DIN EN 1993-1-14

ICS 91.010.30; 91.080.13

Einsprüche bis 2023-10-04

Entwurf

Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-14: Bemessung mithilfe von Finite-Element-Berechnung; Deutsche und Englische Fassung prEN 1993-1-14:2023

Eurocode 3: Design of steel structures –
Part 1-14: Design assisted by finite element analysis;
German and English version prEN 1993-1-14:2023

Eurocode 3: Calcul des structures en acier –
Partie 1-14: Calcul assisté par des analyses par éléments finis;
Version allemande et anglaise prEN 1993-1-14:2023

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2023-08-04 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 136 Seiten

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau)

Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 1993-1-14:2023) 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 005-08-16 AA „Tragwerksbemessung (SpA zu CEN/TC 250/SC 3, ISO/TC 167/SC 1)“ im DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigefügt. 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.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

– Entwurf –

2023-09

prEN 1993-1-14:2023

Titel de:	Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-14: Bemessung mithilfe von Finite-Element-Berechnung
Titel en:	Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-14: Design assisted by finite element analysis
Titel fr:	Eurocode 3: Calcul des structures en acier – Partie 1-14: Calcul assisté par des analyses par éléments finis

Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

Inhalt

Seite

Europäisches Vorwort **4**

0 Einleitung **5**
0.1 Einleitung zu den Eurocodes **5**
0.2 Einleitung zu EN 1993 (alle Teile) **5**
0.3 Einleitung zu prEN 1993-1-14 ..... **7**
0.4 Verwendung modaler Hilfsverben in Eurocodes **7**
0.5 Nationaler Anhang zu prEN 1993-1-14 ..... **7**

1 Anwendungsbereich **9**
1.1 Anwendungsbereich von prEN 1993-1-14 ..... **9**
1.2 Annahmen **9**

2 Normative Verweisungen **10**

3 Begriffe und Symbole **10**
3.1 Begriffe **10**
3.2 Symbole und Abkürzungen **12**
3.2.1 Lateinische Großbuchstaben **12**
3.2.2 Lateinische Kleinbuchstaben **13**
3.2.3 Griechische Großbuchstaben **14**
3.2.4 Griechische Kleinbuchstaben **14**

4 Grundlagen für die Tragwerksplanung und Modellierung **16**

5 Modellierung **17**
5.1 Geometrische Modelle **17**
5.1.1 Allgemeine Regeln für die geometrische Modellierung und Diskretisierung **17**
5.1.2 Modelle mit Balkenelementen **18**
5.1.3 Modelle mit Platten- oder Schalenelementen **18**
5.1.4 Modelle mit Volumenelementen **19**
5.1.5 Mehrstufige und kombinierte Modelle **19**
5.2 Auflager- und Lastmodelle **20**
5.2.1 Definition von Auflagern **20**
5.2.2 Definition der Lasten **20**
5.3 Werkstoffmodelle **21**
5.3.1 Allgemeines **21**
5.3.2 Werkstoffmodelle für warmgewalzte Stähle **22**
5.3.3 Werkstoffmodelle für kaltgeformten Stahl, hochfesten Stahl und nichtrostende Stähle **24**
5.3.4 Fortgeschrittene Werkstoffmodelle **26**
5.4 Imperfektionen **27**
5.4.1 Imperfektionenstypen **27**
5.4.2 Geometrische Imperfektionen **28**
5.4.3 Eigenspannungen **28**
5.4.4 Äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen **31**
5.5 Imperfektionskombinationen **34**

6 Berechnung **35**
6.1 Tragwerksberechnung **35**
6.1.1 Allgemeines **35**
6.1.2 Berechnungstypen **35**
6.2 Thermische Berechnung **38**

AVA Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

7 Validierung und Verifizierung 38
7.1 Allgemeines 38
7.2 Verifizierung 39
7.3 Validierung 40

8 Bemessungsmethodik 42
8.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit 42
8.1.1 Allgemeines 42
8.1.2 Elastischer Grenzzustand – Spannungsnachweis 42
8.1.3 Nachweis des plastischen Widerstands 43
8.1.4 Stabilitätsnachweis 44
8.1.5 Verfahren zur Bewertung der materiell nichtlinearen Berechnung 48
8.2 Grenzzustand der Ermüdung 49
8.2.1 Allgemeines 49
8.2.2 Ermüdungsnachweis nach dem Strukturspannungs- und Kerbspannungskonzept 50
8.2.3 Spannungsextrapolation für das Strukturspannungskonzept in Verbindungen außer in Hohlprofilverbindungen 50
8.2.4 Spannungsextrapolation für das Strukturspannungskonzept in Hohlprofilverbindungen 54
8.2.5 FE-Modellierung – Strukturspannungskonzept 56
8.2.6 FE-Modellierung — wirksame Kerbspannung 56
8.2.7 Zusätzliche Betrachtungen 58
8.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit 59

9 Dokumentation 59

Anhang A (informativ) Berechnung des Modellfaktors (γ_{FE}) 61
A.1 Verwendung dieses Anhangs 61
A.2 Anwendungsbereich und Geltungsbereich 61
A.3 Berechnung des Modellfaktors (γ_{FE}) 61

Anhang B (informativ) Strukturspannungskonzept 63
B.1 Verwendung dieses Anhangs 63
B.2 Anwendungsbereich und Geltungsbereich 63
B.3 Trennung von Spannungskonzentration und numerischen Singularitäten 63
B.4 Berücksichtigung von Spannungskonzentrationen bei der Bemessung 64

Anhang C (normativ) Grenzwerte für maximale Dehnungen für finite Balkenelemente 66
C.1 Verwendung dieses Anhangs 66
C.2 Anwendungsbereich und Geltungsbereich 66
C.3 Dehngrenzen 66

Literaturhinweise 70

AVA Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 1993-1-14:2023) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI gehalten wird. CEN/TC 250 ist für alle Eurocodes des konstruktiven Ingenieurbaus zuständig und wurde von CEN mit der Verantwortung für alle Angelegenheiten der Tragwerks- und geotechnischen Planung betraut.

Dieses Dokument wird derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

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.

Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

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 in der Erarbeitung, z. B. 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 1993 (alle Teile)

EN 1993 (alle Teile) gilt für den Entwurf, die Berechnung und die Bemessung von Bauwerken aus Stahl. Es entspricht den Grundsätzen und Anforderungen an die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von Tragwerken sowie den Grundlagen für ihre Bemessung und Nachweise, die in EN 1990, Grundlagen der Tragwerksplanung, enthalten sind.

EN 1993 (alle Teile) behandelt ausschließlich Anforderungen an die Tragfähigkeit, die Gebrauchs-tauglichkeit, die Dauerhaftigkeit und den Feuerwiderstand von Tragwerken aus Stahl. Andere Anforderungen, wie z. B. Wärmeschutz oder Schallschutz, werden nicht berücksichtigt.

AVA Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

EN 1993 ist in folgende Teile unterteilt:

— EN 1993-1, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*

— EN 1993-2, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 2: Stahlbrücken*

— EN 1993-3, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 3: Türme, Maste und Schornsteine*

— EN 1993-4, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 4: Silos und Tankbauwerke*

— EN 1993-5, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 5: Pfähle und Spundwände*

— EN 1993-6, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 6: Kranbahnen*

— EN 1993-7, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 7: Bemessung von Sandwich-Paneelen* (in Vorbereitung)

EN 1993-1 existiert nicht als ein physikalisches Dokument, sondern besteht aus den folgenden 14 gesonderten Teilen, deren grundlegender Teil EN 1993-1-1 ist:

— EN 1993-1-1, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*

— EN 1993-1-2, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-2: Allgemeine Regeln — Tragwerksbemessung für den Brandfall*

— EN 1993-1-3, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-3: Allgemeine Regeln — Ergänzende Regeln für kaltgeformte dünnwandige Bauteile und Bleche*

ANMERKUNG Kaltgeformte Hohlquerschnitte nach EN 10219 werden in EN 1993-1-1 behandelt.

— EN 1993-1-4, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-4: Allgemeine Bemessungsregeln — Ergänzende Regeln zur Anwendung von nichtrostenden Stählen*

— EN 1993-1-5, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile*

— EN 1993-1-6, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen*

— EN 1993-1-7, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-7: Plattenförmige Bauteile mit Querbelastung*

— EN 1993-1-8, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen*

— EN 1993-1-9, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-9: Ermüdung*

— EN 1993-1-10, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung*

— EN 1993-1-11, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-11: Bemessung und Konstruktion von Tragwerken mit Zuggliedern aus Stahl*

— EN 1993-1-12, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-12: Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993 auf Stahlsorten bis S960*

AVA Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

— EN 1993-1-13, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-13: Träger mit großen Stegöffnungen*

— EN 1993-1-14, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-14: Bemessung mithilfe von Finite-Element-Berechnung*

Alle Teile von EN 1993-1-2 bis EN 1993-1-14 behandeln allgemeine Themen, die unabhängig von der Art des Bauwerks sind, wie die Tragwerksbemessung für den Brandfall, ergänzende Regeln für kaltgeformte Bauteile und Bleche, ergänzende Regeln zur Anwendung von nichtrostenden Stählen, plattenförmige Bauteile usw.

Alle Teile von EN 1993-2 bis EN 1993-7 behandeln Themen, die für eine bestimmte Bauwerksart relevant sind, wie Stahlbrücken; Türme, Maste und Schornsteine; Silos und Flüssigkeitsbehälter; Pfähle und Spund-wände; Kranbahnen usw. EN 1993-2 bis EN 1993-7 beziehen sich auf die allgemeinen Regeln in EN 1993-1 und ergänzen, ändern oder ersetzen diese.

0.3 Einleitung zu prEN 1993-1-14

prEN 1993-1-14 enthält Grundsätze und Anforderungen für die Anwendung numerischer Verfahren bei der Bemessung von Stahlbauten, insbesondere für die Nachweise des Grenzzustands der Tragfähigkeit (einschließlich Ermüdung) und der Gebrauchstauglichkeit. Sie enthält auch Grundsätze und Anforderungen für die Anwendung fortgeschrittener Finite-Elemente- und ähnlicher Modellierungsverfahren für Forschungszwecke, die auch in Bemessungsprozessen verwendet werden dürfen.

0.4 Verwendung modaler Hilfsverben in Eurocodes

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 verifiziert 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 1993-1-14

Nationale Festlegungen sind in dieser Norm zulässig, wo diese Möglichkeit ausdrücklich in Anmerkungen angegeben wird. Nationale Festlegungen umfassen die Auswahl der Werte für national festgelegte Parameter (NDP).

Die nationale Ausgabe von prEN 1993-1-14 kann durch einen nationalen Anhang ergänzt werden, der alle nationalen Festlegungen enthält, die für die Bemessung und Konstruktion von Hochbauten und Ingenieurbauten im jeweiligen Land erforderlich sind.

Wird keine nationale Festlegung angeführt, ist der in dieser Norm angegebene Standardwert anzuwenden.

Wenn keine nationale Festlegung angeführt wird und kein Standardwert in dieser Norm angegeben ist, kann die Festlegung durch eine zuständige Behörde festgelegt werden oder wenn keine Festlegung besteht, für ein spezifisches Einzelprojekt durch die zuständigen Parteien vereinbart werden.

AVA Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

Nationale Festlegungen sind in prEN 1993-1-14 zu den folgenden Abschnitten gestattet:

4(11)	4(15)	5.4.2(1)	7.1(2)
7.2(2)	7.3(1)	7.3(3)	7.3(6)
8.1.2(3)	8.1.2(5)	8.1.5(2)	8.1.5(3)
C.3(1)			

Nationale Festlegungen sind in prEN 1993-1-14 zu den folgenden informativen Anhängen gestattet:

Anhang A	Anhang B

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.

Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

1 Anwendungsbereich

1.1 Anwendungsbereich von prEN 1993-1-14

(1) Dieses Dokument enthält Grundsätze und Anforderungen für die Anwendung numerischer Verfahren bei der Bemessung von Stahlbauten, insbesondere für die Nachweise des Grenzzustands der Tragfähigkeit (einschließlich Ermüdung) und der Gebrauchstauglichkeit. Es enthält auch Grundsätze und Anforderungen für die Anwendung fortgeschrittener Finite-Elemente- (FE) und ähnlicher Modellierungsverfahren für die numerische Simulation, die auch die Sicherheitsbeurteilung abdeckt.

(2) Dieses Dokument behandelt allgemeine Vorgehensweisen wie die Finite-Elemente-Methode (FEM), die Finite-Streifen-Methode (FSM) oder die verallgemeinerte technische Biegetheorie (GBT) für die Modellierung, die Berechnung und Bemessung von Stahlbauten, die aus den folgenden Bauteilen und Verbindungskonfigurationen bestehen:

a) warmgewalzten Profilen;

b) kaltgeformten Bauteilen und Blechen;

c) geschweißten Blechquerschnitte;

d) Profilen aus nichtrostendem Stahl;

e) plattenförmigen Bauteilen;

f) Schalen;

g) geschweißten und geschraubten Verbindungen.

Neben den allgemeinen Bemessungsregeln finden sich in den entsprechenden Normteilen der EN 1993 auch spezifische Zusatzregeln.

(3) Dieses Dokument enthält harmonisierte Bemessungsregeln in Bezug auf die Anwendung der numerischen Modellierungsverfahren, die Entwicklung der numerischen Modelle, die Anwendung von Berechnungstypen, die Verfahren zur Ergebnisbewertung und die Bestimmung des Widerstands von Stahlbauten für verschiedene Grenzzustände.

1.2 Annahmen

(1) Dieses Dokument enthält Regeln für Ingenieure, die in der Anwendung von FE erfahren sind.

(2) Es wird anerkannt, dass die auf den Gesetzen der Physik basierende Tragwerksberechnung erfolgreich für die Bemessung und den Nachweis von Elementen oder ganzen Tragwerken erforscht, entwickelt, historisch oder gegenwärtig verwendet wurde. Dies ist für viele strukturelle Lösungen nach wie vor angemessen. Wenn jedoch ein detaillierteres Verständnis des Tragverhaltens erforderlich ist, können die in diesem Dokument beschriebenen Verfahren für die professionelle Bemessung nützlich sein.

(3) Sofern nicht ausdrücklich angegeben, gelten EN 1990, EN 1991 (alle Teile) und die anderen relevanten Teile von EN 1993-1.

(4) Die in prEN 1993-1-14 angegebenen Bemessungsverfahren sind anwendbar, wenn

— die Ausführungsqualität den Vorgaben von EN 1090-2 und/oder EN 1090-4 entspricht und

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

— die verwendeten Werkstoffe und Bauprodukte den einschlägigen Teilen von EN 1993 oder den einschlägigen Werkstoff- und Produktspezifikationen entsprechen.

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 ist eine Liste weiterer zitierter Dokumente aufgeführt, die keine normativen Verweise sind, einschließlich solcher, die als Empfehlungen (d. h. durch „sollte“-Absätze) und Erlaubnisse (d. h. durch „kann“-Absätze) bezeichnet werden.

EN 1090-2, *Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken — Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken*

EN 1090-4, *Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken — Teil 4: Technische Anforderungen an tragende, kaltgeformte Bauelemente aus Stahl und tragende, kaltgeformte Bauteile für Dach-, Decken-, Boden- und Wandanwendungen*

EN 1990:2023, *Eurocode — Grundlagen der Tragwerksplanung*

EN 1991 (alle Teile), *Eurocode 1 — Einwirkungen auf Tragwerke*

EN 1993 (alle Teile), *Eurocode 3 — Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten*

3 Begriffe und Symbole

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe und Symbole.

3.1 Begriffe

3.1.1
Berechnung, die einen anschließenden Nachweis erfordert
Berechnung (z. B. LA, LBA, GNA, GNIA, MNA), die für den Nachweis durchgeführt wird und deren Ergebnisse verschiedene Systemantwortgrößen sind, die für den statischen Nachweis des untersuchten Tragwerks weiterverwendet werden

3.1.2
Benchmark-Fall
bietet die Eingaben und Ausgaben der analytischen oder numerischen Lösungen, um die Ergebnisse durch Vergleich mit einem vereinfachten Modell zu überprüfen, oder experimentelle Versuche, um die Qualität des zu validierenden numerischen Modells zu überprüfen

3.1.3
Freiheitsgrad
DOF
Anzahl der unabhängigen Bewegungen, die in dem Tragwerk zulässig sind

Anmerkung 1 zum Begriff: DOF können als DOF pro Knoten (1 bis 7 – maximal 3 Translations-, 3 Rotations- und Verwölbung-DOFs) sowie die Gesamtanzahl der DOFs für das gesamte Tragwerk als Summe aller DOFs der Knoten definiert werden.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

3.1.4
direkter Widerstandsnachweis
Berechnung (z. B. MNA, GMNA, GMNIA), die für den Nachweis durchgeführt wird und deren Ergebnis die Tragfähigkeit des untersuchten Tragwerks ist

3.1.5
Folgelast
Änderung der Belastungsrichtung in Abhängigkeit von der Verformung des untersuchten Tragwerks in einer nichtlinearen Berechnung

3.1.6
globale Tragwerksberechnung
Tragwerksberechnung des gesamten Tragwerks oder eines Teils des untersuchten Tragwerks anstelle der gesondert behandelten einzelnen Bauteile oder Komponenten

3.1.7
numerisches Modell
numerische Idealisierung zur Simulation und Vorhersage von Verhaltensaspekten eines Tragsystems, welche zur Darstellung des Tragverhaltens des untersuchten Tragwerks oder eines Teils davon verwendet wird

3.1.8
mehrstufiges oder kombiniertes Modell
Modellierung des gesamten Tragwerks unter Verwendung verschiedener Elementtypen (z. B. Kopplung von Balken-, Platten-, Schalen- oder Volumenelementen) innerhalb eines Modells, wobei die DOFs in den Schnittbereichen kompatibel gemacht werden

3.1.9
numerische Bemessungsverfahren
numerisches Modell und Berechnungstyp, der für den statischen Nachweis eines Tragwerks oder eines Teils davon verwendet wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Ergebnisse des numerischen Modells können (i) verschiedene Systemantwortgrößen (SRQs) sein, die für die weitere Bewertung verwendet werden, oder (ii) Widerstände, die für den direkten Widerstandsnachweis verwendet werden.

3.1.10
numerische Simulation
Ergänzung oder Erweiterung von physikalischen Experimenten zur Bestimmung des direkten Widerstands eines Tragwerks

3.1.11
Berechnung nach Theorie II. Ordnung
geometrisch nichtlineare Berechnung auf der Grundlage von Näherungen der Theorie II. Ordnung (geometrische Steifigkeit oder der Ansatz der Spannungsversteifung)

3.1.12
Standardbemessungsfall
Nachweisführung mit numerischen Modellen für Versagensarten, für die auch ein Eurocode-basiertes Bemessungswiderstandsmodell existiert

3.1.13
Teilmodell
Teil des gesamten Tragwerks, der unter Verwendung gleichwertiger Auflagerbedingungen, die den vernachlässigten Teil des Tragwerks darstellen, modelliert wird

AVA Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

3.1.14
Systemantwortgröße
SRQ
relevanter Ausgabewert, der sich aus einer bestimmten Berechnung ergibt; er spiegelt das Hauptziel der Berechnung durch die Auswahl der wichtigsten Parameter und die Begrenzung ihrer Fehler sowohl bei der Validierung als auch bei der Verifizierung wider

3.1.15
Validierung
Vergleich der numerischen Lösung mit dem experimentellen Verhalten (oder bekannten genauen Lösungen)

3.1.16
Verifizierung
Vergleich der numerischen Lösungen mit genauen analytischen oder numerischen Ergebnissen

3.2 Symbole und Abkürzungen

3.2.1 Lateinische Großbuchstaben

A	Bruchdehnung, definiert in der jeweiligen Werkstoffspezifikation
C_1, C_2	Werkstoffkoeffizient für warmgewalzte Stähle
E	Elastizitätsmodul
E_1, E_2, E_3	Verfestigungsmodul der Spannungs-Dehnungs-Kurve für kaltgeformte Bauteile nach prEN 1993-1-3
$E_{0.2}$	Tangentenmodul der Spannungs-Dehnungs-Kurve an der Streckgrenze für kaltgeformte Stähle und nichtrostende Stähle
E_{sh}	Verfestigungsmodul für warmgewalzte Stähle
H	Gesamtprofilhöhe von geschweißten Kastenprofilen
L	Bauteillänge
$L_{r,min}$, $L_{r,max}$	Grenzen des Extrapolationsbereichs für Rohrverbindungen beim Ermüdungsnachweis
R_{comp}	mit dem numerischen Modell berechneter Tragwiderstand
$R_{b,d}$	Bemessungswert des Stabilitätswiderstands
$R_{b,k}$	charakteristischer Stabilitätswiderstand
R_{check}	berechneter Widerstand für den Fall des Tragwiderstandsnachweises
R_{cr}	niedrigste elastische Verzweigungslast des untersuchten Tragwerks
R_{GMNA}	berechnete plastische Widerstände auf der Grundlage der GMNA-Berechnung
R_{GMNIA}	berechnete Knickwiderstände auf der Grundlage der GMNIA-Berechnung
$R_{k,known}$	berechneter oder bekannter charakteristischer Tragwiderstand

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

$R_{test,known}$	bekanntes Versuchsergebnis
R_{MNA}	berechneter plastischer Widerstand auf der Grundlage der MNA-Berechnung
R_{pl}	plastischer Widerstand des untersuchten Tragwerks oder Querschnitts
$R_{pl,d}$	Bemessungswert des plastischen Widerstands des untersuchten Tragwerks
$R_{pl,k}$	charakteristischer plastischer Widerstand des untersuchten Tragwerks
V_X	Variationskoeffizient des Verhältnisses zwischen den gemessenen (oder bekannten) und den berechneten Ergebnissen
V_{Ed}	Bemessungswert der Querkraft
$V_{pl,Rd}$	Bemessungswert der plastischen Querkrafttragfähigkeit

3.2.2 Lateinische Kleinbuchstaben

a	Länge eines Beulfeldes
b	Breite eines Beulfeldes
b_f	Flanschbreite
a_{rs}, b_{rs}, c_{rs}, d_{rs}, e_{rs}, f_{rs}, g_{rs}, h_{rs}	geometrische Parameter der Eigenspannungsverteilung
e_0	äquivalente Vorkrümmung
$e_{0,dist}$	Imperfektionsgröße bei Distortional Buckling
f_u	Zugfestigkeit
f_y	Streckgrenze
f_{yb}	Grundstreckgrenze von kaltgeformtem Stahl
h_w	Höhe des Stegbleches
k_n	charakteristischer Fraktilwert
m	zweiter Verfestigungsexponent für das Ramberg-Osgood-Werkstoffmodell für kaltgeformten Stahl und nichtrostende Stähle
m_X	Mittelwert des Verhältnisses zwischen den gemessenen (oder bekannten) und den berechneten Ergebnissen
n	Materialkoeffizient für das Ramberg-Osgood-Materialmodell für kaltgeformten Stahl und nichtrostende Stähle
r	Kerbradius für die Ermüdungsbemessung
t	Blechdicke

AVA Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

t_w Stegdicke

t_0 Wanddicke des Gurts bei Hohlprofilen

t_1 Wanddicke der Strebe bei Hohlprofilen

3.2.3 Griechische Großbuchstaben

Θ Flankenwinkel des Schweißnahtmodells für die Ermüdungsbemessung

Ω projektspezifischer Parameter, der das maximal zulässige Niveau der plastischen Dehnung in dem Tragwerk definiert

3.2.4 Griechische Kleinbuchstaben

α Imperfektionsbeiwert

$\alpha_{ult,k}$ minimaler Vergrößerungsfaktor für die Einwirkungen, um den charakteristischen Wert des Widerstands des kritischen Querschnitts zu erreichen

β_{LT} Referenzwert der bezogenen Vorkrümmung für Biegedrillknicken

ε Dehnung

$\varepsilon_{0,2}$ Gesamtdehnung der zugehörigen 0,2-%-Dehngrenze für das Ramberg-Osgood-Werkstoffmodell für kaltgeformten Stahl und nichtrostende Stähle

$\varepsilon_{1,0}$ Gesamtdehnung bei der zugehörigen 1-%-Dehngrenze für das Ramberg-Osgood-Werkstoffmodell für kaltgeformten Stahl und nichtrostende Stähle

ε_{csm} maximal zulässige plastische Dehnung nach der Continuous Strength Method

ε_{Ed} Bemessungswert der maximalen Längsstauchung

ε_{mb} maximale plastische Dehnung für Schrauben

ε_{mpb} maximal zulässige plastische Dehnung für Schrauben

ε_{sh} Verfestigungsdehnung für warmgewalzte Stähle

ε_{true} wahre Dehnung

ε_u totale Dehnung beim Erreichen der Zugfestigkeit

ε_y Dehnung bei Erreichen der Streckgrenze

$\bar{\lambda}$ bezogener Schlankheitsgrad

σ Spannung

$\sigma_{0,05}$ Spannung zugehörig zu 0,05-%-Dehngrenze für das Ramberg-Osgood-Werkstoffmodell für kaltgeformten Stahl und nichtrostende Stähle

$\sigma_{1,0}$ Spannung zugehörig zu 1-%-Dehngrenze für das Ramberg-Osgood-Werkstoffmodell für kaltgeformte Stähle und nichtrostende Stähle

$\sigma_{0,4t}$ berechnete Strukturspannung in einem Abstand von 0,4 t von dem Schweißnahtübergang für die Anwendung beim Ermüdungsnachweis

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

$\sigma_{0,5t}$ berechnete Strukturspannung in einem Abstand von 0,5 t von dem Schweißnahtübergang für die Anwendung beim Ermüdungsnachweis

$\sigma_{0,9t}$ berechnete Strukturspannung in einem Abstand von 0,9 t von dem Schweißnahtübergang für die Anwendung beim Ermüdungsnachweis

$\sigma_{1,0t}$ berechnete Strukturspannung in einem Abstand von 1,0 t von dem Schweißnahtübergang für die Anwendung beim Ermüdungsnachweis

$\sigma_{1,5t}$ berechnete Strukturspannung in einem Abstand von 1,5 t von dem Schweißnahtübergang für die Anwendung beim Ermüdungsnachweis

σ_{4mm} berechnete Strukturspannung in einem Abstand von 4 mm von dem Schweißnahtübergang für die Anwendung beim Ermüdungsnachweis

σ_{5mm} berechnete Strukturspannung in einem Abstand von 5 mm von dem Schweißnahtübergang für die Anwendung beim Ermüdungsnachweis

σ_{8mm} berechnete Strukturspannung in einem Abstand von 8 mm von dem Schweißnahtübergang für die Anwendung beim Ermüdungsnachweis

σ_{12mm} berechnete Strukturspannung in einem Abstand von 12 mm von dem Schweißnahtübergang für die Anwendung beim Ermüdungsnachweis

σ_{15mm} berechnete Strukturspannung in einem Abstand von 15 mm von dem Schweißnahtübergang für die Anwendung beim Ermüdungsnachweis

σ_{rt} Zugeigenspannung

σ_{rc} Druckeigenspannung

σ_{ft}, σ_{wt} Zugeigenspannung von geschweißten oder lasergeschweißten I-Profilen und geschweißten Kastenprofilen aus nichtrostendem Stahl

σ_{fc}, σ_{wc} Druckeigenspannung von geschweißten oder lasergeschweißten I-Profilen und geschweißten Kastenprofilen aus nichtrostendem Stahl

$\sigma_{cr,cs}$ elastische lokale Verzweigungsspannung des Gesamtquerschnitts

$\sigma_{cr,d}$ elastische Verzweigungsspannung für Distortional Buckling

σ_{nom} Nennspannung für die Ermüdungsbemessung

σ_{HS} Strukturspannung (Hot-Spot-Spannung) für die Ermüdungsbemessung

σ_{EN} wirksame Kerbspannung für die Ermüdungsbemessung

σ_{true} Wahre Spannung

ρ Abminderungsbeiwert zur Bestimmung des Bemessungswerts der abgeminderten plastischen Momententragfähigkeit unter Berücksichtigung von Querkräften

ρ_{csm} Abminderungsbeiwert für die maximal zulässige Dehngrenze in Balkenelementen unter Berücksichtigung der Interaktion zwischen Biegung und Querkräften

γ_{FE} Modellfaktor zur Abdeckung der Unschärfen des numerischen Modells und des durchgeführten Berechnungstyps

AVA Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

4 Grundlagen für die Tragwerksplanung und Modellierung

(1) Die Grundlage für die Tragwerksplanung mit numerischen Verfahren muss den allgemeinen Regeln in EN 1990 und EN 1991 (alle Teile) und den besonderen Bemessungsvorschriften für Stahlbauten in den entsprechenden Teilen von EN 1993-1 (alle Teile) entsprechen.

(2) Stahlbauten, die nach diesem Dokument bemessen werden, müssen nach EN 1090-2 und/oder EN 1090-4 ausgeführt werden, wobei Werkstoffe und Produkte zu verwenden sind, die in den entsprechenden Teilen von EN 1993 oder in den entsprechenden Material- und Produktspezifikationen angegeben sind.

(3) Dynamische Einwirkungen sollten entsprechend dem jeweiligen Anwendungsteil von EN 1993 (alle Teile) berücksichtigt werden. Dieses Dokument enthält keine Regeln für die dynamische Berechnung.

(4) Dieses Dokument enthält Bemessungsregeln für die

a) Bemessung nach Grenzzuständen der Tragfähigkeit (ohne Ermüdung),

b) Ermüdungsbemessung und

c) Bemessung nach Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit.

(5) Die Bemessung auf der Grundlage der Finite-Elemente-Berechnung darf mit einer der beiden folgenden Verfahren durchgeführt werden, die als unterschiedlich anerkannt und im Bemessungsprozess unterschiedlich behandelt werden sollten:

a) numerische Bemessungsverfahren;

b) numerische Simulation.

(6) Die Bemessungsverfahren unterscheiden sich hinsichtlich (i) der verwendeten geometrischen und materiellen Eigenschaften, (ii) der Berechnungsergebnisse, (iii) des Validierungs- und Verifizierungsverfahrens, (iv) des weiteren Verfahrens zur Bewertung der Ausgabedaten und (v) der Zuverlässigkeitsbeurteilung der Berechnungsergebnisse.

(7) Numerische Bemessungsverfahren dürfen je nach Berechnungstyp und der Ergebnisse unterschiedlich sein; Bemessungsregeln werden auf der Grundlage der folgenden zwei Kategorien angegeben:

a) Berechnung, die einen anschließenden Nachweis erfordert;

b) direkter Widerstandsnachweis.

(8) Bei Berechnungen, die einen anschließenden Nachweis erfordern, sollte eine der folgenden Berechnungsverfahren verwendet werden: LA, LBA, GNA, GNIA, MNA. Die Ergebnisse der Berechnung sind verschiedene Systemantwortgrößen, die bei der Nachweisführung des untersuchten Tragwerks weiter zu verwenden sind.

(9) Beim direkten Widerstandsnachweis sollte eine der folgenden Berechnungsverfahren verwendet werden: MNA, GMNA, GMNIA. Das Ergebnis der Berechnung ist die nach 8.1.5 ermittelte Tragfähigkeit des untersuchten Tragwerks.

(10) Bei numerischen Bemessungsverfahren sollten nominelle Werte für die geometrischen und Steifigkeitswerte, z. B. Elastizitätsmodul, verwendet werden. Festigkeitswerte, z. B. Werkstoffeigenschaften, werden als nominelle Werte aus den Produktnormen übernommen, welche Fraktilwerte darstellen.

(11) Numerische Simulationen dürfen zur Ergänzung oder Erweiterung von Laborversuchen bei der versuchsbasierten Bemessung eingesetzt werden.

Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

ANMERKUNG Der Nationale Anhang kann weitere Regeln und Einschränkungen für die Anwendung der numerischen Simulation enthalten.

(12) Bei numerischen Simulationen sollten gemessene (oder mittlere) Werte für geometrische und Werkstoffeigenschaften verwendet werden. Das Ergebnis der Berechnung ist der Widerstand des untersuchten Tragwerks.

(13) Die Anwendung von auf der Finite-Elemente-Berechnung basierenden Bemessungsverfahren sollte im Vergleich zu bewährten traditionellen Bemessungsverfahren keine signifikanten Widerstandssteigerungen mit sich bringen, es sei denn, es wird durch Validierung und Verifizierung des verwendeten Finite-Elemente-Modells nach Abschnitt 7, unter Berücksichtigung aller relevanten Versagensmodi, nachgewiesen, dass dies angemessen ist.

(14) Die Regeln von prEN 1993-1-14 sind unabhängig von der verwendeten Software. Die Fähigkeiten der gewählten Software sollten jedoch vom Tragwerksplaner/von der Tragwerksplanerin überprüft werden, und es sollte bestätigt werden, dass die Software für den verwendeten Grenzzustandsnachweis anwendbar ist (siehe Abschnitt 8).

(15) Zur Sicherstellung der Bemessungsqualität sollte die Anwendbarkeit der Bemessung unter Verwendung numerischer Verfahren mit den Qualifikations- und Erfahrungsstufen für die Bemessung (DQLs) verknüpft werden.

ANMERKUNG Geeignete Mindestqualifikationen und -erfahrungen des Personals, das Tragwerke mit numerischen Modellen entwirft, konstruiert und bemisst, können im Nationalen Anhang auf der Grundlage von EN 1990:2023, Tabelle B.1, festgelegt werden.

5 Modellierung

5.1 Geometrische Modelle

5.1.1 Allgemeine Regeln für die geometrische Modellierung und Diskretisierung

(1) Das gewählte finite Element (lineares Element oder Element höherer Ordnung) muss mit der gewählten Netzdichte, der Komplexität der Geometrie (Krümmung) und dem Lösungsverfahren in Zusammenhang stehen, um sicherzustellen, dass die Ergebnisse sowohl die Validierungs- als auch die Verifizierungsanforderungen erfüllen.

(2) Die Diskretisierung des gewählten Modells sollte angemessen sein und den geometrischen Eigenschaften des Tragwerks entsprechen. Ein feineres Netz darf in Bereichen verwendet werden, in denen große Spannungs-, Dehnungs- oder Temperaturgradienten zu erwarten sind. Die Formeigenschaften der Elemente sollten von geeigneter Qualität sein, um die Genauigkeit zu gewährleisten (Seitenverhältnis der Elemente, Jacobi-Verhältnis, Verwölbungsfaktor usw.).

(3) An Stellen mit hohen Spannungs- oder Dehnungskonzentrationen oder an Stellen, an denen ein Versagen des Tragwerks zu erwarten ist, sollte eine Netzverfeinerung vorgenommen werden, um die erforderliche Genauigkeit zu gewährleisten, mit Ausnahme des Ermüdungsnachweises, bei dem vordefinierte Netzverfeinerungen nach 8.2 angewendet werden.

(4) Die Genauigkeit des gewählten FE-Netzes (Dichte, gewählte Elementtypen) sollte durch eine Modellverifizierung nach Abschnitt 7 nachgewiesen werden.

(5) Kaltgeformte Stahlquerschnitte sollten mit abgerundeten Ecken modelliert werden, es sei denn, ihre Wirkung ist nach prEN 1993-1-3 nicht relevant.

AVA Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

(6) Wenn FE-Berechnungen zur Unterstützung von Bemessungsverfahren für die Verbindungen von kaltgeformten Bauteilen, die unter prEN 1993-1-3 fallen, verwendet werden, sollte das FE-Modell der Verbindungen durch Versuchsergebnisse validiert oder anhand geeigneter Bemessungsregeln nachgewiesen werden.

(7) Elementtypen (wie z. B. Fachwerk- oder Seilelemente usw.), die in den folgenden Abschnitten nicht behandelt werden, dürfen ebenfalls im numerischen Modell verwendet werden, wobei auf ihre Besonderheiten bei der Modellierung besonders zu achten ist.

(8) Eine geometrisch nichtlineare globale Tragwerksberechnung von Stabtragwerken (siehe 6.1.2) kann normalerweise auf der Theorie II. Ordnung basieren.

ANMERKUNG In der Regel ist die Genauigkeit von Berechnungen nach der Theorie II. Ordnung für die globale Tragwerksberechnung von Rahmentragwerken ausreichend. In Ausnahmefällen sind genauere geometrisch nichtlineare Berechnungen erforderlich, wenn die Verschiebungen groß genug sind, um die Spannungsresultanten in dem Tragwerk wesentlich zu verändern.

(9) Die Freiheitsgrade (DOFs) des gewählten Elements sollten innerhalb des modellierten Tragwerks und mit den gewählten Randbedingungen kompatibel gemacht werden.

5.1.2 Modelle mit Balkenelementen

(1) Die Systemachse des Balkenmodells sollte mit dem Schwerpunkt der Querschnitte identisch sein oder so gewählt werden, dass die Auswirkungen ihrer Verschiebung gegenüber dem Schwerpunkt der Querschnitte vernachlässigbar klein sind.

(2) Wenn die Systemachse von der Schwerpunktslinie abweicht (oder wenn Schubmittelpunkt und Schwerpunkt unterschiedlich sind und in der Berechnung eine Rolle spielen), sollten entweder Exzentrizitäten in die Bewertung einbezogen oder eine Schnittgrößenanpassung durch die numerische Berechnung vorgenommen werden.

(3) Bei der Verwendung eines Balkenmodells sollte das Verhalten der Verbindungen zwischen den Biegebauteilen berücksichtigt werden. Die angenommene Steifigkeit (gelenkige Verbindung, biegesteife Verbindung, nachgiebige Verbindung) sollte nach EN 1993-1-8 bestimmt werden.

(4) Wenn Torsions- und/oder Stabilitätsprobleme, die Torsion beinhalten (z. B. Biegedrillknicken, Drillknicken, Biegedrillknicken unter Normalkraft usw.), mit Hilfe von Balkenmodellen untersucht werden, sollten die verwendeten Elemente in der Lage sein, torsionsbedingte Verwölbungseffekte zu erfassen (z. B. Elemente mit 7 DOFs – 3 translatorisch, 3 rotatorisch und Verwölbung).

(5) Balkenelemente sollten Schubeffekte enthalten, sofern diese relevant sind.

(6) Dehngrenzen zur Bestimmung des Punktes, an dem Querschnittsversagen auftritt, sind in Anhang C angegeben.

ANMERKUNG Die Berechnung der elastischen kritischen Lasten (für Biegedrillknicken) für Bauteile unterschiedlicher Höhe kann die Verwendung spezieller Balkenelemente erfordern.

5.1.3 Modelle mit Platten- oder Schalenelementen

(1) Die Mittelfläche einer Platte oder einer Schale darf als Referenzfläche für die Modellierung verwendet werden. Es sollte darauf geachtet werden, dass die Auswirkungen von Exzentrizitäten und Versätzen von Mittelflächen im Modell angemessen berücksichtigt werden und dass sie das Tragverhalten des modellierten Tragwerks realistisch darstellen.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

(2) Exzentrizitäten und Stufen in der Mittelfläche sollten in das Modell einbezogen werden, wenn sie signifikante Biegeeffekte hervorrufen, weil die resultierenden Membranspannungen einem exzentrischen Pfad folgen.

(3) Für die Modellierung von 3D-Flächenkörpern (plattenförmige und kaltgeformte Bauteile und Schalen) sollten Schalenelemente mit 5 oder 6 DOFs an jedem Knoten verwendet werden. Die gewählten Elemente sollten in der Lage sein, dünne oder mäßig dicke Schalen zu modellieren. Spezielle Schalenelemente mit unterschiedlichen DOFs dürfen bei für Schalen spezifischen Problemfällen verwendet werden (z. B. Rotationsschalen, zylindrische, konische oder kugelförmige Schalen usw.).

(4) Zusätzliche Anforderungen an die Modellierung von Schalen sind in prEN 1993-1-6 enthalten.

(5) In Bereichen, in denen höhere Schubspannungen durch die Dicke auftreten, ist Vorsicht geboten.

5.1.4 Modelle mit Volumenelementen

(1) Für die Modellierung von Volumenkörpern, die entweder durch Lasten in der Ebene oder durch Lasten senkrecht zu ihrer Ebene belastet werden, dürfen ebene Elemente mit 2 oder 3 DOFs (nur translatorisch) an jedem Knoten für die Vernetzung verwendet werden (z. B. ebene Spannungen/Dehnungen oder achsensymmetrische Probleme).

ANMERKUNG Volumenelemente haben normalerweise 3 DOFs (nur translatorisch) an jedem Knoten. Die Anwendung von Lasten und Auflagern, die in einer mit diesen drei DOFs kompatiblen Weise definiert sind, erfordert besondere Sorgfalt (d. h. Biegemomente und Rotationslasten können nicht aufgebracht werden).

(2) Das gewählte Netz sollte an den Schnittpunkten, in den Verbindungsbereichen und an den Stellen, an denen sich die Dicke ändert, kontinuierlich sein.

(3) In Volumenmodellen können Schrauben durch Verwendung der Schaftfläche mit ihrem Nennquerschnitt modelliert werden, um die Steifigkeit der Schraube ausreichend genau zu berücksichtigen. Sind Spannungsnachweise am Schaft oder im Gewindebereich der Schraube zu führen, sollten entsprechende Modifikationen vorgenommen werden (z. B. darf der Schraubendurchmesser verwendet werden, der dem Spannungsquerschnitt der Schraube entspricht).

5.1.5 Mehrstufige und kombinierte Modelle

(1) Bei mehrstufigen oder kombinierten Modellen sollte eine kontinuierliche Last-, Verschiebungs- und Rotationsübertragung an den Schnittstellen zwischen den verschiedenen modellierten Teilen vorgesehen werden.

(2) Wenn verschiedene Modellebenen verwendet werden und verschiedene Tragelemente miteinander verbunden sind, sollten ihre Exzentrizitäten im Modell berücksichtigt werden.

(3) In mehrstufigen oder kombinierten Modellen dürfen Kontaktelemente oder andere Schnittstellenelemente verwendet werden, um die verschiedenen Modellteile zu verbinden. Die verschiedenen DOFs der verschiedenen Elemente sollten ebenso wie die Diskretisierung der verschiedenen Teile kompatibel gemacht werden.

(4) Die auf das Teilmodell einwirkenden Effekte sollten mit den Effekten des betreffenden modellierten Teils innerhalb des Gesamttragwerks identisch sein.

AVA Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

5.2 Auflager- und Lastmodelle

5.2.1 Definition von Auflagern

(1) Die Auflagerbedingungen im numerischen Modell sollten so gewählt werden, dass sie das Verhalten der physischen Auflager im realen Tragwerk realistisch oder konservativ wiedergeben.

(2) Bei Verwendung von Teilmodellen sollten die gewählten Auflager mit der Auflagerwirkung der angrenzenden Komponenten des Gesamtmodells übereinstimmen. Die gewählten Auflager sollten die Steifigkeitseigenschaften und die Verformungsfähigkeit der angrenzenden Bauteile berücksichtigen.

(3) Werden in Platten-, Schalen- oder Volumenmodellen konzentrierte oder punktuelle Auflager verwendet, können in der Nähe der Auflager numerische Spannungskonzentrationen auftreten, die untersucht werden sollten. Empfehlungen hierzu sind in Anhang B enthalten.

(4) Der Definition von Auflagern in nichtlinearen Berechnungen (insbesondere bei Platten-, Schalen- und Volumenelementen) sollte besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden, um unerwünschte Klemmeffekte zu vermeiden.

ANMERKUNG Auflager, die in einer linearen Berechnung als feste Auflager wirken, können in einer nichtlinearen Berechnung unerwünschte Versteifungseffekte erzeugen.

(5) Spezielle Randbedingungen für Schalen sind in prEN 1993-1-6 angegeben.

(6) Wenn ein Bauteil mit offenem Querschnitt Torsionsverdrehungen infolge von Instabilität oder einwirkenden Lasten ausgesetzt ist (z. B. kaltgeformte Bauteile, die in prEN 1993-1-3 behandelt werden), sollten die Verwölbungsbedingungen der Auflager und Verbindungen besonders beachtet werden.

(7) Sorgfalt sollte herrschen, wenn Symmetriebedingungen angewendet werden und die Symmetrieebene durch Auflager oder Lasten verläuft.

ANMERKUNG Symmetrie kann nur verwendet werden, wenn das erwartete Tragverhalten (Versagensmodus, Knickbiegelinie, Verformungsform, Last- und Auflagerbedingungen usw.) als symmetrisch nachgewiesen wurde.

(8) Bei achsensymmetrischen Schalen kann die Verwendung von Symmetrie in einem Segment (Kuchenstück) des Tragwerks wirksam sein. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, dass unsymmetrische Knickbiegelinien, die die Symmetrieebene kreuzen, nicht kritisch sind. Für weitere Informationen siehe prEN 1993-1-6.

5.2.2 Definition der Lasten

(1) Die im numerischen Modell aufgebrachte Belastung sollte mit dem gewählten Lösungsverfahren (last- oder weggesteuerte Berechnung) in Zusammenhang stehen.

(2) Wenn eine nichtlineare Berechnung verwendet wird, sollte die Angemessenheit des Modus der Lastdefinition nach Abschnitt 7 überprüft und nachgewiesen werden.

ANMERKUNG Last- und weggesteuerte Berechnungen können zu unterschiedlichen Ergebnissen führen, die sich aus den unterschiedlichen Lastübertragungs- und Lastverteilungsmodi im numerischen Modell ergeben.

(3) Wenn eine geometrisch nichtlineare Berechnung durchgeführt wird und Effekte aus einer Lasteinleitung, welche Knotenvorformung folgt, möglich sind, sollten diese entweder in die Berechnung einbezogen werden, oder es sollte nachgewiesen werden, dass ihr Einfluss vernachlässigbar ist.

Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

5.3 Werkstoffmodelle

5.3.1 Allgemeines

(1) Die Werkstoffeigenschaften sollten als nominelle Werte angenommen werden, wenn die Berechnung zur Unterstützung numerischer Bemessungsverfahren verwendet wird.

(2) Bei Berechnungen, die der Modellvalidierung dienen, sollten die gewählten Werkstoffeigenschaften auf einschlägigen Werkstoffprüfungen (Messwerten) beruhen.

(3) Die Spannungs-Dehnungsbeziehung von Stahl unter Druck darf als identisch mit derjenigen unter Zug angenommen werden.

(4) Die in dieser Norm angegebenen Werkstoffeigenschaften gelten für Temperaturen unter 100 °C. Für den Brandfall dürfen die mechanischen Eigenschaften von Kohlenstoffstahl und nichtrostenden Stählen aus prEN 1993-1-2 übernommen werden. Diese definierten Eigenschaften gelten nur für Aufheizraten im Brandfall (wie in prEN 1993-1-2 definiert) und sind nicht auf andere Aufheizraten anwendbar, insbesondere dann nicht, wenn anhaltend hohe Temperaturen auftreten.

(5) Bei erhöhten Temperaturen müssen die Auswirkungen von Grundkriechen nicht explizit betrachtet werden, sofern die in prEN 1993-1-2 angegebenen Spannungs-Dehnungsbeziehungen verwendet werden.

(6) Bei numerischen Bemessungsverfahren unter Verwendung von Berechnungstypen mit einem linear-elastischen Werkstoffgesetz nach Tabelle 6.1 sollte ein linear-elastisches Werkstoffmodell verwendet werden.

(7) Die in 5.3.2 und 5.3.3 definierten nichtlinearen Werkstoffmodelle sind für monotone Beanspruchung anwendbar. Für die Modellierung der zyklischen Plastizität siehe 5.3.4 und EN 1998-1.

(8) Für Stahlsorten bis S700, die eine ausgeprägte Streckgrenze und ein Fließplateau aufweisen, dürfen die Werkstoffmodelle in 5.3.2 verwendet werden.

(9) Für Stahlsorten bis S700, die eine ausgerundete Spannungs-Dehnungs-Kurve aufweisen, darf das Werkstoffmodell in 5.3.3 verwendet werden.

(10) Das von-Mises-Fließkriterium sollte für die Tragfähigkeitsberechnung von Stahlbauten mit Ausnahme des Ermüdungsnachweises verwendet werden, es sei denn, es liegen besondere Bedingungen vor, die es unangemessen machen.

(11) Wird die Verfestigung in der Berechnung berücksichtigt, darf das Verfestigungsmodell als isotrop für eine nichtzyklische Belastung oder kinematisch (oder eine Kombination aus beiden) für eine zyklische Belastung gewählt werden.

(12) Die in 5.3.2 und 5.3.3 angegebenen Werkstoffmodelle betreffen technische Spannungen und Dehnungen.

(13) Wenn die Berechnung eine Materialkontraktion beinhaltet (z. B. bei Volumenelementmodellen oder Schalen mit Dickenreduzierungseffekt), darf die wahre Spannungs-Dehnungs-Kurve bis zur Gleichmaß-dehnung, die aus dem quad-linearen Spannungs-Dehnungs-Modell berechnet wird, oder eine gemessene technische Zugspannungs-Dehnungs-Kurve nach Gleichung (5.1) und Gleichung (5.2) verwendet werden.

$$\sigma_{wahr} = \sigma \cdot (1 + \varepsilon) \tag{5.1}$$

$$\varepsilon_{wahr} = ln(1 + \varepsilon) \tag{5.2}$$

(14) Das Elastizitätsmodul und die Poissonzahl von Kohlenstoffstahl und nichtrostendem Stahl dürfen nach EN 1993-1-1:2022, 5.2.5 bzw. prEN 1993-1-4:2023, 5.1.5 angenommen werden.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

ANMERKUNG 1 Wenn Versuchsergebnisse modelliert werden, kann der gemessene Elastizitätsmodul übernommen werden. Wenn das elastische Knicken für das Tragwerk kritisch ist, kann ein reduzierter Wert des Moduls in Betracht gezogen werden.

ANMERKUNG 2 Es ist zu beachten, dass die Poissonzahl im elastischen Bereich bis zu 0,5 beträgt.

(15) Das Elastizitätsmodul darf auch bei GMNIA, die zur Bestimmung der Zugfestigkeit eines Elements oder eines Tragwerks durchgeführt wird, wie in (14) angegeben angenommen werden, es sei denn, die elastische Instabilität ist dominant. In letzterem Fall darf ein reduzierter Wert von 200 000 N/mm^2 für Kohlenstoffstahl und 191 000 N/mm^2 für nichtrostenden Stahl verwendet werden.

5.3.2 Werkstoffmodelle für warmgewalzte Stähle

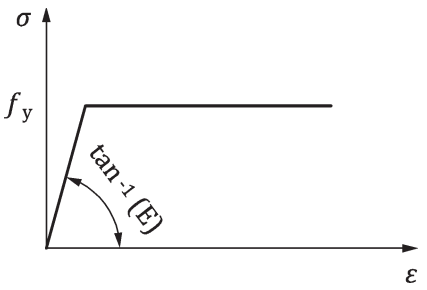
(1) Je nach Art der Berechnung und ihren Anforderungen an die Genauigkeit und die zulässigen Dehnungen dürfen die folgenden Modelle des Werkstoffverhaltens in materiell nichtlinearen Berechnungen verwendet werden, wie im Bild 5.1 dargestellt:

a) linear elastisches – perfekt plastisches Werkstoffmodell ohne Verfestigung;

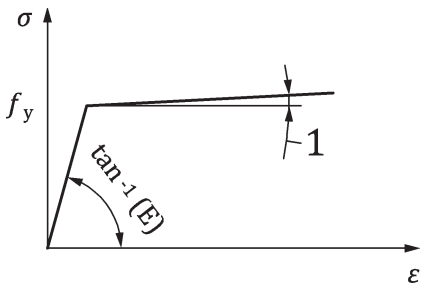
b) linear elastisches – perfekt plastisches Werkstoffmodell mit einer nominalen Plateausteigung für numerische Stabilität;

c) linear elastisches – linear verfestigendes plastisches Werkstoffmodell (quad-lineares Werkstoffmodell mit Verfestigung);

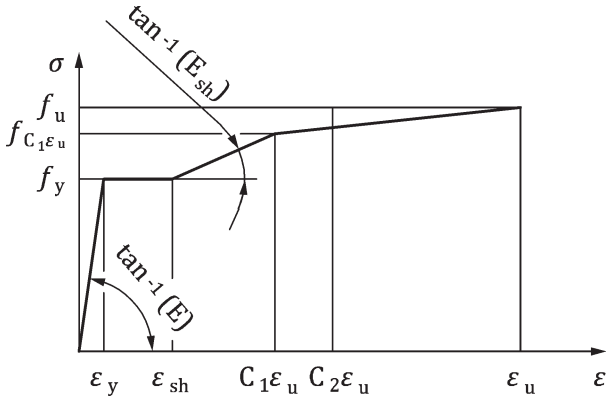
d) linear-elastisches – nichtlinear verfestigendes Werkstoffmodell auf der Grundlage von Coupon-Versuchsergebnissen unter Verwendung einer technischen oder wahren Spannungs-Dehnungs-Kurve.



a) ohne Verfestigung

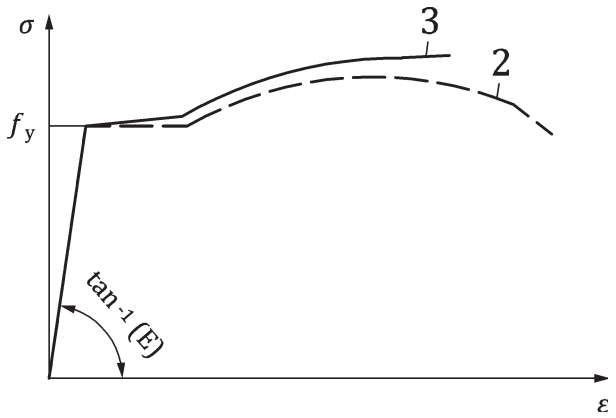


b) mit nominaler Plateausteigung



c) mit Fließplateau und Verfestigung

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09



d) mit gemessener Spannungs-Dehnungs-Kurve

Legende
1 $\tan^{-1}$ (E/10 000)
2 Spannungs-Dehnungs-Kurve aus dem Zugversuch
3 wahre Spannungs-Dehnungs-Kurve

Bild 5.1 — Modellierung von warmgewalzten Stählen

(2) Das quad-lineare Werkstoffmodell wird durch Gleichung (5.3) beschrieben und ist im Bild 5.1 (c) dargestellt.

$$\sigma_{(\varepsilon)} = \begin{cases} E_\varepsilon & \text{für } \varepsilon \le \varepsilon_y \\ f_y & \text{für } \varepsilon_y < \varepsilon \le \varepsilon_{sh} \\ f_y + E_{sh}\,(\varepsilon - \varepsilon_{sh}) & \text{für } \varepsilon_{sh} < \varepsilon \le C_1\varepsilon_u \\ f_{C_1\varepsilon_u} + \dfrac{f_u - f_{C_1\varepsilon_u}}{\varepsilon_u - C_1\varepsilon_u}(\varepsilon - C_1\varepsilon_u) & \text{für } C_1\varepsilon_u < \varepsilon \le \varepsilon_u \end{cases} \quad (5.3)$$

Dabei ist

f_y die Streckgrenze;

$\varepsilon_y = f_y/E$ die Fließdehnung;

f_u die Zugfestigkeit;

ε_{sh} die Verfestigungsdehnung ist, die gegeben ist durch:

$$\varepsilon_{sh} = 0{,}1\frac{f_y}{f_u} - 0{,}055 \text{ aber } 0{,}015 \le \varepsilon_{sh} \le 0{,}03 \quad (5.4)$$

ε_u die totale Dehnung beim Erreichen der Zugfertigkeit ist, die gegeben ist durch:

$$\varepsilon_u = 0{,}6\left(1 - \frac{f_y}{f_u}\right) \text{ aber } 0{,}06 \le \varepsilon_u \le A \quad (5.5)$$

Dabei ist

A die Verlängerung nach dem Bruch ist, die in der jeweiligen Werkstoffspezifikation festgelegt;

C_1 ein Werkstoffkoeffizient, der wie folgt angegeben wird:

Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

$$C_1 = \frac{\varepsilon_{sh} + 0{,}25(\varepsilon_u - \varepsilon_{sh})}{\varepsilon_u} \tag{5.6}$$

E_{sh} ein Verfestigungsmodul, das gegeben ist durch:

$$E_{\mathrm{sh}} = \frac{f_u - f_y}{C_2.\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}} \tag{5.7}$$

C_2 ein Werkstoffkoeffizient, der gegeben ist durch:

$$C_2 = \frac{\varepsilon_{sh} + 0{,}4(\varepsilon_u - \varepsilon_{sh})}{\varepsilon_u} \tag{5.8}$$

(3) Die Werkstoffmodelle gelten für Werkstoffe, die den Stahlgüten in EN 1993-1-1:2022, Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2 und den folgenden Produktnormen entsprechen: Normenreihe EN 10025, Normenreihe EN 10149 und Normenreihe EN 10210.

(4) Wenn das Werkstoffmodell aus EN 1993-1-1:2022, Tabelle 5.1 (d) verwendet wird, sollte für einen einachsigen Zugversuch nur der Teil der Spannungs-Dehnungs-Kurve vor der diffusen Einschnürung (d. h. die maximale technische Spannung) verwendet werden.

5.3.3 Werkstoffmodelle für kaltgeformten Stahl, hochfesten Stahl und nichtrostende Stähle

(1) Für kaltumgeformte, nichtrostende Stähle und für Stähle bis S700, die eine ausgerundete Spannungs-Dehnungs-Kurve aufweisen, darf das zweistufige Ramberg-Osgood-Modell nach Gleichung (5.9), das im Bild 5.2 dargestellt ist, für materiell nichtlineare Berechnungen verwendet werden.

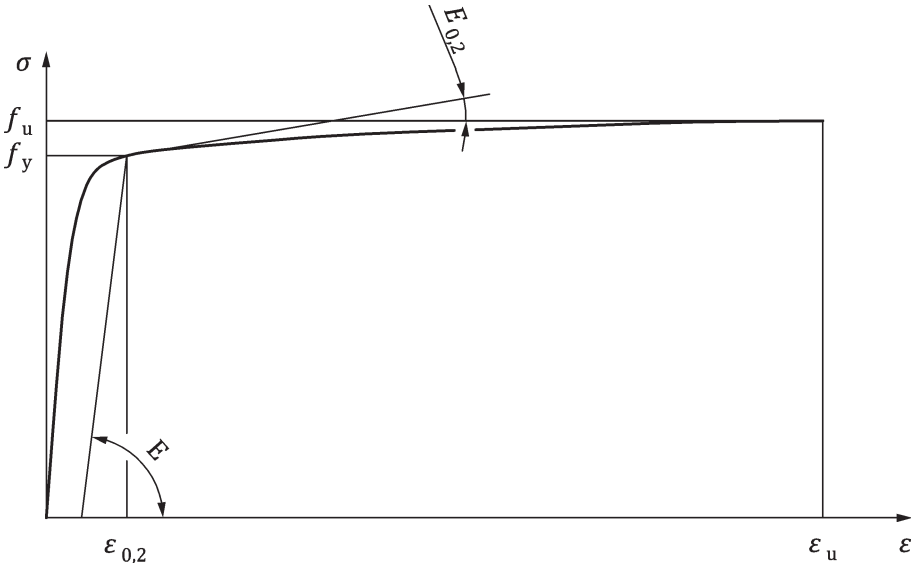


Bild 5.2 — Zweistufiges Ramberg-Osgood-Modell

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

$$\varepsilon = \begin{cases} \dfrac{\sigma}{E} + 0{,}002\left(\dfrac{\sigma}{f_y}\right)^n & \text{für } \sigma \le f_y \\ \dfrac{\sigma - f_y}{E_{0,2}} + \left(\varepsilon_u - \varepsilon_{0,2} - \dfrac{f_u - f_y}{E_{0,2}}\right)\left(\dfrac{\sigma - f_y}{f_u - f_y}\right)^m + \varepsilon_{0,2} & \text{für } f_y < \sigma \le f_u \end{cases} \quad (5.9)$$

Dabei ist

σ die Spannung;

ε die Dehnung;

E, f_y und f_u in EN 1993-1-1 für Kohlenstoffstähle und in EN 10088 für nichtrostende Stähle angegeben;

n ein Koeffizient, der aus Tabelle 5.1 entnommen oder anhand gemessener Eigenschaften berechnet werden kann und sich wie folgt berechnet:

$$n = \frac{ln(4)}{ln\left(\dfrac{f_y}{\sigma_{0,05}}\right)} \quad (5.10)$$

wobei $\sigma_{0,05}$ die Spannung mit Bezug auf die 0,05-%-Dehngrenze ist.

Tabelle 5.1 — Werte von *n*

Stahl	Koeffizient *n*
Kaltgeformte Stähle	8
Austenitische nichtrostende Stähle	7
Ferritische nichtrostende Stähle	14
Nichtrostende Duplexstähle	8
Stahlsorten von S500 – S700	14

$E_{0,2}$ der Tangentenmodul der Spannungs-Dehnungskurve bei der Streckgrenze, definiert als:

$$E_{0,2} = \frac{E}{1 + 0{,}002\, n\, \dfrac{E}{f_y}} \quad (5.11)$$

ε_u die totale Dehnung beim Erreichen der Zugfertigkeit, die gegeben ist durch:

$$\varepsilon_u = \begin{cases} 0{,}6\left(1 - \dfrac{f_y}{f_u}\right) \text{für kaltgeformte Stähle und ferritische nichtrostende Stähle} \\ 1 - \dfrac{f_y}{f_u} \text{ für austenitische und Duplex nichtrostende Stähle} \end{cases} \quad (5.12)$$

aber $\varepsilon_u \le A$, wobei A die in den Werkstoffspezifikationen angegebene Bruchdehnung ist.

m der zweite Verfestigungsexponent, der aus Gleichung (5.13) bestimmt werden kann;

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

$$m = \begin{cases} 1 + 3{,}3\frac{f_y}{f_u} \text{ für kaltgeformte Stähle} \\ 1 + 2{,}8\frac{f_y}{f_u} \text{ für alle nichtrostenden Stähle} \end{cases} \quad (5.13)$$

oder aus gemessenen Eigenschaften wie folgt berechnet wird:

$$m = \frac{ln\left(0{,}008 + \frac{\sigma_{1,0} - f_y}{E} - \frac{\sigma_{1,0} - f_y}{E_{0,2}}\right) - ln\left(\varepsilon_u - \varepsilon_{0,2} - \frac{f_u - f_y}{E_{0,2}}\right)}{ln(\sigma_{1,0} - f_y) - ln(f_u - f_y)} \quad (5.14)$$

wobei $\sigma_{1,0}$ die Spannung zugehörig zur 1%igen Dehngrenze und $\varepsilon_{1,0}$ die entsprechende Gesamtdehnung bei $\sigma_{1,0}$ ist.

ANMERKUNG Für duktilere Werkstoffen kann die angenäherte Beziehung $\left(\varepsilon_u - \varepsilon_{0,2} - \frac{f_u - f_y}{E_{0,2}}\right) \approx \varepsilon_u$, eine einfachere Version von Gleichung (5.9) liefern.

(2) Als Alternative zum zweistufigen Ramberg-Osgood-Modell können die oben genannten Kurven durch multilineare Werkstoffmodelle dargestellt werden.

ANMERKUNG Ist das Tragwerk im Verfestigungsbereich knickgefährdet und reagiert es empfindlich auf kleine Änderungen des Tangentenmoduls (z. B. bei Schalen), führt ein mehrlineares Modell häufig zu numerischen Konvergenzproblemen und abrupten Widerstandsänderungen bei kleinen Änderungen der Belastung oder Geometrie.

(3) Als Alternative zu den Modellen des Ramberg-Osgood Typs darf das im Bild 5.3 dargestellte quad-lineare Werkstoffmodell für kaltgeformte Bauteile, die unter prEN 1993-1-3 fallen, verwendet werden. Eine weitere Vereinfachung dieses Werkstoffmodells kann auch mit $E_1 = E_2 = E$ und $E_3 = E/100$ vorgenommen werden.

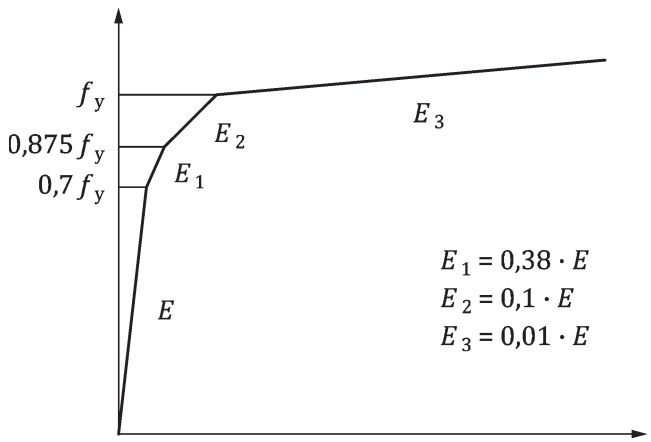


Bild 5.3 — Quad-lineares Werkstoffmodell für kaltgeformte Bauteile

5.3.4 Fortgeschrittene Werkstoffmodelle

(1) Wenn der maßgebende Versagensmodus Bruch ist (Zugelemente, Schrauben, Bleche mit großen plastischen Verformungen) und der Widerstand der Tragfähigkeit nach Grenzzuständen mit einem nichtlinearen Werkstoffmodell berechnet wird, sollten kumulative Schädigungsmodelle verwendet werden, wenn keine Dehngrenze nach Kriterium C2 in 8.1.5(2) verwendet wird.

(2) Bei Berechnungen mit zyklischer Belastung, die zu Plastizität führt, ist die Form der Verfestigungsregel aufgrund des Bauschinger-Effekts von wesentlicher Bedeutung. Bei solchen Berechnungen sollte ein Werkstoffmodell mit kinematischer oder kombinierter kinematischer und isotroper Verfestigung verwendet werden.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

5.4 Imperfektionen

5.4.1 Imperfektionenstypen

(1) Wenn Imperfektionen im FE-Modell enthalten sind, sollten sie die Auswirkungen geometrischer Abweichungen von der perfekten Form, Eigenspannungen und Randbedingungsfehler (z. B. unebenes Fundament usw.) berücksichtigen.

(2) Es darf einer der folgenden Imperfektionstypen verwendet werden:

a) Geometrische Imperfektionen (siehe 5.4.2) und zusätzliche Eigenspannungen infolge der Herstellung (siehe 5.4.3);

b) äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen (siehe 5.4.4) durch Änderung der perfekten Form des Tragwerks; diese Ersatzimperfektionen sollen die Auswirkungen sowohl der geometrischen Imperfektionen als auch der Eigenspannungen abdecken und haben größere Größenordnungen als rein geometrische Imperfektionen.

(3) Geometrische Imperfektionen oder äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen dürfen im FE-Modell wie folgt definiert werden:

a) gemessene Imperfektionsform des Tragelements (nur für geometrische Imperfektionen zulässig);

b) Imperfektionsformen auf der Grundlage der in 5.4.4 definierten Funktionen oder Modifikation der perfekten Form durch eine vordefinierte Verschiebung (zulässig sowohl für geometrische als auch für äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen);

c) Imperfektionsform auf der Grundlage der linearen Eigenwertberechnung (LBA), die der Eigenform (Form) entspricht, die mit dem erwarteten Versagensmodus oder einer Kombination von Eigenformen verbunden ist (zulässig sowohl für geometrische als auch für äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen).

(4) Werden in einer nichtlinearen Berechnung geometrische Imperfektionen oder äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen verwendet, so sollten Imperfektionen angenommen werden, die jeder untersuchten Eigenform entsprechen.

(5) Bei der Berechnung jedes potenziellen Versagensmodus sollte die maßgebende Imperfektion (die realistischerweise auftreten könnte) gewählt werden. Wenn die Wahl dieses Modus nicht eindeutig ist, sollten mehrere Imperfektionsformen und -kombinationen untersucht werden.

(6) Wenn mehr als eine geometrische Imperfektionsform oder äquivalente geometrische Ersatz-imperfektionsform verwendet wird, sollten zusätzlich Kombinationen dieser Formen in Betracht gezogen werden. Die Regeln für die Formulierung solcher Kombinationen hängen von der Art des Tragwerks ab: Rahmen, plattenförmige Bauteile, kaltgeformte Bauteile oder Schalen. Die Regeln sind in 5.5 definiert.

(7) Bei der FE-Berechnung von kaltgeformten Bauteilen, die unter prEN 1993-1-3 fallen und bei denen Imperfektionen modelliert werden, sollten alle Imperfektionen mit äquivalenten geometrischen Ersatzimperfektionen modelliert werden.

(8) Die Richtung der gewählten Imperfektion(en) (Imperfektionskombinationen) sollte so gewählt werden, dass der geringste Widerstand ermittelt wird. Wenn die relevante Imperfektionsrichtung nicht offensichtlich oder durch andere Regeln definiert ist, sollten Imperfektionen mit unterschiedlichen Richtungen untersucht werden, sofern dies physikalisch möglich ist.

AVA Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

5.4.2 Geometrische Imperfektionen

(1) Geometrische Imperfektionen dürfen unter Berücksichtigung der Herstellungs- und Montageprozessen und der damit verbundenen Herstellungs- und Montagetoleranzen gewählt werden. Die Imperfektionsformen dürfen nach 5.4.1(3) gewählt werden.

ANMERKUNG 1 Für Querschnitts- und Bauteilimperfektionen können 80 % der in EN 1090-2 angegebenen geometrischen Herstellungstoleranzen (mindestens L/1 000) verwendet werden, sofern der Nationale Anhang keine anderen Werte angibt.

ANMERKUNG 2 Für Schalen enthält prEN 1993-1-6 die entsprechenden Angaben.

5.4.3 Eigenspannungen

(1) Eigenspannungen dürfen durch eine Spannungsverteilung dargestellt werden, die sich aus dem Fertigungsprozess ergibt.

(2) Eigenspannungen sollten durch initiale Dehnungen oder Spannungen im Modell dargestellt werden, die einen Gleichgewichtsspannungszustand ohne Einwirkung äußerer Lasten ergeben.

(3) Bei geschweißten Bauteilen darf der Spitzenwert der Zugeigenspannung bei Stahlsorten zwischen S235 und S700 mit der Streckgrenze des Werkstoffs gleichgesetzt werden. Der Spitzenwert der Druckeigenspannung hängt vom Herstellungsprozess und von der Geometrie des Querschnitts ab.

(4) Eigenspannungsverläufe für warmgewalzte und geschweißte I-Profile aus Kohlenstoffstahl sowie für geschweißte Kastenprofile können Bild 5.4 bis Bild 5.6 entnommen werden.

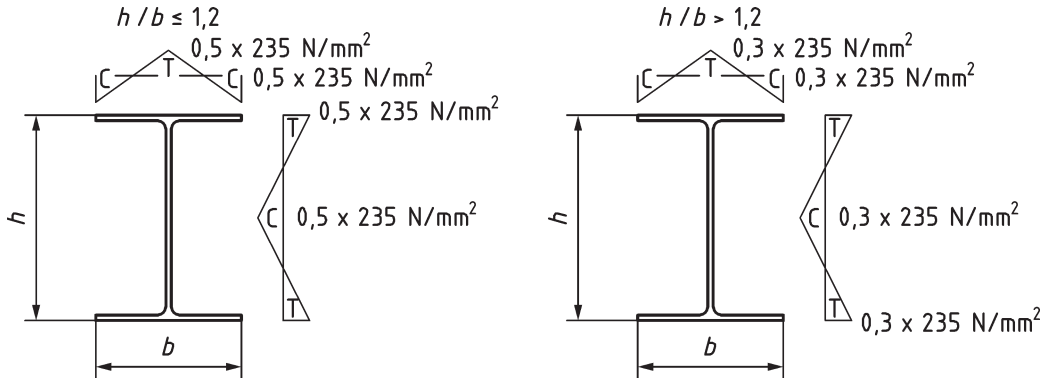


Bild 5.4 — Eigenspannungen für warmgewalzte I-Profile

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

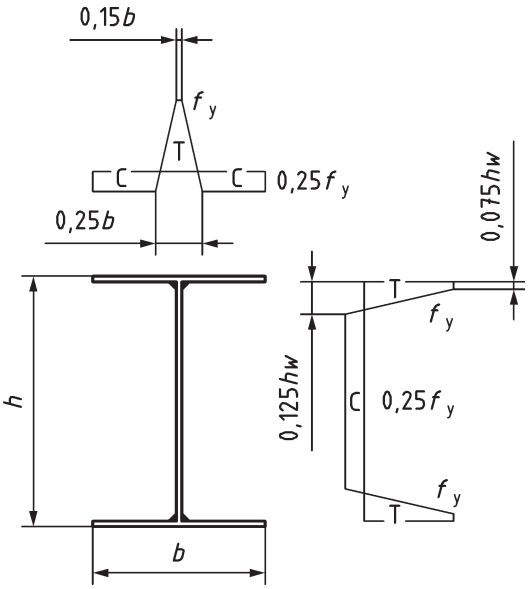
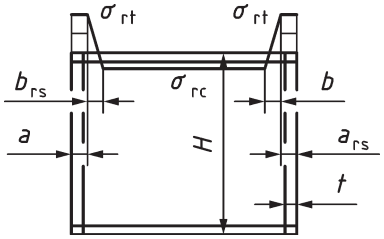


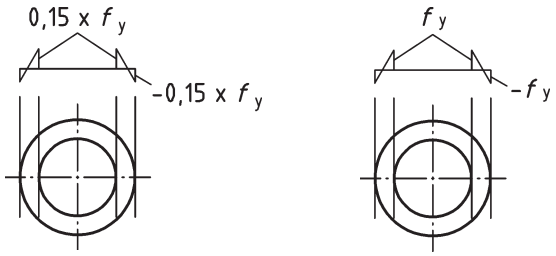
Bild 5.5 — Eigenspannungen für geschweißte I-Profile

Table 5.2 — Eigenspannungen für geschweißte Kastenprofile

H/t	**Art der Verschwei-ßung**	σ_{rt}/f_y	σ_{rc}/f_y	a_{rs}	b_{rs}	
10	—	1,0	−0,60	0	aus dem Gleich-gewicht	
20	Schwere Schweißung	1,0	−0,82	3 *t*	3 *t*	
20	Leichte Schweißung	1,0	−0,29	1,5 *t*	1,5 *t*	
40	Schwere Schweißung	1,0	−0,29	3 *t*	3 *t*	
40	Leichte Schweißung	1,0	−0,13	1,5 *t*	1,5 *t*	

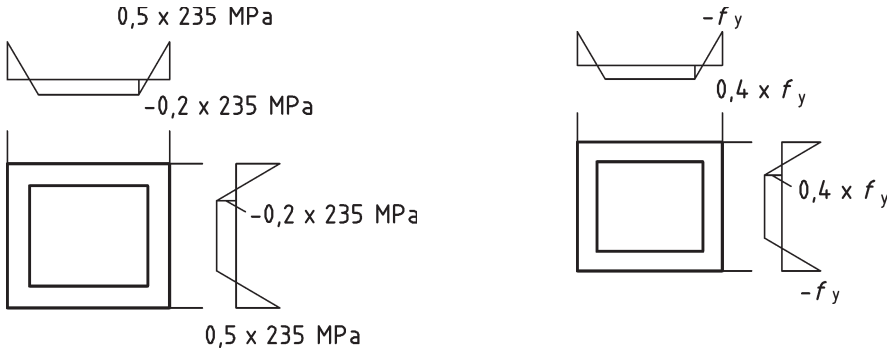
(5) Die Eigenspannungsverteilung für kreisförmige und rechteckige Hohlprofile können Bild 5.6 und Bild 5.7 entnommen werden.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09



a) warmgefertigt **b) kaltgefertigt**

Bild 5.6 — Eigenspannungen für kreisförmige Hohlprofile



a) warmgefertigt **b) kaltgefertigt**

Bild 5.7 — Eigenspannungen für rechteckige Hohlprofile

(6) Für geschweißte oder lasergeschweißte I-Profile und geschweißte Kastenprofile aus nichtrostendem Stahl können die Eigenspannungsverteilungen aus dem Bild 5.8, Tabelle 5.3 und Tabelle 5.4 verwendet werden.

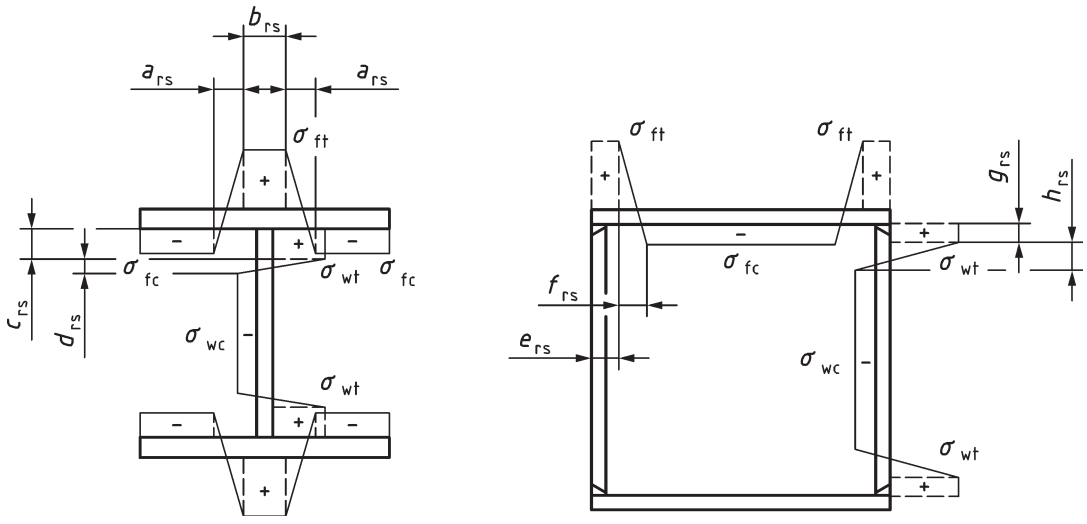


Bild 5.8 — Eigenspannungen für geschweißte Profile aus nichtrostendem Stahl

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

Tabelle 5.3 — Eigenspannungsmodell für geschweißte I-Profile aus nichtrostendem Stahl

Vorhersagemodell		$\sigma_{ft} = \sigma_{wt}$	$\sigma_{fc} = \sigma_{wc}$	a_{rs}	b_{rs}	c_{rs}	d_{rs}
Austenitisch	geschweißt	$0{,}8f_y$	aus dem Gleichgewicht	$0{,}225b_f$	$0{,}05b_f$	$0{,}025h_w$	$0{,}225h_w$
Duplex, ferritisch		$0{,}6f_y$					
Austenitisch, Duplex, Ferritisch	lasergeschweißt	$0{,}5f_y$	aus dem Gleichgewicht	$0{,}1b_f$	$0{,}075b_f$	$0{,}0375h_w$	$0{,}1h_w$

Tabelle 5.4 — Eigenspannungsmodell für geschweißte Kastenprofile aus nichtrostendem Stahl

Vorhersagemodell	$\sigma_{ft} = \sigma_{wt}$	$\sigma_{fc} = \sigma_{wc}$	e_{rs}	f_{rs}	g_{rs}	h_{rs}
Austenitisch	$0{,}8f_y$	aus dem Gleichgewicht	0 für $b_w/t(b_f/t) < 20$ $t_w + 0{,}025c_f$ für $b_w/t(b_f/t) \geq 20$	$5t_f$	0 für $b_w/t(b_f/t) < 20$ $0{,}025h_w$ für $b_w/t(b_f/t) \geq 20$	$5t_w$
Duplex, Ferritisch	$0{,}6f_y$					

(7) Eigenspannungen, die auf Laborversuchen beruhen, dürfen ebenfalls im Modell verwendet werden.

ANMERKUNG Positive Auswirkungen von Nachbehandlungsverfahren (z. B. bei warmgewalzten Profilen, die durch Rollrichten kontinuierlich gerichtet werden) auf die Eigenspannungsverteilung können berücksichtigt werden.

5.4.4 Äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen

(1) Äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen werden in die folgenden Untergruppen eingeteilt:

a) äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen für globale Tragwerke (z. B. Rahmen);

b) äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen für Bauteile;

c) äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen für Querschnitte (Platten);

d) äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen für Schalen.

(2) Sofern keine genauere Berechnung sowohl der geometrischen Imperfektionen des Bauteils als auch der Imperfektionen des Gesamttragwerks durchgeführt wird, dürfen äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen verwendet werden.

(3) Äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen für Gesamttragwerke (Rahmen) dürfen nach EN 1993-1-1:2022, 7.3.2 gewählt werden.

(4) Äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen zur Verwendung in der geometrisch nichtlinearen elastischen Berechnung (GNIA) und der Fließgelenktheorie II. Ordnung von Bauteilen dürfen nach EN 1993-1-1:2022, 7.3.3 oder EN 1993-2 gewählt werden. Andere spezifische äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen können in EN 1993 (alle Teile) definiert sein.

AVA Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

(5) Äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen zur Verwendung bei der geometrisch und materiell nichtlinearen Berechnung (GMNIA) von Bauteilen für das Biegeknicken können aus Gleichung (5.15) bestimmt werden. Die äquivalente Ersatzimperfektionsform kann entweder eine Vorkrümmung (Halbsinuswelle) oder eine Knickbiegelinie sein.

$$e_0 = \frac{\alpha L}{150} \text{ aber } e_0 \geq \frac{L}{1\,000} \tag{5.15}$$

Dabei ist

L die Bauteillänge;

α der Imperfektionsbeiwert ist, entnommen aus EN 1993-1-1 oder EN 1993-1-4.

ANMERKUNG Im Falle von Bauteilen mit starren Zwischeneinspannungen kann L gleich dem Abstand zwischen den starren Einspannungen gewählt werden.

(6) Äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen zur Verwendung bei der geometrisch und materiell nichtlinearen Berechnung (GMNIA) von Bauteilen für Biegedrillknicken können aus Gleichung (5.16) bestimmt werden.

$$e_0 = \alpha \cdot L \cdot \beta_{\mathrm{LT}} \text{ aber } e_0 \geq \frac{L}{1\,000} \tag{5.16}$$

Dabei ist

α der Imperfektionsbeiwert für das Biegeknicken um die schwache Achse, entnommen aus EN 1993-1-1 oder EN 1993-1-4;

β_{LT} die relative bezogene Vorkrümmung für das Biegedrillknicken nach Tabelle 5.5, die senkrecht zur Biegeebene anzusetzen ist.

Tabelle 5.5 — Äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen von Bauteilen für Biegedrillknicken

Form	β_{LT}
Vorkrümmung	Kombination von 1/150 (Sinushalbwelle) und 1/215 (volle Sinuswelle)
Eigenform	1/150

(7) Äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen für Querschnitte von plattenförmigen Bauteilen können aus Tabelle 5.6 und Tabelle 5.7 entnommen werden.

Tabelle 5.6 — Äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen für Querschnitte von plattenförmigen Bauteilen

Bauteil/Typ der Imperfektion	Form	Größe
Längsaussteifung mit Länge a	Vorkrümmung	min ($a/400$, $b/400$)
Blech mit kurzer Spannweite a or b	Eigenform	min ($a/200$, $b/200$)
Aussteifung oder Flansch mit Verwölbung	Vorverwölbung	1/50
Einseitig gestützte Elemente für kaltgeformte Bauteile – lokale	Eigenform	$b/125$
Einseitig gestützte Elemente für kaltgeformte Bauteile – distortional	Eigenform	siehe Gleichung (5.17)

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

(8) Die Imperfektionsgröße für das Distortional Buckling kann mit Gleichung (5.17) bestimmt werden:

$$e_{0,dist} = 0{,}3 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,d}}} \tag{5.17}$$

Dabei ist

t die Dicke des Blechs;

f_{yb} die Streckgrenze nach prEN 1993-1-3;

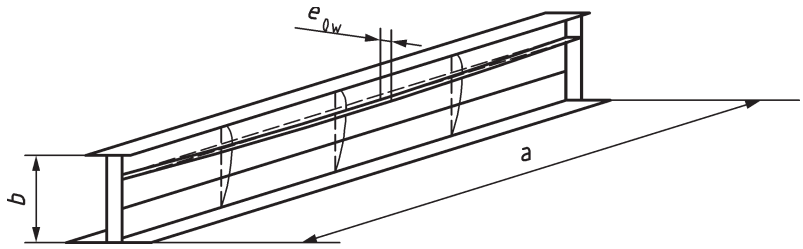
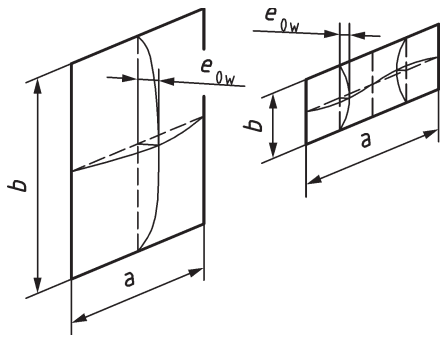
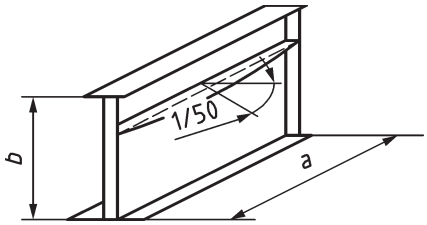
$\sigma_{cr,d}$ die elastische Verzweigungsspannung mit Querschnittsverformung.

(9) Äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen dürfen durch geeignete fiktive Kräfte ersetzt werden, die auf den Bauteil wirken. Die fiktive Kraft für die Imperfektion eines Rahmens und für die Vorkrümmung eines Bauteils darf nach EN 1993-1-1:2022, 7.3.2 und 7.3.3 gewählt werden.

(10) Bei kaltgeformten Bauteilen die unter prEN 1993-1-3 fallen, sollten die äquivalenten Ersatzimperfektionen der Gesamttragwerke und Bauteile nach prEN 1993-1-3 und die äquivalenten Ersatzimperfektionen der Querschnitte nach 5.4.4 (7) definiert werden.

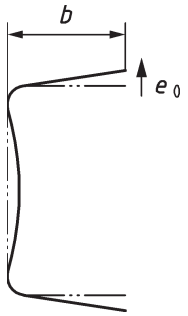
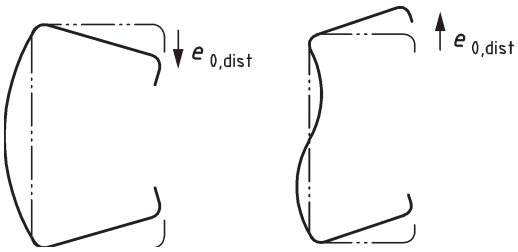
(11) Für Schalen sollten äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen nach prEN 1993-1-6 gewählt werden, abhängig von der Fertigungstoleranz-Güteklasse des Tragwerks.

Tabelle 5.7 — Äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen für Bleche und plattenförmige Bauteile

Imperfektionstypen	Bauteil
Längsaussteifung mit Länge a	
Blech	
Steife oder Flansch, die/der einer Verwölbung ausgesetzt ist	

Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

Imperfektionstypen	Bauteil
lokales Beulen von Außenbauteilen für kaltgeformte Bauteile	
Knicken mit Querschnittverformung von kaltgeformten Profilen	

5.5 Imperfektionskombinationen

(1) Wenn sowohl geometrische Imperfektionen als auch Eigenspannungen verwendet werden, sollten alle geometrischen Imperfektionen und die Eigenspannungen gleichzeitig mit ihren nominellen Werten nach 5.4.2 und 5.4.3 auf das Modell angewendet werden; es sind keine Kombinationsregeln erforderlich.

(2) Werden äquivalente geometrische Imperfektionen aus verschiedenen Untergruppen verwendet (z. B. Imperfektionen der Rahmen, Bauteilen und Querschnitte), sollte jede Imperfektion mit ihrer Größe nach 5.4.4 angesetzt werden. Die verschiedenen Imperfektionstypen können linear addiert werden.

(3) Bei äquivalenten Ersatzimperfektionen der Querschnitte in plattenförmigen Bauteilen kann die Kombination der Imperfektionen nach Tabelle 5.7 erforderlich sein. Die führende Imperfektion sollte zuerst gewählt werden, wobei die begleitenden Imperfektionen mit Größen, die auf 70 % des festgelegten Wertes reduziert sind, zu wählen sind. Jeder Imperfektionstyp sollte der Reihe nach als führende Imperfektion gewählt werden, die restlichen Imperfektionen sind als begleitende Imperfektionen zu betrachten.

(4) Wenn bei kaltgeformten Bauteilen, die unter prEN 1993-1-3 fallen, lokale und/oder Distortional Buckling Modi mit der globalen Eigenform kombiniert werden, ist der empfohlene Wert für die globale äquivalente Ersatzimperfektion $L/1\,000$, wobei L die Länge des Bauteils ist.

ANMERKUNG Bei Bauteilen mit starren Zwischeneinspannungen kann L gleich dem Abstand zwischen den starren Einspannungen gewählt werden.

(5) Bei kaltgeformten Bauteilen, die unter prEN 1993-1-3 fallen, sollten Kombinationen von lokalen Beul-Imperfektionen und denen aus Distortional Buckling untersucht werden, um den relevanten zu finden.

(6) Von allen untersuchten Imperfektionskombinationen (soweit physikalisch relevant) sollte diejenige, die den kleinsten Widerstandswert ergibt, zur Bestimmung des Tragwiderstands verwendet werden.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

6 Berechnung

6.1 Tragwerksberechnung

6.1.1 Allgemeines

(1) Nichtlinearitäten der Tragwerke entstehen aus folgenden Ursprüngen:

a) mittlere bis große Verschiebungen und/oder Dehnungen (geometrische Nichtlinearität);

b) nichtlineare Spannungs-Dehnungsbeziehungen (Fließ- und Material-Nichtlinearität);

c) Änderung der Konnektivität – Kontaktzustand (topologische/kontaktbedingte Nichtlinearität).

(2) Die lineare Berechnung darf verwendet werden, wenn keine der oben genannten Nichtlinearitäten für das FE-Modell erforderlich ist oder wenn die Nichtlinearität durch die Nachweisführung abgedeckt ist. Ist ein Ursprung der Nichtlinearität ein notwendiger Bestandteil der Bewertung, sollte eine nichtlineare Berechnung verwendet werden.

(3) Wird eine lineare Berechnung verwendet, gilt das Superpositionsprinzip, und die Lösung ist unabhängig von der Lastgeschichte.

(4) Wird eine nichtlineare Berechnung verwendet, sollte für jeden Lastfall oder jede Lastkombination eine separate Berechnung durchgeführt werden; eine Superposition ist nicht möglich.

(5) Geometrische Nichtlinearität wird durch eine Änderung der Geometrie des Tragwerks verursacht (mäßige bis große Verschiebungen relativ zur Geometrie und/oder Dehnungen in Bauteilen), die zu einer Änderung der Kraftverteilung oder der Steifigkeitsbedingungen führen. Die Ursachen der geometrischen Nichtlinearität sollten bei der Wahl einer geeigneten Simulation und in Abhängigkeit vom erwarteten Tragverhalten berücksichtigt werden.

(6) Nichtlinearitäten von Systemen veränderlicher Gliederung entstehen durch eine Änderung des Kontaktzustandes während der Berechnung.

(7) Material-Nichtlinearität ergibt sich aus der nichtlinearen Spannungs-Dehnungsbeziehung des Werkstoffs, wenn das Tragwerk oder ein Teil davon über den linear-elastischen Teil des Werkstoffmodells hinaus belastet wird. Bei der Berechnung sollte zwischen linearen und nichtlinearen Werkstoffmodellen unterschieden werden. Wenn ein nichtlineares Werkstoffmodell verwendet wird, sollte das Werkstoffgesetz im nichtlinearen Bereich zusammen mit der Verfestigung definiert werden.

ANMERKUNG 1 Nichtlinearitäten können auch durch elastische Tragelemente in einem System verursacht werden, bei denen eine abrupte Änderung der Steifigkeit auftritt, wie z. B. ein schlankes Zugbauteil, das in Druck übergeht (oder umgekehrt).

ANMERKUNG 2 Nichtlineares Verhalten bei Verbindungen ist eine weitere Ursache für Nichtlinearität der Tragwerke.

6.1.2 Berechnungstypen

(1) Die Wahl der relevanten Berechnung hängt von dem zu lösenden Problem ab. Die in Tabelle 6.1 aufgeführten Berechnungstypen sollten in Abhängigkeit von den relevanten Grenzzustandskriterien ausgewählt werden.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

Tabelle 6.1 — Berechnungstypen

Berechnungstypen	Verformungen	Werkstoff-gesetz	Geometrie
Linear elastische Berechnung (LA)	linear	linear elastisch	perfekt
Lineare Eigenwertberechnung (Eigenwertberechnung) (LBA)	Verzweigung	linear elastisch	perfekt
Materiell nichtlineare Berechnung (MNA)	linear	elastisch-plastisch	perfekt
Geometrisch nichtlineare Berechnung (GNA)	nichtlinear	linear elastisch	perfekt
Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung (GMNA)	nichtlinear	nichtlinear	perfekt
Geometrisch nichtlineare elastische Berechnung mit Imperfektionen (GNIA)	nichtlinear	linear elastisch	imperfekt
Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung mit Imperfektionen (GMNIA)	nichtlinear	nichtlinear	imperfekt

(2) Linear elastische Berechnung (LA)

Eine Berechnung, die das Tragverhalten auf der Grundlage von kleinen Verschiebungen und kleinen Dehnungen und linear elastischem Material vorhersagt, bezogen auf die perfekte Geometrie des modellierten Tragwerks. Die Linearität der Theorie ergibt sich aus den Annahmen einer Linearisierung aller physikalischen (linear-elastische Spannungs-Dehnungsbeziehung), geometrischen (kleine Dehnungen) und Gleichgewichts-bedingungen (kleine Verschiebungen).

(3) Lineare Eigenwertberechnung (LBA)

Eine lineare Eigenwertberechnung (LBA) sagt die Eigenwerte und Eigenmoden des Tragwerks voraus, bei denen das Tragwerk in verschiedene verformte Formen ausknicken kann, wobei davon ausgegangen wird, dass sich die Geometrie vor der Verzweigung nicht ändert und das Werkstoffmodell linear elastisch ist. Imperfektionen jeglicher Art werden ignoriert. Die Berechnung liefert die elastische Verzweigungslast des Tragwerks, definiert durch R_{cr}. Es wird empfohlen, die Anfangssteifigkeit zu verwenden, wenn nichtlineare Verbindungen in einer LBA-Berechnung modelliert werden.

(4) Materiell nichtlineare Berechnung (MNA)

Eine Berechnung des perfekten Tragwerks unter der Annahme von kleinen Verschiebungen, kleinen Dehnungen und einem elastisch-plastischen Werkstoffgesetz. Das Ergebnis der MNA-Berechnung ist der plastische Widerstand des Tragwerks (R_{MNA}), wobei die Auswirkungen von Geometrieänderungen ignoriert werden. Zur Bestimmung der plastischen Bezugslast des Tragwerks unter der gegebenen Lastkombination sollte das ideale, linear elastische perfekt plastische Werkstoffgesetz ohne Verfestigung angenommen werden.

(5) Geometrisch nichtlineare Berechnung (GNA)

Eine Berechnung des perfekten Tragwerks unter Verwendung eines linear elastischen Werkstoffgesetzes und unter Einbeziehung der geometrischen Nichtlinearität. Die GNA-Berechnung darf verwendet werden, um die Schnittgrößen, Spannungen oder Spannungsresultanten in dem perfekten Tragwerk einschließlich der Auswirkungen geometrischer Nichtlinearitäten zu bestimmen.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

(6) Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung (GMNA)

Eine Berechnung des perfekten Tragwerks unter Verwendung der in (4) und (5) beschriebenen kombinierten Nichtlinearitäten. Sie führt zum Widerstand R_{GMNA} ohne Berücksichtigung von Imperfektionen.

(7) Geometrisch nichtlineare Berechnung mit Imperfektionen (GNIA)

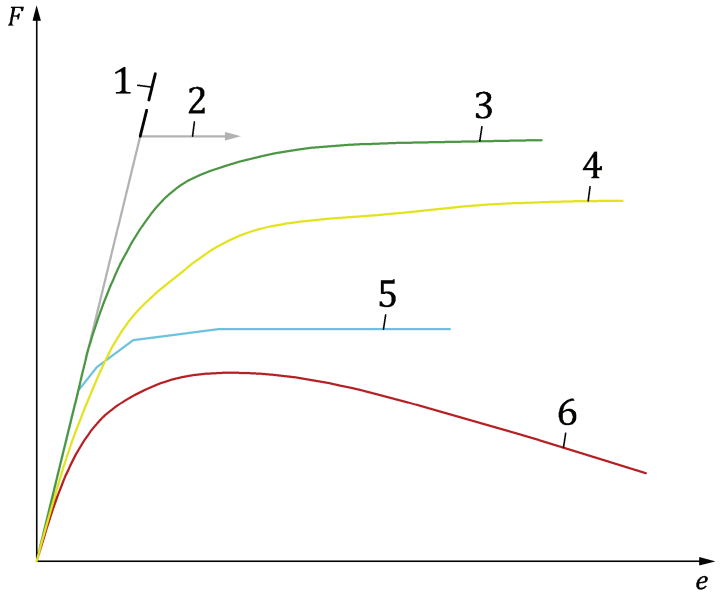
Eine Berechnung des imperfekten Tragwerks unter Verwendung eines linear elastischen Werkstoffgesetzes und unter Einbeziehung der in (5) beschriebenen geometrischen Nichtlinearitäten. Die Imperfektionen werden explizit einbezogen und können geometrische Abweichungen, Abweichungen in den Randbedingungen und die Auswirkungen von Eigenspannungen umfassen. Eine GNIA-Berechnung darf zur Bestimmung der Schnittgrößen, Spannungen oder Spannungsresultanten in dem imperfekten Tragwerk aufgrund geometrischer Nichtlinearität verwendet werden.

(8) Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung mit Imperfektionen (GMNIA)

Eine Berechnung des imperfekten Tragwerks unter Verwendung der in (4) und (5) beschriebenen Annahmen für kombinierte Nichtlinearitäten. Die Imperfektionen werden explizit einbezogen und dürfen geometrische Abweichungen, Abweichungen bei den Randbedingungen und die Auswirkungen von Eigenspannungen umfassen. Die GMNIA-Berechnung darf zur Bestimmung des charakteristischen Widerstands des Tragwerks (R_{GMNIA}) verwendet werden, die Imperfektionen, geometrische und materielle Nichtlinearitäten umfasst.

(9) Die erwarteten Ergebnisse und die grafische Erläuterung der verschiedenen Berechnungstypen sind im Bild 6.1 dargestellt.

ANMERKUNG Die LBA liefert nicht immer den höchsten Lastfaktor unter diesen verschiedenen Berechnungen, wie im Bild 6.1 angedeutet, da das Nachbeulverhalten des Tragwerks zu höheren Lasten führen kann, bevor ein vollständig nichtlineares Versagenskriterium erreicht wird (stabiler sekundärer Lastpfad).



Legende
1 lineare Berechnung: LA
2 elastische Verzweigung: LBA
3 geometrisch nichtlinear elastisch: GNA
4 geometrisch nichtlinear elastisch mit Imperfektionen: GNIA
5 plastisches Versagen: MNA
6 geometrisch und materiell nichtlinear mit Imperfektionen: GMNIA

Bild 6.1 — Grafische Erläuterung der verschiedenen Berechnungstypen

AVA Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

6.2 Thermische Berechnung

(1) Die für die thermische Berechnung angewandte FE muss auf den anerkannten Grundsätzen und Annahmen der Theorie der Wärmeübertragung beruhen.

(2) Bei thermomechanischen Problemen darf die durch Plastizität während der Verformung erzeugte Wärme vernachlässigt werden, wodurch die thermischen und mechanischen Probleme entkoppelt werden. Die instationäre Wärmeübertragungsgleichung darf zunächst gelöst werden, um die Entwicklung des Temperaturfeldes in den Tragelementen zu erhalten. Anschließend sollte die mechanische Berechnung des Problems durchgeführt werden. Wenn es wahrscheinlich ist, dass die mechanische Reaktion die Temperaturverteilung in den Tragelementen beeinflusst, sollte eine gekoppelte thermische und mechanische Berechnung durchgeführt werden.

(3) Bei thermomechanischen Problemen sollte das mechanische Reaktionsmodell die folgenden Faktoren berücksichtigen:

a) die nach prEN 1993-1-2 berechneten Temperaturen in Brandfällen;

b) Temperaturabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs;

c) geometrische Imperfektionen (falls zutreffend);

d) geometrisch nichtlineare Effekte (falls zutreffend);

e) nichtlineares Werkstoffverhalten (falls zutreffend).

(4) Das thermische Reaktionsmodell sollte Folgendes berücksichtigen:

a) relevante thermische Einwirkungen;

b) relevante Randbedingungen;

c) temperaturabhängige thermische Eigenschaften der Materialien;

d) Festlegung einer angemessenen Zeitschrittweite zur Vermeidung numerischer Oszillation der Lösung;

e) Festlegung eines Konvergenzkriteriums aufgrund der Nichtlinearität des Problems.

(5) Eigenspannungen werden im Brandfall als vernachlässigbar angesehen; nur geometrische Imperfektionen sollten bei thermomechanischen Problemen berücksichtigt werden.

7 Validierung und Verifizierung

7.1 Allgemeines

(1) Die Validierung und der Verifizierung sollten unter Beweis stellen, dass das Modell geeignet ist.

(2) Die Validierung und Verifizierung dürfen nach 7.2 und 7.3 durchgeführt werden. Beschränkungen und Ausnahmen sind in 7.1(6) bis (8) angegeben.

ANMERKUNG Für die Anwendung der Validierung und Verifizierung von FE-Ergebnissen gelten die angegebenen Regeln, sofern der Nationale Anhang keine zusätzlichen Informationen und Anwendungsregeln enthält.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09

(3) Validierung ist der Vergleich der numerischen Ergebnisse mit experimentellen Daten oder bekannten genauen Lösungen, um nachzuweisen, dass das Modell die zu modellierenden physikalischen Phänomene korrekt oder konservativ erfasst. Das numerische Modell sollte für jedes zu untersuchende Phänomen validiert werden.

(4) Die Verifizierung zeigt, dass die numerische Lösung eine gute Annäherung an die exakte mathematische Lösung ist und dass das numerische Modell richtig implementiert, verstanden und verwendet wird. Die Verifizierung sollte die Empfindlichkeit des Modells gegenüber der Diskretisierung überprüfen und die angemessene Anwendung des numerischen Modells und der Berechnung nachweisen.

(5) Die Validierungs- und Verifizierungsprozesse dürfen sich teilweise oder vollständig überschneiden. Zunächst sollte die Genauigkeit des numerischen Modells, die Diskretisierung des mathematischen Modells und das gewählte Berechnungsverfahren durch Verifizierung nachgewiesen werden. Die Validierung sollte der zweite Schritt sein, bei dem das physikalische Verhalten und die Ergebnisse des gewählten numerischen Modells oder der Modellierungsvorgehensweise verglichen werden.

(6) Wenn das numerische Modell für das numerische Bemessungsverfahren für Standardbemessungsfälle (Überprüfung der Versagensmodi mit dem bestehenden Eurocode-basierten Bemessungswiderstandsmodell) oder für Berechnungen verwendet wird, die einen anschließenden Nachweis erfordern, darf der Validierungs- und Verifizierungsprozess auf der Grundlage früherer Erfahrungen mit ähnlichen Modellen durchgeführt werden.

(7) Die in (6) angegebene Bemessungsregel sollte nicht angewendet werden, wenn eine Validierung und eine Verifizierung nach 4(13) erforderlich sind.

(8) Für Schalen sind besondere Validierungs- und Verifizierungsregeln nach prEN 1993-1-6 erforderlich.

(9) Eine grafische Darstellung des Validierungs- und Verifizierungsprozesses ist im Bild 7.1 dargestellt.

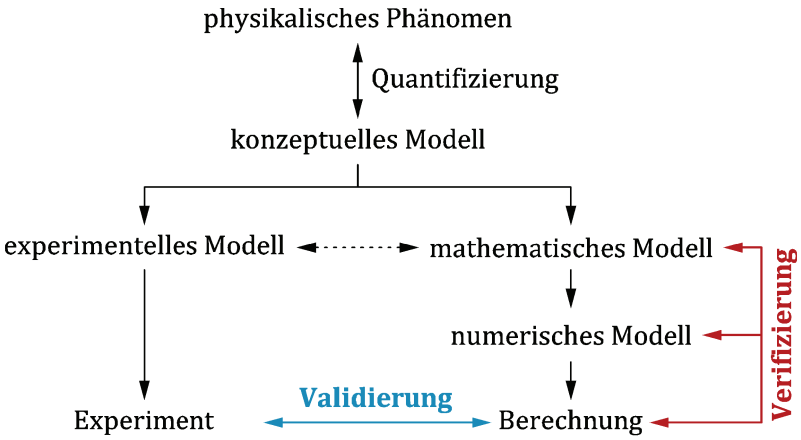


Bild 7.1 — Interpretation des Validierungs- und Verifizierungsprozesses

7.2 Verifizierung

(1) Der Verifizierungsprozess sollte die folgenden Prüfungen umfassen:

a) Überprüfung von Diskretisierungsfehlern (Untersuchung der Netzdichte);

b) Empfindlichkeitsprüfung der Eingabewerte;

c) Bestimmung der Empfindlichkeit gegenüber Imperfektionen (falls relevant);

d) ingenieurmäßige Beurteilung der Berechnungsergebnisse.

AVA Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN EN 1993-1-14:2023-09