

DIN EN ISO 22477-4



ICS 93.020

**Geotechnische Erkundung und Untersuchung –
Prüfung von geotechnischen Bauwerken und Bauwerksteilen –
Teil 4: Pfahlprüfungen: Dynamische Pfahlprobebelastung
(ISO 22477-4:2018);
Deutsche Fassung EN ISO 22477-4:2018**

Geotechnical investigation and testing –
Testing of geotechnical structures –
Part 4: Testing of piles: dynamic load testing (ISO 22477-4:2018);
German version EN ISO 22477-4:2018

Reconnaissance et essais géotechniques –
Essais de structures géotechniques –
Partie 4: Essais de pieux: essai de chargement dynamique (ISO 22477-4:2018);
Version allemande EN ISO 22477-4:2018

Gesamtumfang 64 Seiten

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN ISO 22477-4:2018) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 341 „Geotechnische Erkundung und Untersuchung“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee ISO/TC 182 „Geotechnics“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird.

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).

Deutsche Fassung

Geotechnische Erkundung und Untersuchung —
Prüfung von geotechnischen Bauwerken und Bauwerksteilen —
Teil 4: Pfahlprüfungen: Dynamische Pfahlprobelbelastung
(ISO 22477-4:2018)

Geotechnical investigation and testing —
Testing of geotechnical structures —
Part 4: Testing of piles: dynamic load testing
(ISO 22477-4:2018)

Reconnaissance et essais géotechniques —
Essais de structures géotechniques —
Partie 4: Essais de pieux: essai de chargement
dynamique
(ISO 22477-4:2018)

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 24. Februar 2018 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim CEN-CENELEC-Management-Zentrum oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, der ehemaligen jugoslawischen Republik Mazedonien, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, Serbien, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, der Türkei, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

CEN-CENELEC Management-Zentrum: Rue de la Science 23, B-1040 Brüssel

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 Allgemeines	11
4.2.2 Belastung durch ein Rammsystem	12
4.2.3 Belastung durch ein Freifallsystem für Einzel- oder Mehrfachbelastung	12
4.3 Messungen	12
4.3.1 Allgemeines	12
4.3.2 Messungen für Stoßprüfungen	13
4.3.3 Erforderliche Messungen und Aufzeichnungen für Rammformeln oder die Wellengleichungsanalyse	14
5 Prüfdurchführung	15
5.1 Vorbereitung der Prüfung	15
5.2 Sicherheitstechnische Anforderungen	16
5.2.1 Personen und Ausrüstung in der näheren Umgebung	16
5.2.2 Probepfahl	16
5.3 Vorbereitung des Pfahls	17
5.4 Zeit der Prüfungen	17
5.4.1 Allgemeines	17
5.4.2 Rammen — kontinuierliche Überwachung des Rammens und Prüfung zum Ende des Einrammvorgangs	17
5.4.3 Nachrammen	17
5.4.4 Ortbetonpfähle	18
6 Prüfergebnisse	18
6.1 Prüfergebnisse für dynamische Probelastung mittels Rammformel	18
6.2 Prüfergebnisse für dynamische Probelastung mit Wellengleichungsanalyse	18
6.3 Prüfergebnisse für dynamische Probelastung mit Messungen am Pfahlkopf	19
7 Prüfberichterstattung	19
Anhang A (informativ) Rammformel	22
A.1 Allgemeines	22
A.2 Allgemeines Konzept der Rammformel	22
A.2.1 Allgemeines	22
A.2.2 Analyse Rammformel	22
A.2.3 Bestimmung der kinetischen Energie (E_k)	23
A.2.4 Bestimmung des Restitutionskoeffizienten (C_r)	23

A.2.5	Bestimmung der Eindringung des Pfahls (s und s_{el})	24
A.2.6	Bestimmung der empirischen Effizienz/des Korrelationsfaktors η	24
A.2.7	Berechnung der zum Pfahl übertragenen Energie E_{tr}	24
A.2.8	Berechnung des Bodenwiderstands R_u	24
A.2.9	Zu berücksichtigende ergänzende Faktoren	24
Anhang B (informativ) Wellengleichungsanalyse		25
B.1	Allgemeines	25
B.2	Allgemeines Konzept der Wellengleichungsanalyse	25
B.3	Mathematisches Modell	26
B.3.1	Algorithmen der Wellenausbreitung	26
B.3.2	Mechanische Modellierung von Fallgewicht, Komponenten, Futter und Pfahl	27
B.3.3	Modellierung des nichtlinearen Bodenverhaltens	27
B.3.4	Modellierung des Bodenermüdungsverhaltens	27
B.3.5	Modellierung der Bodenschichten	28
B.3.6	Zeitverläufe	28
B.3.7	Bestimmung der bleibenden Setzung des Pfahlkopfes	30
B.4	Tragfähigkeitskurve-Verfahren	30
B.5	Nachrechnen des Rammprotokolls	31
Anhang C (informativ) Beispiele für die Befestigung von Aufnehmern und für Einzelheiten einer Pfahlkopfverlängerung		35
C.1	Einzelheiten der Befestigung von Aufnehmern	35
C.2	Beispiel für Einzelheiten einer Pfahlkopfverlängerung	36
Anhang D (informativ) Auswertung durch geschlossene Lösungen unter Verwendung von empirischen Dämpfungswerten		37
D.1	Allgemeines	37
D.2	Grundlegende Betrachtungen für geschlossene Lösungen	37
D.3	Beispiele für geschlossene Lösungen	39
D.3.1	CASE-Methode	39
D.3.2	TNO-Methode	41
Anhang E (informativ) Bewertung der Messungen durch vollständige Modellbildung		45
E.1	Allgemeines	45
E.2	Begriffe	45
E.3	Modell des Pfahls	45
E.4	Modell des Bodens	46
E.5	Prozess der vollständigen Modellbildung	48
E.6	Sensitivität der vollständigen Modellbildung und Vergleich mit geotechnischen Informationen	50
E.7	Ergebnisdarstellung	50
Anhang F (informativ) Dynamisches Multischlag-Prüfverfahren		54
F.1	Allgemeines	54
F.2	Allgemeines Konzept einer Multischlag-Analyse	54
F.3	Messkorrektur und Analyse	55
Literaturhinweise		61

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (EN ISO 22477-4:2018) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 182 „Geotechnics“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 341 „Geotechnische Erkundung und Untersuchung“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Oktober 2018, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Oktober 2018 zurückgezogen werden.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Entsprechend der CEN-CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, die ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Serbien, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Türkei, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO 22477-4:2018 wurde von CEN als EN ISO 22477-4:2018 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsorganisationen (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO 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 staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Themen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) 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. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten 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 erhaltenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Eine Erläuterung zum freiwilligen Charakter von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT) berücksichtigt, enthält der folgende Link: www.iso.org/iso/foreword.html.

Dieses Dokument wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 341, *Geotechnische Erkundung und Untersuchung*, in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee ISO/TC 182, *Geotechnics*, in Übereinstimmung mit der Vereinbarung zur technischen Zusammenarbeit zwischen ISO und CEN (Wiener Vereinbarung) erarbeitet.

Eine Auflistung aller Teile der Normenreihe ISO 22477 ist auf der ISO-Internetseite abrufbar.

Einleitung

Das vorliegende Dokument bestimmt die Spezifikationen für die Ausführung von dynamischen Probelastungen, in denen ein einziger Pfahl einer axialen Druckbelastung unterliegt, um seine Dehnung, Beschleunigung und Verschiebung unter dynamischer Belastung zu messen und um eine Bewertung seiner Druckfestigkeit zu ermöglichen. Dieses Dokument legt dar, wie eine dynamische Probelastung definiert ist und spezifiziert die erforderlichen Geräte und Prüfverfahren. Es umfasst eine informative, nicht normative Anleitung für die Auswertung der Prüfergebnisse der dynamischen Probelastung, die erforderlich sind, um den mobilisierten oder gemessenen Grenzwert des Druckwiderstands eines Pfahls zu bestimmen.

1 Anwendungsbereich

Das vorliegende Dokument legt die Spezifikationen für die Ausführung von dynamischen Probelastungen, in denen ein einziger Pfahl einer axialen dynamischen Belastung unterliegt, fest.

Dieses Dokument beschreibt die erforderlichen Prüfmethoden für die Beurteilung des Pfahlwiderstands, der mit den folgenden Methoden und Verfahren, beschrieben in EN 1997-1:2004+A1:2013, bestimmt wird:

- a) Stoßprüfung – Bestimmung des Pfahldruckwiderstands durch Auswertung der Messungen von Dehnung und Beschleunigung und/oder Verschiebung am Pfahlkopf in Abhängigkeit von der Zeit;
- b) Rammformeln – Bewertung des Pfahldruckwiderstands aus Schlagzahl und Energie des Hammers während der Rammarbeiten;
- c) Analyse von Wellengleichungen – Bewertung des Pfahldruckwiderstands aus der Schlagzahl durch die Modellierung des Pfahls, des Bodens und des Rammgeräts;
- d) dynamische Multischlag-Prüfung – Bewertung des Pfahldruckwiderstands aus einer Serie von Schlägen, die dazu bemessen sind, unterschiedliche Niveaus von Pfahlkopfverschiebung und -geschwindigkeit zu erzeugen.

Dieses Dokument gilt für axialbelastete, druckbeanspruchte Pfähle.

Dieses Dokument gilt für sämtliche in EN 1536, EN 12699 und EN 14199 genannten Pfahlarten.

Die in diesem Dokument berücksichtigten Prüfungen sind ausschließlich auf dynamische Probelastungen an Pfählen beschränkt.

ANMERKUNG 1 ISO 22477-4 kann in Verbindung mit EN 1997-1:2004+A1:2013 angewendet werden. Numerische Teilsicherheitsbeiwerte 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 Probelastungen 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 Probelastungen werden in den Anhängen A, B, D, E und F gegeben.

Dieses Dokument 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 3 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 Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. 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).

EN 1997-1:2004+A1:2013, *Eurocode 7 — Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik — Teil 1: Allgemeine Regeln*

3 Begriffe und Symbole

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach EN 1997-1:2004+A1:2013 und die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- IEC Electropedia: unter <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online Browsing Platform: unter <http://www.iso.org/obp>

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 den Druckwiderstand zu bestätigen

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Versuchspfahl könnte 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 Druckwiderstand-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

axiale Druckstoßbelastung (oder -kraft), die auf den Kopf eines Pfahls durch einen Rammbar oder ein Fallgewicht aufgebracht wird

3.1.6

maximale Pfahlbelastung

höchste axiale Druckkraft, die während der Prüfung auf den Pfahl aufgebracht wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese wird im Allgemeinen vor der Prüfung festgelegt.

3.1.7

dynamische Probelastung

Prüfung, bei der ein Pfahl zur Analyse seines Druckwiderstands einer auf den Pfahlkopf aufgetragenen axialen dynamischen Belastung ausgesetzt wird

3.1.8

Stoßprüfung

Pfahlprüfung mit Messung der Dehnung, Beschleunigung und Verschiebung in Abhängigkeit von der Zeit während des Aufpralls

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Aufprall ist in der Regel ein Hammeraufschlag.

Anmerkung 2 zum Begriff: Diese Prüfung wird verwendet, um den Druckwiderstand der einzelnen Pfähle zu bewerten.

3.1.9

Rammformel

Gleichung, die die Aufprallenergie des Hammers und die Anzahl der Schläge für eine Entfernungseinheit oder die bleibende Setzung für einen einzelnen Schlag zum Pfahldruckwiderstand in Beziehung setzt

3.1.10

Wellengleichungsanalyse

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

3.1.11

vollständige Modellbildung

Vorgang zur Beurteilung des Schaft- und Sohlenwiderstands von Pfählen durch Modellierung des Pfahls und Bodens mit Variation von Parametern, um gemessene Signale von Pfahlkopfdrehung oder den Messungen von Verschiebung und Beschleunigung anzupassen

3.1.12

Impedanz

dynamische Steifigkeit eines Pfahls, bestimmt aus der Querschnittsfläche, Werkstoffsteifigkeit und Dichte

Anmerkung 1 zum Begriff: Für einen ungleichmäßigen Pfahl kann die Impedanz über die Länge des Pfahls unterschiedlich sein.

3.1.13

mobilisierter Druckwiderstand

Widerstand, der mit der verfügbaren Energie der Aufprallvorrichtung mobilisiert wird

3.1.14

gemessener Grenzwert des Druckwiderstands

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 den Pfahlkopf von 10 % des Durchmessers der Pfahlunterseite als Versagenskriterium angewendet werden.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Grenzwert des Druckwiderstands wird bei einer dynamischen Probelastung nicht direkt gemessen. Der in einer dynamischen Probelastung gemessene oder mobilisierte Druckwiderstand muss derart analysiert werden, dass die Auswirkungen des dynamischen baugrundabhängigen Verhaltens vom Gesamtwiderstand abgezogen wird, bevor er dem gemessenen Grenzwert des Druckwiderstands gleich gesetzt werden kann, wie im entsprechenden Anhang dargestellt.

3.1.15

statischer Bemessungsdruckwiderstand

Grenzwert des Druckwiderstands eines Pfahls

Anmerkung 1 zum Begriff: Dieser ist vor der Probelastung zu bestimmen, um die Spezifikation der entsprechenden geeigneten Last für die dynamische Probelastung zu ermöglichen.

3.1.16**äquivalenter Durchmesser**

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

Anmerkung 1 zum Begriff: Der äquivalente Durchmesser für einen runden Pfahl ist der Außendurchmesser des Pfahls, für einen rechteckigen Pfahl ist der Durchmesser, der dieselbe Fläche wie der rechteckige Querschnitt ergibt (sofern die längste Seite kleiner als das 1,5-Fache der kürzesten Seite ist), der äquivalente Durchmesser.

3.1.17**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.

3.1.18**Verschiebung**

während der Prüfung gemessene axiale Bewegung des Pfahlkopfes

3.2 Symbole

a	Beschleunigung
A	Querschnittsfläche des Pfahls in der betrachteten Ebene
A_r	Querschnittsfläche der Pfahlbewehrung in der betrachteten Ebene
c	Geschwindigkeit der Spannungswelle innerhalb des Probepfahls
E_{dyn}	dynamischer Elastizitätsmodul des Pfahlwerkstoffs in der betrachteten 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 Pfahlbewehrung
g	Erdbeschleunigung ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$)
h	Fallhöhe (oder Ausschlag), aus der die Masse oder der Hammer gefallen ist
L	Länge des Pfahls
m	Masse
$R_{c,m}$	gemessener Grenzwert des Bodendruckwiderstands bei der Prüfung oder Messwert des geotechnischen Pfahlwiderstands
t	Zeit
v	Geschwindigkeit
Z	Pfahlimpedanz
w	Pfahlverschiebung oder -setzung
ε	Dehnung

4 Prüfeinrichtung

4.1 Allgemeines

Die Prüfeinrichtung muss in der Lage sein, ausreichend Kraft und Energie zur Mobilisierung des Druckwiderstands, der nachzuweisen ist, zu erzeugen.

Ist eines der Prüfziele die Bestimmung des gemessenen Grenzwerts des Druckwiderstands eines Pfahls, muss die Leistung der Prüfausrüstung für das Erreichen des gemessenen Grenzwerts des Druckwiderstands und die Mobilisierung einer adäquaten Setzung unter dynamischer Belastung bei einzelnen oder einer Abfolge von einzelnen Schlägen ausreichend sein.

Die maximale Pfahlbelastung während einer dynamischen Probelastung für die Bestimmung des gemessenen Grenzwerts des Druckwiderstands kann den statischen Bemessungsdruckwiderstand überschreiten. Die Notwendigkeit, solche hohen Belastungen aufzubringen, ist zu berücksichtigen, wenn Ausrüstung und Pfahlwerkstoffe spezifiziert werden.

Wenn für eine dynamische Probelastung eine oder mehrere Anforderungen in diesem Dokument 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 Probelastungen beruhen auf einer Masse, mit welcher die Last auf den Pfahlkopf aufgebracht wird. Das geschieht entweder durch einen Hammer für das Einbringen des Pfahls, bezeichnet als Rammgerät, oder durch Fallenlassen einer Masse, bezeichnet als Freifallgerät. Dynamische Probelastungen können während des Einbaus von Fertigbetonpfählen oder Stahlpfählen (Verdrängungspfählen) durchgeführt werden, wenn das Einbringen mit einem Rammbaren erfolgt. Freifallgeräte werden für die Prüfung von Ortbetonpfählen (Bohrpfähle, Schneckenbohrpfähle und andere vor Ort hergestellte Pfähle) und im Zusammenhang mit Nachrammen verwendet. Die während der Prüfung verwendete Art des Lasteintrags kann von verschiedenen Faktoren abhängen, einschließlich der Verfügbarkeit der Ausrüstung für den Einbau oder der Belastung der Pfähle und der Phase des Bauprojekts.

In EN 1997-1:2004+A1:2013 sind drei Arten von dynamischen Pfahlprüfungen angegeben, die sich auf die Art der durchgeführten Messungen und Analysen beziehen und als Stoßprüfung, Rammformel und Wellengleichungsanalyse bezeichnet werden. Eine ausführlichere Beschreibung ist in den informativen Anhängen enthalten, zusammen mit dem dynamischen Multischlag-Prüfverfahren. Die auszuführenden Messungen und die erforderliche Ausrüstung sowie die für eine dynamische Probelastung erforderlichen Informationen hängen von der durchgeführten spezifischen dynamischen Probelastung ab.

4.2 Belastung

4.2.1 Allgemeines

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 in der Lage sein, die erforderliche maximale Druckkraft zur Mobilisierung eines festgelegten Druckwiderstands oder den gemessenen Grenzwert des Druckwiderstands eines Pfahls aufzubringen. Die Ausrüstung muss den Pfahl mit entsprechend ausgerichteter Fallmasse in 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 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). Bei Betonpfählen unter Zugspannung sollte die Zugkraft $0,9 \times f_{yk} \times A_r$, abzüglich der komprimierten Vorspannung, nicht überschreiten. Bei Stahlpfählen sollte die maximale Spannung im Stahlpfahl das 0,9-Fache der charakteristischen Streckgrenze des Stahls nicht überschreiten.

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

Um potentiellen Schaden an Betonpfählen zu vermeiden, kann eine Simulation des geplanten Belastungsprozesses durch Wellengleichungsanalyse durchgeführt werden. Basierend auf der Wellengleichungsanalyse kann der Belastungsplan angepasst werden und erneut simuliert werden, beispielsweise, um große Zugspannungen in einem Betonpfahl zu vermeiden.

4.2.2 Belastung durch ein Rammsystem

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

Die Häufigkeit der Hammerschläge sollte nicht größer sein als 120 Schläge je Minute, wenn eine Auswertung durch eine Rammformel in Betracht gezogen wird.

4.2.3 Belastung durch ein Freifallsystem für Einzel- oder Mehrfachbelastung

Die Masse der Fallmasse sollte so gewählt werden, dass sie größer als 2 % des statischen Bemessungsdruckwiderstands des Pfahls ist (wenn die Masse der Fallmasse als ein Gewicht ausgedrückt wird).

In sehr harten Böden, wenn Pfähle auf hartem Untergerstein ruhen oder ein Pfahl in einem Gesteinskörper eingebracht ist, können Fallmassen mit einem Gewicht von 1 % des erforderlichen statischen Bemessungsdruckwiderstands ausreichend sein, um den Pfahlwiderstand zu mobilisieren.

Die eingesetzte Energie oder die Fallhöhe der Fallmasse sollten so angepasst werden, dass sie die vollständige Mobilisierung der Mantelreibung des Pfahls erreichen.

4.3 Messungen

4.3.1 Allgemeines

Die ausgeführten Messungen und die erforderliche Ausrüstung und Informationen für eine dynamische Probelastung hängen von der durchgeführten speziellen dynamischen Probelastung ab.

Während einer Stoßprüfung müssen mindestens drei Variablen direkt in Bezug auf die Zeit (t) gemessen werden:

- die Dehnung am Pfahlkopf (ϵ);
- die Beschleunigung des Pfahlkopfs (a);
- die permanente Verschiebung des Pfahls je dynamische Lastaufbringung (Setzung je Schlag).

Wenn die Stoßprüfung mit dem dynamischen Multischlag-Prüfverfahren (Anhang F) analysiert wird, wird dies zusätzlich umfassen:

— die Verschiebung des Pfahlkopfs (w).

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

- die permanente Verschiebung des Pfahls je Schlag des Hammers, bezeichnet als Setzung je Schlag (oder Hitze);
- die Masse des Hammers (oder Fallmasse) und Fallhöhe (und/oder Energie).

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.

4.3.2 Messungen für Stoßprüfungen

Die Aufnehmer 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 Aufnehmer müssen über einen ausreichenden Messbereich verfügen, damit ein erneutes Justieren oder eine Änderung der Position während der Prüfung vermieden wird. Die gesamte Ausrüstung muss während des Pfahleinbaus und der Prüfverfahren funktionsfähig bleiben. Für Dieselhammer sollte die Vorlaufzeit auf mindestens 35 ms ausgedehnt werden und die entsprechende Dauer der Messung auf > 125 ms verlängert werden. Für längere Pfähle sollte bei der Bestimmung der Dauer der Messung die Pfahllänge berücksichtigt werden. Die Abtastrate sollte in Bezug auf die Pfahlart und die Art der durchgeführten Prüfung gewählt werden.

Tabelle 1 — Stoßprüfung: Allgemeine Anforderungen an die Signalverarbeitung

Parameter	Anforderung
Abtastrate	$\geq 5\,000$ Punkte je Sekunde
Dauer der Vorlaufzeit	≥ 10 ms
Dauer der Messung	≥ 100 ms

Tabelle 2 — Stoßprüfung: Anforderungen an Dehnungsaufnehmer

Parameter	Anforderung
maximale Dehnung	$\geq 0,015$
Resonanzfrequenz	$\geq 2\,000$ Hz

Tabelle 3 — Stoßprüfung: Anforderungen an Beschleunigungsaufnehmer

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

Tabelle 4 — Stoßprüfung: Messung der Verschiebung während des Kraftauftrags mit Theodolit

Parameter	Anforderung
Abtastrate	$\geq 10\,000$ Punkte je Sekunde
Genauigkeit	< 1 mm

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 bestimmten Umständen, d. h. bei häufiger Nutzung oder wenn Komponenten ausgetauscht werden oder bei möglicher Beschädigung, 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, der in axialer Richtung montiert ist (siehe Anhang C).

4.3.3 Erforderliche Messungen und Aufzeichnungen für Rammformeln oder die Wellengleichungsanalyse

Die permanente Verschiebung des Pfahls je Schlag des Hammers, bezeichnet als Eindringung je Schlag, wird aufgezeichnet, indem die Anzahl der Schläge für eine Entfernungseinheit der Eindringung für mindestens die letzten 1,0 m der Pfahleindringung manuell gezählt wird.

Vor der Prüfung sollte der zu prüfende Pfahl deutlich mit Abstandsmarkern gekennzeichnet werden. Bei kontinuierlichem Einbringen werden die Schläge je Eindringungseinheit gezählt. Als Alternative kann eine Eindringung für eine festgelegte Anzahl von Schlägen ermittelt werden.

Die Eindringung je Schlag wird entweder durch optische Nivellierung zu einem Bezugspunkt, der durch Rammarbeiten nicht beeinflusst wird, oder durch Sichtbeobachtungen von Markierungen am Pfahl, die einen stabilen, vom Pfahlprüfungsprozess nicht beeinflussten Referenzstrahl passieren, festgestellt. Die Anforderungen für optische Nivellierung sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5 — Verschiebungsanforderungen für die Eindringung je Schlag bei dynamischer Probelastung, wenn durch optische Nivellierung bestimmt

Parameter	Anforderung
Fehlergrenze	≤ 1 mm

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

Die potenzielle Energie des Einbringsystems:

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad (1)$$

Dabei ist

E_p die potenzielle Energie;

m die Masse des Fallgewichts oder des Rammhärens;

g die Erdbeschleunigung ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$);

h die Fallhöhe, aus der das Gewicht oder der Rammhär gefallen ist.

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

Die kinetische Energie des Fallgewichts unmittelbar vor dem Aufprall lässt sich nach folgender Gleichung berechnen:

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

Dabei ist

E_k die kinetische Energie;

v die Geschwindigkeit des Fallgewichts vor dem Aufprall.

Die Geschwindigkeit des Fallgewichts vor dem Aufprall kann durch Näherungsschalter gemessen werden, die im Hammergehäuse angebracht sind.

5 Prüfdurchführung

5.1 Vorbereitung der Prüfung

Es wird empfohlen, vor der Prüfung einen Ausführungsplan auszuarbeiten, der mit dem geplanten Abschlussbericht in Abschnitt 7 übereinstimmt. Der Plan sollte Folgendes umfassen, falls zutreffend:

- a) Prüfziele;
- b) die Baugrund- und Grundwasserbedingungen mit Bezug auf die relevanten Bodenuntersuchungen;
- c) topographische Orte, Typen und Spezifikationen der Probepfähle;
- d) zulässige Höchstwerte für die auf den Pfahl einwirkende Belastung und Spannung und die Verschiebung des Pfahls/der Pfähle;
- e) erforderliche Pfahlverformung und aufgebrachte Last;
- f) Spezifikation der Belastungseinrichtung;
- g) Spezifikationen der Messgeräte und Kalibrierungszertifikate, falls zutreffend;
- h) Spezifikationen zusätzlicher Messgeräte;

- i) Plan der Prüfbaustelle;
- j) Prüfprogramm;
- k) Liste der 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, Anforderungen bzw. -Einschränkungen für Fahrzeuge, Hebevorgang, Platz für Arbeiten im Bereich des Pfahls usw.);
- m) Zugänglichkeit des Pfahls für die Befestigung von Sensoren;
- n) Verfahren zur Vermeidung von Schäden an Pfählen und zum Erkennen von Schäden an Pfählen bei Ortbetonpfählen;
- o) Bewertung der Durchführbarkeit von Prüfung durch Wellengleichungsanalyse;
- p) sicherheitstechnische Anforderungen.

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. EN 16228 sollte wenn möglich eingehalten 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 Probelastungen ist nicht notwendig, wenn die Prüfung Teil eines größeren Programms zum Einbau von Rammpfählen 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 Druckbelastung nicht beschädigt werden sollte. Da Ortbetonpfähle (Bohrpfähle, Schneckenbohrpfähle oder andere Verpresspfähle) in der Regel nicht für Stoßbelastungen bemessen sind, sollten die Pfahlköpfe durch ein Stahlgehäuse verstärkt werden. Vor der Prüfung sollten der zulässige Druck und die zulässige Zugspannung für den Pfahl definiert und mit dem Ergebnis der Wellengleichungsanalyse für den Pfahl verglichen werden. Für Ortbetonpfähle sollten Integritätsprüfungen vor und nach der dynamischen Probelastung durchgeführt werden.

ANMERKUNG Während einer dynamischen Probelastung wird der Probepfahl mit einer Kraft beladen, die die äquivalenten statischen Prüfbelastungen überschreiten kann. Die Probepfähle sind so zu bemessen, dass sie den resultierenden höheren Spannungen widerstehen können. Für Betonpfähle wird in der Regel ein Rammfutter auf dem Pfahl verwendet, um die Spannung zu reduzieren und gleichmäßig zu verteilen.

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 ohne vorherige Genehmigung sämtlicher betroffener Parteien nicht überschreiten.

5.3 Vorbereitung des Pfahls

Der Pfahlkopf muss flach, eben und senkrecht zur Pfahlachse und unbeschädigt sein. Die Oberfläche von Betonpfählen muss mit einem Futter geschützt werden. Der Probepfahl muss oberhalb der Geländeoberkante eine für das Anbringen von Messeinrichtungen ausreichende Länge aufweisen. Vorgeschlagene Positionierung von Aufnehmern und Einzelheiten zu Pfahlverlängerung werden in Anhang C angegeben.

5.4 Zeit der Prüfungen

5.4.1 Allgemeines

Der Druckwiderstand eines Pfahls hat die Tendenz, in Abhängigkeit von der Zeit der Prüfung nach dem Einbau stark zu variieren. Dem sollte für dynamische Probelastungen entsprechende Beachtung geschenkt werden, da die Prüfung während des Einbaus des Pfahls oder zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt werden kann.

5.4.2 Rammen — kontinuierliche Überwachung des Rammens und Prüfung zum Ende des Einrammvorgangs

Bei kontinuierlichen Rammarbeiten für den Einbau kann jeder einzelne Rammschlag als separate dynamische Probelastung betrachtet werden. In der Regel wird eine Druckwiderstandsberechnung durchgeführt, wenn der Pfahl in eine als geeignet betrachtete Baugrundsicht eindringt oder wenn er die Endeinbindung erreicht.

Da der Baugrundwiderstand bei kontinuierlichem Einbringen reduziert werden kann, können die während oder am Ende des Einrammens bestimmten Pfahldruckwiderstände niedriger sein als die in statischen Pfahlprobelastungen bestimmten. Bei bestimmten Bodenbedingungen kann der Druckwiderstand am Ende des Einrammens größer sein als der Druckwiderstand beim Nachrammen. Potenziellen Unterschieden in den gemessenen charakteristischen Pfahldruckwiderständen infolge der Zeit der Prüfung sollte entsprechende Aufmerksamkeit geschenkt werden.

5.4.3 Nachrammen

Das Nachrammen 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 Nachrammens durchgeführte dynamische Probelastung weniger vom Prozess des Pfahleinbaus beeinflusst wird, wenn eine angemessene Zeit nach dem Einrammen verstrichen ist. Der optimale Zeitpunkt für die dynamische Probelastung beim Nachrammen sollte anhand der spezifischen Baugrundbedingungen vor Ort beurteilt werden.

Ergibt das Nachrammen einen geringeren Pfahlwiderstand als den während des Rammens gemessenen, muss dieser als Beurteilungsgrundlage für den Grenzwert des Druckwiderstands verwendet werden (EN 1997-1:2004+A1:2013, Abschnitt 7). Wenn das Nachrammen zu höheren Ergebnissen führt, können diese berücksichtigt werden.

Für bestimmte Baugrundbedingungen sollte das Nachrammen durchgeführt werden. Nachrammen sollte in der Regel in schluffigen Böden durchgeführt werden, es sei denn, dass vergleichbare Erfahrungen vor Ort gezeigt haben, dass dies nicht notwendig ist.

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

5.4.4 Ortbetonpfähle

Zwischen der Einbringung eines Ortbetonprobepfahls und dem Prüfbeginn muss ausreichend Zeit liegen, um sicherzustellen, dass die erforderliche Festigkeit des Pfahlwerkstoffs erreicht ist und der Boden sich vom Prozess der Pfahleinbringung sowie der Ableitung der Porenwasserdrücke und anderen Einwirkungen, wie z. B. Abbindewärme durch Aushärten von Beton, erholen kann. 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 6 entnommen werden. Bei entsprechender Begründung können alternative Zeitspannen festgelegt werden.

Tabelle 6 — Zeiträume zwischen dem Einbau und der Prüfung von Bohrpfählen

Typ des Probepfahls	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 Rammformel

Die Prüfergebnisse müssen folgende Aufzeichnungen enthalten:

- Eindringung je Schlag oder Schläge für Einheitseindringung;
- Energie je Schlag;
- berechneter Grenzwert des Druckwiderstands als $R_{c,m}$.

6.2 Prüfergebnisse für dynamische Probelastung mit Wellengleichungsanalyse

Die Prüfergebnisse müssen folgende Aufzeichnungen enthalten:

- Schläge für Einheitsabstand von Eindringung mit Eindringen;
- Energie je Schlag mit Eindringen;
- berechneter Grenzwert des Druckwiderstands, $R_{c,m}$.