

Zur Modellbildung der Wellenausbreitung in dynamisch belasteten Pfählen

Maik Fritsch

1 Einleitung

Bei Rammpfählen wird durch den Aufprall des Rammhammers ein mechanischer Spannungsanstieg im Pfahl erzeugt. Aufgrund der kurzen Kontaktzeit und der damit verbundenen Grenzwellenlänge der eingeleiteten Stoßbelastung entsteht in der Regel ein Wellenausbreitungsproblem. Zur Lösung von Wellenausbreitungsproblemen wird die eindimensionale Wellengleichung herangezogen. Die Lösungsmethoden der Wellengleichung unterscheiden sich in direkte und indirekte Verfahren. Bei den direkten Verfahren wird in der Regel durch direkte Integration der eindimensionalen Wellengleichung das Wellenausbreitungsproblem berechnet. Bei den indirekten Verfahren dagegen wird das zuerst von Smith entwickelte numerische Modell zur Lösung des inversen Problems herangezogen. Der Pfahl wird dabei als linear-elastisch angenommen, der anstehende Boden dagegen als viskoplastisch. In allen Berechnungen wird die longitudinale Gruppengeschwindigkeit der Welle anhand der Materialparameter berechnet und als konstant vorausgesetzt.

Durch das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig wurde zur Klärung des Wellendurchlaufes eine Tragbohle in unterschiedlichen Messebenen mit Dehnungsmessstreifen appliziert. Weiterhin wurde die Beschleunigung im Bereich des Pfahlkopfes messtechnisch mit einem Referenzsystem erfasst. Mit diesem Messaufbau wurden über 500 Schläge der Pfahlrammung auf Endtiefe erfasst.

Anhand der Versuche konnte nachgewiesen werden, dass im Interaktionsbereich zwischen Pfahl und Boden eine erhöhte Wellengeschwindigkeit der Kompressionsfront auftritt. Das bedeutet, dass die angesetzte Wellengeschwindigkeit, die sich aus dem statischen Elastizitätsmodul und der Rohdichte des Pfahlmaterials errechnet nur im nichteingebundenen Pfahlbereich Gültigkeit besitzt.

2 In situ Großversuch

Das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig (IGB-TUBS) hat im Zuge der Herstellung des Containerterminals 4 (CT4) in Bremerhaven umfangreiche dynamische Probelastungen durchgeführt. Die aufgezeichneten Messsig-

nale zeigten, bei allen Ergebnissen der Prüfungen entlang der Rammtrasse, eine erhöhte Wellengeschwindigkeit. Dieser Effekt ist bisher lediglich bei Ortbetonpfählen beobachtet worden, weil nach Art und Zusammensetzung des Pfahlbetons und aufgrund der Inhomogenitäten des Baustoffes, die Steifigkeit Schwankungen unterliegt. Die Materialeigenschaften variieren somit. Die Herstellung von Stahlerzeugnissen im Werk unterliegt einem höheren Qualitätsmanagement, so dass die Materialeigenschaften einer sehr viel geringeren Schwankungsbreite unterliegen. Um den Wellendurchlauf im Pfahl, der durch die Rammschläge auftritt, zu erfassen, wurde eine Tragbohle (Querschnitt PSp 1000, Form 22, l = 39,0 m) in zehn Tiefenlagen mit Dehnungsmessstreifen (DMS) instrumentiert.

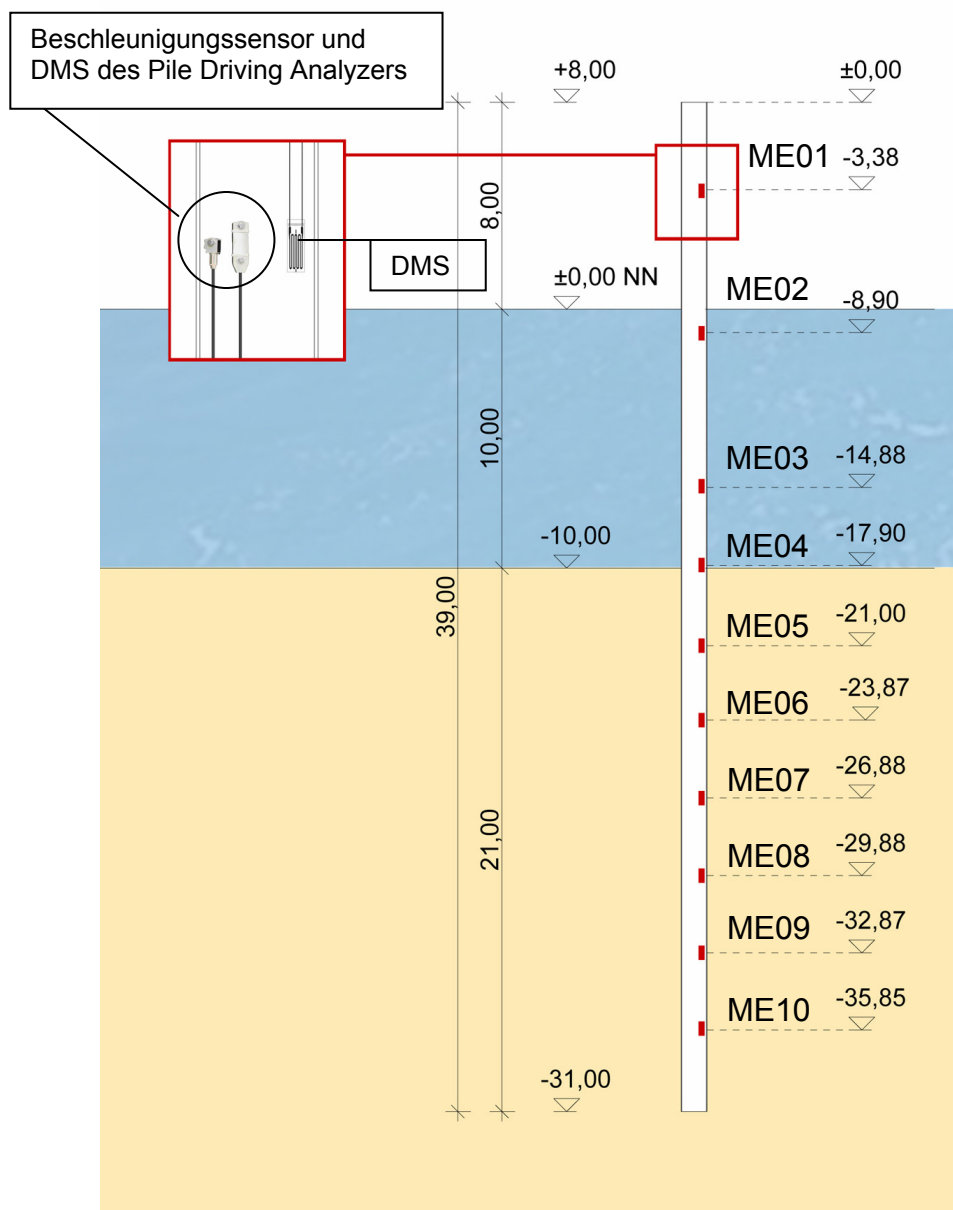


Abb. 1: Lage der Messebenen ME (Rammschlag 500)

Die Lage der Messebenen ist bezogen auf den Pfahlkopf in Abbildung 1 dargestellt. Die Einbindelängen beziehen sich auf den 500. Rammschlag. Die erste Messebene befindet sich ca. 3 m unterhalb des Pfahlkopfes. Als Referenzmesssystem sind in derselben Tiefe die Aufnehmer des Pile Driving Analyzers (PDA) mit zwei Messketten angeordnet worden.

Die Messaufnehmer wurden auf gegenüberliegenden Seiten der Profilstege angebracht, so dass an beiden Stegen je zwei Dehnungs- und zwei Beschleunigungsaufnehmer versetzt installiert wurden. Diese Anordnung wurde gewählt, um eventuell auftretende Exzentrizitäten sowie die ungleichmäßige Verteilung der Stoßkraft zu eliminieren, die bei einem eingeleiteten Schlag in den Pfahl auftreten können. Die DMS wurden jeweils an der gegenüberliegenden Seite in den entsprechenden Ebenen angebracht (vgl. Abb. 2).

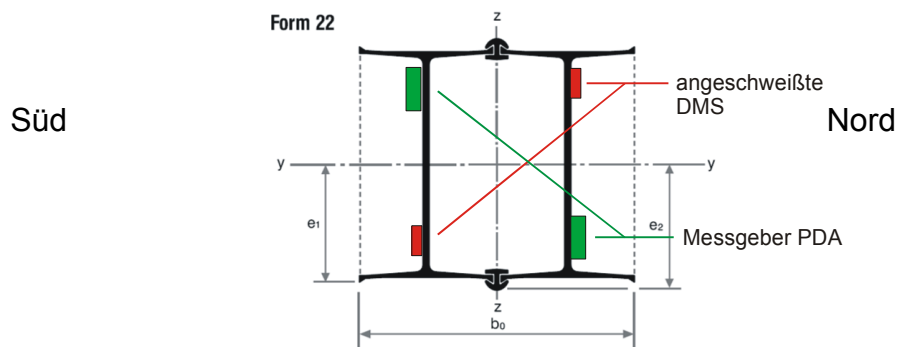


Abb. 2: Anbringung der Messketten und der DMS

Die in diesem Großversuch eingesetzten DMS sind anschweißbar und haben Abmessungen von 4x15 mm. Anschweißbare DMS besitzen den Vorteil, dass sie die beim Rammen eingebrachten hohen Energien aufnehmen können. Dies ist in der Vergangenheit bei geklebten DMS aufgrund der vor Ort hergestellten Verklebung nicht immer der Fall gewesen. Eine hohe Ausfallquote war häufig die Folge.

Die Abbildung 3 zeigt einen angeschweißten Dehnungsmessstreifen, dessen einzelne Punktschweißstellen auf der Metallplatte gut zu erkennen sind. Für den dauerhaften Schutz gegen Wassereintritt ist eine besondere Abdichtung der Messstelle erforderlich. Zu diesem Zweck wird der DMS mit einem Epoxydharz bestrichen und auf diese Weise wasserdicht versiegelt. Als eine weitere Wasserbarriere ist die gesamte Messstelle mit einem dauerplastischen Kitt geschützt. Der Kitt wird in einem schmalen Band um den DMS gelegt, mit einer Kittplatte abgedeckt und durch Andrücken mit dem Messobjekt verbunden.

Alle Messstellen sowie die gesamte Kabelführung wurden zum abschließenden Schutz gegen mechanische Beschädigungen mit einem robusten U-Profil aus Stahl eingehaust. Dadurch wird die Mantelreibung des Bodens nicht direkt auf die Messstellen übertragen.

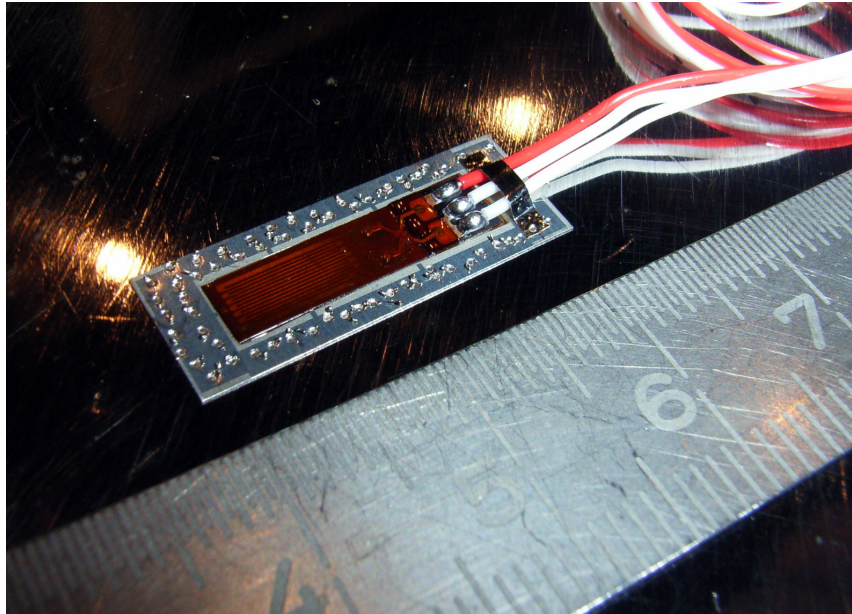


Abb. 3: Punktgeschweißter DMS auf Stahl

2 Ergebnisse der Messungen

2.1 Ergebnisse im Zeitbereich

Im Folgenden wird der Durchlauf der Welle entlang des Pfahles anhand des Kraftverlaufes beschrieben. Die Abbildung 4 zeigt den berechneten und geglätteten Kraftverlauf an der vierten Messstelle für den 400. Rammschlag. Im Diagramm sind vier signifikante Extremwerte des Kraftverlaufes gekennzeichnet, die in Diagramm 5 in Anlehnung an die Pfahlgeometrie zugeordnet sind. Die Voraussetzung für die Lagebestimmung ist die theoretische Wellenausbreitungsgeschwindigkeit von $c = 5122 \text{ m/s}$ ($c = (E/\rho)^{0,5}$).

Die maximale Energie des Rammschlages befindet sich zum Zeitpunkt $t=0$ am Pfahlkopf [1]. 3,5 Millisekunden später, dies entspricht einer Lauflänge von ca. 18,0 Metern, erreicht das Impulsmaximum die Lage des Dehnungsmessstreifens an der vierten Messebene [2]. Nach weiteren 42 Metern tritt die größte negative Dehnung auf. Die Dehnwelle wurde zu diesem Zeitpunkt am Pfahlfuß reflektiert und befindet sich nun wieder auf der Höhe der betrachteten Messstelle [3].

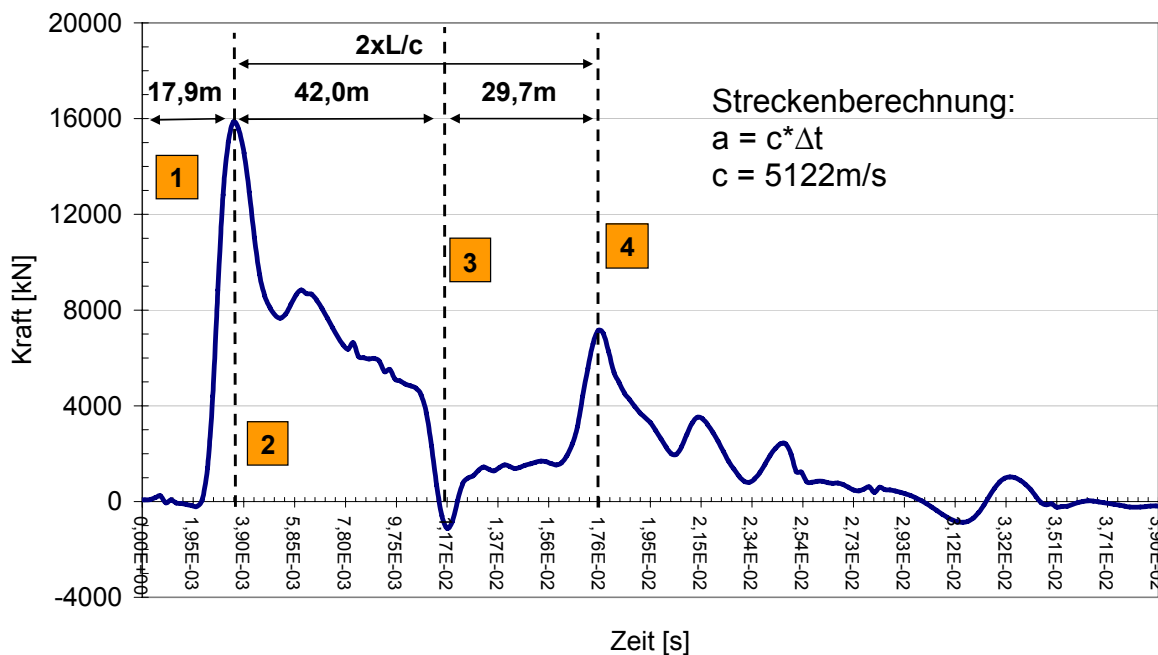


Abb. 4: Kraftverlauf der Messebene 4

Interpretiert man die Aufzeichnungen mit der Wellentheorie, so wird ein Teil der Druckwelle am Fuß als Zugwelle reflektiert. Dies bedeutet weiterhin, dass der verwendete Rammhammer eine ausreichende plastische Verschiebung des Pfahles erreicht, so dass sich die Auflagerbedingung des Pfahles zwischen einer festen und freien Lagerung bewegt. Die verloren gegangenen Wellenanteile der Anfangsamplitude sind durch Dämpfungserscheinungen und durch Energieumwandlungsprozesse (z.B. in Wärme) innerhalb der Scherzone entzogen worden.

Im weiteren Verlauf wandert die Zugwelle zurück zum Pfahlkopf, erfährt dort eine erneute Richtungsänderung und bewegt sich anschließend zurück zur betrachteten Messstelle [4]. Aus dem Wellenverlauf wird deutlich, dass es zu einer Abweichung zur theoretischen Lauflänge von 78,0 m ($2xL/c$) bezogen auf die Messstelle kommt, was auf eine Veränderung gegenüber der theoretischen Wellenausbreitungsgeschwindigkeit hinweist.

Zur Berechnung der Pfahlänge aus den Durchlaufzeiten dient die bereits erwähnte rechnerische Wellenausbreitungsgeschwindigkeit von 5122 m/s. Bis zum zweiten Wellendurchgang an der Messebene zeigt die Annahme dieser Wellenausbreitungsgeschwindigkeit eine gute Übereinstimmung.

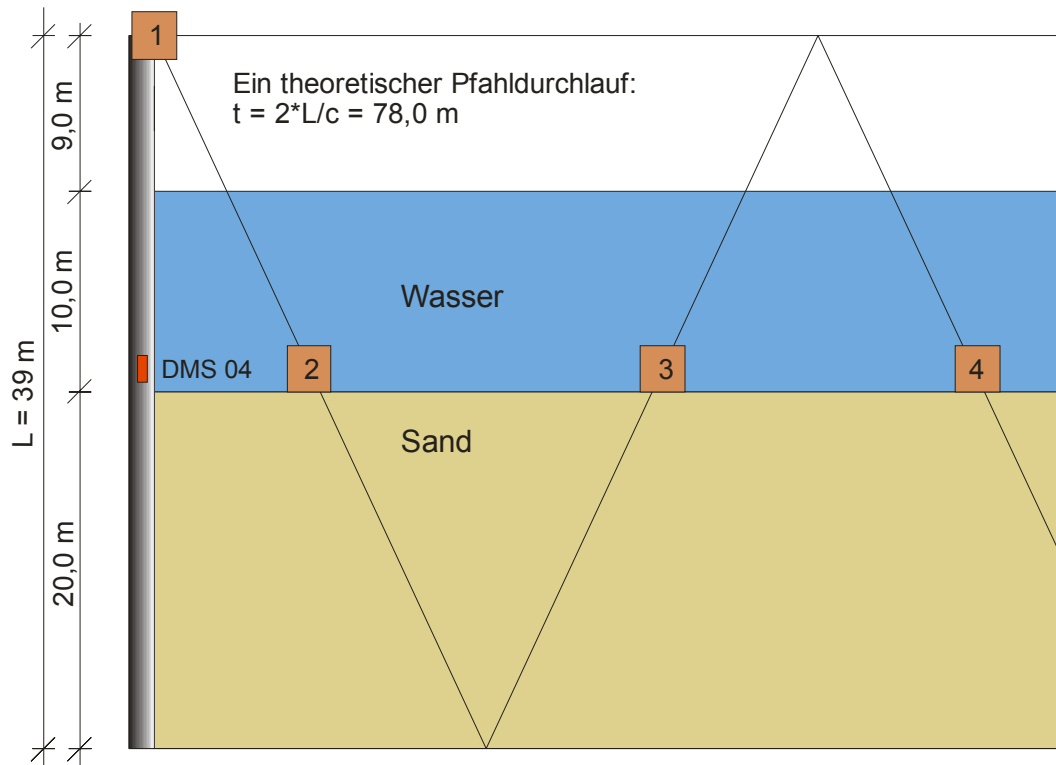


Abb. 5: Wellendurchlauf an Messebene 4

Beim zweiten Auftreffen an der Messstelle läuft die Kompressionswelle hingegen mit einer erhöhten Wellenausbreitungsgeschwindigkeit. Der Laufweg der Welle muss rechnerisch eine Strecke von 35,8 m betragen. Den Messquerschnitt erreicht die Welle allerdings schon nach 29,7 m. Dies entspricht einer Erhöhung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit von ca. 20%. Das hier aufgezeigte Phänomen zeigt sich über den Rammvorgang bei allen ausgewerteten Rammschlägen an unterschiedlichen Messstellen. Anhand einer Betrachtung der Maximalwerte konnte jedoch kein einheitliches Bild der Wellenausbreitungsgeschwindigkeitszunahme nachgewiesen werden. Aufgrund dieser Tatsache wurden Kreuzkorrelationsstudien durchgeführt.

Die statistische Auswertung der Messdaten erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Teil wird mit dem Einleitungsimpuls des Rammhammers eine Kreuzkorrelation der einzelnen Messebenen durchgeführt. Die aufgezeichneten Signale werden anschließend untereinander korreliert, um den zeitlichen Abstand zwischen den Messebenen zu bestimmen.

Zwischen den Messsignalen der einzelnen Messebenen und dem messtechnisch erfassten Sinusimpuls wurde das Signal nach der Kreuzkorrelation direkt ins Amplitudenmaximum verschoben. Das zweite Maximum stellt jeweils das dritte Auftreffen der Welle am Messquerschnitt dar. Während der Kraftereinleitung ergibt sich folgerichtig der höchste Korrelationskoeffizient zwischen dem Sinusimpuls und dem Messsignal. Die Amplitudenab-

nahme der Kraft aufgrund der Energieabgabe der Welle impliziert kleinere Korrelationskoeffizienten für das Wiederauftreten der Welle am Messquerschnitt. In der folgenden Abbildung sind die Ergebnisse unterschiedlicher Messebenen als Wasserfalldiagramm aufgezeigt.

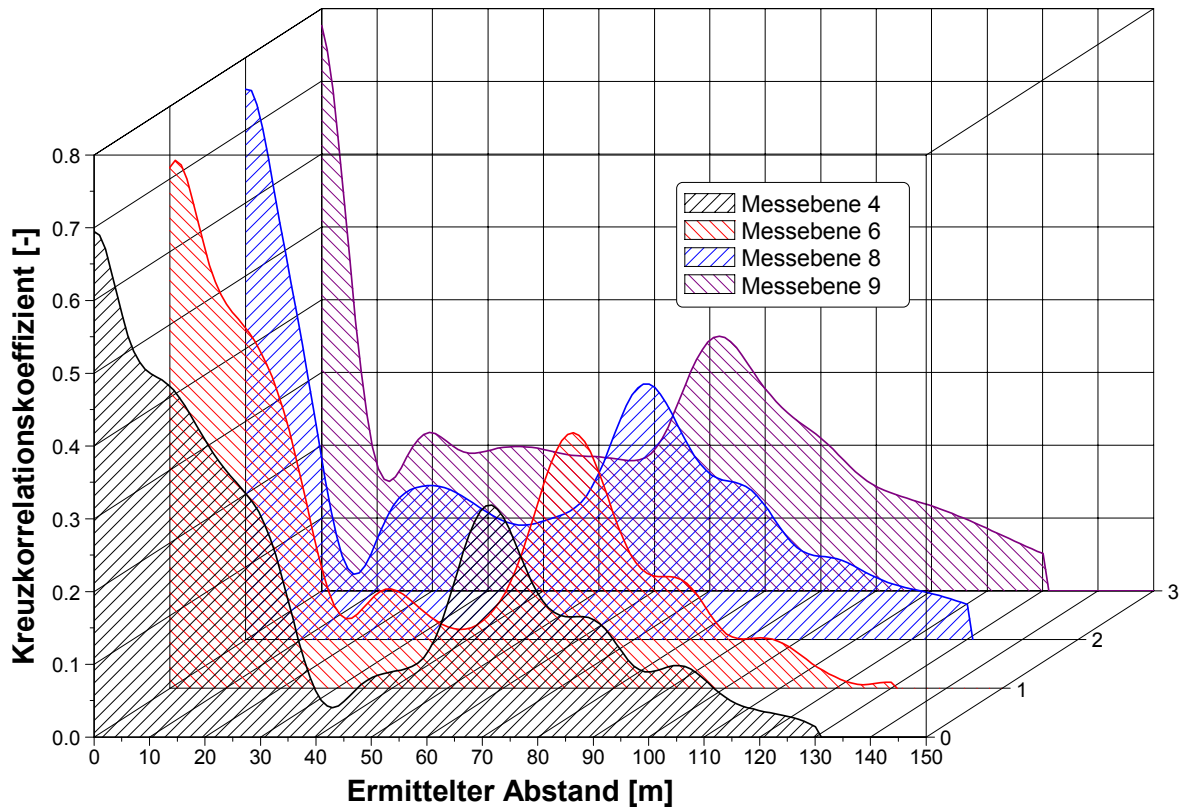


Abb. 6: Ergebnisse der Kreuzkorrelation

Anhand der Kreuzkorrelation ist für alle Messquerschnitte eine einheitliche Pfahlänge von 71,7 m ermittelt worden. Dies entspricht einer Erhöhung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit von ca. 9% von 5122 auf 5571 m/s. Anhand der statistischen Auswertung konnte im Gegensatz zur Betrachtung der Maximalwerte aus den Messsignalen ein einheitliches Bild der Ausbreitungsgeschwindigkeitserhöhung nachgewiesen werden.

Im zweiten Auswertungsschritt wurden unterschiedliche Messebenen untereinander kreuzkorreliert. Anhand des größten normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten kann so die Laufzeit der Welle zwischen den Messebenen beurteilt werden. In Abbildung 7 sind die Ergebnisse der Kreuzkorrelation zwischen den einzelnen Messebenen dargestellt.

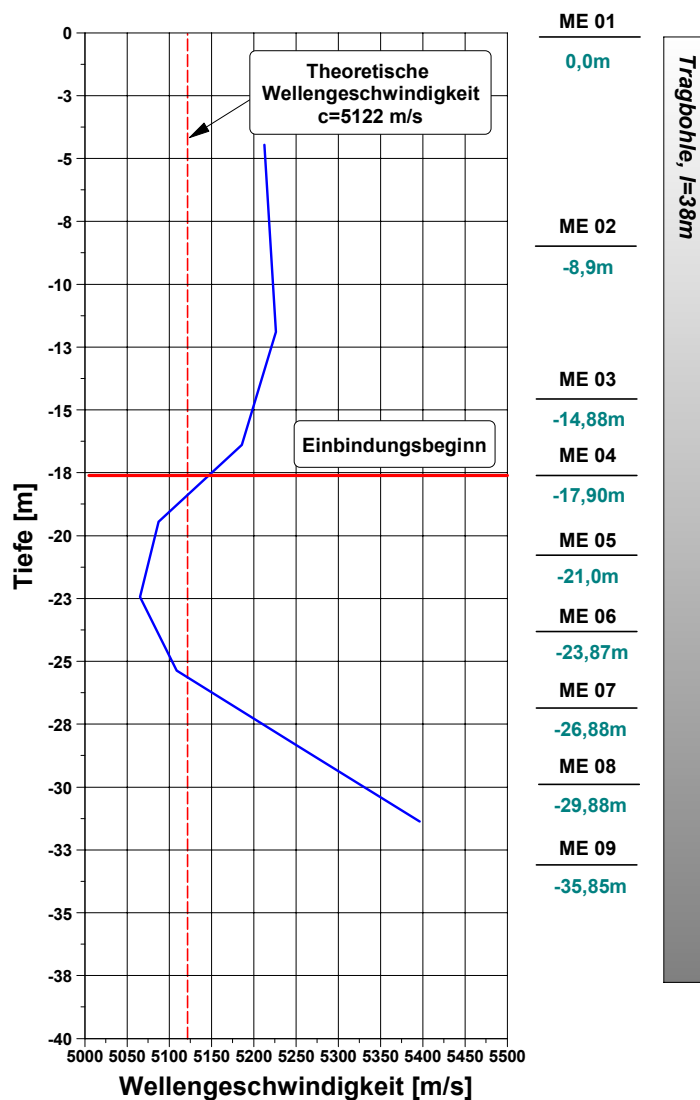


Abb. 7: Ermittelte Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten

Von Messebene 01 bis zur Messebene 04 wird eine annähernd einheitliche Wellenausbreitungsgeschwindigkeit der Einzelauswertungen im Mittel von ca. 5200 m/s erreicht. Dieser Wert ist mit der theoretischen Wellenausbreitungsgeschwindigkeit von 5122 m/s vergleichbar. Beim Auftreffen der Welle in den Einbindungsbereich kommt es zu einer kleinen Verringerung der Ausbreitungsgeschwindigkeit, die sich bis zur Messebene 06 erstreckt und auf die Dämpfung des angreifenden Bodens zurückzuführen ist. Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit steigt danach wieder an. Beim ersten Passieren der Welle an Messebene 09 liegt der Maximalwert bei ca. 5390 m/s. Anhand der zuvor durchgeführten Untersuchungen ist deutlich geworden, dass es nach der Reflexion am Pfahlfuß zu einer weiteren Erhöhung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit kommt, die bezogen auf einen doppelten Durchlauf ein Maximum von ca. 5570 m/s besitzt.

2.1 Ergebnisse im Frequenzbereich

Die bereits dargestellten Untersuchungen sind anhand des aufgezeichneten Messsignales durchgeführt worden. Die messtechnisch erfasste Bewegung setzt sich jedoch aus unterschiedlichen Schwingungsformen zusammen. Bei allen bisher dargestellten Auswertungen ist daher die Gruppengeschwindigkeit der Kompressionswelle bewertet worden. Die Gruppengeschwindigkeit stellt die Geschwindigkeit dar, mit der sich die Kompressionsfront, d. h. das Intensitätsmaximum mehrerer sich überlagernder Wellen, fortbewegt.

Um den Frequenzgehalt unterschiedlicher Messebenen zu untersuchen, wurden die Transferfunktionen zwischen den einzelnen Messebenen betrachtet. Hierzu wurde das Amplitudenspektrum für unterschiedliche Schläge an den einzelnen Messebenen bestimmt. Im Anschluss daran wurden die Transferfunktionen durch Division der Amplitudenspektren benachbarter Messebenen gebildet. Bei einem identischen Frequenzgehalt müsste sich somit für jede Frequenz der Wert von Eins ergeben. In Abbildung 8 sind zwei Mittelwerte von Transferfunktionen gegenübergestellt.

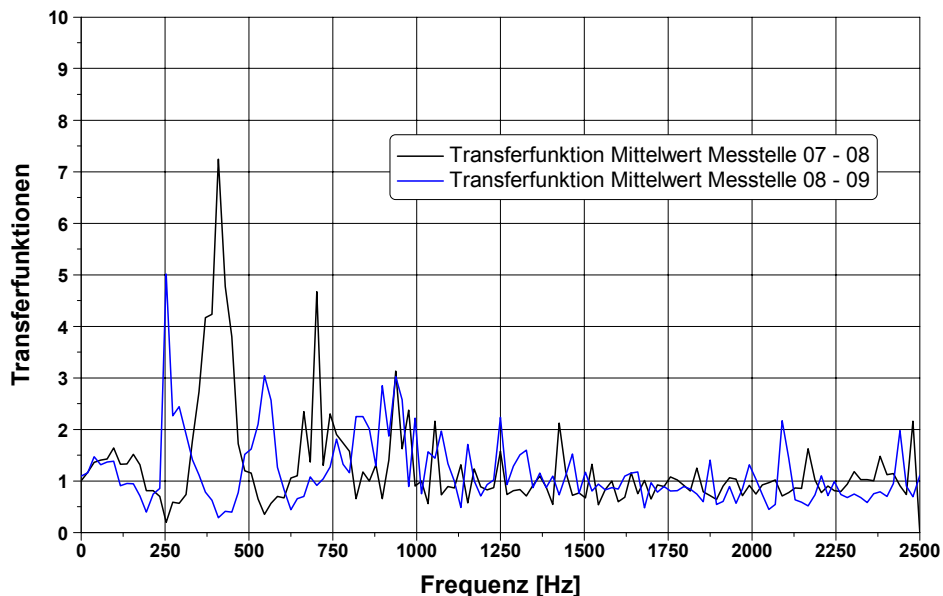


Abb. 8: Transferfunktionen einzelner Messebenen

Im Bereich von ca. 250 Hz, 400 Hz sowie 500 Hz zeigt sich ein Trend, der sich aus mehreren Datenpunkten bildet, was darauf schließen lässt, dass einzelne Frequenzen durch den Boden aus dem Messsignal gedämpft worden sind. Dieser Sachverhalt kann einen Grund für die Zunahme der Wellengeschwindigkeit darstellen, wenn langsamere Schwingungsformen aus dem Signal gedämpft werden und somit zur Beschleunigung der Gruppe beitragen.

3 Numerische Untersuchungen

Die Wellenausbreitung im Pfahl wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Um eine Beurteilung dieser Parameter zu erreichen, wurden neben den Messungen zur Wellenausbreitung im Pfahl ebenfalls numerische Berechnungen durchgeführt. Die in der Dissertation dargestellten Berechnungen umfassen zwei numerische Modelle. Die ersten Untersuchungen wurden an einem rotationssymmetrischen Stab durchgeführt. Das Finite Elemente Modell (FEM) wurde in Anlehnung an das von Smith entwickelte CAPWAP Modell aufgestellt. Anhand dieser Studien soll das im Folgenden kurz diskutierte Bodenmodell verifiziert werden. Weiterhin dienen die Berechnungen zur Ermittlung der messtechnisch nicht erfassten lokalen Geschwindigkeitsverläufe entlang der Pfahlachse, so dass der Energiefluss im Pfahl bewertet werden kann. Die gemessenen Werte werden dabei adaptiv in den Berechnungen berücksichtigt.

Das zweite dreidimensionale Finite Differenzen Modell (FDM) dient zur Grundsatzuntersuchung der Änderung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit infolge einer lateralen Behinderung und wird innerhalb dieser Kurzfassung nicht weiter betrachtet.

In Abbildung 9 ist das den Berechnungen zugrunde gelegte rotationssymmetrische Modell aufgezeigt. Die Einbindelängen beziehen sich wieder auf den 500. Rammschlag, da die Auswertungen für diesen Rammschlag beispielhaft durchgeführt worden sind.

Die Abbildung von Wellenausbreitungsproblemen mittels der FEM setzt eine Modellierung des Pfahles als Dehnstab oder Strukturmodell voraus. In den durchgeführten Untersuchungen mit dem Programmsystem ANSYS ist der Pfahl mit quadratischen Vier-Knoten Elementen im rotationssymmetrischen Spannungszustand und linearen Weggrößenansätzen modelliert worden. Die Freiheitsgrade des Systems sind die Knotenverschiebungen in vertikaler und horizontaler Richtung. Die Modellierung des Stoffverhaltens des Pfahles erfolgt unter Zugrundelegung des linear elastischen Stoffgesetzes nach Hooke.

Durch die Einbindung des Pfahles in den anstehenden Boden kommt es zu einer Interaktion von Boden und Bauwerk. Im Berechnungsmodell wird der angreifende Boden sowohl als linear elastisch-viskoplastisch im Mantelbereich als auch für den Spitzendruck berücksichtigt. Die Formulierung der Massenmatrix erfolgt bei den rotationssymmetrischen Berechnungen mit konsistenten Massen.

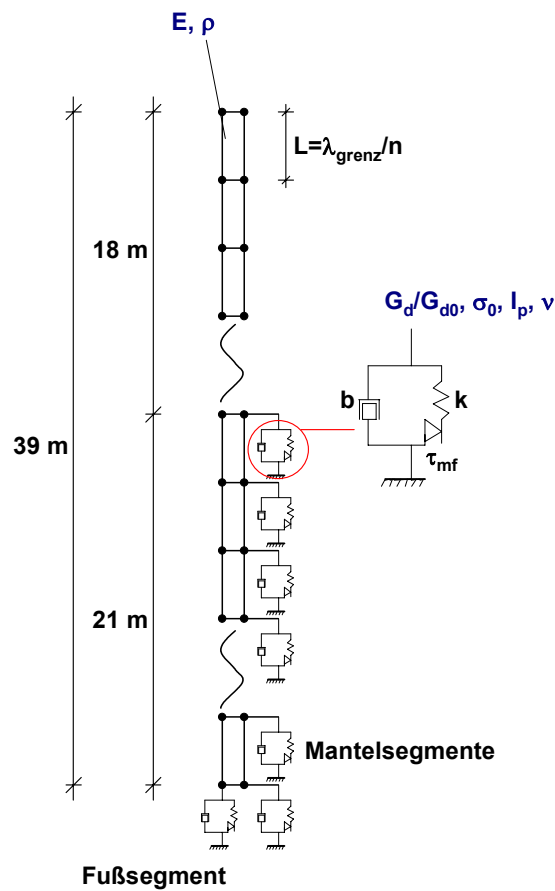


Abb. 9: Schematisches rotationssymmetrisches ANSYS Modell
(nicht maßstäblich)

3.2 Das Baugrundmodell

Der dynamische Schubmodul G_d bezeichnet das Verhältnis der dynamischen Schubspannung τ_d zur resultierenden elastischen Schubverzerrung γ .

$$G_d = \frac{\tau_d}{\gamma}$$

Der dynamische Schubmodul G_d ist keine Bodenkonstante. Vielmehr variiert er mit der Scherdehnungsamplitude γ , der Porenzahl e und der mittleren, allseitigen, effektiven Druckspannung $\bar{\sigma}'_0$ sowie bei kohäsiven Böden mit der Spannungsgeschichte in Form des Überkonsolidierungsgrades OCR. Die Abhängigkeit des Schubmoduls von γ und $\bar{\sigma}'_0$ ist in Abbildung 10 dargestellt.

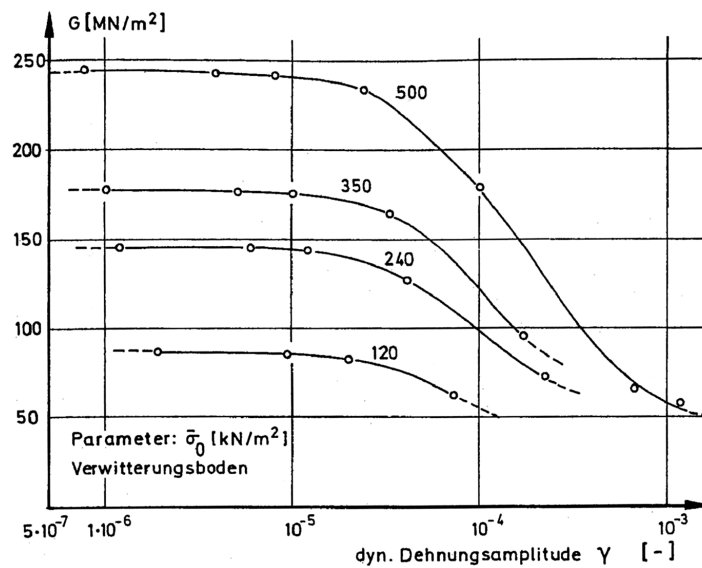


Abb. 10: Dynamischer Schubmodul in Abhängigkeit vom Druck und von der dynamischen Schubverzerrungsamplitude [Haupt, 1986]

Der Maximalwert des Schubmoduls stellt sich bei kleinen Schubverzerrungen ($\gamma < 10^{-5}$) ein und wird mit G_{d0} gekennzeichnet. Durch die Zunahme der Schubverzerrungsamplitude kommt es zu einer Abnahme des Schubmoduls G_{d0} . Dadurch kann bezogen auf die Pfahlrammung der Schubmodul G_{d0} nicht zur Berechnung der Dämpfungs- und Elastizitätsparameter angesetzt werden. In der Literatur werden unterschiedliche Ansätze zur Degradation des Schubmoduls für große Schubverzerrungen vorgeschlagen. In dieser Arbeit wird der Ansatz von [Ishibashi, Zhang, 1993] benutzt, um die Eingangparameter für die numerischen Berechnungen zu ermitteln. Dieser Ansatz beschreibt die Abnahme des Schubmoduls G_{d0} in Abhängigkeit des effektiv angreifenden Spannungszustandes und des Plastizitätsindex I_p .

Durch die Entstehung eines plastischen Bereichs am Pfahlschaft und durch die damit verbundenen großen Schubverzerrungen ist die Vernachlässigung der Materialdämpfung nicht mehr möglich. Zur Berechnung des Dämpfungsgrades D wird ebenfalls die Formulierung nach [Ishibashi, Zhang, 1993] verwendet. Die folgende Formel für den dimensionslosen Dämpfungsgrad ist sowohl für bindige als auch nichtbindige Böden anwendbar.

$$D = 0,333 \frac{1 + e^{-0,0145 \times I_p^{1,3}}}{2} \left(0,586 \left(\frac{G_d}{G_{d0}} \right) - 1,547 \frac{G_d}{G_{d0}} + 1 \right)$$

Durch die Vielzahl an durchgeführten Probelastungen entlang der kompletten Rammtrasse in unterschiedlichen Abständen konnte mit Hilfe des rotationssymmetrischen Berechnungsmodells der Ansatz der Materialdämpfung sowohl für die bindigen als auch für die nichtbindigen Bodenbereiche überprüft werden. Die Materialdämpfung wird bei der Ermittlung der Dämpfungsparameter b als prozentuale Erhöhung der Abstrahlungsdämpfung berücksichtigt.

Anhand der durchgeführten Variationsberechnungen können folgende Aussagen zur Modellierung der Materialdämpfung abgeleitet werden:

- Zur Ermittlung der Dämpfungsparameter für die Pfahlspitze muss die Materialdämpfung als prozentuale Erhöhung zur Abstrahlungsdämpfung für nichtbindige und bindige Böden berücksichtigt werden.
- Bei der Bestimmung der inkrementellen Dämpfung am Pfahlschaft ist die Materialdämpfung nur im Bereich bindiger Bodenschichten anzusetzen.

3.3 Ergebnisse der rotationssymmetrischen Berechnungen

Im Folgenden werden einige Ergebnisse der numerischen Berechnungen dargestellt. Als Referenzwert der ermittelten Pfahlbeschleunigungen bzw. Schwinggeschwindigkeiten kann der gemessene Geschwindigkeitsverlauf der ersten Messebene herangezogen werden. In Abbildung 11 ist der gemessene Geschwindigkeitsverlauf dem der numerischen Berechnung gegenübergestellt. Der Kurvenverlauf macht deutlich, dass unter Ansatz der zuvor beschriebenen Modellparameter eine optimale Angleichung der numerisch ermittelten Schwinggeschwindigkeit erzielt worden ist.

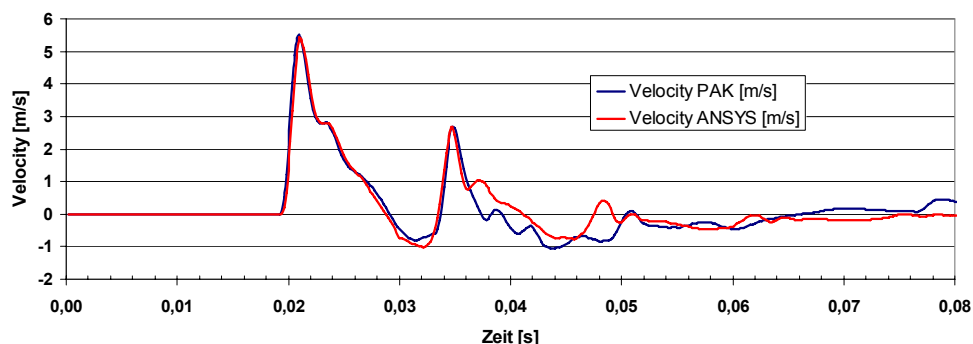


Abb. 11: Vergleich zwischen gemessenem und errechnetem Schwinggeschwindigkeitsverlauf – Messebene 01

Zur Adaption des gemessenen Geschwindigkeitsverlaufes musste ebenfalls die Ausbreitungsgeschwindigkeit im numerischen Modell angepasst werden. Die Anpassung wurde in den Berechnungen über die Rohdichte des Stahlmaterials eingeführt. Die optimale Übereinstimmung wurde mit dem ermittelten Wert aus der Kreuzkorrelationsstudie erreicht.

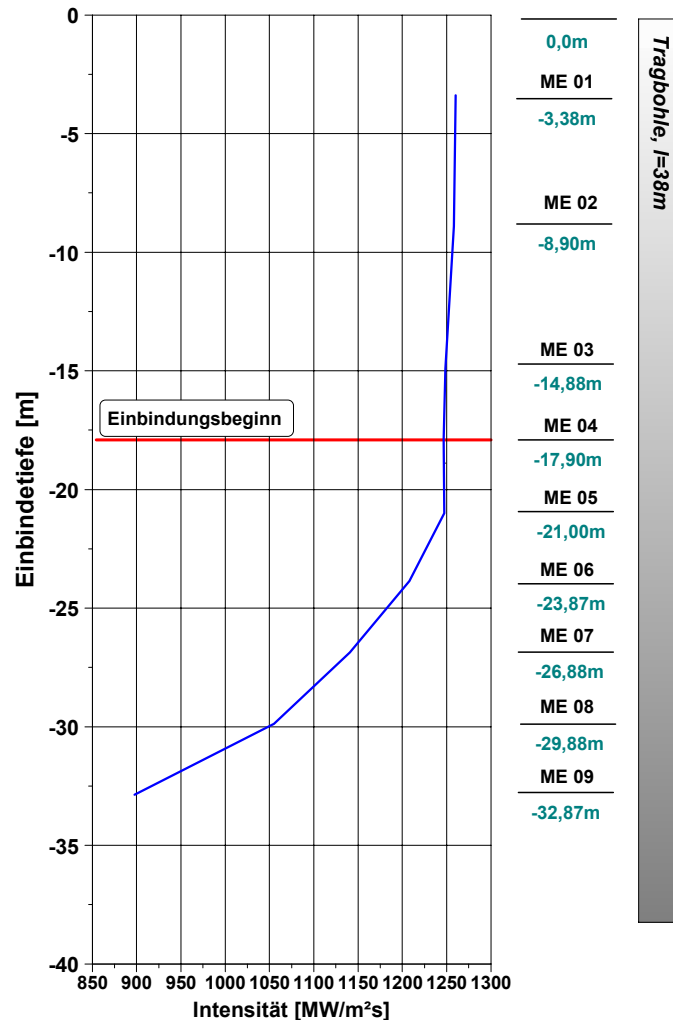


Abb. 12: Momentanes Intensitätsmaximum der Stoßbelastung über die Messquerschnitte

Anhand des numerischen Modells konnten die Schwinggeschwindigkeitsverläufe entlang der kompletten Pfahlachse ermittelt werden. Die ermittelten Schwinggeschwindigkeitsverläufe können zur Beurteilung des momentanen Energieflusses herangezogen werden. In Abbildung 12 sind die Maximalwerte der momentanen Intensität für jeden Messquerschnitt abgebildet. Ab dem sechsten Messquerschnitt kommt es zu einer kontinuierlichen Abnahme der Intensität. Diese Amplitudenabnahme kann durch die angreifenden Dämpfungskräfte aus dem angrenzenden Boden, der Abstrahlung in den Boden sowie der Energie-

umwandlung in Wärme innerhalb der Scherzone zwischen Pfahl und Boden erläutert werden. Von Messstelle 05 bis zur neunten Messebene reduziert sich die Intensität von ca. 1200 MW/m²s auf ein Maximum von ca. 900 MW/m²s.

4 Ergebnisse der Untersuchungen

Die innerhalb der Dissertation durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass folgende Aussagen über die Wellengeschwindigkeit in Pfählen abgeleitet werden können:

- Die elementare Wellenausbreitungsgeschwindigkeit, die sich durch den Elastizitätsmodul und die Rohdichte des Pfahlmaterials ergibt, besitzt höchstens im nicht eingebundenen Pfahlbereich Gültigkeit im unteren Frequenzbereich.
- Beim zweiten Auftreffen der Welle an den einzelnen Messebenen besitzt die Kompressionswelle eine erhöhte Wellengeschwindigkeit gegenüber der theoretischen Ausbreitungsgeschwindigkeit.
- Die Korrelationsstudien der Messdaten zeigen, dass die Welle nach dem Eintritt in den anstehenden Boden eine Beschleunigung erfährt.

Als Ursache für die Veränderung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit können vier mögliche Ursachen, anhand der durchgeführten Untersuchungen festgestellt werden. Dies sind im Einzelnen:

1) Querdehnungsbehinderung

Im Bereich der Einbindung kommt es zu einer lateralen Behinderung der auftretenden Querdehnung durch die Rammbelastung. Hierdurch entsteht der Übergang vom Elastizitätsmodul zum Kompressionsmodul mit behinderter Seitendehnung als charakteristische Bezugsgröße der Ausbreitungsgeschwindigkeit.

2) Gruppen- und Phasengeschwindigkeit

Die eingeleitete Wellenfront unter der dynamischen Stoßbelastung setzt sich aus unterschiedlichen Schwingungsformen zusammen. Dies bedeutet, dass sich bei einer induzierten Dehnwelle höherfrequente Anteile langsamer fortpflanzen, als die im Messsignal ebenfalls enthaltenen niedrigfrequenten Komponenten. Messtechnisch erfasst wird die Gruppengeschwindigkeit der eingeleiteten Welle. Anhand der Versuchsauswertungen wurde gezeigt, dass die Welle bei Eintritt in den anstehenden Boden eine Beschleunigung erfährt. Dies ist genau dann möglich, wenn der

Boden die höherfrequenten Anteile aus der Kompressionsfront dämpft, so dass sich die Gruppengeschwindigkeit erhöht.

3) Dispersion im viskoelastischen Material

Unter Dispersion versteht man die Abhängigkeit der Phasengeschwindigkeit von der Wellenlänge bzw. von der Frequenz. Die Phasengeschwindigkeit viskoelastischer Materialien steigt mit ansteigender Frequenz an. Gegenüber dem Werkstoff Stahl, handelt es sich bei Boden um ein dispersives Medium. Das bedeutet, dass eine sich im Boden ausbreitende Welle gegenüber der Anfangsgeschwindigkeit eine Beschleunigung erfährt. Bei viskoelastischen Materialien tritt eine physikalische Dispersion aufgrund der Materialeigenschaft auf.

4) Dispersion von Dehnwellen

Weiterhin kann eine Dispersion der geführten Dehnwelle im Pfahl auftreten, sobald mindestens eine der wesentlichen Wellenlängen des zusammengesetzten Wellenzuges kleiner ist, als etwa das Doppelte der Querabmessung H des Pfahles. Aufgrund dieser geometrischen Eigenschaften nimmt die Ausbreitungsgeschwindigkeit höherfrequenter Wellen in einem Wellenleiter ab.

5 Literatur

Balthaus, H., 1986

Zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Pfählen mit dynamischen Pfahlprüfmethoden, Promotion, Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Carolowilhelmina zu Braunschweig, Heft 21

Chen, L.; Meier, K., 1996

Dispersive wave propagation analysis for condition assessment of marine timber piles, Fifth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, 11. - 13. September 1996, Orlando, Florida, S. 721 - 732.

Doyle, J.F., 1997

Wave Propagation in Structures, Spectral Analysis Using Fast Discrete Fourier Transforms, Second Edition, Springer Verlag, New York

Elmer, K.-H., 2004

Three-Dimensional Wave Propagation and Energy Flow, International Journal of Computational Engineering Science (IJCES), Imperial College Press, Vol.5, No.3, p. 481-494

Fritsch, M., 2008

Zur Modellbildung der Wellenausbreitung in dynamisch belasteten Pfählen, Promotion, Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Heft 86

Gaul, L., 1999

The influence of Damping on Waves and Vibrations, Mechanical Systems and Signal Processing 13(1), Article No. mssp.1998.0185, MSSP, Academic Press

Haupt, Wolfgang, 1986

Bodendynamik, Grundlagen und Anwendung, Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig / Wiesbaden

Ishibashi; Zhang, 1993

Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay, Soils and Foundations, Vol. 33(1), pp. 182-191

Zhou, J.; Liang, R., 1996

Identification of Soil-Pile Interaction Model Parameters from HST Data, Proceedings of the Fifth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, Orlando, September 1996

Dr.-Ing. Maik Fritsch
INROS LACKNER AG
Lindenstraße
28755 Bremen
Tel.: +49 (0)421 65841 90
Fax: +49 (0)421 65841 10
E-mail: maik.fritsch@inros-lackner.de
Internet: www.inros-lackner.de