gute Übereinstimmung zwischen der Scherdehnung γ und dem Quotienten v_{res}/c_s , siehe jeweils grüne Kurven Bild 4. Analog ergibt sich diese Übereinstimmung für die Berechnungen mit $f = 10 \text{ Hz}$ für die beiden betrachteten Punkte ($x = 6 \text{ m}$; $y = -6 \text{ m}$) und ($x = 12 \text{ m}$; $y = -12 \text{ m}$). Hingegen erhält man $\gamma = v_{res}/c_s$ bei den Berechnungen mit $f = 5 \text{ Hz}$ nur für den betrachteten Punkt ($x = 12 \text{ m}$; $y = -12 \text{ m}$). Bei abnehmender Frequenz wird folglich der Abstand r kleiner, ab dem $\gamma = v_{res}/c_s$ beträgt.

In Bild 5 ist das Verhältnis γ zu v_{res}/c_s in Abhängigkeit vom Abstand r zur dynamisch belasteten Fläche für Anregungen mit $f = 5 \text{ Hz}$, 10 Hz und 20 Hz dargestellt. Die Datenpunkte (Kreise, Quadrate und Dreiecke) in Bild 5 zeigen die Ergebnisse der numerischen Berechnungen in den jeweiligen betrachteten Punkten diagonal unter der Belastungsfläche $r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$ mit $i = 1, 2, 3 \dots 12$.

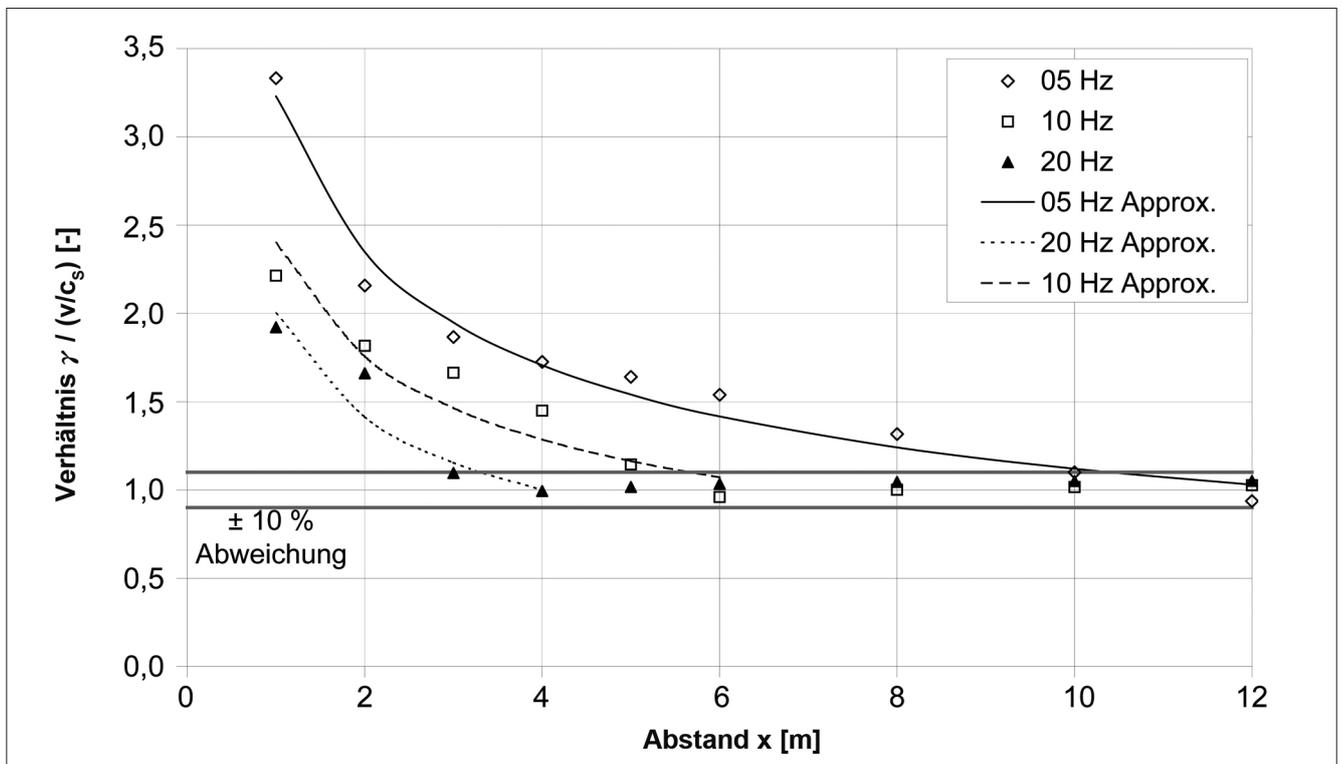


Bild 5: Verhältnis γ zu v_{res}/c_s in Abhängigkeit vom Abstand r zur dynamisch belasteten Fläche für Anregungen mit $f = 5 \text{ Hz}$, 10 Hz und 20 Hz im Ergebnis numerischer Berechnungen nach Bild 3 sowie Approximation

Figure 5: Ratio of γ to v_{res}/c_s as a function of the distance r from the dynamically loaded surface for excitations with $f = 5 \text{ Hz}$, 10 Hz and 20 Hz in the result of the numerical calculations in accordance with Figure 3 and approximation

Anschließend wurden die Datenpunkte zu Kurven approximiert.

Für geringe Abstände r beträgt das Verhältnis $\gamma/(v_{res}/c_s) \gg 1$. Mit zunehmendem Abstand r nähert sich das Verhältnis $\gamma/(v_{res}/c_s)$ dem Wert 1 an. Dabei wird der in Bild 5 dargestellte Toleranzbereich von $\gamma/(v_{res}/c_s) = 1,0 \pm 10\%$ für die Berechnungen mit $f = 20$ Hz bei $r \approx 4,2$ m, mit $f = 10$ Hz bei $r \approx 7,4$ m und mit $f = 5$ Hz bei $r \approx 14,2$ m erreicht. Der Abstand r , ab dem $\gamma \approx v_{res}/c_s$ beträgt, hängt somit annähernd linear von der Anregungsfrequenz ab.

Weitere numerische Berechnungen mit Variation des Radius der Lastfläche und der Wellengeschwindigkeiten in Wegener (2012) ergaben, dass eine Verdoppelung der Wellengeschwindigkeit annähernd auch zu einer Verdoppelung des Abstandes r führt, ab dem $\gamma/(v_{res}/c_s)$ innerhalb des in Bild 5 dargestellten Toleranzbereiches liegt, und bestätigen damit die Ergebnisse in Bild 5. Hingegen zeigt r_0 nur einen relativ geringen Einfluss auf den Abstand r . Der Abstand r vergrößert sich lediglich summativ um die Größe des Radius r_0 . Im Ergebnis der numerischen Untersuchungen kann allgemein der Abstand r wie folgt nach Gleichung 5 abgeschätzt werden:

$$r \geq r_0 + 2/3 \cdot \lambda_r \quad (5)$$

Dabei entspricht $\lambda_r = cr/f$ der Wellenlänge der Rayleighwelle, siehe auch Richart et. al. (1970).

Der Abstand r ist dabei in etwa so groß wie r_g für die Beschreibung der Grenze zwischen Nahfeld und Fernfeld mit $r_g \approx \lambda_r$ nach Savidis et. al. (2002) bzw. $r_g \approx 1/2 \cdot c_s/f$ nach Auersch (1981), was in etwa $r_g \approx 0,55 \lambda_r$ entspricht. Die Grenze r_g dient dabei der Beurteilung der Wellenausbreitung an der Halbraum- bzw. Schichtoberfläche. Im Fernfeld dominiert die Rayleighwelle so stark, dass vereinfachend nur mit der Rayleighwelle gerechnet werden kann. Dabei beträgt die Abnahmefunktion der Verschiebungsamplitude u analog der Abnahmefunktion für die Rayleighwelle $u \sim 1/\sqrt{r}$, während man im Nahfeld $u \sim 1/r$ erhält.

Die Unterscheidung in Nah- und Fernbereich in diesem Abschnitt verdeutlicht hingegen das unterschiedliche Bodenverhalten im unmittelbaren Bereich unterhalb der Lasteintragung, wo in der Regel das größte Potenzial an bleibenden Verformungen infolge dynamischer Belastung entsteht.

Im entsprechend großen Abstand r von der Anregung lässt sich die sich ausbreitende Welle annähernd einer Scherwelle zuordnen, bei der sich die Welle in Längsrichtung ausbreitet und die maximalen Verformungen senkrecht dazu auftreten. Unter diesen Voraussetzungen kann die Wellenausbreitung auf ein annähernd eindimensionales Problem zurückgeführt werden und entsprechend den Herleitungen in z.B. Timoshenko (1970) gilt die Beziehung $\gamma = v_{res}/c_s$. Deshalb beträgt im Fernbereich für die betrachteten Punkte im Winkel von 45° unter der dynamisch belasteten Fläche bzw. im sogenannten Scherfenster nach Woods (1968) das Verhältnis $\gamma/(v_{res}/c_s) \approx 1,0$, siehe Bild 5.

Wie weitere numerische Berechnungen auf der Halbraumoberfläche sowie senkrecht unter der Lastfläche zeigten, sind die Unterschiede zwischen Nahbereich und Fernbereich analog den betrachteten Punkten im Winkel von 45° unter der dynamisch belasteten Fläche deutlich und r kann ebenfalls nach Gleichung (5) abgeschätzt werden.

Bei Betrachtung der Scherdehnungen auf bzw. dicht unterhalb der Oberfläche des Halbraums ist außerdem zu beachten, dass die maximale Scherdehnungsamplitude infolge der Rayleighwelle γ_r kleiner als der Quotient v_{res}/c_s ist, wie Niemunis (1995) mittels numerischer Berechnungen gezeigt hat. Da sich im lastnahen Bereich P-, S- und R-Wellen überlagern, kann daraus jedoch keine Schlussfolgerung für das Verhältnis $\gamma/(v_{res}/c_s)$ im Nahbereich gezogen werden. Auf der Halbraumoberfläche im Fernbereich, wo die Verformungen und Dehnungen nahezu vollständig der Rayleighwelle zugeordnet werden können, beträgt jedoch $\gamma_r \approx \gamma < v_{res}/c_s$.

Das unterschiedliche dynamische Verhalten im Nah- und Fernbereich der Belastung für Schwingungen innerhalb einer Schicht wurde auch in Wegener & Herle (2010a) für geschichteten Untergrund gezeigt. Demnach hängt das Materialverhalten (Dehnungen, Verformungen) im Nahbereich vorwiegend von der zyklischen Belastung (Amplitude, Frequenz) ab, während es im Fernbereich im Wesentlichen von den Massenträgheitskräften und der Energiedissipation infolge der Wellenausbreitung (Abstrahlungsdämpfung) sowie der Eigenfrequenz der Schicht abhängt.

4 Ermittlung der Scherdehnung durch Schwingungsmessungen

Determination of the shear strain by means of vibration measurements

Bei Schwingungsmessungen werden entweder mittels Geophonen Schwinggeschwindigkeiten oder mittels Beschleunigungsaufnehmern Schwingbeschleunigungen gemessen, aus denen mittels Zeitintegration Schwinggeschwindigkeiten ermittelt werden. Wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, lässt sich die Scherdehnung im Nahbereich der Belastung, die für die Akkumulation bleibender Verformungen besonders relevant ist, nicht einfach aus dem Quotienten der Schwinggeschwindigkeit zur Scherwellengeschwindigkeit ermitteln. Es wird im Folgenden beispielhaft für Schwingungsmessungen an einer Bahnstrecke gezeigt, wie man mit Schwingungsmessungen trotzdem die Scherdehnungsamplitude abschätzen kann und wie groß der Unterschied zum Quotient aus Schwinggeschwindigkeit zur Scherwellengeschwindigkeit ist.

Eine zweigleisige Bahnstrecke in Süddeutschland führt oberflächennah über mächtige Weichschichten aus ca. 1,5 m weichen Seeton und ca. 3,0 m Torf. Vor der

Ertüchtigung der Bahnstrecke durch den gleisgebundenen Einbau einer 50 cm dicken, zweifach geogitterbewehrten Tragschicht und der Erneuerung des Oberbaus wurden unter anderem Schwingungsmessungen sowie die Ermittlung der Scher- und Kompressionswellengeschwindigkeiten mittels Downhole-Messungen im Bereich des Eisenbahndammes durchgeführt. Die Anordnung der Schwingungsaufnehmer sowie die Ergebnisse der Downhole-Messungen und die Baugrundsichtung sind in Bild 6 dargestellt. Dabei wurden folgende Scherwellengeschwindigkeiten für die einzelnen Bodenschichten gemessen:

- Damm toniger Kies GU/GT: $c_s \approx 130$ m/s,
- weicher Seeton TM/TA: $c_s \approx 110$ m/s,
- Torf HN/HZ: $c_s \approx 85$ m/s.

Die Schwingungsmessungen wurden mit SM 6 Geophonen der Firma Sensor Netherland mit einer Eigenfrequenz von 4,5 Hz durchgeführt. Im Ergebnis der Schwingungsmessungen erhält man die Schwinggeschwindigkeits-Zeitverläufe für die einzelnen Richtungskomponenten der Messaufnehmer. Exemplarisch sind in Bild 8 die Schwinggeschwindigkeits-Zeitverläufe in vertikaler Richtung für die Aufnehmer in 0,5 m, 2,0 m

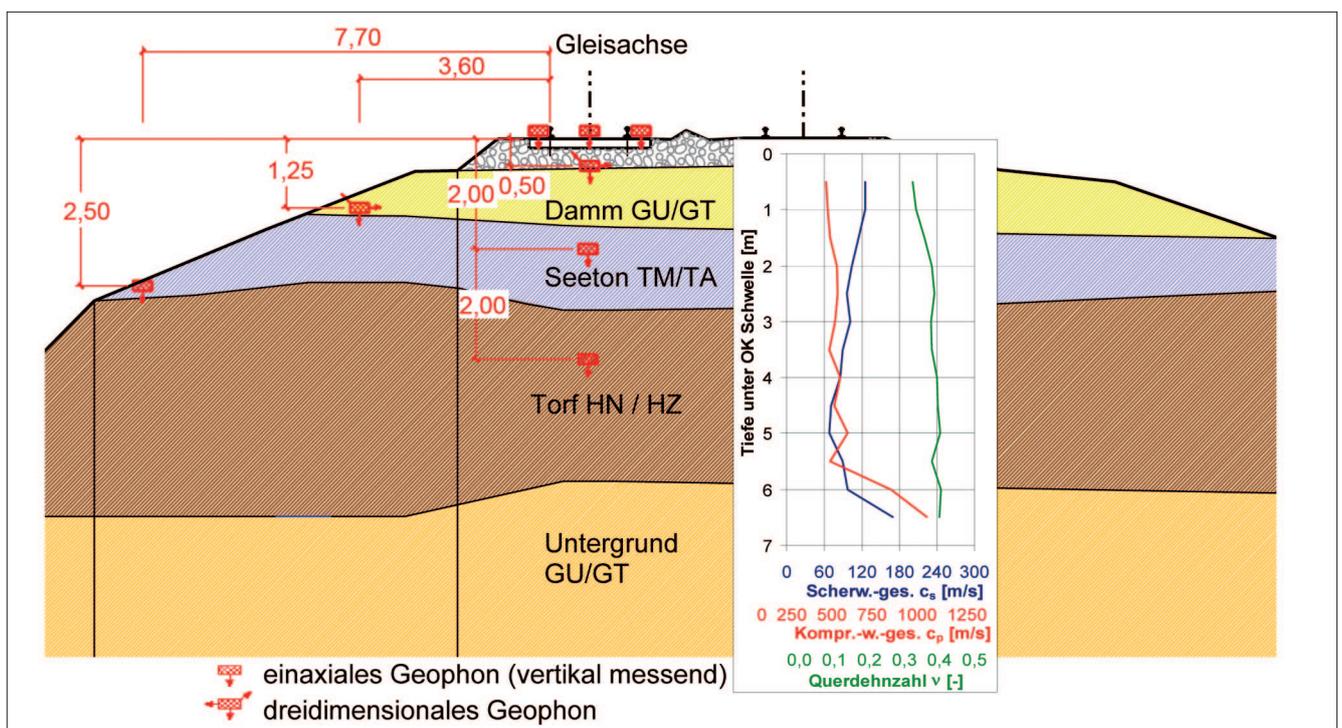


Bild 6: Baugrundsichtung und Ergebnisse der Downhole-Messungen sowie Anordnung der Schwingungsaufnehmer aus Vogel et. al. (2010), siehe auch Wegener & Herle (2010)

Figure 6: Stratification of the soil, results of downhole measurements and arrangement of the vibration pick-ups according to Vogel et al. (2010), see also Wegener & Herle (2010)

und 4,0 m unter SO in Gleisachse sowie in 1,25 m unter SO und 4,35 m neben der Gleisachse dargestellt.

Die gemessenen Schwinggeschwindigkeiten für das dreiaxiale Geophon in der Ebene UK Schotter zeigten, dass die Horizontalkomponenten v_x und v_z maximal ca. 10% der Vertikalkomponente v_y betragen. Dadurch gilt für die resultierende Schwinggeschwindigkeit $v_{res} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \leq 1,01 \cdot |v_y|$. Für die Auswertung der Schwinggeschwindigkeiten in Gleisachse werden deshalb vereinfachend nur die Vertikalkomponenten der Schwinggeschwindigkeiten v_y verwendet und $v_{res} \approx |v_y|$ zu Grunde gelegt.

Der Quotient v_{res}/c_s ergibt sich durch Division der resultierenden Schwinggeschwindigkeit mit der Scherwellengeschwindigkeit der Bodenschicht, in der sich der Schwingungsaufnehmer befindet. Die Quotienten v_{res}/c_s sind für die einzelnen Aufnehmer in den Bildern 10 und 11 als blaue und rote Kurven dargestellt.

Im Gegensatz zu den Schwinggeschwindigkeiten lassen sich die Scherdehnungen nicht direkt messen. Hier können lediglich über Bodenbereiche zwischen den Geophonen gemittelte Werte aus den Messergebnissen berechnet werden. Dazu wird wie folgt vorgegangen:

Mittels Zeitintegration der Schwinggeschwindigkeits-Zeitverläufe erhält man die Zeitverläufe der Schwingwege für die einzelnen Messaufnehmer (siehe Bild 9). Anschließend ermittelt man die Dehnungen $\epsilon_{xx} = \delta u_x / \delta X$, $\epsilon_{yy} = \delta u_y / \delta Y$ und $\gamma_{xy} = \delta u_x / \delta Y + \delta u_y / \delta X$, ϵ_{yy} , ϵ_{yy} , aus denen dann die Hauptdehnungen ϵ_1 , ϵ_2 und ϵ_3 berechnet werden können. Aus den Hauptdehnungen kann mit den Gleichungen (1) und (3) wie folgt die invariante Scherdehnung γ ermittelt werden:

$$\gamma = 2 \cdot \sqrt{II_e} = \sqrt{(2/3) \cdot [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + \epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]} \quad (6)$$

Geht man vereinfachend davon aus, dass in Gleisachse die Horizontalverformungen $\Delta u_x = 0$ sind und im Abstand ΔX die Vertikalverformungen u_y genauso groß wie in Gleisachse sind, erhält man das in Bild 7 dargestellte Verformungsbild.

Die Vertikaldehnung $\Delta \epsilon_y = \Delta u_y / Y$ entspricht der größten Hauptdehnung $\Delta \epsilon_1$, die beiden anderen Hauptdehnungen sind Null: $\Delta \epsilon_2 = \Delta \epsilon_3 = 0$. Die Scherdehnung γ ergibt sich nach Gleichung (5) zu:

$$\gamma = 2/\sqrt{3} \cdot \Delta u_y / Y \quad (7)$$

Dabei entspricht Y dem vertikalen Abstand der Geophone in Gleisachse und Δu_y der Verformungsdifferenz der mittels Zeitintegration aus den gemessenen Schwinggeschwindigkeiten ermittelten Schwingwege zum jeweils gleichen Zeitpunkt t .

So ergeben sich beispielsweise für die in Bild 9 dargestellten Zeitverläufe zum Zeitpunkt $t = 12,05$ s Vertikalverformungen von $u_y = 2,0$ mm für den Aufnehmer in 2,0 m Tiefe und von $u_y = 0,7$ mm in 4,0 m Tiefe. Daraus ergibt sich eine Verformungsdifferenz von $\Delta u_y = 1,3$ mm bzw. mit dem Abstand $Y = 2,0$ m eine Vertikaldehnung von $\Delta \epsilon_y = 6,5 \cdot 10^{-4}$ bzw. eine Scherdehnung $\gamma = 7,5 \cdot 10^{-4}$, siehe Bild 11.

Bei großen Abständen der Schwingungsaufnehmer kann die Abschätzung der Scherdehnung nach der beschriebenen Methode nur relativ grob erfolgen. Für eine genauere Ermittlung wäre ein geringerer Abstand der Aufnehmer (möglichst $\leq 1,0$ m) sowie die Anordnung von mindestens drei Aufnehmern innerhalb einer Bodenschicht notwendig.

In den Bildern 10 und 11 ist erkennbar, dass die mittleren Scherdehnungen γ in den Bereichen zwischen den Geophonen deutlich größer als die Quotienten v_{res}/c_s an den mittels Geophonen gemessenen Stellen sind. So beträgt im Bereich zwischen 2,0 m und 4,0 m unter OK Schwelle die maximale Scherdehnungsamplitude $\gamma \approx 7,5 \cdot 10^{-4}$, während der maximale Quotient $v_{res}/c_s \approx 3,4 \cdot 10^{-4}$ im Seeton in 2,0 m unter SO bzw. $v_{res}/c_s \approx 1,3 \cdot 10^{-4}$ im Torf in 4,0 m unter SO beträgt.

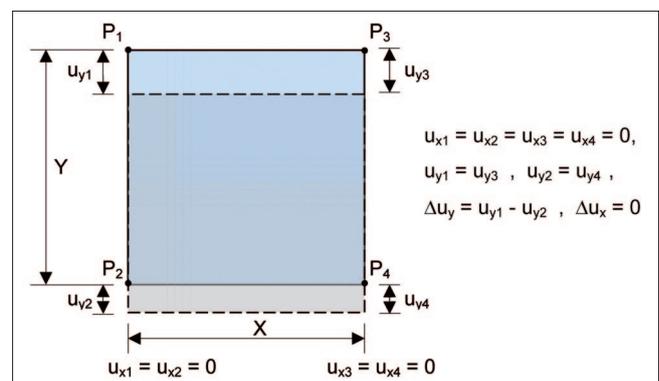


Bild 7: Vereinfachtes Verformungsbild für einen Bodenbereich in Gleisachse

Figure 7: Simplified deformation pattern for a soil area in the axis of the track

Damit bestätigen die Messergebnisse, dass die Gleichung $\gamma = v_{res}/c_s$ nicht allgemein gültig ist und im Nahbereich der dynamisch belasteten Fläche nicht angewendet werden soll.

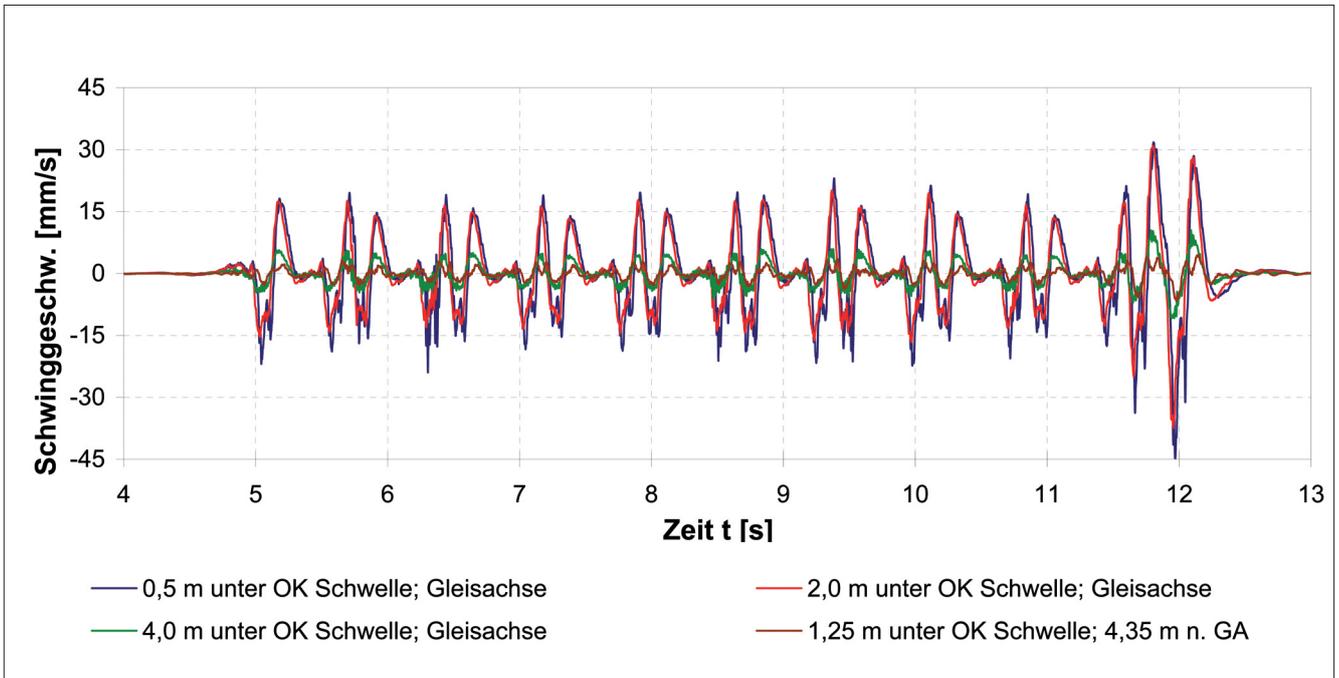


Bild 8: Gemessene Schwinggeschwindigkeiten während einer Zugüberfahrt
 Figure 8: Measured velocities of the vibrations occurring when a train passes

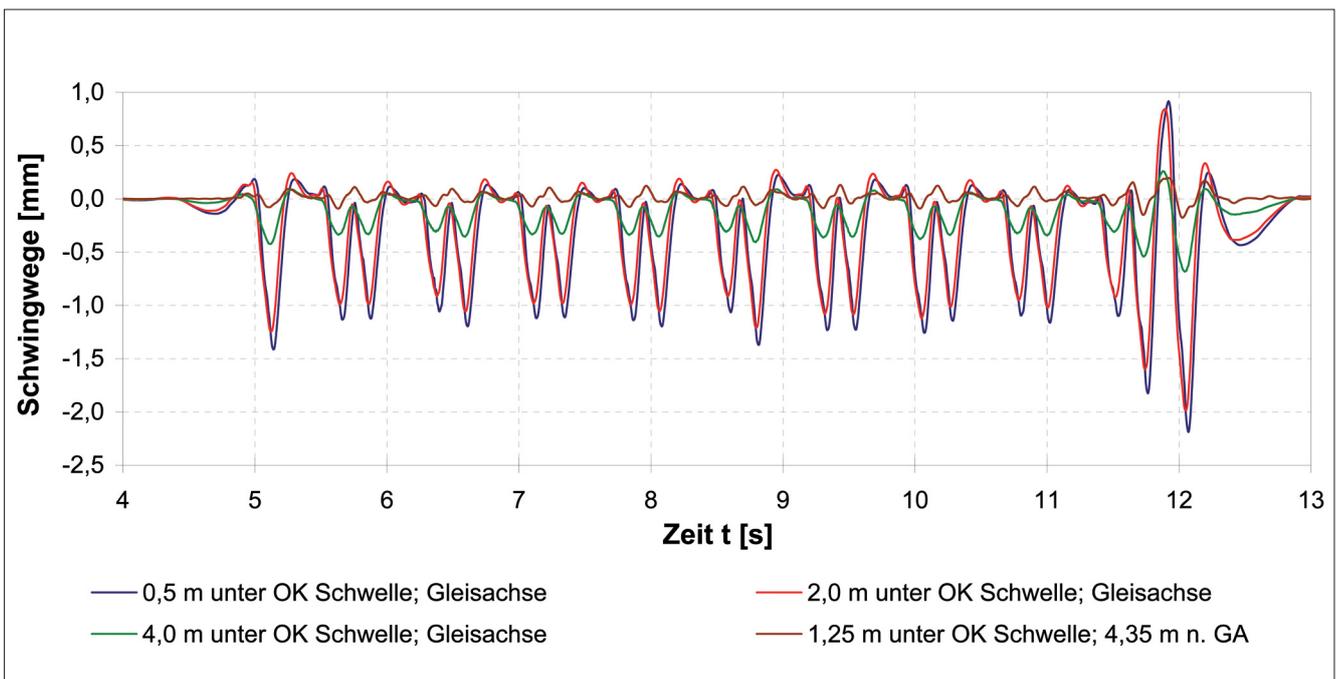


Bild 9: Berechnete Schwingwege aus den gemessenen Schwinggeschwindigkeiten während einer Zugüberfahrt
 Figure 9: Vibration paths calculated on the basis of the vibration velocities measured when a train passes

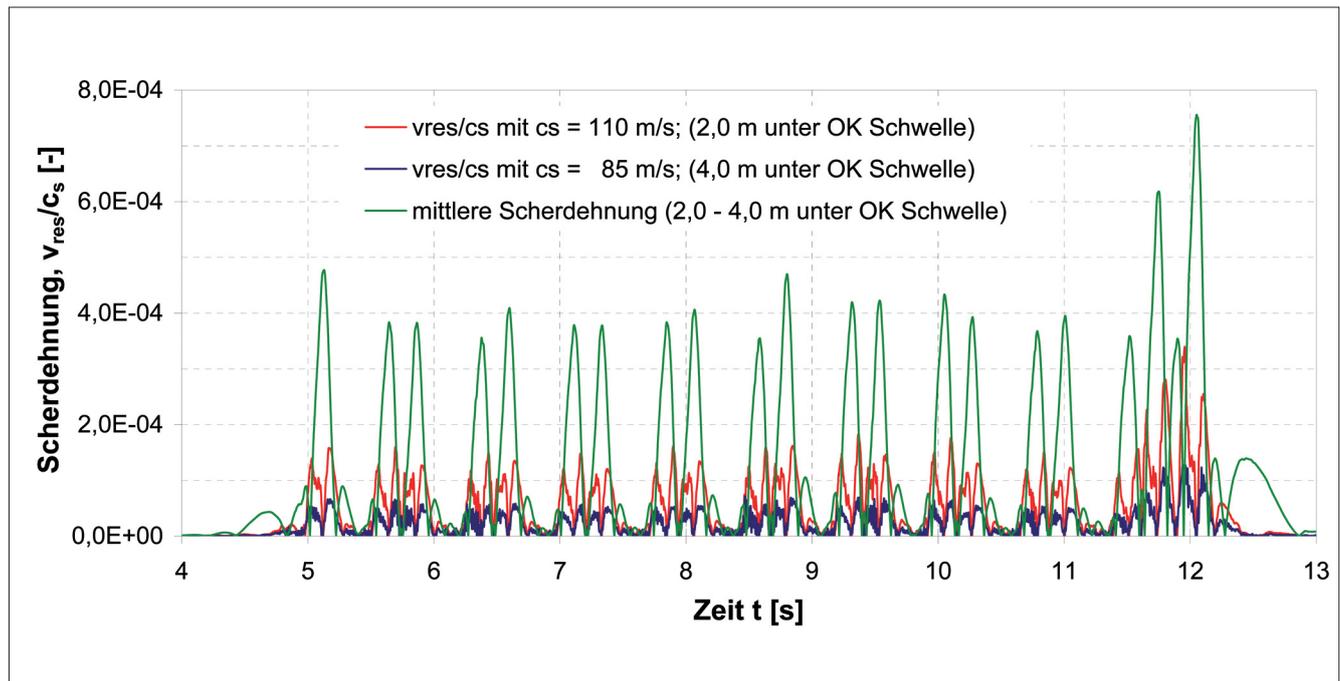


Bild 10: Vergleich der Scherdehnungsinvariante γ im Bereich zwischen 0,5 m und 2,0 m unter OK Schwelle mit dem Quotienten v_{res}/c_s im Damm GU/GT und im Seeton TM/TA

Figure 10: Comparison of the shear strain invariant γ between 0.5 m and 2.0 m beneath the upper edge of the sleeper with the ratio v_{res}/c_s in the embankment GU/GT and in lacustrine clay TM/TA

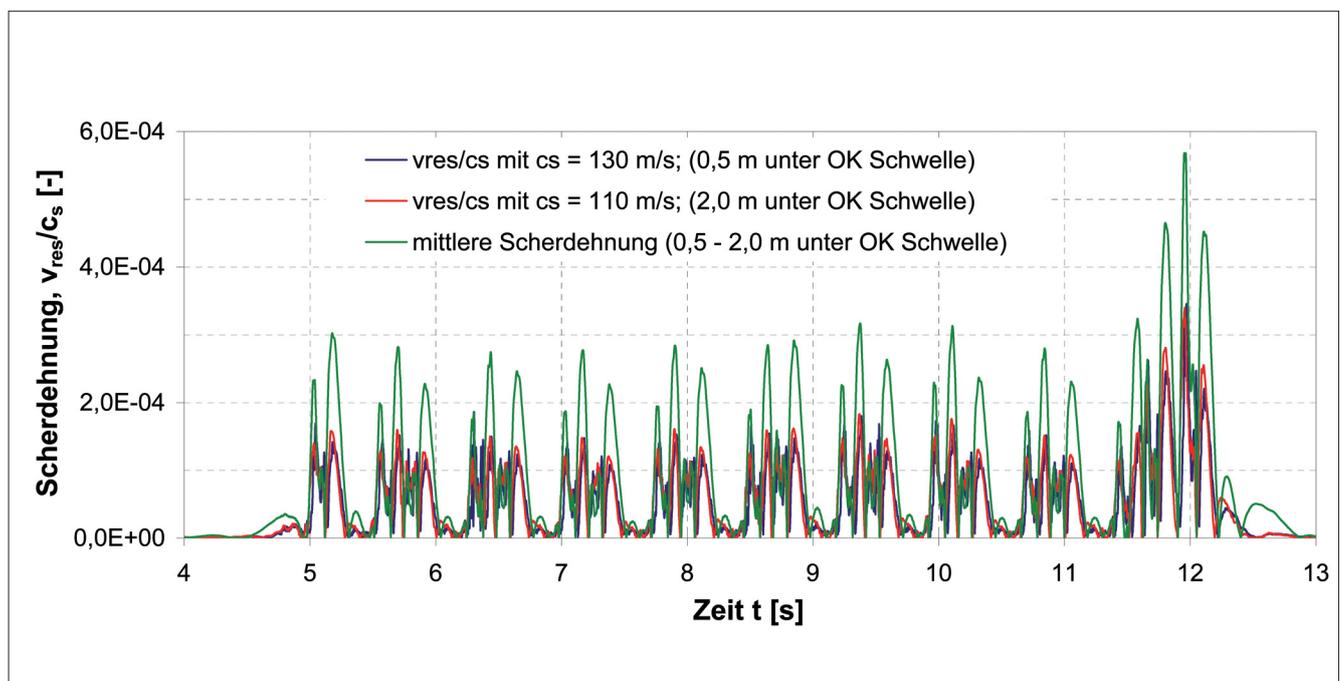


Bild 11: Vergleich der Scherdehnungsinvariante γ im Bereich zwischen 2,0 m und 4,0 m unter OK Schwelle mit dem Quotienten v_{res}/c_s im Seeton TM/TA und im Torf HN/HZ

Figure 11: Comparison of the shear strain invariant γ between 2.0 m and 4.0 m beneath the upper edge of the sleeper with the ratio v_{res}/c_s in lacustrine clay TM/TA and in peat HN/HZ

5 Literatur *References*

- Achenbach, J. D. (1984): Wave Propagation in Elastic Solids. North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics, Bd. 16.
- Auersch, L. (1981): Wellenausbreitung durch eine Bodenschicht. Die Bautechnik 31, Nr. 7, S. 229-236.
- DIN 45672 Teil 1 (2009): Schwingungsmessungen in der Umgebung von Schienenverkehrswegen, Teil 1: Messverfahren. Deutsches Institut für Normung.
- Ladd, R. S., Dutko, P. (1985): Small Strain Measurement Using Triaxial Apparatus. Advances in the Art of Testing Soils Under Cyclic Conditions. ASCE-Convention, Detroit, Michigan, S. 148-165.
- Lo Presti, D. C. F. (1989): Propriet á Dinamiche dei Terreni. Proceedings XIV Conferenza Geotechnica di Torino, Department of Structural Engineering, Politecnico di Torino.
- Manolis, G. D., Ahmad, S., K. Banerjee P. (1985): Boundary Element Method Implementation for Three-dimensional Elastodynamics. K. Banerjee P. (Hrsg.); Watson Taylor, J. O. (Hrsg.): Developments in Boundary Element Methods. London: Elsevier Applied Science Publishers, S. 29-63.
- Neidhart, T. (1994): Lösung dreidimensionaler linearer Probleme der Bodendynamik mit der Randelementmethode. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Dissertation, Heft 131.
- Niemunis, A. (1995): On the estimation of the amplitude of shear strain from measurements in situ. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 14, Nr. 1, S. 1-3.
- Savidis, S. et. al. (2002): Empfehlungen des Arbeitskreises 1.4 Baugrunddynamik der DGGT. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Eigenverlag Grundbauinstitut der TU Berlin, (1. Auflage).
- Timoshenko, S. P., Goodier, J. N. (1970): Theory of Elasticity. 3. Auflage, McGraw-Hill Book Company Inc., New York.
- Triantafyllidis, T. (1989): Halbraumlösungen zur Behandlung bodenmechanischer Probleme mit der Randelementmethode. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Habilitation, Heft 116.
- Vogel, W., Lieberenz, K., Neidhart, T., Wegener, D. (2010): Erarbeitung von Kriterien zur Beurteilung der Notwendigkeit von Ertüchtigungen bei Eisenbahnstrecken auf Weichschichten. Abschlussbericht, unveröffentlicht.
- Vogel, W., Lieberenz, K., Neidhart, T., Wegener, D. (2011): Zur dynamischen Stabilität von Eisenbahnstrecken mit Schotteroberbau auf Weichschichten. Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 60, Nr. 9, S. 46-54.
- Vucetic, M. (1994): Cyclic threshold shear strains in soils. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering 120, Nr. 12, S. 2008-2227.
- Wegener, D., Herle, I. (2010a): Zur Ermittlung von Scherdehnungen unterhalb von dynamisch belasteten Flächen. Geotechnik 33, Nr. 1, S. 12-18.
- Wegener, D., Herle, I. (2010b): Investigation of shear strain amplitude induced by railroad traffic in soils. Proceedings of the 5th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, San Diego, California, paper No. 2.06.
- Wegener, D. (2012): Bestimmung von bleibenden Verformungen in dynamisch beanspruchten Böden mittels numerischer Verfahren. Dissertation, TU Dresden, erscheint voraussichtlich 2012.
- Wichtmann, T., Triantafyllidis, T. (2009): On the influence of the grain size distribution curve of quartz sand on the small strain shear modulus G_{max} . ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 135, Nr. 10, S. 1404-1418.
- Woods, R. D. (1968): Screening of surface waves in soils. ASCE, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division 94, Nr. SM4, S. 951-979.

