Erkenntnisse aus Erschütterungsmessungen beim Frankipfahl

Findings from Vibration Measurements on Franki Piles

Von F. Kopf, Wien, Th. Garbers und L. Söllhuber, Seevetal (D)

Mit 11 Abbildungen

Priv.Doz. Dipl.-Ing.
Dr.techn. Fritz Kopf

Dipl.-Ing.
Thomas Garbers

Dr.-Ing.
Leonardo Söllhuber

Kurzfassung

Die Erschütterungsausbreitung bei der Herstellung von Frankipfählen wurde mittels baustellenbegleitenden Messungen und deren Auswertung analysiert. Der Beitrag zeigt Erkenntnisse bodendynamischer Natur, zum effizienten Rammen sowie zur Reduktion der Erschütterungen auf.

Abstract

The vibrations of Franki pile construction were detected and analysed by means of on-site measurements. Findings in terms of soil dynamics, efficient pile driving procedure and reduction of vibration are presented in this paper.

1. Motivation

Der Frankipfahl NG (neue Generation) ist ein Ortbetonrammpfahl mit vergrößertem Pfahlfuß. Wegen der Bodenverbesserung durch den Verdrängerpfahl und der Möglichkeit, den Pfahlfuß gezielt auszubilden, hat der Frankipfahl in der Regel eine bedeutend höhere Tragkraft als Bohrpfähle mit vergleichbaren Abmessungen. Beim Frankipfahl NG, im Folgenden kurz Frankipfahl bezeichnet, wird beim Betonieren nur mehr der Fuß, und nicht mehr der Schaft ausgestampft.

Die bislang vorliegenden Erschütterungsmessungen an Frankipfahl-Baustellen sind anlassbezogene Messungen, die der Dokumentation von Schwingungen einzelner Objekte und dem Einhalten definierter Grenzwerte dienten. Schwingungsmessungen werden üblicherweise nur dort gemacht, wo es Schützenswertes (Menschen, Objekte) gibt. Genau dort ist in der Regel nicht mit ungestörter Wellenausbreitung zu rechnen, da im besiedelten Bereich Einbauten, frühere Beeinflussung des Untergrundes und die Bebauung, die gemessen wird, das Ausbreitungsverhalten beeinflussen. Die Messprogramme der bisherigen Baustellenmessungen waren nie darauf abgestimmt Erkenntnisse zu gewinnen sondern entsprachen anlassbezogen den lokalen Anforderungen. Mit dem vorhandenen, mit den geschilderten Mischeffekten behafteten, kaum vergleichbaren Datenmaterial ist es nicht möglich, einen brauchbaren Zusammenhang zwischen der Herstellung eines Frankipfahles und den Erschütterungen des Umfeldes zu ermitteln.

Aus diesen Gründen wurde an einer Baustelle, bei der annähernd ideale Bedingungen herrschten, die Erschütterungsausbreitung messtechnisch bestimmt und dabei die Pfahlherstellung variiert, sodass maximaler Erkenntnisgewinn bei minimalem Aufwand zu erzielen war. Diese Idealbedingungen, unter denen anlassbezogen niemals Messungen gemacht würden, sahen wie folgt aus:

- Ebener, horizontal geschichteter Untergrund mit vorliegenden Bodenaufschlüssen (Bodengutachten, Bohrprofil, Druck- oder Rammsondierung, Lage des Grundwasserspiegels etc.)
- Repräsentativer „Frankipfahl-Untergrund“: rammbar, nicht tragfähige Deckschichten geringer Steifigkeit unterlagert von tragfähigem Untergrund in erreichbarer Tiefe.
- Boden im ursprünglichen Zustand: das errichtete Bauwerk ist das erste und einzige im Umkreis
- Keine Einbauten im Untergrund
- Umgebung ist zugänglich z.B. Felder mit Bewuchs von weniger als 1m Höhe.
- Pfähle sind möglichst nicht oder nur schwach geneigt

Die Windkraftanlagen südlich Wiens erfüllen diese Kriterien größtenteils und wurden deshalb für das gegenständliche Experiment ausgewählt.

2. Messort, Messaufstellungen

In der Nähe von Trautmannsdorf (Niederösterreich, Österreich) wurden im Sommer 2015 die Fundamente für Windkraftanlagen hergestellt. Es war eine Tiefgründung erforderlich, Frankipfähle kamen zur Anwendung. Bei der Baustelle TDN-04 wurden die Versuche zur Erschütterungsausbreitung durchgeführt.

Das Pfahlfundament bestand aus 36 Pfählen, die in einem Kreis von 10,15 m Radius angeordnet, mindestens 15 m in den Untergrund einzubinden hatten (Wechselbelastung Zug-Druck). Die Pfähle waren mit der Neigung 4,5:1 nach außen geneigt. Jeder dritte Pfahl jedoch war mit einer Neigung von 7:1 nach innen geneigt. Von diesen schwach geneigten Pfählen wurden sechs für den Versuch ausgewählt.

Die Reihenfolge wurde so ausgewählt, dass die Seiten abgewechselt wurden um den frisch betonierten Pfahl durch eine neuerliche Pfahlherstellung in der unmittelbaren Umgebung

nicht unzulässig zu belasten. Die Versuchspfähle waren mindestens 10,6 m voneinander entfernt. Außerdem wurde darauf geachtet, dass sich in der Messrichtung noch keine Pfähle befanden, welche die Erschütterungsausbreitung stören könnten. Abb. 1 zeigt die Positionierung der Sensorik in Relation zu den Versuchspfählen.

Die stationären Sensoren beziehen sich auf den Mittelpunkt der Fundierung und wurden in ihrer Position den ganzen Versuch über unverändert belassen. Sie waren mit dem Abstand 16 m, 32 m, 64 m und 128 m in einer Linie angeordnet. Die X-Richtung war sowohl für die Schwinggeschwindigkeits- als auch für die Beschleunigungsmessung vom Mittelpunkt wegweisend festgelegt.

Die mobilen Sensoren wurden der Position des jeweils untersuchten Versuchspfahls mitgeführt. Sie lagen auf einer Geraden zwischen dem aktuellen Versuchspfahl und dem stationären Sensor 7 (mit 64 m vom Mittelpunkt) mit dem Abstand 2 m, 4 m, 8 m und 16 m von der Pfahlachse. Die X-Richtung war in Richtung Sensor 7 orientiert. Je nach Position des Versuchspfahles traten somit unterschiedliche Abweichungen in der X-Richtung der mobilen und der stationären Sensoren auf, die in Abbildung 1 mit α bezeichnet sind.

Diese Anordnung hatte den Vorteil, dass nicht alle Sensoren beim Positionswechsel des Pfahlgerätes nachgezogen werden mussten. Die Auswertung berücksichtigt natürlich die tatsächliche Geometrie. Die variablen Distanzen der stationären Sensoren zu den Pfahlpositionen sind in Abb. 1 angegeben.

Es wurden Sensoren zur dreidimensionalen Erfassung der Schwinggeschwindigkeiten und Beschleunigungen eingesetzt und es wurde der Luftschall gemessen und ausgewertet. Der gegenständliche Beitrag beschränkt sich aber nur auf die Messungen der Schwinggeschwindigkeit.

3. Messablauf

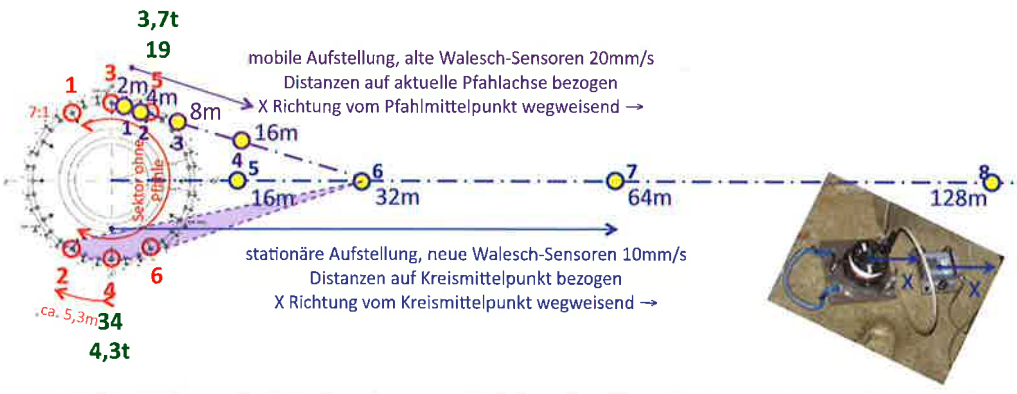
Die in diesem Beitrag beschriebenen Messungen wurden an zwei Pfählen durchgeführt, welche mit unterschiedlichem Rammbärgewicht nach dem Frankipfahl-Prinzip durch Rammen im Rohr hergestellt wurden.

Diese Versuchspfähle konnten nach Belieben gerammt werden und die Fallhöhe des Rammbären auf die Erfordernisse der Rammbarkeit des Untergrundes abgestimmt werden. Jedoch bei jedem vollen Meter Eindringtiefe des Vortriebrohres wurde eine Pause vom regulären Rammbetrieb gemacht, in der Versuchsschläge ausgeführt wurden, die nur der Messung und nicht dem Vortrieb dienten. Vor den Testschlägen wurde das Rohr mit einer Markierung versehen. Darauf folgen jeweils 5 Testschläge mit konstanter Fallhöhe; beginnend mit 2 m, 4 m, 6 m und nach Maßgabe der erlangten Rammtiefe auch noch 8 m und 10 m. Nach jeweils 5 Testschlägen konstanter Fallhöhe wurde kurz pausiert, eine weitere Markierung angebracht und mittels Abstand zur vorhergehenden Markierung die Eindringtiefe durch die letzten Versuchsschläge gemessen. Nach den letzten Versuchsschlägen konnte regulär nach Belieben weiter gerammt werden, bis der nächste volle Meter der Eindringung erreicht wurde. Bei Endteufe wurde wie üblich der Pfropfen bei gleichzeitigem Ziehen mit 4m Fallhöhe gelöst (Wasserkübel ins Rohr geleert) und der Fuß mit gleichzeitigem Wiedereindringen des Rohres mit voller Fallhöhe ausgestampft. Dieser Vorgang wurde bis zum Erreichen des erforderlichen Fußvolumens wiederholt. Danach wurde die Bewehrung eingebracht und betoniert, während die Sensorik bereits in die Position für den nächsten Versuchspfahl gebracht wurde. Mit dieser Abstimmung des Versuchsablaufes konnten mit den zwei Versuchspfählen sämtliche Informationen ermittelt werden, die ursprünglich 10 Versuchspfähle erforderlich gemacht hätten, und dies mit dem Vorteil der besseren Vergleichbarkeit und der Zusatzinformation der gestaffelten Eindringtiefen.

4. Erkenntnisse, bodenphysikalische Phänomene, Konsequenzen für Erschütterungswirkung und Rammfortschritt

Im Folgenden werden einige bodenmechanische Phänomene beschrieben und anhand von exemplarischen Messergebnissen gezeigt. Die Graphiken zeigen auf der Abszisse die Schlagnummer im Laufe der Pfahlherstellung an, während auf der Ordinate die maximale Schwingschnelle dargestellt ist. Die bunten Kurven zeigen die Messwerte an den Versuchsstellen mit definierter Fallhöhe an. An den Einzelpunkten dieser Linien ist die Pfahltiefe (beginnend mit 1 m beim 3,7 t-Rammbären und 2 m beim 4,3 t-Rammbären und endend bei 15 m Eindringtiefe) unschwer ersichtlich.

Im Nahfeld treten die maximalen Erschütterungen bei geringer Eindringtiefe des Pfahles auf (Abb. 2). Genau dann, wenn die zunehmende Eindringtiefe es gerade erlaubt das erste



Nr.	Projekt	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8
1	13	2,00 m	4,00 m	8,00 m	16,00 m	22,85 m	38,10 m	69,65 m	133,35 m
2	1	α = 0			α=	22,64 °	13,34 °	7,25 °	3,78 °
3	16	2,00 m	4,00 m	8,00 m	16,00 m	18,95 m	33,55 m	64,80 m	128,40 m
4	34				α=	32,39 °	17,60 °	9,01 °	4,53 °
5	19	2,00 m	4,00 m	8,00 m	16,00 m	14,00 m	28,30 m	59,60 m	123,25 m
6	31				α=	38,82 °	18,08 °	8,48 °	4,09 °

Abb. 1: Geometrie der Fundierung und der Sensorpositionen

Fig. 1: Geometry of foundation and sensor setup

Mal mit voller Fallhöhe zu arbeiten werden die Erschütterungen im Nahfeld extrem. Mit steigender Pfahltiefe nehmen die Erschütterungen laufend ab und steigen auch beim Erreichen der tragfähigen Schichte sowie beim Ausstampfen und Ziehen des Rohres nicht mehr auf dieses Niveau. Man muss bei der Interpretation der ersten ca. 100 Stößen bedenken, dass erst mit zunehmender Rammtiefe die Fallhöhe gesteigert werden kann, da ansonsten die Gefahr des Ausweichens der Pfahlspitze gegeben ist.

Auch im Fernfeld ist die anfängliche Steigerung der Fallhöhe an den Erschütterungen zu erkennen. Diese nehmen mit zunehmender Eindringtiefe des Pfahles nicht mehr so stark ab und haben ihr Maximum beim Erreichen der tragfähigen Bodenschichte, beim Ausstampfen und beim Ziehen des Rohres (Abb. 3). Die später beschriebene Abhängigkeit von der Bodensteifigkeit ist bereits hier erkennbar.

Anhand der Rammzahlen ist jede Frankipfahl-Herstellung auch als Bodenaufschluss zu verwenden. Aus der Eindringtiefe bei den jeweils 5 Versuchsschlägen pro Fallhöhe lässt sich die theoretische Anzahl von Schlägen ermitteln, die erforderlich wäre, das Rohr 1 m vorzutreiben. Diese Schlagzahlen sind in Abb. 4 ersichtlich. Bei Pfahl 34 (4,3 t) ist eine steife Schicht in 4 m zu erkennen, es können aber auch drei weiche Schichten (in 6 m, 9 m und 13 m Tiefe) ausgemacht werden. In knappen 15 m Tiefe wird der tragfähige Boden erreicht.

Jetzt beinhaltet ein Schlag mit 2 m Fallhöhe aber nur ein Fünftel der Energie eines Schlages mit 10 m Fallhöhe. Die Frage, ob der Rammerfolg proportional ist wird von Abb. 5 beantwortet, in dem die erforderlichen Schläge pro 1 m Eindringung auf einen Meter Rammbär-Fallhöhe und auf die Masse des Rammbären bezogen sind. Deutlich sichtbar ist hier, dass in den weichen Schichten diese Proportionalität gegeben ist, während mit zunehmender Bodensteifigkeit sukzessive die Schläge mit geringer Fallhöhe, beginnend mit 2 m Fallhöhe, gefolgt von 4 m Fallhöhe usw. überproportional ineffektiv werden.

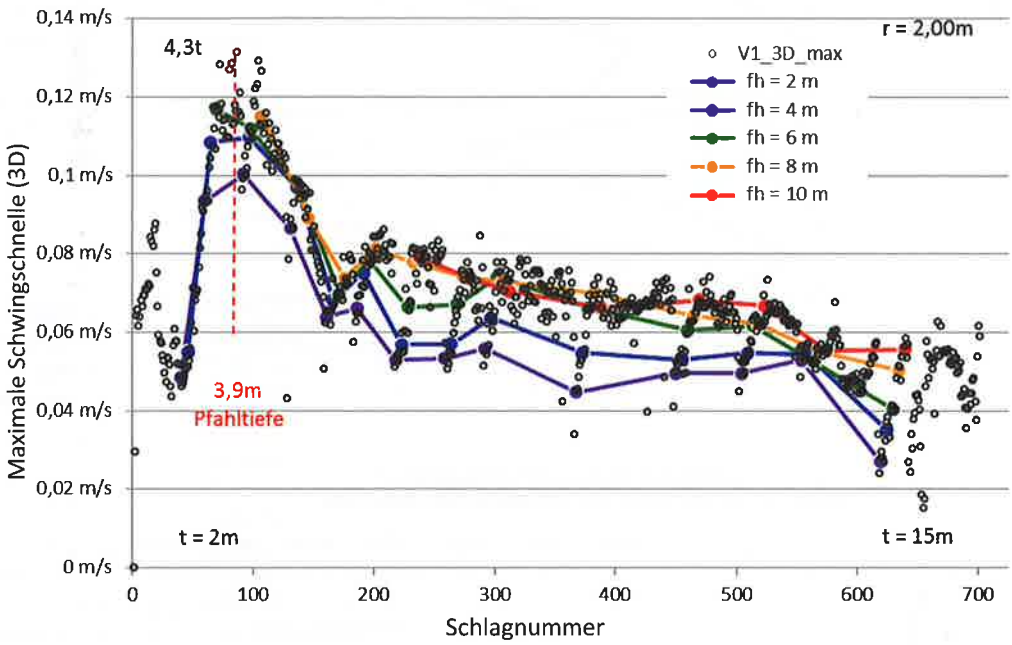


Abb. 2: Erschütterungsmaximum im Nahfeld bei geringer Pfahltiefe

Fig. 2: Maxima of vibration at shallow pile depth in the near field

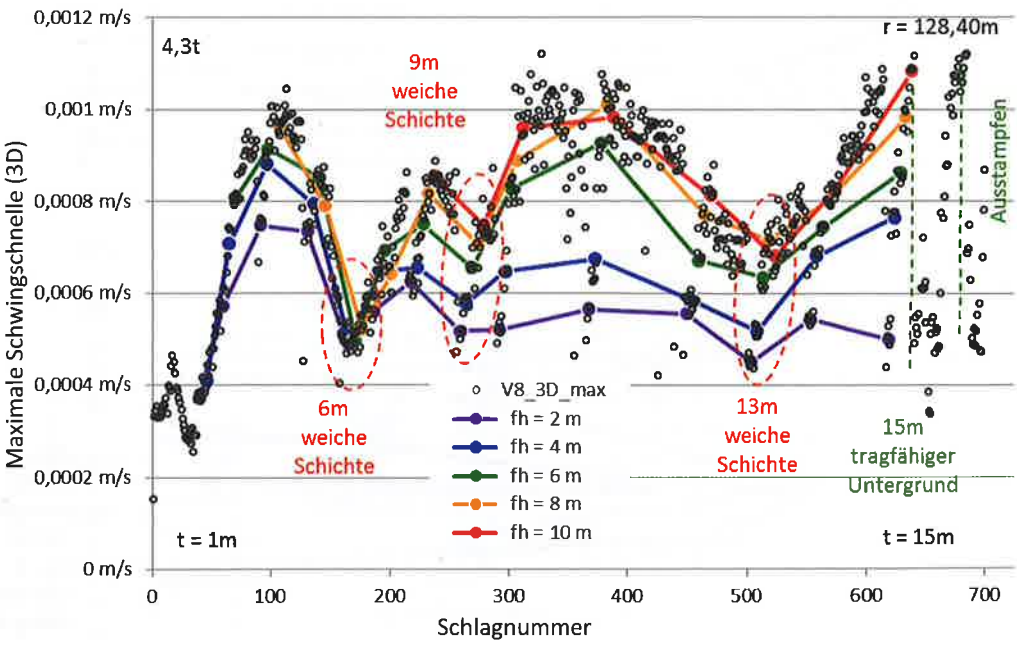


Abb. 3: Erschütterungsmaximum im Fernfeld: bodensteifigkeitsabhängig und maximal, bei Erreichen der tragfähigen Schichte.

Fig. 3: Maxima of vibration in the far field: dependent on soil stiffness, maximum at penetration of stable layer

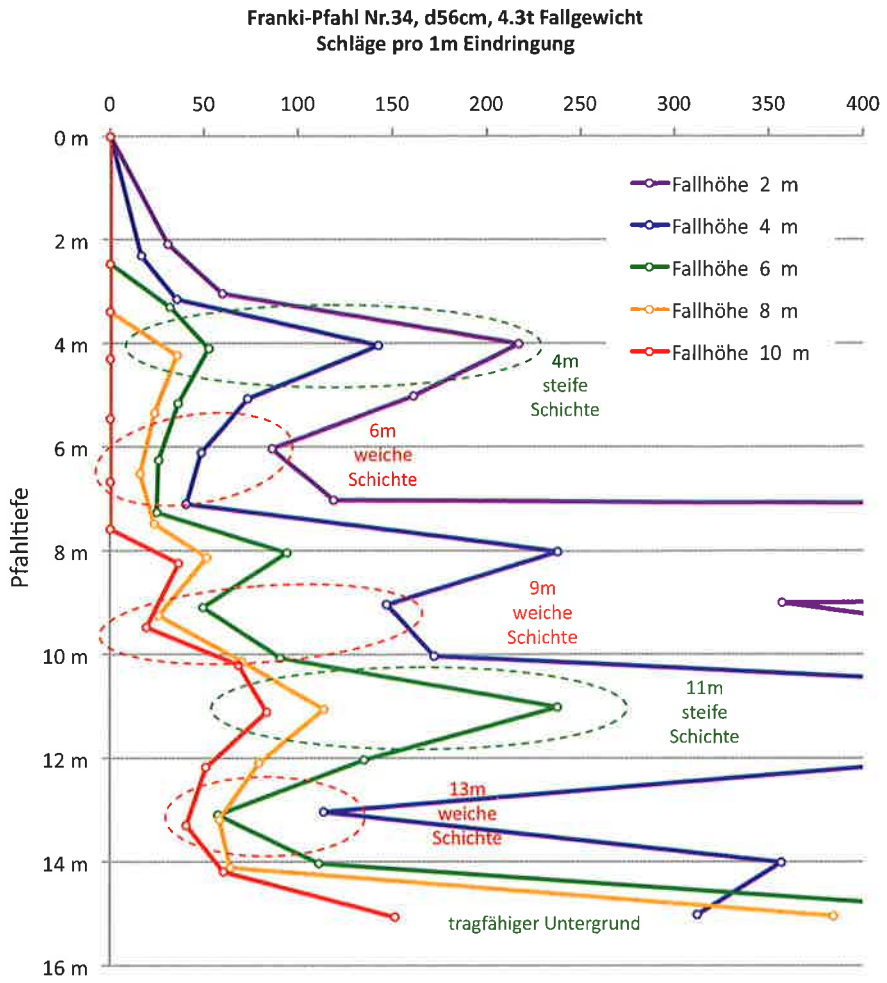


Abb. 4: Theoretische Anzahl von Schlägen die für 1 m Rohrvortrieb erforderlich wäre

Fig. 4: Theoretical number of impacts for one metre of pipe driving

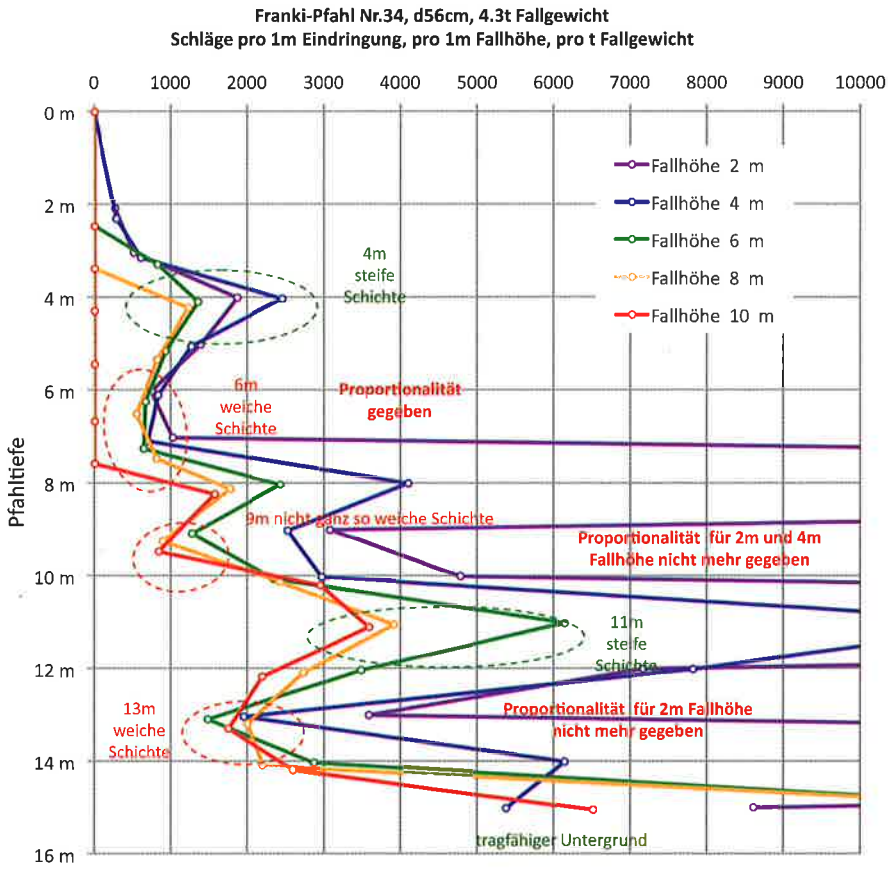


Abb. 5: Theoretische Anzahl von Schlägen die für 1 m Rohrvortrieb erforderlich wäre, bezogen auf 1 m Fallhöhe und 1 t Rammbärmasse

Fig. 5: Theoretical number of impacts for one metre of pipe driving relating to 1 m falling height and 1 t ram mass

Die weichen Schichten zeigen sich aber auch deutlich in den Erschütterungen in der Umgebung. Abb. 6 zeigt die maximalen Schwingschnellen in mittlerem Abstand (33,55 m) von den beiden untersuchten Pfählen. Es zeigt sich deutlich, dass die Umgebung beim Rammen in den weichen Schichten deutlich weniger erschüttert wird als beim Durchörtern steifer Regionen. Auffallend ist, dass die unterschiedlichen Linien gleicher Fallhöhe beim Rammen in weichen Schichten ganz eng zusammenrücken bzw. nahezu zusammenfallen, was bedeutet, dass es für die Erschütterung der Umgebung keinen Unterschied macht, ob mit 2 m Fallhöhe oder mit 10 m Fallhöhe gearbeitet wird. Da aufgrund der oben gezeigten Proportionalität in diesen weichen Schichten der 10m-Schlag fünfmal effektiver ist als der 2 m Schlag und aufgrund des Schlagabstandes (7,4 sec / 2,9sec) nur um den Faktor 2,5-mal langsamer ist, hat man mit großer Fallhöhe weit mehr Effektivität als mit geringer.

Beim Rammen durch die steifen Schichten ist durch die Begrenzung der Fallhöhe eine deutliche Reduktion der Erschütterungen in der Umgebung erzielbar. Die bunten Linien sind weit gefächert. Hier wird das Verfahren jedoch durch die fehlende Proportionalität durch die Fallhöhenbegrenzung noch wesentlich ineffektiver als im Falle von weichen Schichten. Im Weichen, dort wo die Proportionalität wieder gegeben ist, bewirkt die Fallhöhenreduktion aber kaum mehr eine Reduktion der Erschütterungen und kostet damit nur Zeit.

Es gibt eine bodensteifigkeitsabhängige „kritische Fallhöhe" des Rammbären, die mit der Bodensteifigkeit steigt. Wird diese „kritische Fallhöhe" überschritten, so herrscht Proportionalität und eine weitere Steigerung der Fallhöhe bewirkt kaum mehr eine Zunahme der Erschütterungen in der Umgebung. Beim Arbeiten unter der „kritischen Fallhöhe" reduzieren sich zwar die Erschütterungen, durch die überproportionale Ineffektifität bezüglich Rammfortschritt steigt die gesamte Rammenergie durch erhöhte Schlaganzahl aber deutlich an.

Jetzt könnte es erwünscht sein, um einen gewissen Grenzwert der Erschütterungen in der Umgebung einzuhalten (z.B. einige wenige Pfähle einer Großbaustelle in der Nähe empfindlicher Gebäude), die Fallhöhe zu beschränken; wissend, dass es zu Einbußen der Effektivität kommt. Wenn nun die Fallhöhe von 10 m auf 2 m reduziert wird, so wird nur mehr ein Fünftel der Energie eingebracht. Durch den quadratischen Zusammenhang zwischen Feldgröße und Anregungsenergie wäre bei linear elastischer Gesetzmäßigkeit eine Reduktion der Erschütterungen um den Faktor $\sqrt{5}$ = 2,24 zu erwarten. Es at sich jedoch gezeigt, dass der Faktor der maximalen Schwingschnellen bei Fallhöhen 4 m, 6 m, 8 m und 10 m in Relation zu jenen bei 2 m Fallhöhe eine bei weitem nicht so starke Erschütterungsreduktion zeigt, wie die theoretische Erwartung ist. Die Reduktion ist demnach nicht um den Faktor 2,24 gegeben sondern liegt immer unter dem Faktor 1,9. Um eine entsprechende Erschütterungsreduktion zu erzielen, müsste die Fallhöhe noch wesentlich mehr reduziert werden, was die Effektivität des Verfahrens recht bald in Frage stellt.

Nun stellt sich die Frage: Warum nehmen die Erschütterungen in der Umgebung ab dem Erreichen einer „kritischen Fallhöhe" des Rammbären nicht mehr zu?

Frühere Messungen bei anderen verdrängenden Verdichtungsverfahren (z.B. Dynamische Intensivverdichtung „DYNIV") haben gezeigt, dass der Untergrund nur eine begrenzte Kraft aufnehmen kann und wenn diese dynamisch erreicht wird, tritt eine „Gleitphase" auf in der bei annähernd konstanter Kontaktkraft der Boden verdrängt wird.

Wie lange dieser Bruchzustand aufrechterhalten werden kann, liegt an der dynamischen Energie, die durch das Fallgewicht zur Verfügung gestellt wird. Je länger die Gleitphase dauert, desto tiefer ist die Eindringung in den Boden. Dieses Phänomen ließe sich wohl auch beim Frankipfahl mit Hilfe eines Beschleunigungssensors am Rammbären nachweisen.

Je höher der „plastische Anteil" der Verformungsarbeit im Boden ist, desto weniger „elastischer Anteil" bleibt für die Erschütterung der Umgebung über.

Es ist klar, dass im Moment des Rammens des Pfahles an dessen Spitze eine Reihe an bodenphysikalischen Phänomenen auftritt:

- plastische Deformationen (Verdichtung, Verdrängung)
- Porenwasser-Überdruck
- Bodenverflüssigung
- Aufbrechen von Wasserwegigkeiten
- Mantelreibung (Haft- Gleitreibung)
- lokaler Grundbruch, etc.

Wenn nun in einem stark vereinfachten Gedankenmodell eine Grenzkraft angenommen wird, so dient dies nur dem Verständnis der beobachteten Phänomene und beschreibt nicht die reale Situation im Boden.

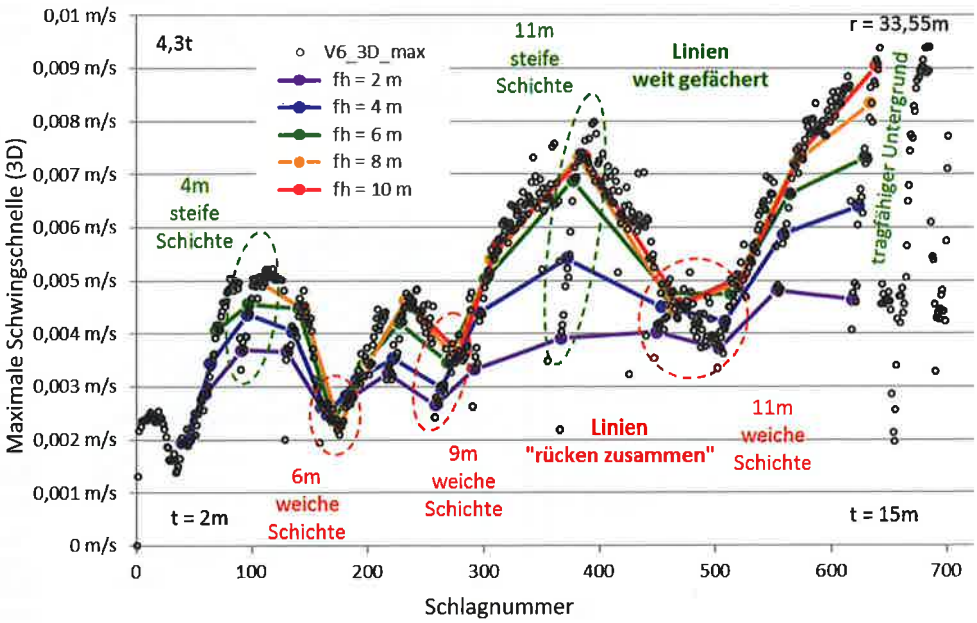


Abb. 6: Maximale Schwingschnellen im Abstand von 33,55 m von dem Versuchspfahl über der Schlagnummer aufgetragen. Einfluss der Untergrundeigenschaften auf die Erschütterungen in der Umgebung

Fig. 6: Maxima of vibration velocity at a distance of 33.55 m from the test pile: dependent on soil stiffness

Wird nun angenommen, dass es eine bodensteifigkeitsabhängige Grenzkraft gäbe, ab der der Pfahl in den Boden eindringt, dann würde in sehr weichen Bodenschichten diese Grenzkraft bei allen Fallhöhen erreicht werden und der Pfahl proportional der Schlagenergie in den Boden eindringen.
Stark vereinfachte Betrachtung ohne elastische Rückfederung:

Energie = Fallgewicht x Fallhöhe ≈ Grenzkraft x Pfahleindringung

In der Betrachtung aus dem Fernfeld wird an der Pfahlspitze kurzfristig die Grenzkraft aufgebracht (Rechteck-Impuls). Je nach Fallhöhe ist die Dauer zwar unterschiedlich, was sich kaum auf die Erschütterungen auswirkt, denn die Grenzkraft ist eben konstant. Genau diese Phänomene zeigen die Messungen: Fallhöhenproportionale Eindringung und nahezu gleiche Erschütterungswirkung im Fernfeld.
Wird in diesem Gendankenmodell nun die Bodensteifigkeit erhöht, so steigt damit auch die Grenzkraft, die dann bei geringen Fallhöhen nicht mehr erreicht wird, da die Energie mit der elastischen Einfederung bereits verbraucht wird und in dieser Form durch die Wellenausbreitung hauptsächlich Erschütterungen ohne Rammfortschritt erzeugt. Natürlich sind die Erschütterungen absolut geringer als jene bei großer Fallhöhe (weitgefächerte bunte Linien an steifen Stellen) aber in Relation zur eingebrachten Energie sind sie überproportional hoch. Erst ab einer Fallhöhe, bei der die erhöhte Grenzkraft erreicht wird und dadurch eine nennenswerte Gleitphase entsteht, stellt sich die Proportionalität wieder ein und ab dieser „kritischen Fallhöhe" steigen die Erschütterungen im Fernfeld nicht mehr nennenswert an. Genau dies ist auch in den Messungen erkennbar.

Jetzt ist die Realität sicher nicht so einfach, dass es wie in dem Gedankenmodell nur eine konstante Grenzkraft gibt. Wenn man sich jedoch zu jedem oben beschriebenen bodenphysikalischen Phänomen eine entsprechende Last-Verformungsrelation vorstellt und diese superponiert, so wird man unter Berücksichtigung von Massenträgheitskräften und Wellenausbreitungsphänomenen der Realität wohl näher kommen.

Die hervorragende Datenqualität und die Erkenntnisse bezüglich der „kritischen Fallhöhe" und der annähernd fallhöhenunabhängigen Erschütterungswirkung beim Arbeiten über dieser „kritischen Fallhöhe" verleiten dazu, einen Zusammenhang zwischen den offensichtlich bodenabhängigen Schlagzahlen und den zugehörigen Erschütterungen herzustellen. Die wechselnden Bodeneigenschaften bei Pfahl 34, mit 4,3 t Fallgewicht, werden nun herangezogen, um den Zusammenhang zwischen Schlagzahl bei Proportionalität und zugehöriger Erschütterungswirkung in folgender Weise herzustellen:

- An den Stellen, an denen Proportionalität (konstante Schlagzahl) herrscht, werden für jene Linien (Fallhöhen), für die Proportionalität gegeben ist, die zugehörigen Schwingschnellen

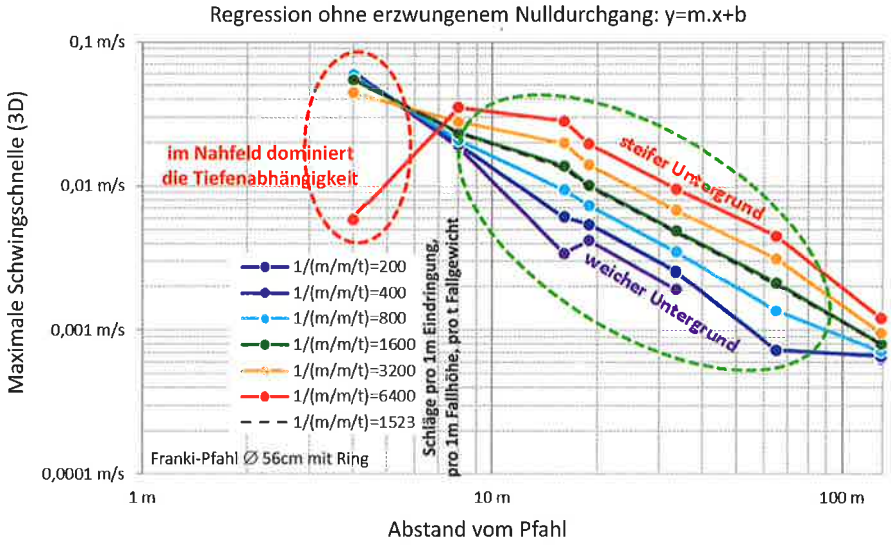


Abb. 7: Abhängigkeit zwischen Schwingschnelle und Abstand zum Franki-Pfahl von 56 cm Durchmesser im doppelt logarithmischen Maßstab für unterschiedliche Schlagzahlen (Regressionsgerade ohne erzwungenen Nulldurchgang)

Fig. 7: Maxima of vibration velocity relating to the distance and the soil stiffness. Relationship with linear regression

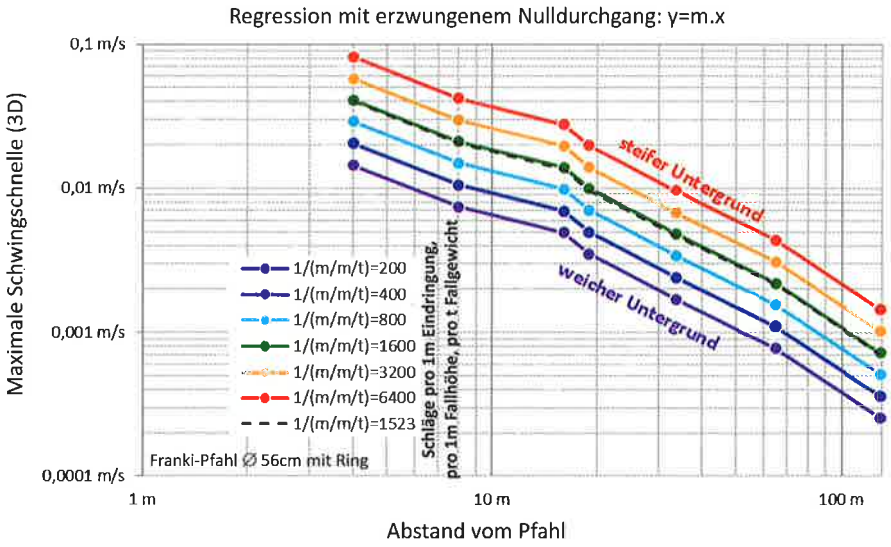


Abb. 8: Abhängigkeit zwischen Schwingschnelle und Abstand zum Franki-Pfahl von 56 cm Durchmesser im doppelt logarithmischen Maßstab für unterschiedliche Schlagzahlen (Regressionsgerade mit erzwungenem Nulldurchgang)

Fig. 8: Maxima of vibration velocity relating to the distance and the soil stiffness. Relationship with linear regression with zero point crossing

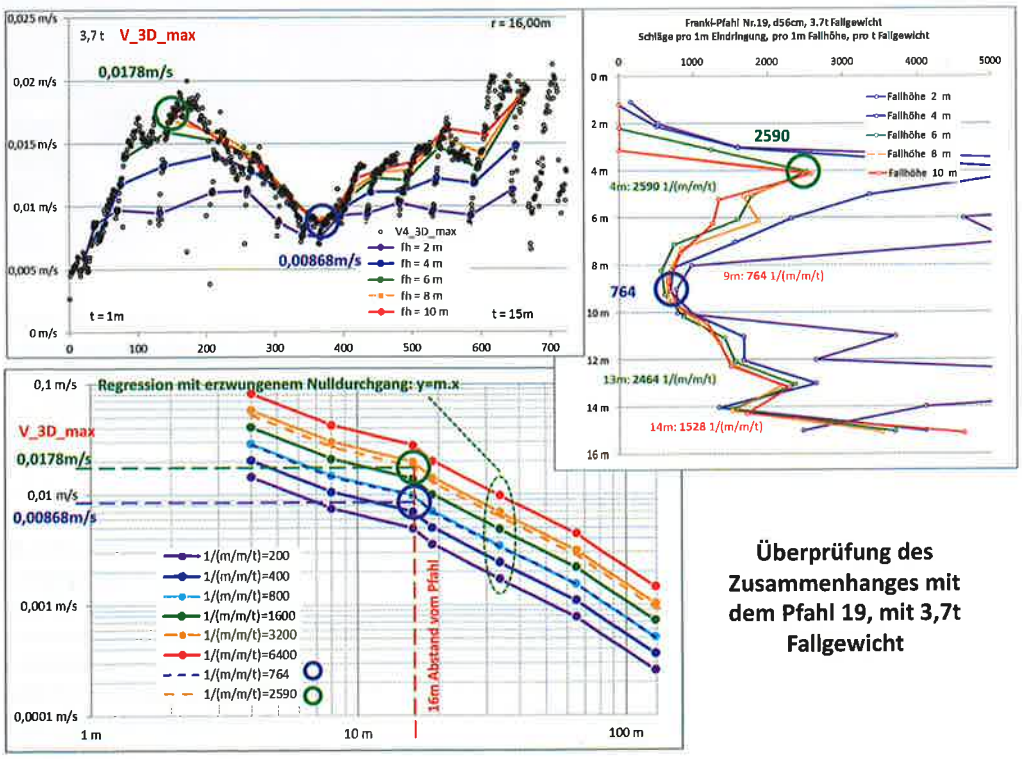
aus den Diagrammen der einzelnen Sensorpositionen herausgelesen
- Diese Schwingschnellen werden quadriert (quadratischer Zusammenhang zwischen Feldgröße und Anregungs-Energie)
- Mit dem Zusammenhang Schlagzahl zu „Schwingschnellenquadrat“ wird eine lineare Regression gebildet, der Schnittpunkt mit der Ordinate und Geradensteigung bestimmt
- Für ausgewählte Schlagzahlen (200, 400, 800, 1600, 3200, 6400 und 1523 Schläge/(m/m/t)) werden die zugehörigen „Schwingschnellenquadrate“ aus der linearen Regression errechnet und davon die Wurzel gezogen um Schwingschnellen zu erhalten
- Die lineare Regression wird einerseits mit einer frei liegenden Geraden geringsten Fehlerquadrats (Regression ohne erzwungenem Nulldurchgang: y = m . x + b) und anderseits mit einer Geraden, die durch den Nullpunkt geht (Regression mit erzwungenem Nulldurchgang: y = m . x) berechnet
- Diese werden im doppelt logarithmischen Maßstab in Abhängigkeit von dem Abstand zum Pfahl aufgetragen um den Zusammenhang darzustellen (Abb. 7 und Abb. 8)

Für jede Sensordistanz wurde die Regression für den Zusammenhang zwischen Schlagzahl und Erschütterung mittels fünf aus den Diagrammen gemessenen Stützpunkten einmal mit einer „freien“ Geraden ermittelt und einmal mit einer Regressionsgeraden, die durch den Nullpunkt geht, bestimmt. Zum Vergleich mit der Norm-Rammarbeit, die in den EA-Pfähle [3] definiert ist, würde die Schlagzahl bei 125 Schlägen / 2 m Eindringung x 6,5 m Fallhöhe x 3,75 t Fallgewicht = 1523 Schläge / (m/m/t) betragen. Dieser Wert wurde als schwarze unterbrochene Linie in Abb. 7 und Abb. 8 eingetragen.
Bei der „freien“ Geraden (Regressionsgerade ohne erzwungenem Nulldurchgang, Abb. 7) ist die Qualität des Zusammenhanges gut erkennbar und damit auch die Grenze der Vertrauenswürdigkeit der Methode. Im Nahfeld dominiert der Einfluss der Pfahltiefe, der in dem gegenständlichen einfachen Gesetz nicht berücksichtigt wird (Die Tiefenabhängigkeit im Nahfeld könnte numerisch untersucht werden und die Ergebnisse mit den gegenständlichen Messungen in Einklang gebracht werden). Im weiteren Fernfeld dürfte der einfache Zusammenhang auch wieder etwas verloren gehen. Dies könnte damit zusammenhängen, dass mit zunehmender Entfernung die zunehmend die Transmission durch die tiefere, tragfähige Schicht dominiert und hier wohl andere Gesetzmäßigkeiten zum Tragen kommen.

Zwischen 16 m und 64,8 m ist der Zusammenhang aber einwandfrei gegeben. Nachdem die Schlagzahl, wie beschrieben, mit einfachen Baustellenmitteln leicht zu bestimmen ist, kann die Erschütterungswirkung mittels des gefundenen Zusammenhanges gleichsam „mit dem Zollstock“ gemessen werden.

Durch das Erzwingen des Nulldurchganges der Regressionsgeraden im Ursprung lassen sich die Streuungen im Zusammenhang weitgehend eliminieren, sodass wunderschöne Linien des Zusammenhanges entstehen (Abb. 8), die auch über die Grenzen dessen gesicherter Gültigkeit hinausgehen.

Beim Pfahl 19 (3,7 t Fallgewicht) weist das Bodenprofil weniger Variation auf, sodass er sich nicht zur Bestimmung des Zusammenhanges zwischen Schlagzahl und Erschütterung eignet. Zur Kontrolle des bei Pfahl 34 (4,3 t Fallgewicht) ermittelten Zusammenhanges kann es jedoch herangezogen werden. Die hervorragende Übereinstimmung in Abb. 9 zeigt, dass die bei Pfahl 34 gefundene Beziehung auch für Pfahl 19 bei leicht anderen Untergrundeigenschaften Gültigkeit hat. Es scheint, als könnte man die Erschütterungen anhand der Schlagzahlen prognostizieren; also förmlich „mit dem Zollstock messen“. Die allgemeine Gültigkeit des gefundenen Zusammenhanges zwischen Schlagzahl und Erschütterung ist damit noch nicht vollständig bewiesen. Dieser Beweis könnte mit hoher Wahrscheinlichkeit geführt werden, würde jedoch viele derartige Messungen an unterschiedlichen Orten bzw. numerische Simulation erfordern.



Überprüfung des Zusammenhanges mit dem Pfahl 19, mit 3,7t Fallgewicht

Abb. 9: Kontrolle der bei Pfahl 34 gefundenen Beziehung anhand des Pfahles 19. (Regressionsgerade mit erzwungenem Nulldurchgang).

Fig. 9: Check of the identified relationship with another pile

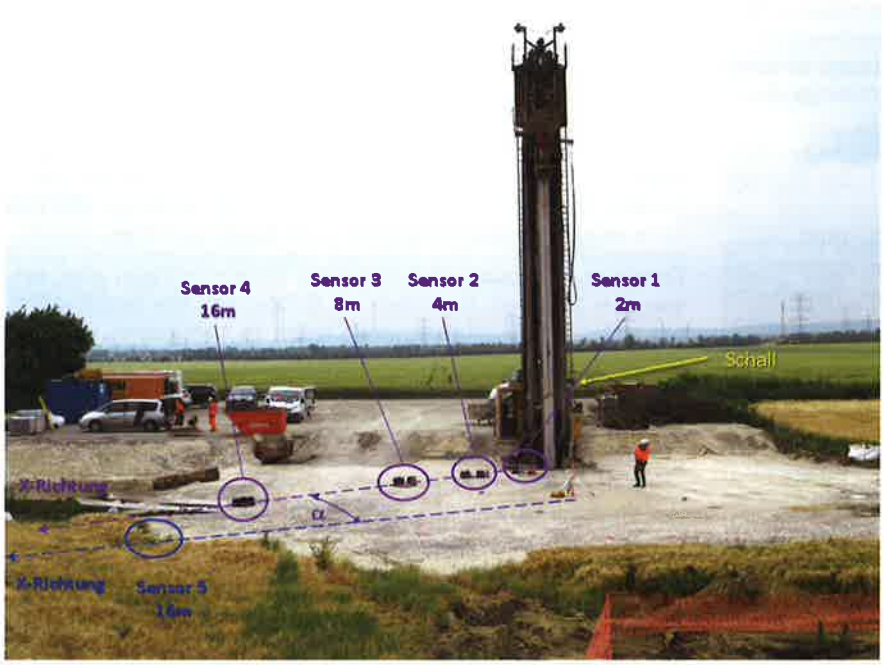


Abb. 10: Mobile Sensoren im Nahfeld

Fig. 10: Near field setup of flexible sensor positions

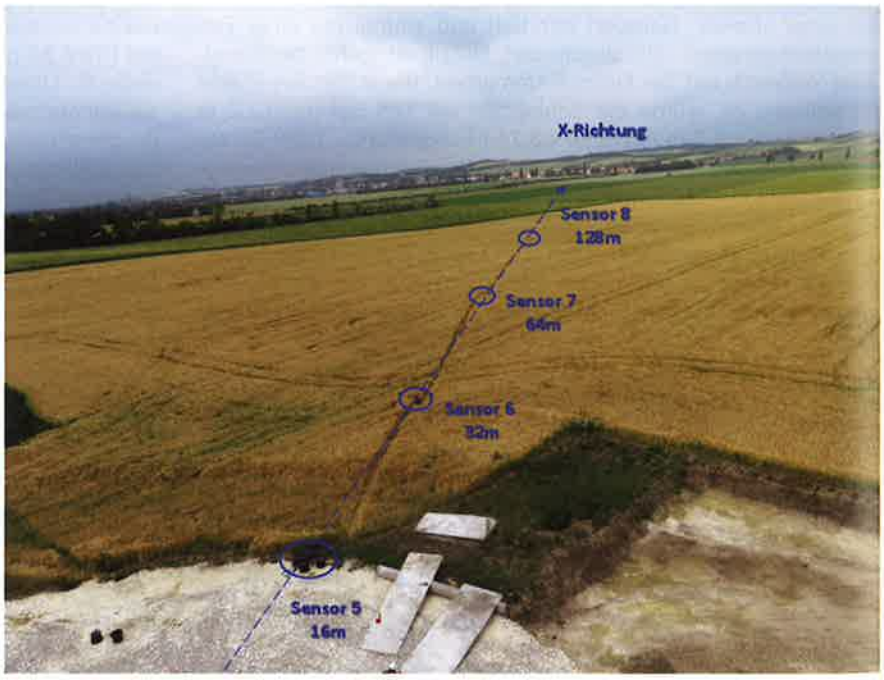


Abb. 11: Stationäre Sensoren im Fernfeld

Fig. 11: Fixed sensor setup in far field

5. Möglichkeiten der Erschütterungsreduktion

Neben der Erkundung der Erschütterungsausbreitung und der Schaffung von Grundlagen zur Erschütterungsprognose war die Möglichkeit der Verminderung der Erschütterungen der Umgebung durch die Begrenzung der Fallhöhe ein entscheidendes Thema der Experimente.

Bei der Auswertung der Messungen und der Interpretation der Ergebnisse konnten entscheidende Erkenntnisse gewonnen werden, die zu einer recht eindeutigen Antwort auf diese Fragestellung führen:

1. Es gibt eine „kritische Rammenergie", die wir in unseren Betrachtungen mit der Fallhöhe des Rammbären beschrieben haben. Sie ist abhängig vom Gerät, der Geometrie des Vortreibrohres und ganz wesentlich von den Untergrundeigenschaften. In weichen Bodenschichten ist die „kritische Fallhöhe" gering, mit zunehmender Bodensteifigkeit steigt sie an, bis sie bei einer bestimmten Steifigkeit die Möglichkeiten des Gerätes übersteigt, sodass ein effizientes Rammen nicht mehr möglich ist und z.B. vorgebohrt werden muss.
2. Die „kritische Fallhöhe" kann, wie in diesem Beitrag beschrieben, einfach und mit Baustellenmitteln (Latte und Zollstock) ermittelt werden.
3. Wird die kritische Fallhöhe unterschritten, so kommt es zu einer Reduktion der Erschütterungen in der Umgebung. Diese Erschütterungsreduktion fällt aber geringer aus, als es der geringeren Energie entspräche. Durch den quadratischen Zusammenhang zwischen Energie und Feldgröße (z.B. Schwingschnelle) müsste die Erschütterung bei einer Halbierung der Fallhöhe etwa um den Faktor $\sqrt{(1/2)} = 0{,}707$ vermindert werden. Die tatsächlich gemessene Verminderung fällt aber geringer aus. Dem gegenüber steht eine über-

proportionale Verringerung des Rammfortschrittes, sodass bei halber Fallhöhe wesentlich mehr als das Doppelte an Schlägen für die gleiche Eindringtiefe erforderlich werden. Da der zeitliche Schlagabstand sich bei einer Halbierung der Fallhöhe nicht ebenfalls halbiert sondern nur leicht verringert, steigt die Zeit der Pfahlherstellung nochmals deutlich an. Die Grenze des Machbaren und des Zumutbaren ist demnach rasch erreicht.

4. Wird oberhalb der „kritischen Fallhöhe" gearbeitet, so ist die Proportionalität zwischen Rammenergie und Rammfortschritt nahezu gegeben. Eine Verdoppelung der Fallhöhe bewirkt demnach etwa eine Verdoppelung der Eindringung des Vortriebrohres. Die Messungen haben gezeigt, dass es eine, der Schlagzahl zugehörige Erschütterungswirkung bei der Frankipfahl-Herstellung gibt, die sich bei Erhöhung der Fallhöhe kaum mehr steigert, sondern nahezu konstant bleibt (erst im weiten Fernfeld steigt sie vielleicht etwas an). Der zeitliche Schlagabstand erhöht sich nur moderat, sodass sich steigende Fallhöhe mehrfach günstig auf die Effizienz auswirkt.
5. Wird oberhalb der „kritischen Fallhöhe" gearbeitet, sind die Erschütterungen im Fernfeld kaum mehr von der Fallhöhe sondern hauptsächlich von der Bodensteifigkeit abhängig. Die Bodensteifigkeit kann durch die Schlagzahl beschrieben werden, welche die Anzahl der Schläge pro Meter Eindringung, pro Meter Fallhöhe, pro Tonne Rammbärmasse angibt und leicht mit Baustellenmitteln zu bestimmen ist. Der Zusammenhang zwischen der Schlagzahl (Bodensteifigkeit), dem Abstand vom Pfahl und den Erschütterungen konnte in diesem Beitrag hergestellt und verifiziert werden.
6. Es hat sich in den Ergebnissen der Messungen gezeigt, dass sich die Erschütterungen beim Durchörtern weicher Schichten deutlich verringern, während steife Schichten zu Spitzen in den Umgebungs-Erschütterungen führen. Wenn nun die Untergrundverhältnisse beim Arbeiten oberhalb der „kritischen Fallhöhe" zu Überschreitungen der zulässigen Erschütterung in der Umgebung führen, hat es wenig Sinn die Fallhöhe unter die „kritische Fallhöhe" abzusenken, da die geringen Erschütterungsverminderungen die fehlende Effizienz und deutliche Erhöhung der Schlaganzahl und Herstellungsdauer nicht rechtfertigen. Vielmehr könnte es sinnvoll werden, örtlich durch Vorbohren den Untergrund so aufzulockern, dass die Erschütterungen auch beim Arbeiten über der nun geringer werdenden „kritischen Fallhöhe" im akzeptablen Bereich blieben. Diese Methode ist nur dann erfolgversprechend, wenn das Schutzgut im Nahfeld gelegen ist, welches hauptsächlich beim Durchörtern der oberen Bodenlagen erschütterungsmäßig in Mitleidenschaft gezogen wird, denn beim Einbinden in die tragfähigen Schichten und beim Ausstampfen des Fußes treten unverminderte Erschütterungen auf, welche im Fernfeld dominant werden und durch Vorbohren kaum in den Griff zu bekommen sind.
7. Wenn das Vorbohren überhand nimmt, dann stellt sich ohnehin die Frage, ob die Frankipfahl-Herstellung überhaupt die geeignete Methode der Gründung darstellt oder andere Methoden zu bevorzugen wären.
8. Der Frankipfahl ist eine raffinierte Methode unter Ausnützung der bodenmechanischen und bodendynamischen Phänomene und Effekte (z.B. Siloerddruck im Pfropfen beim Rammen im Rohr) auf sehr effiziente Weise mit geringen Mitteln und geringem Materialaufwand unter gleichzeitiger Bodenverbesserung einen hoch tragfähigen Pfahl herzustellen. Aber er benötigt vom Untergrund her und eben von dem Fehlen erschütterungsempfindlicher Bebauung bzw. Anrainer her ausreichende Frankipfahl-Bedingungen. So hervorragend die Methode unter guten Bedingungen funktioniert, so deplatziert ist sie wenn die erforderlichen Verhältnisse nicht gegeben sind. Der vorauseilenden Erkundung des Untergrundes kommt somit eine zusätzliche Bedeutung zu.
9. Das Entscheidende für gute Frankipfahl-Bedingungen ist, dass „ungehemmt" mit großer Fallhöhe gearbeitet werden kann, sobald der Pfahl soweit eingedrungen ist, dass dies möglich ist, ohne ein Ausweichen zu riskieren. Je größer die Rammenergie, desto effizienter ist die Methode. Die zur Verfügung stehende Rammenergie sollte durch das Gerät und nicht durch die Baustellenumstände begrenzt sein und deutlich über der „kritischen Rammenergie" liegen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Es hat sich gezeigt, dass bei systematischer Vorgehensweise bereits mit sehr geringem Aufwand grundlegende Erkenntnisse gewonnen werden können.
Das nunmehr bekannte Prinzip der Gewinnung der „kritischen Fallhöhe" aus der Dokumentation der Eindringung bei unterschiedlichen Fallhöhen kann mit einfachen Mitteln (Latte und Maßstab) unter Baustellenbedingungen angewandt werden. Es dient nicht nur zur Abschätzung einer möglichen Erschütterungsreduktion, sondern hilft auch die Effizienz der Methode zu beurteilen. Auch unter steifen Boden-Bedingungen, unter denen nur mäßiger Rammfortschritt zu verzeichnen ist, könnte die Methode zur Abschätzung dienen, wie weit man von der „kritischen Rammenergie", das heißt von der mindestens erforderlichen Rammenergie entfernt ist.
Vielleicht stehen in Zukunft einmal Geräte zur Verfügung, die die Fallhöhe automatisch halten können und die in der Lage sind, die Eindringtiefe des Pfahles genau zu registrieren. Dann müsste man nur stellenweise ein „Versuchspfahl-Programm" fahren um einen perfekten Frankipfahl-Bodenaufschluss zu gewinnen, der vor Ort sofort ausgewertet zur Verfügung stünde.
Mit dem Fortschritt in der Messtechnik wird es wohl auch bald möglich sein, die Fallgewichtsbeschleunigungen zu registrieren und kabellos zu übermitteln. Die Größe und Form der dynamischen Ramm-Kraft gäbe weitere Erkenntnisse bodenphysikalischer Natur.

Literaturverzeichnis

[1] Kopf, F.; Garbers, T,; Pani, E.: Der Frankipfahl in Österreich, Tagungsband der 10. Österreichische Geotechniktagung des Österreichischen Nationalkomitees der International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ASSMGE) und des ÖIAV, Messe Wien Congress Center Vienna, 29.–30. Jänner 2015, Wien

[2] Kopf, F.; Garbers, T,; Söllhuber, L.: Franki Pfahl – Erkenntnisse aus Erschütterungsmessungen, Tagungsband, 10. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, 19. und 20. Jänner 2016, Ostfildern/Stuttgart

[3] EA-Pfähle Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.), Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle", 2. wesentlich überarbeitete und erweiterte Auflage – Januar 2012

Priv.Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Fritz Kopf
FCP, Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH
Diesterweggasse 3, A-1140Wien
kopf@fcp.at

Dipl.-Ing. Thomas Garbers
isg, Ingenieurservice Grundbau GmbH
Hittfelder Kirchweg 24, D-21220 Seevetal
tgarbers@isg-seevetal.de

Dr.-Ing. Leonardo Söllhuber
FRANKI, Franki Grundbau GmbH & Co.KG,
Hittfelder Kirchweg 24-28, D-21220 Seevetal
lsoellhuber@franki.de