

DIN EN 1998-5



ICS 91.010.30; 91.120.25

Einsprüche bis 2022-11-02
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 1998-5:2010-12

Entwurf

**Eurocode 8 –
Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben –
Teil 5: Geotechnische Aspekte, Gründungen, Stütz- und
Untertagebauwerke;
Deutsche und Englische Fassung prEN 1998-5:2022**

Eurocode 8 –
Design of structures for earthquake resistance –
Part 5: Geotechnical aspects, foundations, retaining and underground structures;
German and English version prEN 1998-5:2022

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2022-09-02 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 von 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 oder Am DIN-Platz, 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 233 Seiten

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 1998-5:2022) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 005-51-06 AA „Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben — Teil 5: Geotechnische Aspekte, Gründungen, Stütz- und Untertagebauwerke“ im DIN-Normenausschuss DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau).

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

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 1998-5:2010-12 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Titel geändert;
- b) neuen Abschnitt 0 „Einleitung“ hinzugefügt;
- c) normative Verweisungen aktualisiert und als neuen Abschnitt 2 hinzugefügt;
- d) neuen Abschnitt 3 „Begriffe und Symbole“ hinzugefügt;
- e) weitere technische und inhaltliche Ergänzungen und Änderungen;
- f) Dokument redaktionell überarbeitet.

Titel de: Eurocode 8 — Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben — Teil 5:
Geotechnische Aspekte, Gründungen, Stütz- und Untertagebauwerke

Titel en: Eurocode 8 — Design of structures for earthquake resistance — Part 5:
Geotechnical aspects, foundations, retaining and underground structures

Titel fr:

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	6
0 Einleitung	7
1 Anwendungsbereich	10
1.1 Anwendungsbereich von prEN 1998-5	10
1.2 Voraussetzungen	10
2 Normative Verweisungen	10
3 Begriffe und Symbole	11
3.1 Begriffe	11
3.1.1 Allgemeines	11
3.2 Symbole und Abkürzungen	13
3.2.1 Allgemeines	13
3.2.2 Symbole	14
3.2.3 Abkürzungen	22
3.3 SI-Einheiten	22
4 Bemessungsgrundlage	23
4.1 Leistungsanforderungen	23
4.2 Versagensfolgeklassen	23
4.3 Grenzzustände und damit einhergehende Erdbebeneinwirkung	24
4.4 Konformitätskriterien	25
4.5 Berechnungsverfahren	26
4.6 Nachweis des Erdbebenverhaltens	26
5 Erdbebeneinwirkung	27
5.1 Definition der Erdbebeneinwirkung	27
5.2 Erdbebeneinwirkung für geotechnische Systeme und geotechnische Bauwerke	27
6 Baugrundeigenschaften	28
6.1 Baugrunderkundung	28
6.2 Wasserstände	29
6.3 Festigkeitsparameter	29
6.4 Steifigkeit und Energiedissipationseigenschaften	30
6.5 Teilsicherheitsbeiwerte und Bemessungsfälle	31
7 Bewertung des Erdbebenverhaltens der Baustelle	31
7.1 Standortwahl	31
7.1.1 Allgemeines	31
7.1.2 Potenziell seismisch aktive Verwerfungen	32
7.2 Standsicherheit von Böschungen	33
7.2.1 Allgemeines	33
7.2.2 Berechnungsverfahren	33
7.3 Potenziell verflüssigbare Böden	35
7.3.1 Allgemeines	35
7.3.2 Betrachtung der Standortbedingungen	35
7.3.3 Bewertung des zyklischen Widerstandsverhältnisses (CRR)	36
7.3.4 Bewertung des zyklischen Spannungsverhältnisses (CSR)	37
7.3.5 Beurteilung der Verflüssigung	37
7.3.6 Sanierung im Fall von Verflüssigung	38

7.4	Setzungen von Böden unter zyklischer Beanspruchung	38
7.5	Berechnungen des standortspezifischen Verhaltens.....	39
7.5.1	Allgemeines	39
7.5.2	Berechnung des Baugrundverhaltens	39
8	Boden-Bauwerk-Interaktion.....	40
8.1	Allgemeines	40
8.2	Berechnung der Trägheitswirkungen	41
8.2.1	Allgemeines	41
8.2.2	Kraftbasierter Ansatz.....	42
8.2.3	Verschiebungsbasierter Ansatz	42
8.3	Modellierung kinematischer Auswirkungen	43
8.4	Kombination von Trägheits- und kinematischen Wirkungen bei Schnittkräften.....	44
8.5	Gleichzeitige Modellierung von kinematischen und Trägheitswirkungen.....	44
9	Gründungssystem.....	45
9.1	Allgemeine Anforderungen	45
9.2	Bemessungswerte der Auswirkungen der Einwirkungen.....	45
9.3	Horizontale Verbindungen zwischen Gründungskörpern.....	47
9.4	Oberflächen Gründungen und eingebettete Flachgründungen	48
9.4.1	Allgemeines	48
9.4.2	Nachweise	48
9.4.3	Tragwerksplanung.....	51
9.5	Pfahlgründungen	52
9.5.1	Allgemeines	52
9.5.2	Allgemeine Bemessungsanforderungen	52
9.5.3	Berechnungsverfahren.....	53
9.5.4	Bemessungsnachweise.....	55
9.5.5	Bauliche Durchbildung und Mindestbewehrungsgrad für Stahlbetonpfähle	57
10	Stützbauwerke.....	58
10.1	Allgemeines	58
10.2	Allgemeine Gesichtspunkte bei der Bemessung	58
10.3	Berechnung und Nachweis der Leistung.....	58
10.3.1	Allgemeine Grundsätze	58
10.3.2	Erddrücke für aktive und passive Grenzzustände	59
10.3.3	Berechnung der hydrodynamischen Drücke	60
10.3.4	Nachweis des Erdbebenverhaltens.....	60
10.3.5	Spezifische Regeln für verformbare Stützbauwerke.....	61
10.3.6	Spezifische Regeln für Gewichtsstützwände	63
10.3.7	Spezifische Regeln für Stützwände mit Pfahlgründung	63
10.3.8	Spezifische Regeln für verankerte Stützwände.....	63
10.3.9	Spezifische Regeln für nicht verformbare Stützsysteme	64
10.3.10	Spezifische Regeln für Brückenwiderlager.....	64
11	Tiefbauwerke.....	64
11.1	Allgemeines	64
11.2	Erdbebeneinwirkungen	65
11.2.1	Allgemeines	65
11.2.2	Parameter für Baugrundbewegungen	65
11.2.3	Parameter für Baugrundbewegungen	66
11.3	Berechnungsverfahren.....	66
11.3.1	Erdbebeneinwirkung bei Tiefbauwerken	66
11.3.2	Vorübergehende Erdbebeneinwirkung	66
11.3.3	Bleibende Baugrundverformung.....	68
11.4	Erdbebenbelastung bei großräumigen Tiefbauwerken	69
11.4.1	Baugrunderschütterung	69

11.4.2	Bleibende Baugrundverschiebungen.....	70	
11.5	Durchlässe.....	70	
Anhang A (informativ) Abminderung der Erdbebeneinwirkung als Auswirkung der Wandhöhe und der vorherrschenden Wellenlänge			71
A.1	Anwendung dieses Anhangs	71	
A.2	Anwendungsbereich und Geltungsbereich	71	
A.3	Vereinfachte Bewertung	71	
A.4	Anwendung von Berechnungen des standortspezifischen Baugrundverhaltens	72	
Anhang B (informativ) Verfahren für Berechnungen der Verflüssigung.....			74
B.1	Anwendung dieses informativen Anhangs.....	74	
B.2	Anwendungsbereich und Geltungsbereich	74	
B.3	Allgemeines	74	
B.4	Beurteilung der Anfälligkeit für Verflüssigung	74	
B.5	In-situ-Bewertung des CRR	75	
B.5.1	Allgemeines	75	
B.5.2	SPT-basiertes Verfahren	75	
B.5.3	CPT-basiertes Verfahren.....	77	
B.6	Bewertung des Spannungsabminderungsfaktors	78	
B.7	Vereinfachter Verflüssigungsindex	78	
Anhang C (informativ) Berechnung von Setzungen von grobkörnigen Böden			79
C.1	Anwendung dieses Anhangs	79	
C.2	Anwendungsbereich und Geltungsbereich	79	
C.3	Setzung im Freifeld	79	
C.4	Volumetrische Dehnung in gesättigten Sanden.....	79	
C.4.1	Verfahren auf Grundlage des Sicherheitsbeiwerts (FS) gegen Verflüssigung.....	79	
C.4.2	Verfahren auf Grundlage von SPT-Daten.....	80	
C.4.3	Verfahren auf Grundlage von CPT	81	
C.5	Volumetrische Dehnung in trockenem Sand.....	82	
C.6	Setzung unter einem Hochbau.....	83	
C.7	Horizontaler Versatz infolge Verflüssigung.....	85	
Anhang D (informativ) Impedanzfunktionen für Oberflächengründungen und tiefe Gründungen			87
D.1	Anwendung dieses Anhangs	87	
D.2	Anwendungsbereich und Geltungsbereich	87	
D.3	Impedanz einer rechteckigen Gründung auf einem homogenen Halbraum	87	
D.3.1	Steifigkeitsbeiwert.....	87	
D.3.2	Dämpferbeiwert.....	88	
D.4	Statische Impedanz von eingebetteten Einzelfundamenten in einem homogenen Halbraum.....	91	
D.5	Seitliche statische Impedanz eines Einzelpfahls in einer homogenen Schicht.....	92	
D.6	Seitliche statische Impedanz eines Einzelpfahls in einer linear nicht homogenen Schicht.....	93	
D.7	Seitliche Impedanz einer Pfahlgruppe	93	
Anhang E (informativ) Seismische Grundbruchsicherheit von Flachgründungen			95
E.1	Anwendung dieses Anhangs	95	
E.2	Anwendungsbereich und Geltungsbereich	95	
E.3	Oberflächen-Streifenfundament.....	95	
E.4	Kreisförmige Oberflächengründung auf feinkörnigen Böden	97	
E.5	Eingebettete rechteckige Flachgründungen in feinkörnigen Böden	97	
E.6	Eingebettete rechteckige Flachgründungen in grobkörnigen Böden	98	
E.7	Anwendung eines globalen Sicherheitsbeiwerts auf den Widerstand	98	
Anhang F (informativ) Bewertung der Erddrücke auf Stützbauwerken.....			100
F.1	Anwendung dieses Anhangs	100	
F.2	Anwendungsbereich und Geltungsbereich	100	

F.3	Koeffizienten des aktiven und passiven Erddrucks	100
F.4	Erddruck auf nicht verformbare Stützbauwerke	101
Anhang G (informativ) Vereinfachte Bewertung von Spitzenwerten der Baugrundparameter für die Erdbenenbemessung von Tiefbauwerken.....		
G.1	Anwendung dieses Anhangs.....	103
G.2	Anwendungsbereich und Geltungsbereich	103
G.3	Erdbebeneinwirkung.....	103
G.4	Auswirkungen der Erdbebeneinwirkung auf Tiefbauwerke	104
G.5	Veränderlichkeit der Baugrundbewegung	105
Anhang H (informativ) Vereinfachte rechnerische Angaben für die Erdbenenbemessung von Tunneln		
H.1	Anwendung dieses Anhangs.....	106
H.2	Anwendungsbereich und Geltungsbereich	106
H.3	Kreisförmige Tunnel — Verhalten in Querrichtung.....	106
H.4	Rechteckige Tunnel — Verhalten in Querrichtung.....	109
H.5	Verhalten in Längsrichtung	111
Anhang I (informativ) Impedanzfunktionen für Tiefbauwerke.....		
I.1	Anwendung dieses Anhangs.....	115
I.2	Anwendungsbereich und Geltungsbereich	115
I.3	Verhalten in Querrichtung.....	115
I.4	Verhalten in Längsrichtung	116
Literaturhinweise.....		118

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 1998-5:2022) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI gehalten wird. CEN/TC 250 ist für alle Eurocodes des konstruktiven Ingenieurbaus zuständig. Die Verantwortung für alle Angelegenheiten der Tragwerks- und geotechnischen Planung wurde dem CEN/TC 250 von CEN übertragen.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument ersetzt EN 1998-5:2004.

Die erste Generation der EN Eurocodes wurde zwischen den Jahren 2002 und 2007 veröffentlicht. Dieses Dokument wurde als Teil der zweiten Generation der Eurocodes im Rahmen des Mandats M/515 erarbeitet, das die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelsassoziation CEN erteilt haben.

Die Eurocodes wurden erarbeitet, um in Verbindung mit einschlägigen Ausführungs-, Werkstoff-, Produkt- und Prüfnormen angewendet zu werden und um Anforderungen an Ausführung, Werkstoffe, Produkte und Prüfung zu identifizieren, auf denen die Eurocodes beruhen.

Die Eurocodes erkennen die Verantwortlichkeit aller Mitgliedstaaten an und wahren deren Recht, sicherheitsbezogene Werte auf nationaler Ebene in Nationalen Anhängen festzulegen.

0 Einleitung

0.1 Einleitung zu den Eurocodes

Die Eurocodes des konstruktiven Ingenieurbaus umfassen die folgenden Normen, die in der Regel aus mehreren Teilen bestehen:

- EN 1990, Eurocode: *Grundlagen der Tragwerksplanung*
- EN 1991, Eurocode 1: *Einwirkungen auf Tragwerke*
- EN 1992, Eurocode 2: *Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken*
- EN 1993, Eurocode 3: *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten*
- EN 1994, Eurocode 4: *Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton*
- EN 1995, Eurocode 5: *Bemessung und Konstruktion von Holzbauten*
- EN 1996, Eurocode 6: *Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten*
- EN 1997, Eurocode 7: *Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik*
- EN 1998, Eurocode 8: *Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben*
- EN 1999, Eurocode 9: *Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken*
- Neue Teile sind derzeit in Erarbeitung, z. B. der Eurocode für die Bemessung von tragenden Konstruktionen aus Glas

Die Eurocodes sind für die Anwendung durch Tragwerksplaner, Bauherren, Hersteller, Ausführende, zuständige Behörden (bei der Wahrnehmung ihrer Aufgaben in Übereinstimmung mit nationalen oder internationalen Vorschriften), Lehrkräfte, Softwareentwickler und Normenausschüsse, in denen verwandte Produktnormen, Prüfnormen und Ausführungsnormen erarbeitet werden, gedacht.

ANMERKUNG Einige Entwurfs- und Bemessungsaspekte werden am zutreffendsten von den zuständigen Behörden festgelegt oder können, sofern keine Festlegungen getroffen wurden, für ein bestimmtes Bauvorhaben zwischen den beteiligten Parteien wie Tragwerksplanern und Bauherren vereinbart werden. In den Eurocodes werden solche Aspekte durch ausdrückliche Bezugnahme auf die zuständigen Behörden und die beteiligten Parteien gekennzeichnet.

0.2 Einleitung zu EN 1998, Eurocode 8

EN 1998 legt die Regeln für die Erdbebenbemessung von Neubauten und Ingenieurbauten sowie für die Beurteilung und Verbesserung von bestehenden Bauten, einschließlich geotechnischer Aspekte, sowie vorübergehenden Bauwerken fest.

Bei der Bemessung von Bauwerken in Erdbebengebieten sollten die Vorschriften nach EN 1998 zusätzlich zu den maßgebenden Vorschriften nach EN 1990 bis EN 1997 und EN 1999 angewendet werden.

Der perfekte Schutz vor Erdbeben (ein Erdbebenrisiko von null) ist in der Praxis nicht möglich, insbesondere weil das Wissen über die Gefährdung an sich durch eine erhebliche Unsicherheit gekennzeichnet ist. Daher wird die Erdbebeneinwirkung im Eurocode 8 in einer konventionellen Form dargestellt, die proportional zur Amplitude von Erdbeben ist, deren Auftreten an einem bestimmten Standort wahrscheinlich ist und die repräsentativ für ihren Frequenzgehalt ist. Diese Darstellung ist nicht die Voraussage einer bestimmten seismischen Bewegung, und eine derartige Bewegung könnte schwerwiegendere Auswirkungen als die der

betrachteten Erdbebeneinwirkung nach sich ziehen und größeren Schaden verursachen, als der für die Grenzzustände nach dieser Norm beschriebene.

Nicht nur die Erdbebeneinwirkung kann nicht vorhergesagt werden, sondern es sollte auch anerkannt werden, dass technische Verfahren keine perfekte Vorhersage treffen, wenn es um die spezifischen Auswirkungen geht, bei denen davon ausgegangen wird, dass die Bauwerke im nicht-linearen Bereich reagieren. Derartige Unsicherheiten werden in Übereinstimmung mit dem allgemeinen Rahmen nach EN 1990 mit einem Restrisiko der Unterschätzung ihrer Auswirkungen berücksichtigt.

0.3 Einleitung zu prEN 1998-5

Dieses Dokument enthält allgemeine Anforderungen an die erdbebensichere Bemessung von geotechnischen Bauwerken und geotechnischen Systemen, einschließlich der Festlegung der Erdbebeneinwirkung, der Baugrundmerkmale, der allgemeinen Anforderungen an die Standortwahl und den Baugrund, der Bemessung der Gründungssysteme, der Stützbauwerke und Tiefbauwerke sowie der Berücksichtigung der Boden-Bauwerk-Interaktion.

Dieses Dokument enthält auch Vorschriften für die Beurteilung von bestehenden geotechnischen Bauwerken und geotechnischen Systemen.

0.4 In den Eurocodes verwendete Verbformen

Das Verb „muss“ beschreibt eine Anforderung, die zwingend zu befolgen ist und von der bei Anwendung der Eurocodes keine Abweichung zulässig ist.

Das Verb „sollte“ beschreibt eine streng empfohlene Auswahl oder Vorgehensweise. In Abhängigkeit von nationalen Regeln und/oder relevanten Vertragsbestimmungen können alternative Lösungen verwendet/angenommen werden, wenn sie technisch gerechtfertigt sind.

Das Verb „darf“ beschreibt eine erlaubte Vorgehensweise innerhalb der Anwendungsgrenzen der Eurocodes.

Das Verb „kann“ beschreibt Möglichkeiten und Fähigkeiten; es wird für Tatsachenfeststellungen und Erklärungen verwendet.

0.5 Nationaler Anhang zu prEN 1998-5

Nationale Festlegungen sind in diesem Dokument gestattet, wenn im Rahmen von Anmerkungen eine Wahl ausdrücklich gestattet ist. Nationale Festlegungen enthalten die Auswahl von Werten für national festzulegende Parameter (NDP, en: nationally determined parameters).

Die nationale Ausgabe von EN 1998-5 kann einen Nationalen Anhang mit allen nationalen Festlegungen enthalten, die für den Entwurf und die Bemessung von Hoch-, Ingenieurbauten und geotechnischen Bauten im jeweiligen Land Verwendung finden.

Wird keine nationale Festlegung angeführt, ist die in diesem Dokument angegebene Standardfestlegung anzuwenden.

Wenn keine nationale Festlegung angeführt wird und kein Standardwert in diesem Dokument angegeben ist, kann die Festlegung durch eine zuständige Behörde getroffen werden, oder sofern keine Festlegungen getroffen wurden, können die beteiligten Parteien im Einzelfall eine Vereinbarung treffen.

Nationale Festlegungen sind in prEN 1998-5 im Rahmen von Anmerkungen zu den folgenden Abschnitten gestattet:

4.2(3)	4.2(6)	4.3(3) ANMERKUNG 1	4.3(3) ANMERKUNG 2
6.5(2)	6.5(3)	7.3.1(2)	9.4.2.1.3(7) ANMERKUNG 1

Nationale Festlegungen sind in prEN 1998-5 bei der Anwendung folgender informativer Anhänge zugelassen:

Anhang A	Anhang B	Anhang C	Anhang D
Anhang E	Anhang F	Anhang G	Anhang H
Anhang I			

Der Nationale Anhang kann, direkt oder durch Verweisungen, nicht widersprüchliche ergänzende Informationen zur Erleichterung der Umsetzung enthalten, sofern dadurch keine Bestimmungen der Eurocodes geändert werden.

1 Anwendungsbereich

1.1 Anwendungsbereich von prEN 1998-5

(1) Dieses Dokument legt die allgemeinen Grundsätze für die Auslegung und Beurteilung von geotechnischen Systemen in Erdbebengebieten fest. Sie enthält allgemeine Regeln, die für alle Arten von geotechnischen Bauwerken, für die Auslegung von Gründungen, Stütz- und Untertagebauwerke relevant sind, und sollte in Ergänzung zu EN 1997-3 für die Bemessungssituation mit Erdbeben verwendet werden.

(2) Dieses Dokument enthält die grundlegenden Leistungsanforderungen und Konformitätskriterien, die für geotechnische Bauwerke und geotechnische Systeme in Erdbebengebieten gelten.

(3) Dieses Dokument bezieht sich auf die Regeln für die Darstellung von Erdbebeneinwirkungen und die Beschreibung der in EN 1998-1-1 definierten Bemessungssituationen mit Erdbeben und enthält eine spezifische Definition der für geotechnische Bauwerke geltenden Erdbebeneinwirkung.

1.2 Voraussetzungen

(1) Es wird davon ausgegangen, dass die allgemeinen Voraussetzungen nach prEN 1990:2021, 1.2, gelten.

(2) Die Vorschriften dieser Norm gehen davon aus, dass die Projektbeteiligten, die für die Berechnungen, für die Beurteilung und mögliche Bemessung der Modernisierung bestehender geotechnischer Bauwerke verantwortlich sind, über geeignete Erfahrung mit der Art der zu verstärkenden oder instandzusetzenden Bauwerke verfügen.

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).

ANMERKUNG In den Literaturhinweisen sind zitierte Dokumente aufgelistet, die keine normativen Verweisungen sind, einschließlich solcher Dokumente, die als Empfehlungen (d. h. „sollte“-Sätze), Erlaubnisse („darf“-Sätze), Möglichkeiten („kann“-Sätze) und in Anmerkungen in Bezug genommenen werden.

prEN 1990:2021, *Eurocode — Grundlagen der Tragwerksplanung*

prEN 1997-1:2022, *Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik — Teil 1: Allgemeine Regeln*

prEN 1997-2:2022, *Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik — Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds*

prEN 1997-3:2022, *Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik — Teil 3: Geotechnische Bauwerke*

prEN 1998-1-1:2022, *Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben — Teil 1-1: Grundlagen und Erdbebeneinwirkung*

prEN 1998-3, *Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben — Teil 3: Beurteilung und Ertüchtigung von Gebäuden*

ISO 80000, *Quantities and units*

3 Begriffe und Symbole

3.1 Begriffe

3.1.1 Allgemeines

(1) Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach EN 1990 und prEN 1998-1-1:2022, 3.1.

(2) Die Begriffe nach EN 1997-1, EN 1997-2 und EN 1997-3 gelten, während die Definitionen anderer geotechnischer Begriffe mit besonderem Bezug zu Erdbeben in dieser Norm angegeben werden.

(3) In diesem Dokument werden zusätzliche Begriffe nach 3.1.2 bis 3.1.29 mit den entsprechenden Definitionen verwendet.

3.1.2

scheinbare Wellengeschwindigkeit

horizontale Oberflächengeschwindigkeit des Wellenfelds bei einem Einfallswinkel im Baugrund.

Anmerkung 1 zum Begriff: Sie kann näher an der Geschwindigkeit von Erdbebenwellen durch tiefes Gestein liegen

3.1.3

Tonfraktion

prozentualer Massenanteil der Trockenmasse des Bodens mit Korngrößen kleiner als 2 µm

3.1.4

grobkörniger Boden

Boden, in dem Korngrößen zwischen 0,063 mm und 63 mm überwiegen

3.1.5

kritische Schicht

Bodenschicht in einem Bodenprofil, die aufgrund ihrer Tiefe, relativen Dichte und Dicke als diejenige identifiziert wurde, die sich am wahrscheinlichsten verflüssigt und den größten Schaden verursacht

3.1.6

kritischer Bereich

<von Pfählen> Abschnitt in einem Pfahl, in dem die Auswirkung der Einwirkung die Elastizitätsgrenze erreicht, angegeben in Form von Spannungen oder Verformungen

3.1.7

kritischer Erdbebenbeiwert

Mindestwert des Erdbebenbeiwerts, der zu pseudo-statischem Versagen führt

3.1.8

zyklische undrännierte Scherfestigkeit

Scherfestigkeit eines Baugrundmaterials unter zyklischer undrännierter Belastung, die durch das betrachtete Erdbeben hervorgerufen wird; wird auch als der zyklische Widerstand eines Materials bezeichnet

3.1.9

zyklisches Spannungsverhältnis

CSR

zyklische Scherspannung, die durch die vertikale effektive Ausgangsspannung für eine gegebene Tiefe normalisiert wurde. Wird auch als die auf den Boden wirkende zyklische Belastung beschrieben

3.1.10

zyklisches Widerstandsverhältnis CRR

zyklische undrännierte Scherfestigkeit, die durch die vertikale effektive Ausgangsspannung für eine gegebene Tiefe normalisiert wurde, auch beschrieben als Widerstand eines Bodens gegen die Auslösung von Verflüssigung

3.1.11

verformbares Stützbauwerk

Stützbauwerk, das bleibenden seismischen Verschiebungen ausgesetzt sein kann

3.1.12

feinkörniger Boden

Boden, in dem Korngrößen kleiner als 0,063 mm überwiegen

3.1.13

Feinanteilgehalt

prozentualer Massenanteil der Trockenmasse von Material, das kleiner als 63 µm ist

3.1.14

Gründungsbauteil

Bauteil eines Gründungssystems

BEISPIEL Einzelfundamente, Gründungsträger, -platten, Pfahlköpfe, Zerrbalken

3.1.15

geotechnisches Bauwerk

Tragwerk, das den Baugrund umfasst, oder tragendes Bauteil, dessen Tragfähigkeit auf dem Baugrund beruht

3.1.16

geotechnisches System

komplexes System, bei dem ein geotechnisches Bauwerk mit anderen Tragwerken oder geotechnischen Bauwerken interagiert

BEISPIEL Stützwände mit einem gelagerten Tragwerk auf der Krone, Böschungen mit einem Bauwerk auf der Krone oder am Fuß

3.1.17

Trägheitswirkung

Auswirkung der Einwirkung, die in der Bemessungssituation mit Erdbeben durch Trägheitskräfte hervorgerufen werden

3.1.18

kinematische Auswirkung

Auswirkung der Einwirkung, die in der Bemessungssituation mit Erdbeben durch seismische Baugrundverschiebung hervorgerufen werden

3.1.19

Anfälligkeit für Verflüssigung

Potenzial einer Bodenschicht zur Auslösung einer Verflüssigung in der Bemessungssituation mit Erdbeben

3.1.20

Materialdämpfung

Energie, die durch das Material bei zyklischer Belastung abgeleitet wird

3.1.21

nicht verformbares Stützbauwerk

Stützbauwerk, dass keinen bleibenden seismischen Verschiebungen ausgesetzt sein kann

3.1.22

p-y-Kurve

Verhältnis zwischen der Resultierenden der Kontaktnormalspannungen je Längeneinheit den Pfahls und der entsprechenden horizontalen Verschiebung

3.1.23

bleibende seismische Verschiebung

erdbebeninduzierte Verschiebung, die nach dem Erdbeben bleibt

3.1.24

Pfahlgruppenwirkung

Änderung des Pfahlgruppenverhaltens infolge der Pfahl-Boden-Pfahl-Interaktion

3.1.25

unsichere Böschung

Böschung mit geringem Sicherheitsspielraum in einer statischen Situation, wie nach EN 1997-3 berechnet oder Böschungen, die mit einer geotechnischen Komplexität GCC3 nach prEN 1997-1:2022, 4.1.2.3, klassifiziert sind

3.1.26

Strahlungsdämpfung

Energie, die durch Wellen, die sich von der Gründung fortbewegen, in den Boden abgeleitet wird

3.1.27

Restfestigkeit

Scherfestigkeit eines verflüssigten Materials oder Untergrenze der Scherfestigkeit eines feinkörnigen Bodens, die nach umfangreichem Scheren und der Neuausrichtung von Partikeln nach prEN 1997-2:2022, 3.1.5.6, erreicht wird

3.1.28

t-z-Kurve

Verhältnis zwischen der Resultierenden der Kontaktscherspannungen je Längeneinheit den Pfahls und der entsprechenden vertikalen Verschiebung

3.1.29

nachgiebiger (nicht nachgiebige) Pfahl

Pfahl, der einer nichtelastischen Verformung in der Bemessungssituation mit Erdbeben unterzogen wird (nicht unterzogen wird)

3.2 Symbole und Abkürzungen

3.2.1 Allgemeines

(1) Die in prEN 1990:2021, 3.2, aufgeführten Symbole und Abkürzungen sollten verwendet werden.

(2) Die in prEN 1998-1-1:2022, 3.2, aufgeführten Symbole und Abkürzungen sollten verwendet werden.

(3) Für die werkstoffbezogenen Zeichen sowie für Zeichen, die sich nicht spezifisch auf die Bemessungssituation mit Erdbeben beziehen, sollten die Festlegungen der einschlägigen Eurocodes gelten.

(4) Weitere Symbole und Abkürzungen, die in Verbindung mit der Erdbebensituation verwendet werden, werden bei ihrem Auftreten zur leichteren Anwendung in der vorliegenden Norm definiert. Die in EN 1998-5

am häufigsten vorkommenden Zeichen sind jedoch in 3.2.2 aufgeführt und definiert und zusätzliche Abkürzungen sind in 3.2.3 angegeben.

3.2.2 Symbole

3.2.2.1 In EN 1998-5 verwendete Symbole

3.2.2.1.1 Lateinische Großbuchstaben

A_b	Sohlfläche des Einzelfundaments in Kontakt zum Baugrund
A_T	Querschnittsfläche des Tunnels
A_{Sw}	Amplitude der Scherwelle
B	Gründungsbreite
B_b	Gebäudebreite
CAV_{dp}	gefilterte kumulierte absolute Geschwindigkeit
C_E	Korrekturfaktor der Hammerschlagenergie in SPT
C_N	Korrekturfaktor der Überlagerungsspannung für die Normalisierung auf atmosphärischen Luftdruck
C_R	Verhältnis des Biegeverhaltens bei Tunneln
C_{xx}	Strahlungsdämpfer in der horizontalen X-Richtung
C_{yy}	Strahlungsdämpfer in der horizontalen Y-Richtung
C_{zz}	Strahlungsdämpfer in der vertikalen Z-Richtung
C_{rx}	Strahlungsdämpfer um die horizontale X-Richtung
C_{ry}	Strahlungsdämpfer um die horizontale Y-Richtung
C_{rz}	Strahlungsdämpfer um die vertikale Z-Richtung
CRR	zyklisches Widerstandsverhältnis in der Beurteilung der Verflüssigung
CSR	zyklisches Spannungsverhältnis in der Beurteilung der Verflüssigung
C_α	Dämpferbeiwert für den Freiheitsgrad α entsprechend der Strahlungsdämpfung
$C_{\alpha t}$	Dämpferbeiwert für den Freiheitsgrad α entsprechend der Gründungsdämpfung (Material + Strahlung)
D_e	Tiefe von der Bodenoberfläche bis zur Sohlfläche der Gründung
D_H	horizontale Verschiebung infolge horizontalen Versatzes
D_R	relative Dichte von Sand in Prozent
D_S	Setzmaß unter dem Gebäude

E_{di}	Bemessungswert der Auswirkung der Einwirkung des Bereichs oder Bauteils i für die Bemessungssituation mit Erdbeben
E_{Fd}	Bemessungswert der Auswirkung der Einwirkung für die Erdbebensituation
$E_{Fd,G}$	Bemessungswert der Auswirkung der Einwirkung für nichtseismische Lastfälle
$E_{Fd,E}$	Auswirkung der Einwirkung der anhand der seismische Berechnung berechneten Bemessungssituation mit Erdbeben
E_L	Elastizitätsmodul der Tunnelauskleidung
E_P	Elastizitätsmodul des Pfahls
ER	Energieverhältnis, in Prozent, spezifisch für die Prüfeinrichtung beim SPT
$E_{RI,R}$	Biegesteifigkeit je Längeneinheit der Stützwand
E_S	Elastizitätsmodul des Bodens, der mit einer räumlich und zeitlich repräsentativen Scherdehnung verträglich ist
E_{str}	Elastizitätsmodul eines Kastentragwerks
F	normalisiertes Reibungsverhältnis in CPT
$\bar{F}$	dimensionslose Trägheitskraft des Bodens
F_A	Verhältnis von S_α zur Beschleunigung für die Nullperiode
F_R	Verhältnis des Biegeverhaltens bei Tunneln
F_{Rd}	Bemessungswert des Gleitwiderstands eines Einzelfundaments
FS	Sicherheitsbeiwert gegen Verflüssigung
G	Sekantenschermodul, der mit einer räumlich und zeitlich repräsentativen Scherdehnung verträglich ist
G_0	Schermodul bei sehr geringer Dehnung
H	Gesamthöhe einer Böschung oder Höhe des Stützbauwerks in Kontakt mit dem Baugrund
H_{cov}	Dicke der Bodenüberdeckung zwischen der Felsformation und der Höhe der Gründung
H_{heav}	Heaviside-Funktion
H_L	Dicke der verflüssigbaren Schicht
H_R	Gesamthöhe des Stützsystems
H_{st}	Gesamthöhe des Tiefbauwerks von der Decke bis zur Höhe der Sohlplatte
H_w	Gesamthöhe des in Kontakt mit dem Stützbauwerk stehenden Wassers
I_c	Index für die Art des Bodenverhaltens für CPT

I_e	wirksames Trägheitsmoment je Längeneinheit der Auskleidung eines kreisförmigen Segmenttunnels
I_j	Trägheitsmoment je Längeneinheit der Verbindungsstelle der Segmentauskleidung eines kreisförmigen Tunnels
I_l	Trägheitsmoment je Längeneinheit der Sohlplatte des Tragwerks
I_L	Trägheitsmoment je Längeneinheit der Tunnelauskleidung
I_P	Plastizitätsindex des Bodens
I_R	Trägheitsmoment je Längeneinheit der Dachplatte des Tragwerks
J_{bx}, J_{by}, J_{bz}	Trägheitsmomente (um die x-Achse bzw. y-Achse bzw. z-Achse) der Sohlfläche des Einzelfundaments mit Kontakt zum Baugrund
I_W	Trägheitsmoment je Längeneinheit der Seitenwände des Tragwerks
K_a	Federsteifigkeit des Bodens in horizontaler Längsrichtung
K_{AE}	aktiver Erddruckbeiwert in der Bemessungssituation mit Erdbeben
K_h	Federsteifigkeit des Bodens in horizontaler Querrichtung
$K_{ii,D}$	Gründungsimpedanz bei eingebetteter Gründung
K_{ii}	Gründungsimpedanz bei Oberflächengründung
K_{xx}	Nullfrequenzwert der Impedanz in horizontaler X-Richtung
K_{yy}	Nullfrequenzwert der Impedanz in horizontaler Y-Richtung
K_{zz}	Nullfrequenzwert der Impedanz in vertikaler Z-Richtung
K_{rx}	Nullfrequenzwert der Kipp-Impedanz um die horizontale X-Richtung
K_{ry}	Nullfrequenzwert der Kipp-Impedanz um die horizontale Y-Richtung
K_{rz}	Nullfrequenzwert der Verwindungsimpedanz um die vertikale Z-Richtung
K_{PE}	passiver Erddruckbeiwert in der Bemessungssituation mit Erdbeben
K_α	Federbeiwert für den Freiheitsgrad α
K_σ	Überlagerungsspannungsfaktor
L	größtes Maß der Gründung in der Ebene
L_e	Abstand von Anker zu Wand unter Erdbebenbedingungen
L_P	Pfahllänge
L_V	Abstand vom Mittelpunkt des plastischen Gelenks an der Pfahlkopfoberseite zum Momentennullpunkt des Pfahls

L_s	Abstand von Anker zu Wand unter statischen Bedingungen
LSN	Schweregrad der Verflüssigung
M_{Ed}	Bemessungswert des Moments
M_{ff}	Biegemoment in der Auskleidung bei nicht vorhandener SSI
MSF	Skalierungsfaktor der Erdbebenmagnitude
M_{ssi}	Biegemoment in der Auskleidung bei vorhandener SSI
M_w	Größenordnung des Moments
M_{wT}	Schwellenwert der Größenordnung des Moments für die Verflüssigungsbeurteilung
N	SPT-Schlagzahl
$\bar{N}, \bar{V}, \bar{M}$	dimensionslose vertikale Kraft, Scherkraft und Kippmoment, die auf die Gründung einwirken
$(N_1)_{60}$	normalisierte SPT-Schlagzahl für die Überlagerung und das Energieverhältnis
$(N_1)_{60,cs}$	normalisierte SPT-Schlagzahl für die Überlagerung, das Energieverhältnis und den Feinanteilgehalt
N_c	Tragfähigkeitsbeiwert
N_{Ed}	Mittelwert der Bemessungswerte der Normalkräfte der verbundenen vertikalen Bauteile in der Bemessungssituation mit Erdbeben
N_{ff}	Normalkraft in der Auskleidung bei nicht vorhandener SSI
N_{max}	Grenztragfähigkeit der Gründung unter einer mittig wirkenden Last
$N_{pl,Rd}$	Bemessungswert der plastischen Zugbeanspruchbarkeit bei Erreichen der Streckgrenze, ermittelt am Bruttoquerschnitt eines Bauteils entsprechend EN 1993-1-1
N_{SSI}	Normalkraft in der Auskleidung bei vorhandener SSI
PGA_e	Bemessungswert der horizontalen Spitzenbeschleunigung des Baugrunds nach prEN 1998-1-1:2022, 5.2.2.4, (entspricht a_H)
PGA	horizontale Spitzenbeschleunigung des Baugrunds in der Tiefe
PGV	horizontale Spitzengeschwindigkeit des Baugrunds in der Tiefe
PGD	Spitzenwert der horizontalen Baugrundverschiebung in der Tiefe
Q	normalisierter Punktwiderstand in CPT
Q_L	Sohldruck der Gründung
R	horizontaler Abstand des Standorts zur seismischen Quelle
R_c	Unrundheitsverhältnis

R_{di}	Bemessungswert des Widerstands des Bereichs oder des Bauteils i
R_d	Bemessungswert des Widerstands
R_r	Verhältnis der Scheibenbeanspruchung
S_1	spektrale Ordinate bei 1 s des horizontalen elastischen Beschleunigungs-Antwortspektrums (5 % Dämpfung)
S_{ff}	Setzung im Freifeld
S_{Ru}	erforderliche Kraft zum Hervorrufen einer einheitenbezogenen Schubfeldverformung (en: unit racking deflection) des Tiefbauwerks
T_0	Grundschwingungsperiode der Bodenschicht
T_m	mittlere Schwingungsperiode der Erdbebeneinwirkung
T_B, T_C	Schwingungsperioden der unteren und oberen Ecken des Bereichs konstanter Spektralbeschleunigung
U	Resultierende des auf die Gründung wirkenden Porenwasserdrucks
V_{app}	scheinbare Scherwellengeschwindigkeit
V_{Ed}	Bemessungswert der horizontalen Scherkraft, die auf die Unterseite der Gründung einwirkt
V_{ff}	Scherkraft in der Auskleidung bei nicht vorhandener SSI
$V_{pl,Rd}$	Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit eines Bauteils nach EN 1993-1-1
$V_{Rd,1}$	Bemessungswert der Scherkraft, die auf die Unterseite einer horizontalen Gründung einwirkt
$V_{Rd,2}$	Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit zwischen den vertikalen Seiten einer Ortbetongründung und dem Baugrund
$V_{Rd,3}$	Bemessungswert der horizontalen Komponente des passiven Erddrucks auf die Seiten einer Gründung
V_{SSI}	Scherkraft in der Auskleidung bei vorhandener SSI
W	Wichtungsfaktor
W_t	Breite des Querschnitts des Tiefbauwerks

3.2.2.1.2 Lateinische Kleinbuchstaben

$a(t)$	Beschleunigungszeitverlauf
a_1	Freiflächenverhältnis (in %), d. h. das Verhältnis zwischen der Höhe der Freifläche und dem Abstand von der Freifläche zum Betrachtungspunkt
a_2	kumulierte Dicke von verflüssigbaren Schichten
a_3	mittlerer Feinanteilgehalt in verflüssigbaren Schichten

a_4	mittlere Korngröße von körnigem Material in verflüssigbaren Schichten
a_5	Böschung (in %)
$\bar{a}_{eq}$	Mittelwert der äquivalenten Beschleunigung unter Berücksichtigung der Veränderlichkeit über die Tiefe und den Zeitverlauf
a_H	konventionelle horizontale Baugrundbeschleunigung
c'	Kohäsion des dränierten Bodens (effektive Kohäsion)
c_s	scheinbare Geschwindigkeit von Scherwellen
c_p	scheinbare Geschwindigkeit von Dilatationswellen
c_R	scheinbare Geschwindigkeit von Rayleigh-Wellen
$c'_{rx}, c'_{ry}, c'_{rz}$	frequenzabhängige Beiwerte für Strahlungsdämpfer bei Kippbewegung
c_u	undränierte Scherfestigkeit des Bodens
d	Pfahldurchmesser
d_b	Durchmesser der Längsbewehrung des Pfahls
d_e	Dicke der Gründung
d_t	Tunneldurchmesser
f	Beiwert des Biegeverhaltens einer Wand
f_s	gemessener Mantelwiderstand in CPT
f_y	Streckgrenze der Längsbewehrung in einem Pfahl
g	Fallbeschleunigung
l_p	Länge des kritischen Querschnitts für die bauliche Durchbildung von nachgiebigen Pfählen
m	Spannungsexponent für die Überlagerungskorrektur in SPT und CPT
m_a	hydrodynamische Masse des Wassers
n	Spannungsexponent für die Überlagerungskorrektur in CPT
n_s	Anzahl der Segmente in einem segmentierten Tunnel
p_a	atmosphärischer Luftdruck (= 100 kN/m ²)
p_w	hydrodynamischer Wasserdruck, der auf ein Stützbauwerk einwirkt
q_c	gemessener Spitzenwiderstand (en: cone tip resistance) nach EN ISO 22476-1; für Sand kann q_c gleich q_t angesetzt werden, dem bezüglich des Wasserdrucks korrigierten Spitzenwiderstand nach EN ISO 22476-1
q_{c1N}	Spitzenwiderstand in CPT, normalisiert und korrigiert in Bezug auf die Überlagerung

$q_{c1N,cs}$	Spitzenwiderstand in CPT, normalisiert und korrigiert in Bezug auf die Überlagerung und den Feinanteilgehalt
q_u	einaxiale Druckfestigkeit (ohne seitliche Verformungsbehinderung)
r_d	Abminderungsfaktor für die Amplitude der maximalen zyklischen Scherspannung mit der Tiefe
r_{dt}	tiefenabhängige Spannungsabminderungsfunktion für Tiefbauwerke
r_L	Radius der Tunnelauskleidung
t_L	Dicke der Tunnelauskleidung
u	Porenwasserdruck
$\dot{u}_s$	Spitzenwert der Partikelgeschwindigkeit in Zusammenhang mit Scherwellen
$\dot{u}_p$	Spitzenwert der Partikelgeschwindigkeit in Zusammenhang mit Dilatationswellen
$\dot{u}_{Rp}$	Spitzenwert der Partikelgeschwindigkeit in Zusammenhang mit der Dilatationskomponente von Rayleigh-Wellen
$\dot{u}_{Rs}$	Spitzenwert der Partikelgeschwindigkeit in Zusammenhang mit der Scherkomponente von Rayleigh-Wellen
v_s	Scherwellengeschwindigkeit
v_{sc}	Scherwellengeschwindigkeit, die mit der mittleren Dehnungsamplitude verträglich ist
z	Tiefe unter der Geländeoberfläche
z_w	Tiefe unter dem Grundwasserspiegel

3.2.2.1.3 Griechische Großbuchstaben

Δ	einheitenbezogene Durchbiegung des Tiefbauwerks
Λ_s	Wellenlänge
Ω_d	Wert von (R_{di}/E_{di}) des dissipativen Bereiches des Bauteils i des Tragwerks mit dem größten Einfluss auf die betrachtete Beanspruchungsgröße E_F
ϑ_{ii}	Korrekturbeiwerte für die Impedanzen von Oberflächengründungen

3.2.2.1.4 Griechische Kleinbuchstaben

α_C	kritischer Erdbebenbeiwert
α_{Ca}	kritischer Erdbebenbeiwert eines Mechanismus, der den Herauszieh-Widerstands eines Ankers anspricht
α_H	horizontaler Erdbebenbeiwert
α_p	Spitzenwert der Beschleunigung von Kompressionswellen
α_s	Spitzenbeschleunigung in Zusammenhang mit Scherwellen

α_{Rp}	Spitzenbeschleunigung in Zusammenhang mit der Dilatationskomponente von Rayleigh-Wellen
α_{Rs}	Spitzenbeschleunigung in Zusammenhang mit der Scherkomponente von Rayleigh-Wellen
α_v	vertikaler Erdbebenbeiwert
β_H	Koeffizient zur Berücksichtigung der tiefenbezogenen, räumlichen Veränderlichkeit der horizontalen Baugrundbewegung
β_{DR}	Funktion des Koeffizienten von D_R zur Berechnung der volumetrischen Scherdehnung
β_{sl}	Geländeneigung
γ	Wichte des Baugrunds
γ_R	Gesamtwiderstandsbeiwert
γ_{cyc}	erbebeninduzierte wirksame zyklische Scherdehnung
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert für Materialfestigkeit
γ_{max}	Höchstwert der Freifeld-Scherdehnung
γ_{Rd}	Überfestigkeitsbeiwert
γ_{ref}	Bezugsscherdehnung
γ_s, γ_{sm}	Scherdehnung bzw. maximale Scherdehnung in Tunneln
γ_w	Wichte von Wasser
δ_f	Wandreibungswinkel zwischen dem Boden und dem Fundament oder der Stützwand
δ_{ff}	Freifeld-Verschiebung bei Scheibenbeanspruchung in der Vergrabungstiefe des Bauwerks
δ_{str}	horizontale Tragwerksverformung der Auskleidung
ε_c	Druckdehnung des Betons an der äußersten Faser
$\varepsilon_l, \varepsilon_{lm}$	Längsdehnung bzw. Höchstwert der Längsdehnung in Tunneln bei nicht vorhandener SSI
$\varepsilon_n, \varepsilon_{nm}$	Normaldehnung bzw. Höchstwert der Normaldehnung in Tunneln bei nicht vorhandener SSI
ε_{sd}	Zugdehnung der Längsbewehrung
ε_{shear}	durch Verflüssigung verursachte Scherdehnung im Freifeld
ε_{smd}	Dehnung bei Spitzenspannung der Längsbewehrung in Pfählen
ε_{ss}	Dehnung des Stahlmantels an der äußersten Faser in Pfählen
ε_{vi}	erdbebeninduzierte volumetrische Dehnung in Bodenschicht i
ζ, ζ_m	Krümmung bzw. maximale Krümmung
θ	Empfindlichkeitsbeiwert für gegenseitige Stockwerksverschiebungen

θ_{eq}	scheinbare Neigung des Schwerefelds in der Bemessungssituation mit Erdbeben
κ	Parameter zur Berücksichtigung der Ungleichzeitigkeit der Bemessungswerte der Auswirkungen der Einwirkungen im Baugrund und auf die Gründung
λ	Koeffizient zur Angabe der tiefenbezogene Abnahme von PGA_e bei Tiefbauwerken
ν	Poisson-Zahl des Baugrunds
ν_L	Poisson-Zahl der Tunnelauskleidung
ξ	Dämpfungsverhältnis
ρ	Dichte
ρ_s	wirksamer volumetrischer Bewehrungsgrad des Umschnürungsstahls = (Volumen des umschnürenden Stahls in einer Schlaufe)/(Volumen des Betonkerns für eine Länge gleich dem Abstand des Umschnürungsstahls entlang der Pfahllänge)
σ_a	totale Kontaktspannung senkrecht zu einer vertikalen Wand bei einem aktiven Grenzzustand
σ_p	totale Kontaktspannung senkrecht zu einer vertikalen Wand bei einem passiven Grenzzustand
σ_v	totaler Überlagerungsdruck, gleich der totalen Vertikalspannung
$\sigma_{v,H}$	totale Vertikalspannung bei der Tiefe H
σ'_v	effektiver Überlagerungsdruck, gleich der effektiven vertikalen Spannung
$\tau_{cy,u}$	zyklische undrained Scherfestigkeit von grobkörnigem Boden
τ_{max}	maximale zyklische Scherspannung
ϕ'	effektiver Reibungswinkel
χ_H	Koeffizient in Bezug auf die Amplitude der durch die Baugrundbewegung hervorgerufenen, zulässigen bleibenden Verschiebung
ψ	Winkel zwischen der Richtung der Wellenausbreitung und der Tunnelachse

3.2.3 Abkürzungen

CPT	Drucksondierungen
SPT	Standard Penetration Test

3.3 SI-Einheiten

(1) Es müssen SI-Einheiten in Übereinstimmung mit ISO 80000 verwendet werden.

(2) Für Berechnungen sollten, sofern zutreffend, die folgenden Einheiten verwendet werden:

— Masse:	kg, t, kt
— Dichte:	kg/m ³ , t/m ³ , kt/m ³

— Kräfte und Lasten:	kN, kN/m, MN/m
— Wichte:	N/m ³ , kN/m ³ , MN/m ³
— Spannungen und Festigkeiten:	Pa (= N/m ²), kPa (kN/m ²), MPa (= MN/m ²)
— Momente (Biegemomente usw.):	Nm, kNm, MNm
— Beschleunigung:	m/s ²

4 Bemessungsgrundlage

4.1 Leistungsanforderungen

(1) Bei geotechnischen Systemen müssen die grundsätzlichen Anforderungen auf den Schadenszustand im Tragwerk Bezug nehmen, der hier durch die Grenzzustände (LS) nach prEN 1998-1-1:2022, 4.3(1), beschrieben wird.

(2) Bei geotechnischen Bauwerken müssen die Anforderungen dieser Norm unter den vorgegebenen Bemessungswerten der Erdbebeneinwirkungen eingehalten werden.

4.2 Versagensfolgeklassen

(1) Die Versagensfolgeklassen geotechnischer Systeme sollten den Versagensfolgeklassen des Tragwerks entsprechen, wie im entsprechenden Teil der Normenreihe EN 1998 für die betrachtete Tragwerksart festgelegt.

(2) Die Folgen des Versagens von geotechnischen Systemen müssen nach prEN 1990:2021, 4.3, klassifiziert werden.

(3) Geotechnische Bauwerke müssen in die Versagensfolgeklassen CC1, CC2 und CC3 eingeordnet werden.

ANMERKUNG Tabelle 4.1 (NDP) enthält eine Klassifizierung von geotechnischen Bauwerken in die Versagensfolgeklassen CC1 bis CC3, es sei denn die zuständigen Behörden oder der Nationale Anhang geben eine andere Klassifizierung zur Anwendung in einem Land vor oder die Klassifizierung wird in Ermangelung einer derartigen Anforderung für ein bestimmtes Bauvorhaben zwischen den beteiligten Parteien vereinbart.

Tabelle 4.1 (NDP) — Versagensfolgeklassen für geotechnische Bauwerke

Versagensfolgeklasse	Beschreibung der Versagensfolge	Beispiele
CC1	Geringer	Stützwände und Gründungen, die Gebäude stützen, die als CC1 nach prEN 1990:2021, A.1.2, betrachtet werden (z. B. landwirtschaftliche Bauten). Künstliche Böschungen und Einschnitte in Bereichen, in denen ein Versagen eine geringe Auswirkung auf die Gesellschaft haben wird. Kleinere Straßendämme und/oder Brückengründungen, die nach prEN 1998-2 ¹ nicht kritisch für die Kommunikation sind. Tiefbauwerke mit geringer Exposition, die nicht kritisch für die Gesellschaft sind (z. B. kleine Durchlässe für Tiere).

Versagensfolgeklasse	Beschreibung der Versagensfolge	Beispiele
CC2	Normal	Alle geotechnischen Bauwerke, die nicht als CC1 oder CC3 klassifiziert sind.
CC3	Höher	Stützwände und Gründungen, die Gebäude stützen, die als CC3 nach prEN 1990:2021, A.1.2, betrachtet werden (z. B. ein Krankenhaus). Künstliche Böschungen und Gruben, Stützbauwerke, die gegenüber der Gesellschaft stark exponiert sind oder Infrastruktur. Wichtige Straßen-/Bahndämme und/oder Brücken Gründungen, die nach prEN 1998-2¹ von entscheidender Wichtigkeit für die Aufrechterhaltung des Kommunikationswesens sind, insbesondere in der Phase unmittelbar nach einem Erdbeben. Tiefbauten, die gegenüber der Gesellschaft stark exponiert und von entscheidender Bedeutung sind (z. B. wichtiger Bahn- oder Autobahntunnel, großer Flussdurchlass).
¹ Derzeit in Erarbeitung.		

(4) Die Erdbebeneinwirkungsklassen sind nach prEN 1998-1-1:2022, 4.1(4), festgelegt, in Abhängigkeit des Koeffizienten des Indexes für die Erdbebeneinwirkung δ der auch in prEN 1998-1-1:2022, 4.1(4), festgelegt ist.

(5) Für geotechnische Systeme entsprechen die Werte von δ den Werten des Tragwerks und werden in den einschlägigen Teilen von EN 1998 angegeben.

(6) Für geotechnische Bauwerke sollte δ bestimmt werden.

ANMERKUNG Die für geotechnische Bauwerke geltenden Werte von δ sind in Tabelle 4.2 (NDP) angegeben, sofern durch die zuständigen Behörden oder im Nationalen Anhang keine anderen Werte für die Verwendung in einem Land angegeben sind.

Tabelle 4.2 (NDP) — δ -Werte für geotechnische Bauwerke

	Versagensfolgeklasse		
	CC1	CC2	CC3
δ	0,6	1,0	1,5

4.3 Grenzzustände und damit einhergehende Erdbebeneinwirkung

(1) Der Schadenszustand sollte sich auf die vier Grenzzustände (LS) nach prEN 1998-1-1:2022, 4.3(1), beziehen.

ANMERKUNG Die Grenzzustände für die geotechnischen Systeme ähneln den für die Bauwerke festgelegten Grenzzuständen.

(2) Bei geotechnischen Systemen sollten die mit jedem festgelegten Grenzzustand einhergehenden Erdbebeneinwirkungen dieselben sein wie die des Tragwerks.

ANMERKUNG Die Erdbebeneinwirkung wird durch eine Wiederkehrperiode $T_{LS,CC}$ oder durch einen Leistungsfaktor $\gamma_{LS,CC}$ numerisch festgelegt.

(3) Für geotechnische Bauwerke sollten prEN 1998-1-1:2022, 4.3(3) und (4), angewendet werden.

ANMERKUNG 1 Die Werte von $T_{LS,CC}$ nach prEN 1998-1-1:2022, 4.3(3), sind in Tabelle 4.3 (NDP) angegeben, sofern durch die zuständigen Behörden oder im Nationalen Anhang keine anderen Werte für die Verwendung in einem Land angegeben sind.

Tabelle 4.3 (NDP) — Wiederkehrperioden von Erdbebeneinwirkungen, in Jahren, für geotechnische Bauwerke

Grenzzustand	Versagensfolgeklasse		
	CC1	CC2	CC3
NC	800	1 600	2 500
SD	250	475	800
DL	50	60	60

ANMERKUNG 2 Wenn Leistungsfaktoren nach prEN 1998-1-1:2022, 4.3(5) angewendet werden, sind die Werte von $\gamma_{LS,CC}$ die in Tabelle 4.4 (NDP) angegebenen, sofern durch die zuständigen Behörden oder im Nationalen Anhang keine anderen Werte für die Verwendung in einem Land angegeben sind.

Tabelle 4.4 (NDP) — Leistungsfaktoren

Grenzzustand	Versagensfolgeklasse		
	CC1	CC2	CC3
NC	1,2	1,5	1,8
SD	0,8	1,0	1,2
DL	0,4	0,5	0,5

4.4 Konformitätskriterien

(1) Für neue geotechnische Systeme sollten die zutreffenden Anforderungen nach prEN 1998-1-1:2022, 4.4, angewendet werden.

(2) Zur Erfüllung der Leistungsanforderungen sollte für neue geotechnische Bauwerke die Nichtüberschreitung des SD-Grenzzustands nachgewiesen werden, in Übereinstimmung mit den einschlägigen Abschnitten der vorliegenden Norm.

(3) Für bestehende geotechnische Systeme sollten die zutreffenden Abschnitte nach prEN 1998-3¹ angewendet werden.

(4) Zur Erfüllung der Leistungsanforderungen sollte für bestehende geotechnische Bauwerke die Nichtüberschreitung des NC-Grenzzustands nachgewiesen werden, in Übereinstimmung mit den einschlägigen Abschnitten der vorliegenden Norm.

¹ Derzeit in Erarbeitung.

4.5 Berechnungsverfahren

(1) Die Auswirkungen von Erdbebeneinwirkungen sollten entweder nach a) oder b) berechnet werden:

- a) ein kraftbasierter Ansatz;
- b) ein verschiebungsbasierter Ansatz.

(2) Bei dem kraftbasierten Ansatz sollte die Konformität in Hinblick auf verallgemeinerte Spannungen überprüft werden.

(3) Bei dem verschiebungsbasierten Ansatz sollte die Konformität durch den Vergleich der rechnerischen bleibenden Verschiebungen mit den zulässigen Verschiebungen überprüft werden.

ANMERKUNG 1 Die Werte der zulässigen Verschiebungen können von den beteiligten Parteien im Einzelfall vereinbart werden.

ANMERKUNG 2 Die Werte der dauerhaften Verschiebungen und die letztendliche Anwendung eines Sicherheitsfaktors werden in Übereinstimmung mit den Rechenmodellen berücksichtigt.

4.6 Nachweis des Erdbebenverhaltens

(1) Der Nachweis für geotechnische Bauwerke und geotechnische Systeme muss nach Gleichung (4.1) geführt werden.

$$E_{Fd} \leq R_d \quad (4.1)$$

Dabei ist

E_{Fd} der Bemessungswert der Auswirkung der Einwirkungen, angegeben als verallgemeinerte Spannungen im kraftbasierten Ansatz oder angegeben als berechnete Verschiebung im verschiebungsbasierten Ansatz;

R_d der Bemessungswert des Widerstands im kraftbasierten Ansatz oder die zulässige Verschiebung im verschiebungsbasierten Ansatz.

(2) Der Nachweis für tragende Bauteile von geotechnischen Bauwerken und geotechnischen Systemen muss nach Gleichung (4.1) geführt werden:

Dabei ist

E_{Fd} der Bemessungswert der Auswirkung von Einwirkungen (verallgemeinerte Spannungen im tragenden Bauteil) im kraftbasierten Ansatz; im verschiebungsbasierten Ansatz ist es entweder eine verallgemeinerte Spannung in spröden Bauelementen oder Verformungen des tragenden Bauteils in duktilen Bauelementen;

R_d der Bemessungswert der Tragfähigkeit des tragenden Bauteils und wird in gleicher Weise für die Auswirkung der Einwirkung (Schnittkräfte oder Verformungen des tragenden Bauteils) verwendet;

(3) Anker, die in geotechnischen Bauwerken oder geotechnischen Systemen verwendet werden, sollten prEN 1997-3:2022, Abschnitt 8, entsprechen.

(4) Der Nachweis für Bauteile von geotechnischen Bauwerken oder geotechnischen Systemen, die mit bewehrter Erde, Bodenbewehrungselementen und Baugrundverbesserung ausgestattet sind, sollte nach prEN 1997-3:2022, Abschnitt 9, Abschnitt 10 und Abschnitt 11 geführt werden.

(5) Die statische Standsicherheit geotechnischer Bauwerke und geotechnischer Systeme nach dem Erdbebenereignis sollte nachgewiesen werden.

(6) Die Standsicherheit nach dem Erdbebenereignis sollte mit den Werkstoffparametern überprüft werden, die für den Zustand nach dem Erdbeben gelten.

(7) Die Nachweise nach (1) und (2), die den kraftbasierten Ansatz verwenden, dürfen entweder mit dem Ansatz mit Beiwerten für Baustoffeigenschaften (MFA, en: material factor approach) oder mit dem Ansatz mit Beiwerten für den Widerstand (RFA, en: resistance factor approach) geführt werden, es sei denn ein Ansatz mit spezifischem Teilsicherheitsbeiwert wird in dieser Norm angegeben.

ANMERKUNG Da in der Kombination von Einwirkungen für Bemessungssituationen mit Erdbeben nach prEN 1990:2021, 8.3.4.4(1), und in prEN 1990:2021, 8.4.3.5(1), bleibende und veränderliche Einwirkungen nicht berücksichtigt werden, gilt der Ansatz mit Beiwerten für die Auswirkung (EFA, en: effect factor approach) nach prEN 1997-1:2022, 8.2(7), nicht in der Bemessungssituation mit Erdbeben.

(8) Die Nachweise nach (1) und (2), die den verschiebungsbasierten Ansatz verwenden, sollten mit dem Ansatz mit Beiwerten für Baustoffeigenschaften (MFA) geführt werden.

5 Erdbebeneinwirkung

5.1 Definition der Erdbebeneinwirkung

(1) Die Erdbebeneinwirkung sollte nach prEN 1998-1-1:2022, 5.2.2, auf Grundlage der verwendeten Berechnung festgelegt werden.

(2) Es darf davon ausgegangen werden, dass Vereinfachungen der Definition der Erdbebeneinwirkung für geotechnische Systeme und geotechnische Bauwerke 5.2 entsprechen.

5.2 Erdbebeneinwirkung für geotechnische Systeme und geotechnische Bauwerke

(1) Für geotechnische Systeme und geotechnische Bauwerke sollte die horizontale Baugrundbeschleunigung nach Gleichung (5.1) festgelegt werden.

$$a_H = \frac{\beta_H S_\alpha}{\chi_H F_A} = \frac{\beta_H}{\chi_H} PGA_e \quad (5.1)$$

Dabei ist

S_α das nach prEN 1998-1-1:2022, 5.2.2.2, festgelegte maximale Beschleunigungsantwortspektrum (5% Dämpfung), das dem Bereich konstanter Beschleunigung des elastischen Antwortspektrums entspricht;

F_A das nach prEN 1998-1-1:2022, 5.2.2.2, festgelegte Verhältnis von S_α zu Beschleunigungsspektralwerten für die Nullperiode;

β_H ein Koeffizient zur Berücksichtigung der tiefenbezogenen, räumlichen Veränderlichkeit der horizontalen Baugrundbewegung innerhalb der betrachteten Baugrundmasse;

χ_H ein Koeffizient zur Berücksichtigung der Amplitude der zulässigen bleibenden Verschiebungen des Boden-Bauwerk-Systems, die durch die horizontale Baugrundbewegung für die betrachtete Versagensfolgeklasse und den Grenzzustand erzeugt werden;

PGA_e der Bemessungswert des Spitzenwertes der horizontalen Baugrundbeschleunigung.

ANMERKUNG 1 Bei kraftbasierten oder verschiebungsbasierten Ansätzen schwankt β_H je nach Berechnungsmodell und -verfahren und kann die Werte $0 < \beta_H \leq 1$ annehmen. Er wird den einschlägigen Abschnitten dieser Norm entsprechend festgelegt.

ANMERKUNG 2 χ_H wird in den einschlägigen Abschnitten dieser Norm festgelegt. Es berücksichtigt nichtlineares Verhalten und ist abhängig von der Art des Boden-Bauwerk-Systems und dem betrachteten LS. In verschiebungsbasierten Ansätzen beträgt $\chi_H = 1,0$.

(2) Sofern in dieser Norm angegeben (z. B. für Stützbauwerke, Böschungen), darf alternativ die horizontale Baugrundbeschleunigung als ein horizontaler Erdbebenbeiwert α_H nach Gleichung (5.2) angegeben werden.

$$\alpha_H = \frac{a_H}{g} \quad (5.2)$$

Dabei ist g die Fallbeschleunigung.

(3) Bei einem verschiebungsbasierten Ansatz unter Einschluss von Berechnungen von bleibenden Baugrundverformungen, sollte die Darstellung der Erdbebeneinwirkung aus aufgezeichneten Beschleunigungszeitverläufen bestehen, die nach prEN 1998-1-1:2022, 5.2.3.1, ausgewählt wurden oder, soweit geeignet, anhand von geeigneten standortspezifischen Untersuchungen des Baugrundverhaltens nach 7.5 bewertet wurden.

ANMERKUNG Obwohl EN 1998-1-1 die Verwendung künstlicher oder spektral angepasster Beschleunigungszeitverläufe ermöglicht, wird die Bestimmung von bleibenden Baugrundverformungen oder -verschiebungen besser mit natürlichen Beschleunigungszeitverläufen abgeschätzt, die bei echten Erdbeben aufgezeichnet wurden, vorausgesetzt, dass störende Verläufe der Grundlinienverschiebung (en: spurious baseline displacement trends) aus den Eingangsaufzeichnungen entfernt werden.

6 Baugrundeigenschaften

6.1 Baugrunderkundung

(1) Die Baugrunderkundung in Zusammenhang mit der Erdbebenbemessung muss nach prEN 1997-2 durchgeführt werden.

(2) Abgeleitete und repräsentative Werte von Baugrundparametern für die Erdbebenbemessung sollten im Baugrundmodell bzw. im geotechnischen Bemessungsmodell nach prEN 1997-2 angegeben werden.

(3) Standortspezifische Untersuchungen bezüglich des Erdbebenverhaltens des Baugrunds dürfen für niedrige Erdbebeneinwirkungsklassen entfallen.

(4) Für die nach prEN 1998-1-1:2022, 4.1(4), festgelegte mittlere Erdbebeneinwirkungsklasse dürfen Daten von benachbarten Standorten verwendet werden, die wahrscheinlich ähnliche geotechnische Eigenschaften aufweisen, und die durch konventionelle geotechnische Untersuchungen dokumentiert wurden.

(5) Für die Anwendung von (4) dürfen vorhandene seismische Mikrozonierungsuntersuchungen und -karten berücksichtigt werden, vorausgesetzt, sie werden durch geotechnische Untersuchungen am Bauwerksstandort nach prEN 1997-2 bestätigt.

(6) Das Profil der Scherwellengeschwindigkeit v_s im Untergrund sollte als der zuverlässigste Indikator der Steifigkeit der Baugrundsichten für die Erdbebenbemessung betrachtet werden.

(7) Bei Berechnungen, die die Scherwellengeschwindigkeit oder den Schermodul des Baugrunds erfordern, sollte eine direkte Messung des v_s -Profils für mittlere und hohe Erdbebeneinwirkungsklassen nach prEN 1998-1-1:2022, 4.1(4), erfolgen.

(8) In allen anderen Fällen, darf das v_s -Profil durch empirische Korrelationen schätzungsweise bestimmt werden, unter Verwendung des In-situ-Penetrationswiderstandes oder anderer geotechnischer Eigenschaften, wobei die Streuung solcher Korrelationen zu berücksichtigen ist. In diesem Fall sollte der für v_s angesetzte Schwankungskoeffizient nicht größer als 0,3 sein.

(9) Für die Anwendung dieser Norm sollten zusätzlich zur Scherwellengeschwindigkeit zusätzliche Untersuchungen in a) oder b) berücksichtigt werden:

- a) Standard Penetration Tests (SPT) und/oder statische Drucksondierungen (CPT) nach prEN 1997-2:2022, 7.3;
- b) zyklische und dynamische Laborversuche nach prEN 1997-2:2022, 7.2, 7.3, 7.4, Abschnitt 8, Abschnitt 9 und Abschnitt 10.

6.2 Wasserstände

(1) Der bei der Bemessungssituation mit Erdbeben zu berücksichtigende Wasserstand sollte seinem quasi-ständigen Wert nach prEN 1990:2021, 6.1.2.3(1) und prEN 1990:2021, 6.1.3.2(4) entsprechen.

6.3 Festigkeitsparameter

(1) In der Bemessungssituation mit Erdbeben sollte berücksichtigt werden, dass das Verhalten gesättigter Böden dem unter unkonsolidierten Verhältnissen entspricht.

ANMERKUNG Ausschließlich bei durchlässigen Materialien mit einem Durchlässigkeitsbeiwert größer als 5×10^{-3} m/s kann davon ausgegangen werden, dass das Verhalten dränierten Bedingungen entspricht.

(2) Zur Übereinstimmung mit (1) darf das undräßierte Verhalten in Form von Gesamtspannungen oder wirksamen Spannungen unter gebührender Berücksichtigung des Porenwasserdrucks untersucht werden.

(3) Hinsichtlich der Gesamtspannungen darf der unter statischen undräßierten Bedingungen anwendbare Wert der Bodenfestigkeitsparameter verwendet werden, unter Berücksichtigung von a) oder b):

- a) Bei feinkörnigen Böden sollte der geeignete Festigkeitsparameter der undräßierten Scherfestigkeit c_u entsprechen; c_u sollte zyklische Abnahmewirkungen unter lang andauernden Erdbebeneinwirkungen berücksichtigen.
- b) Bei grobkörnigem Boden sollte der geeignete Festigkeitsparameter der zyklischen undräßierten Scherfestigkeit $\tau_{cy,u}$ entsprechen.

ANMERKUNG Unter Verweisung auf prEN 1998-1-1:2022, Tabelle 5.6, sind lang andauernde Erdbebeneinwirkungen Erdbeben mit $D_R \geq 12$ s.

(4) Der potenzielle Anstieg von c_u infolge der hohen Belastungsgeschwindigkeit darf auf Grundlage von Labordaten berücksichtigt werden.

(5) Beim Vorliegen potentiell empfindlicher Tonböden darf die Abnahme von c_u infolge großer Dehnungszyklen auf Grundlage literaturbasierter Daten abgeschätzt werden. Bei einer hohen Erdbebeneinwirkungsklasse, sollte dies auf Labordaten beruhen.

(6) Alternativ zu (3) dürfen effektive Festigkeitsparameter für den jeweils passenden, während der zyklischen Belastung entstehenden Porenwasserdruck verwendet werden.

(7) Bei Gesteinen dürfen Festigkeitseigenschaften auf Grundlage der einaxialen Druckfestigkeit q_u festgelegt werden.

6.4 Steifigkeit und Energiedissipationseigenschaften

(1) Aufgrund seines Einflusses auf die Bemessungswerte von Erdbebeneinwirkungen sollte der Hauptsteifigkeitsparameter des Baugrunds unter Erdbebeneinwirkung der Schermodul G sein. Der Steifigkeitswert bei geringer Dehnung G_0 sollte Gleichung (6.1) [siehe auch prEN 1997-2:2022, 10.4.1(1)] entnommen werden.

$$G_0 = \rho v_s^2 \quad (6.1)$$

Dabei ist

ρ die Dichte;

v_s die Scherwellenausbreitung des Baugrunds bei geringer Dehnung.

(2) In Berechnungen, die dynamische Baugrundeigenschaften einbeziehen, sollte der Unterschied berücksichtigt werden zwischen den geringen Dehnungswerten G_0 , wie den aus dem gemessenen Wert von v_s ermittelten und den Schersteifigkeitswerten G , die kompatibel mit Dehnungsamplituden sind, die beim Bemessungswert der Erdbebenbewegung hervorgerufen werden.

ANMERKUNG Siehe prEN 1997-2:2022, Anhang F, F.2 und F.3.

(3) Soweit zutreffend, sollte die Energiedissipation durch nichtelastisches Verhalten unter zyklischer Belastung als eine zusätzliche Baugrundeigenschaft berücksichtigt werden.

ANMERKUNG Die Energiedissipation durch nichtelastisches Verhalten wird häufig durch ein lineares visko-elastisches Modell mit einem frequenzunabhängigen hysteretischen Dämpfungsfaktor ξ modelliert.

(4) Die Veränderung des Dämpfungsverhältnisses ξ infolge der beim Bemessungswert der Erdbebenbewegung hervorgerufenen Dehnungsamplituden sollte in Berechnungen berücksichtigt werden, die dynamische Baugrundeigenschaften einbeziehen.

ANMERKUNG Siehe prEN 1997-2:2022, Anhang F, F.2 und F.3.

(5) In Ermangelung spezifischer Daten dürfen die Werte nach Tabelle 6.1 für Materialien mit einem Plastizitätsindex $I_p < 50$ verwendet werden, um (2) und (4) zu entsprechen.

ANMERKUNG Die Werte nach Tabelle 6.1 sind indikativ. Genauere Werte können aus veröffentlichten Daten oder spezifischen Berechnungen ermittelt werden.

Table 6.1 — Dämpfungsverhältnisse und mittlere Abminderungsfaktoren ($\pm$ eine Standardabweichung) des normalisierten Schermoduls G/G_0 in einer Tiefe von 20 m

Niveau der Erdbebengefährdung	$150 \leq v_s < 250$ m/s		$250 \leq v_s < 400$ m/s		$400 \leq v_s < 800$ m/s		800 m/s $\leq v_s$	
	G/G_0	ξ	G/G_0	ξ	G/G_0	ξ	G/G_0	ξ
Sehr niedrig	0,70 ($\pm 0,08$)	0,04	0,80 ($\pm 0,09$)	0,03	1,00	0,03	1,00	0,02
Niedrig	0,50 ($\pm 0,14$)	0,07	0,65 ($\pm 0,16$)	0,05	0,80 ($\pm 0,10$)	0,03	1,00	0,02
Mittel	0,30 ($\pm 0,10$)	0,10	0,50 ($\pm 0,20$)	0,07	0,70 ($\pm 0,10$)	0,05	1,00	0,02

Niveau der Erdbebengefährdung	$150 \leq v_s < 250 \text{ m/s}$		$250 \leq v_s < 400 \text{ m/s}$		$400 \leq v_s < 800 \text{ m/s}$		$800 \text{ m/s} \leq v_s$	
	G/G_0	ξ	G/G_0	ξ	G/G_0	ξ	G/G_0	ξ
Hoch	0,20 ($\pm 0,10$)	0,20	0,40 ($\pm 0,20$)	0,12	0,60 ($\pm 0,20$)	0,10	0,90 ($\pm 0,10$)	0,02
ANMERKUNG 1 Das Niveau der Erdbebengefährdung ist in prEN 1998-1-1:2022, Tabelle 5.2, festgelegt.								
ANMERKUNG 2 G_0 ist der beste Schätzwert bei geringen Dehnungen ($< 10^{-5}$), siehe auch prEN 1997-2:2022, 9.1.4 und Anhang F.								

(6) Abgesehen von mittleren und hohen Niveaus der Erdbebengefährdung dürfen auch die in Tabelle 6.1 für $150 \text{ m/s} \leq v_s < 250 \text{ m/s}$ aufgeführten Werte im Fall sehr weicher Böden mit $100 \text{ m/s} < v_{s,H} \leq 150 \text{ m/s}$ übernommen werden.

(7) Bei der Anwendung von (5) sollte die Unsicherheit berücksichtigt werden, indem die Bereiche zuzüglich oder abzüglich einer Standardabweichung (in Tabelle 6.1 in Klammern angegeben) berücksichtigt werden, abhängig von Faktoren wie Steifigkeit und Schichtung des Baugrundprofils, je nachdem, was am ungünstigsten ist.

6.5 Teilsicherheitsbeiwerte und Bemessungsfälle

(1) In den durch Gleichung (4.1) angegebenen Nachweisen, die den Ansatz mit Beiwerten für Baustoffeigenschaften (MFA) verwenden, sollten die Teilsicherheitsbeiwerte γ_M auf die Baugrundfestigkeitsparameter angewendet werden.

(2) Die Teilsicherheitsbeiwerte γ_M , die auf die Baugrundfestigkeitseigenschaften für c_u , $\tau_{cy,u}$, q_u , c' , $\tan \phi'$ und $\tan \delta_f$ angewendet werden sollten, werden durch γ_{cu} , $\gamma_{\tau_{cy,u}}$, γ_{qu} , $\gamma_{c'}$, $\gamma_{\phi'}$ bzw. γ_{δ} bezeichnet.

ANMERKUNG Die Werte, die in der Bemessungssituation mit Erdbeben γ_{cu} , $\gamma_{\tau_{cy,u}}$, γ_{qu} , $\gamma_{c'}$, $\gamma_{\tan \phi'}$ und γ_{δ} zugeordnet werden, betragen für die SD- und NC-Grenzzustände $\gamma_{cu} = 1,0$, $\gamma_{\tau_{cy,u}} = 1,25$, $\gamma_{qu} = 1,0$, $\gamma_{c'} = 1,0$, $\gamma_{\phi'} = 1,0$ und $\gamma_{\delta} = 1,0$, es sei denn im Nationalen Anhang sind andere Werte zur Anwendung in einem Land festgelegt.

(3) In den durch Gleichung (4.1) angegebenen Nachweisen, die den Ansatz mit Beiwerten für den Widerstand (RFA) verwenden, sollten die Teilsicherheitsbeiwerte γ_R auf den Widerstand nach prEN 1990:2021, 8.3.5.3, Gleichung (8.20) angewendet werden.

ANMERKUNG Die γ_R zugeordneten Werte sind gleich 1,0, es sei denn, dass in dieser Norm oder im Nationalen Anhang andere Werte zur Anwendung in einem Land festgelegt sind.

(4) Beim kraftbasierten Ansatz sollten die Bemessungsfälle nach prEN 1997-3 für die Nachweise verwendet werden, außer wenn dies spezifisch in dieser Norm angegeben ist.

7 Bewertung des Erdbebenverhaltens der Baustelle

ANMERKUNG Abschnitt 7 enthält einen Leitfaden dazu, wie Bauwerke anhand der Erdbebengefährdungen nach 7.1.1 (1) berechnet werden können.

7.1 Standortwahl

7.1.1 Allgemeines

(1) Eine Beurteilung der Stabilität des Baugeländes muss im Hinblick auf die Gefährdungen im Zusammenhang mit Verwerfungsbruch, Böschungsinstabilität, Verflüssigung, horizontalem Versatz und hoher Verdichtung bei einem Erdbebenereignis durchgeführt werden.

7.1.2 Potenziell seismisch aktive Verwerfungen

(1) Falls die Bedingungen nach prEN 1998-1-1:2022, 5.1.1(5)a) und 5.1.1(5)c) erfüllt sind, dürfen in der Nähe von potenziell aktiven Verwerfungen Bauwerke der Versagensfolgeklassen CC2 und CC3 nur errichtet werden, wenn a) und b) erfüllt sind:

- a) eine durchgehende starre Gründung ist vorhanden;
- b) die Bodenbedeckung überschreitet eine bestimmte Dicke H_{cov} .

ANMERKUNG Eine seismisch aktive Verwerfung wird entweder anhand einer offiziellen Karte oder mit einer spezifischen tektonischen Untersuchung, die durch eine nationale Behörde zertifiziert wurde, bestimmt.

(2) Die Tiefe H_{cov} nach (1) darf dem Bild 7.1 entnommen werden.

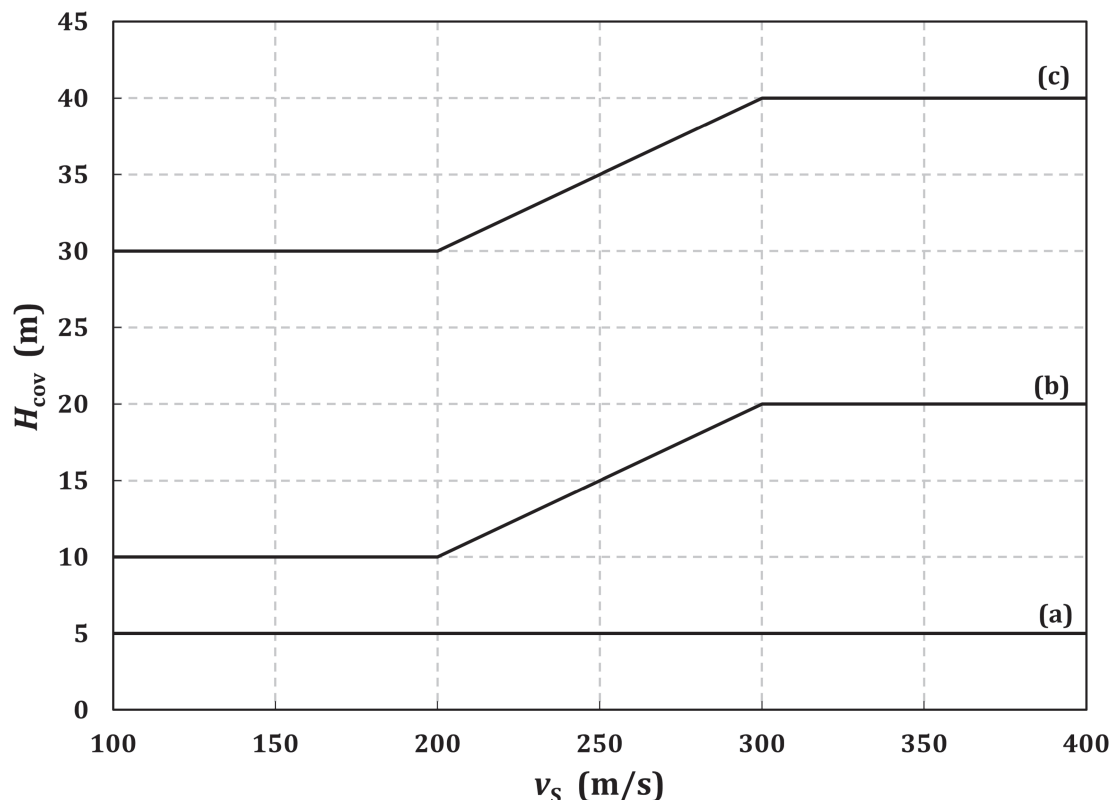


Bild 7.1 — Dicke H_{cov} der minimal zulässigen Bodenbedeckung gegenüber der mittleren Scherwellengeschwindigkeit des Bodens v_s innerhalb der Einflusstiefe der Gründung: (a) niedrige Erdbebeneinwirkungsklasse; (b) mittlere Erdbebeneinwirkungsklasse; (c) hohe Erdbebeneinwirkungsklasse

ANMERKUNG Die mittlere Scherwellengeschwindigkeit kann nach prEN 1998-1-1:2022, 5.1.2(7), berechnet werden, wobei H der Einflusstiefe der Gründung entspricht.

(3) Die Gründungen von Bauwerken der Versagensfolgeklassen CC2 und CC3, die (2) erfüllen und in Nähe von tektonischen Verwerfungen errichtet sind, sollten so bemessen sein, dass sie die Auswirkung des Versagens auf das Tragverhalten des Bauwerks minimieren.

ANMERKUNG 1 Die Nähe einer möglichen Verwerfung bedeutet einen relativ breiten Bereich (in der Größenordnung von einigen hundert Metern) von einer hypothetischen (oder sogar zuvor aktivierten) Verwerfungslinie.

ANMERKUNG 2 Die Bemessung von geeigneten Gründungen kann, um (3) zu entsprechen, Eingriffe im Boden unter dem und/oder um das Bauwerk einschließen.

(4) Tragpfähle sollten nicht dafür bemessen werden die mögliche Verwerfungsebene zu durchqueren und ihr Fuß sollte mindestens 10 Durchmesser oberhalb dieser Ebene angeordnet sein.

(5) Bei langen Bauwerken, wie Brücken, Tiefbauwerken und Tunneln sollten besondere Vorkehrungen ergriffen werden, um ausreichend starre Gründungen zu bemessen und/oder Relativverschiebungen aufzunehmen.

ANMERKUNG Für Tunnel sind Festlegungen in Abschnitt 11 angegeben.

(6) Die gleichzeitigen Auswirkungen des Verwerfungsbruchs mit Tragwerksschwingungen infolge Baugrunderschütterung dürfen vernachlässigt werden.

7.2 Standsicherheit von Böschungen

7.2.1 Allgemeines

(1) Ein Nachweis der Böschungsstandsicherheit sollte für Bauwerke erbracht werden, die auf oder in der Nähe von natürlichen oder künstlichen Böschungen errichtet werden, um sicherzustellen, dass die Sicherheit und/oder die Gebrauchstauglichkeit der Bauwerke in der Bemessungssituation mit Erdbeben erhalten bleiben. Der Nachweis sollte auch in Situationen erbracht werden, in denen eine Böschungsinstabilität zu einer unsicheren Situation führt, z. B. bei Dämmen.

ANMERKUNG Siehe auch prEN 1997-3:2022, Abschnitt 4.

(2) Wenn sich eine Böschungsinstabilität auf ein benachbartes Bauwerk auswirken kann, sollten für die Böschung dieselben Versagensfolgekassen und Grenzzustände wie für das Bauwerk berücksichtigt werden.

(3) Die Grenzzustände für Böschungen sollten mit zulässigen bleibenden Baugrundverschiebungen einhergehen, die mit den für das Bauwerk betrachteten Grenzzuständen kompatibel sind.

(4) Die Modellierung des mechanischen Verhaltens des Baugrunds unter kombinierten statischen und seismischen Einwirkungen sollte nach 6.3 erfolgen.

7.2.2 Berechnungsverfahren

7.2.2.1 Allgemeines

(1) Die Berechnung einer Böschung darf mit einem kraftbasierten Ansatz nach 7.2.2.2 erfolgen, wobei die Erdbebeneinwirkung mit einem pseudostatischen Verfahren angewendet wird.

(2) Falls eine Bewertung der bleibenden Verschiebungen erforderlich ist, sollte ein verschiebungsbasierter Ansatz nach 7.2.2.3 angewendet werden.

7.2.2.2 Kraftbasierter Ansatz

(1) Ein kraftbasierter Ansatz sollte nicht durchgeführt werden, wenn eine erhebliche Abnahme der Bodenfestigkeit, wie nach 6.3(3) bis 6.3(6) festgelegt, oder ein Potenzial für Verflüssigung vorliegt.

(2) Die erdbebenbezogenen Anforderungen an die Böschung sollten mit einem horizontalen Erdbebenbeiwert α_H nach 5.2 angegeben werden.

(3) Der Beiwert β_H in Gleichung (5.2) sollte in Bezug zur Höhe der Böschung und der vorherrschenden Wellenlänge der seismischen Bewegung stehen.

ANMERKUNG Anhang A enthält einen Leitfaden zur Berechnung von β_H .

(4) Der Beiwert $\chi_H \geq 1,0$ in Gleichung (5.1) sollte in Bezug zu den bleibenden Baugrundverschiebungen stehen und darf je nach betrachtetem Grenzzustand (DL, SD oder NC) unterschiedliche Werte ansetzen.

(5) Bei einem kraftbasierten Ansatz sollte der Bemessungswert der Auswirkungen der Einwirkungen für den zutreffenden Grenzzustand mit Gleichung (5.1) berechnet werden, mit den Werten für χ_H nach Tabelle 7.1, die dem angegebenen Bereich der bleibenden Verschiebungen indikativ entsprechen.

Tabelle 7.1 — Werte von χ_H für Berechnungen der Standsicherheit von Böschungen

χ_H	1,5	2,0	2,5
Bereich der bleibenden Verschiebungen (mm)	30 bis 50	60 bis 100	120 bis 200
ANMERKUNG Die Werte von χ_H nach Tabelle 7.1 werden für die empfohlenen Werte von Beiwerten für Baustoffeigenschaften und Beiwerten für den Gesamtwiderstand kalibriert. Die Werte von χ_H für andere Werte von Beiwerten für Baustoffeigenschaften oder Beiwerten für den Gesamtwiderstand sind nicht in dieser Norm angegeben.			

(6) Mit Ausnahme der hohen Erdbebeneinwirkungsklasse darf die Vertikalkomponente der Erdbebeneinwirkung vernachlässigt werden.

(7) Wenn (6) nicht gilt, sollten die äquivalenten vertikalen statischen Erdbebenkräfte unter Verwendung des vertikalen Erdbebenbeiwerts nach Gleichung (7.1) verwendet werden.

$$\alpha_V = \pm 0,5\alpha_H \quad (7.1)$$

(8) Die Sicherheitsnachweise der Baugrundböschung sollten mit dem Ansatz mit Beiwerten für Baustoffeigenschaften (MFA) unter Verwendung von Teilsicherheitsbeiwerten nach 6.5 erbracht werden, und sie sollten die potenzielle Gleitfläche mit der geringsten Sicherheit berücksichtigen.

(9) Der Erdbebenwiderstand der Böschung sollte durch seinen kritischen Erdbebenbeiwert α_c angegeben werden, der als der Mindestwert des horizontalen Erdbebenbeiwerts definiert ist, der zu pseudostatischem Versagen führt.

7.2.2.3 Verschiebungsbasierter Ansatz

(1) Verschiebungsbasierte Ansätze sollten verwendet werden, wenn eine Bewertung von Verschiebungen benötigt wird.

(2) Das Verhalten einer Böschung sollte auf Grundlage zulässiger bleibender Verschiebungen für die betrachteten Grenzzustände bewertet werden.

ANMERKUNG Zulässige bleibende Verschiebungen sind abhängig von der Umgebung der Böschung, wie vorhandene benachbarte Bauwerke.

(3) Die bleibende Verschiebung einer Böschung infolge der Erdbebeneinwirkung darf entweder mit festgelegten Starrkörper-Modellen oder mit nichtlinearer dynamischer Berechnung mit Modellierung des Baugrundbereichs berechnet werden.

ANMERKUNG 1 Für Berechnungen des nichtlinearen Antwortzeitverlaufs ist eine repräsentative Beurteilung des Ausgangsspannungszustands wesentlich.

ANMERKUNG 2 Ein Starrkörpermodell kann nicht verwendet werden, wenn es eine erhebliche Abnahme der Bodenfestigkeit gibt, es sei denn die Restscherfestigkeit des Bodens wird verwendet und der Block ist unter Gewichtslasten stabil.

(4) Bei Starrkörperberechnungen dürfen die Auswirkungen der Verformbarkeit und Dämpfung des Baugrunds mit vereinfachten ungekoppelten Berechnungen berücksichtigt werden.

ANMERKUNG Ungekoppelte Berechnungen sind Berechnungen, bei denen die angewendete Erdbebeneinwirkung nicht durch Systemverschiebungen beeinflusst wird.

(5) Beschleunigungszeitverläufe in einem verschiebungsbasierten Ansatz sollten nach 5.2(3) ausgewählt werden.

(6) Mit Ausnahme der hohen Erdbebeneinwirkungsklasse darf die Vertikalkomponente der Erdbebeneinwirkung vernachlässigt werden.

(7) Die seismische Anforderung an eine Böschung sollte als ihre bleibende Verschiebung infolge Erdbebeneinwirkung angegeben und nach (3) berechnet werden.

(8) Die seismische Kapazität einer Böschung sollte als die maximale zulässige bleibende Verschiebung nach (2) angegeben werden.

7.3 Potenziell verflüssigbare Böden

7.3.1 Allgemeines

(1) Die Beurteilung der Verflüssigung sollte für die während der geplanten Nutzungsdauer des Bauwerks vorherrschenden Freifeld-Standortbedingungen (Niveau der Geländeoberfläche, Grundwasserspiegel) durchgeführt werden.

ANMERKUNG Die Verflüssigung wird im Folgenden als eine beträchtliche Abnahme der Scherfestigkeit des Bodens und/oder als eine transiente Entfestigung des Bodens infolge des Anstiegs der Porenwasserdrücke in gesättigten Materialien während der Schwerwellenausbreitung, die zu wesentlichen bleibenden Verformungen oder sogar zu einem Zustand mit nahezu verschwindender effektiver Spannung im Boden führen kann, bezeichnet.

(2) Die Beurteilung der Verflüssigung darf bei Größenordnungen kleiner als M_{WT} vernachlässigt werden.

ANMERKUNG Der dem Schwellenwert der Größenordnung zugeordnete Wert ist $M_{WT} = 5,0$, es sei denn ein anderer Wert wird im Nationalen Anhang zur Anwendung in einem Land festgelegt.

(3) Die maßgebenden Daten für die Beurteilung der Verflüssigung sollten die zyklische undrännierte Scherfestigkeit nach 6.3(3) sowie die mit der Korngrößenverteilung bestimmte Bodenklassifizierung oder andere zustandsbezogene Eigenschaften (siehe prEN 1997-2:2022, Abschnitt 7) sein.

(4) Die zyklische undrännierte Scherfestigkeit in (3) darf vorzugsweise mit Korrelationen in In-Situ-Standard Penetration Tests (SPT) oder Drucksondierungen (CPT) ermittelt werden. Laborversuche (prEN 1997-2:2022, Abschnitt 10) dürfen ebenfalls angewendet werden.

ANMERKUNG Bei der Beurteilung der Verflüssigung werden in-situ-basierte Verfahren laborbasierten Verfahren aufgrund der Schwierigkeiten und hohen Kosten, die damit einhergehen, ungestörte Bodenproben von hoher Güte für Laborversuche sicherzustellen, die die In-situ-Bedingungen zufriedenstellend repräsentieren, vorgezogen.

7.3.2 Betrachtung der Standortbedingungen

(1) Bei Bauwerken, die nicht auf Pfählen gründen, dürfen in den niedrigen Erdbebeneinwirkungsklassen die Versagensfolgen von Verflüssigung vernachlässigt werden, wenn die Verflüssigung in Tiefen von mehr als 15 m unterhalb der Gründungssohle festgestellt wird.

(2) Böden, die auf ihre Anfälligkeit für Verflüssigung untersucht werden sollten, schließen Sand, Kiessand, Schluff, Bergematerial und feinkörnigen Boden mit einem Plastizitätsindex nicht größer als 15 ein. In Bodenschichten mit einer Tonfraktion größer als 15 % darf die Bewertung der Anfälligkeit für Verflüssigung entfallen.

7.3.3 Bewertung des zyklischen Widerstandsverhältnisses (CRR)

7.3.3.1 Allgemeine Anforderung

(1) Das zyklische Widerstandsverhältnis, CRR, sollte nach Gleichung (7.2) berechnet werden.

$$\text{CRR} = \frac{\tau_{\text{cy,u}}}{\sigma'_v} \quad (7.2)$$

Dabei ist σ'_v der effektive vertikale Überlagerungsdruck.

7.3.3.2 Bewertung des zyklischen Widerstandsverhältnisses (CRR) unter Anwendung In-situ-basierter Verfahren

(1) Bei grobkörnigen Böden und feinkörnigen Böden mit einem Plastizitätsindex kleiner als 7 sollte die Bewertung des CRR des Bodens mit zugelassenen SPT- oder CPT-basierten Verfahren erfolgen.

ANMERKUNG CPT-basierte Verfahren werden im Allgemeinen als zuverlässiger als SPT-basierte Verfahren angesehen. Anhang B enthält Beispiele für SPT- oder CPT-basierte Verfahren.

(2) Normalisierungs- und Korrekturfaktoren, die auf den CRR-Wert angewendet werden können, schließen die Listeneinträge a) bis f) ein:

- a) SPT-Hammerschlagenergie (nur bei SPT-basierten Verfahren);
- b) Überlagerungsdruck;
- c) Feinanteilgehalt;
- d) Korrekturwert für Dünnschichten;
- e) Auswirkungen der Alterung;
- f) zeitlicher Verlauf von Erschütterungen.

(3) Zusätzliche Korrekturfaktoren sollten auf das CRR angewendet werden, um die Bedingungen in den Listeneinträgen a) bis c), soweit zutreffend, zu berücksichtigen:

- a) Korrektur bezüglich Erdbebenmagnituden;
- b) effektiver Überlagerungsdruck;
- c) Korrektur für die statische Anfangsscherspannung.

ANMERKUNG Beispiele für Normalisierungs- und Korrekturfaktoren sind in Anhang B enthalten.

(4) Für feinkörnige Böden nach Tabelle B.1, die anfällig oder mäßig anfällig für Verflüssigung sind sowie für hohe Erdbebeneinwirkungsklassen sollte die zyklische undrained Scherfestigkeit durch Laborversuche bestimmt werden.

7.3.3.3 Bewertung des zyklischen Widerstandsverhältnisses (CRR) unter Anwendung laborbasierter Verfahren

(1) Die Prüfbedingungen und die Probenvorbereitung sollten realistische In-situ-Bedingungen aufrecht erhalten, um aussagekräftige CRR-Werte zu erreichen: In-situ-Spannungsbedingungen, relative Dichte, Bodengefüge und Sättigungsgrad sollten berücksichtigt werden.

7.3.4 Bewertung des zyklischen Spannungsverhältnisses (CSR)

(1) Das CSR darf nach Gleichung (7.3) berechnet werden, es sei denn (2) wird angewendet.

$$\text{CSR} = 0,65 \frac{\tau_{\max}}{\sigma'_v} \quad (7.3)$$

Dabei ist $\tau_{\max}$ die maximale zyklische Scherspannung, berechnet nach Gleichung (7.4) unter Verwendung von empirischen Korrelationen zur Abschätzung der Eingangsparameter.

$$\tau_{\max} = \alpha_H r_d \sigma_v \quad (7.4)$$

Dabei ist

α_H angegeben nach Gleichung (5.2) mit $\beta_H = \chi_H = 1,0$;

σ_v der totale vertikale Überlagerungsdruck;

r_d ein Spannungsabminderungsfaktor.

ANMERKUNG Anhang B enthält einen Leitfaden zur Berechnung des Spannungsabminderungsfaktors.

(2) Die maximale Scherspannung $\tau_{\max}$ darf mit Berechnungen des standortspezifischen Baugrundverhaltens nach 7.5 und prEN 1998-1-1:2022, 5.2.2.2(11) berechnet werden. Bei stark heterogenen Bodenprofilen sollten Berechnungen des standortspezifischen Baugrundverhaltens verwendet werden.

ANMERKUNG Ein geschichtetes Profil mit zwei aufeinanderfolgenden Schichten mit einem Steifigkeitsverhältnis größer als 3 können als stark inhomogen betrachtet werden.

7.3.5 Beurteilung der Verflüssigung

(1) Die Nachweise für Verflüssigung sollten mit dem Ansatz mit Beiwerten für den Widerstand (MFA) nach (2) durchgeführt werden.

(2) Ein Boden sollte als verflüssigbar betrachtet werden, wenn $(\text{CRR}/\gamma_{\text{TCY,U}})/\text{CSR} \leq 1,0$.

(3) Falls (2) nicht erfüllt wird, dürfen bei niedrigen Erdbebeneinwirkungsklassen die Versagensfolgen von Verflüssigung mit einem vereinfachten Verflüssigungsindex beurteilt werden.

ANMERKUNG Ein Beispiel für einen derartigen Index wird in Anhang B angegeben.

(4) Falls (2) nicht erfüllt wird, dürfen bei mittleren Erdbebeneinwirkungsklassen die Versagensfolgen von Verflüssigung mit einer Kombination aus einem vereinfachten Verflüssigungsindex und einer Bewertung von Freifeld-Setzungen beurteilt werden.

ANMERKUNG Anhang C enthält einen Leitfaden zu Berechnungen von Setzungen.

(5) Falls (2) nicht erfüllt wird, sollten bei hohen Erdbebeneinwirkungsklassen die möglichen Versagensfolgen von Verflüssigung bewertet werden. Die potenziellen Aspekte in den Listeneinträgen a) bis d) sollten berücksichtigt werden:

- a) Überschreitung der Tragfähigkeit;
- b) Instabilität von Gründungen;
- c) Setzung und Setzungsunterschiede des Bauwerks;
- d) horizontaler Versatz.

(6) Zur Bewertung möglicher Versagensfolgen der Listeneinträge c) und d) nach (5), dürfen numerische Berechnungen oder empirische Verfahren angewendet werden.

ANMERKUNG Anhang C enthält einen Leitfaden zu Berechnungen von Setzungen mit empirischen Verfahren.

(7) Zur Bewertung möglicher Versagensfolgen der Listeneinträge a) und b) nach (5), darf die Restfestigkeit eines verflüssigten Bodens unter Verwendung von Laborversuchen oder empirischen Korrelationen wie nach prEN 1997-2:2022, 8.3, geschätzt werden.

7.3.6 Sanierung im Fall von Verflüssigung

(1) Im Fall von verflüssigbarem Boden nach 7.3.5(2) dürfen Maßnahmen wie Baugrundverbesserungen oder die Verwendung von Pfählen (zur Lastübertragung auf Schichten, die nicht anfällig für Verflüssigung sind) ergriffen werden, um die Stabilität von Gründungen sicherzustellen.

ANMERKUNG Baugrundverbesserungen werden in prEN 1997-3:2022, Abschnitt 10, behandelt.

(2) Wirksame Baugrundverbesserungen dürfen Verfahren einschließen wie Verdichtung, Injektionen, Steinstützen, chemische Injektion und vertikale Dränagen.

ANMERKUNG Über die Durchführbarkeit der Verdichtung entscheidet hauptsächlich der Feinanteilgehalt.

(3) Wenn Baugrundverbesserungen umgesetzt werden, sollte die Verringerung der Anfälligkeit für Verflüssigung der Bodenschicht auf ein zulässiges Maß nachgewiesen werden. Das darf mit In-situ-Prüfungen nach der Verbesserung erreicht werden, um die Zunahmen des zyklischen Widerstands auf ein zufriedenstellendes Maß darzulegen.

(4) Die Bemessung von Pfahlgründungen sollte die Kräfte, die infolge des Verlusts der Tragwirkung der verflüssigten Schicht oder Schichten in die Pfähle eingeleitet werden, die infolge von seitlichen Bewegungen durch horizontalen Versatz eingeleitet werden sowie die Unsicherheiten bei der Bestimmung der Lage und der Mächtigkeit einer solchen Schicht oder Schichten, berücksichtigen.

ANMERKUNG 1 Anhang C enthält einen Leitfaden zu Berechnungen der Amplitude von Verschiebungen verflüssigten Bodens, die durch horizontalen Versatz verursacht werden.

ANMERKUNG 2 Die Verflüssigung einer Schicht in einer bestimmten Tiefe kann Setzungen aller darüberliegenden Schichten auslösen; in dieser Situation entwickeln alle Schichten negative Reibung am Pfahl.

7.4 Setzungen von Böden unter zyklischer Beanspruchung

(1) Im Fall mittlerer oder hoher Erdbebeneinwirkungsklassen sollten (2) bis (7) angewendet werden.

(2) Die Anfälligkeit ungesättigter Böden für Verdichtung und übermäßige Setzungen infolge erdbeben-induzierter zyklischer Beanspruchungen sollte berücksichtigt werden, wenn ausgedehnte Schichten oder dicke Linsen von lockeren, grobkörnigen Materialien in einer Tiefe anstehen, in der sie das Verhalten der Gründung beeinflussen können.

(3) Erdbebeninduzierte Setzungen und Verdichtung in ungesättigten grobkörnigen Böden dürfen unter Verwendung empirischer Beziehungen zwischen volumetrischer Dehnung, zyklischer Dehnung und Bodeneigenschaften geschätzt werden.

ANMERKUNG Anhang C enthält einen Leitfaden zu diesen Berechnungen.

(4) Setzungen in weichen, feinkörnigen Böden infolge zyklischer Verschlechterung unter lang andauernden Baugrunderschütterungen und die Dissipation von eingeleiteten Porenwasserüberdrücken sollten behandelt werden.

(5) Setzungen in gesättigten grobkörnigen Böden infolge der Dissipation von erdbebeninduzierten Porenwasserüberdrücken sollten behandelt werden.

ANMERKUNG 1 Anhang C enthält einen Leitfaden zur Beziehung zwischen den volumetrischen Dehnungen und dem Sicherheitsbeiwert.

ANMERKUNG 2 Für die Anwendung von (3), (4) und (5) können die Werte der zulässigen Setzungen von den beteiligten Parteien im Einzelfall vereinbart werden.

(6) Bei verflüssigbaren gesättigten Böden nach 7.3.5(2) sollten volumetrische Dehnungen infolge von Dissipation des Porenwasserüberdrucks berücksichtigt werden.

(7) Das Potenzial zu Verdichtung und Setzung von Böden darf ebenfalls mit geeigneten zyklischen Laborversuchen an repräsentativen Probekörpern des untersuchten Bodenmaterials bewertet werden.

7.5 Berechnungen des standortspezifischen Verhaltens

7.5.1 Allgemeines

(1) Wenn die Bedingungen nach prEN 1998-1-1:2022, 5.1.2(2) und 5.2.2.1(4), gelten, sollte die Erdbebeneinwirkung für die Beurteilungen nach 7.2, 7.3 und 7.4 für die Bemessung von Gründungssystemen nach Abschnitt 8 und Abschnitt 9, Erdstützbauwerke nach Abschnitt 10 und Tiefbauwerke nach Abschnitt 11 aus den Ergebnissen der Untersuchungen des standortspezifischen Baugrundverhaltens ermittelt werden.

(2) Der Eingangswert der Erdbebeneinwirkung in Untersuchungen des standortspezifischen Baugrundverhaltens sollte aus den aufgezeichneten Beschleunigungszeitverläufen in Übereinstimmung mit prEN 1998-1-1:2022, Abschnitt C.3, bestehen.

7.5.2 Berechnung des Baugrundverhaltens

(1) Die in einer Untersuchung des standortspezifischen Baugrundverhaltens verwendete Berechnung sollte in Übereinstimmung mit prEN 1998-1-1:2022, Abschnitt B.4, durchgeführt werden und die Auswirkungen der Einwirkungen entlang der Tiefe enthalten.

(2) Die Darstellung der Erdbebeneinwirkung darf auf die sich vertikal ausbreitenden Scherwellen beschränkt sein.

ANMERKUNG Es gibt spezifische Situationen (z. B. topographische Unregelmäßigkeiten), in denen andere Wellenarten oder Polarisationsrichtungen für das Standortverhalten bestimmend sind.

(3) Die Berechnung sollte die Aspekte in den Listeneinträgen a) bis c) berücksichtigen:

- a) ein nichtlineares mechanisches Verhalten des Bodens, das durch die Abnahme der Sekantensteifigkeit bei zunehmender Dehnung angegeben wird;
- b) die Abhängigkeit des Dämpfungsverhältnisses des Bodens von der Größe der Verzerrung;
- c) die geringere Dehnungssteifigkeit des darunter liegenden Bodens wird als Halbraum angenommen.

ANMERKUNG Die in den Listeneinträgen a) und b) festgelegten Eigenschaften beziehen sich auf ein äquivalentes, lineares, visko-elastisches, konstitutives Modell.

(4) Die Diskretisierung des Bodenvolumens sollte an die spezifische Technik angepasst werden, die zur Berücksichtigung nichtlinearer Auswirkungen in (3)a) und (3)b) angewendet wird.

(5) Falls die Berechnung des Baugrundverhaltens im Hinblick auf effektive Spannungen durchgeführt wird, sollte ein nichtlineares konstitutives Modell zur Berücksichtigung des Anfangszustands der effektiven Spannung in der Bodenschicht, des volumetrischen und abweichungsbezogenen Verhaltens des Bodens und der geeigneten Drainagebedingungen berücksichtigt werden.

ANMERKUNG Bei gesättigten Böden ist die Annahme von vollständig undrnierten Bedingungen üblicherweise geeignet.

8 Boden-Bauwerk-Interaktion

8.1 Allgemeines

(1) Die Berechnung der Auswirkungen der seismischen Boden-Bauwerk-Interaktion (SSI) sollte zwei Auswirkungen nach den Listenpunkten a) und b) berücksichtigen:

- a) Trägheitswirkungen, die das dynamische Verhalten des Bauwerks durch Änderung der Grundswingungsperiode und Dämpfung des Boden-Bauwerk-Systems modifizieren;
- b) kinematische Auswirkungen, die die Erdbebenanregung an der Tragwerksbasis in Bezug auf das Freifeld modifizieren und eine Belastung der Gründungselemente erzeugen.

ANMERKUNG Gründungsbewegungen können auch ohne eine Rotationskomponente in der Freifeldbewegung eine Rotationskomponente einschließen.

(2) Im Fall von Baugrundverbesserungen sollten die neuen Baugrundverhältnisse in SSI-Berechnungen berücksichtigt werden.

(3) Die SSI darf bei niedrigen Erdbebeneinwirkungsklassen vernachlässigt werden.

(4) Die SSI darf bei eingebetteten Gründungen vernachlässigt werden, die auf Baugrund mit einer Scherwellengeschwindigkeit größer als 800 m/s gründen.

(5) Die Trägheitswirkungen von SSI sollten in Fällen berücksichtigt werden, in denen mindestens eine Bedingung nach den Listenpunkten a) bis d) gilt:

- a) bei Boden-Bauwerk-Systemen, in denen ein Anstieg der Grundswingungsperiode infolge von SSI-Auswirkungen die Spektralbeschleunigung erhöht;
- b) wenn die Verschiebung des Bauwerks für die Breite der Trennfugen zwischen benachbarten Bauwerken (bestehenden oder geplanten) oder für andere Leistungskriterien maßgebend ist;
- c) bei Tragwerken auf weichem Untergrund mit einer Schergeschwindigkeit v_s , die im Fall von Einzelfundamenten über eine Tiefe gemittelt ist, die dem 3-fachen Wert der maximalen Gründungsbreite entspricht oder die im Fall einer Plattengründung kleiner als 250 m/s ist;
- d) für Bauwerke, in denen geometrische Nichtlinearität (als Auswirkung nach Theorie II. Ordnung oder als $P-\Delta$ -Auswirkung bezeichnet) eine erhebliche Rolle spielt.

ANMERKUNG Die Bedingung in Listenpunkt d) entspricht der Situation, wenn θ nach prEN 1998-1-2 (derzeit in Erarbeitung), 6.2.4(1), für Gebäude und nach prEN 1998-2 (derzeit in Erarbeitung), 5.1.3(1), für Brücken, größer als 0,1 ist.

(6) Eine Änderung des Eingangswerts der Gründungsbewegung sollte für die Situationen a) bis d) erwogen werden:

- a) tiefe Gründungen;
- b) Gründungen, die in einer Tiefe von mindestens zwei Stockwerken eingebettet sind oder in einer Tiefe größer als $L/4$, wobei L das größte Maß der Gründung im Grundriss ist, bei dem die vertikalen Oberflächen der Gründung in vollständigem Kontakt mit dem umgebenden Baugrund sind;
- c) Widerlager von Brücken mit großen Dämmen oder integrale Brücken ohne spezifische Vorkehrungen zur Minimierung der SSI-Auswirkungen;

- d) Gründungen mit einem oder zwei großen Maßen im Grundriss (größer als 50 m), die aus einer Platte oder einem einzelnen Kastenfundament bestehen oder Fundamente, die mit Einfassungsbalken verbunden sind.

ANMERKUNG Die kinematische Wechselwirkung bei großen Gründungen entsteht durch die räumliche Inkohärenz der Baugrundbewegung. Modelle für die räumliche Variabilität der Erdbebenbewegung sind in prEN 1998-1-1:2022, 5.2.3.2, angegeben.

(7) Bei flexiblen Pfahlgründungen dürfen Änderungen der Freifeld-Bewegung, wie nach 8.1(6)a) erforderlich, vernachlässigt werden und die Freifeld-Bewegung darf für den Eingangswert der Gründungsbewegung verwendet werden.

(8) Eine Pfahlgründung darf als flexibel betrachtet werden, wenn das Verhältnis E_P/E_S des Elastizitätsmoduls des Pfahls zum Elastizitätsmodul des Bodens $E_P/E_S \leq (L_P/1,5d)^4$ erfüllt, dabei sind L_P und d die Pfahllänge und der Pfahldurchmesser.

ANMERKUNG E_S ist der mittlere Elastizitätsmodul des Bodens entlang der aktiven Länge des Pfahls, der mit der mittleren Dehnungsamplitude kompatibel ist (nach 6.4); die aktive Länge des Pfahls ist die Pfahllänge, unterhalb derer die Pfahldurchbiegung vernachlässigt werden kann. Er entspricht üblicherweise 6 bis 10 Pfahldurchmessern.

(9) Die kinematische Wechselwirkung darf für die vertikale Komponente der Erdbebeneinwirkung vernachlässigt werden.

8.2 Berechnung der Trägheitswirkungen

8.2.1 Allgemeines

(1) Die Auswirkungen der Erdbebeneinwirkungen auf das Tragwerk und die Gründungen sollten mit einem geeigneten Tragwerksmodell bestimmt werden, das die Masse der Gründung einschließt, die durch seine Einzelfundamente oder Gründungen auf den Baugrund übertragen wird.

(2) Die Baugrundreaktionen dürfen durch Federn für alle Freiheitsgrade dargestellt werden.

ANMERKUNG 1 Im Allgemeinen sind die Federn nichtlinear und frequenzabhängig.

ANMERKUNG 2 Eine starre Gründung auf verformbarem Baugrund hat 6 Freiheitsgrade, 3 Verschiebungsfreiheitsgrade (in x-, y-, z-Richtung) und 3 Rotationsfreiheitsgrade (r_x , r_y , r_z um die x-, y- und z-Achse).

(3) Bei Pfahlgründungen und tief eingebetteten Gründungen oder Caissons sollte die Kopplung der horizontalen und der Rotationsfedern berücksichtigt werden.

(4) Bei bestimmten Gründungsformen (kreisförmig, streifenförmig, rechteckig), Pfählen und Baugrundprofilen (z. B. homogener Halbraum und Bodenschicht auf Gestein), dürfen die Werte der Federsteifigkeiten aus verfügbaren elastizitätsbasierten Lösungen ermittelt werden.

ANMERKUNG Anhang D enthält einen Leitfaden zur Berechnung der Federsteifigkeiten von Flachgründungen und Pfählen.

(5) Jeder Feder darf ein frequenzunabhängiger Steifigkeitswert zugeordnet werden, entsprechend der Dauer der Grundeigenform unter Berücksichtigung von SSI in der betrachteten Richtung. Falls es schwierig ist, diese Dauer zuverlässig zu bestimmen, dürfen stattdessen die statischen Steifigkeiten verwendet werden.

ANMERKUNG Die statische Steifigkeit bezieht sich auf die Steifigkeit bei Nullfrequenz.

(6) Bei Bemessungswerten der Grenzzustände SD und NC sollten die zu verwendenden äquivalent-linearen Steifigkeiten für nichtlineare horizontale und Rotationsfedern mit der Amplitude der horizontalen Verschiebungen und Rotationen der Gründung kompatibel sein.

(7) Zur Anwendung von (6) dürfen die äquivalent-linearen Steifigkeiten jeder Feder mit Bodenmoduli berechnet werden, die mit der im Freifeld entwickelten Dehnungsamplitude kompatibel sind.

ANMERKUNG Steifigkeiten, die mit der Dehnungsamplitude kompatibel sind, können anhand einer iterativen Berechnung berechnet werden.

8.2.2 Kraftbasierter Ansatz

8.2.2.1 Allgemeines

(1) Wenn numerische Berechnungen des Gründung-Boden-Systems zur Ermittlung der Gründungssteifigkeiten verwendet werden, sollten sie 8.5 entsprechen.

8.2.2.2 Nach DC1 bemessene Bauwerke

(1) Wenn die Dämpfung infolge SSI berücksichtigt wird, wird die Erdbebeneinwirkung unter Verwendung des elastischen Spektrums (mit $q = 1$) nach prEN 1998-1-1:2022, 5.2.2.2, festgelegt und eine Dämpfungskorrektur sollte nach prEN 1998-1-1:2022, 5.2.2.2(12), durchgeführt werden.

(2) Die Strahlungsdämpfung darf ausschließlich für Perioden berücksichtigt werden, die kürzer als die Grundswingungsperiode T_0 der Bodenschicht sind. Die Strahlungsdämpfung sollte auf 20 % begrenzt werden, es sei denn, sie wird durch numerische Berechnungen unterstützt, die die Schichteigenschaften bis zu einer Tiefe modellieren, in der $v_s > 600$ m/s ist.

ANMERKUNG 1 Die Dämpfung in SSI-Berechnungen setzt sich aus der Strahlungsdämpfung und der Materialdämpfung zusammen.

ANMERKUNG 2 T_0 ist das Reziproke der Grundfrequenz der Bodenschichten; siehe prEN 1998-1-1:2022, Anhang A.

(3) Die Tragfähigkeitsbedingung von tragenden Bauteilen des Unterbaus und des Oberbaus darf erfüllt werden, unter Berücksichtigung der Auswirkungen der Erdbebeneinwirkung dividiert durch einen Verhaltensbeiwert $q = 1,5$.

8.2.2.3 Nach DC2 und DC3 bemessene Bauwerke

(1) Die Auswirkung der Dämpfung infolge SSI darf im kraftbasierten Ansatz mit q_D berücksichtigt werden, das nach prEN 1998-1-1:2022, 6.4.1(5), berechnet wird.

(2) Bei Berücksichtigung der Dämpfung infolge SSI nach (1) sollte der Dämpfungs-Korrekturbeiwert η nicht kleiner als 0,7 angesetzt werden.

8.2.3 Verschiebungsbasierter Ansatz

8.2.3.1 Nichtlineare statische Berechnung

(1) Bei der nichtlinearen statischen Berechnung von Oberflächen- oder Flachgründungen, dürfen unelastische Verschiebungs- und Rotationsfedern verwendet werden.

ANMERKUNG Derartige Federn bestehen mindestens aus zwei Ästen: einer äquivalenten linearen Steifigkeit als linearer Ast und dem plastischen Ast bei der entsprechenden Grenztragfähigkeit.

(2) Werden keine Federn verwendet, darf die Beziehung Horizontalkraft zu Verschiebung des Boden-Gründungs-Systems unter großen Verformungen mit einer geeigneten nichtlinearen statischen Berechnung berechnet werden, in der der Baugrund als ein unelastisches Kontinuum modelliert ist. Die Möglichkeit des Auftriebs auf der Zugseite der Gründung sowie von Rutschungen an der Kontaktfläche von Baugrund und Gründung dürfen in das Modell aufgenommen werden.

ANMERKUNG Die nichtlineare statische Berechnung verwendet häufig Finite Elemente oder Finite Differenzen.

(3) Die Berechnung der Zielverschiebung sollte nach prEN 1998-1-1:2022, 6.5.4, erfolgen.

8.2.3.2 Berechnung des Antwortzeitverlaufs

(1) Die Trägheitswirkung der SSI in Berechnungen des Antwortzeitverlaufs darf durch Modellierung des Boden-Gründungs-Systems mit Federn und Dämpfern berücksichtigt werden.

ANMERKUNG 1 Die Federsteifigkeiten werden in 8.2.1(2) festgelegt. Dämpfer repräsentieren die gesamte Dämpfung des Boden-Gründungs-Systems.

ANMERKUNG 2 Die Erdbewegung wird auf die Lager der Federn aufgebracht.

(2) Jeder Feder darf ein frequenzunabhängiger Steifigkeitswert zugeordnet werden, entsprechend der Dauer der Grundeigenform unter Berücksichtigung von SSI in der betrachteten Richtung.

ANMERKUNG Die Frequenzabhängigkeit der Federn und Dämpfer kann in Berechnungen des Antwortzeitverlaufs mit Brockenmodellen aus konstanten Federn, Dämpfern und Massen modelliert werden.

(3) Die Strahlungsdämpfung darf der Materialdämpfung unter Verwendung von Gleichung (8.1) hinzugefügt werden.

$$C_{\alpha t} = C_{\alpha} + \xi \frac{K_{\alpha} T}{\pi} \quad (8.1)$$

Dabei ist/sind

$C_{\alpha t}$	der Dämpferbeiwert, der die Antwortgeschwindigkeit in der Bewegungsgleichung multipliziert;
ξ	das Dämpfungsverhältnis des Materials;
T	die Dauer der Grundeigenform unter Berücksichtigung von SSI;
C_{α} und K_{α}	der Dämpferbeiwert (in Zusammenhang mit der Strahlungsdämpfung) bzw. die Federsteifigkeit entsprechend der Dauer der Grundeigenform unter Berücksichtigung von SSI in der betrachteten Richtung.

ANMERKUNG 1 Anhang D enthält einen Leitfaden zu den vereinfachten Gleichungen.

ANMERKUNG 2 Die Strahlungsdämpfung wird durch die Baugrundsichtung stark beeinflusst. Lösungen für einen homogenen elastischen Halbraum ergeben unrealistisch große Werte der Strahlungsdämpfung.

8.3 Modellierung kinematischer Auswirkungen

(1) Kinematische Wechselwirkungen dürfen nach 8.5 als Teil des gesamten Bauwerk-Gründung-Boden-Systems berechnet werden oder mit einer gesonderten Berechnung bestimmt werden, in der ausschließlich Gründung und Boden enthalten sind.

ANMERKUNG Für eine derartige Berechnung werden Fundament und Pfahlkopf ohne ihre Masse modelliert; die Masse der Pfähle wird im Modell berücksichtigt.

(2) Die gesonderte Berechnung nach (1) darf mit Finite-Elemente- oder Finite-Differenzen-Modellierung durchgeführt werden. Für Pfähle darf ein Modell nach Winkler verwendet werden mit seitlichen Bodenfedern und Dämpfern, die die Einwirkung des Bodens in Kontakt mit den Gründungselementen repräsentieren.

(3) Bei der Finite-Elemente-/Finite-Differenzen-Modellierung eines Pfahl-Boden-Systems sollte die Erdbewegung an der Sohle der Baugrundsichtung erfolgen und die seitlichen Begrenzungen sollten sich ähnlich dem Freifeld verformen können.

ANMERKUNG Andere Vorbedingungen für eine geeignete numerische Berechnung sind in 8.5(2) angegeben.

(4) Wenn eine Modellierung nach Winkler verwendet wird, sollte der Baugrund in horizontale Schichten diskretisiert werden. Eine eindimensionale Berechnung des Baugrundverhaltens sollte durchgeführt werden, um die Zeitverläufe der Verschiebung bei jeder Schicht zu ermitteln. Diese Verschiebungen sollten an den Auflagern der seitlichen Federn und Dämpfer aufgebracht werden.

(5) Wird eine Modellierung nach Winkler verwendet, darf eine Alternative zu (4) angewendet werden, um die Baugrundverschiebungen vorzugeben, indem die Einwirkung des umgebenden Baugrunds mit einem Scherstab dargestellt wird, der mit den freien Enden der Federn und Dämpfer verbunden ist.

(6) Die Masse des Scherstabs in (5) sollte um eine Größenordnung größer als die Pfahlmassen sein.

(7) Zur Ermittlung der induzierten Biegemomente in einem Pfahl darf die Berechnung in (4) die Verschiebungszeitverläufe mit den entsprechenden Spitzenwerten ersetzen, die an den Federauflagern statisch aufzubringen sind, wobei die Dämpfer vernachlässigt werden. Eine statische Berechnung darf durchgeführt werden.

8.4 Kombination von Trägheits- und kinematischen Wirkungen bei Schnittkräften

(1) Wenn Trägheitswirkungen und kinematische Wirkungen gesondert bewertet werden, dürfen die Kräfte in den Gründungselementen aus den beiden Berechnungen entweder nach a) oder b) kombiniert werden:

- a) wenn die Frequenz des Modus, der am stärksten zum SSI-Verhalten beiträgt um mehr als 15 % von der Grundfrequenz der Bodenschicht abweicht, werden die Auswirkungen der Einwirkungen mit einer SRSS-Regel (Quadratwurzel der Summe der Quadrate) nach prEN 1998-1-1:2022, 6.4.3.2(2) kombiniert;
- b) wenn die Bedingung in a) nicht erfüllt wird, werden die absoluten Werte der Auswirkungen der Einwirkungen der beiden Berechnungen zusammengerechnet.

8.5 Gleichzeitige Modellierung von kinematischen und Trägheitswirkungen

(1) Die dynamische Berechnung des Antwortzeitverlaufs des gesamten Bauwerk-Gründung-Boden-Systems unter Verwendung von Finiten-Elementen/Finiten-Differenzen darf zur Erfassung sowohl der kinematischen Wirkungen als auch der Trägheitswirkungen in einem einzelnen Schritt verwendet werden. In diesem Fall sollten (2) und (3) angewendet werden.

(2) Das Berechnungsmodell für (1) sollte die Übertragung der Erdbebenwelle über die seitlichen und unteren Begrenzungen des Systems ermöglichen.

ANMERKUNG 1 Die unsachgemäße Modellierung der Grenzbedingungen erzeugt Wellenreflexionen, die mit nicht-reflektierenden Grenzen gedämpft werden können. Das Vorliegen einer Gesteinsschicht oder einer Schicht des Baugeländes der Kategorie A in einer gewissen Tiefe, die nicht im numerischen Modell enthalten ist, trägt zur Wellenreflexion und zur Verminderung der Strahlungsdämpfung bei.

ANMERKUNG 2 Die genaue Modellierung der maßgebenden Frequenzen des Bauwerks erfordert Bauteilgrößen, die kleiner als 1/6 (Auflösung des Frequenzbereichs) bis 1/10 (Auflösung des Zeitverlaufs) der betrachteten kleinsten Wellenlänge sind.

(3) Die Beschleunigungszeitverläufe der Sohlflächenanregung sollten nach prEN 1998-1-1:2022, 5.2.3.1, ausgewählt werden. Sie sollten mit dem elastischen Antwortspektrum nach prEN 1998-1-1:2022, 5.2.2.2, kompatibel sein. Die Auswirkung der gewählten Beschleunigungszeitverläufe sollte bei der Baugrundoberfläche im Freifeld prEN 1998-1-1:2022, Abschnitt B.3, entsprechen.

9 Gründungssystem

9.1 Allgemeine Anforderungen

(1) Die Gründung eines Bauwerks in einem Erdbebengebiet muss die Auswirkungen der Einwirkungen im Bauwerk für die Bemessungssituation mit Erdbeben ohne konstruktiv unzulässige bleibende Verschiebungen vom Bauwerk in den Baugrund einleiten.

ANMERKUNG Relevante Kriterien sind in Abschnitt 9.3 angegeben.

(2) Nach 6.4 sollten die Verzerrungsabhängigkeit der dynamischen Eigenschaften des Baugrunds sowie die mit der zyklischen Natur der Erdbebeneinwirkung verbundenen Auswirkungen gebührend berücksichtigt werden.

(3) Die Nachweise von Gründungen nach Gleichung (4.1) sollten entweder mit dem Ansatz mit Beiwerten für Baustoffeigenschaften (MFA) oder mit dem Ansatz mit Beiwerten für den Widerstand (RFA) durchgeführt werden.

(4) Unterschiedliche Gründungssysteme für unterschiedliche vertikale Bauelemente desselben Tragsystems, z. B. Pfähle in Kombination mit Flachgründungen, dürfen nur verwendet werden, wenn eine spezifische Untersuchung durchgeführt wird. In diesem Fall sollten die Gründungssteifigkeit und die Relativverschiebungen bei der Überprüfung des Bauwerks berücksichtigt werden.

(5) Unterschiedliche Gründungssysteme dürfen in dynamisch unabhängigen Teilen desselben Bauwerks verwendet werden.

(6) Teilsicherheitsbeiwerte für die Tragfähigkeit von Baustoffen sollten den einschlägigen Teilen der Normreihe EN 1998 zu tragenden Bauteilen entsprechen.

9.2 Bemessungswerte der Auswirkungen der Einwirkungen

(1) Die Einwirkungen auf die Gründung für den Tragfähigkeitsnachweis des Baugrunds sollten an der Unterseite der Gründungsbaulemente oder bei Pfahlgründungen an den Pfahlköpfen berechnet werden.

(2) Bei einem kraftbasierten Ansatz sollten die Bemessungswerte der Auswirkungen der Einwirkungen mit Gleichung (9.1) berechnet werden.

$$E_{Fd} = E_{Fd,G} + \gamma_{Rd} \frac{\Omega_d}{\chi_H} E_{Fd,E} \quad (9.1)$$

Dabei ist

„+“ bedeutet kombiniert mit positivem (+) oder negativem (–) Vorzeichen;

γ_{Rd} ein Überfestigkeitsbeiwert;

χ_H gibt die Amplitude der zulässigen bleibenden Verformungen nach 5.2 wieder;

E_{Fd} der Bemessungswert der in der Bemessungssituation mit Erdbeben auf die Gründung wirkenden Auswirkungen der Einwirkungen

$E_{Fd,G}$ die Auswirkung der Einwirkung infolge nichtseismischer Einwirkungen, die in der Zusammenstellung der Einwirkungen für die Bemessungssituation mit Erdbeben enthalten sind (prEN 1990:2021, 8.4.3.5);

- $E_{Fd,E}$ die Auswirkung der Einwirkung des Bemessungswerts der Erdbebeneinwirkung, die anhand einer seismischen Tragwerksberechnung unter Berücksichtigung der Verhaltensbeiwerts q berechnet wurde;
- Ω_d sofern nicht anders in (4) bis (12) festgelegt, der Wert von $(R_{di}/E_{di}) \leq q$ des dissipativen Bereiches oder Bauteils i des Tragwerks mit dem größten Einfluss auf die betrachtete Auswirkung E_F ;
- R_{di} der Bemessungswert des Widerstands des Bereichs des Bauteils i ;
- E_{di} der Bemessungswert der Auswirkung der Einwirkung auf den Bereich des Bauteils i in der Bemessungssituation mit Erdbeben.

(3) Zum Nachweis der Gründungselemente sollten (4) bis (11) mit $\chi_H = 1,0$ in Gleichung (9.1) angewendet werden.

(4) Falls die Auswirkungen der Einwirkungen auf die Gründung mit dem Wert des Verhaltensbeiwerts q bestimmt wurden, der für die Duktilitätsklasse DC1 gilt, sollten die Auswirkungen der Einwirkungen der Berechnung der Bemessungssituation mit Erdbeben entnommen und $\Omega_d \gamma_{Rd} = 1,0$ angesetzt werden.

(5) Falls die Auswirkungen der Einwirkungen auf die Gründung mit dem Wert des Verhaltensbeiwerts q bestimmt wurden, der für die Duktilitätsklassen DC2 und DC3 gilt, sollte der Bemessungswert der Auswirkungen der Einwirkungen für die Gründungselemente wie in (6), (7), (8) und (9) angegeben, ermittelt werden.

ANMERKUNG Die Gründungselemente beziehen sich auf das Einzelfundament, den Pfahlkopf und die Platten Gründung.

(6) Bei Platten- oder Caissongründungen von Tragwerken, die nach den Duktilitätsklassen DC2 oder DC3 bemessen sind, sollte das Produkt von $\Omega_d \gamma_{Rd}$ gleich $1,25 q_R$ angesetzt werden, dabei ist q_R die Komponente des Verhaltensbeiwerts zur Berücksichtigung der Überfestigkeit infolge der Lastumlagerung von Auswirkungen der Erdbebeneinwirkungen in redundanten Tragwerken.

ANMERKUNG Die Werte von q_R sollten für jeden Tragwerkstyp und Baustoff angesetzt werden, wie in dem entsprechenden Teil von EN 1998 angegeben. Soweit zutreffend, sind sie für Gebäude in prEN 1998-1-2 (derzeit in Erarbeitung), Abschnitt 10 bis Abschnitt 15, angegeben.

(7) Bei Einzelfundamenten in Tragwerken, die nach den Duktilitätsklassen DC2 oder DC3 bemessen sind, sollte das Produkt von $\Omega_d \gamma_{Rd}$ gleich $1,25 q_R$ angesetzt werden, für die Berechnung des Kippmoments oder der Scherkraft und gleich Ω für die Normalkraft; dabei ist Ω der Kraftverstärkungsfaktor nach DC2 für jeden Baustoff und Tragwerkstyp.

ANMERKUNG Soweit zutreffend, ist Ω für Gebäude in prEN 1998-1-2 (derzeit in Erarbeitung), Abschnitt 10 bis Abschnitt 15, angegeben.

(8) Bei nach DC1 bemessenen Gründungsbalken in nach DC2 und DC3 bemessenen Tragwerken sollte, für die Berechnung sämtlicher Auswirkungen der Einwirkungen in den Gründungsbalken, das Produkt $\Omega_d \gamma_{Rd}$ gleich $1,25 q_R$ angesetzt werden.

(9) Bei Gründungsbalken und Tragwerken, die beide nach DC2 und DC3 bemessen sind, sollte das Produkt von $\Omega_d \gamma_{Rd}$ gleich $1,0$ angesetzt werden und die Bemessung der Gründungsbalken sollte nach prEN 1998-1-2¹, Abschnitt 10, für Stahlbetonbalken und nach prEN 1998-1-2, Abschnitt 12, für einbetonierte Verbundstützen erfolgen.

(10) Für die Bemessung von Pfählen, bei denen kein Fließen nach 9.5 zulässig ist, sollte in Tragwerken, die nach Duktilitätsklasse DC2 oder DC3 bemessen sind, (7) angewendet werden.

(11) Für die Bemessung von Pfählen, bei denen Fließen nach 9.5 zulässig ist, darf das Produkt von $\Omega_d \gamma_{Rd}$ in Gleichung (9.1) gleich 1,0 angesetzt werden.

(12) Für die Überprüfung der Bodenkapazität der Gründung von Tragwerken, die nach DC2 oder DC3 bemessen sind, darf das Produkt von $\Omega_d \gamma_{Rd}$ in Gleichung (9.1) für Tragfähigkeitsnachweise gleich 1,2 und für Gleitnachweise gleich 1,0 angesetzt werden.

9.3 Horizontale Verbindungen zwischen Gründungskörpern

(1) Jegliche Auswirkungen der Einwirkungen im Tragwerk durch horizontale Relativverschiebungen zwischen Gründungselementen sollten berechnet und geeignete Maßnahmen zur Anpassung der Bemessung ergriffen werden.

ANMERKUNG Diese Anforderung steht mit 9.1(1) in Einklang.

(2) Die Absätze (3) bis (7) sollten auf Gebäudegründungen angewendet werden.

(3) Absatz (1) darf als erfüllt betrachtet werden, wenn die Gründungen in ein und derselben horizontalen Ebene angeordnet sind und Zerrbalken oder eine geeignete Gründungsplatte nach (7) auf Höhe der Einzelfundamente oder der Pfahlköpfe vorgesehen sind, mit Ausnahme einer Festlegung nach (6).

(4) Die Biegeträger oder eine Gründungsplatte dürfen als Zerrbalken betrachtet werden, vorausgesetzt, sie befinden sich in einer sicheren Verbindung mit dem Tragwerk und in einem Abstand von weniger als 1,0 m von der Sohlfläche der Einzelfundamente oder der Pfahlköpfe.

(5) Bei der Anwendung von (4) sollte die Querkrafttragfähigkeit der kurzen Stütze größer als der im Stützenquerschnitt über dem Zerrbalken oder der Gründungsplatte berechnete Bemessungswert der Querkraft V_{Ed} sein.

(6) Sofern sich das Bauwerk nicht in der Nähe von unsicheren Böschungen befindet, dürfen Zerrbalken im Fall der Baugrundkategorie A nach prEN 1998-1-1:2022, 5.1.2, Tabelle 5.1, oder falls Relativverschiebungen zwischen Einzelfundamenten in der Erdbebenbemessung des Oberbaus berücksichtigt werden, entfallen.

(7) Die Verbindungen der Gründung dürfen als ausreichend betrachten werden, wenn (a) und (b) erfüllt sind:

a) Zerrbalken werden für die Aufnahme einer Normalkraft auf Zug und Druck bemessen, die entsprechend der Baugrundklasse nach prEN 1998-1-1:2022, 5.1.2, Tabelle 5.1, einem der Werte nach i) bis iii), soweit zutreffend, entspricht:

- i) $\pm 0,2 \alpha_H N_{Ed}$ bei einer starren Baugrundklasse;
- ii) $\pm 0,3 \alpha_H N_{Ed}$ bei einer mittelstarken Baugrundklasse;
- iii) $\pm 0,4 \alpha_H N_{Ed}$ bei einer weichen Baugrundklasse.

Dabei ist

N_{Ed} der Mittelwert des Absolutwerts des Bemessungswerts der Normalkräfte der verbundenen vertikalen Bauteile in der Bemessungssituation mit Erdbeben;

α_H berechnet nach Gleichung (5.2) mit $\beta_H = \chi_H = 1,0$.

b) Die Längsbewehrung von Zerrbalken ist vollständig im Körper des Einzelfundaments oder in anderen Zerrbalken oder in der Gründungsplatte verankert.

9.4 Oberflächengründungen und eingebettete Flachgründungen

9.4.1 Allgemeines

(1) Absatz (2) bis Absatz (4) sollten auf die Einleitung horizontaler Kräfte, vertikaler Kräfte und des Kippmoments in den Baugrund überprüft werden.

(2) Der Bemessungswert der horizontalen Kraft V_{Ed} sollte durch einen oder mehrere der Mechanismen nach a) bis c) übertragen werden:

- a) durch den Bemessungs-Scherwiderstand $V_{Rd,1}$, der sich zwischen der horizontalen Sohlfläche eines Einzelfundaments oder einer Gründungsplatte und dem Boden entwickelt, wie in 9.4.2.1.1(2) angegeben;
- b) durch den Bemessungs-Scherwiderstand $V_{Rd,2}$ zwischen den vertikalen Seiten einer Ortbetongründung, die zur Richtung der Bewegung und des Baugrunds parallel sind;
- c) durch die horizontale Bemessungskomponente der nach 10.3.2 berechneten, passiven Erddrücke $V_{Rd,3}$ auf der Seite der Gründung unter den Beschränkungen und Bedingungen nach (3).

(3) Bei einem kraftbasierten Ansatz sollte der gesamte Gleitwiderstand nicht größer angesetzt werden als die Kombination aus dem Scherwiderstand, der durch Addieren der Widerstände nach (2)a) und b) und von bis zu 30 % des Widerstands durch vollständig mobilisierte passive Erddrücke nach (2)c) ermittelt wurde.

(4) Die Bemessungswerte der Normalkräfte N_{Ed} und Kippmomente M_{Ed} sollten mittels eines Werts oder einer Kombination der Werte, die in Zusammenhang mit den Mechanismen nach a) und b) stehen, in den Baugrund übertragen werden:

- a) die Bemessungs-Auflagerkräfte, die an der Sohlfläche der Gründung wirken;
- b) die Bemessungswerte der Schnittgrößen, die sich durch die Bemessungswerte der Querkraft- und Normalkrafttragfähigkeit zwischen den Seiten von eingebetteten Ortbeton-Gründungselementen und dem Baugrund entwickeln.

9.4.2 Nachweise

9.4.2.1 Einzelfundamente

9.4.2.1.1 Allgemeines

(1) In Übereinstimmung mit dem zu betrachtenden Grenzzustand müssen Einzelfundamente auf Versagen durch Gleiten, Tragfähigkeitsversagen und Versagen durch Drehung überprüft werden.

ANMERKUNG „Versagen“ bezieht sich auf eine Situation, in der unzulässige Verschiebungen nach 9.1(1) erreicht werden.

9.4.2.1.2 Gleiten

(1) Bei einem kraftbasierten Ansatz sollte, unter den Bedingungen nach (4) einem Gleiten der Gründung durch Reibung und horizontale Widerstandskräfte widerstanden werden.

(2) Der Bemessungswert des Gleitwiderstands darf mit Gleichung (9.2) berechnet werden.

$$F_{Rd} = (N_{Ed} - U) \frac{\tan \delta_f}{\gamma_\delta} \quad (9.2)$$