

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE

Softwaregestützte Tragwerksberechnung
Verifikationsbeispiele
Software-based structural analysis
Verification examples

VDI 6201

Blatt 2 / Part 2

Ausg. deutsch/englisch
Issue German/English

Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.

The German version of this standard shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.

Inhalt	Seite
Vorbemerkung	2
Einleitung	2
1 Anwendungsbereich	2
2 Normative Verweise	2
3 Begriffe	2
4 Formelzeichen	2
5 Aufbau eines Pools von Evaluierungsbeispielen	5
6 Anforderungen an Form und Inhalt von Evaluierungsbeispielen	6
6.1 Klassifikation	6
6.2 Problembeschreibung	6
6.3 Referenzlösung	7
6.4 Ergebnisse	7
6.5 Bewertung	10
6.6 Referenzen	10
7 Sammlungen von Evaluierungsbeispielen	10
Anhang A Analytisches Verifikationsbeispiel	12
Anhang B Numerisches Verifikationsbeispiel	15
Anhang C Experimentelles Validierungsbeispiel	20
Anhang D Normenbasiertes Validierungsbeispiel	25
Anhang E Systemisches Validierungsbeispiel	31
Schrifttum	43

Contents	Page
Preliminary note	2
Introduction	2
1 Scope	2
2 Normative references	2
3 Terms and definitions	2
4 Symbols	2
5 Compiling a pool of evaluation examples	5
6 Requirements regarding the form and content of evaluation examples	6
6.1 Classification	6
6.2 Description of the problem	6
6.3 Reference solution	7
6.4 Results	7
6.5 Assessment	10
6.6 References	10
7 Collections of evaluation examples	10
Annex A Analytical verification example	12
Annex B Numerical verification example	15
Annex C Experimental validation example	20
Annex D Design-code-based validation example	25
Annex E Holistic validation example	31
Bibliography	43

VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG)

Fachbereich Bautechnik

VDI-Handbuch Bautechnik

This is a preview. Click here to purchase the full publication.

Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen (www.vdi.de/richtlinien), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Eine Liste der aktuell verfügbaren Blätter dieser Richtlinienreihe ist im Internet abrufbar unter www.vdi.de/6201.

Einleitung

In dieser Richtlinie befinden sich – ergänzend zur Richtlinie VDI 6201 Blatt 1 – Hinweise zur Gestaltung von Verifikationsbeispielen für Software zur Tragwerksberechnung.

1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie gilt für die Entwicklung und Herstellung von Software zur Tragwerksberechnung sowie für das Aufstellen und Prüfen von softwaregestützten Standsicherheitsnachweisen.

2 Normative Verweise

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieser Richtlinie erforderlich:

VDI 4700 Blatt 1:2015-10 Begriffe der Bau- und Gebäudetechnik

VDI 6201 Blatt 1:2015-12 Softwaregestützte Tragwerksberechnung; Grundlagen, Anforderungen, Modellbildung

3 Begriffe

Für die Anwendung dieser Richtlinie gelten die Begriffe nach VDI 4700 Blatt 1 und VDI 6201 Blatt 1.

4 Formelzeichen

In dieser Richtlinie werden die nachfolgend aufgeführten Formelzeichen verwendet:

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
A	Querschnittsfläche	mm ²
A_c	Betonnettofläche	mm ²

Preliminary note

The content of this standard has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the standard VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this standard without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions (www.vdi.de/richtlinien) specified in the VDI Notices.

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this standard.

A catalogue of all available parts of this series of standards can be accessed on the Internet at www.vdi.de/6201

Introduction

As a supplement to standard VDI 6201 Part 1, this standard contains notes on how to design verification examples for structural engineering software.

1 Scope

This standard applies to the development and production of structural engineering software as well as to the performance and checking of software-based structural analyses.

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this standard:

VDI 4700 Part 1:2015-10 Terminology of civil engineering and building services

VDI 6201 Part 1:2015-12 Software-based structural analysis; Fundamentals, requirements, modeling

3 Terms and definitions

For the purposes of this standard, the terms and definitions as per VDI 4700 Part 1 and per VDI 6201 Part 1 apply.

4 Symbols

The following symbols are used throughout this standard:

Symbol	Designation	Unit
A	cross-section area	mm ²
A_c	net concrete area	mm ²

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
A_s	Bewehrungsfläche	mm ²
A_{sl}	Längsbewehrung	cm ²
A_{sb}	Bügelbewehrung	cm ² /m
A_v	wirksame Schubfläche	mm ²
A_{vz}	wirksame Schubfläche für Querkraft in z-Richtung	mm ²
A_w	Fläche des Stegblechs	mm ²
a_g	Abstand der Gurte	mm
a_{sx}	Bewehrung in x-Richtung	cm ² /m
a_{sxo}, a_{sxu}	einseitige Bewehrung in x-Richtung	cm ² /m
a_{sy}	Bewehrung in y-Richtung	cm ² /m
a_{syo}, a_{syu}	einseitige Bewehrung in y-Richtung	cm ² /m
b	Breite	mm
c_v	Überdeckung	mm
D, d	Durchmesser/Abmessung	mm
D_x	Verformung in x-Richtung	mm
D_y	Verformung in y-Richtung	mm
D_z	Verformung in z-Richtung	mm
$d_{1,xlower}$	Randabstand der Bewehrung	mm
$d_{1,xupper}$	Randabstand der Bewehrung	mm
$d_{1,ylower}$	Randabstand der Bewehrung	mm
$d_{1,yupper}$	Randabstand der Bewehrung	mm
E	Elastizitätsmodul	MPa
E_{cm}	mittlerer Wert des Elastizitätsmoduls	MPa
F_y	Kraft in y-Richtung	kN
F_z	Kraft in z-Richtung	kN
f_{cm}	mittlere Druckfestigkeit	MPa
f_{ctm}	mittlere Zugfestigkeit	MPa
f_y	Streckgrenze	MPa
f_{yd}	Bemessungswert der Streckgrenze	MPa
G	Schubmodul	MPa
H, h	Höhe, Querschnittshöhe	mm
h_w	Höhe des Stegs	mm
I_{eff}	Spannweite	m
I_T	Torsionsträgheitsmoment	mm ⁴
I_y	Biegeträgheitsmoment (y-y-Achse)	mm ⁴
I_z	Biegeträgheitsmoment (z-z-Achse)	mm ⁴
I_ω	Wölbwiderstand	mm ⁶
K_t	Einflussfaktor	–
L, l	Länge	m
M_{Ed}	Bemessungswert des einwirkenden Moments	kN·m
M_x	Torsionsmoment	kN·m

Symbol	Designation	Unit
A_s	reinforcement area	mm ²
A_{sl}	longitudinal reinforcement	cm ²
A_{sb}	hoop reinforcement	cm ² /m
A_v	effective shear area	mm ²
A_{vz}	effective shear area for shear force in z-direction	mm ²
A_w	web plate area	mm ²
a_g	distance between the flanges	mm
a_{sx}	reinforcement in x-direction	cm ² /m
a_{sxo}, a_{sxu}	one-sided reinforcement in x-direction	cm ² /m
a_{sy}	reinforcement in y-direction	cm ² /m
a_{syo}, a_{syu}	one-sided reinforcement in y-direction	cm ² /m
b	width	mm
c_v	overlap	mm
D, d	diameter/dimension	mm
D_x	deformation in x-direction	mm
D_y	deformation in y-direction	mm
D_z	deformation in z-direction	mm
$d_{1,xlower}$	edge-to-reinforcement distance	mm
$d_{1,xupper}$	edge-to-reinforcement distance	mm
$d_{1,ylower}$	edge-to-reinforcement distance	mm
$d_{1,yupper}$	edge-to-reinforcement distance	mm
E	modulus of elasticity	MPa
E_{cm}	mean value of the modulus of elasticity	MPa
F_y	force in y-direction	kN
F_z	force in z-direction	kN
f_{cm}	mean compressive strength	MPa
f_{ctm}	mean tensile strength	MPa
f_y	yield point	MPa
f_{yd}	design value of the yield point	MPa
G	shear modulus	MPa
H, h	height, cross-section height	mm
h_w	height of the web	mm
I_{eff}	span	m
I_T	polar moment of inertia	mm ⁴
I_y	area moment of inertia (y-y axis)	mm ⁴
I_z	area moment of inertia (z-z axis)	mm ⁴
I_ω	warping constant	mm ⁶
K_t	influencing factor	–
L, l	length	m
M_{Ed}	design value of the acting moment	kN·m
M_x	torsional moment	kN·m

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
M_{xp}	primäres Torsionsmoment	$\text{kN} \cdot \text{m}$
M_{xs}	sekundäres Torsionsmoment	$\text{kN} \cdot \text{m}$
M_y	Biegemoment (y - y -Achse)	$\text{kN} \cdot \text{m}$
$M_{y,Rd}$	Bemessungswert der Momententragfähigkeit (y - y -Achse)	$\text{kN} \cdot \text{m}$
$M_{y,V,Rd}$	Bemessungswert der Momententragfähigkeit, abgemindert infolge von V_{Ed} (y - y -Achse)	$\text{kN} \cdot \text{m}$
M_ω	Wölbmoment	$\text{kN} \cdot \text{m}^2$
N	Normalkraft	kN
N_{Ed}	Bemessungswert der Normalkraft	kN
N_x	Zugkraft	kN
$N_{v,Rd}$	Bemessungswert der Normalkraft, abgemindert infolge von V_{Ed}	kN
n	Verhältnis von N_{Ed} zu $N_{pl,Rd}$	–
n_{DOF}	Anzahl der Freiheitsgrade	–
n_{xx}	Membranschnittgröße (x -Richtung)	kN/m
P	Einzellast	kN
p	verteilte Last	kN/m
r	Ausrundungsradius	mm
s	Stegdicke	mm
t	Blechdicke, Flanschdicke	mm
t_f	Flanschdicke	mm
t_w	Stegdicke	mm
u	Verschiebung	mm
u_x	Verschiebung in x -Richtung	mm
u_y	Verschiebung in y -Richtung	mm
$V_{pl,Rd,z}$	Bemessungswert der Querkraft	kN
V_y	Querkraft in y -Richtung	kN
V_z	Querkraft in z -Richtung	kN
$V_{z,Ed}$	Einwirkung der Querkraft V_z	kN
$V_{z,Rd}$	Bemessungswert der Querkraft V_z	kN
$W_{y,pl}$	plastisches Widerstandsmoment (y - y -Achse)	mm^3
w	Verschiebung	mm
y	Koordinate	mm
z	Koordinate	mm
α_{cr}	Verzweigungslastfaktor	–
γ_{M0}	Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchung von Querschnitten	–
ϑ	Verdrehung um die Stabachse	mrad
ν	Querdehnzahl	–

Symbol	Designation	Unit
M_{xp}	primary torsional moment	$\text{kN} \cdot \text{m}$
M_{xs}	secondary torsional moment	$\text{kN} \cdot \text{m}$
M_y	bending moment (y - y axis)	$\text{kN} \cdot \text{m}$
$M_{y,Rd}$	design value of the moment capacity (y - y axis)	$\text{kN} \cdot \text{m}$
$M_{y,V,Rd}$	design value of the moment capacity, reduced due to V_{Ed} (y - y axis)	$\text{kN} \cdot \text{m}$
M_ω	warping moment	$\text{kN} \cdot \text{m}^2$
N	normal force	kN
N_{Ed}	design value of the normal force	kN
N_x	tensile force	kN
$N_{v,Rd}$	design value of the normal force, reduced due to V_{Ed}	kN
n	$N_{Ed}/N_{pl,Rd}$ ratio	–
n_{DOF}	number of degrees of freedom	–
n_{xx}	membrane internal stress (x -direction)	kN/m
P	single load	kN
p	distributed load	kN/m
r	fillet radius	mm
s	web thickness	mm
t	plate thickness, flange thickness	mm
t_f	flange thickness	mm
t_w	web thickness	mm
u	displacement	mm
u_x	displacement in x -direction	mm
u_y	displacement in y -direction	mm
$V_{pl,Rd,z}$	design value of the shear force	kN
V_y	shear force in y -direction	kN
V_z	shear force in z -direction	kN
$V_{z,Ed}$	action of the shear force V_z	kN
$V_{z,Rd}$	design value of the shear force V_z	kN
$W_{y,pl}$	plastic section modulus (y - y axis)	mm^3
w	displacement	mm
y	coordinate	mm
z	coordinate	mm
α_{cr}	buckling load factor	–
γ_{M0}	partial safety factor for the effects of loads on cross-section areas	–
ϑ	torsion around the beam axis	mrad
ν	Poisson's ratio	–

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
ρ	Abminderungsbeiwert zur Bestimmung des Bemessungswerts der Momententragfähigkeit unter Berücksichtigung von V_{Ed}	–
$\sigma_{xx,A}$	maximale Spannung am Rand des Lochs	N/mm ²
$\sigma_{xx,nom}$	mittlere Spannung am Rand	N/mm ²

5 Aufbau eines Pools von Evaluierungsbeispielen

Gemäß Richtlinie VDI 6201 Blatt 1, Abschnitt 6.2 werden die Evaluierungsbeispiele in die folgenden Klassen eingeteilt.

Analytische Verifikationsbeispiele

Die Referenzlösung liegt in analytischer Form vor. Folglich können die Ergebnisse mit beliebiger Genauigkeit verifiziert werden. Da eine analytische Lösung in der Regel nur mit entsprechenden Vereinfachungen erhalten werden kann, sind diese detailliert darzustellen. Näheres hierzu zeigt Anhang A.

Numerische Verifikationsbeispiele

Die Referenzlösung liegt in geprüften Näherungsrechnungen vor. Folglich können die Ergebnisse nur mit einer begrenzten Genauigkeit verifiziert werden. In einem wesentlichen Teil des Verifikationsbeispiels geht es darum, zu beweisen, dass die Lösung im Rahmen der verwendeten Theorie korrekt ist. Die Qualität der Ergebnisse ist in der Regel mit einer Konvergenzstudie oder Grenzwertbetrachtung zu belegen. Näheres hierzu zeigt Anhang B.

Experimentelle Validierungsbeispiele

Die Referenzlösung liegt in sorgfältig durchgeführten Versuchen vor. Folglich können die Ergebnisse nur im Rahmen der Messtoleranzen und systematischer Versuchsfehler verifiziert werden. Hier kann nur gezeigt werden, in welchem Maß die gemessene Realität abgebildet werden kann. Die komplette Angabe der Parameter der Messung ist hier von besonderer Bedeutung. Näheres hierzu zeigt Anhang C.

Normenbasierte Validierungsbeispiele

Die Referenzlösung liegt in einem dem anerkannten Stand der Technik entsprechenden, genormten Ergebnis vor. Eine Verifikation zeigt, inwieweit die gewählte Software in der Lage ist, die in einer genormten Anforderung definierten Ziele zu erfüllen.

Eine zusätzliche Validierung kann zudem darlegen, warum von der Norm abweichende Ergebnisse in

Symbol	Designation	Unit
ρ	reduction factor for determining the design value of moment capacity in consideration of V_{Ed}	–
$\sigma_{xx,A}$	maximum stress at the edge of the hole	N/mm ²
$\sigma_{xx,nom}$	mean stress at the edge	N/mm ²

5 Compiling a pool of evaluation examples

Pursuant to standard VDI 6201 Part 1, Section 6.2, examples for evaluation purposes are classified as follows.

Analytical verification examples

The reference solution is presented in analytical form. Thus, the results can be verified as accurately as desired. Since an analytical solution can generally only be obtained by applying corresponding simplifications, the details of these simplifications have to be described. Refer to Annex A for more details.

Numerical verification examples

The reference solution is presented in approved approximation calculations. Thus, the results can only be verified with limited accuracy. A substantial part of the verification example is concerned with proving that the solution is correct within the scope of the applied theory. The quality of the results usually has to be proved by means of a convergence study or limit value analysis. Refer to Annex B for more details.

Experimental validation examples

The reference solution has been obtained by carefully performed experiments. Thus, the results can only be verified within the limits of measurement tolerances and systematic experimental errors. This solution can only be used to show the degree to which the measured real results can be represented by the software model. In this category it is particularly important to state all parameters of the measurements. Refer to Annex C for more details.

Design-code-based validation examples

The reference solution is presented in the form of a recognized state-of-the-art, standardized result. A verification shows the extent to which the selected software is capable of fulfilling the objectives of a standardized requirement.

Furthermore, an additional validation can show why results deviating from the standard constitute