

DIN EN ISO 22477-4



ICS 93.020

Einsprüche bis 2016-12-21

Entwurf

**Geotechnische Erkundung und Untersuchung –
Prüfung von geotechnischen Bauwerken und Bauwerksteilen –
Teil 4: Pfahlprüfungen: Dynamische Pfahlprobebelastung
(ISO/DIS 22477-4:2016);
Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 22477-4:2016**

Geotechnical investigation and testing –
Testing of geotechnical structures –
Part 4: Testing of piles dynamic load testing (ISO/DIS 22477-4:2016);
German and English version prEN ISO 22477-4:2016

Reconnaissance et essais géotechniques –
Essais de structures géotechniques –
Partie 4: Test des pieux de charge dynamique (ISO/DIS 22477-4:2016);
Version allemande et anglaise prEN ISO 22477-4:2016

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2016-10-21 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal des DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nabau@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau), 10772 Berlin, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 102 Seiten

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 22477-4:2016) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 341 „Geotechnische Erkundung und Untersuchung“, dessen Sekretariat vom BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird, in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee ISO/TC 182 „Geotechnics“ erarbeitet.

Das zuständige deutsche Gremium ist der Arbeitsausschuss NA 005-05-07 AA „Baugrund; Pfähle (SpA zu Teilen von CEN/TC 288 sowie CEN/TC 341/WG 4 und WG 7)“ im DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung der prEN ISO 22477-4 beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

**Geotechnische Erkundung und Untersuchung — Prüfung von
geotechnischen Bauwerken und Bauwerksteilen — Teil 4: Pfahlprüfungen:
Dynamische Pfahlprobelastung (ISO/DIS 22477-4:2016)**

*Reconnaissance et essais géotechniques — Essais de structures géotechniques — Partie 4 : Test des pieux de charge
dynamique: (ISO/DIS 22477-4:2016)*

*Geotechnical investigation and testing — Testing of geotechnical structures — Part 4: Testing of piles dynamic load
testing (ISO/DIS 22477-4:2016)*

ICS:

Deskriptoren:

Dokument-Typ: Europäische Norm
Dokument-Untertyp:
Dokumentstufe: parallele Umfrage
Dokumentsprache: D

STD Version 2.8f

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Vorwort	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe und Symbole	8
3.1 Begriffe	8
3.2 Symbole	10
4 Prüfeinrichtung	11
4.1 Allgemeines	11
4.2 Belastung	11
4.2.1 Belastung durch ein Rammsystem	12
4.2.2 Belastung durch eine einzelne oder durch mehrere Fallmassen	12
4.3 Messungen	12
4.3.1 Messungen für dynamische Aufprallversuche	13
4.3.2 Erforderliche Messungen und Aufzeichnungen für Pfahleinbringungsgleichung oder Wellengleichungsanalyse	14
5 Prüfdurchführung	15
5.1 Vorbereitung der Prüfung	15
5.2 Sicherheitstechnische Anforderungen	15
5.2.1 Personen und Ausrüstung in der näheren Umgebung	15
5.2.2 Probepfahl	16
5.3 Vorbereitung des Pfahls	16
5.4 Zeit der Prüfungen	16
5.4.1 Einbringen - kontinuierliche Überwachung und Ende der anfänglichen Einbringungsprüfung	16
5.4.2 Erneutes Einbringen	16
5.4.3 Bohrpfähle oder vor Ort hergestellte Pfähle	17
6 Prüfergebnisse	17
6.1 Prüfergebnisse für dynamische Probelastung mittels Einbringungsgleichung	17
6.2 Prüfergebnisse für dynamische Probelastung mit Wellengleichungsanalyse	17
6.3 Prüfergebnisse für dynamische Probelastung mit Messungen am Pfahlkopf	18
7 Prüfbericht	18
Anhang A (informativ) Einbringungsgleichung	20
A.1 Allgemeines	20
A.2 Allgemeines Konzept der Einbringungsgleichung	20
A.2.1 Analyse Einbringungsgleichung	20
A.2.2 Bestimmung der kinetischen Energie (E_k)	20
A.2.3 Bestimmung des Restitutionskoeffizienten (C_r)	21
A.2.4 Bestimmung der Eindringung des Pfahls (s und s_{el})	21
A.2.5 Bestimmung der empirischen Effizienz / des Korrelationsfaktors η	22
A.2.6 Berechnung der zum Pfahl übertragenen Energie E_{tr}	22

A.2.7	Berechnung des Bodenwiderstands R_u	22
A.2.8	Zu berücksichtigende ergänzende Faktoren.....	22
Anhang B (informativ) Wellengleichungsanalyse.....		23
B.1	Allgemeines	23
B.2	Allgemeines Konzept der Wellengleichungsanalyse.....	23
B.3	Mathematisches Modell	24
B.3.1	Algorithmen der Wellenausbreitung.....	24
B.3.2	Mechanische Modellierung von Fallgewicht, Komponenten, Polsterung und Pfahl.....	25
B.3.3	Modellierung des nichtlinearen Bodenverhaltens	25
B.3.4	Modellierung des Bodenermüdungsverhaltens.....	25
B.3.5	Modellierung der Bodenschichten.....	26
B.3.6	Zeitverläufe	26
B.3.7	Bestimmung der permanenten Eindringung	27
B.4	Tragfähigkeits-Kurve-Verfahren.....	28
B.5	Verfahren zur Anpassung der Schlagzahl.....	29
Anhang C (informativ) Beispiele für die Befestigung von Schwingungsaufnehmern		33
Anhang D (informativ) Auswertung durch geschlossene Lösungen unter Verwendung von empirischen Dämpfungswerten		34
D.1	Allgemeines	34
D.2	Grundlegende Betrachtungen für Analyseansätze geschlossener Lösungen.....	34
D.3	Beispiele für Analyseansätze geschlossener Lösungen.....	36
D.3.1	CASE-Methode.....	36
D.3.2	TNO-Methode	38
Anhang E (informativ) Bewertung der Messungen durch Signalanpassung.....		42
E.1	Allgemeines	42
E.2	Begriffe.....	42
E.3	Modell des Pfahls.....	42
E.4	Modell des Bodens	43
E.5	Prozess der Signalanpassung.....	44
E.6	Sensitivität der Signalanpassung und Vergleich mit Bodenuntersuchungen	46
E.7	Ausgangsleistung.....	46
Literaturhinweise.....		49

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 22477-4:2016) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 182 „Geotechnics“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 341 „Geotechnische Erkundung und Untersuchung“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur parallelen Umfrage vorgelegt.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO/DIS 22477-4:2016 wurde vom CEN als prEN ISO 22477-4:2016 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung von Nationalen Normungsorganisationen (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird normalerweise von ISO Technischen Komitees durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale Organisationen, staatlich und nicht-staatlich, in Liaison mit ISO, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) bei allen elektrotechnischen Themen zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Direktiven, Teil 1 beschrieben. Im Besonderen sollten die für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten notwendigen Annahmekriterien beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der empfangenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname wird als Information zum Nutzen der Anwender angegeben und stellt keine Anerkennung dar.

Eine Erläuterung der Bedeutung ISO-spezifischer Benennungen und Ausdrücke, die sich auf Konformitätsbewertung beziehen, sowie Informationen über die Beachtung der Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO) zu technischen Handelshemmnissen (TBT, en: Technical Barriers to Trade) durch ISO enthält der folgende Link: www.iso.org/iso/foreword.html.

Das für dieses Dokument verantwortliche Komitee ist ISO/TC 182 „Geotechnics“, Unterkomitee SC 1.

ISO 22477 besteht unter dem allgemeinen Titel *Geotechnical investigation and testing — Testing of geotechnical structures* aus folgenden Teilen:

- *Part 4: Pile load test by dynamic axially loaded compression test (in preparation)*
- *Part 5: Testing of anchorages (in preparation)*
- *Part 10: Testing of piles: rapid load testing (in preparation)*

Einleitung

Die vorliegende internationale Norm bestimmt die Spezifikationen für die Ausführung von dynamischen Pfahlprobebelastungen, in denen ein einziger Pfahl einer komprimierten Axialbelastung unterliegt, um seine Dehnung, Beschleunigung und Verschiebung bei dynamischen Belastungen zu messen und um eine Bewertung seiner Druckfestigkeit zu ermöglichen. Diese internationale Norm legt dar, wie eine dynamische Pfahlprobebelastung definiert ist und spezifiziert die erforderlichen Geräte und Prüfverfahren. Die Auswertung der Prüfergebnisse der dynamischen Pfahlprobebelastung umfasst eine informative, nicht normative Anleitung, die erforderlich ist, um den mobilisierten oder endgültigen Druckwiderstand eines Pfahls zu bestimmen.

Diese internationale Norm wurde als Teil der ISO 22477-Serie *Geotechnical investigation and testing — Testing of geotechnical structures* erarbeitet.

1 Anwendungsbereich

Die vorliegende internationale Norm bestimmt die Spezifikationen für die Ausführung von dynamischen Pfahlprobelastungen, in denen ein einziger Pfahl einer dynamischen komprimierten Axialbelastung unterliegt.

Diese Norm beschreibt die erforderlichen Prüfmethoden für die Bewertung des Pfahlwiderstands, der mit den folgenden Methoden und Verfahren bestimmt wird:

- a) dynamische Schlagprüfung – Bestimmung des Pfahlwiderstands durch Auswertung der Messungen von Dehnung und Beschleunigung und/oder Verschiebung am Pfahlkopf in Abhängigkeit der Zeit;
- b) Gleichungen für das Einbringen des Pfahls – Bewertung des Pfahlwiderstands aus Schlagzahl und Energie des Hammers während der Rammarbeiten;
- c) Analyse von Wellengleichungen – Bewertung des Pfahlwiderstands aus der Schlagzahl durch die Modellierung des Pfahls, des Bodens und der Ausrüstung für das Einbringen.

Die Bestimmungen dieser internationalen Norm gelten für axialbelastete, druckbeanspruchte Pfähle.

Sämtliche in EN 1536, EN 12699 und EN 14199 genannten Pfahlarten werden von dieser Internationalen Norm abgedeckt.

Die in dieser Internationalen Norm berücksichtigten Prüfungen sind ausschließlich auf dynamische Pfahlprobelastungen beschränkt.

ANMERKUNG 1 ISO 22477-4 kann in Verbindung mit EN 1997-1 angewendet werden. Numerische Werte von Teilfaktoren für Grenzzustände aus Pfahlprobelastungen, die bei der Bemessung berücksichtigt werden müssen, werden in EN 1997-1 zur Verfügung gestellt. Für eine Bemessung nach EN 1997-1 werden die Ergebnisse der dynamischen Pfahlprobelastung als äquivalent zur gemessenen Druckfestigkeit $R_{c,m}$ angesehen, nachdem diese einer geeigneten Analyse unterzogen wurden.

ANMERKUNG 2 Hinweise zu den Analyseverfahren für die Ergebnisse dynamischer Pfahlprobelastungen werden in den informativen Anhängen gegeben.

Diese internationale Norm bietet Spezifikationen für:

- i) Untersuchungsprüfungen, wobei ein Probepfahl bis zum Grenzzustand der Tragfähigkeit belastet wird;
- ii) Kontrollprüfungen, wobei der Pfahl mit einer spezifischen Last oberhalb des Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit belastet wird.

ANMERKUNG Im Allgemeinen konzentriert sich eine Untersuchungsprüfung auf die allgemeinen Kenntnisse zu einem Pfahltyp; eine Kontrollprüfung konzentriert sich auf eine bestimmte Pfahlanwendung.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ISO 22476, *Geotechnical investigation and testing — Field testing* (alle Teile)

ISO 22477-1, *Geotechnical investigation and testing — Testing of geotechnical structures — Part 1: Pile load test by static axially loaded compression* (in Vorbereitung)

EN 12699, *Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau — Verdrängungspfähle*

EN 1536, *Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau — Bohrpfähle*

EN 16228, *Geräte für Bohr- und Gründungsarbeiten — Sicherheit*

EN 1997-1, *Eurocode 7: Berechnung und Bemessung in der Geotechnik — Teil 1: Allgemeine Regeln*

EN 1997-2, *Eurocode 7: Berechnung und Bemessung in der Geotechnik — Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds*

3 Begriffe und Symbole

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach Eurocode EN 1997-1 und die folgenden Begriffe.

3.1.1

Versuchspfahl

Pfahl, der vor Beginn der eigentlichen Pfahlausführung auf der Baustelle oder in einem Bauabschnitt hergestellt wird, um die Eignung des gewählten Pfahltyps zu überprüfen und den Entwurf, die Abmessungen und die Tragfähigkeit zu bestätigen

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Probepfahl zum Herstellungsversuch darf geopfert werden, um den Grenzzustand der Tragfähigkeit zu erreichen.

3.1.2

Bauwerkspfahl

Pfahl, der Teil der Gründung des Bauwerkes wird

3.1.3

Probepfahl

Pfahl, auf den Lasten aufgebracht werden, um das Widerstands-Verformungs-Verhalten des Pfahls und des umgebenden Baugrunds zu ermitteln

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei einem Probepfahl kann es sich um einen Versuchspfahl oder einen Bauwerkspfahl handeln.

3.1.4

Pfahlbelastung

axiale Druckbelastung (oder -kraft), die während der Prüfung auf den Kopf eines Pfahls aufgebracht wird

3.1.5

dynamische Belastung

eine Krafteinwirkung auf den Kopf eines Pfahls durch einen Rammbar oder ein Fallgewicht

3.1.6

maximale Druckbelastung

maximale axiale Druckbelastung (oder Kraft), die während der Prüfung auf den Pfahl aufgebracht wird, im Allgemeinen vor der Prüfung festgelegt

3.1.7

dynamische Probelastung

Belastungsprüfung, bei der ein Pfahl zur Analyse seiner Tragfähigkeit einer auf den Pfahlkopf aufgetragenen schnellen axialen dynamischen Belastung ausgesetzt wird

3.1.8

dynamische Aufprallprüfung

wenn eine dynamische Anprallpfahlprüfung (Hammeraufschlag) mit Messung der Dehnung, Beschleunigung und Verschiebung in Abhängigkeit der Zeit während des Aufpralls verwendet wird, um den Widerstand der einzelnen Druckpfähle zu bewerten

3.1.9

Einbringungsgleichung

Gleichung, die die Aufprallenergie des Hammers und die Anzahl der Schläge für eine Entfernungseinheit oder dauerhafte Einstellung für einen einzelnen Schlag zum Pfahlwiderstand in Beziehung setzt

3.1.10

Analyse der Wellengleichung

Analyse eines dynamisch belasteten Pfahls durch ein mathematisches Modell, das das dynamische Verhalten des Pfahls durch die Zunahme von Stoßwellen im Pfahl und die daraus resultierende Reaktion des Bodens darstellen kann

3.1.11

Wellengleichung

Gleichung, basierend auf der eindimensionalen Wellen-Theorie, die die am Pfahlkopf gemessenen Informationen zum Pfahlwiderstand in Beziehung setzt

3.1.12

Signalanpassung

Vorgang zur Bestimmung des Bodenwiderstands und der Pfahlimpedanz aus den Messungen von Pfahlkopfdrehung und Beschleunigung

3.1.13

Grenzwert des Druckwiderstands eines Pfahls

entspricht dem Zustand der signifikanten Verschiebung der Pfahlgründung bei vernachlässigbarem Anstieg des Widerstands

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei Schwierigkeiten mit der Festlegung des Grenzzustands der Tragfähigkeit anhand einer stetig leicht ansteigenden Last-Setzungs-Kurve sollte eine Setzung für die Pfahloberseite von 10 % des Durchmessers der Pfahlunterseite als Versagenskriterium angewendet werden.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Grenzwert des Druckwiderstands wird während einer dynamischen Probelastung nicht direkt gemessen. Der in einer dynamischen Lastprüfung gemessene Widerstand muss analysiert werden, um die Auswirkungen des dynamischen baugrundabhängigen Verhaltens abzuziehen, bevor er dem gemessenen Grenzwert des Druckwiderstands gleich gesetzt werden kann.

3.1.14

statischer Bemessungsdruckwiderstand eines Pfahls

Grenzwert des statischen Druckwiderstands eines Pfahls, der vor der Probelastung zu bestimmen ist, um die Spezifikation der entsprechenden geeigneten Zyklengrößen für die dynamische Probelastung zu ermöglichen

3.1.15

äquivalenter Durchmesser

Durchmesser des Kreises, dessen Fläche der betreffenden Querschnittsfläche des Pfahls entspricht

Anmerkung 1 zum Begriff: Der äquivalente Durchmesser ist bei einem Pfahl mit kreisförmigem Querschnitt dessen Außendurchmesser und bei einem Pfahl mit rechteckigem Querschnitt der Durchmesser, der dieselbe Fläche wie der rechteckige Querschnitt ergibt. Für andere Pfähle der Durchmesser, der in den statischen Berechnungen des Pfahls verwendet wird. Für H-Träger und Spundbohlen wird das volle Rechteck zur Berechnung des äquivalenten Durchmessers verwendet.

3.1.16

Mindestbezugsabstand

Abstand zwischen einem feststehenden Stützpunkt und einem Punkt, der durch das Prüfverfahren signifikanter Verschiebung unterliegt

Anmerkung 1 zum Begriff: Ausschließlich feststehende Punkte können als Bezugspunkte für Verschiebungsmesseinrichtungen eingesetzt werden. Verschiebungsmesssysteme können ohne Isolierungsmaßnahmen (Verschiebungsausgleich) außerhalb des Bezugsabstands auf dem Boden aufgestellt werden.

3.1.17

Verschiebung

während der Prüfung gemessene axiale Verschiebung des Pfahlkopfes

3.2 Symbole

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Symbole.

a	Beschleunigung
A	Querschnittsfläche des Pfahls auf der betrachteten Ebene
A_y	Fläche der Pfahlverstärkung
c	Geschwindigkeit der Spannungswelle innerhalb des Probepfahls zur Ermittlung der Tragfähigkeit
E_{dyn}	dynamischer Elastizitätsmodul des Pfahlwerkstoffs auf der Messebene
E_k	kinetische Energie
E_p	potenzielle Energie
F	die Kraft am Pfahlkopf, abgeleitet aus den Messungen der Dehnung
F_{yk}	die charakteristische Streckgrenze der Pfahlverstärkung
g	Schwerkraftbeschleunigung
h	Fallhöhe (oder Ausschlag), von der die Masse oder der Hammer gefallen ist
L	Länge des Pfahls
m	Masse
$R_{c,m}$	gemessener Grenzwert des Bodenwiderstands bei der Prüfung oder geotechnischer Messwert des Pfahlwiderstands
t	Zeit
v	Geschwindigkeit
Z	Pfahlimpedanz
ε	Dehnung

4 Prüfeinrichtung

4.1 Allgemeines

Die Prüfeinrichtung muss in der Lage sein, ausreichend Kraft und Energie zur Mobilisierung des Druckwiderstands zu erzeugen, um ihn verifizieren zu können.

Ist eines der Prüfziele der Kenntniskennwert hinsichtlich des Grenzwerts der Tragfähigkeit eines Pfahls, muss die Leistung der Prüfausrüstung für das Erreichen der Tragfähigkeit und die Mobilisierung einer adäquaten Setzung unter dynamischer Belastung bei einzelnen oder mehreren Belastungszyklen oder Schlägen ausreichend sein.

ANMERKUNG 1 Die erforderliche Kraft auf den Pfahlkopf während einer dynamischen Probelastung für die Bestimmung des Grenzwerts der Tragkapazität ist in der Regel von der gleichen Größe oder größer als der Grenzwert der Tragfähigkeit. Die Notwendigkeit, solche hohen Belastungen aufzubringen, ist zu berücksichtigen, wenn Ausrüstung und Pfahlwerkstoffe spezifiziert werden.

Wenn für eine dynamische Probelastung eine oder mehrere der in dieser Norm genannten Anforderungen nicht erfüllt werden, sollte bewiesen werden, dass dieser Mangel keine Auswirkung auf das Erreichen der Ziele der Prüfung hat, bevor die Ergebnisse als dynamische Probelastung interpretiert werden können.

Prüfsysteme für dynamische Lasten beruhen auf einer Masse, mit welcher die Last auf den Pfahl aufgebracht wird. Das geschieht entweder durch einen Hammer für das Einbringen des Pfahls, bezeichnet als Aufpralleinbringssystem, oder durch Fallenlassen einer Masse, bezeichnet als Massenfallsystem. Dynamische Pfahlprüfungen können während des Einbaus von Fertigbetonpfählen oder Stahlpfählen (Verdrängungspfählen) durchgeführt werden, wenn das Einbringen mit einem Rammbaren erfolgt. Massenfallsysteme werden für die Prüfung von vor Ort gegossenen Pfählen (Bohrpfähle, Schneckenbohrpfähle und andere vor Ort hegestellte Pfähle) und im Zusammenhang mit dem erneuten Einbringen verwendet. Die während der Prüfung verwendete Art des Kraftauftrags kann von verschiedenen Faktoren abhängen, einschließlich der Verfügbarkeit der Ausrüstung für den Einbau bzw. der Belastung der Pfähle und der Phase des Bauprojekts.

In EN 1997-1 sind drei Arten von dynamischen Pfahlprüfungen angegeben, die sich auf die Art der durchgeführten Messungen und Analysen beziehen und als dynamischer Aufprallversuch, Pfahleinbringungsgleichung und Analyse von Wellengleichungen bezeichnet werden. Eine ausführlichere Beschreibung ist in den informativen Anhängen enthalten. Die ausgeführten Messungen und die erforderliche Ausrüstung sowie Informationen für eine dynamische Prüfung hängen von der durchgeführten spezifischen dynamischen Pfahlprüfung ab.

4.2 Belastung

Bei der Auswahl der Belastungsausrüstung muss Folgendes berücksichtigt werden:

- das Ziel der Prüfung;
- der Typ der dynamischen Prüfung und die durchzuführende Analyse;
- der Typ des Pfahls;
- die Baugrundbedingungen;
- die maximale Belastung des Pfahls;
- die Festigkeit des Pfahls (Werkstoff) und die zulässigen Spannungen, die er tragen kann;
- die Ausführung der Prüfung;
- Sicherheitsaspekte.

Die Belastungsausrüstung muss ausreichend Kraft und Energie erzeugen, um die Anforderungen in 4.1 zu erfüllen und die erforderliche maximale Kraft und Verschiebung des Pfahls zu erbringen.

Die Ausrüstung muss den Pfahl mit entsprechend ausgerichteter Fallmasse genau entlang der Richtung der Pfahlachse belasten. Die Exzentrizität der Belastung muss weniger als 10 % des äquivalenten Durchmessers betragen. Die Abweichung der Ausrichtung der Kraft auf die Pfahlachse muss weniger als 20 mm/m betragen.

Die erzeugte Spannung im Pfahl unter maximaler Belastung darf die zulässige Spannung des Pfahlwerkstoffs nicht überschreiten. Für Betonpfähle unter Druckbeanspruchung darf die maximale Spannung im Pfahl, einschließlich der Vorspannung im Pfahl, das 0,8-Fache der charakteristischen Spannung des Betons unter Druckbeanspruchung zum Zeitpunkt des Einbringens nicht überschreiten, wie in EN 12699 dargestellt. Für Betonpfähle unter Spannung sollte die Zugkraft $0,9 \times f_{yk} \times A_p$, abzüglich der komprimierten Vorspannung, nicht überschreiten. Für Stahlpfähle unter Druckbeanspruchung sollte die maximale Spannung im Stahlpfahl das 0,9-Fache der charakteristischen Streckgrenze des Stahls nicht überschreiten.

ANMERKUNG 1 Wenn Spannungen während des Schlagammvorgangs überwacht werden, können diese bis zu 20 % größer als die oben genannten Werte sein. Die Fließfestigkeit von Werkstoffen kann sich unter dynamischer Stoßbelastung vergrößern.

4.2.1 Belastung durch ein Rammsystem

Rammsysteme bestehen aus einer Masse (Rammen) und Hebe- und Auslösesystemen. Sie sind durch ihre Masse und ihren maximalen Ausschlag (Fallhöhe) oder die jeweilige potentielle Energie (Masse $\times$ Beschleunigung $\times$ Ausschlag) oder kinetische Energie unmittelbar vor dem Aufprall definiert.

Die Häufigkeit der Hammerschläge darf nicht größer sein als 120 Schläge pro Minute, wenn eine Bewertung durch eine Einbringungsgleichung in Betracht gezogen wird.

4.2.2 Belastung durch eine einzelne oder durch mehrere Fallmassen

Die Masse der Fallmasse sollte so gewählt werden, dass sie größer als 2 % des erforderlichen Grenzwerts des Widerstands ist (wenn die Masse der Fallmasse als ein Gewicht ausgedrückt wird). Nur in sehr harten Böden oder falls bei einem Pfahl mit Gesteinskörper, sind Fallmassen mit einem Gewicht von 1 % des erforderlichen Grenzwerts des Widerstands ausreichend, um den Pfahlwiderstand zu mobilisieren.

Die angewandte Energie oder der Ausschlag der Fallmasse sollten angepasst werden, um die vollständige Mobilisierung der Mantelreibung des Pfahls zu erreichen.

4.3 Messungen

Die ausgeführten Messungen und die erforderliche Ausrüstung und Informationen für eine dynamische Prüfung hängen von der durchgeführten spezifischen dynamischen Pfahlprüfung ab.

Während eines dynamischen Aufprallversuchs müssen mindestens drei Variablen direkt in Bezug auf die Zeit (t) gemessen werden:

- die Verschiebung des Pfahlkopfs (ϵ);
- die Beschleunigung des Pfahlkopfs (a).

Während einer Prüfung, in der die Pfahleinbringungsgleichung oder die Wellengleichungsanalyse verwendet wird, müssen mindestens zwei Variablen direkt aufgezeichnet werden:

- die permanente Verschiebung des Pfahls pro Schlag des Hammers, bezeichnet als Satz pro Schlag (Schläge);
- die Masse der Hammers (oder Fallmasse) und Fallhöhe (und/oder Energiebemessungswerte).

Wenn ein einzelner Schlag des Hammers oder Belastungszyklen durch Fallmassen auf Pfähle einwirken und diese zugänglich sind, muss die Höhe des Pfahlkopfes im Verhältnis zu einem Punkt außerhalb des Mindestbezugsabstands mittels optischer Nivellierung bestimmt werden. Die Messungen mit der optischen Nivellierung müssen durch den Bezug zu einem oder mehreren festen Bezugspunkten überwacht werden und sollten mit einer Messunsicherheit von ± 1 mm durchgeführt werden.

4.3.1 Messungen für dynamische Aufprallversuche

Die Schwingungsaufnehmer und die Signalverarbeitung müssen den Anforderungen aus Tabelle 1 bis 3 entsprechen. Das Abtasten muss mindestens 10 ms vor Beginn der Belastung beginnen und mindestens andauern, bis der Pfahl zur Ruhe gekommen ist. Die Schwingungsaufnehmer müssen über einen ausreichenden Messbereich verfügen, damit ein erneutes Justieren während der Prüfung vermieden wird. Die gesamte Ausrüstung muss während des Pfahleinbaus und der Prüfverfahren funktionsfähig bleiben.

Tabelle 1 — Dynamischer Aufprallversuch: Allgemeine Anforderungen an die Signalverarbeitung

Parameter	Anforderung
Abtastrate	$\geq 5\,000$ Proben pro Sekunde
Dauer der Vorlaufzeit	≥ 10 ms
Dauer der Messung	≥ 100 ms
ANMERKUNG 1 Für Dieselhammer sollte die Vorlaufzeit auf mindestens 35 ms ausgedehnt werden.	

Tabelle 2 — Dynamischer Aufprallversuch: Anforderungen an Dehnungsaufnehmer

Parameter	Anforderung
maximale Dehnung	$\geq 2\%$
Resonanzfrequenz	$\geq 2\,000$ Hz

Tabelle 3 — Dynamischer Aufprallversuch: Anforderungen an Beschleunigungsaufnehmer

Parameter	Anforderung
Linearität	bis zu $2\,000$ g und $2\,000$ Hz

Die gesamte Ausrüstung, mit der während der Prüfung die Dehnung, Verschiebung und Beschleunigung gemessen werden, muss kalibriert werden. Die Ausrüstung muss regelmäßig überprüft werden. Die Ergebnisse dieser Überprüfungen müssen aufgezeichnet und mit den Unterlagen der jüngsten Kalibrierung aufbewahrt werden. Diese Daten müssen auf Verlangen vor Beginn der Prüfung zur Verfügung gestellt werden.

Die zeitlichen Abstände zwischen den Überprüfungen und Kalibrierungen sind nicht vorgeschrieben, da die Gültigkeitsdauer einer Kalibrierung stark von der Art des Messgeräts abhängen kann. Die Überprüfungen müssen jedoch so detailliert sein, dass sichergestellt werden kann, dass alle Messeinrichtungen während der Prüfung gültige Werte anzeigen. Es wird empfohlen, dass alle Überprüfungen direkt vor der Prüfung durchgeführt werden, um den Einfluss von Transport und Zeit zu vermeiden. Unter einigen Umständen, z. B. bei häufiger Nutzung oder anderen Bestandteilen oder angenommenem Schaden, können eine zusätzliche Kalibrierung und Überprüfung erforderlich sein.

Die Dehnung (ε) als Funktion der Zeit (t), die durch die dynamische Belastung in den Pfahlkopf induziert wird, muss durch mindestens zwei Dehnungsaufnehmer gemessen werden, die in axialer Richtung und als diametral entgegengesetzte Paare montiert sind (siehe Anhang C). Die Beschleunigung a des Pfahlkopfs als Funktion der Zeit (t) muss durch mindestens einen Beschleunigungsaufnehmer gemessen werden, die in axialer Richtung und als diametral entgegengesetzte Paare montiert sind (siehe Anhang C).

4.3.2 Erforderliche Messungen und Aufzeichnungen für Pfahleinbringungsgleichung oder Wellengleichungsanalyse

Die permanente Verschiebung des Pfahls pro Schlag des Hammers, bezeichnet als Eindringung pro Schlag, wird aufgezeichnet, indem die Anzahl der Schläge für eine Entfernungseinheit der Eindringung für mindestens die letzten 0,25 m der Pfahlpenetration manuell gezählt wird.

Abstandsmarker sollten auf dem geprüften Pfahl deutlich gekennzeichnet sein. Bei kontinuierlichem Einbringen werden die Schläge pro Eindringungseinheit gezählt. Als Alternative kann eine Eindringung für eine festgelegte Anzahl von Schlägen ermittelt werden.

Die Eindringung pro Schlag wird entweder durch optische Nivellierung mit einem mit minimalem Referenzabstand platzierten Instrument oder durch Sichtbeobachtungen von Markierungen am Pfahl, die einen stabilen, vom Pfahlprüfungsprozess nicht beeinflussten Referenzstrahl passieren, festgestellt.

Tabelle 4 — Dynamische Probelastung: Verschiebungsanforderungen für Eindringung pro Schlag, wenn durch optische Nivellierung bestimmt

Parameter	Anforderung
Genauigkeit	$\leq 1 \text{ mm}$

Um die durch die dynamische Belastung zum Pfahl übertragene Energie zu bestimmen, ist es notwendig, die Masse des Fallgewichts oder des Hammers und die Fallhöhe dieses Gewichts zu kennen.

Die potenzielle Energie des Einbringsystems:

$$E_p = m \times g \times h, \quad (1)$$

Dabei ist

- E_p potenzielle Energie;
- m Masse des Fallgewichts oder des Hammers;
- g Erdbeschleunigung ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$);
- h Fallhöhe (oder Ausschlag), durch die das Gewicht oder der Hammer gefallen ist.

Die Fallhöhe oder der Ausschlag wird nur dann durch eine visuelle Schätzung gemessen, wenn das Fallgewichtsichtbar ist.

Die kinetische Energie des Fallgewichts lässt sich nach folgender Gleichung berechnen:

$$E_k = m \times v^2 / 2 \quad (2)$$

Dabei ist

- E_k kinetische Energie;
- v Geschwindigkeit des Fallgewichts vor dem Aufprall.

Die Geschwindigkeit des Fallgewichts vor dem Aufprall kann durch Näherungsschalter gemessen werden, die als Teil des Hammergehäuses angebracht sind.

5 Prüfdurchführung

5.1 Vorbereitung der Prüfung

Es wird empfohlen, dass vor der Prüfung ein Ausführungsplan formuliert wird, der mit dem geplanten Abschlussbericht in Abschnitt 7 konsistent ist. Der Plan sollte Folgendes umfassen, falls zutreffend:

- a) Prüfobjekte;
- b) die Baugrund- und Grundwasserbedingungen mit Bezug auf die relevanten Felduntersuchungsberichte;
- c) topografische Orte, Typen und Spezifikationen der Probepfähle zur Ermittlung der Tragfähigkeit;
- d) zulässige Höchstwerte für die auf den Pfahl einwirkende Belastung und Spannung und die Verschiebung des Pfahls/der Pfähle;
- e) erforderliche Pfahlverformung und angewandte Last;
- f) Spezifikation des Lastgeräts;
- g) Spezifikationen der Messgeräte und Kalibrierungszertifikate, falls zutreffend;
- h) Spezifikationen zusätzlicher Messgeräte;
- i) Plan der Prüfbaustelle;
- j) Prüfprogramm;
- k) Liste an wesentlichen Personen, die aufzeigt, wer für die Aufsicht, die Sicherheit, die Prüfausführung, die Datenaufzeichnung und andere Aufgaben verantwortlich ist;
- l) logistische Anforderungen auf der Baustelle (zum Beispiel flacher Baugrund, Fahrzeuganforderungen und -einschränkungen, Hebevorgang, Arbeitsplatz um den Pfahl herum usw.);
- m) Zugänglichkeit des Pfahls für die Befestigung von Sensoren.

Es ist empfehlenswert, dass der Plan für die Durchführung mindestens sieben Tage vor Beginn der Prüfungen verfügbar ist.

5.2 Sicherheitstechnische Anforderungen

5.2.1 Personen und Ausrüstung in der näheren Umgebung

Die Sicherheit von Personen und der Ausrüstung im Umgebungsbereich muss während der Durchführung der Prüfung angemessen berücksichtigt werden und sollte, falls zutreffend, in Übereinstimmung mit EN 16228 ausgeführt werden.

Personen in benachbarten Gebäuden, die möglicherweise von der Prüfung betroffen sind, müssen über die Art der Prüfung und den Zeitplan in Kenntnis gesetzt werden. Eine gesonderte Benachrichtigung zu dynamischen Pfahlprüfungen ist nicht notwendig, wenn die Prüfung Teil eines größeren Programms zum Einbau von Verdrängungspfählen ist, zu dem eine Benachrichtigung bereits stattgefunden hat.

Behinderungen von schwingungsempfindlichen Prozessen in benachbarten Gebäuden sollten, sofern möglich, verhindert werden. Wenn Prüfungen in der Nähe von bestehenden Gebäuden durchgeführt werden, sollten das Alter, die Unversehrtheit und die Empfindlichkeit der Konstruktion berücksichtigt werden.

5.2.2 Probepfahl

Der Probepfahl sollte so bemessen, gefertigt und eingebracht werden, dass er bei der Prüfung von der aufgetragenen maximalen Last nicht beschädigt wird. Da vor Ort hergestellte Pfähle (Bohrpfähle, Schneckenbohrpfähle oder andere Verpresspfähle) sich in der Regel nicht für axiale dynamische Belastungen eignen, sollten die Pfahlköpfe durch ein Stahlgehäuse verstärkt werden. Vor der Prüfung sollten der zulässige Druck und die zulässige Spannungen für den Pfahl definiert werden.

ANMERKUNG Während einer dynamischen Probelastung wird der Probepfahl zur Ermittlung der Tragfähigkeit mit einer Kraft beladen, die die äquivalenten statischen Prüfbelastungen überschreiten kann. Die Probepfähle zur Ermittlung der Tragfähigkeit müssen so bemessen sein, dass sie den resultierenden höheren Spannungen widerstehen können. Für Betonpfähle wird in der Regel ein Pfahlfutter verwendet, um die Spannung zu reduzieren.

Bei Bauwerkspfählen muss die maximale akkumulierte endgültige Verschiebung des Pfahlkopfs vor Prüfbeginn vereinbart werden. Die Verschiebung des Pfahlkopfs darf 10 % des (äquivalenten) Durchmessers unter normalen Umständen und ohne vorherige Genehmigung sämtlicher betroffener Parteien nicht überschreiten.

5.3 Vorbereitung des Pfahls

Der Pfahlkopf muss flach, eben und senkrecht zur Pfalachse und unbeschädigt sein. Das Kopfteil von Betonpfählen muss mit einem Pfahlfutter geschützt werden. Der Probepfahl zur Ermittlung der Tragfähigkeit muss oberhalb der Geländeoberkante eine für das Anbringen von Messeinrichtungen ausreichende Länge aufweisen. Vorgeschlagene Positionierung von Schwingungsaufnehmern siehe Anhang C.

5.4 Zeit der Prüfungen

Der Widerstand eines Pfahls hat die Tendenz, in Abhängigkeit von der Zeit der Prüfung nach dem Einbau stark zu variieren. Dem sollte für dynamische Belastungsprüfungen entsprechende Beachtung geschenkt werden, da die Prüfung während des Einbaus des Pfahls oder zu einem späteren Zeitpunkt, an dem die Porenwasserdrücke ihre Anfangswerte wieder erreicht haben, durchgeführt werden kann.

5.4.1 Einbringen – kontinuierliche Überwachung und Ende der anfänglichen Einbringungsprüfung

Bei kontinuierlichen Rammarbeiten für den Einbau kann jeder einzelne Aufprall als separate dynamische Probelastung betrachtet werden. In der Regel wird eine Widerstandsberechnung durchgeführt, wenn der Pfahl in eine als geeignet betrachtete Schicht vordringt oder wenn er die letzte Eindringung erreicht.

Da der Bodenwiderstand bei kontinuierlichem Einbringen reduziert werden kann, können die während oder am Ende des anfänglichen Einbringens (EOI, en: end of initial driving) bestimmten Pfahlwiderstände niedriger sein, als die in statischen Pfahlprobelastungen bestimmten. Bei bestimmten Baugrundbedingungen kann der Widerstand am Ende des Einbringens größer sein als der Widerstand beim erneuten Einbringen. Potenziellen Unterschieden in den gemessenen charakteristischen Pfahlwiderständen infolge der Zeit der Prüfung sollte entsprechende Aufmerksamkeit geschenkt werden.

5.4.2 Erneutes Einbringen

Das erneute Einbringen ist eine dynamische Probelastung, die einige Zeit nach dem Einbau des Pfahls durchgeführt wird, und ist ein in Bezug auf die während des Pfahleinbaus durchgeführte Prüfung eigenständiger Vorgang. Es kann angenommen werden, dass eine während des erneuten Einbringens durchgeführte dynamische Prüfung weniger vom Prozess des Pfahleinbaus beeinflusst wird, wenn eine angemessene Zeit nach dem Einbau verstrichen ist. Der optimale Zeitpunkt für die Prüfung beim erneuten Einbringen sollte anhand der spezifischen Baugrundbedingungen vor Ort beurteilt werden.

Ergibt das erneute Einbringen einen geringeren Pfahlwiderstand, als der während des Einbringens für den Einbau gemessene, muss dieser als Bewertungsgrundlage für den Grenzwert des Druckwiderstands verwendet werden. Wenn das erneute Einbringen zu höheren Ergebnissen führt, können diese berücksichtigt werden.

Für bestimmte Baugrundbedingungen sollte das erneute Einbringen durchgeführt werden. Erneutes Einbringen sollte in der Regel in schluffigen Böden durchgeführt werden, es sei denn, dass dies aufgrund von vergleichbaren Erfahrungen vor Ort nicht notwendig ist.

ANMERKUNG Das erneute Einbringen von Reibungspfählen in tonigen Böden führt in der Regel zu einem verminderten Druckwiderstand.

5.4.3 Bohrpfähle oder vor Ort hergestellte Pfähle

Zwischen der Einbringung des Probe-Bohrpfahls und dem Prüfbeginn muss ausreichend Zeit liegen, um sicherzustellen, dass die erforderliche Festigkeit des Pfahlwerkstoffs erreicht ist und der Baugrund sich vom Prozess der Pfahleinbringung sowie der Ableitung der Porenwasserdrücke und anderen Einwirkungen erholen kann, wie z. B. erzeugte Wärme durch Bohrungen oder Aushärten von Beton. Während dieser Zeit darf der Pfahl nicht durch Belastung, Stoß, Schwingungen oder andere äußere Einflüsse gestört werden.

Zeiträume zwischen der Herstellung und der Prüfung eines Pfahls sollten Tabelle 5 entnommen werden. Bei entsprechender Begründung können alternative Zeitspannen festgelegt werden.

Tabelle 5 — Zeiträume zwischen dem Einbau und der Prüfung eines Bohrpfahls

Typ des Probepfahls zur Ermittlung der Tragfähigkeit	Art des Bodens	Mindestzeit [Tage]
Probepfahl	nicht bindig	7
	bindig	21
Bauwerkspfahl	nicht bindig	5
	bindig	14
Bei entsprechender Begründung können alternative Zeitspannen festgelegt werden.		

6 Prüfergebnisse

6.1 Prüfergebnisse für dynamische Probelastung mittels Einbringungsgleichung

Die Prüfergebnisse müssen folgende Aufzeichnungen enthalten:

- Eindringung je Schlag oder Schläge für Einheitsabstand der Eindringung;
- Energie pro Schlag;
- berechnet als Grenzwert des Widerstands $R_{c,m}$.

6.2 Prüfergebnisse für dynamische Probelastung mit Wellengleichungsanalyse

Die Prüfergebnisse müssen folgende Aufzeichnungen enthalten:

- Schläge für Einheitsabstand der Eindringens durch Eindringung;
- Energie pro Schlag mit Eindringen;
- berechneter Grenzwert des Widerstands $R_{c,m}$.

6.3 Prüfergebnisse für dynamische Probelastung mit Messungen am Pfahlkopf

Die Prüfergebnisse müssen die folgenden zeitbasierten Messungen enthalten, wobei sämtliche Zeitmessungen über eine gemeinsame Basis verfügen müssen:

- die durch das Belastungssystem am Pfahlkopf als Zeitfunktion angewandte durchschnittliche, aus der Dehnung abgeleitete Kraft als Funktion der Zeit $F(t)$;
- die Geschwindigkeit, integriert aus der Beschleunigung des Pfahlkopfs als Zeitfunktion $v(t)$;
- Kraft $F(t)$ und Geschwindigkeit $v(t)$ in einem Diagramm, wobei die Geschwindigkeit auf das Maß der Kraft skaliert wird, durch die Impedanz $Z = E_{dyn} \times A/c$ (siehe Anhang D).

Wenn der Querschnitt eines Pfahls eine Kombination von Werkstoffen ist, muss die auf den Eigenschaften der kombinierten Werkstoffe basierende Impedanz berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse können ausgewertet werden durch

- eine direkte abgeschlossene Lösung durch Anwendung von bodenabhängigen geschätzten Dämpfungswerten (siehe Anhang D).
- Signalanpassung (siehe Anhang E).

Alle gemessenen Prüfergebnisse müssen, sofern geeignet, als ausgedruckte Diagramme und digital in einem lesbaren textbasierten Format vorliegen. Alle Ergebnisse müssen anhand von Kalibrierfaktoren korrigiert und in technischen Einheiten vorgelegt werden. An den Messsignalen vorgenommene Korrekturen müssen schriftlich und in den digitalen Datensätzen festgehalten werden. Messergebnisse in technischen Einheiten sollten vor jeder weiteren Auswertung im offenen Format, wie etwa ASCII, zugänglich gemacht werden.

Die Messungen der Pfahlhöhen durch unabhängige visuelle Messungen müssen aufgezeichnet werden. Alle anderen Messwerte, wie z. B. Temperatur vor Ort, Prüfungen an Betonproben, visuelle Ablesungen der Pfahlhöhe, Pfahlform oder statische Prüfungen vor Ort, sofern zutreffend, müssen ebenfalls im Prüfbericht festgehalten werden.

7 Prüfbericht

Ein Sachstandsbericht sollte für alle Belastungsprüfungen erstellt werden. Sofern zutreffend, sollte dieser Bericht Folgendes umfassen:

- a) Bezug auf alle relevanten Normen;
- b) allgemeine Informationen bezüglich des Prüforts und des Prüfprogramms:
 - topographische Lage des Prüforts, einschließlich der Festlegung der Bezugsbasis für die Höhe, die als Bezug für Höhenmessungen verwendet wird;
 - Beschreibung der Baustelle;
 - Zweck der Prüfung;
 - Prüfungsdatum;
 - das geplante und durchgeführte Prüfprogramm;
 - Name der Organisation, die die Prüfung durchführte;
 - Name der Organisation, die die Prüfung beaufsichtigte.

- c) Spezifikationen des Probepfahls zur Ermittlung der Tragfähigkeit:
- der Pfahltyp, der Prüfgrund und dessen Referenznummer;
 - die topografische Position und Stufe des Probepfahls zur Ermittlung der Tragfähigkeit in Bezug auf den lokalen Bezugspunkt;
 - Pfahldaten, wie z. B. Geometrie (mindestens einschließlich der Gesamtlänge des Pfahls L und des Durchmessers D oder des äquivalenten Durchmessers), Ebene der Pfahlkopffläche und des Sockels, Pfahlwerkstoff (einschließlich der Werkstoffdichte und Steifigkeit, falls bekannt) und Verstärkungsvorkehrungen;
 - Datum der Herstellung;
 - Beschreibung der Pfahlherstellung und der während der Arbeiten aufgetretenen Probleme;
 - Aufzeichnungen zum Einbau, wie z. B. Bohrprotokolle, Betonverbrauch, Bohrfortschritt;
 - Prüfberichte über die Qualität oder die Spezifikation des Pfahlwerkstoffs (wo zutreffend);
 - Bericht für die Integritätsuntersuchung, wenn diese vor der Prüfung durchgeführt wird.
- d) Informationen bezüglich der Baugrundbedingungen:
- die Baugrund- und Grundwasserbedingungen mit Bezug auf die relevanten Felduntersuchungsberichte;
 - Beschreibung der Baugrundbedingungen, insbesondere in der unmittelbaren Umgebung des Probepfahls zur Ermittlung der Tragfähigkeit.
- e) Spezifikationen der Prüfung:
- die postulierte Maximalkraft und die daraus resultierenden Spannungen im Pfahl;
 - eine Beschreibung der Belastungs- und Prüfeinrichtungen;
 - Informationen zur potenziellen Energie für jeden Belastungszyklus (Fallhöhe, Masse);
 - Kalibrierungsdokumente für die Dehnungsmessstreifen, Beschleunigungsmesser und Verschiebungsmessgeräte (falls verwendet);
 - der Abstand zwischen dem Pfahl und dem Verschiebungsmessgerät (falls verwendet);
 - nähere Angaben zur Installation der Pfahlprüfausrüstung durch Zeichnungen und/oder Bilder.
- f) Prüfergebnisse:
- für die Bewertung durch die Einbringungsgleichung; Nachweis der Äquivalenz zu statischen Prüfungen, Bohrprotokoll, Energie pro Schlag und Begründung von übernommenen empirischen Parametern. Siehe Anhang A;
 - für die Anwendung der Wellengleichung; Beschreibung des verwendeten Berechnungsmodells, Bohrprotokoll, einschließlich Energie, Begründung der übernommenen dynamischen Parameter. Siehe Anhang B;
 - für die Bewertung durch geschlossene Formgleichung; die Gesamtkapazität und die statische Kapazität, bestimmt, zusammen mit dem angewandten Dämpfungsfaktor. Siehe Anhang D;
 - für die Bewertung durch Signalanpassung; das abgeleitete Last-Verschiebungs-Diagramm, Nachweis und Quellen der gewählten Parameter, für dynamische Tests von vor Ort gegossenen Pfählen müssen die Annahmen bezüglich der Werkstoffeigenschaften und Pfahlform beschrieben werden; die Mantelreibung – Verteilung des Spitzenwiderstands. Siehe Anhang E;
 - die Anpassungsqualität der Bewertung als kombinierte graphische Darstellung von gemessenem und berechnetem Pfahlverhalten.
- g) Gründe für Abweichungen von EN ISO 22477-4.

Anhang A (informativ)

Einbringungsgleichung

A.1 Allgemeines

Dieser Anhang enthält eine informative Anleitung zu einem Verfahren zur Analyse von Pfählen während des Einbringens. Diese informative Anleitung ist nicht als verpflichtende Vorgabe oder als Einschränkung der Auswertungsverfahren, die durchgeführt werden dürfen, zu verstehen. Weitere Hinweise bezüglich geeigneter Analyseverfahren sollten von dem fachkundigen Unternehmen für Pfahlprüfung eingeholt werden, das die Prüfung und den Einbau durchführt, da alternative Verfahren angewandt werden können. Die Anwendung der informativen Anleitung zur Analyse des Einbringens von Pfählen sollte nicht davon abhalten, alternative Auswertungsverfahren zu nutzen, einzuführen oder zu entwickeln.

A.2 Allgemeines Konzept der Einbringungsgleichung

Die allgemeine Grundlage für alle Einbringungsgleichungen ist der Ansatz, eine Beziehung (η) zwischen der geschätzten auf die Pfahlkopffläche übertragenen Energie (E_{tr}) und der Ableitung dieser Energie zum Boden als Pfahlwiderstand (R_u) in Bezug auf die Verschiebung der Pfahlkopffläche (w) zu finden (Referenz [1]).

Die grundlegende Form der Beziehung von Widerstand zu Energie ist gegeben durch:

$$R_u = \eta \times E_{tr} / w \quad (\text{A.1})$$

A.2.1 Analyse Einbringungsgleichung

Die erforderlichen Eingabeparameter für die Bestimmung des Bodenwiderstands sind:

E_k die kinetische Energie der Ramme im Moment des Aufpralls;

C_r der Restitutionskoeffizient, repräsentiert den Energieverlust durch die Wechselwirkung der Systemkomponenten des Hammers (Amboss, Schlaghaube, Nuss, Polsterung);

s die bleibende Eindringung der Pfahlkopffläche nach einem Schlag;

s_{el} die elastische Eindringung des Pfahls während eines Schlags;

η ein empirischer Effizienz/Korrelationsfaktor, abhängig von örtlichen Bodenverhältnissen und Konfigurationstyp von Pfahl/Hammer.

A.2.2 Bestimmung der kinetischen Energie (E_k)

Vorausgesetzt, dass während des Falls des Fallgewichts keine Energieverluste auftreten, ist die kinetische Energie E_k direkt vor dem Aufprall gleich der potenziellen Energie auf einer bestimmten Fallhöhe.

$$E_k = E_p \quad (\text{A.2})$$

Die potenzielle Energie ist die Energie des Fallgewichts auf der Fallhöhe, h .

$$E_p = m \times g \times h \quad (\text{A.3})$$

Dabei ist

E_p potenzielle Energie;

m Masse des Fallgewichts;

g Erdbeschleunigung ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$);

h Fallhöhe (oder Ausschlag).

$$E_p = m \times g \times h = W \times h \quad (\text{A.4})$$

Dabei ist

W Gewicht des Fallgewichts.

ANMERKUNG Die Fallhöhe des Fallgewichts vor dem Aufprall kann durch Näherungsschaltersysteme gemessen werden, die am Hammer montiert sind; optische Systeme messen die Höhe des Fallgewichts. Im Falle von Dieselhammern kann die Fallhöhe aus der Schlagrate geschätzt werden.

Die kinetische Energie kann auch bestimmt werden, indem die Aufprallgeschwindigkeit des Fallgewichts (V) gemessen wird.

$$E_{kin} = 0,5 \times m \times v^2 \quad (\text{A.5})$$

ANMERKUNG Aufprallgeschwindigkeiten können durch Näherungsschaltersysteme, die am Hammer montiert sind, die Bewegung des Fallgewichts messende optische Systeme oder am Fallgewicht montierte Beschleunigungsmesser gemessen werden.

A.2.3 Bestimmung des Restitutionskoeffizienten (C_r)

Der Energieverlust infolge der Interaktion der Systemkomponenten des Hammers (Amboss, Schlaghaube, Nuss, Polsterung) wird in der Regel als Restitutionskoeffizient C_r bezeichnet.

C_r kann durch die Messung der Fallhöhe eines Fallgewichts oder durch die Messung der Aufprallgeschwindigkeit des Fallgewichts in Kombination mit der Messung der übertragenen Energie E_{tr} durch Analysemessungen beim Einbringen des Pfahls erhalten werden. Für einen Aufprall-Schlag wird C_r bestimmt durch:

$$C_r = E_{trt} / E_k \quad (\text{A.6})$$

A.2.4 Bestimmung der Eindringung des Pfahls (s und s_{el})

Für kontinuierliches anfängliches Einbringen wird die permanente Eindringung pro Schlag aus den Schlägen pro Einheitseindringung (Schlagzahl) bestimmt.

Beim erneuten Einbringen kann die permanente Eindringung pro Schlag durch Nivellierung nach jedem Schlag in einer einzelnen Schlag-Anwendung ermittelt werden. Wenn eine durchschnittliche permanente Eindringung für eine Abfolge von Schlägen festgestellt wurde, sollte die kumulative Gesamteindringung für diese Schläge 50 mm nicht übersteigen.

Die elastische Eindringung während eines Schlags (s_{el}) muss aus der Messung der Verschiebung einer Pfahlkopfoberseite abgeleitet werden, die durch manuelle Beobachtungen, durch optische Systeme oder Beschleunigungsmesser, die nahe der Pfahlkopfoberseite montiert sind, erfolgen kann.

A.2.5 Bestimmung der empirischen Effizienz / des Korrelationsfaktors η

Der empirische Faktor η muss aus den Kalibrierungen einer statischen Probelastung (R_{stat}) abgeleitet werden.

$$\eta = R_{stat} \times (s + s_{el}) / (C_r \times E_k) \quad (A.7)$$

Wo gezeigt werden kann, dass das Verhalten der mobilisierten Pfahlbelastungsdurchbiegung dem Grenzwert der Tragfähigkeit des Pfahls entspricht, kann R_u als äquivalent zum gemessenen Pfahlwiderstand $R_{c,m}$ angesehen werden.

A.2.6 Berechnung der zum Pfahl übertragenen Energie E_{tr}

Die zum Pfahl übertragene Energie lässt sich nach folgender Gleichung berechnen:

$$E_{tr} = E_k \times C_r \quad (A.8)$$

A.2.7 Berechnung des Bodenwiderstands R_u

Die vom Pfahl und dem Boden absorbierte Energie ist die abgeleitete Energie, von der angenommen wird, dass sie dem gesamten Bodenwiderstand R_u , multipliziert mit der permanenten Eindringung (s), entspricht. Da Energie auch für die elastische Verformung erforderlich ist, wird eine elastische Anpassung der elastischen Eindringung zur permanenten Eindringung hinzugefügt, so dass die Grundform einer Beziehung von Widerstand zu Energie so ausgedrückt wird:

$$R_u = (\eta \times C_r \times E_k) / (s + s_{el}) \quad (A.9)$$

A.2.8 Zu berücksichtigende ergänzende Faktoren

Es gibt einige zusätzliche Faktoren, die unter Umständen berücksichtigt werden müssen, wenn die Pfahleindringungsgleichung verwendet wird, um den ultimativen oder mobilisierten Stauchungswiderstand eines eingebrachten Pfahls zu schätzen (Referenz [2]). Einige davon sind:

- Der Ansatz der Pfahleindringungsgleichung impliziert eine Vereinfachung des realen Pfahls und des realen Baugrundverhaltens. Die Gleichung setzt voraus, dass die angewandten Kräfte und Bodenwiderstände im gleichen Moment agieren, was im Fall von Pfählen nur für sehr kurze Pfähle (Starrkörperverhalten) zutrifft.
- die Leistungsfähigkeit von Hammern ist ohne zusätzliche Messungen schwierig zu erhalten und die Energieabsorptionseigenschaften von Pfählen und Rammhauben können stark variieren.
- Die Gleichung berücksichtigt keine Änderungen der Baugrundeigenschaften bei mehreren Bodenschichten.

Anhang B (informativ)

Wellengleichungsanalyse

B.1 Allgemeines

Dieser Anhang enthält eine informative Anleitung zu einem Analyseverfahren für die dynamische Probelastung. Diese informative Anleitung ist nicht als verpflichtende Vorgabe oder als Einschränkung der Auswertungsverfahren, die durchgeführt werden dürfen, zu verstehen. Weitere Hinweise bezüglich angemessener Analyseverfahren sollten vom fachkundigen Unternehmen eingeholt werden, das die Prüfung durchführt. Die Anwendung der informativen Anleitung zur Auswertung der Ergebnisse der dynamischen Probelastung mit axialer Druckbelastung sollte nicht davon abhalten, alternative Auswertungsverfahren zu nutzen, einzuführen oder zu entwickeln.

B.2 Allgemeines Konzept der Wellengleichungsanalyse

Die Wellengleichungsanalyse basiert auf einem mathematischen Modell, das den aufprallenden Hammer und zugehörige Komponenten, wie die Pfahlkomponenten und die Ausbreitung von Spannungswellen in einem Pfahl, sowie das Verhalten des Bodens simuliert.

Das mathematische Modell wird in einen Computercode implementiert, das für die Berechnung von Druckwiderständen Folgendes umfassen muss:

- Modellierung des Fallgewichts, der Komponenten wie Ambosse, Schlaghauben, Polsterung und Pfahl, um einen akkuraten Zeitverlauf der Kraft für die Pfahlkopfoberseite erzeugen zu können;
- ein nichtlineares Bodenmodell, um die permanente Eindringung für einen einzelnen Schlag akkurat zu berechnen;
- Dämpfungselemente, um die dynamische Komponente des Widerstands zu definieren;
- ein Bodenmodell, das die Darstellung der Bodenermüdung/des Abtrags bei kontinuierlichem Einbringen erlaubt, so dass eine akkurate Schätzung des Pfahlwiderstands durchgeführt werden kann;
- die generierten Zeitverläufe der Verschiebung für Pfahlkopfoberseite und Pfahlfuß;
- die Berechnung der permanenten Eindringung zu dem Zeitpunkt, an dem die Pfahlkopfoberseite oder der Pfahlfuß zu Ruhe gekommen sind.

Es sind zwei Methoden verfügbar, um den Druckwiderstand mit der Wellengleichungsanalyse abzuleiten:

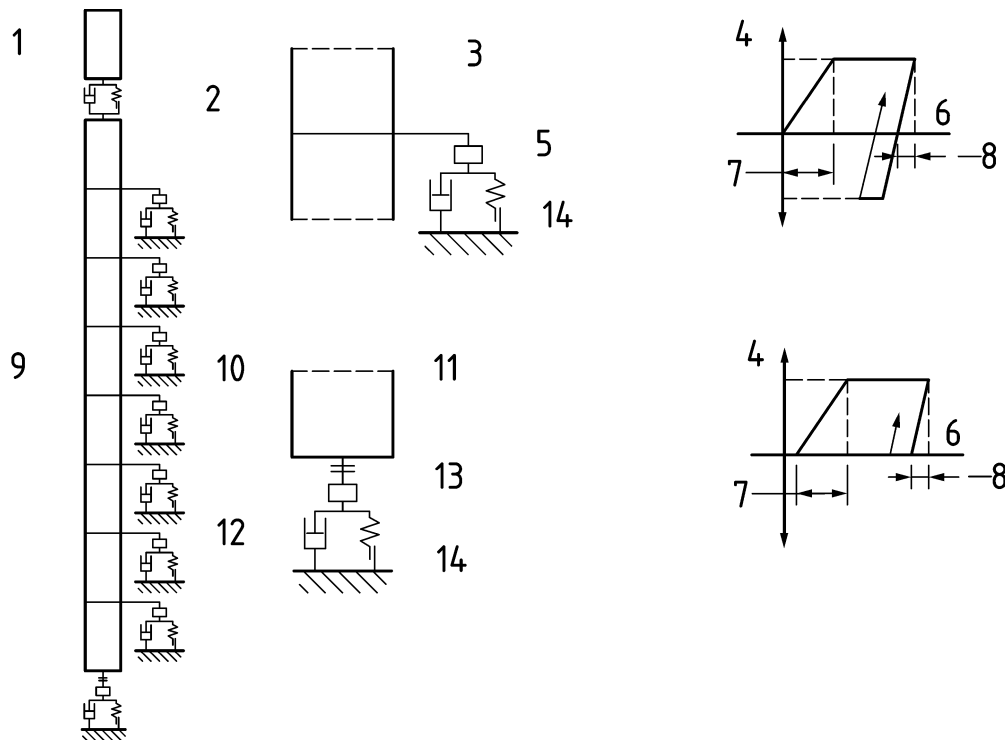
- 1) Tragfähigkeits-Kurven, die eine Beziehung zwischen der zum Pfahl übertragenen Energie, der finalen Eindringung pro Schlag (Schlagzahl) und dem Druckwiderstand des Pfahls darstellen;
- 2) Anpassung der Schlagzahl, durch die das Wellengleichungsprogramm den Einbringungsprozess für mehrere Eindringtiefen am Pfahlfuß simuliert. Die berechnete Energie und das berechnete endgültige Abbinden sollten mit der gemessenen Energie und dem gemessenen endgültigen Abbinden übereinstimmen. Die abgeleiteten statischen Boden-Modellparameter in den Simulationen werden verwendet, um den Druckwiderstand für jede Eindringstufe zu berechnen.

Beide Methoden sind abhängig von der entsprechenden Berechnung der finalen Eindringung pro Schlag (Schlagzahl).

B.3 Mathematisches Modell

B.3.1 Algorithmen der Wellenausbreitung

Die Algorithmen zur Simulation der Wellenausbreitung im Pfahl können auf dem Punktmasse-Feder-Ansatz (Quelle [3] und [4]), dem kontinuierliches-Segment-Ansatz (Quelle [5] und [6]) oder dem Finite-Elemente-Ansatz (Quelle [7]) basieren. Bild B.1 gibt ein Beispiel des kontinuierliches-Segment-Modells für einen Pfahl im Boden.



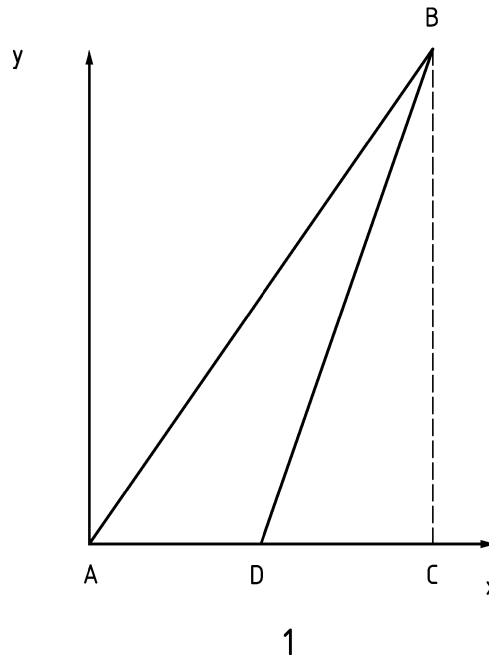
Legende

1 Modell des Fallgewichts	2 Modell der Polsterung	3 Schaftsegment
4 Widerstand	5 Bodenmasse	6 Verschiebung
7 Erschütterung ₁	8 Erschütterung ₂	9 Modell des Pfahls
10 Modell des Bodens	11 Kuppensegment	12 Flüssigkeitsdämpfer
13 Bodenmasse an Basislücke	14 Federschieber	

Bild B.1 — Standardmodell für die Interaktion zwischen Pfahl und Boden während des Einbringens

B.3.2 Mechanische Modellierung von Fallgewicht, Komponenten, Polsterung und Pfahl

Fallgewicht, Amboss, Schlaghauben können als Segmente oder als Punktmasse und Federn modelliert werden. Die Polsterung kann als diskrete Feder modelliert werden (siehe Bild B.2). Der Computercode modelliert das aufprallende Fallgewicht, das Polsterungssystem, den Pfahl im Boden und die Spannungswellenausbreitung durch die Berücksichtigung des Pfahlquerschnitts, der Dichte und des Elastizitätsmoduls des Pfahls sowie des nichtlinearen statischen, dynamischen und Ermüdungsverhaltens.



Legende

x Dehnung

y Spannung

1 Restitutionskoeffizient = $\sqrt{\text{Fläche BCD}/\text{Fläche ABD}}$

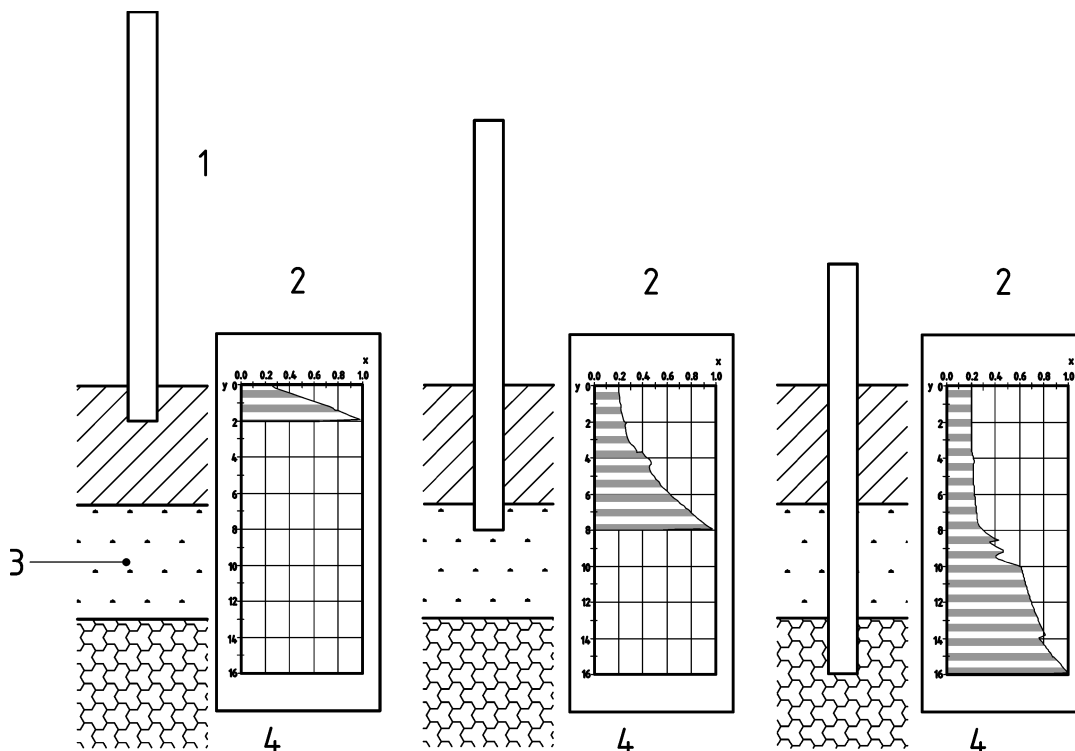
Bild B.2 — Beispiele für diskretes Polstermodell

B.3.3 Modellierung des nichtlinearen Bodenverhaltens

Um das Spannungsverformungsverhalten des Bodens abzubilden, wird die statische Komponente durch eine linear-elastische, idealerweise plastische Feder, und die dynamische Komponente durch einen linear-viskosen Schwingungsdämpfer und hinzugefügte Masse (siehe Bild B) dargestellt. Die Wahl der statischen Parameter wie Bodenfließgrenzen, Erschütterungen und dynamische Parameter müssen entsprechend ausgewertet werden, da sie bedeutenden Einfluss auf die berechneten Widerstände und die permanente Eindringung pro Schlag haben.

B.3.4 Modellierung des Bodenermüdungsverhaltens

Ein Bodenmodell, das Ermüdung/Abtrag während des kontinuierlichen Einbringens einbezieht, kann hinzugefügt werden, so dass eine akkurate Schätzung des finalen Pfahlwiderstands durchgeführt werden kann. Da der Bodenabtrag für jede Bodenschicht (siehe Bild B.3) und für jede Eindringstufe des Pfahlfußes unterschiedlich sein wird, ist es notwendig, eine Aktualisierung für jede Bodenschicht auf jeder Eindringstufe des Pfahlfußes durchzuführen (Quelle [8]).



Legende

1 Pfahl

2 Bodenermüdung

3 Boden

4 Ermüdungsfaktor entlang der
Pfahlachse

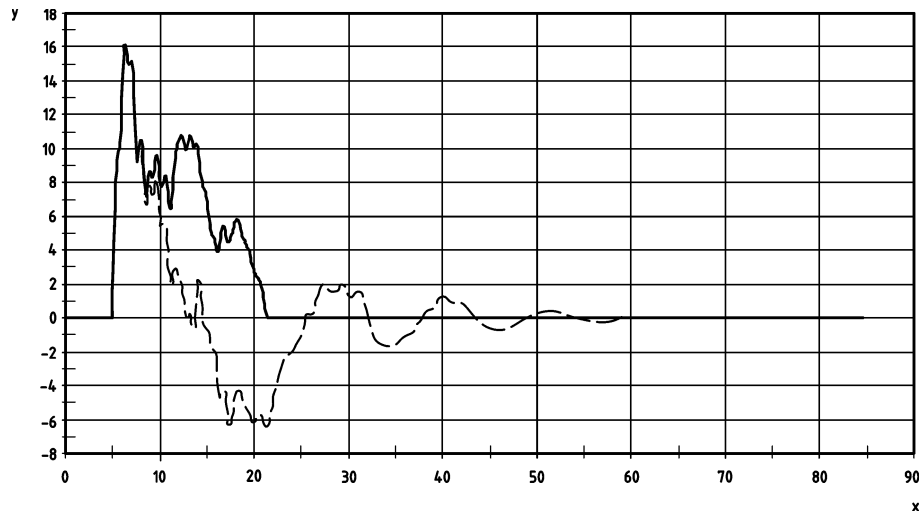
Bild B.3 —Beispiel Reduktionsfaktor für Bodenermüdung für drei Eindringstufen von Pfahlfüßen

B.3.5 Modellierung der Bodenschichten

Alle relevanten Bodenschichten und diejenigen, die voraussichtlich mit den höchsten Einbringungswiderständen in Verbindung gebracht werden, sollten durch mindestens eine Eindringstufe abgebildet werden, wo Vorhersagen getroffen werden.

B.3.6 Zeitverläufe

Zeitverläufe werden verwendet, um die Ergebnisse der Simulation mit real gemessenen Signalen, wie Stoßkräfte, übertragene Energie und Verschiebungen, zu vergleichen und zu kalibrieren (siehe Bild B.4 und B.5).



Legende

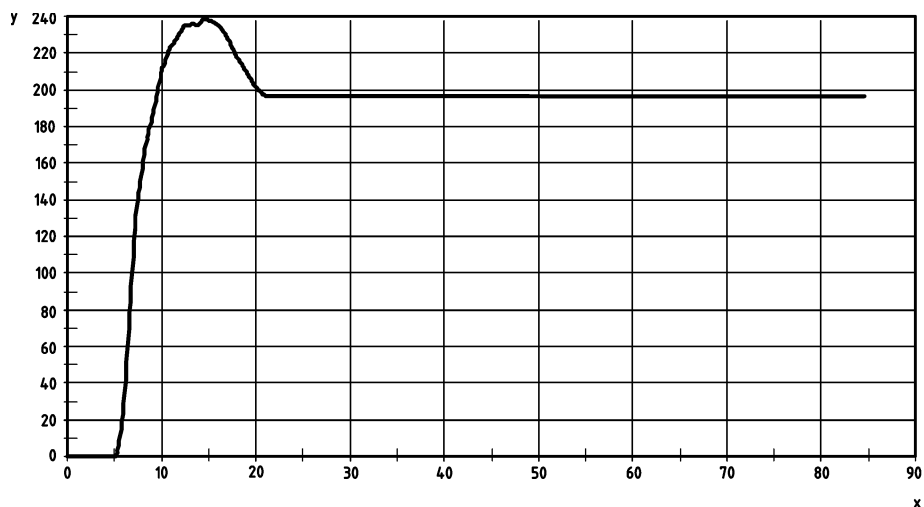
x Zeit (ms)

y Kraft (MN)

— Kraft

— — Zv

Bild B.4 — Zeitverlauf für Stoßkraft und Geschwindigkeit, multipliziert mit der Impedanz an der Pfahlkopfoberseite



Legende

x Zeit (ms)

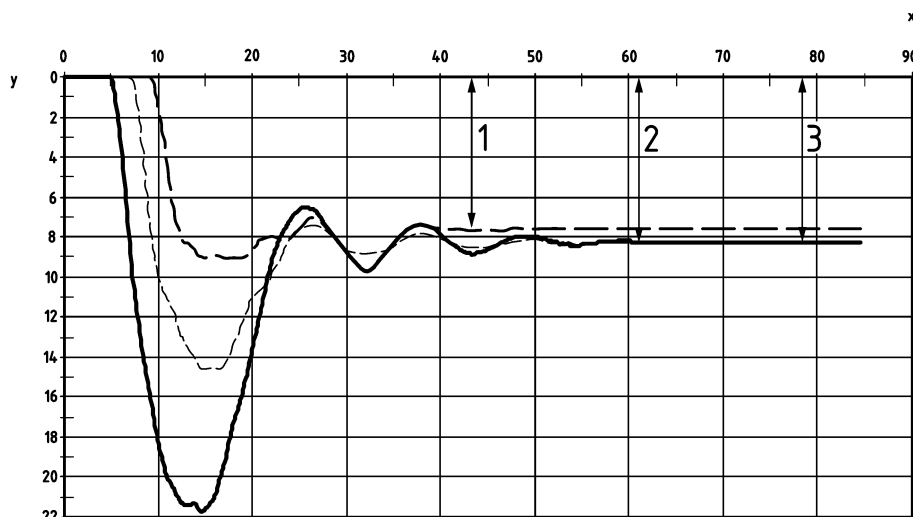
y Energie (kNm)

— berechnet

Bild B.5 — Zeitverlauf für die zum Pfahl übertragene Energie

B.3.7 Bestimmung der permanenten Eindringung

Die Eindringung pro Schlag wird aus den berechneten Verschiebungen an der Pfahlkopffläche, oder nachdem der Pfahl zur Ruhe gekommen ist, berechnet (Bild B.6).



Legende

x Zeit (ms)

y Verschiebung (mm)

1 Pfahlfuß

2 Pfahlmitte

3 Pfahloberseite

— Stufe = 0,000 m

--- Stufe = 11,311 m

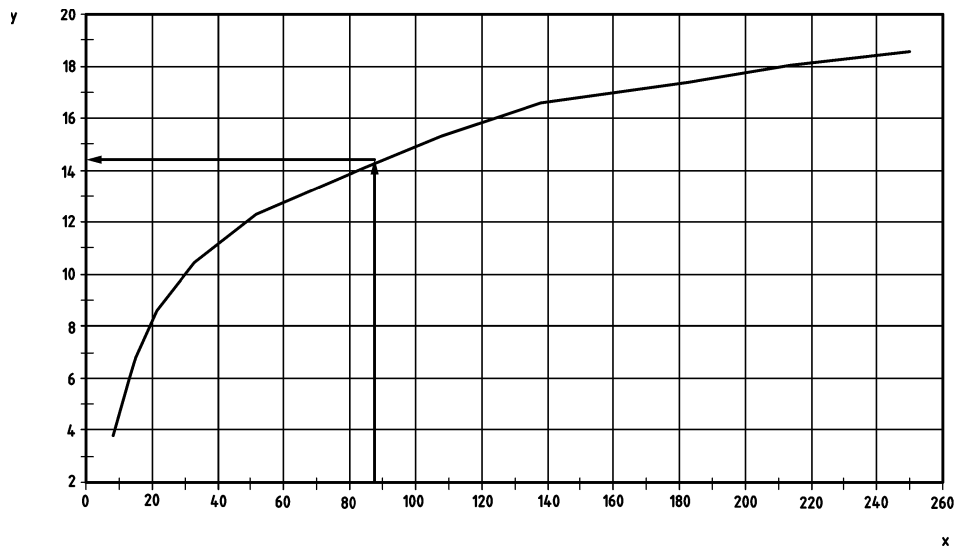
— — Stufe = 23,000 m

Bild B.6 — Bestimmung der permanenten Eindringung für einen Hammerschlag

B.4 Tragfähigkeits-Kurve-Verfahren

Mit diesem Verfahren werden mehrere Simulationsläufe mittels Wellengleichungen durchgeführt, wobei jeder einen Hammerschlag für ansteigende Bodenwiderstände, für ein/e bestimmtes/bestimmte Gewicht, Polsterung, Pfahlkonfiguration und eine vorgeschriebene Energie sowie Eindringstufe des Pfahlfußes simuliert. Für jeden Durchgang wird das endgültige Abbinden (Schlagzahl) abgeleitet und die entsprechende Druckfestigkeit wird aus den Parametern des statischen Bodenmodells berechnet. Die Ergebnisse werden in einer Tragfähigkeits-Kurve dargestellt (siehe Bild B.7).

Während des tatsächlichen Einbringens bei gleicher Ausgangslage in Bezug auf die Konfiguration des Hammers, der Energiestufe und der Eindringstufe des Pfahlfußes und durch Aufzeichnung der Schlagzahl (endgültiges Abbinden) kann der tatsächliche Druckwiderstand aus der Tragfähigkeits-Kurve ermittelt werden (Bild B.7).



Legende

x Schlagzahl (Schläge/0,25 m)

y Druckwiderstand (MN)

**Bild B.7 — Tragfähigkeits-Kurve SRD versus Schlagzahl, Eindringung = 16,000 (m),
Aufprallenergie = 252,7 (kJ)**

Für die während des Einbringens aufgezeichnete Schlagzahl (in diesem Fall 87 Schläge für 250 mm, Bild B.7) kann ein Pfahlwiderstand aus dem Graphen des simulierten Pfahlwiderstands ermittelt werden (in diesem Fall 14,2 MN).

B.5 Verfahren zur Anpassung der Schlagzahl

Dieses Verfahren kann angewendet werden, wenn vollständige Aufzeichnungen zum Einbringen einschließlich Energie pro Eindringungseinheit zu Einbringungstiefe und Schlagzahl zu Einbringungstiefe verfügbar ist.

Mehrere Durchläufe der Wellengleichung, wobei jeder einen Schlag des Hammers simuliert, werden für jede Eindringungsstufe des Pfahlfußes durchgeführt, wenn Aufzeichnungen zum Einbringen verfügbar sind. Es wird angenommen, dass die Energie des Hammerschlags der Energie aus den Aufzeichnungen zum Einbringen entspricht. Für jede Stufe wird das Bodenverhalten so variiert, dass eine Übereinstimmung zwischen gemessenen und geschätzten Schlagzahlen oder Eindringungen pro Schlag erzielt wird (siehe Bild B.8).