

Bau-Überwachungsverein (BÜV e. V.) Hrsg.

# Tragende Kunststoffbauteile

Entwurf – Bemessung – Konstruktion

*2. Auflage*

**EBOOK INSIDE**

 Springer Vieweg

---

# Tragende Kunststoffbauteile

---

Bau-Überwachungsverein (BÜV e. V.)  
(Hrsg.)

# Tragende Kunststoffbauteile

Entwurf – Bemessung – Konstruktion

2., aktualisierte und erweiterte Auflage

*Hrsg.*  
Bau-Überwachungsverein (BÜV e. V.)  
Berlin, Deutschland

ISBN 978-3-658-30404-1                      ISBN 978-3-658-30405-8 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-30405-8>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2014, 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

## Vorwort

Die zweite Auflage der BÜV-Empfehlungen „Tragende Kunststoffbauteile“ wurde vom Arbeitskreis vollständig aktualisiert und um zwei zusätzliche Berechnungsbeispiele erweitert. Die zitierten Normen und Richtlinien zu Entwurf, Bemessung und Konstruktion von tragenden Kunststoffbauteilen und die zugehörigen vom Arbeitskreis ausgearbeiteten Berechnungsbeispiele sind damit auf dem Stand März 2020. Zusätzlich erfolgte die Korrektur von Druckfehlern aus der ersten Auflage. Die zwei neuen zusätzlichen Berechnungsbeispiele behandeln Knicknachweise für eine Stütze aus pultrudierten GFK-Profilen und den Nachweis eines geschraubten Anschlusses für einen Fachwerkknoten als Teil einer Brücke aus GFK-Profilen.

Der Arbeitskreis „Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen“ des Bau-Überwachungsvereins (BÜV e.V.) hofft, dass mit den vorliegenden BÜV-Empfehlungen „Tragende Kunststoffbauteile“ eine aktuelle Grundlage für die weitere Erforschung und Anwendung von Tragwerken aus Kunststoffen im Bauwesen gegeben ist, und freut sich über Anregungen und Hinweise der interessierten Fachöffentlichkeit zu diesem Thema.

Hamburg, im März 2020

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manuel Krahwinkel

Leiter des Arbeitskreises „Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen“ des Bau-Überwachungsvereins (BÜV e.V.)

## Autorenverzeichnis

Prof. Dr.-Ing. habil **Günther Ackermann**, geboren 1929 in Insterburg, promovierte 1962 zum Dr.-Ing. an der Hochschule für Bauwesen in Cottbus. Von 1964 arbeitete er 14 Jahre an der Deutschen Bauakademie auf dem Gebiet der ingenieur-theoretischen Grundlagen von Flächen-tragwerken und Plastkonstruktionen und promovierte dort 1976 zum Dr.-sc. techn. Von 1978 bis 1998 lehrte er als Dozent und Universitätsprofessor an der Hochschule für Architektur und Bauwesen und an der Bauhaus Universität in Weimar.

**Matthias Behrens** M. Sc. ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand am Fachgebiet Innovative Bauweisen und Baukonstruktion des Bauingenieurwesens der HafenCity Universität Hamburg. Im Rahmen seiner Tätigkeit lehrt er Stahl- und Holzbau sowie Stabilität und Dynamik der Baukonstruktionen und forscht im Rahmen seiner Promotion an momententragfähigen Verbindungen von GFK-Profilen.

Dipl.-Ing. **Stephan Deuber** ist Bauingenieur und Projektentwickler bei der B&L Real Estate GmbH in Hamburg sowie Lehrbeauftragter an der TH-Lübeck. Vor der Tätigkeit bei B&L war er als Projektleiter bei der HOCHTIEF AG beschäftigt, wo er zuletzt für das Bauvorhaben der Elbphilharmonie verantwortlich war. Im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben und Bauvorhaben hat er sich intensiv mit der Bemessung, Konstruktion und dem Einsatz von Faserverbundkunststoffen im Baubereich beschäftigt.

Dr.-Ing. **Markus Gabler** studierte und promovierte an der Universität Stuttgart, wo er sich vornehmlich mit der Anwendung von Faserverbundwerkstoffen im Bauwesen beschäftigte. Aktuell leitet Herr Gabler die Brückenbauabteilung bei Arup Deutschland in Düsseldorf.

Dr.-Ing. **Ralf Gastmeyer** ist Mitarbeiter des Prüfamtes für Baustatik der Landesgewerbeanstalt Bayern, Zweigstelle Würzburg, und Prüfer für bautechnische Nachweise im Eisenbahnbau. Sein Tätigkeitsbereich umfasst unter anderem die Prüfung von Behältern, Fassaden-, Dach- und Antennenträgerkonstruktionen aus glasfaserverstärktem Kunststoff.

Prof. Dr.-Ing. **Elke Genzel** lehrt Bauwerkserhaltung und Baugeschichte an der HTW Berlin. Ihr Schwerpunkt sind die Beurteilung, Erhaltung und Sanierung von Bauten aus faserverstärkten Kunststoffen (Forschungsverbund mit Dr.-phil. Pamela Voigt).

Dipl.-Ing. **Matthias Gerold** ist Geschäftsführer der Harrer Ingenieure GmbH, Karlsruhe, Beratender Ingenieur, Prüfenieur für Bautechnik, Prüfer für bautechnische Nachweise im Eisenbahnbau sowie ö.b.u.v. Sachverständiger für Bautechnik und Baukonstruktionen des Massiv-, Stahl-, Holz- und Glasbaus. Er ist seit Jahren in der nationalen wie europäischen Normungsarbeit insbesondere im Holzbau tätig.

Prof. Dr.-Ing. **Jan Knippers** ist Partner in Knippers Helbig Advanced Engineering und Leiter des Instituts für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen an der Universität Stuttgart. Dort beschäftigt er sich in der Forschung schwerpunktmäßig mit faserverstärkten Kunststoffen für Architektur und Bauwesen.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. **Manuel Krahwinkel** forscht und lehrt an der HafenCity Universität Hamburg im Bauingenieurwesen mit den Schwerpunkten Stahl-, Holz- und Leichtbau. Als Leiter der bautechnischen Labore der HafenCity Universität verfügt er über Erfahrung mit der experimentellen Untersuchung von Bauteilen aus tragenden Kunststoffen und mit deren Zulassung für bautechnische Anwendungen. Er ist Prüflingenieur für Baustatik und Mitglied der Geschäftsführung der Ingenieurgemeinschaft Eriksen in Oldenburg.

Dipl.-Ing (FH) **Frank Kümmerle** ist Mitarbeiter der Harrer Ingenieure GmbH, Karlsruhe, einem Ingenieurbüro mit den Schwerpunkten Hoch- und Ingenieurbau, Industrie- und Gewerbebau, Brücken-, Grund- und Tunnelbau, Generalplanung und Projektmanagement sowie Sonderkonstruktionen und Risiko Management. Er arbeitet in der Niederlassung Ostfildern bei Stuttgart (innerhalb der Bürogemeinschaft Kuhlmann - Gerold - Eisele) als Tragwerksplaner und Fachplaner für vorbeugenden Brandschutz.

Dr.-Ing. **Hans-Jürgen Meyer** ist Diplomphysiker und Bauingenieur. Er unterrichtet als Lehrbeauftragter Bauphysik an der Hochschule Bremen und ist Inhaber eines Ingenieurbüros für Bauphysik und Polartechnik.

Prof. Dr.-Ing. **Hans-Werner Nordhues** ist Bauingenieur und Mediator im Bauwesen sowie geschäftsführender Gesellschafter der wörner nordhues engineering GmbH mit Sitz in Darmstadt. Er unterrichtet als Honorarprofessor an der Ruhr-Universität Bochum. Zudem ist er Geschäftsführer der DPÜ-Zertifizierstelle GmbH, die Personal-zertifizierungen im Bauwesen durchführt.

Dr.-Ing. **Matthias Oppe** ist promovierter Bauingenieur und seit 2010 Mitglied der Geschäftsleitung bei der Knippers Helbig GmbH. Dort leitet er das Büro in Stuttgart und beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit der Verwendung innovativer Materialien im Bauwesen. Im Rahmen seiner Promotion an der RWTH Aachen hat er ein Bemessungskonzept für geschraubte Verbindungen in pultrudierten Polymerprofilen entwickelt. Er ist in mehreren nationalen und internationalen Vereinigungen und Normenausschüssen tätig.

Prof. Dr.-Ing. **Jens Ridzewski** ist Leiter der Zertifizierungsstellen für Bauprodukte (LBO, EU-BauPVO) an der IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH in Dresden, lehrt an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg, der Steinbeis-Hochschule und Kunststoffhochschule Radeberg Leichtbau mit Faserverbundwerkstoffen und betreibt die Composite Consulting mit dem Schwerpunkt Bauwesen und ist öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger.

Dipl.-Ing. **Rolf Schadow** ist Bauingenieur, arbeitet bei der Ingenieurberatung Pühl und Becker in Essen und hat langjährige Erfahrung im Bereich der Bemessung und Prüfung von tragenden Konstruktionen aus Kunststoffen mit dem Schwerpunkt Rohre und Schächte.

Dr.-Ing. **Jochen Stahl**, P.Eng. ist Partner und Geschäftsführer des Ingenieurbüros Fast + Epp in Darmstadt und hat einen Lehrauftrag für das Entwerfen von Holztragwerken an der Technischen Universität Darmstadt.

Professor Dr.-Ing. **Rainer Taprogge** ist Inhaber des 1973 gegründeten Ingenieurbüros für Kunststofftechnik in Hamburg. Schwerpunkte sind die technische Anwendung von Kunststoffen im Maschinen- und Anlagenbau sowie in der Bautechnik einschließlich Konstruktion, Berechnung und Fertigung. An der RWTH Aachen ist er als apl. Professor für das Lehrgebiet Konstruieren mit Kunststoffen und als Sachverständiger Gutachter bei Schadensfällen und in Zulassungsverfahren tätig.

Dr.-Ing. **Heiko Trumpf**, IWE ist Niederlassungsleiter/ Partner bei Bollinger + Grohmann Ingenieure und Lehrbeauftragter an der TU München. Er promovierte an der RWTH Aachen zum ‚Stabilitätsverhalten ebener Tragwerke aus pultrudierten glasfaserverstärkten Polymerprofilen‘.

Dipl.-Ing. **Momčilo Vidacković** ist studierter Architekt und seit 2007 Mitarbeiter der Bundesvereinigung der Prüfindgenieure für Bautechnik (BVPI), wo er die Ressorts Bautechnik und Baurecht innehat.

Dr. **Frédéric Waimer** studierte Bauingenieurwesen an der Universität Stuttgart, wo er auch 2016 promovierte. Von 2010 bis 2015 war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen tätig; sein Forschungsschwerpunkt lag dabei im Bereich komplexer Geometrien, innovativer Werkstoffe und digitaler Planungswerkzeuge. Seit 2015 ist er als Projektleiter und seit 2020 als Teamleiter bei der Werner Sobek AG für die Tragwerksplanung anspruchsvoller nationaler und internationaler Bauvorhaben verantwortlich.

Prof. Dr.-Ing. **Johann-Dietrich Wörner** ist Generaldirektor der Europäischen Weltraumorganisation ESA. Als Professor für Statik und Dynamik der Tragkonstruktionen lehrt er an der Technischen Universität Darmstadt Baudynamik, Glasbau und Kunststoffe im Bauwesen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>ANWENDUNGSBEREICH UND ANWENDUNGSBEDINGUNGEN</b>	<b>1</b>
1.1	Allgemeines .....	1
1.2	Temperaturbereich .....	1
1.3	Materialkennwerte .....	1
1.4	Dichtheit .....	1
1.5	Brandverhalten und erhöhte Temperaturen.....	1
1.6	Toxizität.....	2
1.7	Resistenz gegen aggressive Medien.....	2
1.8	Anwendungsbedingungen.....	2
1.9	Nicht genormte Baustoffe.....	2
1.10	Nichtruhende Belastungen / Beanspruchungen .....	2
<b>2</b>	<b>BAUTECHNISCHE UNTERLAGEN</b>	<b>3</b>
2.1	Art der bautechnischen Unterlagen.....	3
2.2	Zeichnungen .....	3
2.3	Statische Berechnung.....	3
2.4	Baubeschreibung.....	4
<b>3</b>	<b>SICHERHEITSKONZEPT</b>	<b>5</b>
3.1	Allgemeines .....	5
3.2	Sicherheitsnachweis.....	6
3.3	Nachweisverfahren – Regelverfahren.....	6
3.4	Nachweisverfahren auf Basis einer Schadensakkumulation.....	7
3.4.1	Allgemeines .....	7
3.4.2	Zeitstandbeanspruchung im Hinblick auf die Lebensdauer (Einwirkungen) 7	
3.4.3	Zeitstandbeanspruchbarkeit im Hinblick auf die Lebensdauer (Widerstand) 8	
3.4.4	Bemessungsverfahren mit Ersatzbeanspruchung.....	9
3.4.5	Bemessungsverfahren mit Hilfe der Schadensakkumulation.....	11
<b>4</b>	<b>AUSGANGSSTOFFE</b>	<b>14</b>
4.1	Allgemeines .....	14
4.2	Fasern .....	14
4.2.1	Allgemeines .....	14
4.2.2	Glasfasern .....	15
4.2.3	Aramidfasern .....	15
4.2.4	Carbonfasern.....	15
4.3	Kunststoffe.....	16
4.4	Schaumstoffe .....	16

---

4.4.1	Allgemeines .....	16
4.4.2	Polyurethan-Hartschäume (PUR-Schaum) .....	17
4.4.3	Polyvinylchloridschäume (PVC-Schaum) .....	17
<b>5</b>	<b>MATERIALEIGENSCHAFTEN UND BAUTEILE</b>	<b>19</b>
5.1	Allgemeines .....	19
5.2	Unverstärkte Kunststoffe .....	21
5.2.1	Thermoplaste .....	21
5.2.2	Duroplaste .....	22
5.3	Faserverstärkte Kunststoffe .....	22
5.3.1	Vorbemerkungen .....	22
5.3.2	Glasfaserverstärkte Lamine mit Duroplasten .....	22
5.4	Sandwichkonstruktionen .....	24
5.5	Bemessungswert des Widerstands .....	25
<b>6</b>	<b>EINWIRKUNGEN</b>	<b>27</b>
6.1	Allgemeines .....	27
6.2	Ständige Einwirkungen .....	28
6.3	Veränderliche Einwirkungen .....	28
6.4	Außergewöhnliche Einwirkungen .....	30
6.5	Brandeinwirkung und erhöhte Temperaturen .....	30
6.6	Bemessungswert der Einwirkungen .....	31
<b>7</b>	<b>VERFORMUNGEN, SCHNITTGRÖßEN UND SPANNUNGEN</b>	<b>33</b>
<b>8</b>	<b>NACHWEISE</b>	<b>35</b>
8.1	Grundlegende Anforderungen .....	35
8.2	Grenzzustand der Tragfähigkeit .....	35
8.2.1	Allgemeines .....	35
8.2.2	Festigkeit .....	38
8.2.3	Stabilitätsversagen .....	43
8.2.4	Dehnungsbeschränkung .....	47
8.3	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit .....	47
8.3.1	Allgemeines .....	47
8.3.2	Dehnungsbeschränkung .....	48
8.3.3	Verformungsbegrenzung .....	48
8.4	Verbindungen .....	49
8.4.1	Allgemeines .....	49
8.4.2	Lösbare Verbindungen .....	49
8.4.3	Nicht lösbare Verbindungen .....	54

<b>9</b>	<b>BAULICHE DURCHBILDUNG</b>	<b>57</b>
9.1	Grundsätzliches .....	57
9.2	Bauteile .....	58
9.2.1	Allgemeines .....	58
9.2.2	Hohlkästen und Hohlbauteile.....	58
9.2.3	Plattenförmige Bauteile .....	59
9.2.4	Schalenförmige Bauteile.....	59
9.2.5	Behälter.....	59
9.2.6	Sandwichkonstruktionen.....	60
9.2.7	Absturzsichernde Bauteile .....	61
9.2.8	Brücken.....	61
9.3	Verbindungen und Auflagerungen.....	61
9.4	Herstellung und Konstruktion.....	62
9.4.1	Faserverbundkunststoffe.....	62
9.4.2	Unverstärkte Kunststoffe .....	62
<b>10</b>	<b>AUSFÜHRUNG UND ÜBERWACHUNG</b>	<b>63</b>
10.1	Rohprodukte .....	63
10.1.1	Allgemeines .....	63
10.1.2	Eigenüberwachung.....	64
10.1.3	Fremdüberwachung .....	66
10.1.4	Probenentnahme und Auswertung .....	67
10.2	Halbzeuge und Verbindungsmittel .....	68
10.2.1	Allgemeines .....	68
10.2.2	Prüfung der Halbzeuge ( Thermoplaste sowie Duroplaste und Elastomere ) 68	
10.2.3	Prüfung der Klebstoffe.....	68
10.2.4	Prüfung von Schweißzusätzen .....	68
10.3	Bauausführung.....	69
10.3.1	Allgemeines .....	69
10.3.2	Personal und Ausstattung des ausführenden Betriebes .....	69
10.4	Überwachung.....	70
10.4.1	Überwachung auf der Baustelle .....	70
10.4.2	Zustandsklassifizierung .....	72
<b>11</b>	<b>NORMEN UND RICHTLINIEN</b>	<b>75</b>
11.1	Grundnormen.....	75
11.2	Stoffnormen .....	76
11.3	Prüfnormen .....	77
11.4	Normen für Halbzeuge .....	81
11.5	Bemessungsnormen .....	81

11.6	Richtlinien/Merkblätter.....	82
<b>12</b>	<b>BEISPIEL 1 PROFILIERTER EINFELDTRÄGER AUS GLASFASERVERSTÄRKTEM LAMINAT</b>	<b>85</b>
12.1	Statisches System, Bauwerksform.....	85
12.2	Querschnitt, Werkstoff.....	86
12.2.1	Querschnittswerte.....	86
12.2.2	Material.....	87
12.3	Einwirkungen (charakteristische Werte).....	87
12.3.1	Eigenlast.....	87
12.3.2	Schneelast (DIN EN 1991-1-3).....	87
12.3.3	Windlast (DIN EN 1991-1-4).....	88
12.3.4	Temperatur (DIN EN 1991-1-5).....	88
12.3.5	Einwirkungsdauer.....	88
12.4	Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit.....	89
12.4.1	Festigkeit.....	89
12.4.2	Stabilitätsversagen.....	95
12.5	Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.....	101
12.5.1	Durchbiegungsbegrenzung.....	101
12.6	Literatur zum Beispiel 1.....	103
<b>13</b>	<b>BEISPIEL 2 ZYLINDERWAND EINES BEHÄLTERS</b>	<b>104</b>
13.1	Statisches System, Bauwerksform.....	104
13.2	Querschnitt und Werkstoff.....	105
13.2.1	Laminatdicken.....	105
13.2.2	Zylinder.....	105
13.2.3	Zylinderfuß.....	106
13.3	Einwirkungen und Schnittgrößen.....	107
13.3.1	Übersicht.....	107
13.3.2	LF 10 Eigenlast.....	107
13.3.3	LF 20 Füllgut.....	108
13.3.4	LF 21 Verkehrslast auf Kegelschale.....	108
13.3.5	LF 22 Betriebsdruck.....	108
13.3.6	LF 30 Temperatur.....	109
13.3.7	Lastkombinationen.....	109
13.3.8	Bemessungswerte der Schnittgrößen.....	110
13.3.9	Bemessungswerte der Spannungen.....	112
13.4	Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit.....	112
13.4.1	Festigkeit.....	112
13.4.2	Stabilitätsversagen.....	125

13.5	Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.....	129
13.5.1	Durchbiegungsbegrenzung .....	129
13.6	Berechnungsergebnisse.....	132
13.6.1	Lastkombination 1 (Schnittgrößen faktorisiert, Verformungen nicht faktorisiert) .....	132
13.6.2	Lastkombination 2 (Schnittgrößen faktorisiert, Verformungen nicht faktorisiert) .....	134
13.6.3	Lastkombination 3 (Schnittgrößen faktorisiert, Verformungen nicht faktorisiert) .....	136
13.6.4	Lastkombination 4 (Schnittgrößen faktorisiert, Verformungen nicht faktorisiert) .....	138
13.7	Literatur zum Beispiel 2 .....	140
<b>14</b>	<b>BEISPIEL 3 DREISCHICHTIGE ZWEIFELDPLATTE MIT DECKSCHICHTEN</b>	
	<b>141</b>	
14.1	Statisches System, Bauwerksform .....	141
14.2	Querschnitt und Werkstoff.....	142
14.2.1	Laminatdicken .....	142
14.2.2	Material.....	142
14.3	Einwirkungen und Schnittgrößen .....	143
14.3.1	Übersicht.....	143
14.3.2	LF 10 Eigenlast.....	143
14.3.3	LF 31 ... LF 34 Temperatur (DIN EN 1991-1-5).....	143
14.3.4	LF 40 Schneelast (DIN EN 1991-1) .....	144
14.3.5	LF 51 + LF 52 Windlast (DIN EN 1991-1) .....	144
14.3.6	Lastkombinationen .....	144
14.3.7	Bemessungswerte der Schnittgrößen .....	145
14.3.8	Bemessungswerte der Spannungen.....	146
14.4	Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit .....	146
14.4.1	Festigkeit .....	146
14.4.2	Stabilitätsversagen .....	151
14.4.3	Charakteristische Werte des E-Moduls.....	152
14.5	Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.....	156
14.5.1	Durchbiegungsbegrenzung .....	156
14.6	Berechnungsergebnisse.....	158
14.6.1	System und Lasteingabe .....	158
14.6.2	Membrankräfte der GFK-Deckschicht (faktorisiert) .....	160
14.6.3	Schubspannungen des PUR-Kerns (faktorisiert) .....	161
14.6.4	Verformungen (nicht faktorisiert).....	162
14.7	Literatur zum Beispiel 3 .....	163

<b>15</b>	<b>BEISPIEL 4 VIERSEITIG GELENKIG GELAGERTE PLATTE</b>	<b>165</b>
15.1	Bauteilabmessungen, statisches System, Bauwerksform.....	165
15.2	Querschnitt, Werkstoff .....	167
15.2.1	Querschnittswerte .....	167
15.2.2	Material.....	167
15.3	Einwirkungen (charakteristische Werte).....	167
15.3.1	Eigenlast der Platte .....	167
15.3.2	Schneelast (DIN EN 1991-1-3).....	167
15.3.3	Windlast (DIN EN 1991-1-4) .....	168
15.3.4	Temperaturlast (DIN EN 1991-1-5).....	169
15.3.5	Einwirkungsdauer .....	169
15.4	Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit.....	169
15.4.1	Festigkeit .....	169
15.5	Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.....	175
15.5.1	Durchbiegungsbegrenzung .....	175
15.6	Modellierungsvarianten für die PMMA-Platte .....	178
15.6.1	Allgemein .....	178
15.6.2	Einachsig gespannte Platte.....	178
15.6.3	Zweiachsig gespannte, linear-elastische Platte mit Tabellenwerk .....	178
15.6.4	Lineare Finite-Element-Berechnung.....	179
15.6.5	Nichtlineare Finite- Element- Berechnung mit abhebenden Ecken .....	180
15.6.6	Vergleich der Berechnungsergebnisse .....	182
15.7	Literatur zum Beispiel 4 .....	182
<b>16</b>	<b>BEISPIEL 5 SICKERWASSERSCHACHT AUS PE-HD</b>	<b>183</b>
16.1	System, Bauteilmaße, Querschnittswerte, Annahmen .....	183
16.2	Einwirkungen.....	185
16.2.1	Charakteristische Werte.....	185
16.2.2	Bemessungswerte in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit .....	185
16.2.3	Repräsentative Werte im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit .....	186
16.3	Schnittgrößen am Schachtfuß .....	186
16.3.1	Schnittgrößen im Grenzzustand der Tragfähigkeit .....	186
16.3.2	Schnittgrößen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit .....	187
16.4	Nachweis in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit .....	187
16.4.1	Bemessungswerte des Baustoffs .....	187
16.4.2	Nachweis der Biegetragfähigkeit.....	189
16.4.3	Stabilitätsversagen .....	189
16.5	Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.....	191
16.5.1	Bemessungswerte des Baustoffs .....	191
16.5.2	Maßgebende Verformung $u_d$ .....	191

16.5.3	Bemessungswert zur Erfüllung der Durchbiegungsbegrenzung .....	192
16.6	Literatur zum Beispiel 5 .....	192
<b>17</b>	<b>BEISPIEL 6 PULTRUSIONSPROFIL AUS GLASFASERVERSTÄRKTEM KUNSTSTOFF ALS EINFELDTRÄGER</b>	<b>193</b>
17.1	Aufgabenstellung, statisches System .....	193
17.2	Querschnitt, Werkstoff .....	193
17.2.1	Querschnittswerte .....	193
17.2.2	Material .....	194
17.3	Einwirkungen (charakteristische Werte).....	194
17.3.1	Eigenlast .....	194
17.3.2	Schneelast .....	194
17.3.3	Temperatur.....	194
17.3.4	Einwirkungsdauer .....	195
17.4	Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit.....	195
17.4.1	Teilsicherheitsbeiwerte .....	195
17.4.2	Einwirkungskombinationen .....	195
17.4.3	Bemessungsschnittgrößen (Einfeldträger) .....	196
17.4.4	Werkstoffspezifische Einflussfaktoren .....	196
17.4.5	Festigkeitsnachweise .....	198
17.4.6	Stabilitätsnachweise.....	200
17.5	Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.....	206
17.5.1	Teilsicherheitsbeiwert.....	206
17.5.2	Einwirkungskombinationen .....	206
17.5.3	Charakteristischer Wert des E-Moduls als Mittelwert .....	206
17.5.4	Werkstoffspezifischer Einflussfaktor des E-Moduls .....	207
17.5.5	Durchbiegungsbegrenzung .....	207
17.6	Literatur zum Beispiel 6 .....	208
<b>18</b>	<b>BEISPIEL 7 PULTRUSIONSPROFIL AUS GLASFASERVERSTÄRKTEM KUNSTSTOFF ALS STÜTZE</b>	<b>209</b>
18.1	Aufgabenstellung und statisches System .....	209
18.2	Querschnitt, Werkstoff .....	210
18.2.1	Querschnittswerte .....	210
18.2.2	Material.....	211
18.3	Einwirkungen (charakteristische Werte).....	211
18.3.1	Eigenlast aus Struktur und Profil .....	211
18.3.2	Eigenlast aus Ausbau (Technikinstallation).....	211
18.3.3	Schneelast .....	211
18.3.4	Temperatur.....	211
18.3.5	Einwirkungsdauer .....	211

18.4	Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit.....	212
18.4.1	Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsbeiwerte Einwirkung .....	212
18.4.2	Teilsicherheitsbeiwerte Widerstand.....	212
18.4.3	Einwirkungskombinationen .....	212
18.4.4	Werkstoffspezifische Einflussfaktoren .....	213
18.4.5	Festigkeitswerte .....	215
18.5	Querschnittsklassifikation.....	217
18.5.1	Einordnen in Querschnittsklasse.....	217
18.5.2	Ermittlung der kritischen Beulspannung.....	217
18.5.3	Ermittlung der effektiven Breiten .....	217
18.6	Biegeknicken nach dem Ersatzstabverfahren .....	219
18.6.1	Nachweisformat.....	219
18.6.2	Ermittlung der Eingangsparameter für das Ersatzstabverfahren.....	219
18.6.3	Biegeknicknachweis mit Knickspannungslinie.....	219
18.7	Vereinfachter Stabilitätsnachweis Biegeknicken.....	222
18.7.1	Nachweisformat.....	222
18.7.2	Einwirkung .....	222
18.7.3	Verzweigungslast unter Berücksichtigung $A_{\text{mod}}^E$ (Stabilität).....	222
18.8	Literatur zum Beispiel 7 .....	224
<b>19</b>	<b>BEISPIEL 8 NACHWEISE „GESCHRAUBTE VERBINDUNGEN“</b>	<b>225</b>
19.1	Aufgabenstellung.....	225
19.2	System .....	225
19.3	Charakteristische Werte der einwirkenden Lasten.....	227
19.3.1	Allgemeines .....	227
19.3.2	Ständige Einwirkungen.....	227
19.3.3	Veränderliche Einwirkungen .....	228
19.3.4	Einwirkungen auf Geländer.....	228
19.3.5	Schnee- und Windlasten .....	229
19.3.6	Temperatureinwirkungen und Medieneinfluss .....	229
19.3.7	Außergewöhnliche Einwirkungen .....	229
19.4	Schnittgrößen (Theorie I Ordnung) .....	229
19.5	Randbedingungen .....	230
19.6	Materialkennwerte .....	231
19.7	Teilsicherheitsbeiwert.....	231
19.8	Einfluss- und Modifikationsfaktoren .....	232
19.9	Lastfallkombinationen .....	233
19.10	Nachweis Zugdiagonale 100×100×8 .....	233
19.10.1	Einwirkungen.....	233
19.10.2	Tragfähigkeiten.....	233
19.10.3	Nachweise.....	235
19.11	Nachweis Untergurt 240×72×10.....	235

---

19.11.1	Einwirkungen.....	235
19.11.2	Tragfähigkeiten.....	236
19.11.3	Nachweise.....	238
19.12	Nachweis Untergurt 240×72×10 am Anschluss Druckpfosten infolge Holmlast	239
19.12.1	Einwirkungen.....	239
19.12.2	Tragfähigkeiten.....	240
19.12.3	Nachweise.....	241
19.13	Literatur zum Beispiel 8 .....	241
<b>ANHANG</b>		<b>243</b>
Anhang A:	Einflussfaktoren (Richtwerte) für unverstärkte Kunststoffe.....	243
Anhang B:	Einflussfaktoren für faserverstärkte Kunststoffe .....	246
Anhang C:	Einflussfaktoren für Schaumstoffe .....	249
Anhang D:	Bemessungswerte der Einwirkungen.....	250
Anhang E:	Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_M$ .....	255
Anhang F:	Mechanische Eigenschaften zu Fasern und Sandwichkernen .....	256
<b>LITERATUR</b>		<b>257</b>
<b>SACHWORTVERZEICHNIS</b>		<b>261</b>

# Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 4-1:</b> Unterschiede der Eigenschaften von Duro- und Thermoplasten .....	16
<b>Tabelle 5-1:</b> Faktoren $k_s$ zur Ermittlung von $R_{k,0,95}$ (bei 75 % Aussagewahrscheinlichkeit) .....	20
<b>Tabelle 6-1:</b> Klassen der Last-Einwirkungsdauer (KLED) für Hochbaukonstruktionen .....	27
<b>Tabelle 6-2:</b> Größenordnung der Klassen der Lasteinwirkungen (KLED) .....	29
<b>Tabelle 8-1:</b> Übersicht der zu führenden Nachweise und der zugehörigen Einflussfaktoren ...	37
<b>Tabelle 8-2:</b> Empfehlungen für den Bemessungswert $C_d$ der Durchbiegung .....	48
<b>Tabelle 10-1:</b> Art und Umfang der Probenentnahme von Ausgangsstoffen für Halbzeuge sowie für Verbindungsmittel .....	66
<b>Tabelle 10-2:</b> Prüfung der erhärteten Produkte (Halbzeug) .....	66
<b>Tabelle Beispiel 2-1:</b> Untersuchte Lastfälle .....	107
<b>Tabelle Beispiel 2-2:</b> Untersuchte Lastkombinationen .....	109
<b>Tabelle Beispiel 2-3:</b> Bemessungswerte der Spannungen für alle Lastkombinationen 1 bis 4 .....	112
<b>Tabelle Beispiel 2-4:</b> Charakteristischer Wert der Kurzzeit-Biegefestigkeit .....	113
<b>Tabelle Beispiel 2-5:</b> Charakteristischer Wert der Kurzzeit-Zugfestigkeit .....	113
<b>Tabelle Beispiel 2-6:</b> Einflussfaktor $A_1$ in Abhängigkeit der Lastdauer .....	114
<b>Tabelle Beispiel 2-7:</b> Zusammenstellung der Einflussfaktoren .....	114
<b>Tabelle Beispiel 2-8:</b> Bemessungswert des Materialwiderstands .....	119
<b>Tabelle Beispiel 2-9:</b> Spannungsnachweis .....	119
<b>Tabelle Beispiel 2-10:</b> Exemplarische Auflistung der Einzelschichten .....	122
<b>Tabelle Beispiel 2-11:</b> Ermittlung der Widerstände für KLED lang .....	123
<b>Tabelle Beispiel 2-12:</b> Festigkeitsnachweis für die Einzelschichten .....	124
<b>Tabelle Beispiel 4-1:</b> Einflussfaktoren $A$ nach [3] .....	172
<b>Tabelle Beispiel 4-2:</b> Zusammenstellung der berechneten Spannungen .....	174
<b>Tabelle Beispiel 4-3:</b> Zusammenstellung der berechneten Verformungen .....	177
<b>Tabelle Beispiel 4-4:</b> Vergleich der Modellierungsvarianten .....	182
<b>Tabelle A-1:</b> Einflussfaktor $A^f_1$ , $A^E_1$ bzw. $A^D_1$ infolge Belastungsdauer von 20 Jahren .....	243
<b>Tabelle A-2:</b> Einflussfaktor $A^f_2$ , $A^E_2$ bzw. $A^D_2$ infolge Medieneinfluss für Deponiebauwerke .....	243
<b>Tabelle A-3a:</b> Einflussfaktor $A^f_3$ , $A^E_3$ bzw. $A^D_3$ für Thermoplaste infolge Temperatureinfluss bei 40 °C .....	244
<b>Tabelle A-3b:</b> Einflussfaktor $A^f_3$ , $A^E_3$ bzw. $A^D_3$ für Duroplaste infolge Temperatureinfluss bis zur Anwendungsgrenze .....	244
<b>Tabelle B-1a</b> Einflussfaktor $A^f_1$ infolge Belastungsdauer von 20 Jahren (Bezeichnungen M, MW, FM und FMU gemäß DIN 18820) .....	246
<b>Tabelle B-1b:</b> Einflussfaktor $A^E_1$ und $A^D_1$ infolge Belastungsdauer von 20 Jahren (Bezeichnungen M, MW, FM und FMU gemäß DIN 18820) .....	247
<b>Tabelle B-2:</b> Einflussfaktor $A^f_2$ , $A^E_2$ bzw. $A^D_2$ infolge Medieneinfluss .....	248
<b>Tabelle C-1:</b> Einflussfaktor $A^f_1$ bzw. $A^G_1$ , $A^E_1$ infolge Belastungsdauer .....	249

<b>Tabelle C-2:</b>	Einflussfaktor $A^f_2$ bzw. $A^G_2, A^E_2$ infolge Freibewitterung über 25 Jahre durch <b>Deckschichten</b> geschützt.....	249
<b>Tabelle C-3:</b>	Einflussfaktor $A^f_3$ bzw. $A^G_3, A^E_3$ infolge Temperatureinfluss .....	249
<b>Tabelle D-1:</b>	Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_F$ der Einwirkungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit auf Grundlage von DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.2 (A) bis (C) .....	251
<b>Tabelle D-2:</b>	Kombinationsbeiwerte $\psi$ für den Hochbau (in Anlehnung an DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.1).....	252
<b>Tabelle D-3:</b>	Kombinationsbeiwerte $\psi$ für Straßenbrücken (in Anlehnung an DIN EN 1990, Tabelle A2.1) .....	253
<b>Tabelle D-4:</b>	Kombinationsbeiwerte $\psi$ für Fußgänger- und Radwegbrücken (in Anlehnung an DIN EN 1990, Tabelle A2.2) .....	253
<b>Tabelle E-1:</b>	Empfohlene Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_M$ im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach Ackermann .....	255
<b>Tabelle F-1:</b>	Fasereigenschaften.....	256
<b>Tabelle F-2:</b>	Mechanische Eigenschaften einiger Polymer-Hartschäume für Sandwichkerne (Richtwerte für die Mittelwerte).....	256

# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 3-1:</b> Ermittlung der vorhandenen Sicherheit .....	5
<b>Abbildung 3-2:</b> Einwirkungskollektiv im Bemessungszeitraum $t_R$ .....	8
<b>Abbildung 3-3:</b> Beispiel einer Lebensdauerlinie (Zeitstandbeanspruchbarkeit) am Beispiel GFK .....	8
<b>Abbildung 3-4:</b> Anwendung der Gleichung 3.1 für 2 Einwirkungen und Ermittlung der Neigung der Zeitstandgeraden für faserverstärkte duroplastische Produkte .....	10
<b>Abbildung 3-5:</b> Bemessung am Ende des Bemessungszeitraumes $t_R$ am Beispiel GFK .....	11
<b>Abbildung 6-1:</b> E-Modul und Festigkeit ausgewählter Kunststoffe in Abhängigkeit der Temperatur [27], [47] .....	31
<b>Abbildung 8-1:</b> Abhängigkeit des Einflussfaktors $A_1$ von dem Tabellenwert $A_{1,20J}$ und der akkumulierten Last-Einwirkungsdauer $t_a$ .....	37
<b>Abbildung 8-2:</b> Quotient des Einflussfaktors $1/A_1$ im doppelt-logarithmischen Maßstab, gerade Kurvenverläufe .....	38
<b>Abbildung 8-3:</b> Versagensarten einer unidirektionalen Laminatschicht entsprechend den Gleichungen 8.9 und 8.10 [35] .....	42
<b>Abbildung 8-4:</b> Stabwerkmodell zur Berechnung der Tragfähigkeit einer Schraubenverbindung [33] .....	50
<b>Abbildung 8-5:</b> Beispielhafte Ermittlung der maßgebenden Breite $w^*$ bzw. $e_{2,\perp}^*$ [33] .....	50
<b>Abbildung 8-6:</b> Typische Versagensmechanismen für geschraubte Verbindungen in GFK ....	51
<b>Abbildung 8-7:</b> Scherfuge in einem pultrudierten Flachprofil mit zweischnittiger Verklebung unter zentrischer Zugkraft .....	56
<b>Abbildung 8-8:</b> Interaktion in der Klebefuge .....	56

# Zeichenerklärungen

Sämtliche im Folgenden nicht angegebenen Formelzeichen sind der DIN EN 1990 zu entnehmen.

## Physikalische Kenngrößen

$E$	Elastizitätsmodul (Kurzzeitkennwert)
$G$	Schubmodul
$K$	Kompressionsmodul
$\nu$	Querkontraktionszahl (entspricht $\mu$ nach DIN 18820)
$\sigma$	Spannung
$\tau$	Schubspannung
$\gamma$	Schubverzerrung
$\varepsilon$	Dehnung
$\sigma_f$	Kriechzahl
$f_k$	Charakteristische Festigkeit
$m$	Neigung der Lebensdauerlinie
$u, v, w$	Verformungen in x- (Längsdehnung), y- und z-Richtung (Durchbiegung)
$T$	Temperatur
$t$	Zeit
$t_R$	Bemessungszeitraum
$t_b$	Standzeit
$t_E$	Einwirkungsdauer

## Querschnittsgrößen

$A$	Querschnittsfläche, Ansichtsfläche
$D$	Durchmesser, Plattenbiegesteifigkeit
$I$	Flächenmoment 2. Grades
$S$	Statisches Moment
$W$	Elastisches Widerstandsmoment
$a, b, h$	geometrische Größe, Abmessung
$d$	Durchmesser, Dicke
$N$	Normalkraft
$M$	Biegemoment
$V$	Querkraft
$d_S$	Schaftdurchmesser Verbindungsmittel

**Einwirkungen, Widerstandsgrößen, Sicherheitselemente und Teilsicherheitsbeiwerte**

$E$	Einwirkung
$F$	Kraft (Allgemeines Formelzeichen)
$\varphi$	Faservolumengehalt (entspricht $V_f$ )
$F_{zd}$	Abreiß- oder Umlenkraft
$G$	Ständige Einwirkung
$Q$	Veränderliche Einwirkung
$S$	Beanspruchung (Reaktion auf Einwirkungen, z. B. Verformung)
$D$	Dehngrenze
$C_d$	Bemessungswert der Bauteil- oder Werkstoffeigenschaft
$R$	Widerstand
$\gamma$	Teilsicherheitsbeiwert (stets mit Fußzeiger)
$\gamma_{E,i}$	Teilsicherheitsbeiwert der $i$ -ten Einwirkung
$\gamma_M$	Teilsicherheitsbeiwert für die Widerstandsgrößen
$\psi$	Kombinationsbeiwert
$\delta$	Glasmassenanteil (entspricht $\psi$ nach DIN 18820)
$A_{mod}$	Werkstoffspezifischer Modifikationsfaktor, berücksichtigt den Einfluss der Einwirkungsdauer, der Umweltbedingungen und der Temperatur auf die Bauteileigenschaften
$A_i$	Einflussfaktoren zur Ermittlung von $A_{mod}$
$P_f$	Versagenswahrscheinlichkeit
$E_e$	Ersatzbeanspruchung für den Bruchzustand
$E_{RK}$	Charakteristischer Widerstand am Ende des Bemessungszeitraums
$\mu_R$	Mittelwert einer Widerstandsgröße
$\sigma_R$	Standardabweichung
$k_s$	Faktor zur Ermittlung von $R_{k0,95}$
$s_k$	Charakteristischer Wert der Schneelast auf dem Boden
$t_a$	Akkumulierte Last-Einwirkungsdauer
$t_R$	Bemessungszeitraum
KLED	Klassen der Last-Einwirkungsdauer
LK	Lastkombination
LF	Lastfall
$g$	Eigenlast
$q$	veränderliche Last
$\Delta T$	Temperaturlast

**Fußzeiger**

<i>f</i>	Faser
<i>d</i>	Bemessungswert
<i>k</i>	charakteristischer Wert
<i>m</i>	Material, Biegung, Mittelwerte
<i>t</i>	Zug
<i>c</i>	Druck
<i>u</i>	Bruchzustand
0,05	5 %-Fraktil-Wert
0,95	95 %-Fraktil-Wert
0	Winkel $0^\circ$ zwischen Kraft- und Faserrichtung bzw. Verstärkungsrichtung
90	Winkel $90^\circ$ zwischen Kraft- und Faserrichtung bzw. Verstärkungsrichtung
<i>cr</i>	kritisch
<i>el</i>	elastisch
<i>max</i>	maximal
<i>inf</i>	unterer Wert
<i>sup</i>	oberer Wert
<i>N</i>	Normalkraft
<i>B</i>	Biegung
$\tau$	Schubspannung
<i>Z</i>	Zylinderwand
<i>ZÜ</i>	Zylinderübergang, Zylinderfuß
<i>F</i>	Füllgut
<i>U</i>	Unterdruck
<i>Ü</i>	Überdruck

**Hochzeiger**

<i>f</i>	Festigkeit
<i>E</i>	E-Modul
<i>D</i>	Dehngrenze

**Kurzzeichen für unverstärkte und verstärkte Kunststoffe und deren Ausgangsstoffe**

CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
EP	Epoxidharz
FVK	Faserverstärkter Kunststoff, Faserverbundkunststoff
GF-UP	ungesättigtes Polyesterharz, glasfaserverstärkt

---

GF-PHA	Polyhydroxyalkanoate, glasfaserverstärkt
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
PA	Polyamid
PAN	Polyacrylnitril
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PE-HD	Hard-Polyethylen
PF	Phenolharz
PHA	Phenacrylatharz
PMI	Polymethacrylimid
PMMA	Polymethylmethacrylat
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PP-H	Homo-Polypropylen
PPD-T	Polyparaphenylenterephthalamid
PUR	Polyurethan
PVC-U	Hard-Polyvinylchlorid
PVC-NI	Polyvinylchlorid, normal schlagzäh
PVDF	Polyvinylidenfluorid
UP	ungesättigtes Polyesterharz
VE	Vinylesterharz
FM	Wickellaminat senkrecht zur Wickelrichtung nach DIN 18820 – Teil 2
FMU	Wickellaminat parallel zu Wickelrichtung nach DIN 18820 – Teil 2
M	Wirrfaserlaminat nach DIN 18820 – Teil 2
MW	Mischlaminat nach DIN 18820 – Teil 2



# 1 Anwendungsbereich und Anwendungsbedingungen

## 1.1 Allgemeines

(1) Diese Empfehlungen sind anzuwenden für den Entwurf und die Bemessung tragender Konstruktionen des Hoch- und Ingenieurbaus, die ganz oder teilweise aus Duroplasten oder Thermoplasten bestehen.

(2) Nicht in den Anwendungsbereich dieser Empfehlungen fallen u. a.:

- Elemente mit bauaufsichtlicher Zulassung (z. B. Dübel, Lager aus Elastomere)
- Hilfsbauteile für rein konstruktive Zwecke
- Schaumstoff-Leichtbeton, kunststoff- oder textildbewehrter Beton
- Membrane

## 1.2 Temperaturbereich

(1) Bei der Materialauswahl (speziell der Harze) ist auf die Temperaturen im Einsatzbereich zu achten.

## 1.3 Materialkennwerte

(1) Bei der Berechnung von Bauteilen sind neben den Teilsicherheitsbeiwerten der maßgeblichen Kurzzeitkennwerte auch die Einflüsse der Zeit (i. W. Lasteinwirkungsdauer), des umgebenden Mediums, einer nicht ruhenden Beanspruchung sowie der Temperatur bei der Ermittlung der charakteristischen Werte zu berücksichtigen.

## 1.4 Dichtheit

(1) Ein Nachweis der Wasser- bzw. Gasdichtheit ist zu führen, wenn es aus Umweltschutzgründen oder zur Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit des Bauteils notwendig ist.

## 1.5 Brandverhalten und erhöhte Temperaturen

(1) Kunststoffe haben ein temperaturabhängiges Verhalten und sind aufgrund ihres organischen Aufbaus generell brennbar. Für die einzelnen Regelungen werden folgende Temperaturbereiche betrachtet:

- Normaltemperatur von minimal  $-20\text{ °C}$  (bei Duroplasten  $-30\text{ °C}$ ), bis maximal  $40\text{ °C}$
- erhöhte Temperatur bis zur Anwendungsgrenze
- hohe Temperatur über der Anwendungsgrenze (Brandfall)

Die Anwendungsgrenze ist eine für jeden Kunststoff individuell unterschiedliche Temperatur, bei der irreversible chemische Zersetzungs Vorgänge beginnen bzw. der Elastizitätsmodul des Materials überproportional abnimmt.

## 1.6 Toxizität

(1) Die Toxizität (Grad der schädigenden Wirkung in Abhängigkeit von der Art der Einwirkung, Umweltschutz) regelt DIN 53436.

## 1.7 Resistenz gegen aggressive Medien

(1) Die Resistenz der Materialien gegen aggressive Medien wie z. B. Säuren und Laugen ist gegebenenfalls nachzuweisen. Für glasfaserverstärkte Kunststoffe aus GF-UP und GF-PHA regelt dies die Medienliste 40 für Behälter, Auffangvorrichtungen und Rohre aus Kunststoff des DIBt, die EN 13121 „Oberirdische GFK-Tanks und –Behälter mit dem Teil 2: Verbundwerkstoffe – Chemische Widerstandsfähigkeit sowie die DIN 18820-3<sup>1</sup>.

Bei PE-HD gilt das Beiblatt 1 der DIN 8075.

## 1.8 Anwendungsbedingungen

(1) Die Anwendung dieser Empfehlungen setzt eine entsprechende Qualifikation und Sorgfalt der Tragwerksplaner und Ausführenden, der Prüfengeure und Überwachenden voraus. Die Bemessungsverfahren sind nur dann gültig, wenn die Anforderungen an die Bauausführung nach Abschnitt 10 erfüllt sind.

## 1.9 Nicht genormte Baustoffe

(1) Kommen Werkstoffe zur Anwendung, die nicht geregelt sind, dann sind die Werkstoffkennwerte durch eine dafür kompetente Materialprüfanstalt oder gleichwertige Institution experimentell zu ermitteln. Die Ergebnisse sind hinsichtlich der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit für die geplante Konstruktion oder die Bauteile gutachterlich zu bewerten.

(2) Es wird empfohlen die Vorgehensweise zur Ermittlung der Werkstoffkennwerte rechtzeitig mit der für die Bauaufsicht zuständigen Stelle und die Schritte im Zuge des Genehmigungsverfahrens mit der Bauaufsicht selbst abzustimmen.

## 1.10 Nichtruhende Belastungen / Beanspruchungen

Bauteile mit nichtruhender Belastung / Beanspruchung sind gesondert nachzuweisen. Die Ermüdungsfestigkeit bedarf einer gesonderten Untersuchung im Einzelfall. (s.a. VDI 2014, Blatt 3)

---

<sup>1</sup> Die Normenreihe der DIN 18820 ist offiziell zurückgezogen. Inhaltlich ist sie in die Normenreihe DIN EN 13121 eingegangen. In der Praxis wird die DIN 18820 weiter verwendet und wird daher in der TKB-Empfehlung ebenfalls zitiert.



## 2 Bautechnische Unterlagen

### 2.1 Art der bautechnischen Unterlagen

(1) Zu den bautechnischen Unterlagen gehören die wesentlichen Zeichnungen, die statische Berechnung und eine ergänzende Baubeschreibung sowie etwaige Zulassungs- und Prüfbescheide.

### 2.2 Zeichnungen

(1) Die tragenden Bauteile, ihr Querschnittsaufbau sowie alle Einbauteile und Verbindungen sind zeichnerisch eindeutig und übersichtlich darzustellen und zu vermaßen. Die Darstellungen müssen mit den Angaben in der statischen Berechnung übereinstimmen und alle Maße, die für die Ausführung der Bauteile und für die Prüfung der Berechnungen erforderlich sind, enthalten.

(2) Auf den Ausführungsplänen ist insbesondere anzugeben:

- Art der Kunststoffe, der Reaktionsharze und der Zusatzstoffe
- Art und Aufbau der Verstärkungswerkstoffe
- Aufbau der Oberflächen- und Chemieschutzschichten
- Angabe der Dicken zu den Gesamt- und Teilschichten der Lamine mit den dazugehörigen Toleranzen
- Angabe des Herstellungsverfahrens und der dazugehörigen Aushärtungsbedingungen
- Hinweise für das Entformen, die Lagerung, den Transport und die Montage
- Angaben zu den Verbindungsmitteln. Bei Schweißungen gehören dazu Einzelheiten der Schweißnahtvorbereitung und zum Aufbau der Nähte.

(3) Für den Zusammenbau der Bauteile sind Montagepläne anzufertigen.

(4) Die Übereinstimmung der statischen Berechnung und der Ausführungspläne ist verantwortlich festzustellen.

### 2.3 Statische Berechnung

(1) Die Standsicherheit bzw. die ausreichende Bemessung einer Konstruktion und ihrer Bauteile sowie die Gebrauchstauglichkeit sind in der statischen Berechnung übersichtlich und prüffähig nachzuweisen.

(2) Die statische Berechnung muss ausreichende Angaben enthalten zu:

- Nutzungsdauer der Konstruktion
- Größe und Zeitdauer der Einwirkungen, z. B. auch den auftretenden Temperaturen, den Umweltbedingungen und den Druckverhältnissen
- verwendeten Kunststoffen, Reaktionsharzen, Verstärkungsmaterialien und Zusatzstoffen
- gewählten Herstellungsverfahren
- vorgenommenen Idealisierungen zum statischen System für den Bau- und Endzustand
- Kenndaten des Baugrundes und/oder der Hinterfüllung

– Verbindungsmitteln.

(3) Es sind die Grundlagen zur Berechnung der Verformungen, Spannungen und Schnittgrößen aus den Einwirkungen sowie für die Erfassung der Zeit-, Temperatur- und Medienabhängigkeit zu erläutern.

(4) In den Nachweisen sind baupraktisch unvermeidliche Toleranzen bei Herstellung und Montage zu berücksichtigen. Das gilt insbesondere für alle beanspruchungserhöhenden Einflüsse (Bohrungen, Randausschnitte unter Berücksichtigung von Eckausrundungen, Einspannungen, Deformationen der Unterstützungsstruktur, Temperaturdehnungen, Lagerexzentrizitäten, Montagezwängungen).

(5) Wechselwirkungen der Bauteile aus Kunststoffen zu Bauwerken oder Bauteilen aus anderen Baustoffen sind zu berücksichtigen. Dies gilt insbesondere für die Auflagerbedingungen und Zwangsbeanspruchungen. Es wird auf die erforderliche Koordination zwischen den unterschiedlichen Fachplanern hingewiesen.

(6) Wechselwirkungen zwischen Bauwerk und Baugrund bzw. Hinterfüllung sind aufzuzeigen und, wenn statisch von Bedeutung, rechnerisch zu verfolgen. Dazu sind ausreichende Baugrundaufschlüsse sowie Aussagen eines Baugrundsachverständigen zu den bodenphysikalischen Kennwerten Voraussetzung (Gründungsbeurteilung).

(7) Um für die Ausführungsunterlagen eine gesicherte Grundlage zu haben, ist es erforderlich, dass die übersichtlich zusammengestellten Lastannahmen vom späteren Nutzer des Bauwerks bestätigt werden. Das gilt insbesondere für Verkehrslasten, Drücke, Temperaturen, Beanspruchungen infolge Korrosion sowie für Einwirkungen oder Widerstände aus Schüttgütern und Hinterfüllungen.

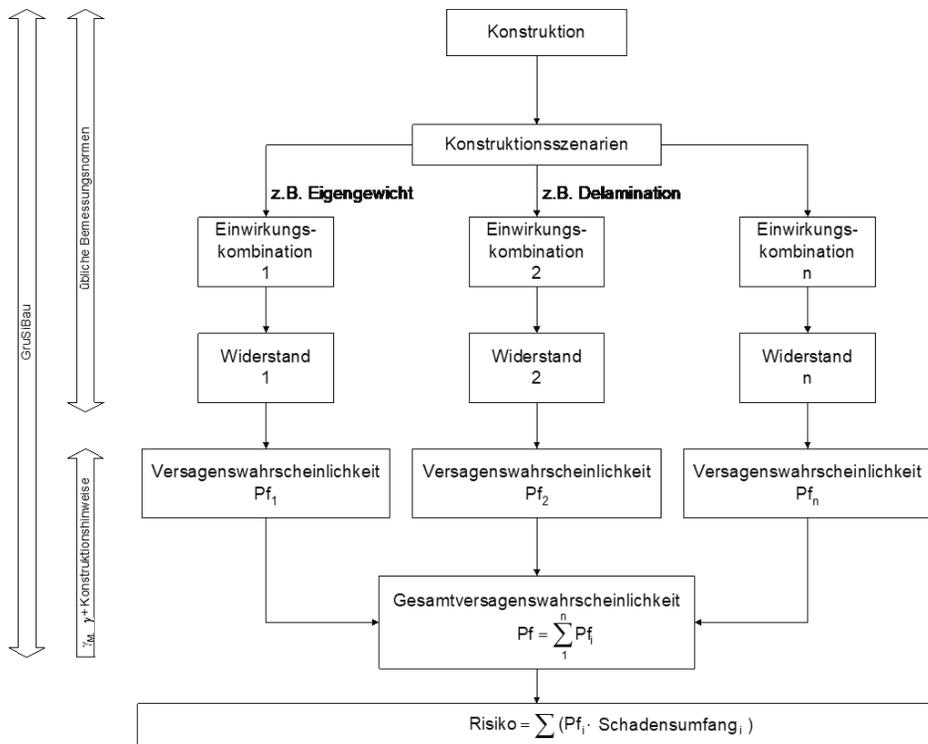
## 2.4 Baubeschreibung

(1) Angaben, die für die Herstellung des Bauteils, die Prüfung der Zeichnungen und der statischen Berechnungen notwendig sind, insbesondere die aus den vorgenannten Unterlagen nicht ohne weiteres entnommen werden können, müssen in einer Baubeschreibung enthalten und erläutert sein. Für Bauteile, die im Werk hergestellt und auf einer Baustelle zu Konstruktionen zusammengesetzt werden, sind beispielsweise detaillierte Angaben zur Lagerung, zum Transport und zur Montage der Bauteile erforderlich.

### 3 Sicherheitskonzept

#### 3.1 Allgemeines

(1) Alle Konstruktionen, deren Versagen eine Gefährdung von Menschen oder Sachen darstellen kann, bedürfen eines Nachweises ausreichender Tragfähigkeit. Üblicherweise werden in der praktischen Tätigkeit eines Ingenieurs die in Normen und Regelwerken festgeschriebenen Sicherheitsbeiwerte zur Erfüllung o.g. Anforderungen verwendet. Prinzipiell gilt, dass für eine Konstruktion die möglichen Schadensszenarien betrachtet und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten durch verschiedene Maßnahmen so begrenzt werden, dass das resultierende Risiko akzeptabel klein ist. Für übliche Bauwerke sind die anzustrebenden Versagenswahrscheinlichkeiten der GruSiBau [8] und DIN EN 1990 zu entnehmen. Sind bei dem Versagen besondere Gefahren wie Umweltgefährdung, chemische Verunreinigung u. a. zu befürchten, reicht das versagenswahrscheinlichkeitsorientierte Vorgehen der GruSiBau [8] nicht aus. Es muss das resultierende Risiko begrenzt werden. **Abbildung 3-1** zeigt das Vorgehen stark vereinfacht.



**Abbildung 3-1:** Ermittlung der vorhandenen Sicherheit

(2) Die dem Ingenieur bereitzustellenden Instrumente sollten möglichst einfach sein, jedoch wichtige Systemeigenschaften beinhaltende Maßnahmen umfassen.

### 3.2 Sicherheitsnachweis

(1) Zielsetzung einer ausreichenden Bemessung in Form eines Sicherheitsnachweises ist es sicherzustellen, dass die Konstruktion während ihrer planmäßigen Nutzungsdauer mit ausreichender Wahrscheinlichkeit den Einwirkungen widersteht.

(2) Für die Bemessung von tragenden Kunststoffbauteilen hat sich der Einsatz von Teilsicherheitsbeiwerten (gesplittet nach Widerstand und Einwirkungen) bei gleichzeitiger Formulierung von material- und konstruktionsspezifischen Ausführungshinweisen als sicher und wirtschaftlich herausgestellt. Zu berücksichtigen ist insbesondere die von einer Dauereinwirkung abhängige Beeinflussung des Widerstands. Die rechnerischen Beanspruchungen (unter Berücksichtigung aller Einwirkungen) müssen unterhalb der Zeitstand- bzw. Lebensdauerlinie liegen, welche die Widerstandscharakteristik wiedergibt. Alle in Versuchen zur Ermittlung der Zeitstandfestigkeit realisierten Einflüsse spiegeln sich in der Zeitstandlinie wieder. Einflüsse, die hierin nicht erfasst sind, müssen zusätzlich mit genügender Sicherheit mit Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Dies gilt insbesondere für nicht ruhende Lasten, die in erster Linie die Neigung der Zeitstandlinie beeinflussen. Für kurzzeitig wirkende Lasten kann ein weiterer Kurzzeitznachweis erforderlich werden. Bei Anwendung der Schadensakkumulationsregel, (eigentlich werden Schädigungen (Problem der Englischübersetzung!) akkumuliert. Ein dabei sich ausbildender Schaden ist Aufgabe für das Schadenstoleranzkonzept), wie im Abschnitt 3.4 beschrieben, ist dies nicht erforderlich. Dann können die zuvor genannten Nachweise in einen überführt werden.

(3) Für Bauteile aus Kunststoff werden Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** empfohlen (siehe auch Abschnitt 6). Für die Widerstandsseite werden die charakteristischen Werte und die Modifikationsfaktoren  $A_{\text{mod}}$  zur Erfassung der Dauer der Einwirkungen, der vorhandenen Temperatur und des umgebenden Mediums in Abschnitt 5 definiert.

(4) Zugehörige Konstruktionshinweise, die Teil des Sicherheitskonzepts sind, befinden sich in Abschnitt 9.

### 3.3 Nachweisverfahren – Regelverfahren

(1) Die Nachweise sollen bewirken, dass zu jedem kritischen Zeitpunkt die einwirkenden Beanspruchungen, die während der planmäßigen Nutzungsdauer erwartet werden, in Verbindung mit der Einwirkungszeit mit genügender Wahrscheinlichkeit den Grenzwert der Tragfähigkeit nicht überschreiten, der durch die Zeitstand- bzw. Lebensdauerlinie (zeitabhängige Beanspruchbarkeit) vorgegeben ist.

(2) Die nachfolgenden Regeln stellen ein Verfahren für den Kurzzeit- und Zeitstandfestigkeitsnachweis von Bauteilen dar.

(3) Da sich bei Kunststoffen die Widerstandscharakteristik durch die Einwirkungsgeschichte des Bauteils ändert, müssen die Versagenswahrscheinlichkeiten infolge der zeitabhängigen Einwirkungen mit einer Schadensakkumulationsregel berücksichtigt werden. Dies geschieht vereinfachend mit Einflussfaktoren.

Dieser Regelnachweis ist in Abschnitt 8 ausführlich dargestellt.

### 3.4 Nachweisverfahren auf Basis einer Schadensakkumulation

#### 3.4.1 Allgemeines

(1) Mit Kenntnis der statistischen Werte der einwirkenden Beanspruchungen und der Widerstände der Kunststoffe (Zeitstandverhalten, Verhalten bei Einwirkung von nicht ruhenden Lasten usw.) kann ein genauerer Nachweis, als im Regelnachweis beschrieben, geführt werden. Die im Abschnitt 3.4.4 vorgestellte Schadensakkumulationsregel ist Grundlage dieses genaueren Nachweises unter Zugrundelegung von Versuchsergebnissen, entsprechend Abschnitt 5.1, Materialprüfungen, zur Ermittlung einer Zeitstand- oder Lebensdauerlinie (Beanspruchbarkeit).

(2) In der für die Bemessungssituation formulierten Grenzzustandsgleichung können unter Zugrundelegung der Begrenzung der maßgebenden Versagenswahrscheinlichkeit die exakten Teilsicherheitsbeiwerte ermittelt werden. Dicht unter der Zeitstand- oder Lebensdauerlinie liegende und stark streuende Einwirkungen ergeben eine große Versagenswahrscheinlichkeit (Einwirkungen oberhalb der Zeitstand- oder Lebensdauerlinie führen zum Versagen). Wenig streuende und unter der Zeitstand- oder Lebensdauerlinie liegende Einwirkungen weisen eine niedrige Versagenswahrscheinlichkeit auf. Eine Abschätzung der erforderlichen Teilsicherheitsbeiwerte für eine angestrebte, genügend geringe Versagenswahrscheinlichkeit ist erforderlich. Hierzu kann die Schadensakkumulationsregel mit den empfohlenen Teilsicherheitsbeiwerten nach Anhang D genutzt werden.

#### 3.4.2 Zeitstandbeanspruchung im Hinblick auf die Lebensdauer (Einwirkungen)

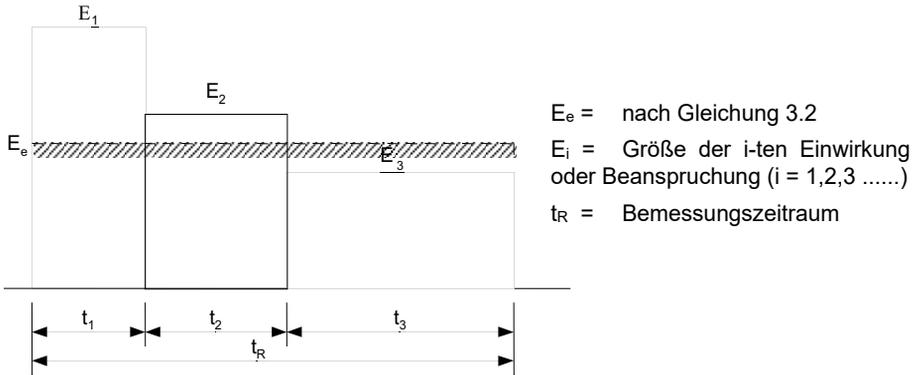
(1) Die theoretische Lebensdauer eines Bauteils, gerechnet als Zeitspanne der Beanspruchung bis zum Versagen, hängt hauptsächlich ab von:

- der Art, Größe und Dauer der Einwirkungen
- der Temperatur
- dem umgebenden Medium
- den nicht ruhenden Lasten (z. B. Verkehr, Wind)
- den Konstruktionsgegebenheiten (Bauteilabmessungen, Form, Laminataufbau, Anschlussdetails usw.)

(2) Die für den Zeitstandfestigkeitsnachweis zugrunde gelegte Belastung sollte die normale Zeitstandbelastung einschließlich nicht ruhender Einwirkungen, Temperatur- und Medieneinfluss möglichst genau wiedergeben.

(3) Die maßgebenden Werte für die einwirkende Zeitstandbeanspruchung können Abschnitt 6 entnommen werden. Die Zeitstandbelastung kann aus verschiedenen Lastfällen zusammengesetzt werden, die jeweils durch Ort und Größe der Lasten und ihre Häufigkeit beschrieben werden und in einem Kollektiv zusammengefasst sind. Die experimentell nicht erfassten Einflüsse müssen mit Einflussfaktoren geeignet berücksichtigt werden.

(4) Die vollständigen Belastungsfolgen werden sinnvollerweise als Beanspruchungs-Zeit-Verlauf in einem Kollektiv wie folgt dargestellt (**Abbildung 3-2**). Dieses Kollektiv sollte mindestens in drei Einwirkungsblöcke geteilt werden, in kurzzeitig und mittellang wirkende Lasten sowie ständige Lasten.



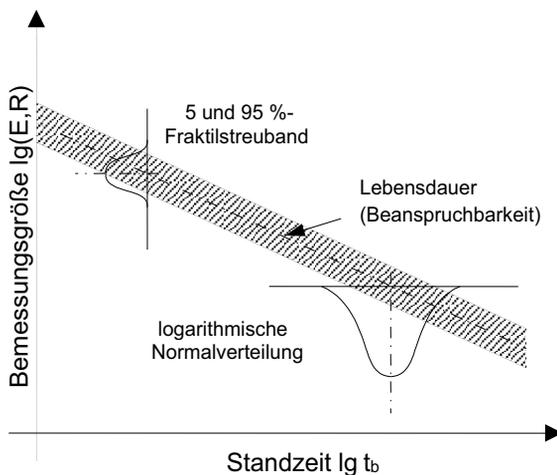
**Abbildung 3-2:** Einwirkungskollektiv im Bemessungszeitraum  $t_R$

(5) Für kurzzeitige Einwirkungen, für mittellange Einwirkungen und ständige Einwirkungen wie Eigenlasten können die Teilsicherheitsbeiwerte in Anhang D entnommen werden.

(6) Bei höheren Sicherheitsanforderungen wird insbesondere empfohlen, die Kontrollen bei Herstellung und Montage sowie die Überwachung im Betrieb zu verbessern oder höhere Teilsicherheitsbeiwerte einzuführen.

### 3.4.3 Zeitstandbeanspruchbarkeit im Hinblick auf die Lebensdauer (Widerstand)

(1) Die Zeitstandbeanspruchbarkeit ist durch Versuche als Lebensdauerlinie im log-log-Diagramm darzustellen (Abbildung 3-3).



**Abbildung 3-3:** Beispiel einer Lebensdauerlinie (Zeitstandbeanspruchbarkeit) am Beispiel GFK

(2) Die Zeitstandbeanspruchbarkeit kann unter Zugrundelegung einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 95 % dargestellt werden. Diese ergibt sich sowohl in Zeitrichtung als auch in Beanspruchungsrichtung bei Eintragung paralleler Streubänder. Die unteren Grenzwerte ergeben die charakteristischen Werte des Widerstands.

(3) Mit den Versuchsproben ist der Beanspruchungszustand in der realen Konstruktion möglichst genau nachzustellen.

(4) Risse und Delaminierungen entstehen oft an Punkten mit Spannungskonzentrationen, hervorgerufen durch abrupte Querschnittsänderungen. Erhebliche Verbesserungen der Zeitstandfestigkeit können durch Reduktion der Spannungskonzentration bewirkt werden (siehe Abschnitt 9, bauliche Durchbildung).

### 3.4.4 Bemessungsverfahren mit Ersatzbeanspruchung

(1) Der Sicherheitsnachweis beruht auf der Anwendung einer Schadensakkumulationsregel auf Basis der Miner-Regel. Die Schadensakkumulationsregel stellt sich für nicht ruhende Lasten entsprechend der Miner-Regel wie auch für konstante Zeitstandlasten (entsprechend der Robinson-Thaira-Regel) nach dem gleichen Formalismus dar (siehe Gleichung (3.1) und Abbildung 3-4).

$$\sum_{i=1}^n \frac{t_{E,i}}{t_{b,i}} \leq 1 \quad (3.1)$$

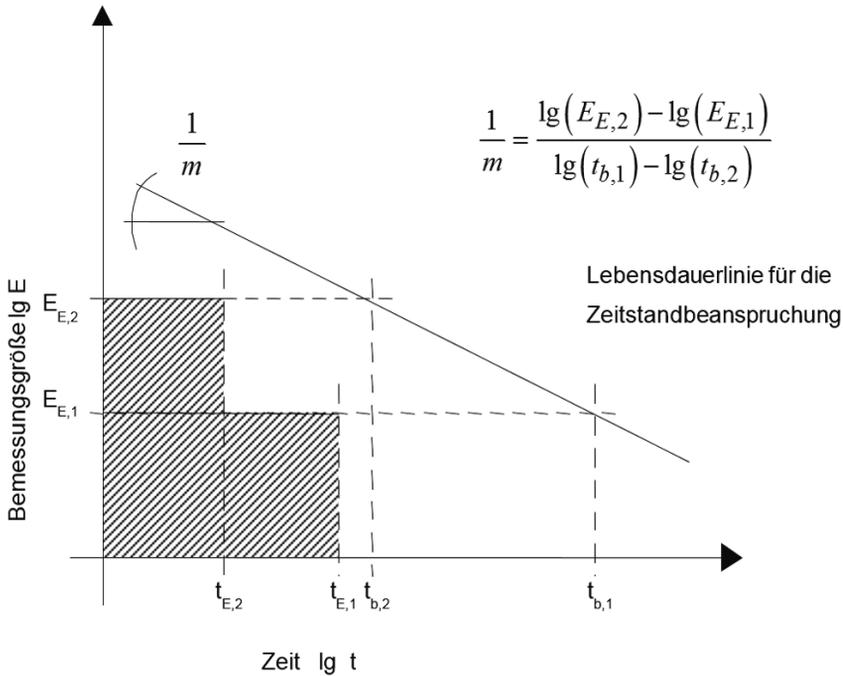
mit:

$E_i$   $i$ -te Beanspruchung infolge äußerer Einwirkungen

$t_{E,i}$  Einwirkungsdauer auf dem Beanspruchungsniveau  $E_i$

$t_{b,i}$  ertragbare Zeit auf dem Beanspruchungsniveau  $E_i$

(2) Ist die Zeitstandgerade abschnittsweise linear (als Approximation), so ist  $m_i$  für die einzelnen Abschnitte zu berechnen und mit den Einwirkungsauern zu korrelieren.



**Abbildung 3-4:** Anwendung der Gleichung 3.1 für 2 Einwirkungen und Ermittlung der Neigung der Zeitstandgeraden für faserverstärkte duroplastische Produkte

(3) Die Einzelschädigungen auf der Stufe verschiedener Beanspruchungen  $E_i$  können summiert und in eine schadensgleiche konstante Beanspruchung  $E_e$  umgerechnet werden. Gleichung (3.2) zeigt die Berechnung der Ersatzbeanspruchung für den Nutzungszeitraum  $t_R$ .

$$E_e = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (\gamma_{E,i} \cdot E_i)^{m_i} \cdot t_{E,i}}{t_R} \right\}^{\frac{1}{m^*}} \quad (3.2)$$

mit:

$E_e$  Ersatzbeanspruchung auf der Ebene des Bruchzustandes

$E_i$   $i$ -te Beanspruchung infolge äußerer Einwirkungen

$t_{E,i}$  Einwirkungsdauer auf dem Beanspruchungsniveau  $E_i$

$t_R$  Bemessungszeitraum

$\gamma_{E,i}$  Teilsicherheitsbeiwert für die  $i$ -te Einwirkung

$m_i$  Neigung der Zeitstandgeraden im doppellogarithmischen Maßstab für den  $i$ -ten Abschnitt

$m^*$  Für eine Zeitstandgerade gilt  $m^* = m - m_i$

Für abschnittsweise lineare Zeitstandlinien wird  $m^*$  als Mittelwert aller  $m_i$  eingesetzt.

(4) Diese mittels der Schadensakkumulationsregel berechnete Ersatzbeanspruchung  $E_e$ , die zu derselben Schädigung des Bauteils geführt hätte, wie die real einwirkenden Beanspruchungen des Einwirkkollektives, wird am Ende des Bemessungszeitraumes dem noch vorhandenen Widerstand gegenüber gestellt (Abbildung 3-5).

(5) Es ergibt sich:

$$\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^* \cdot \frac{E_e}{E_{R,k}} \leq 1 \quad (3.3)$$

mit:

$E_e$	Ersatzbeanspruchung für den Bruchzustand (Bemessungswert)
$\gamma_M$	Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand
$E_{R,k}$	charakteristischer Widerstand am Ende des Bemessungszeitraumes
$A_{\text{mod}}^*$	werkstoffspezifischer Modifikationsfaktor zur Berücksichtigung von Einflüssen, die nicht experimentell erfasst sind

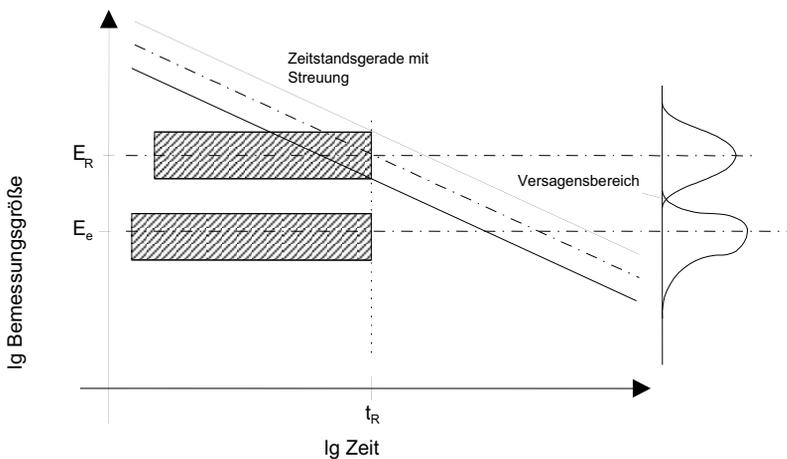


Abbildung 3-5: Bemessung am Ende des Bemessungszeitraumes  $t_R$  am Beispiel GFK

### 3.4.5 Bemessungsverfahren mit Hilfe der Schadensakkumulation

(1) Alternativ zum Nachweis mit Ersatzspannungen (Abschnitt 3.4.4) kann insbesondere bei gekrümmten Widerstandslinien der Nachweis über die Einzelschädigungen erbracht werden (vergl. auch DVS 2205-1).

(2) Die theoretische Lebensdauerlinie stellt sich für glasfaserverstärkte Kunststoffe mit duroplastischer Matrix in der Regel als Gerade im doppeltlogarithmischen Maßstab dar. Ansonsten sollte sie abschnittsweise als Polygonzug approximiert werden.

(3) Der Lebensdauernachweis für die Zeitstandsbeanspruchung wird anhand der Schädigungen durchgeführt.

Gleichung (3.4) zeigt den Nachweis in Abhängigkeit von der Zeit.

$$\sum_{i=1}^n \gamma_{E,i} \cdot \gamma_M \cdot \frac{t_i(E_i)}{t_{b,i}(E_i)} \leq 1 \quad (3.4)$$

mit:

$\gamma_{E,i}$  Teilsicherheitsbeiwert für die i-te Einwirkungen

$\gamma_M$  Teilsicherheitsbeiwert für die Widerstände

bei nicht parallelen Streubändern ist eine besondere Betrachtungsweise notwendig

$E_i$  i-te Beanspruchung infolge der Einwirkungen

$t_i(E_i)$  Belastungsdauer auf dem Beanspruchungsniveau  $E_i$

$t_{b,i}(E_i)$  ertragbare Zeit (Bruchzeitpunkt) auf dem Beanspruchungsniveau  $E_i$  (Beanspruchbarkeit)

(4) Da in Gleichung (3.4) andere Teilsicherheitsbeiwerte eingeführt werden, ist der Nachweis in Beanspruchungsrichtung zu bevorzugen. Umgerechnet auf die Beanspruchungsebene ergibt sich Gleichung (3.5)

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \left( \gamma_{E,i} \cdot \gamma_M \cdot \frac{E_i}{R_i} \right)^{m_i} \right\}^{\frac{1}{m^*}} \leq 1 \quad (3.5)$$

mit:

$\gamma_{E,i}$  Teilsicherheitsbeiwert für die i-te Einwirkung

$\gamma_M$  Teilsicherheitsbeiwert für die Widerstände

$E_i$  Beanspruchung infolge der i-ten Einwirkung

$R_i$  zugehörige Beanspruchbarkeit aus der Gleichung der Zeitstandsbeanspruchung

$m^*$  Mittelwert der Neigungen des Polygonzuges der Lebensdauerlinie

$m_i$  Neigung des betrachteten Abschnittes des Polygonzuges der Lebensdauerlinie

(5) Es ist zu beachten, dass Änderungen der Zeitstandsbelastung oder der Beanspruchungsverteilung, die z. B. durch nachträgliche Änderung von Details entstehen können, die Lebensdauer

reduzieren und deshalb einen neuen Zeitstandfestigkeitsnachweis notwendig machen (siehe auch Abschnitt 8).



## 4 Ausgangsstoffe

### 4.1 Allgemeines

(1) Die Auswahl eines Kunststoffes bzw. Verbundkunststoffes setzt eine genaue Kenntnis der Ausgangsstoffe, der verwendeten Fertigungsverfahren, der Faserorientierung und der geplanten Einsatzbedingungen voraus.

(2) Im Folgenden werden die Grundwerkstoffe wie Fasern, Kunststoffe und Schaumstoffe kurz erläutert.

### 4.2 Fasern

#### 4.2.1 Allgemeines

(1) Für Faserverbundkunststoffe, welche als tragende Teile im Baubereich eingesetzt werden, kommen in erster Linie Glas-, Carbon- und Aramid-Fasern zur Anwendung. Die Wahl der Faser hängt im Wesentlichen vom Einsatzgebiet des Faserverbundkunststoffes ab und damit von der erwarteten Medienbelastung (z. B. alkalisches Milieu des Betons), von dem erforderlichen E-Modul und der elektrischen oder thermischen Leitfähigkeit.

(2) Die besonderen Eigenschaften der Fasern werden im Folgenden beschrieben.

(3) Auf die Fasern kann in diesem Zustand noch eine Schlichte zum Oberflächenschutz und zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit und der Verbundeigenschaften (Haftung) mit dem Harz aufgebracht werden. Die Schlichte der Fasern unterliegt einer Alterung. Daher kommt den Lagerbedingungen der Fasern, vor allem hinsichtlich Temperatur und Feuchte eine besondere Bedeutung zu. Eine gealterte Schlichte führt zu starken Abminderungen der Verbundeigenschaften.

#### **Beschichtung vom Filament:**

Überzug der Filamente für textile Verarbeitung, sog. **Faserschlichte** (sizing, avivage), um deren Verarbeitbarkeit und auch Alkalibeständigkeit wie z. B. bei Basalt zu verbessern. Schlichte kann auch als Haftvermittler zwischen Filament und Matrix dienen. Dazu muss jedoch die Schlichte auf das entsprechende Matrixsystem abgestimmt sein. Die Schlichte wird vor dem weiteren Verarbeiten teilweise wieder entfernt.

**Beschichtung:** Imprägnierung, Durchtränkung der Produkte Roving/ Tow/ Faserstrang/Stab Überzug des textilen Produkts aus Gründen des Oberflächenschutzes und der Verbesserung der Haftung, also des Grenzflächenverhaltens von Faserbewehrung-Beton. (Note: Organische Polymer-Dispersionen aus EP, Silane Styrol-Butadien, TP-kompatibel und in Zukunft hoffentlich mineralische Beschichtungen, um die Feuerwiderstandsfestigkeit zu steigern. Allein eine vollständige Beschichtungsimprägnierung (vor der Härtung ist eine Roving-Durchtränkung bis ins Innere notwendig) auch der innen liegenden Filamente garantiert eine gleichmäßige Ausnutzbarkeit aller Filamente eines Rovings.)

**Tränkung:** Roving, Faserstrang, Tow, Gitter

Tiefen-Imprägnierung, damit eine möglichst gleiche Ausnutzung aller roving-internen Filamente stattfinden kann.

### 4.2.2 Glasfasern

(1) Glasfasern stellen die Standardverstärkungsfasern für Anwendungen im Bauwesen dar. Die überwiegenden Anforderungen werden dabei von der E-Glasfaser erfüllt. Für Anforderungen hinsichtlich einer erhöhten Widerstandsfähigkeit gegenüber Medien oder basischer Umgebung sowie bei erhöhten Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften stehen weitere Faserarten unterschiedlicher Hersteller zur Verfügung, vgl. auch mit DIN EN 13121 Teil 1:

**E-Glas** (Electric): Faser für Standardanwendungen, ca. 90 % des Marktes, wird in basischer und saurer Umgebung angegriffen,

**S- oder R-Glas** (Strength/Résistance): Bor- und Bromfrei; für höhere mechanische Anforderungen als E-Glas,

**C-Glas** (Chemical): Faser mit hoher Chemikalienbeständigkeit; Einsatz in der Chemieschutzschicht,

**ECR-Glas** (E-Glass - Corrosion Resistant): Faser mit erhöhter Korrosionsbeständigkeit, Einsatz in der Chemieschutzschicht und im Traglaminat,

**AR-Glas** (Alkaline Resistant): Faser mit erhöhter Korrosionsbeständigkeit gegenüber einer basischen Umgebung, entwickelt für die Verstärkung von Beton,

**HM-Glas** (High Modulus): Faser mit einem erhöhten E-Modul (ca. 88 – 96 GPa gegenüber ca. 73 GPa für E-Glasfaser).

(2) Glasfasern werden von anorganischen Basen und anderen Medien angegriffen und sind daher durch eine wirksame Oberflächenversiegelung zu schützen. Es wird auf die DIN 18820-3 verwiesen.

(3) Die thermischen und mechanischen Eigenschaften von Glasfasern sind weitestgehend isotrop.

### 4.2.3 Aramidfasern

(1) Aramidfasern (Aromatisches Polyamid) werden aus polymeren Grundmaterialien unter Zugabe von Schwefelsäure ( $H_2SO_4$ ) gesponnen.

(2) Aramidfasern haben gegenüber den Glasfasern einen höheren E-Modul und auch eine höhere Festigkeit. Jedoch sind die Faser extrem anisotrop, haben einen negativen Wärmeausdehnungskoeffizienten und sind hygroskopisch.

(3) Aramidfasern werden vorzugsweise im Bereich des Impact- oder Ballistiksches eingesetzt. Aramidfaserverstärkte Kunststoffe können – im Verhältnis zu GFK geringere Druckspannungen aufnehmen.

### 4.2.4 Carbonfasern

(1) Carbonfasern werden durch Oxidation und Karbonisieren einer Grundfaser, in der Regel einer PAN-Faser, hergestellt.

(2) Carbonfaser sind ebenfalls anisotrop und besitzen einen negativen Wärmeausdehnungskoeffizient.

(3) Carbonfasern besitzen einen hohen E-Modul und eine hohe Festigkeit und werden daher vorzugsweise in Anwendungen mit erhöhten Anforderungen an mechanische Eigenschaften bei gleichzeitig geringen Gewicht eingesetzt.

(4) Carbonfasern werden hinsichtlich ihrer Festigkeit und Steifigkeit unterschieden. Als Standard-Carbonfasern gelten die HT-Fasern. Die Unterteilung der wichtigsten Faserarten wird wie folgt vorgenommen:

HT – (High Tenacity)	HM – (High Modulus)
UHT – (Ultra High Tenacity)	UHM – (Ultra High Modulus)
IM – (Intermediate Modulus)	UMS – (Ultra Modulus Strength)

### 4.3 Kunststoffe

(1) Kunststoffe können eingeteilt werden in:

- Duroplaste (chemisch aushärtende, räumlich vernetzte Reaktionsharze)
- Thermoplaste (Polymere, die bei hoher Temperatur erweichen und bei niedriger Temperatur erstarren)
- Elastomere (räumlich schwach vernetzte Polymere)

Für Faserverbundkunststoffe werden im Allgemeinen nur Duroplaste und Thermoplaste eingesetzt. Zu den Duroplasten gehören z. B. ungesättigte Polyesterharze (UP), Epoxidharze (EP) und Vinylesterharz (VE). Thermoplaste, welche bei Faserverbundkunststoffen zur Anwendung kommen, sind z. B. Polyamid (PA), Polycarbonat (PC), Polyoxymethylen (POM).

(2) Bedingt durch die großen Unterschiede in den Eigenschaften der einzelnen Kunststoffe und Harzhersteller kann eine allgemeine Beurteilung nur grob geschehen. Die wesentlichen Unterschiede zwischen Thermo- und Duroplasten sollen durch die Angaben in **Tabelle 4-1** beschrieben werden.

**Tabelle 4-1:** Unterschiede der Eigenschaften von Duro- und Thermoplasten

	Vorteile	Nachteile
Duroplaste	sehr geringe Kriechneigung hohe Temperaturbeständigkeit	keine Möglichkeit des nachträglichen Verformens
Thermoplaste	kurze Zykluszeiten bei der Herstellung Nachträgliche Verformbarkeit des Faserverbundkunststoffes	Erhöhte Kriechneigung

### 4.4 Schaumstoffe

#### 4.4.1 Allgemeines

(1) Als Kernwerkstoffe in Sandwichkonstruktionen mit Deckschichten aus Faserverbundkunststoffen werden überwiegend Hartschäume auf der Basis von Polyurethan (PUR) eingesetzt, der Einsatz von aufgeschäumten Polyvinylchlorid (PVC), Polymethacrylimid (PMI) oder Polyethylenterephthalat (PET) oder ähnlichen Kunststoffen ist jedoch ebenfalls möglich.

- (2) Im Falle der statischen Tragfunktion muss der Schaumstoff eine Mindestdichte von  $40 \text{ kg/m}^3$  aufweisen.
- (3) Vereinfachend können Schäume als isotrop betrachtet werden. Aufgrund des Aufschäumprozesses können sich jedoch Zellorientierungen einstellen, welche zu anisotropem Verhalten führen. Aufgrund des Herstellungsprozesses ergibt sich beispielsweise auch eine unterschiedliche Haftzugfestigkeit an den beiden Deckschichten.
- (4) Einige Schaumstoffe werden im Folgenden kurz erläutert.

#### **4.4.2 Polyurethan-Hartschäume (PUR-Schaum)**

- (1) PUR-Schäume werden üblicherweise durch Vermischen von Polyolen und Isocyanat unter Zugabe eines Treibmittels hergestellt (FCKW-haltige Schäume sind nicht zulässig).
- (2) PUR-Schäume sind Duroplaste. Sie besitzen eine mittlere thermische Belastbarkeit bis ca.  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- (3) Für alleintragende Anwendungen (z. B. Radardome) werden PUR-Schäume mit einem spezifischen Gewicht von bis zu  $300 \text{ kg/m}^3$  hergestellt, für Sandwichanwendungen werden spezifische Gewichte von bis zu  $100 \text{ kg/m}^3$  verwandt.
- (4) Herstellbedingt können PUR-Schäume richtungsabhängige Eigenschaften aufweisen.

#### **4.4.3 Polyvinylchloridschäume (PVC-Schaum)**

- (1) PVC-Schäume werden aus einer PVC-Schmelze unter Zugabe eines Treibmittels beziehungsweise zusätzlich eines Isocyanat-Vernetzungsmittels hergestellt. Dementsprechend gibt es PVC-Schäume mit vernetzten und unvernetzten Molekülketten. Sie sind jedoch beide thermisch verformbar.
- (2) PVC-Schäume besitzen eine relativ hohe Feuerbeständigkeit, dies ist jedoch verbunden mit einer unerwünschten Chlor-Abspaltung.



## 5 Materialeigenschaften und Bauteile

### 5.1 Allgemeines

(1) In diesen Empfehlungen wird zwischen drei Bauarten unterschieden:

- Bauarten aus unverstärkten Kunststoffen
- Bauarten aus faserverstärkten Kunststoffen
- Sandwichkonstruktionen mit faserverstärkten Deckschichten

(2) Die Festlegung der Kennwerte für die mechanischen Kurz- und Langzeiteigenschaften setzt eine genaue Kenntnis des Werkstoffes, der verwendeten Fertigungsverfahren und der geplanten Einsatzbedingungen voraus. Die Materialeigenschaften können z. B. den in Abschnitt 11 zitierten Normen, oder allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen entnommen werden. Alternativ sind sie durch Versuche unter Beachtung der Ausgangswerkstoffe und der Herstellungsverfahren sowie der Aushärtungs- und Nachbehandlungsbedingungen zu ermitteln.

(3) Der charakteristische Wert einer Eigenschaft für den Grenzzustand der Tragfähigkeit - z. B. der Festigkeit  $f_k$  - ist der Kurzzeitwert, ermittelt als 5 % Fraktile bei 75 % Aussagewahrscheinlichkeit. Er wird mit  $R_{k0,05}$  bezeichnet. Für die charakteristischen Werte des E-Moduls als Kennwert für die Stabilität und die Dehngrenze darf ohne weiteren Nachweis auf der sicheren Seite liegend von  $E_{k0,05}$  und  $D_{k0,05}$  ausgegangen werden. Höhere Werte, jedoch maximal  $E_{k0,50}$ , dürfen auf der Grundlage entsprechender statistischer, bauteilspezifischer Nachweise angesetzt werden.

(4) Der charakteristische Wert einer Eigenschaft für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit - z. B. der E-Modul zur Ermittlung der Durchbiegung- ist der Kurzzeitwert, ermittelt als 50 % Fraktile (Mittelwert) bei 75 % Aussagewahrscheinlichkeit. Er wird mit  $E_{k,m}$  bezeichnet. Für andere Eigenschaften, wie z. B. die Temperaturdehnzahl, sind als charakteristische Werte ebenfalls die Mittelwerte einzuführen.

(5) Bei der Ermittlung der charakteristischen Werte des Widerstandes aus Versuchen an Prüfkörpern kann die Bestimmung von  $R_{k0,05}$  nach Gleichung (5.1) erfolgen. Es muss sich dabei um repräsentative Proben aus der laufenden Produktion handeln, für die die Normalverteilung zugrunde gelegt werden kann. Die Versuchskörpergröße sollte den tatsächlichen Begebenheiten angepasst sein, um starke Schwankungen der Ergebnisse zu vermeiden.

$$R_{k0,05} = \mu_R - k_s \cdot \sigma_R \quad (5.1)$$

Hierin ist:

$\mu_R$  Mittelwert einer Widerstandsgröße

$\sigma_R$  Standardabweichung der Widerstandsgröße

$k_s$  Faktor gemäß Tabelle 5-1 in Anlehnung an Tabelle D-1 der DIN EN 1990  
für unbekannte Variationskoeffizienten

Im Sinne einer sinnvollen statistischen Auswertbarkeit wird empfohlen, den charakteristischen Wert aus mindestens 5 gültigen Versuchen zu bestimmen.

**Tabelle 5-1:** Faktoren  $k_s$  zur Ermittlung von  $R_{k0,95}$  (bei 75 % Aussagewahrscheinlichkeit)

Anzahl der Versuche	(3)	(4)	5	6	8	10	20	30	$\infty$
$k_s$ -Wert	(3,37)	(2,63)	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

Die Temperatur, die Belastungsgeschwindigkeit, und die Methoden der Auswertung sind in den jeweiligen Prüfnormen (z. B. DIN EN ISO 527-4, DIN EN ISO 14125) festgelegt.

Für Zeitstandversuche können die Normen DIN EN ISO 527-4 und DIN EN ISO 899-1 zugrunde gelegt werden.

(6) Wenn keine Zeitstandkurven zur Erfassung der vorhandenen Temperatur und des umgebenden Mediums vorliegen, sind die charakteristischen Werte einer Eigenschaft aus dem Kurzzeitwert unter Normalklima abzumindern.

Rechnerisch wird dazu ein werkstoffspezifischer Wert, der Modifikationsfaktor  $A_{\text{mod}}$  als Produkt von drei Einflussfaktoren entsprechend den o.g. Einsatzbedingungen gebildet:

$$A_{\text{mod}} = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \quad (5.2)$$

wobei  $A_1$  der Einflussfaktor zur Berücksichtigung der Einwirkungsdauer (wie z. B. aus Belastung),

$A_2$  der Einflussfaktor zur Berücksichtigung des umgebenden Mediums, wie z. B. Bewitterung, Feuchtigkeit, Chemikalien, etc.,

$A_3$  der Einflussfaktor zur Berücksichtigung der Umgebungstemperatur nach den Abschnitten 5.2 , 5.3 und 5.4 erfasst.

Für einige Kunststoffe sind Richtwerte der Einflussfaktoren in den Anhängen angegeben, dort nicht angegebene Werte sind durch Versuche zu ermitteln.

(7) Der Bemessungswert einer Eigenschaftsgröße zur Ermittlung des Widerstandes ergibt sich dann zu

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}}$$

Hierin ist:  $R_d$  Bemessungswert des Widerstands

$R_k$  Widerstand gebildet aus dem charakteristischen Wert einer Eigenschaft und einem Querschnittswert

$\gamma_M$  Teilsicherheitsbeiwert nach Abschnitt 5.5

Die Festigkeit ergibt sich damit zu

$$f_d = \frac{f_{k0,05}}{\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^f} \quad (5.3)$$

Alternativ kann der Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit auch nach der DIN EN 13121 Teil 3 erfolgen. Auch wenn diese Norm sich auf Oberirdische GFK-Tanks und Behälter bezieht, kann sie als aktueller Stand der Technik angesehen werden und gleichzeitig als Nachfolgenorm der DIN 18820.

Für die rechnerischen Nachweise sind nach DIN EN 13121-3, Abschnitt 7.9.5 für die Einwirkungen und für die Werkstoffkennwerte verschiedene Einflüsse  $A_1$  bis  $A_6$  zu berücksichtigen:

- $A_1$ : Einfluss der Fertigung auf das Laminat (bei advanced design:  $A_1 = 1,0$ ),
- $A_2$ : Einfluss des Mediums bzw. der Umwelt auf das Laminat,
- $A_3$ : Einfluss der Auslegungstemperatur auf das Laminat,
- $A_4$ : Einfluss einer dynamischen Belastung auf das Laminat,
- $A_5$ : Einfluss der Belastungsdauer auf das Laminat,
- $A_6$ : Einfluss der ionisierenden Strahlung.

Diese  $A_1$  bis  $A_6$  Faktoren entsprechen nicht den im Anhang A bis C dieser Empfehlung angegebenen A-Faktoren.

## 5.2 Unverstärkte Kunststoffe

### 5.2.1 Thermoplaste

#### Kennwerte

(1) Die Kennwerte der mechanischen Eigenschaften und die thermischen Kenndaten sind gemäß Abschnitt 5.1 zu ermitteln.

#### Erfassung der Einsatzbedingungen (rechnerische Abminderung)

##### - Dauer der Einwirkung

(2) Der Einflussfaktor  $A_1$  der Tabelle A-1 (siehe Anhang) erfasst den Einfluss der zeit- und lastabhängigen Verminderung des Festigkeitsverhalten ( $A_1^f$ ), des E-Moduls ( $A_1^E$ ) bzw. der Dehngrenze ( $A_1^D$ ) infolge einer Belastungsdauer bis zu 20 Jahre. Bei einer Belastungsdauer größer 20 Jahre sind die Zeitstandkurven in der DIN EN 1778 zu beachten.

(3) Für eine kurze Belastungsdauer kann der Faktor  $A_1$  auf der Basis entsprechender Versuche ermittelt werden. Für außergewöhnliche Kurzzeitbelastungen kann  $A_1 = 1$  gesetzt werden.

##### - Medieneinfluss

(4) Der Einflussfaktor  $A_2^f$ ,  $A_2^E$  bzw.  $A_2^D$  erfasst die Abminderungen aus dem Einfluss der Umgebungsmedien und kann für Deponiebauwerke der Tabelle A-2 entnommen werden.

##### - Temperatureinfluss

(5) Der Einflussfaktor  $A_3$  der Tabellen A-3a und A-3b erfasst den Einfluss einer erhöhten Umgebungstemperatur auf das Festigkeitsverhalten ( $A_3^f$ ), den E-Modul ( $A_3^E$ ) bzw. die Dehngrenze ( $A_3^D$ ).

(6) Zwischenwerte der Einflussfaktoren gemäß Anhang A können bei Bedarf linear interpoliert werden, wobei für Temperaturen zwischen  $-20\text{ °C}$  und  $+20\text{ °C}$   $A_3 = 1$  gesetzt werden kann.

(7) Sind ständige Betriebstemperaturen  $T > 40 \text{ °C}$  zu erwarten, dann ist durch Materialprüfung des Werkstoffes der notwendige Einflussfaktor zu ermitteln.

## 5.2.2 Duroplaste

Im Bauwesen werden unverstärkte Duroplaste in der Regel nur für nicht tragende Konstruktionen und Beschichtungen eingesetzt, auf eine Beschreibung der Kennwerte und Materialeigenschaften wird darum hier verzichtet.

Einflussfaktoren zur Erfassung der Einsatzbedingungen sind jedoch in den Tabellen A-1, A-2 und A-3b angegeben.

## 5.3 Faserverstärkte Kunststoffe

### 5.3.1 Vorbemerkungen

(1) Um eine Verstärkungswirkung durch Fasern zu erreichen, muss die Steifigkeit und Festigkeit der Faser höher sein als die des Harzes. Dies ist bei allen gängigen Fasertypen gegeben. Im Baubereich werden in erster Linie glasfaserverstärkte Duroplaste (UP, PHA, EP) verarbeitet.

(2) Für Glasfaserlamine in Verbindung mit ungesättigten Polyesterharzen (UP) und Phenacrylatharzen (PHA) sind Kennwerte genormt (DIN 18820). Diese Kennwerte sind in Abschnitt 5.3.2 eingearbeitet.

### 5.3.2 Glasfaserverstärkte Lamine mit Duroplasten

#### Kennwerte

(1) Grundlegende mechanische und thermische Kurzzeitkennwerte für Lamine aus textilglasverstärkten und ungesättigten Polyester- und Phenacrylatharzen können DIN 18820 entnommen werden oder sind analog Abschnitt 1.1 zu ermitteln.

(2) Bei der Verwendung von anderen Harz-Faser-Kombinationen und bei nicht in der Norm erfassten Einsatzbedingungen (z. B. kombinierten Einwirkungsmedien) sind in der Regel Untersuchungen gemäß Abschnitt 1.1 durchzuführen.

#### Erfassung der Einsatzbedingungen (rechnerische Abminderung)

##### - Dauer der Einwirkung

(3) Der Einflussfaktor  $A_1$  (entspricht  $A_5$  nach DIN EN 13121-3) berücksichtigt den Einfluss der langzeitigen Lasteinwirkung auf die Festigkeit ( $A^f_1$ ), den E-Modul ( $A^{E_1}$ ) bzw. die Dehngrenze ( $A^{D_1}$ ) auf das Bauteil. Er ist stets mit  $A_1 \geq 1,0$  anzusetzen.

(4) Für eine kurze Belastungsdauer kann der Faktor  $A_1 (\geq 1,0)$  auf der Basis entsprechender Versuche ermittelt oder im doppelt-logarithmischen-Maßstab aus Langzeitwerten linear interpoliert werden. Für außergewöhnliche, kurzzeitig wirkende Belastungen kann  $A_1 = 1$  gesetzt werden (siehe Abschnitt 6).

##### - Medieneinfluss

(5) Die Einwirkung der umgebenden Medien hat einen unterschiedlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von glasfaserverstärkten Kunststoffen. Der Einflussfaktor  $A_2$  enthält die sich daraus ergebenden Abminderungen aus dem Einfluss der Umgebungsmedien auf das Festigkeitsverhalten, den E-Modul bzw. die Dehngrenze.

(6) Bei aggressiven Medien gemäß DIN 18820 kann beim Aufstellen in geschlossenen Räumen  $A_2 = 1,0$  bzw. im Freien  $A_2 = 1,2$  bis  $1,3$  gesetzt werden. Genauere Angaben hierzu siehe Abschnitt 4.3 der DIN 18820-3. Die Anordnung einer Chemie-Schutz-Schicht (CSS) ist dann zwingend erforderlich. Sie zählt nicht zum tragenden Laminat und muss gemäß Tabellen 5 und 6 der DIN 18820-3 bzw. nach DIN EN 13121-2 und Medienliste-40 des DIBt hergestellt werden.

- *Temperatureinfluss*

(7) Die mechanischen Kennwerte sind in starkem Maße von der einwirkenden Temperatur abhängig. Mit steigender Temperatur nehmen E-Modul und Festigkeit stetig ab, Verformungen nehmen dagegen zu. Der Einflussfaktor  $A_3$  berücksichtigt den Einfluss einer erhöhten Umgebungstemperatur auf die Festigkeit, den E-Modul bzw. die Dehngrenze. Es ist stets  $A_3 \geq 1,1$  einzuhalten.

(8) Bei einer Betriebstemperatur  $40\text{ °C} \leq T_D \leq 60\text{ °C}$  kann ohne weiteren Nachweis der Einflussfaktor mit  $A_3 \geq 1,4$  angesetzt werden. Sind ständige Betriebstemperaturen  $T_D > 60\text{ °C}$  zu erwarten, ist durch Materialprüfung des glasfaserverstärkten Kunststoffes der notwendige Einflussfaktor zu ermitteln.

Alternativ wird empfohlen, zur Bestimmung von  $A_3$  den folgenden Ansatz gemäß DIN EN 13121-3 zu wählen:

$$A_3 = 1,0 + 0,4 \cdot \frac{T_D - 20}{HDT - 30}$$

$T_D$  Auslegungstemperatur in °C

(gemäß der Spachregelung des DIBt; in DIN EN 13121 mit  $T_S$  bezeichnet)

HDT Wärmeformbeständigkeitstemperatur in °C

(HDT = heat distortion temperature oder heat deflection temperature)

Mit diesem Ansatz wird die tatsächlich vorhandene Wärmeformbeständigkeit HDT des gewählten Harzes berücksichtigt. Zum Erreichen des HDT-Wertes ist das Harz gemäß Vorgaben des Herstellers zu tempern.

(9) Die Bestimmung der Wärmeformbeständigkeit kann am jeweiligen Harz oder Laminat z. B. nach DIN EN ISO 75-1,-2,-3 oder in der Dynamisch Mechanischen Analyse (DMA) nach DIN EN ISO 6721 (Onset) bestimmt werden.

Die Wärmeformbeständigkeitstemperatur des für die Laminatverstärkung verwendeten ausgehärteten Harzsystems muss mindestens  $20\text{ °C}$  höher sein als die Auslegungstemperatur.

- *Weitere Abminderung des E-Moduls*

(10) Werden ungetemperte Laminat (nur MW, FM und FMU, nicht M) verwendet, so sind die Zug- und Biege-E-Module für die Ermittlung der Verformungen und Dehnungen auf 90 % der in DIN 18820 für Mattenlaminat ausgewiesenen Richtwerte abzumindern, wobei die o.g. Einflussfaktoren entsprechend zu wählen sind.

(11) Für Wickellaminat (nur FM) sind bei einer Zugbelastung mit  $\varepsilon_t > 0,2\text{ %}$  quer zur Wickelrichtung die E-Module für die Ermittlung der Verformungen und Dehnungen auf 70 bis 80 % der in DIN 18820 ausgewiesenen Richtwerte abzumindern, wobei die o.g. Einflussfaktoren entsprechend zu wählen sind.

Genauere Angaben hierzu siehe Tabelle 8 der DIN 18820-2 bzw. in DIN EN 13121-1, Abschnitt 7.

(12) Bei einem Design über HDT sind zwingend Werkstoffversuche zur Ermittlung des Temperatureinflusses auf die mechanischen Kennwerte und das Alterungsverhalten durchzuführen.

## 5.4 Sandwichkonstruktionen

(1) Die mechanischen Eigenschaften einiger in Sandwichkonstruktionen verwendeter Hartschäume sind in Tabelle F-2 in Anhang F aufgelistet. Es handelt sich hierbei um Richtwerte für die Mittelwerte.

### Kennwerte

(2) Das Verhalten der Sandwichkonstruktionen wird maßgebend bestimmt durch das Verhalten der Deck- und Kernschichten sowie durch den Verbund zwischen diesen Schichten. Die mechanischen Eigenschaften einiger in Sandwichkonstruktionen verwendeter Hartschäume sind in Tabelle F-2 aufgelistet. Im Allgemeinen sind bei der Ermittlung der Festigkeits- und Verformungseigenschaften nach Abschnitt 5.1 (3) die Besonderheiten der Schaumstoffe im Aufbau des Zellgerüsts und der Zusammensetzung des Zellgases zu beachten.

### Erfassung der Einsatzbedingungen (rechnerische Abminderung)

#### - Dauer der Einwirkung

(3) Der Einflussfaktor  $A_1$  erfasst für die Hartschäume den Einfluss der langzeitigen Einwirkungen auf die Schub- und Druckfestigkeit ( $A_1^f$ ) und den Schub- und Druckmodul ( $A_1^{G,E_1}$ ). Dabei ist die unterschiedliche Rohdichte zu berücksichtigen. Im Anhang C, Tabelle C-1, sind einige Beiwerte für den Schaumstoff PUR in Abhängigkeit von der Belastungsdauer angegeben.

#### - Medieneinfluss

(4) Der Einflussfaktor  $A_2$  berücksichtigt allgemein die Veränderungen in den mechanischen Eigenschaften der Hartschäume durch einwirkende Medien. Der Schaumstoffkern ist jedoch durch die Deckschichten gegen Medieneinflüsse, wie z. B. die Witterung, weitgehend geschützt. Insbesondere über offene Begrenzungsflächen können jedoch durch Zellgasaustausch die mechanischen Eigenschaften verändert werden. Im Anhang C, Tabelle C-2, ist ein Beiwert für die Freibwitterung für den Schaumstoff PUR aufgeführt.

#### - Temperatureinfluss

(5) Der Einflussfaktor  $A_3$  erfasst den Einfluss der Temperatureinwirkung auf die Schub- und Druckfestigkeit ( $A_3^f$ ) und den Schub- und Druckmodul ( $A_3^{G,E_3}$ ). Durch die Farbe / Art der vorhandenen Deckschichten wird die Temperatureinwirkung von außen, wie z. B. durch Sonneneinstrahlung, beeinflusst. Die Kerntemperatur sollte  $T = 80 \text{ °C}$  nicht überschreiten. Im Anhang C Tabelle C-3 sind einige Beiwerte für den Schaumstoff PUR für verschiedene Temperaturen angegeben.

Auf Grund der isolierenden Wirkung der Kernschicht (z.B. Schaum) kann zur Bestimmung von  $A_3$  für die GFK-Deckschichten der durch erhöhte Temperatur beaufschlagten Sandwichseite für die Laminate Deckschicht gemäß DIN EN 13121-3 folgender Ansatz gewählt werden

$$A_3 = 1,0 + 0,4 \cdot \frac{T_D}{HDT - 30}$$

## 5.5 Bemessungswert des Widerstands

(1) Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit kann für den Elastizitätsmodul (E) und die Dehngrenze (D) einheitlich mit  $\gamma_M = 1,0$  gerechnet werden. Sollen die Unsicherheiten in den geometrischen Eigenschaften und im Tragwiderstandsmodell mit berücksichtigt werden, so ist  $\gamma_M=1,1$  zu setzen.

(2) Für die Ermittlung der Bemessungswerte auf der Widerstandsseite im Grenzzustand der Tragfähigkeit sind die Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M$  der Tabelle E-1 zu berücksichtigen und die Einflussfaktoren  $A_1$ ,  $A_2$  und  $A_3$  der Tabellen im Anhang zu beachten.

(3) Für Festigkeitsnachweise gilt für "langzeitig" wirkende Lasten:

$$\gamma_F \cdot \gamma_M \cdot A_1^f \cdot A_2^f \cdot A_3^f \geq 4,0$$

Bei Nichteinhaltung der Bedingung ist der Faktor  $A_1^f$  entsprechend zu erhöhen.

Für Stabilitätsnachweise gilt für "langzeitig" wirkende Lasten:

$$\gamma_F \cdot \gamma_M \cdot \sqrt{A_1^E} \cdot A_2^E \cdot A_3^E \geq 2,7$$

Bei Nichteinhaltung der Bedingung ist der Faktor  $A_1^E$  entsprechend zu erhöhen.

**(aus DIBT-Berechnungsempfehlung 40-B1 für glasfaserverstärkte Kunststoffbehälter)**

Für Festigkeitsnachweise gilt für "ständig" wirkende Lasten:

$$A_1^f \cdot A_2^f \cdot A_3^f \geq 1,75$$

Bei Nichteinhaltung der Bedingung ist der Faktor  $A_1^f$  entsprechend zu erhöhen.

**(aus Richtlinie DVS 2205-1 für Thermoplaste)**

Für Festigkeitsnachweise gilt:

$$A_1^f \cdot A_2^f \cdot A_3^f \geq 1,5 \text{ (1 Tag)}$$

$$A_1^f \cdot A_2^f \cdot A_3^f \geq 2,0 \text{ (Dauerbelastung)}$$

Bei Nichteinhaltung der Bedingung ist der Faktor  $A_1^f$  entsprechend zu erhöhen.

**(aus DIN 24537-3 für Kunststoffgitterroste)**

Für Festigkeitsnachweise gilt für "ständig" wirkende Lasten:

$$A_1^f \cdot A_2^f \cdot A_3^f \geq 1,75$$

Bei Nichteinhaltung der Bedingung ist der Faktor  $A_1^f$  entsprechend zu erhöhen.

Für Stabilitätsnachweise gilt für "ständig" wirkende Lasten:

$$\sqrt{A_1^E \cdot A_2^E \cdot A_3^E} \geq 1,35$$

Bei Nichteinhaltung der Bedingung ist der Faktor  $A_1^E$  entsprechend zu erhöhen.

**(aus Zulassung Fiberline für pultrudierte GFK-Profile)**

Für Festigkeitsnachweise gilt:

$$\gamma_F \cdot \gamma_M \cdot A_1^f \cdot A_2^f \cdot A_3^f \geq 4,0$$

Bei Nichteinhaltung der Bedingung ist der Faktor  $A_1^f$  entsprechend zu erhöhen.

Für Stabilitätsnachweise gilt:

$$\gamma_F \cdot \gamma_M \cdot \sqrt{A_1^E \cdot A_2^E \cdot A_3^E} \geq 2,7$$

Bei Nichteinhaltung der Bedingung ist der Faktor  $A_1^E$  entsprechend zu erhöhen.

**(aus DIN EN 13121-3 für oberirdische GFK-Tanks und -Behälter, Tabelle 8 „advanced design“)**



## 6 Einwirkungen

### 6.1 Allgemeines

(1) Bei den Einwirkungen wird zwischen direkten und indirekten Einwirkungen unterschieden. Direkte Einwirkungen sind Lasten, die auf das Tragwerk wirken; indirekte Einwirkungen sind eingeprägte Verformungen (z. B. Klimabedingungen, Herstellungsbedingungen, Setzung des Baugrundes), die bei statisch unbestimmten Tragwerken zu Schnittgrößen führen.

Ferner werden die Einwirkungen, entsprechend ihrer Veränderlichkeit mit der Zeit, klassifiziert nach:

- ständigen Einwirkungen (G)
- veränderlichen Einwirkungen (Q)
- außergewöhnlichen Einwirkungen (A)

(2) Hinsichtlich der Einwirkungsdauer können die Einwirkungen in „Klassen der Lasteinwirkungsdauer“ eingeteilt werden. Für Kunststoffbauteile ist die Größenordnung der akkumulierten Dauer der charakteristischen Einwirkung in Anlehnung an DIN EN 1995-1-1 in den Tabellen 6-1 und 6-2 angegeben. Vereinfacht dürfen Einwirkungen ohne Abminderung in Klassen längerer Einwirkungsdauer eingestuft werden.

**Tabelle 6-1:** Klassen der Last-Einwirkungsdauer (KLED) für Hochbaukonstruktionen

Klasse der Last-Einwirkungsdauer für Hochbaukonstruktionen	Größenordnung der akkumulierten Dauer der charakteristischen Lasteinwirkung
ständig	> 10 Jahre
lang	6 Monate bis 10 Jahre
mittel	1 Woche bis 6 Monate
kurz	< 1 Woche
sehr kurz	< 1 Minute*

\* Anmerkung aus DIN 1052

(3) Als charakteristische Werte  $E_k$  der Einwirkungen gelten grundsätzlich die Werte der eingeführten Normen (z. B. DIN EN 1991-1-1, DIN EN 1991-1-3, DIN EN 1991-1-4, DIN EN 1991-1-5).

(4) Für Einwirkungen, die nicht oder nicht vollständig in Normen oder anderen bauaufsichtlichen Bestimmungen angegeben sind, müssen entsprechende charakteristische Werte, ggf. in Absprache mit der Bauaufsicht, vom Bauherrn bzw. in Absprache mit dem Bauherrn vom Tragwerksplaner festgelegt werden. Voraussetzung hierbei ist jedoch, dass die in den Normen vorgegebenen Werte nicht unterschritten werden.

## 6.2 Ständige Einwirkungen

(1) Es wird auf die Tabelle D-1 verwiesen.

## 6.3 Veränderliche Einwirkungen

(1) Zu den veränderlichen Einwirkungen zählen Nutz- und Verkehrslasten, Schnee, Wind und Temperaturänderungen. Oft sind mehrere dieser Einwirkungen gleichzeitig zu berücksichtigen. Die Wahrscheinlichkeit, dass diese alle zur gleichen Zeit mit ihrem maximalen Wert auftreten, ist allerdings gering.

(2) Für Nutz- und Verkehrslasten ist die zu erwartende akkumulierte Einwirkungsdauer über die Lebensdauer des Bauteils sinnvoll abzuschätzen.

(3) Zur Orientierung können die in Tabelle 6-2 in Anlehnung an DIN EN 1995-1-1 vorgeschlagenen Einstufungen angenommen werden, die im Einzelfall zu prüfen sind.

(4) Für die Ermittlung der Einwirkungen einer Lasteinwirkungsdauer  $t_a$  sind alle Einwirkungen mit höherer Lasteinwirkungsdauer zu addieren (siehe Tabelle 8-1). Die Eigenlast ist für alle Lasteinwirkungsdauer  $t_a$  zu berücksichtigen.

(5) Für die Ermittlung der Temperaturlasten ist die Aufstelltemperatur  $T_0$  abzuschätzen und in den bautechnischen Unterlagen kenntlich zu machen. Die tatsächliche Aufstelltemperatur ist aufzuzeichnen. Ggf. sind die Auswirkungen einer Abweichung zur tatsächlichen Aufstelltemperatur abzuschätzen.

(6) Ggf. ist eine schnelle Abkühlung von erwärmten Bauteilen, z. B. durch Niederschläge, zu berücksichtigen.

(7) Einwirkungen, die sich bei der Herstellung von Bauteilen ergeben, wie z. B. infolge des Zusammenklebens von Einzelteilen oder Eigenspannungen aus einem Herstellungsverfahren, sind abzuschätzen.

Der zeitliche Verlauf von Einwirkungen, die sich aus der Herstellung einer Konstruktion ergeben, wie z. B. Zwängungen aus der Montage beim Auftreten ungünstiger Toleranzen, ist zu erfassen.

(8) Beanspruchungen infolge klimatischer Einwirkungen wie Feuchtigkeit oder Bewitterung und infolge aggressiver Medien sind in  $A_{\text{mod}}$  zu berücksichtigen.

**Tabelle 6-2:** Größenordnung der Klassen der Lasteinwirkungen (KLED)

Einwirkung		KLED
Eigenlast		ständig
Lotrechte Nutzlasten im Hochbau		
A,B	Spitzböden, Wohn- und Aufenthaltsräume, Büroflächen, Arbeitsflächen, Flure	mittel
C	Räume, Versammlungsräume und Flächen, die Ansammlungen von Personen dienen können (außer A,B,D,E)	kurz
D	Verkaufsräume	mittel
E	Fabriken und Werkstätten, Ställe, Lagerräume und Zugänge, Flächen mit erheblichen Menschenansammlungen	lang
F	Verkehrs- und Parkflächen für leichte Fahrzeuge	mittel
	Zufahrtsrampen zu Verkehrs- und Parkflächen	kurz
G	Flächen für den Betrieb mit Gegengewichtsstaplern	mittel
H, K, T, Z	nicht begehbare Dächer, Treppen oder Treppenpodeste, Zugänge, Balkone oder ähnliches	kurz
Horizontale Nutzlasten im Hochbau		
	Nutzlasten infolge von Personen auf Brüstungen, Geländer und andere Rückhaltekonstruktionen	kurz
	Horizontallasten aus Kran- und Maschinenbetrieb	kurz
Vertikale Verkehrslasten auf Brücken		
UDL / TS	Autobahnen und Straßen mit hohem oder mittlerem LKW-Anteil, Hauptstrecken mit geringem LKW-Anteil	lang <sup>1</sup>
	Örtliche Straßen mit geringem LKW-Anteil	mittel <sup>1</sup>
	Wirtschaftswege	kurz <sup>1</sup>
Windlasten		kurz
Schnee- und Eislast		
$H \leq 1000 \text{ m}$	Gelände des Bauwerksstandortes über NN	kurz
$H > 1000 \text{ m}$	Gelände des Bauwerksstandortes über NN	mittel
Temperaturlasten		
Jährliche Amplitude		lang
Tägliche Amplitude		mittel
Anpralllasten		sehr kurz

<sup>1</sup> Einordnung der Verkehrslasten auf Brücken für eine Nutzungsdauer von 100 Jahren unter Berücksichtigung der zu erwartenden Lastkraftwagen pro Jahr

## 6.4 Außergewöhnliche Einwirkungen

(1) Außergewöhnliche Einwirkungen sind i. d. R. von kurzer Dauer und von geringer Wahrscheinlichkeit hinsichtlich ihres Auftretens, wie z. B. Explosion, (Fahrzeug-) Anprall oder Erdbeben. Diese Einwirkungen sind unter Berücksichtigung ihres zeitabhängigen Verlaufs zu untersuchen.

(2) Die Tatsache, dass Kunststoffe sich bei schlagartiger Einwirkung spröde verhalten, ist zu berücksichtigen (siehe DIN EN 1998-1). Für die Nachweise kann von den Kurzzeitwerten ausgegangen werden.

## 6.5 Brandeinwirkung und erhöhte Temperaturen

(1) Organische Polymere sind grundsätzlich brennbar und daher nicht bei besonderen Brandschutzanforderungen einsetzbar. Die mechanischen Kenngrößen sind in hohem Maße temperaturabhängig.

(2) Die Anwendungsgrenze von Kunststoffen wird i. d. R. in Abhängigkeit von der Glasübergangstemperatur  $T_g$  definiert, die den Übergang von einem spröde-elastischen zu einem zäh-viskoelastischen Verhalten beschreibt. Anders als Thermoplaste erreichen Duroplaste jedoch keinen viskosen Zustand, da sie sich bei höheren Temperaturen zersetzen. Dennoch wird der Begriff der Glasübergangstemperatur  $T_g$  in der Literatur auch für Duroplaste verwendet. Eine Überschreitung der Glasübergangstemperatur ist nicht zulässig.

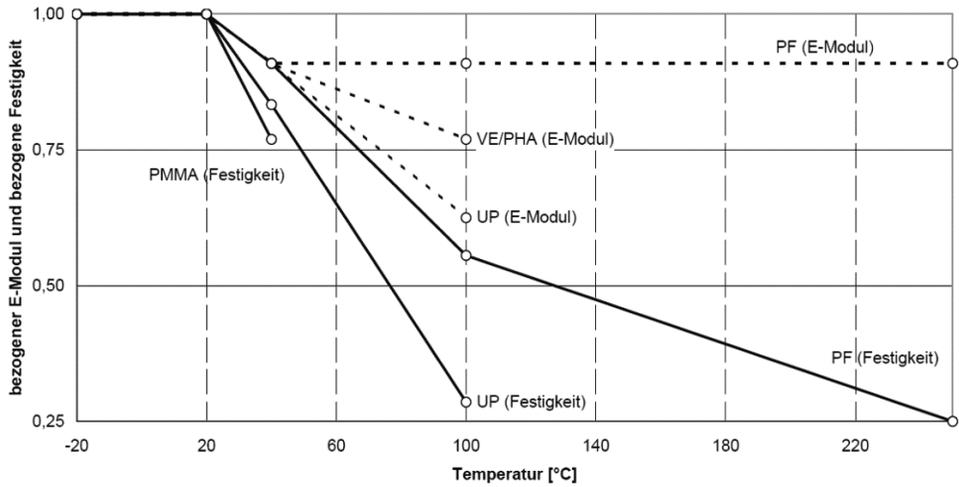
Für die Definition der Temperaturanwendungsgrenze bei GFK hat sich die Wärmeformbeständigkeitstemperatur HDT (heat deflection temperature, auch heat distortion temperature) nach der DIN EN ISO 75-1,-2,-3 durchgesetzt. Alternativ zum HDT kann der Onset aus der DMA-Messung verwendet werden.

Es wird empfohlen, die Anwendungsgrenze bis 20 K unterhalb vom HDT-Wert anzusetzen.

(3) Mit im Bauwesen üblichen Kunststoffen ist i. d. R. maximal Brandklasse B oder C, oft nur D oder E nach DIN EN 13501 erreichbar. Bei den üblichen Duroplasten entstehen keine toxischen Gase und sie tropfen nicht brennend ab. Phenolharze haben eine höhere Glasübergangstemperatur als andere Duroplaste. Sie werden daher für Bauteile mit erhöhten Brandschutzanforderungen verwendet. Darüber hinaus werden der Matrix feuerhemmende Füllstoffe (Halogene, Aluminiumtrihydrit (-trihydroxid)) beigemischt, die eine Selbstverlöschung unterstützen.

(4) Die aus dem Stahlbau bekannten konstruktiven Brandschutzmaßnahmen wie dämmschichtbildende Anstriche, profilfolgende Putze oder kastenförmige Bekleidungen sind auf Kunststoffkonstruktionen nicht ohne weiteres übertragbar.

(5) Für die Abminderungen des E-Moduls von ausgewählten Kunststoffen werden die Zusammenhänge aus Abbildung 6-1 herangezogen. Diese Abbildung dient der Darstellung eines groben Zusammenhanges und zur Orientierung. Abminderungen für konkrete Harzsysteme oder Kunststoffe sind aus dieser Abbildung nicht ableitbar! Diese hängen vom jeweiligen Harzsystem, dessen Wärmeformbeständigkeit und Vernetzungsgrad ab und müssen experimentell bestimmt werden.



**Abbildung 6-1:** E-Modul und Festigkeit ausgewählter Kunststoffe in Abhängigkeit der Temperatur [27], [47]

## 6.6 Bemessungswert der Einwirkungen

Der Bemessungswert der Einwirkung wird aus den einzelnen Einwirkungen mit den in Anhang D angegebenen Kombinationen gebildet.



## 7 Verformungen, Schnittgrößen und Spannungen

- (1) Die Verformungen, Schnittgrößen und Spannungen für die Tragwerke sind in Abhängigkeit von den in Abschnitt 6 genannten, maßgebenden Einwirkungen mit der zugehörigen Zeitdauer zu berechnen. Dabei sind die Veränderungen der Verformungseigenschaften der Werkstoffe infolge aller auftretenden, äußeren Einwirkungen zu berücksichtigen.
- (2) Die Zeit- und Temperaturabhängigkeit der Verformungen, Schnittgrößen und Spannungen sind im Allgemeinen unter Beachtung der Theorie der Thermoviskoelastizität und Thermoviskoelastizität zu berechnen [9], [28], [36], [37]. Das Verformungsgesetz ist zeitabhängig unter Berücksichtigung der Einwirkung von Temperatur und umgebenden Medium einzuführen. Die Querschnittsgrößen der Tragwerke sind aus den Nennwerten der Bauteilzeichnungen abzuleiten.
- (3) Zur Ermittlung der Verformungen, Schnittgrößen und Spannungen können auch geeignete Näherungsverfahren angewendet werden.
- (4) Bei statisch bestimmten Tragwerken im Bereich der Theorie I. Ordnung können die Schnittgrößen infolge Lasteinwirkungen allein aus Gleichgewichtsbedingungen berechnet werden. Für die Berechnung der Verformungen für verschiedene Zeitpunkte  $t_i$  kann die elastische Anfangsverformung vereinfacht mit dem Verhältnis  $E(t_0)/E(t_i)$  multipliziert werden. Entsprechend kann bei der Ermittlung von Schnittgrößen infolge Verformungseinwirkungen vorgegangen werden.
- (5) Bei statisch unbestimmten Tragwerken (z. B. Platten) ist neben den Gleichgewichtsbedingungen die Verträglichkeit der Verformung erforderlich, um die Schnittgrößen zu bestimmen. Sofern ein mehrdimensionaler Spannungszustand vorhanden ist, ist die Querkontraktionszahl in Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls zum jeweiligen Zeitpunkt zu bestimmen:

$$v(t_i) = 0,5 - E(t_i) / (6K) \quad (7.1)$$

mit

$E(t_i)$  = Elastizitätsmodul zum Zeitpunkt  $t_i$

$K$  = Kompressionsmodul des Materials

$$K = E(t_0) / (3(1 - 2\nu(t_0)))$$

$E(t_0)$  = Elastizitätsmodul zum Beginn der Lasteinwirkung (aus Materialtest)

$\nu(t_0)$  = Querkontraktion zum Beginn der Lasteinwirkung (aus Materialtest)

- (6) Im Allgemeinen wird die Berechnung der Verformungen, Schnittgrößen und Spannungen für eine bestimmte Lastkombination nach Abschnitt 6 mit einer zugehörigen, zeitlich konstanten Temperatur und einer zeitlich konstanten Umweltbedingung mit den dazu entsprechenden Verformungseigenschaften durchgeführt und für diese die zeitabhängige Lösung ermittelt.

- (7) Stark veränderliche Temperaturen über die Fläche oder Höhe eines Tragwerkes sowie in der Zeit sind bei der Ermittlung der Verformungen, Schnittgrößen und Spannungen zu berücksichtigen.
- (8) Der Einfluss der Schubverzerrungen auf die Verformungen, Schnittgrößen und Spannungen kann im Allgemeinen bei faserverstärkten Kunststoffen und Thermoplasten in der Berechnung vernachlässigt werden. In besonderen Fällen, wie z. B. bei unidirektional verstärkten Laminaten, ist der Einfluss der Schubverzerrungen zu erfassen.
- (9) Bei Tragwerken mit einem besonderen Kernaufbau, wie z. B. mehrschichtigen Tragwerken mit einer Kernschicht aus schubweichen Schaumstoffen, sind spezielle Berechnungsverfahren anzuwenden [5], [31].
- (10) Bei Thermoplasten mit einer ausgeprägten Richtungsabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften und bei faserverstärkten Kunststoffen mit orientierten Faserrichtungen, die gegebenenfalls in mehreren Schichten unterschiedlich angeordnet sein können, sind die Verformungen, Schnittgrößen und Spannungen unter Erfassung dieser Anisotropie zu berechnen. (z. B. für faserverstärkte Kunststoffe nach klassischer Laminattheorie CLT).



## 8 Nachweise

### 8.1 Grundlegende Anforderungen

(1) Das Bemessungskonzept basiert auf so genannten Grenzzuständen, bei deren Überschreitung die an das Tragwerk gestellten Anforderungen nicht mehr erfüllt werden. Je nachdem, ob das Versagen durch Erreichen des rechnerischen Versagenszustandes oder durch ein Überschreiten der Nutzungsbedingungen erreicht wird, unterscheidet man zwischen den

– Grenzzuständen der Tragfähigkeit

und den

– Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit.

Die genaueren Definitionen sind den nachfolgenden Abschnitten zu entnehmen.

(2) Für die Gewährleistung der Dauerhaftigkeit über den vorgegebenen Nutzungszeitraum sind die zu erwartenden Umweltbedingungen zu bestimmen, denen das Tragwerk ausgesetzt sein wird. Darauf aufbauend ist die Notwendigkeit von Schutzmaßnahmen, wie z. B. Chemie-Schutzschichten, zu bestimmen.

(3) Anzustreben und vorzuziehen ist eine Zugrundelegung der Festigkeitswerte aus ermittelten Tabellen und Zeitstanddiagrammen, um eine höhere Genauigkeit zu erlangen. Ansonsten kann näherungsweise mit den Einflussfaktoren aus den Anhängen A, B und C gerechnet werden.

### 8.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit

#### 8.2.1 Allgemeines

(1) Die Grenzzustände der Tragfähigkeit werden durch das Gefährdungspotential definiert, das von einem Tragwerksversagen ausgeht. Hierzu ist der Verlust des statischen Gleichgewichtes, der Bruchzustand von Tragwerksteilen und Querschnitten, kritische Dehnungszustände, Materialermüdung sowie Stabilitätsversagen zu zählen.

Aufgrund des besonderen zeitabhängigen Verhaltens von Kunststoffen sind die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit unter Beachtung der Einwirkungsdauer zu führen. Grundlagen zur Zeitstandfestigkeit werden in dem Kapitel 3.4.2 erläutert. Die Einwirkungen und deren Einordnung in Einwirkungsdauern werden in Kapitel 6.3 dargestellt.

(2) Für die Grenzzustände ist nachzuweisen, dass:

$$E_d(t_a) \leq R_d(t_a) \quad (8.1)$$

$E_d(t_a)$  Bemessungswert der Einwirkungen für die akkumulierte Last-Einwirkungsdauer  $t_a$

$R_d(t_a) = \frac{R_k}{\gamma_M \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3}$  Bemessungswert des Widerstands für die akkumulierte Last-Einwirkungsdauer  $t_a$

wobei  $A_1$  die Einwirkungsdauer der Belastung,  
 $A_2$  den Medieneinfluss, wie z. B. Bewitterung, Feuchtigkeit, Chemikalien, etc.,  
 $A_3$  die Umgebungstemperatur  
 repräsentiert.

(3) Entsprechend der Klasse der Last-Einwirkungsdauer (KLED) sind mehrere Nachweise zu führen. Dabei werden auf jedem Nachweisniveau auch alle Einwirkungen mit einer längeren Einwirkungsdauer berücksichtigt. Die zugehörigen Einflussfaktoren können aus dem Grundwert für eine 20-jährige Belastungsdauer ( $A_{1,20J}$ ) hergeleitet werden. Die Grundwerte sind in den Tabellen A-1, B-1a, B-1b bzw. C-1 im Anhang gelistet.

Die Kombination unabhängiger veränderlicher Lasten ist durch Kombinationsbeiwerte nach Anhang D geregelt.

(3a) Bei durch Erddruck belastete Bauwerke mit duktilem bzw. redundantem Tragverhalten kann auch vereinfacht mit gewichteten Materialkennwerten gerechnet werden, siehe Beispiel 5.

(4) Die zugehörigen Einflussfaktoren  $A_1(t_a)$  sind der Tabelle 8-1 zu entnehmen. Die Zusammenhänge gelten jeweils für die Einflussfaktoren  $A_1^t$ ,  $A_1^E$  und  $A_1^D$ .

(5) Alternativ kann der Beiwert  $A_1(t_a)$  in Abhängigkeit des Tabellenwertes  $A_{1,20J}$  und der akkumulierten Einwirkungsdauer  $t_a$  mit Gleichung (8.2) über folgenden Zusammenhang ermittelt werden:

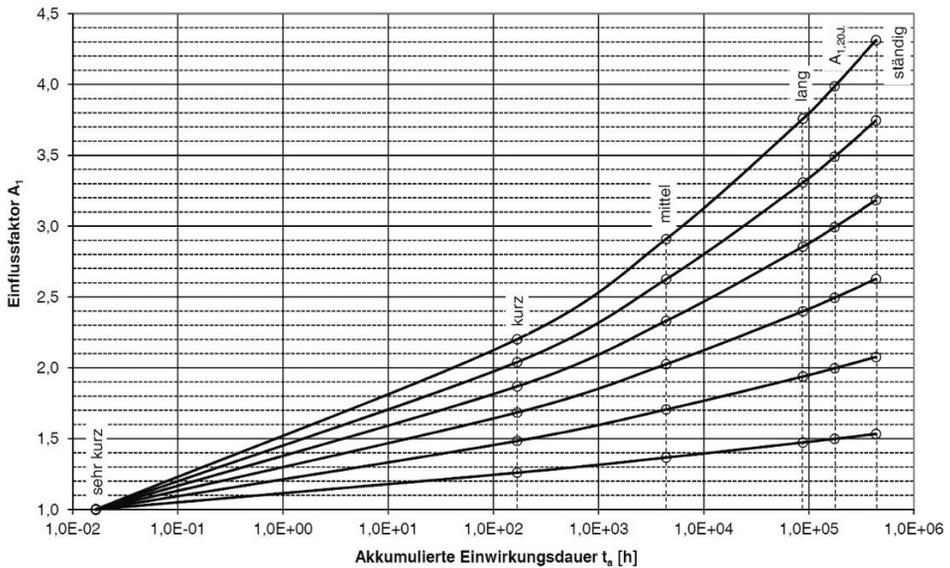
$$A_1(t_a) = (A_{1,20J})^T; \quad T = 0,253 + 0,142 \cdot \lg(t_a) \quad (8.2)$$

$A_{1,20J}$  Grundwert von  $A_1$  für 20 Jahre entsprechend Tabellen im Anhang

$\lg(t_a)$  dekadischer Logarithmus der akkumulierten Lasteinwirkungsdauer  $t_a$  in Stunden [h]

**Tabelle 8-1:** Übersicht der zu führenden Nachweise und der zugehörigen Einflussfaktoren

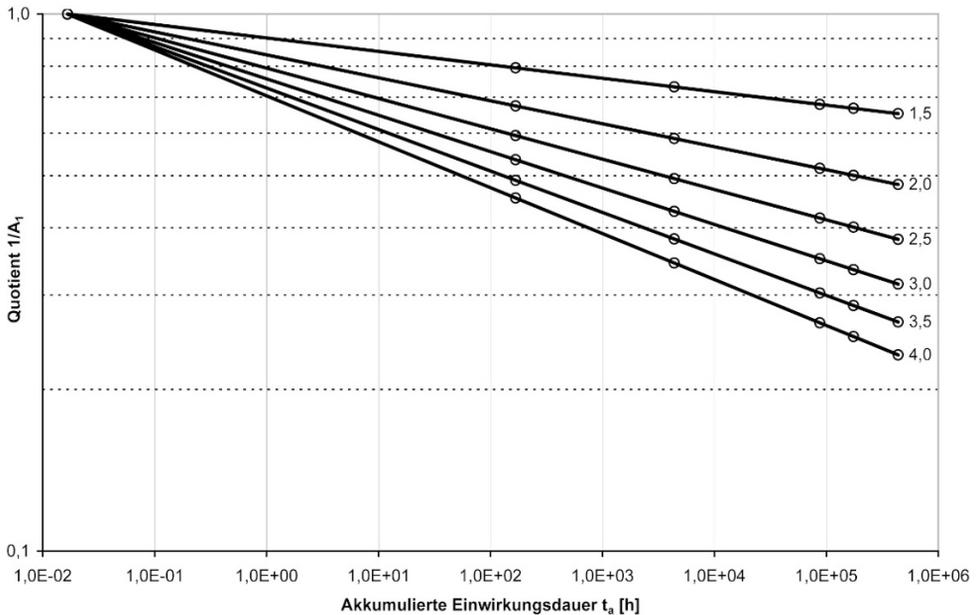
Nachweisniveau	Anzusetzende Lasten	Einflussfaktor $A_1(t_a)$ in Abhängigkeit des Tabellenwerts $A_{1,20J.}$ und der Einwirkungsdauer $t_a$					
		1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
<b>Tabellenwert <math>A_{1,20J.}</math> 20 Jahre</b>	---	<b>1,5</b>	<b>2,0</b>	<b>2,5</b>	<b>3,0</b>	<b>3,5</b>	<b>4,0</b>
ständig 50 Jahre	ständig	1,55	2,10	2,65	3,20	3,75	4,30
lang 10 Jahre	ständig, lang	1,45	1,95	2,40	2,85	3,30	3,75
mittel 6 Monate	ständig, lang, mittel	1,35	1,70	2,05	2,35	2,60	2,90
kurz 1 Woche	ständig, lang, mittel, kurz	1,25	1,50	1,70	1,90	2,05	2,20
sehr kurz 1 Minute	ständig, lang, mittel, kurz, sehr kurz	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00



**Abbildung 8-1:** Abhängigkeit des Einflussfaktors  $A_1$  von dem Tabellenwert  $A_{1,20J.}$  und der akkumulierten Last-Einwirkungsdauer  $t_a$

(6) Die Nachweise für die unterschiedlichen Zeitstandsniveaus werden nicht im Sinne einer Schadensakkumulation überlagert. Es ist ausreichend, dass der Nachweis der Tragfähigkeit bei allen relevanten Einwirkungsauern erfüllt ist, da in den einzelnen Nachweisen bereits alle relevanten Belastungen überlagert sind.

(7) Wird der Quotient des Einflussfaktors  $1/A_1$  im doppelt-logarithmischen Maßstab gegen die akkumulierte Einwirkungsdauer aufgetragen, ergeben sich gerade Kurvenverläufe. Siehe auch Kapitel 3.4.2.



**Abbildung 8-2:** Quotient des Einflussfaktors  $1/A_1$  im doppelt-logarithmischen Maßstab, gerade Kurvenverläufe

(8) Der Einflussfaktor  $A_1(t)$  nach Gleichung (8.2), Tabelle 8-1 sowie den Abbildungen 8-1 und 8-2 gilt ausschließlich für vorwiegend ruhende Belastung. Bei ermüdungsrelevanter Beanspruchung (z. B. Zwangskräfte infolge tages- und jahreszeitlicher Temperaturänderung) ist die Einhaltung des Grenzzustands der Tragfähigkeit und der Ermüdung mit einer Schadensakkumulationshypothese nachzuweisen.

## 8.2.2 Festigkeit

### Grundmaterial

(1) Es ist nachzuweisen, dass während der Nutzungsdauer in einem Querschnitt kein Bruch eintritt.

Der Nachweis erfolgt auf der Basis der Schnittgrößen

$$E_d(t) \leq \frac{R_{k0,05}}{\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^f} \quad (8.3)$$

oder auf der Basis der Spannungen

$$\sigma_d(t) \leq \frac{f_{k0,05}}{\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^f} \quad (8.4)$$

(2) Für die interlaminare Scherbeanspruchung ist der Nachweis analog Gleichung (8.3) oder (8.4) zu führen, wobei für  $\sigma_d(t)$  oder  $E_d(t)$  die Schubspannung  $\tau_d(t)$  aus dem Bemessungswert  $V_d(t)$  für einen allgemeinen Querschnitt

$$\tau_d(t) = V_d(t) \frac{S}{I \cdot b} \quad (8.5)$$

und für einen Rechteckquerschnitt

$$\tau_d(t) = V_d(t) \frac{1,5}{I \cdot b} \quad (8.6)$$

lauten.

Mit:

$S$  statisches Moment (Flächenmoment 1. Grades)

$I$  Trägheitsmoment (Flächenmoment 2. Grades)

$A$  Querschnittsfläche

$b$  Querschnittsbreite

(3) Bei GFK-Laminaten gemäß DIN 18820 ist für  $f_{k0,05}$  die interlaminare Scherfestigkeit nach DIN 18820-2 einzuführen. Sie kann für das Matrixmaterial der Wirr-, Misch- und Wickellamine mit 8 N/mm<sup>2</sup> angesetzt werden, sofern nicht für das verwendete Matrixmaterial durch Versuche günstigere 5 % Fraktilwerte bei 75 %iger Aussagewahrscheinlichkeit ermittelt werden. Alternativ können die Materialkennwerte nach DIN EN 13121-3, Abschnitt 7 bestimmt werden) Für andere Kunststoffe (z. B. Thermoplaste) ist für  $f_{k0,05}$  die entsprechende Scherfestigkeit anzusetzen.

(4) Für die interlaminare Zugfestigkeit ist der Nachweis ebenfalls nach Gleichung (8.3) oder (8.4) zu führen, wobei für  $\sigma_d(t)$  oder  $E_d(t)$  die Normalspannung  $\sigma_{zd}(t)$  senkrecht zur Faserrichtung aus dem Bemessungswert der Abreiß- oder Umlenkraft  $F_{zd}(t)$

$$\sigma_{zd}(t) = \frac{F_{zd}(t)}{A_z} \quad (8.7)$$

lautet.

Mit:  $A_z$  mitwirkende Querschnittsfläche in der Ebene der Fasern zur Übertragung der Abreiß- oder Umlenkraft

(5) Bei Laminaten gemäß DIN 18820 kann für  $f_{k,0,05}$  die interlaminare Zugfestigkeit nach DIN 18820-2 angenommen werden. Sie kann für das Matrixmaterial der Wirr-, Misch- und Wickellamine mit  $4 \text{ N/mm}^2$  angesetzt werden oder es ist wie bei der interlaminaren Scherbeanspruchung zu verfahren.

(6) Bei Sandwichkonstruktionen gelten für die Nachweise der Deckschichten analog die Gleichungen (8.3) bis (8.6). Der Bemessungswert der Spannungen  $\sigma_d(t)$  in Gleichung (8.4) ergibt sich dabei aus den Schnittgrößen der Deckschichten  $N$ ,  $M$  und  $V$  (Normalkraft, Moment, Querkraft) oder im Sonderfall bei dünnen Deckschichten nur aus der Normalkraft, diese sind aus der statischen Berechnung nach den Grundsätzen des Abschnitts 1 zu ermitteln.

Für Deckschichten aus Stahl, Aluminium und anderen Werkstoffen sind für die Nachweise die zugehörigen Normen verbindlich.

(7) Bei Sandwichkonstruktionen gelten für die Nachweise der Kernschicht aus Schaumstoff ebenso die Gleichungen (8.3) bis (8.6). Der Bemessungswert der Spannung  $\sigma_d(t) \equiv \tau_d(t)$  in Gleichung (8.4) ergibt sich hier aus der Querkraft  $V$  der Kernschicht, die nach den Gleichungen (8.5) oder (8.6) zu bestimmen ist.

### Überlagerung verschiedener Beanspruchungsarten

(8) Bei faserverstärkten Kunststoffen unter zusammengesetzter Beanspruchung kann vereinfachend der Nachweis auf der Grundlage der Quotienten der Bemessungswerte aus den Einwirkungen  $E_d$  und den Widerständen  $R_d$  für die verschiedenen Beanspruchungsarten aus Normalkraft  $N$ , Biegemoment  $M$  und Querkraft  $V$  während der Nutzungsdauer geführt werden:

$$\frac{E_{dN}}{R_{dN}} + \frac{E_{dM}}{R_{dM}} + \frac{E_{dV}}{R_{dV}} \leq 1 \quad (8.8)$$

mit:

$R_{dN}$ ,  $R_{dM}$ ,  $R_{dV}$  Bemessungswerte des Widerstands für Normalkraft, Biegemoment und Querkraft siehe vorherigen Abschnitt

$E_{dN}$ ,  $E_{dM}$ ,  $E_{dV}$  Bemessungswerte der Einwirkungen für Normalkraft, Biegemoment und Querkraft

Weitere Beanspruchungen (z. B. Torsionsmomente, mehraxiale Spannungszustände) sind additiv zu berücksichtigen. Es wird empfohlen, den Nachweis auf Spannungsebene zu führen.

(9) Eine bessere Ausnutzung für einachsige verstärkte Kunststoffe gewährleistet z. B. das vereinfachte Versagenskriterium nach [35]. Dort werden die Spannungen auf Laminatenebene betrachtet.

$$\frac{\sigma_{11,Ed}}{\sigma_{11,Rd}} \leq 1 \quad \text{mit} \quad \sigma_{11,Rd} = \begin{cases} \sigma_{11,Rd}^t & \text{für } \sigma_{11,Ed} > 0 \\ \sigma_{11,Rd}^c & \text{für } \sigma_{11,Ed} < 0 \end{cases} \quad (8.9)$$

$$\left( \frac{\sigma_{22,Ed}}{\sigma_{22,Rd}} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{12,Ed}}{\tau_{12,Rd}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{11,Ed}}{E_{11} \cdot \varepsilon_{m11}} \right)^2 < 1 \quad \text{mit} \quad \sigma_{22,Rd} = \begin{cases} \sigma_{22,Rd}^t & \text{für } \sigma_{22,Ed} > 0 \\ \sigma_{22,Rd}^c & \text{für } \sigma_{22,Ed} < 0 \end{cases} \quad (8.10)$$

$\sigma_{11,Ed/Rd}$ : Normalspannung in Faserrichtung, Einwirkung / Widerstand

$\sigma_{22,Ed/Rd}$ : Normalspannung senkrecht zur Faserrichtung, Einwirkung / Widerstand

$\tau_{12,Ed/Rd}$ : Schubspannung in Scheibenebene (in-plane-shear), Einwirkung / Widerstand

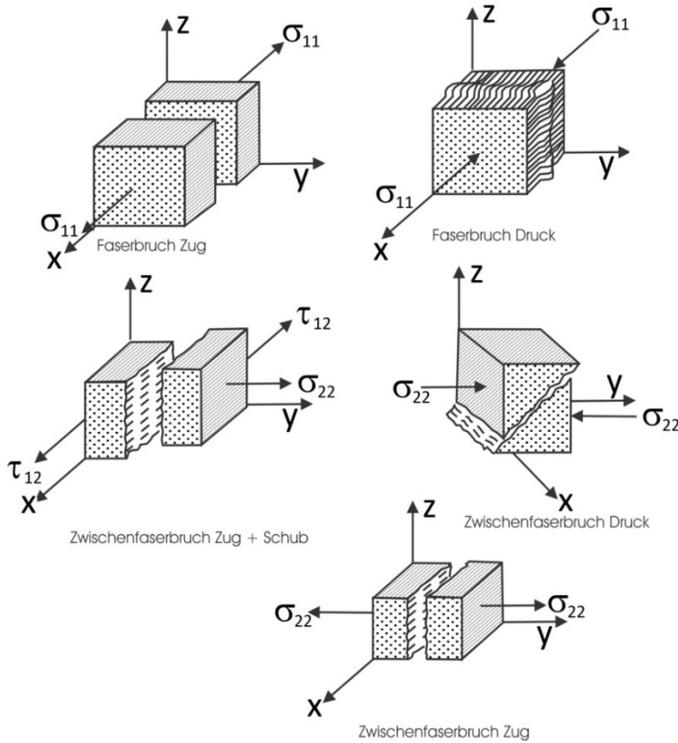
$\sigma_{11,Ed}^{t/c}$ : Normalspannung in Faserrichtung infolge Zug- bzw. Druckkraft, Widerstand

$\sigma_{22,Ed}^{t/c}$ : Normalspannung senkrecht zur Faserrichtung infolge Zug- bzw. Druckkraft, Widerstand

$E_{11}$ : E-Modul in Faserrichtung (Gesamtlaminat)

$\varepsilon_{m11}$ : Grenzdehnung der Matrix in Faserrichtung

(10) Weitere Möglichkeiten der Festigkeitsnachweise sind z. B. in der VDI 2014 enthalten.



**Abbildung 8-3:** Versagensarten einer unidirektionalen Laminatschicht entsprechend den Gleichungen 8.9 und 8.10 [35]

(11) Die exemplarisch in Abbildung 8-3 dargestellten Versagensarten und das für einachsige (unidirektionale) Laminatschichten, wie z. B. Pultrudate, beschriebene Bruchkriterium nach PUCK oder CUNTZE gelten nicht für Matten- oder Gewebelaminatschichten.

(12) Treffen größere Zug-, Druck- und Schubspannungen zusammen bzw. treten mehrachsige Spannungszustände auf, so ist an dieser Stelle bei **unverstärkten Kunststoffen** die Vergleichsspannung nachzuweisen z. B. nach [51]. Für sprödes und duktileres Werkstoffverhalten von unverstärkten Kunststoffen können weitere geeignete Bruchkriterien verwendet werden.

### Verbindungen

(13) Verbindungen können analog den oben aufgeführten Grundsätzen dimensioniert werden. Hierbei ist jedoch bezüglich der Beanspruchbarkeiten zu beachten, dass das Harz bei manchen Konstruktionen stark beansprucht wird.

(14) Bei Sandwichkonstruktionen ist die Verbindung zwischen den Deckschichten und der Kernschicht sowie zwischen den Deckschichten, der Kernschicht und den Randprofilen konstruktiv so zu gestalten und technologisch so vorzubereiten, dass die Tragfähigkeit dieser Verbindungen

größer ist als die der Grundmaterialien. Kann das nicht gewährleistet werden, dann sind die Nachweise nach den Gleichungen (8.3) bis (8.6) für diese Verbindungen entsprechend zu führen oder durch Versuche zu erbringen. Dabei sind die zeit-, medien- und temperaturabhängigen Einflüsse zu berücksichtigen.

### 8.2.3 Stabilitätsversagen

(1) Der Stabilitätsnachweis soll gewährleisten, dass während der Nutzungsdauer sowohl die örtliche Stabilität (z. B. Knittern von Deckschichten bei Sandwichplatten) als auch die Gesamtstabilität des Systems erfüllt ist.

Es werden hierbei die  $\gamma_F$ -fachen Lasten aus Tabelle D-1 im Anhang D angesetzt.

(2) Der Nachweis erfolgt auf der Basis der Schnittgrößen

$$E_d(t) \leq F_{cr,d}(t) \quad (8.11)$$

oder gegebenenfalls auf der Basis der Spannungen

$$\sigma_d(t) \leq \sigma_{cr,d}(t) \quad (8.12)$$

$F_{cr}(t)$  und  $\sigma_{cr}(t)$  sind die Bemessungswerte des Knick-, Biegedrillknick- oder Beulwiderstandes bei Berücksichtigung der Zeitdauer der Einwirkungen, der Temperatur und des umgebenden Mediums sowie der auftretenden Lastanordnung und Lastkombination.

(3) Die Bemessungswerte der Widerstände bei Stabilitätsversagen sind unter Beachtung der Grundsätze der Thermoviskoelastizität zu ermitteln (siehe Abschnitt 7).

(4) Die Berechnung kann auch näherungsweise so erfolgen, dass in den Beziehungen für die Verzweigungslast elastischer Tragwerke die elastischen Verformungsgrößen durch die für den Zeitpunkt geltenden Bemessungswerte nach Abschnitt 5 ersetzt werden.

Der E-Modul darf dabei mit dem Faktor  $\sqrt{A_1^E}$  abgemindert werden.

(5) Gemäß DIN 18820-2, Absatz 2.1.2, sind Wirrfaserlaminat in ihrer Ebene wie Thermoplaste isotrope Werkstoffe. Für diese kann eine näherungsweise Ermittlung der idealen Beulspannungen für Plattenbeulen nach DIN EN 1993-1-5 erfolgen:

$$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma,p} \cdot \frac{\pi^2 \cdot E(t)}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (\text{DIN EN 1993-1-5 – Gl. A.1})$$

$$\tau_{cr,p} = k_{\tau} \cdot \frac{\pi^2 \cdot E(t)}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (\text{DIN EN 1993-1-5 – Gl. 5.4})$$

(6) Für Werkstoffe mit einer gerichteten Faserverstärkung, wie z. B. im Pultrusionsverfahren hergestellte GFK-Profile, müssen die orthotropen Werkstoffeigenschaften bei der Bestimmung der Beulspannungen berücksichtigt werden. In diesem Fall können nicht die Gleichungen aus DIN EN 1993-1-5 für den isotropen Werkstoff Stahl verwendet werden. Hinweise zu Stabilitätsnachweisen für pultrudierte GFK-Profile findet man z. B. in [45] und [48].

(7) Der Stabilitätsnachweis kann auch als Spannungsnachweis nach Theorie II. Ordnung geführt werden, wenn geeignete geometrische Ersatzimperfektionen bekannt sind.

(8) Auf der sicheren Seite kann die Erfassung der Belastungsdauer durch den Kriechfaktor  $\varphi_t$  erfolgen:

$$A_1^E = (1 + \varphi_t) \quad (8.13)$$

Ansätze hierfür befinden sich in den IfBt-Prüfgrundsätzen für den Gewässerschutz (siehe Abschnitt 11.6).

(9) Der Kriechfaktor wird in DIN 18820-2 für verschiedene Lamine unter Dauerlast angegeben. Seine Ermittlung kann zum Beispiel analog zu DIN EN ISO 899-1 erfolgen.

(10) Der Teilsicherheitsbeiwert für örtliche Stabilität (Anhang E) bezieht sich auf den Nachweis der Deckschicht einer Sandwichkonstruktion gegen Knittern. Der Teilsicherheitsbeiwert für Gesamtstabilität bezieht sich auf das Beulverhalten der gesamten Sandwichstruktur.

(11) Für Stabilitätsnachweise ist der E-Modul wie folgt anzusetzen:

$$E_d(t_a) = \frac{E_k}{\gamma_M \cdot \sqrt{A_1^E \cdot A_2^E \cdot A_3^E}} \quad (8.14)$$

$E_k$  charakteristischer Wert des E-Moduls, bei Laminaten nach DIN 18820:  $E_k = 0,8 \cdot E_{k,m}$

$\gamma_M$  Teilsicherheitsbeiwert für Stabilität

$A_j^E$  Einflussfaktoren für den E-Modul

(12) Für den Nachweis von Sandwich-Deckschichten auf Knittern kann folgender Bemessungswert der kritischen Spannung angesetzt werden:

$$\sigma_{cr,d}(t) = 0,82 \cdot \sqrt[3]{E_{D,d}(t_a) \cdot E_{K,d}(t_a) \cdot G_{K,d}(t_a)}$$

$E_{D,d}(t_a)$  zeitabhängiger Bemessungswert des E-Moduls der Deckschicht

$E_{K,d}(t_a)$  zeitabhängiger Bemessungswert des E-Moduls der Kernschicht

$G_{K,d}(t_a)$  zeitabhängiger Bemessungswert des G-Moduls der Kernschicht

Hierin werden Materialimperfectionen in den Teilsicherheitsbeiwerten für die Bemessungswerte der E-Moduln berücksichtigt.

(13) Für dünnwandige Zylinder aus glasfaserverstärktem Kunststoff mit Belastung in Axialrichtung kann die aufnehmbare Druckkraft gemäß DIN EN 13121-3 ermittelt werden:

$$n_{cr,d} = k \cdot \sqrt{E_{\phi b,d} \cdot E_{x,d}} \cdot \frac{t^2}{D} \quad (\text{DIN EN 13121-3 – Gl. 41})$$

wobei:

$$k = \frac{k_1}{\sqrt{1 + \frac{D}{200 \cdot t}}} \quad (\text{keine Durchbrüche berücksichtigt})$$

$n_{cr,d}$  Bemessungswert der aufnehmbaren Membrankraft in Axialrichtung [kN/m]

$E_{\phi b,d}$  Bemessungswert des Biegemoduls in Umfangsrichtung

$E_{x,d}$  Bemessungswert des Axialmoduls

$t$  Wandstärke

$D$  Durchmesser des Zylinders

$k_1$  Beiwert zur Berücksichtigung von Öffnungen, Regelfall  $k_1 = 0,84$

Bei Schalenbereichen oder Zargenauflagern mit Ausschnitten wird  $k_1$  für derartige Ausschnitte geringer angesetzt. Bei kleinen Öffnungen ist  $k_1 = 0,78$  und bei großen Öffnungen  $k_1 = 0,54$  einzusetzen. Eine Öffnung ist als klein einzustufen, wenn gilt:

$$\frac{d_{co}}{\sqrt{D \cdot t}} \leq 3,5 \cdot \sqrt{2}$$

$d_{co}$  Durchmesser der Öffnung

(14) Für Zylinder aus Thermoplasten mit Belastung in Axialrichtung kann die aufnehmbare Druckkraft entsprechend Abschnitt 4.2.2.1 der Richtlinie DVS 2205-2 ermittelt werden.

(15a) Für kurze Zylinder aus glasfaserverstärktem Kunststoff mit Belastung in Umfangsrichtung, bei denen das Verhältnis von Länge  $L_s$  zum Durchmesser  $D$  kleiner oder gleich 6 ist, beträgt der aufnehmbare Unterdruck im Inneren des Zylinders gemäß DIN EN 13121-3:

$$p_{cr,d} = 2,40 \cdot \sqrt[4]{E_{\phi b,d}^3 \cdot E_{x,d}} \cdot \frac{D}{L_s} \cdot \left(\frac{t}{D}\right)^{2,5} \quad (\text{DIN EN 13121-3 – Gl. 45})$$

$p_{cr,d}$  Bemessungswert des aufnehmbaren Unterdrucks [N/m<sup>2</sup>]

$E_{\phi b,d}$  Bemessungswert des Biegemoduls in Umfangsrichtung

$E_{x,d}$  Bemessungswert des Axialmoduls

$t$  Wandstärke

$D$  Durchmesser des Zylinders

$L_s$  Zylinderhöhe zwischen Aussteifungen

(15b) Für lange Zylinder aus glasfaserverstärktem Kunststoff mit Belastung in Umfangsrichtung, bei denen das Verhältnis von Länge  $L_s$  zum Durchmesser  $D$  größer als 6 ist, beträgt der aufnehmbare Unterdruck im Inneren des Zylinders gemäß DIN EN 13121-3:

$$p_{cr,d} = 2,1 \cdot E_{\phi b,d} \cdot \left(\frac{t}{D}\right)^3 \quad (\text{DIN EN 13121-3 – Gl. 46})$$

$p_{cr,d}$  Bemessungswert des aufnehmbaren Unterdrucks [N/m<sup>2</sup>]

$E_{\phi b,d}$  Bemessungswert des Biegemoduls in Umfangsrichtung

$t$  Wandstärke

$D$  Durchmesser des Zylinders

(16) Für Zylinder aus Thermoplasten mit Belastung in Umfangsrichtung kann der aufnehmbare Unterdruck entsprechend Abschnitt 4.2.2.2 der Richtlinie DVS 2205-2 ermittelt werden.

(17) Bei gleichzeitigem Auftreten axialer und radialer Lasten in einem Zylinder aus unverstärktem oder glasfaserverstärktem Kunststoff muss gemäß DIN EN 13121-3 folgende Bedingung für den Nachweis erfüllt sein:

$$\left(\frac{n_{xc,d}}{n_{cr,d}}\right)^{1,25} + \left(\frac{p_{D,d}}{p_{cr,d}}\right)^{1,25} \leq 1 \quad (\text{DIN EN 13121-3 – Gl. 48})$$

$n_{xc,d}$	Bemessungswert der vorhandenen Membrankraft in Axialrichtung [kN/m]
$n_{cr,d}$	Bemessungswert der aufnehmbaren Membrankraft in Axialrichtung [kN/m]
$p_{D,d}$	Bemessungswert des vorhandenen Unterdrucks [N/m <sup>2</sup> ]
$p_{cr,d}$	Bemessungswert des aufnehmbaren Unterdrucks [N/m <sup>2</sup> ]

### 8.2.4 Dehnungsbeschränkung

(1) Durch eine Beschränkung der Dehnungen wird die Mediendiffusion durch das Harz vermindert. Dadurch wird der Schädigungsfortschritt verringert und die Lebensdauer vergrößert. Es ist daher speziell bei Faserverbundkonstruktionen, welche starkem chemischen Angriff ausgesetzt sind, sinnvoll, den Tragfähigkeitsnachweis auch über eine Beschränkung der Dehnungen zu führen.

(2) Der Nachweis erfolgt durch:

$$\varepsilon_d(t) \leq \frac{D_{k0,05}}{\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^D} \quad (8.15)$$

mit:

$\gamma_M$  (siehe Abschnitt 5.5 und Tabelle E-1)

$\varepsilon_d(t)$  maßgebende Dehnung (elastische Dehnung und Kriechdehnung)

$D_{k0,05}$  charakteristischer Wert der Dehngrenze, ermittelt aus Dauerstandversuchen unter Last bei entsprechendem chemischen Angriff, z. B. nach DIN EN ISO 22088. Die Auswertung der Dauerstandversuche erfolgt nach DIN EN ISO 22088.

## 8.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

### 8.3.1 Allgemeines

(1) Die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit für einen Tragwerkszustand werden durch die Nutzungsbedingungen definiert. Dazu sind im Wesentlichen die Beschränkung der Dehnung, der Dichtheit und die zulässige Verformung zu zählen.

Für die Grenzzustände ist nachzuweisen, dass:

$$E_d \leq C_d \quad (8.16)$$

$E_d$  Bemessungswert aus den Einwirkungen

$C_d$  Bemessungswert des Gebrauchstauglichkeitskriteriums

### 8.3.2 Dehnungsbeschränkung

(1) Durch eine Beschränkung der Dehnung können technische Anforderungen wie z. B. Dichtigkeit und Rissbreitenbeschränkung, oder ästhetische Anforderungen, wie z. B. Schädigungen an den Oberflächen, erfüllt werden.

Es ist folgender Nachweis zu erfüllen:

$$\varepsilon_d(t) \leq \varepsilon_{\max}(t) \quad (8.17)$$

$\varepsilon_d(t)$  maßgebende Dehnung (elastische Dehnung und Kriechdehnung)

$\varepsilon_{\max}(t)$  Bemessungswert zur Erfüllung technischer und ästhetischer Anforderungen für einen Zeitpunkt  $t$ .

(2) In der Regel ist  $\varepsilon_{\max}(t)$  durch Versuche abzuleiten oder aus Erfahrungen festzulegen (bei GFK  $\varepsilon_{\max}(t)$  in Abhängigkeit vom Material zwischen 0,15 und 0,35 %). Weitere Angaben zu Kunststoffen im Behälterbau können der DIN EN 13121-3 entnommen werden.

### 8.3.3 Verformungsbegrenzung

Die maximalen Verformungen des Tragwerks als Folge aller Beanspruchungen, wie Einwirkungen, Umwelteinflüsse, u. a. sind zu begrenzen. Der Bemessungswert  $C_d$  als Bauteileigenschaft ist von der Art des Tragwerkes, von technischen Anforderungen, wie z. B. Veränderung des statischen Systems oder Zusatzbeanspruchungen infolge von Längskräften und ästhetischen Anforderungen, wie zum Beispiel Durchhängen abhängig.

Durchbiegungsbegrenzungen und Einwirkungskombinationen sind für jeden Einzelfall zwischen Bauherr und Planer festzulegen.

Es werden folgende Nachweise empfohlen:

$$u_d(t) \leq u_{d,\max} \quad (8.18)$$

$u_d(t)$  maßgebende Verformung zum Zeitpunkt  $t$  (elastische Verformung und Kriechverformung unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren  $A$ )

$u_{d,\max}$  Bemessungswert  $C_d$  nach Tabelle 8-2 zur Erfüllung der Durchbiegungsbegrenzung

**Tabelle 8-2:** Empfehlungen für den Bemessungswert  $C_d$  der Durchbiegung

Einwirkung	$C_{d,\max}$
Tragwerke ohne Anforderungen	1/50
Tragwerke mit geringen Anforderungen	1/80
Tragwerke mit normalen Anforderungen	1/125
Tragwerke mit hohen Anforderungen	1/200

mit: 1 = für das Bauteil maßgebende Stützweite

## 8.4 Verbindungen

### 8.4.1 Allgemeines

(1) Verbindungen sollen den Kraftfluss zwischen den zu verbindenden Bauteilen nur im unbedingt erforderlichen Maße beeinflussen. Die Beanspruchung der Verbindungen eines Querschnittsteiles soll aus den Schnittgrößen dieses Querschnittsteiles berechnet werden. Exzentrizitäten, Nettoquerschnitte und lokale Umlenkungen sowie Einleitungen von Kräften sind in den Nachweisen zu berücksichtigen. Der Einfluss der Nachgiebigkeit bzw. des Schlupfes von Verbindungsteilen ist zu berücksichtigen. Die anteiligen Kräfte sind nach dem Verfahren elastisch-elastisch zu berechnen. Dabei sind die zeit-, medien- und temperaturabhängigen Einflüsse zu berücksichtigen.

(2) Die Ergebnisse von Bauteilversuchen können rechnerische Nachweise ersetzen. Dabei ist die DIN EN 1990 (Anhang D) entsprechend zu berücksichtigen.

(3) Es wird zwischen lösbaren und ohne Zerstörung nicht lösbaren Verbindungen unterschieden.

(4) Es können vorgespannte Verbindungen eingesetzt werden, wobei die zeitabhängige Abnahme der Vorspannkraft zu berücksichtigen ist. Des Weiteren ist sicherzustellen, dass die zulässigen Druckspannungen senkrecht zum Material durch das Aufbringen der Vorspannung nicht überschritten werden.

### 8.4.2 Lösbare Verbindungen

#### Schraubverbindungen für faserverstärkte Kunststoffe

(1) Die Tragsicherheitsnachweise gelten für die in DIN EN 1993-1-8 geregelten Ausführungsformen. Bei unmittelbar beanspruchten Laschen- und Stabanschlüssen dürfen in Krafrichtung hintereinander liegend höchstens 2 Schrauben, bei maschinell gefertigten Faserverbundwerkstoffen (pultrudierten Profilen) höchstens 5 Schrauben für den Nachweis berücksichtigt werden. Jeder Anschluss sollte aus mindestens 2 Verbindungsmitteln bestehen.

(2) Zur Ermittlung der Grenzabscherkraft je Scherfuge sind für die Schrauben die folgenden Nachweise zu erbringen:

- Abscheren von Stahlschrauben: entsprechend DIN EN 1993-1-8, Abschnitt 3.6

$$F_{v,Rd} = a_v \cdot f_{ub} \cdot A / \gamma_{M2} \quad (8.19)$$

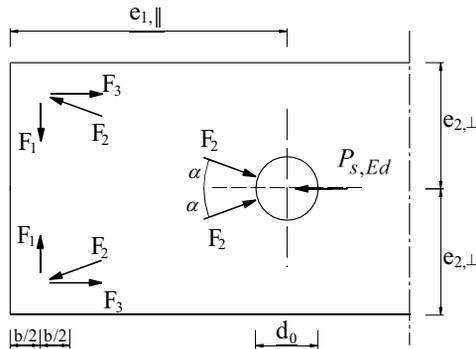
- Abscheren von Kunststoffschrauben:

$$F_{v,Rd}(t) = \frac{f_{k0,05} \cdot A}{\gamma_M \cdot A_{mod}^f} \quad (8.20)$$

mit:

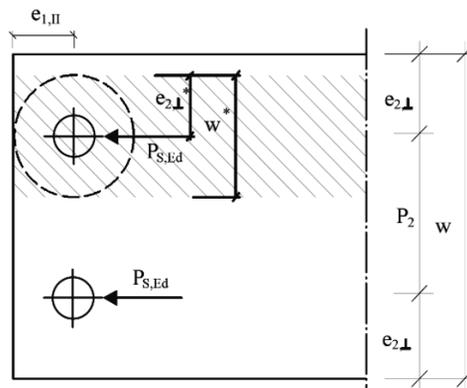
$F_{v,Rd}(t)$	Bemessungswert der Abschertragfähigkeit einer Schraube
$\alpha_v$	Beiwert nach DIN EN 1993-1-8 in Abhängigkeit von der Schraubenfestigkeit
$f_{ub}$	charakteristischer Wert der Zugfestigkeit einer Stahlschraube
$f_{k,0,05}$	charakteristischer Wert der Kurzzeitschubfestigkeit einer Kunststoffschraube
$A$	Spannungsquerschnittsfläche der Schrauben

(3) Die Belastungsverteilung unter Beanspruchung in Bauteilebene kann in Analogie zur Stabwerktheorie (Abbildung 8-4) beschrieben werden.



**Abbildung 8-4:** Stabwerkmodell zur Berechnung der Tragfähigkeit einer Schraubenverbindung [33]

Für breite Bauteile, bei denen  $2e_{2,\perp} > e_{1,||}$ , entspricht die maßgebende Breite  $w^*$  bzw. der maßgebende Randabstand  $e_{2,\perp}^*$  dem kleinsten Abstand in beliebiger Richtung vom Zentrum der Bohrung bis zum Profilrand [33].



**Abbildung 8-5:** Beispielhafte Ermittlung der maßgebenden Breite  $w^*$  bzw.  $e_{2,\perp}^*$  [33]

Die Tragfähigkeit des anzuschließenden Bauteils aus Kunststoff unter Beanspruchung in Bauteilebene ist dann ausreichend, wenn die auftretenden Kräfte die Widerstände nicht überschreiten.

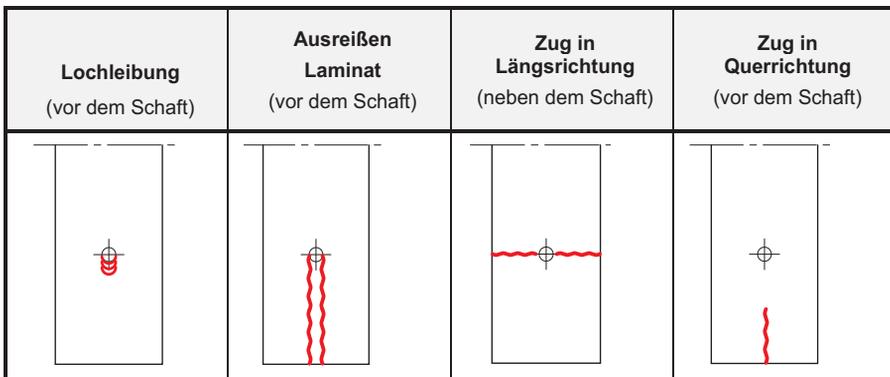
$$P_{s,d}(t) = \frac{R_{k0,05} \cdot A}{\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^f} \quad (8.21)$$

mit:

$P_{s,d}(t)$  Einwirkende Schraubkraft in Laminebene

$R_{k0,05}$  charakteristischer Wert für den jeweiligen Versagensmechanismus; der kleinste Wert ist maßgebend für die Bemessung

Die möglichen Versagensmechanismen sind in Abbildung 8-6 zusammengestellt.



**Abbildung 8-6:** Typische Versagensmechanismen für geschraubte Verbindungen in GFK

In Kunststoffbauteilen sind die Tragfähigkeiten für die dargestellten Versagensmechanismen mit den folgenden Gleichungen getrennt voneinander zu bestimmen [33]:

Lochleibungsversagen (vor dem Schaft)

$$P_{s,Rd}(t) = \frac{d \cdot t \cdot k_{cc} \cdot f_{pk0,05}}{\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^f} \quad (8.22a)$$

Ausreißen Laminat (vor dem Schaft) / Schubversagen

$$P_{s,Rd}(t) = \frac{2e_{1,u} \cdot t \cdot f_{\tau 0,05}}{\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^f} \quad (8.22b)$$

Zug in Längsrichtung (neben dem Schaft)

$$P_{s,Rd}(t) = \frac{(2e_{2,\perp} - d_0) \cdot t \cdot f_{tk0^\circ 0,05} / k_{tc}}{\gamma_M \cdot A_{mod}^f} \quad (8.22c)$$

Zug in Querrichtung (vor dem Schaft)

$$P_{s,Rd}(t) = \frac{b \cdot t \cdot f_{tk90^\circ 0,05}}{\gamma_M \cdot A_{mod}^f} \quad (8.22d)$$

$P_{s,d}(t)$	Einwirkende Schraubenkraft
$t$	Laminatdicke
$d$	Durchmesser des Schraubenschafts
$d_0$	Lochdurchmesser
$e_{1,  }$	Randabstand in Krafrichtung
$e_{2,\perp}$	Randabstand senkrecht zur Krafrichtung
$F_{1d}$	Querzugkraft am Bauteilrand; näherungsweise gilt: $F_{1d} = \tan 30^\circ \times F_d / 2$
$b$	effektive Breite auf der die Querzugkraft angreift; näherungsweise $b = d$
$f_{tk,0^\circ 0,05}$	charakteristische Kurzzeitzugfestigkeit Krafrichtung
$f_{tk,90^\circ 0,05}$	charakteristische Kurzzeitzugfestigkeit senkrecht zur Krafrichtung
$f_{\tau 0,05}$	charakteristische Kurzzeitschubfestigkeit in Laminebene (in Krafrichtung)
$f_{pk0,05}$	Kurzzeitlochleibungsfestigkeit in Krafrichtung (entspricht der Bolzentragfähigkeit gemäß DIN EN 13706-2)
$k_{cc}$	Spannungskonzentrationsfaktor zur Berücksichtigung von Spannungsspitzen infolge Lochspiel unmittelbar vor dem Schraubenschaft (ist generell experimentell zu ermitteln). Für maschinell gefertigte Faserverbundwerkstoffe (pultrudierte Polymerprofile) kann nach [33] näherungsweise $k_{cc} = (d / d_0)^2$ angesetzt werden.
$k_{tc}$	Spannungskonzentrationsfaktor zur Berücksichtigung der maximalen Lochrandspannung, die unter der Annahme eines elastischen Verhaltens bis zum Bruch berechnet werden kann. Für genauere Nachweise können für Matten- bzw. Mischlamine gem. DIN 18820-2 die Rechenansätze nach [40] oder [14] verwendet werden, z. B. ( $k_{tc} = 1/\alpha_l = 1,72$ bzw. 1,89). Für maschinell gefertigte Faserverbundwerkstoffe (pultrudierte Polymerprofile) kann nach [33] vereinfachend mit dem Wert 2,25 gerechnet werden.

Bei genauer Nachweisführung sind die Werte für  $k_{tc}$  der folgenden Tabelle 8-3 anzusetzen.

**Tabelle 8-3:** Werte  $k_{tc}$  für den Schraubennachweis

$e_{1,III}/w$ \ w/d	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	8,0	10,0
0,500	1,31	1,36	1,42	1,47	1,53	1,58	1,64	1,70	1,76	1,99	2,23
0,750	1,29	1,34	1,39	1,44	1,49	1,54	1,60	1,66	1,71	1,94	2,18
0,875	1,28	1,33	1,38	1,43	1,48	1,53	1,59	1,64	1,70	1,93	2,16
1,000	1,28	1,32	1,37	1,42	1,47	1,53	1,58	1,64	1,69	1,92	2,15

Die dargestellten Versagensmechanismen sind in Abhängigkeit des Lastangriffswinkels  $\alpha$  zur Längsrichtung (bei pultrudierten Profilen identisch mit der Pultrusionsrichtung) im Bemessungskonzept einzubeziehen.

Hierzu wird in [33] folgendes Interaktionskriterium vorgeschlagen. Dabei ist die angreifende Kraft  $P_{S,Ed}$  unter Berücksichtigung des Lastangriffswinkels  $\alpha$  in zwei Kraftkomponenten aufzuteilen und mit den entsprechenden Widerständen ins Verhältnis zu setzen.

$$\left( \frac{P_{S,Ed,0^\circ}}{P_{S,Rd,0^\circ}} \right)^2 + \left( \frac{P_{S,Ed,90^\circ}}{P_{S,Rd,90^\circ}} \right)^2 \leq 1,0 \quad (8.23)$$

- mit:
- $P_{S,Ed,0^\circ}$  Einwirkende Kraftkomponente in Längs- bzw. Pultrusionsrichtung
  - $P_{S,Rd,0^\circ}$  Beanspruchbarkeit in Längs - bzw. Pultrusionsrichtung
  - $P_{S,Ed,90^\circ}$  Einwirkende Kraftkomponente senkrecht zur Längs- bzw. Pultrusionsrichtung
  - $P_{S,Rd,90^\circ}$  Beanspruchbarkeit senkrecht zur Längs- bzw. Pultrusionsrichtung

Auf der sicheren Seite liegend, können die Nachweise auch mit einem vereinfachten Nachweisformat geführt werden:

$$\text{Wenn gilt: } 0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ \quad P_{S,Rd} = \min(P_{Lochleibung,0^\circ}, P_{Schubversagen,0^\circ}) \quad (8.24a)$$

$$\text{Wenn gilt: } 30^\circ < \alpha \leq 90^\circ \quad P_{S,Rd} = \min(P_{Lochleibung,90^\circ}, P_{Querzugversagen,90^\circ}) \quad (8.24b)$$

Die in den Gleichungen (8.22a) bis (8.22d), (8.23), (8.24a) und (8.24b) angegebenen Beziehungen wurden für maschinell hergestellte Profile aus glasfaserverstärktem Kunststoff entwickelt. Die Angaben sind jedoch auch auf manuell gefertigte oder unverstärkte Bauteile übertragbar.

(4) Die Beanspruchung senkrecht zur Bauteilebene ist in Abhängigkeit der Grenzzugkraft der Schrauben (Stahlschrauben nach DIN EN 1993-1-8) sowie des Ausknöpfungswiderstands / Durchstanzwiderstands des Kunststoffs zu bestimmen.

Dabei ist der Durchstanzwiderstand des Kunststoffes wie folgt zu ermitteln

$$P_{S,d\perp}(t) = \frac{\pi \cdot d_u \cdot t \cdot f_{\tau\perp,II0.05}}{\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^f} \quad (8.25)$$

mit:

$P_{S,d\perp}(t)$  Einwirkende Schraubenkraft senkrecht zur Bauteilebene

$d_u$  Durchmesser der Unterlegscheibe

$t$  Laminatstärke

$f_{\tau\perp,II0,05}$  Kurzzeitschubfestigkeit senkrecht zur Bauteilebene

Bei pultrudierten Profilen gilt näherungsweise:  $f_{\tau\perp,II0,05} = 1,25 f_{\tau 0,05}$

(5) Für eine kombinierte Beanspruchung infolge Zug und Abscheren gilt für Stahlschrauben die Interaktionsbedingung nach DIN EN 1993-1-8. Für alle Kunststoffbauteile kann der Bemessungswert der Tragfähigkeit auf der sicheren Seite liegend mit der linearen Interaktionsbeziehung entsprechend Gleichung (8.8) abgeschätzt werden.

### Verbindungen mit Ankern, Bolzen, Nieten und vergleichbaren Tragelementen

(6) Verbindungen mit Ankern, Bolzen, Nieten und vergleichbaren Tragelementen können analog geführt werden.

### Zusammenwirkung verschiedener Verbindungsmittel

(7) Verschiedene Verbindungsmittel dürfen für die Übertragung von Schnittgrößen im Stoß- bzw. Anschlussquerschnitt gemeinsam herangezogen werden, wenn die unterschiedlichen Kraft-Weg-Beziehungen / Steifigkeitsverhältnisse sowohl im Gebrauchs- als auch im Tragzustand bei den Nachweisen entsprechend berücksichtigt werden. Die Ergebnisse von Versuchen sind vor der Verwendung auf Vergleichbarkeit zu überprüfen. Die Kraftanteile eines Teilquerschnitts sollen in der Regel nur durch eine Verbindungsmittelart übertragen werden.

## 8.4.3 Nicht lösbare Verbindungen

(1) Die Verbindung erfolgt bei GFK-Konstruktionen überwiegend durch Überlaminieren bzw. Kleben durch Überlappung [41] oder Verwendung von Verbindungsteilen.

### Überlaminieren

(2) Es sollten symmetrische, den Kraftverlauf möglichst nur gering beeinflussende Ausführungen gewählt werden. Die Überlappungslänge muss mindestens gleich der 10-fachen Materialdicke des anzuschließenden Bauteils sein.

(3) Bei Überlaminierung sind die einzelnen Laminatschichten abgetrept gesondert zu stoßen. Der Versatz der einzelnen Schichten soll mindestens 10 cm betragen. Stärkere Aufdickungen im Verbindungsbereich sind zu vermeiden.

(4) Bei nicht voller Stoßdeckung sind die entsprechenden Nachweise zu führen, wobei etwaige Exzentrizitäten zu berücksichtigen sind. Insbesondere bei nicht gestützten Verbindungen sind auch die Einflüsse auf die zu verbindenden Bauteile im Hinblick auf Spannungen bzw. Dehnungen und auf die Stabilität bei den Nachweisen zu berücksichtigen.

### **Schweißen**

(5) Bei Thermoplasten wird die Verbindung hauptsächlich durch Heißschweißen und Kleben [17] hergestellt.

(6) Beim Heißschweißen muss die werkstoffmäßige charakteristische Spannung um einen Schweißfaktor verringert werden, mit dem das Langzeitverhalten der Schweißnaht gegenüber dem Grundwert berücksichtigt wird.

### **Kleben allgemein**

(7) Klebstoffe müssen für den vorgegebenen Verwendungszweck geeignet sein. Die Eignung ist nachzuweisen. Die Klebflächen der zu verbindenden Teile sind geeignet vorzubereiten.

### **Kleben von faserverstärkten Kunststoffen**

(8) Es sollten symmetrische, den Kraftverlauf möglichst nur gering beeinflussende Ausführungen gewählt werden. Die Überlappungslänge muss mindestens die 10-fache Materialdicke des anzuschließenden Bauteils betragen.

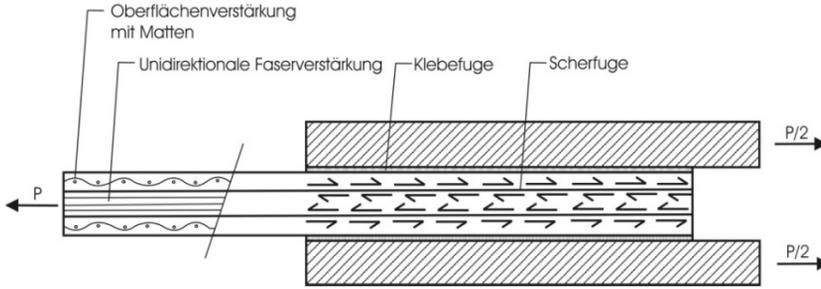
(9) Bei nicht kontinuierlichen Verklebungen entstehen abschälende Spannungen senkrecht zur Klebfuge, diese sind zu ermitteln und anzusetzen. Ebenfalls sind etwaige Exzentrizitäten zu berücksichtigen.

(10) Prinzipiell sind vier Versagensmechanismen möglich:

- kohäsiver Bruch des Klebstoffs,
- adhäsiver Bruch an der Klebfuge,
- interlaminares Scherbruch des FVK-Bauteils (Zwischenschichtbruch),
- intralaminares Bruch in der ersten Lage des FVK-Bauteils (Grenzschichtversagen zwischen Fasern und Harz).

(11) Bei allen Versagensarten sind neben den mechanischen Eigenschaften des Klebstoffs auch die Bauteilabmessungen der Fügebauteile und ihr Laminataufbau für die Spannungsverteilung maßgebend. Die Beanspruchbarkeit der Verbindung wird zudem von der Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktflächen bestimmt. Der rechnerische Nachweis einer Klebverbindung ist daher von vielen Einflussfaktoren abhängig und kann nur am Gesamtbauteil geführt werden.

(12) Klebverbindungen im Bauwesen werden häufig mit Epoxidharzmörtel hergestellt. Solche Verbindungen versagen in der Regel nicht in der Klebfuge, sondern auf Grund der geringen interlaminares Scherfestigkeit des faserverstärkten Bauteils oberflächennah im Grundmaterial [46].



**Abbildung 8-7:** Scherfuge in einem pultrudierten Flachprofil mit zweischnittiger Verklebung unter zentrischer Zugkraft

(13) Bei allen drei Versagensarten leisten die Fasern (insofern es sich um einen faserverstärkten Kunststoff handelt) keinen nennenswerten Beitrag zum Lastabtrag. Die Interaktionsbeziehung aus Gleichung (8.26) konnte in mehreren Versuchsreihen bestätigt werden [32], [34], [47]. Die angegebenen Widerstände sind Anschlusskenngrößen für den schwächsten Versagensmechanismus der Verbindung (kohäsiver Bruch, adhäsiver Bruch, inter- und intralaminare Versagen). Zur Anwendung der Interaktionsbeziehung müssen jedoch die Widerstände rechtwinklig und längs zur Klebfuge aus dem gleichem Versagen resultieren.

$$\left( \frac{\sigma_{33,Ed}}{\sigma_{33,Rd}} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{31,Ed}}{\tau_{31,Rd}} \right)^2 < 1 \quad (8.26)$$

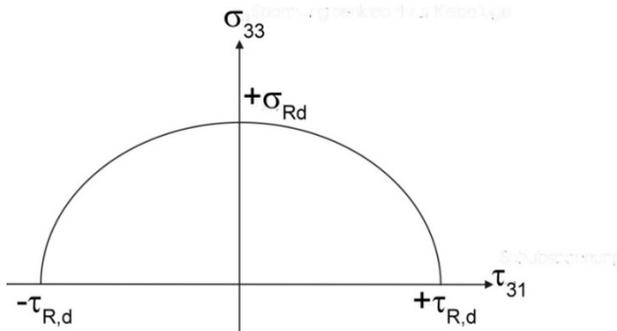
$\sigma_{33,Ed}$ : einwirkende Zugspannung senkrecht zur Klebefläche

$\sigma_{33,Rd}$ : Widerstand senkrecht zur Klebefläche

$\tau_{31,Ed}$ : einwirkende Schubspannung längs zur Klebefläche

$\tau_{31,Rd}$ : Widerstand längs zur Klebefläche

(14) Die Interaktionsbeziehung aus Gleichung (8.26) kann auch auf unverstärkte Kunststoffe übertragen werden.



**Abbildung 8-8:** Interaktion in der Klebefuge



## 9 Bauliche Durchbildung

### 9.1 Grundsätzliches

(1) Die bauliche Durchbildung der Bauteile und Querschnitte ist geprägt durch die Anwendung dünnwandiger, einschichtiger Konstruktionen aus Kunststoffen, deren Eigenschaften durch hohes Verformungsverhalten gekennzeichnet sind. Große Verschiebungen und Verdrehungen sowie örtliche und gesamte Stabilität sind daher besonders zu beachten.

(2) Die Form von Kunststoffbauten und deren Gestaltung hat entscheidende Auswirkung auf die Durchführbarkeit und Wirksamkeit der Oberflächenschutzmaßnahmen. Sie beeinflusst auch den Aufwand für die zum Umweltschutz nötigen Maßnahmen bei späterer Instandhaltung. Die am Standort vorhandenen korrosiven Belastungen und Umweltbedingungen sind zu beachten und in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit einzubeziehen.

(3) Alle Kunststoffbauteile sollen zugänglich und erreichbar sein, damit der Oberflächenschutz ausgeführt, geprüft und instand gesetzt werden kann. Für die Durchführung späterer Instandsetzungsarbeiten sollen die nötigen Hilfsmittel, wie zum Beispiel feste Stege, bewegliche Arbeitsbühnen, Rüsthilfen, Haken oder Ösen schon beim Entwurf des Bauwerks berücksichtigt werden.

(4) Spalten sollten möglichst vermieden werden. Unvermeidbare Spalten sind zu verschließen, zum Beispiel durch Abdichten oder Verfugen. Sämtliche Maßnahmen sind auch für den Übergang zu Konstruktionen aus anderen Werkstoffen erforderlich.

(5) Flächen, auf denen sich aggressive Medien wie z. B. Staub, Salze, aggressive Lösungen, Wasser usw. ansammeln können, sollen vermieden werden. Geeignete Maßnahmen hierzu sind zum Beispiel:

- Überhöhung unter Berücksichtigung der zeitabhängigen Verformungen,
- geneigte und gewölbte Flächen,
- Vermeiden oben offener Profile oder Anordnen in Schräglage,
- Durchbrüche oder Öffnungen,
- Ablauföffnungen, Tropfnasen und Tropftüllen unter Beachtung möglicher Windverwehungen.

(6) Einspringende Ecken von Ausschnitten sind auszurunden. Die Ausschnittsränder sind aufgrund statischer Nachweise zu verstärken, wobei die Verstärkung ausreichend einzubinden ist.

(7) Flansche sind ausreichend auszurunden. Die interlaminaire Zugfestigkeit im Krümmungsbereich ist nachzuweisen.

## 9.2 Bauteile

### 9.2.1 Allgemeines

- (1) Gegenüberliegende, von beiden Seiten erreichbare Flächen von Profilen mit einer Höhe  $h < 100$  mm sollen einen Abstand  $a > 15$  mm haben. Bei kleineren Abständen ist der Zwischenraum auszufüttern. Um Rinnen zu vermeiden, sollten die Futterflächen überstehen.
- (2) In Bauteilen im Freien und bei erhöhten aggressiven Einwirkungen sollen Zwischenräume bis 25 mm ausgefüttert werden, oder es sollen Oberflächenschutzverfahren gewählt werden, welche auch bei kleineren Zwischenräumen anwendbar sind.
- (3) Der Abstand zwischen Profilen mit einer Höhe  $h > 1000$  mm sowie zwischen diesen Profilen und anderen Bauwerksteilen sollte mindestens 500 mm betragen.
- (4) Bauteile, die aggressiven Medien ausgesetzt und nach den Montagen nicht mehr zugänglich beziehungsweise nicht mehr erreichbar sind, müssen aus einem entsprechend beständigem Werkstoff bestehen oder einen so wirksamen Oberflächenschutz erhalten, dass während der Nutzungsdauer des Objektes keine Beeinträchtigung der Standsicherheit eintritt. Anderenfalls sind ausreichende Zuschläge zu den statisch erforderlichen Mindestquerschnitten vorzusehen oder Maßnahmen für eine vorzeitige Bauteilerneuerung einzuplanen. Die Querschnitte eines Oberflächenschutzes sind bei den Nachweisen nicht anzusetzen.

### 9.2.2 Hohlkästen und Hohlbauteile

- (1) Hohlkästen (zugänglich) und Hohlbauteile (nicht zugänglich) sind, wenn nachstehende Forderungen erfüllt werden, eine besonders günstige Querschnittsform im Hinblick auf aggressive Medien. Sie reduzieren die der atmosphärischen Einwirkung ausgesetzten Oberflächen auf ein Minimum. Hohlkästen und Hohlbauteile im Sinne dieser Empfehlungen werden konstruktiv in offene und dicht geschlossene Kästen unterteilt.
- (2) Offene Hohlkästen und offene Hohlbauteile mit Einwirkung von Oberflächenfeuchte müssen, je nach konstruktiver Belastung, nach Anzahl und Größe ausreichend Umluft- und Entwässerungsöffnungen haben.
- (3) Dicht geschlossene Hohlkästen und Hohlbauteile dürfen weder Luft noch Feuchtigkeit eindringen lassen. Daher sind umlaufende dichte Fügenähte und dichte Verschlüsse vorzusehen. Bei der Herstellung ist eine Prüfung der Dichtheit nach Art und Umfang zu vereinbaren. Bei der Montage ist darauf zu achten, dass kein Wasser eingeschlossen wird. Zur weiteren Kontrolle der Dichtheit sind an den tiefsten Stellen des Hohlbauteils Schraubstopfen vorzusehen. Die Bereiche von Stabdübeln und Schraubstößen sind zum Hohlraum hin abzudichten. Handlöcher im Stoßbereich sind möglichst nur an der Unterseite vorzusehen und gegen Eindringen von Fremdkörpern zu sichern. Der im Stoßbereich abgeschottete Hohlraum sollte im Tiefpunkt eine Wasserablauföffnung erhalten. Die Abläufe sind regelmäßig zu reinigen. Der wechselnde Innendruck infolge Temperaturänderung ist bei den Nachweisen bei luftdichtem Abschluss zu berücksichtigen.

### 9.2.3 Plattenförmige Bauteile

- (1) Zur Erhöhung der Biegesteifigkeit der Platten sind bei vorwiegend einachsig gespannten Platten in Spannrichtung Profilierungen des Querschnittes durch einachsige Krümmungen und Faltungen und bei zweiachsig gespannten Platten in den beiden Spannrichtungen Rippen, die in ihren Steifigkeiten dem Stützweitenverhältnis angepasst sind, zur Reduzierung der Verformungen und zur Vermeidung von Stabilitätsversagen der gedrückten Bereiche, anzuordnen.
- (2) Bei der Querschnittsbildung sind gleichmäßige Dicken (keine Massenanhäufungen) anzustreben, um ein unterschiedliches Aushärten und Schwinden zu vermeiden. Ecken und Kanten in den Querschnitten der Platten sind durch ausreichende Krümmungsradien auszurunden, um ein Knicken der Fasereinlagen bei der Herstellung auszuschließen. Die interlaminaeren Zugbeanspruchungen infolge von Krümmungen sind nachzuweisen.
- (3) Zur Entformung der Bauteile und zum besseren Einbringen der Fasereinlagen sind die senkrechten Stege mit einer Seitenneigung je nach der Höhe des Querschnittes auszuführen.
- (4) An den Längsrändern serienmäßig gefertigter, profilierter Platten sind Verbindungen an der Oberseite der Profilierungen anzuordnen.
- (5) An der Kontur der Platten und an Öffnungen sind zur Sicherung freier Ränder Randprofile oder Aufkantungen vorzusehen. Aufkantungen sind stets ausreichend auszurunden.
- (6) Zur Einleitung konzentrierter Lasten an den Auflager- und Lastpunkten sind Aussteifungen anzuordnen.

### 9.2.4 Schalenförmige Bauteile

- (1) Die Formgebung der dünnwandigen Schalen sollte nach den Grundsätzen für zugbeanspruchte Membrane erfolgen, wobei eine gleichmäßige Dicke anzustreben ist.
- (2) Zur Sicherung der Formstabilität von Schalen mit großen Krümmungsradien sind für den Transport und die Montage eine ausreichende Anzahl von Aussteifungsrippen anzuordnen.
- (3) In Bereichen mit großer Druckbeanspruchung sind die Krümmungsradien der Schalen zu verkleinern, die Schalendicke zu vergrößern oder in den Hauptbeanspruchungsrichtungen Rippen vorzusehen.
- (4) Durch Vorspannen und Verspannen der Schalen kann eine günstige Schalenform und ein günstiges Tragverhalten erreicht werden.
- (5) Die Randkonturen der Schalen sind durch Kunststoff- oder Stahlprofile (Rohre / Hohlkästen) zu versteifen, wobei eine kraftschlüssige Verbindung mit der Schalenfläche durch Überlaminierung herzustellen ist.
- (6) An den Verbindungsstellen zu benachbarten Bauteilen und zu den Unterstützungsstrukturen ist auf eine hohe Maßgenauigkeit zu achten, um Zwängungsspannungen bei der Herstellung der Verbindung, z. B. durch Anziehen von Schrauben, zu verhindern.

### 9.2.5 Behälter

- (1) Die Formgebung der Behälter erfolgt in der Regel durch Zusammenfügen verschiedener Formen von Rotationsschalen, wie Zylinder, Kegel, Kugel, u. a.m.
- (2) Die Verbindung der Lamine untereinander und mit den anderen Bauteilen ist mit symmetrischer Stoßanordnung auszuführen.

- (3) Beim Herstellen der Behälterwand aus vorgefertigten, ebenen Laminaten sind die Krümmungsradien beim Einrollen der ebenen Laminate für den Transport, wegen der zu erwartenden Schädigungen durch Rissbildung, zu begrenzen.
- (4) Die Dicke der Behälterwand kann bei stehenden Behältern entsprechend der Beanspruchung abgestuft werden.
- (5) An Rohreinführungen sind die Ränder entsprechend den auftretenden höheren Beanspruchungen ausreichend zu verstärken.
- (6) Bei Wasserbehältern, welche im Freien stehen, sind zur Vermeidung einer Algenbildung die Laminate dunkel einzufärben oder zu streichen.

## 9.2.6 Sandwichkonstruktionen

### Allgemeines

(1) Sandwichbauteile bestehen aus einer leichten Kernschicht mit hohem Wärmedämmvermögen und dünnen beidseitigen Deckschichten mit hohem Tragvermögen. Die Kernschicht besteht vorwiegend aus geschäumten Kunststoffen, die Deckschichten bestehen aus faserverstärkten Kunststoffen, Stahl, Aluminium oder auch anderen Werkstoffen.

Zur Einleitung von Stützkräften und zur Randverstärkung können örtliche Verstärkungen in Form von Profilen aus Stahl, Aluminium, Holz oder durch Randprofilierung der Deckschichten angeordnet werden.

Die Herstellung kann erfolgen durch:

Erstellen des Sandwiches aus Kern und Deckschichten in einem Arbeitsgang

(z. B. durch Vakuuminfusion, RTM- oder Prepreg-Verfahren)

Ausschäumen des Kerns zwischen den Deckschichten im Stand- oder Durchlaufverfahren

(2) Die Kernschicht hat im Regelfall eine gleichmäßige Dicke. Im Falle der statischen Tragfunktion muss der Schaumstoff eine Mindestdichte von  $40 \text{ kg/m}^3$  aufweisen. Sie überträgt vorwiegend die Querkräfte zu den Auflagern und gegebenenfalls zu den Randprofilen. Die Stöße zwischen den Kernteilen, den Rand- und Auflagerprofilen sind kraftschlüssig herzustellen.

(3) Um das statische Zusammenwirken zwischen Kern- und Deckschichten zu gewährleisten sind die Verbundflächen technologisch vorzubereiten, z. B. durch Entfetten, Aufbringen von Einbrennlacken etc.

Die Verbindung der Deckschichten mit den Auflager- und Randprofilen ist kraftschlüssig zu konstruieren.

Die Mindestdicke der Deckschichten aus Kunststoffen soll, ohne Ansatz von Schutzschichten, 1,0 mm betragen.

Die Mindestlagenüberlappung soll 100 mm betragen (Stöße versetzen).

(4) Die Verbindungen zwischen den Sandwichbauteilen an den Längs- und Querrändern hat so zu erfolgen, dass durch auftretende Einwirkungen keine undichten Fugen entstehen.

Die leichten Sandwichbauteile sind ausreichend sicher gegen abhebende Wirkungen, wie z. B. Windsog, mit der Unterkonstruktion zu verankern.

(5) Nach der Herstellung der Bauteile ist eine ausreichende Aushärtungszeit vorzusehen. Dazu sind die Bauteile so zu lagern, dass Vorverformungen auszuschließen sind.

(6) Sandwichbauteile können statische und bauphysikalische Anforderungen erfüllen, wie z. B. erhöhte Wärme- oder Schalldämmung.

### 9.2.7 Absturzsichernde Bauteile

(1) Absturzsichernde Bauteile aus Kunststoffen können in Anlehnung an die Regeln im konstruktiven Glasbau ausgeführt werden.

### 9.2.8 Brücken

(1) Bei Brücken mit Bauteilen aus glasfaserverstärkten Kunststoff (GFK) oder kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) sollte darauf geachtet werden, alle Detailpunkte und Verbindungsmittel korrosionsfest auszuführen.

(2) Fahrbahntafeln aus pultrudiertem GFK können mit Stahlträger durch Kopfbolzendübel oder eine Klebefuge verbunden werden. Zur Vorbereitung der Verklebung ist eine geeignete Oberflächenvorbehandlung notwendig. Es ist eine trockene, ausreichend warme und staubfreie Umgebung sicherzustellen.

(3) Bei Straßenbrücken sollten die Einwirkungen aus konzentrierten Radlasten durch Versuche nachgewiesen werden. Die lastabtragende Funktion eines Fahrbahnbelags kann angesetzt werden, dabei sollte die Zugfestigkeit des Belags jedoch nicht in Rechnung gestellt werden.

(4) Für die Herstellung einer rauen Oberfläche wird ein Reaktionsharz - Dünnebelag nach ZTV-ING, Abschnitt 7, Teil 5 empfohlen.

## 9.3 Verbindungen und Auflagerungen

(1) Verbindungen zwischen den einzelnen Bauteilen können im Werk und auf der Baustelle hergestellt werden.

Bei Duroplasten durch

- Kleben
- Laminieren
- Schrauben (mit und ohne Vorspannung)

Bei Thermoplasten durch

- Kleben
- Schweißen
- Schrauben (nur ohne Vorspannung)

Bei der Ausführung auf der Baustelle sind geeignete Maßnahmen zum Schutz gegen Regen und niedrige Temperaturen vorzusehen.

(2) Die der aggressiven Medienbelastung ausgesetzten Oberflächen von Kunststoffbauten sollen möglichst klein und wenig gegliedert sein. Verschweißte Konstruktionen sind wegen der glatten Flächen mechanisch verbundenen Konstruktionen vorzuziehen. Unterbrochene Fugennähte sind zu vermeiden.

(3) Im Auflagerbereich können einzelnen Bauteile durch Verstärkung der Bauteildicken oder Anordnung von Aussteifungen, wie z. B. Querschotte versteift werden. Gegebenenfalls sind Einbauteile aus Stahl oder anderen Materialien vorzusehen, deren Eignung nachzuweisen ist.

(4) Die Auflagerkonstruktion muss in der Lage sein, konzentrierte Druck- und Sogkräfte aufzunehmen und größere Verformungen zuzulassen.

- (5) Bei allen stiftförmigen Verbindungsmitteln wie Schrauben, Bolzen sollen die Achsabstände  $5 d_s$  und die Randabstände  $2,5 d_s$ , jedoch mindestens 30 mm nicht unterschreiten.
- (6) Bei Passverbindungen darf das Lochspiel höchstens 0,5 mm betragen.
- (7) Im Lochbereich darf kein Gewinde vorhanden sein. In der Regel sind bei geschraubten Verbindungen Unterlegscheiben zu verwenden.

## 9.4 Herstellung und Konstruktion

### 9.4.1 Faserverbundkunststoffe

- (1) Für GFK-Lamine gelten die einschlägigen Regelungen der DIN 18820 und DIN EN 13121 bzw. einschlägiger Regeln nach Produktnormen, wie z. B. der DIN EN 13706 oder der EAD 260001-00-0303.
- (2) Alle tragenden GFK-Lamine beginnen und enden im Schichtenaufbau mit einer Wirrfaserschicht von mindestens  $450 \text{ g/m}^2$  flächenbezogener Masse (Symmetrie). Dies gilt nicht für pultrudierte Profile.
- (3) Bei Bauteildicken  $t > 15 \text{ mm}$  sind gezielte Maßnahmen wegen exothermer Reaktionen erforderlich.
- (4) Fasern dürfen nicht frei liegen. Schnittkanten und Bohrlöcher sind mit Gelcoat oder Reinhraz (auf Reaktionsharzbasis) zu versiegeln.
- (5) Die im Verbund liegenden Matten- und Rovinglagen sind ohne Unterbrechung um Krümmungen mit planmäßigem Kraftfluss herumzuführen und ausreichend auszurunden. Die interlaminaire Zugfestigkeit ist nachzuweisen, z. B. analog zu DIN 18820-2, Abschnitt 2.4.4. Abstufungen der Materialdicke sollen möglichst stetig verlaufen. Überlappungen müssen jeweils ausreichend lang sein, die Laminatstöße sind ausreichend abzustufen. Die Ränder von Aussparungen sind durch Randsteifen zu verstärken, die Ecken sind auszurunden.
- (6) Alle Fasern müssen gleichmäßig vom Kunststoff umhüllt sein (Verbund möglichst luftporenfrei).
- (7) In Bereichen mit starker Krümmung sind unverstärkte Harzdicken von über 1 mm unzulässig. Hier ist besonders sorgfältig durch Ausrollen bzw. Eindrücken eine gute Haftung der Laminatschichten ohne verbleibende Lufträume herzustellen.
- (8) Die Lamine sind regelmäßig auf ihren ordnungsgemäßen Zustand hin zu untersuchen. Oberflächenrisse und Delaminierungen sind fachgerecht auszubessern.

### 9.4.2 Unverstärkte Kunststoffe

- (1) Die im Vergleich zu anderen Baustoffen großen Temperaturendeckungskoeffizienten sind bei Berechnung und Konstruktion zu berücksichtigen.
- (2) Flächen und Spalten, auf bzw. in denen sich Wasser oder aggressive Medien wie z. B. Staub, Salze, angreifende Lösungen, usw. ansammeln können, müssen konstruktiv vermieden werden.
- (3) Begehbarere Flächen sind zu profilieren oder in einer anderen geeigneten Weise zu gestalten, um Rutschgefahr bei Nässe zu vermeiden.



# 10 Ausführung und Überwachung

## 10.1 Rohprodukte

### 10.1.1 Allgemeines

(1) In über Jahrzehnte entwickelten Verfahren zur Gewährleistung von Produktqualität umfassen folgende festgeschriebene Merkmale und Qualitätsrichtlinien [52] Abschnitt 6:

- Eigenüberwachung/WPK,
- Fremdüberwachung/Inspektion,
- Erst- und Zulassungsprüfung,
- Überwachungsprüfung,
- Zertifizierung.

Voraussetzung zur Zertifizierung ist die Feststellung der Übereinstimmung definierter Merkmale eines Bauproduktes. Für den gesamten Überwachungs- und Zertifizierungsprozess ist ein Drei-ecks-Vertragsverhältnis zwischen Zertifizierer, neutraler Prüfstelle und Hersteller. Dieser Prozess garantiert:

- Eigenschaftsprofile und Prüfvorschriften, die in nationalen Normen festgeschrieben sind,
- Regelungen für die werkseigene Produktionskontrolle,
- die regelmäßige Fremdüberwachung durch anerkannte, neutrale Prüf- und Überwachungsstellen,
- eindeutige Produktkennzeichnung bezüglich Werkstoff und Hersteller (Werkstoffidentifikation, Rückverfolgbarkeit),
- Regelungen bezüglich Verleihung, Nutzung, Entzug und Schutz des Gütezeichens (Wiederholter negativer Befund führt zum Entzug des Gütezeichens).

Dieses seit Jahrzehnten bewährte Qualitätssicherungsverfahren entspricht den Forderungen der ISO 9000-Normenfamilie und der DIN 18200 Übereinstimmungsnachweis für Bauprodukte - Werkseigene Produktionskontrolle, Fremdüberwachung und Zertifizierung und verweist auf Bestimmungen, die auch für Faserverbundkunststoffe verbindlich sind.

(2) Die Eigenüberwachung ist vom Hersteller bzw. in dessen Auftrag durchzuführen. Die Fremdüberwachung oder Inspektion muss im Auftrag des Herstellers / Unternehmers oder Importeurs durch eine hierfür anerkannte Prüf-, Überwachungs-/Inspektion- oder Zertifizierungsstelle vorgenommen werden.

(3) Die serienmäßige Herstellung der Stoffe für Bauprodukte bzw. Bauarten hat in Betrieben (Herstellerwerken) zu erfolgen. Ausgenommen ist die Erstellung von Stoffen (z. B. Überlaminieren oder Stoffverbindungen) im Verlauf von Montagearbeiten oder bei Einzelfertigungen vor Ort.

(4) Herstellerwerke und Montagefirmen müssen organisatorisch, personell und technisch so ausgestattet sein, dass eine weitestgehend gleich bleibende, unbedingt aber den jeweiligen Anforderungen des Einzelfalles entsprechende Qualität garantiert werden kann.

(5) Bei der Eigen- sowie der Fremdüberwachung ist allgemein die BauPrüfVO, für Lamine / Formstoffe aus GF-UP und GF-PHA – sinngemäß aber auch für EP-, VE- und weitere GFK-Materialien – zugrunde zu legen. Bauaufsichtlich eingeführte Bemessungs- und Anwen-

dungsnormen oder europäische technische Bewertungen (ETA) bei europäisch geregelten Bauprodukten sowie allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (abZ) / allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnisse (abP) bei national geregelten Bauprodukten oder vorhabenbezogene Bauartgenehmigungen – Zustimmung im Einzelfall (ZiE) bei unregulierten Bauprodukten können detailliertere, davon abweichende oder darüber hinausgehende Vorschriften enthalten.

(6) Die Verpflichtung des Unternehmers / Herstellers / Importeurs zur ordnungsgemäßen Qualitätssicherung seiner geregelten, wie auch unregulierten Bauprodukte ist unabhängig davon, ob die damit hergestellten baulichen Anlagen genehmigungspflichtig oder -frei sind.

Der Hersteller ist für die Erbringung der Materialnachweise verantwortlich. Der Bauherr beziehungsweise der von ihm bestellte Entwurfsverfasser ist gemäß Bauordnung uneingeschränkt dafür verantwortlich, dass die Bauausführung dem öffentlichen Baurecht entspricht.

(7) Für die Hersteller von Bauprodukten aus unverstärkten und verstärkten Kunststoffen wird die Zertifizierung nach DIN EN ISO 9001:2015-11 „Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen“ als Grundvoraussetzung für das Inverkehrbringen von Produkten empfohlen.

(8) Die Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstellen sollten eine vom DIBt benannte und anerkannte Stelle oder nach DIN EN ISO/IEC 17020 und DIN EN ISO/IEC 17065 akkreditiert sein. Für die Labore wird die Akkreditierung nach DIN EN ISO/IEC 17025 empfohlen.

(9) Für die zum Einsatz kommenden Reaktionsharze (z. B. UP, VE) wird empfohlen, Systeme mit einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) zu verwenden.

### 10.1.2 Eigenüberwachung

(1) Während der Herstellung sind an jeder Produktionsstätte kontinuierliche Aufzeichnungen über alle für die Identifizierung sowie für die Güte und Gleichmäßigkeit (Qualität) der Stoffe (Bauprodukte) wichtigen Fakten zu führen, z. B.

- Bezeichnung, Typ- und Seriennummer
- Art, Aufbau, Zusammensetzung, Rezeptur
- Herstellungsort und -datum
- Produktionsanlage, zuständiger Mitarbeiter
- Eventuelle Probenentnahmen

(2) Während beziehungsweise nach der Herstellung ist die Einhaltung charakteristischer Eigenschaftswerte (zwecks Übereinstimmung mit den jeweiligen Anforderungen) durch zeitnahe Kontrollprüfungen an bzw. aus Produktionsteilen nachzuweisen und zu dokumentieren. Der Nachweis kann auch an repräsentativen, unter gleichen Bedingungen gefertigten Proben erbracht werden.

Beispielsweise sind dies für GFK-Lamine nach DIN 18820-4, der Glasverstärkungsaufbau nach Art, Lage und Menge sowie der Verformungsmodul, der den Biegemodul (zur Steifigkeitskontrolle) und das Kriechverhalten (zur Aushärtungskontrolle) enthält.

Diese zeitnah ermittelten Kontrollwerte sind laufend zwischen Qualitäts- und Produktionsverantwortlichen abzustimmen um bei eingetretenen oder absehbaren Abweichungen von den Vorgaben umgehend die erforderlichen Produktionskorrekturen zu veranlassen sowie die fehlerhaften Produkte zu sperren.

(3) Art, Umfang und Häufigkeit der Eigenüberwachung (Zeitabstände, Anzahl der zu kontrollierenden Bauprodukte und daraus zu entnehmenden Prüfkörper) müssen den jeweiligen Vor-

schriften (Normen, Zulassungen, Prüfzeugnissen, ggf. auch zusätzlichen vertraglichen Vereinbarungen) entsprechen.

Beispielsweise sollen bei GFK-Laminaten nach DIN 18820-4 die Glasmenge und der Verformungsmodul an jedem Bauteil, jedoch mindestens einmal arbeitstäglich überprüft werden. Ergänzende DSC-Messungen werden empfohlen.

Die Gesamtübersicht der anzusetzenden Prüfmethoden ist in der DIN EN 13121-3, Anhang D enthalten.

(4) Beim Wechsel von Rohstoffchargen (z. B. Harz- und Glaschargen bei GFK) und Einfärbungen sind die Prüfungen je Rohstoffvariante durchzuführen.

(5) Die Häufigkeit der Eigenüberwachungsprüfung ist bei einer automatisierten Produktion entsprechend der Tabelle 10-1 und Tabelle 10-2 durchzuführen. Die Überwachung der Füller je Charge oder Abfüllung hat sinngemäß zu erfolgen. Bei manueller oder teilautomatisierter Fertigung ist die Prüfhäufigkeit zu erhöhen.

(6) Bei einer sehr geringen Produktion muss mindestens 1 x jährlich geprüft werden, erforderlichenfalls jede Produktion.

(7) Das Protokoll der werksseitigen Produktionskontrolle muss außer den Prüfergebnissen folgende Angaben enthalten:

- Erzeuger
- Name / Typ des Stoffes
- Form und Größe der Proben nebst der Kennung
- Datum und Chargennummer der Herstellung
- Ort und Datum der Entnahme, evtl. Name des Bauvorhabens
- Unterschrift des / der Verantwortlichen

(8) Die Aufzeichnungen sind statistisch auszuwerten und über 5 Jahre im Herstellerwerk aufzubewahren sowie auf Verlangen der Bauaufsicht zur Einsicht freizugeben.

**Tabelle 10-1:** Art und Umfang der Probenentnahme von Ausgangsstoffen für Halbzeuge sowie für Verbindungsmittel

Prüfung	Mindesthäufigkeit der Eigenüberwachungsprüfungen	
	Prod. je Woche	Prod. je Charge
Dichte bzw. Faservolumenanteil	1 * je Produkt und Woche	≤ 10 t
Kornzusammensetzung (Granulat)	1 * je Produkt und Woche	≤ 50 t

**Tabelle 10-2:** Prüfung der erhärteten Produkte (Halbzeug)

Prüfung	Anzahl der Prüfungen je Charge	Toleranz
Biegezug- und Druckfestigkeit	jede	0 % <sup>1</sup>
Wärmedehnkoeffizient	jede 10.	± 10 % <sup>2</sup>
Rohdichte bzw. Faservolumenanteil	jede	± 5 % <sup>2</sup>
Verformungsmodul	jede	± 10 % <sup>2</sup>

<sup>1</sup> bezogen auf den 95 %-Fraktilwert der Festigkeit

<sup>2</sup> bezogen auf Mittelwert

### 10.1.3 Fremdüberwachung

(1) Es ist zwischen dem Hersteller und der die Fremdüberwachung durchführenden Prüfstelle ein Überwachungsvertrag abzuschließen, in welchem der Überwachungsgegenstand, die Grundlagen und der Prüfumfang sowie erforderlichenfalls die Produkte einzeln aufgeführt sind.

(2) Der Fremdüberwacher hat die personelle und technische Ausstattung des Herstellerbetriebes zu überprüfen.

Dies betrifft im Besonderen:

- Lagerung der Stoffe
- Freigabe der Stoffe für die Produktion
- Verfallsdaten der Stoffe
- Zustand der Fertigungsstätten Maschinen und Geräte
- Eignung des Produktions- und Prüfpersonals
- Maßnahmen zur Rückverfolgbarkeit der Qualitätssicherung

(3) Die regelmäßigen Kontrollprüfungen betreffen im Besonderen:

- Wand- und Schichtdicken
- Materialaufbau
- Mechanische Kennwerte

(4) Die Regelprüfung ist jährlich mindestens 2 x durchzuführen, kann aber bei einer geringeren oder nur saisonalen Produktion einzelner Bauprodukte auf 1x jährlich reduziert werden.

### 10.1.4 Probenentnahme und Auswertung

(1) Die Proben sind im Herstellerwerk aus der Produktion nach statistischen Grundsätzen zu entnehmen.

(2) Die statistische Auswertung soll analog der DIN EN 13791 bzw. DIN EN 1990 erfolgen. Es sind mindestens 12 der in den Produkt- bzw. Prüfnormen geforderten Proben zu entnehmen. Liegt nur ein Ausreißer vor, so kann dieser unter Wegfall des Besten bei der Auswertung unberücksichtigt bleiben. Zwei und mehr Ausreißer sind prinzipiell zu werten.

(3) Die Proben sind unverwechselbar wie folgt zu kennzeichnen:

- Hersteller
- Ort und Datum
- Bauprodukt / Stoffbezeichnung
- Chargennummern der einzelnen Bestandteile
- Probennummer
- Herstellerdatum und Chargennummer
- Unterschrift des Verantwortlichen

(4) Der Fremdüberwacher / die Prüfstelle hat bei den Regelprüfungen stichprobenartig die Ergebnisse, statistischen Auswertungen und Dokumentationen der werkseigenen Produktionskontrolle zu sichten und zu beurteilen, ggf. bei Unregelmäßigkeiten Nachprüfungen zu veranlassen oder durchzuführen.

Bei über die Festlegungen / Grenzen der Überwachungsgrundlagen (Norm, Zulassung, Prüfzeugnis) hinausgehenden Abweichungen sind Bauprodukte oder Produktionslose zu verwerfen und Produktionsumstellungen zu veranlassen. Produkte dürfen erst wieder zur Verwendung freigegeben werden, wenn die Übereinstimmung nachgewiesen ist.

(5) Der Fremdüberwacher stellt einen Überwachungsbericht aus, der u. a. folgende Angaben enthalten muss:

- Nr. und Datum des Überwachungsvertrages
- Nr. und Datum des Berichtes
- Herstellerwerk
- Überwachungsgegenstand
- Überwachungsgrundlage
- anwesende Personen (Verantwortliche)
- Beurteilung der Fertigungsstätten, Geräte und Lagerungsbedingungen
- Beurteilung der Proben
- Beurteilung der Eigenüberwachung
- Beurteilung der Verwendbarkeit
- Unterschriften der Überwachungsstelle und des Prüfverantwortlichen

(6) Der Fremdüberwacher / die Prüfstelle hat entsprechend der festgelegten Überwachungshäufigkeit mit den Berichten die eingeschaltete Zertifizierungsstelle über den aktuellen Stand der Eigen- und Fremdüberwachung, insbesondere dabei aufgetretene Besonderheiten / Unregelmäßigkeiten/Mängel zu informieren und mit ihr ggf. erforderliche Maßnahmen abzustimmen.

Ggf. sind auch – bei bauaufsichtlicher Vorgabe oder entsprechender vertraglicher Regelung – zuständige Behörden oder dritte Vertragsparteien zu informieren.

## **10.2 Halbzeuge und Verbindungsmittel**

### **10.2.1 Allgemeines**

(1) Prüfung der Halbzeuge in der Eingangskontrolle und Beurteilung von Qualität und Gebrauchstauglichkeit im Hinblick auf die schweißtechnische Praxis siehe DVS 2201-1.

(2) Die Prüfung der Schweißbeignung einer gegebenen Kombination von Halbzeugen miteinander sowie von Schweißzusätzen siehe DVS 2201-2.

(3) Bei GFK-Materialien erfolgt die Eingangskontrolle der Einzelkomponenten in Übereinstimmung mit DIN 18820-1 bis -4 durch Werkszeugnisse der Zulieferer nach DIN EN 10204, Absatz 2.2, mit Angabe für Harz nach DIN 16945 und 16946 bzw. für Glaserzeugnisse nach DIN 61853, DIN 61854 und DIN EN 14020.

(4) Es ist ein Lagerbuch über Eingangs-, Lager- und Verarbeitungsdaten der Komponenten zu führen.

### **10.2.2 Prüfung der Halbzeuge ( Thermoplaste sowie Duroplaste und Elastomere )**

(1) Es gelten DVS 2201-1 und DVS 2201-2.

(2) Die Prüfungen gehen nicht auf die Qualität ein. Sie lassen auch keine Aussagen über die Güte der mit den Schweißpartnern hergestellten Schweißverbindungen zu.

(3) Eine Aussage über die Schweißbeignung im Hinblick auf die Güte der Schweißausführung ist in der DVS 2203 und in der DVS 2212 geregelt.

(4) Die Qualitätsbeurteilung ist den einschlägigen DIN-Normen bzw. den Lieferbedingungen der Hersteller zu entnehmen.

### **10.2.3 Prüfung der Klebstoffe**

(1) Duroplaste sowie Elastomere sind Klebprodukte.

(2) Die Verarbeitung sowie die Begriffe sind in der DVS 2204-3 geregelt.

### **10.2.4 Prüfung von Schweißzusätzen**

(1) Die Prüfung der Schweißzusätze ist in der DVS 2211 geregelt.

## 10.3 Bauausführung

### 10.3.1 Allgemeines

- (1) Die Eigenüberwachung ist von einer sachkundigen, vom Bauherrn beauftragten Person (in der Regel Bauleiter) durchzuführen.
- (2) Die Fremdüberwachung ist von einem anerkannten Prüfingenieur für Standsicherheit oder einem anerkannten Sachverständigen für Standsicherheit durchzuführen.
- (3) In Fällen von geringfügigen Mängeln kann die Nachbegehung von der objektverantwortlichen Stelle durchgeführt werden.

### 10.3.2 Personal und Ausstattung des ausführenden Betriebes

- (1) Die Betriebe müssen über Einrichtungen verfügen, mit denen die Arbeiten sachgerecht durchgeführt werden können. Die einschlägigen Unfallverhütungsvorschriften sowie die Merkblätter der Berufsgenossenschaften der Chemischen Industrie sind zu beachten.

#### 10.3.2.1 Personal

- (1) Das Herstellen, Verarbeiten, Prüfen und Überwachen von Kunststoffprodukten erfordert eine nach DVS 2220 ausgebildete Fachkraft, Bauleiter sowie Fachpersonal, welche sowohl in der Fertigung als auch auf der Baustelle auf diesem Gebiet mit Erfolg schon tätig waren und ausreichende Kenntnisse und Erfahrung besitzen.

#### 10.3.2.2 Führungskraft

- (1) Sie ist zuständig und verantwortlich für alle Belange im Betrieb und auf der Baustelle.

#### 10.3.2.3 Bauleiter

- (1) Der Bauleiter ist für ein fachlich qualifiziertes und sicheres Arbeiten auf der Baustelle zuständig.

#### 10.3.2.4 Baustellenfachpersonal

- (1) Auf der Baustelle muss eine nach DVS 2220 ausgebildete Fachkraft mit Kunststoffkenntnissen ständig anwesend sein.

#### 10.3.2.5 Geräteausstattung

- (1) Auf der Baustelle müssen folgende Arbeiten jederzeit fachgerecht ausgeführt werden können:

- Lagern der Baustoffe
- Messen
- Verarbeiten
- Prüfen

Dabei sind ausreichende Vorkehrungen gegen Witterungseinflüsse vorzusehen.

## 10.4 Überwachung

### 10.4.1 Überwachung auf der Baustelle

#### 10.4.1.1 Allgemeines

- (1) Für jede Baumaßnahme ist eine Überwachung gemäß BauPrüfVO von Baustoffen, Bauteilen und Bauarten durchzuführen.
- (2) Der Nachweis über die Eigen- und Fremdüberwachung der Rohprodukte sowie der Halbzeuge ist auf der Baustelle vorzuhalten.

#### 10.4.1.2 Eigenüberwachung

- (1) Es ist ein Bautagebuch mit folgendem Inhalt zu führen:
  - Beginn und Ende der Arbeiten
  - Witterungsverhältnisse
  - Bauwerkstemperatur
  - Bauteiltemperatur
  - verarbeitete Stoffe
  - Lieferwerk, Chargennummer
  - Arbeitsabläufe
  - Untergrund, Verankerung, Maßgenauigkeit
  - Geräteeinsatz
  - Personal
- (2) Die Aufzeichnungen sind ständig an der Baustelle vorzuhalten.
- (3) Sie sind bei der Herstellerfirma mindestens 5 Jahre aufzubewahren.

#### 10.4.1.3 Fremdüberwachung

- (1) Dem Fremdüberwacher ist Einsicht in alle Unterlagen zu gewähren.
- (2) Es ist besonders auf folgende Punkte zu achten:
  - ordnungsgemäße Nachweise der Eigen- bzw. Fremdüberwachung
  - Beschaffenheit und Lagerung der Baustoffe
  - Gerätepark
  - Vollständigkeit der Planunterlagen
  - Qualifikation des Personals

(3) Der Überwachungsbericht soll mindestens folgende Angaben enthalten:

- Bauherr
- Baustelle
- Unternehmen
- Bauleiter
- Material der Produkte
- Ergebnisse der Kontrollen insbesondere der Eigenüberwachung
- Datum, Unterschrift des Überwachers

(4) Als fachlich qualifiziert sind alle Personen anzusehen, die eine nach DVS 2220 ausgebildete Fachkraft sind.

(5) Die Überwachung der Herstellung und der Materialien erfolgt in der Regel stichprobenartig.

(6) Bei der Feststellung Gefahr drohender Schäden sind sofort alle Beteiligten, die Planenden, der Bauherr sowie die kommunale Bauaufsicht zu benachrichtigen.

(7) Bei Außenbauteilen ist eine Gefährdung von Fußgängern sowie des Straßenverkehrs auszuschließen.

#### 10.4.1.4 Wiederkehrende Prüfungen

(1) Art und Umfang der Prüfungen sowie der Anforderungen und Toleranzen im Rahmen der Eigen- und Fremdüberwachung sind wie folgt festgelegt:

- Werden an einem Objekt umfangreiche bauliche Veränderungen bzw. Instandsetzungen vorgenommen, so gelten dann die Regelungen wie bei Neubauten.
- Nach der ersten 5 - Jahresbegehung ist dann alle 3 Jahre eine Zwischenbegehung durchzuführen.
- Bei der Untersuchung bzw. Begutachtung sind die Sicherheit des Verkehrs sowie die Einhaltung der Unfallverhütungsvorschriften zu gewährleisten.
- Vor Ablauf der Verjährungsfrist für Gewährleistungsansprüche ist immer eine Begehung durchzuführen.
- Bauwerke, die nur mit Hilfe von Rüstungen oder Besichtigungsgeräten zugänglich sind, können im Rahmen einer Voruntersuchung auch mit dem Fernglas inspiziert werden. Dies liegt in der Eigenverantwortlichkeit des Abnehmenden.
- Im Rahmen der Untersuchung sollen vorrangig die bei einer vorangegangenen Begehung festgestellten Mängel und Schäden beobachtet und Veränderungen am Bauwerk festgehalten werden.

(2) Es sind folgende Schwerpunkte zu kontrollieren:

- Aufhängung bzw. Auflagerung
- Setzungen, Deformation
- Schiefstellungen bzw. Verdrehungen und Verzug
- Die Maßgenauigkeit im Hochbau ist anzuwenden, wobei die Forderungen an den Stahlbau anzusetzen sind (DIN 18202)
- Befestigungen von weiteren Bauteilen

- Lockerung der Verbindungsmittel
- Stöße
- Fugenausbildung
- Stirndichtungen als Profil sowie als aufgeklebte Manschette
- Dichtigkeit bei Bauteilen, die im Wasser stehen bzw. im Außenbereich
- Bei Innenentwässerung, ob eingedrungenes Wasser ungehindert abfließen kann
- Bei einem Materialwechsel z. B. von Kunststoff zu Holz sind die Randbedingungen zu überprüfen (Quellen und Schwinden)
- Farbbeständigkeit
- Konstruktionen zur Befahrung und Reinigung
- Absturzsicherung
- Leit-, Schutzschienen und Schutzsicherungen
- brandschutztechnische Belange
- Beschädigungen
- Reinigung bzw. Verschmutzung

## **10.4.2 Zustandsklassifizierung**

### *10.4.2.1 Beweissicherung*

- (1) Schäden erfordern eine Zwischenkontrolle.
- (2) Dabei sind alle relevanten Randbedingungen wie z. B. Standsicherheit, Material, Brandschutz, Arbeitssicherheit sowie versicherungstechnische Belange zu berücksichtigen.
- (3) Es sind folgende Angaben festzuhalten:
  - Datum der Schadens- und Zustandsbewertung
  - Angaben zum Ort und der Lage des Objektes
  - Art der Konstruktion, statisches System
  - allgemeine Angaben zu den vorhandenen Schäden
  - Angaben zu früheren Schäden
  - detaillierte Angaben zu vorhandenen Sicherheitsmängeln, Schadensstufe, Anzahl, Größenordnung
  - skizzenhaftes Sichern, Fotos
  - Bewertung des baulichen Zustandes der Bauwerksteile / des Gesamtbauwerkes
  - Angaben zu Sofortmaßnahmen
  - Verkehrssicherung

### 10.4.2.2 Schadensstufen

- (1) Es ist eine Einstufung in Schadensstufen vorzunehmen.
- Schadensstufe 0 Merkschaden ( sonst ohne Bedeutung )
  - Schadensstufe 1 geringfügige Schäden
  - Schadensstufe 2 Schäden und Mängel mittleren Umfangs
  - Schadensstufe 3 Schäden und Mängel großen Umfangs
  - Schadensstufe 4 völlige Verrottung, Zerstörung

### 10.4.2.3 Zustandskategorien

- (1) Es gelten folgende Zustandskategorien:

#### **Zustandskategorie 1**

Am Bauwerksteil, welche die Sicherheit nicht beeinflussen. Maßnahmen des vorbeugenden Unterhalts sind bei langfristig (länger als 10 Jahre) zu erhaltenden Bauwerksteilen auf ihre Wirtschaftlichkeit zu überprüfen.

#### **Zustandskategorie 2**

Punktuelle Schäden am Bauwerksteil, welche die Sicherheit nicht beeinflussen. Maßnahmen des vorbeugenden Unterhalts sind bei langfristig (länger als 5 Jahre) zu erhaltenden Bauwerksteilen auf ihre Wirtschaftlichkeit zu überprüfen.

#### **Zustandskategorie 3**

Umfangreiche Schäden am Bauwerksteil, welche die Sicherheit nicht beeinflussen. Eine Instandsetzung ist noch möglich, ihre Wirtschaftlichkeit ist zu prüfen.

#### **Zustandskategorie 4**

Gravierende Schäden am Bauwerksteil, welche die Sicherheit noch nicht beeinflussen. Eine wirtschaftliche Instandsetzung ist nicht mehr möglich.



# 11 Normen und Richtlinien

## 11.1 Grundnormen

DIN 440	Scheiben mit Vierkantloch, vorwiegend für Holzkonstruktionen (03/01)
DIN 18200	Übereinstimmungsnachweis für Bauprodukte (09/18)
DIN 18202	Maßtoleranzen im Hochbau (12/18)
DIN 18820	Lamine aus textilverstärkten ungesättigten Polyester- und Phenacrylatharzen für tragende Bauteile (Achtung: Offiziell aus dem Verkehr gezogen) Teil 1: Aufbau und Eigenschaften (03/91) Teil 2: Physikalische Kennwerte der Regellamine (03/91) Teil 3: Schutzmaßnahmen für das tragende Laminat (03/91) Teil 4: Prüfung und Güteüberwachung (03/91)
DIN EN 1990	Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung (10/12)
DIN EN 1991	Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke; Wichten, Eigenlasten und Nutzlasten im Hochbau (10/12) Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen; Brandeinwirkungen auf Tragwerke (10/12) Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen; Schneelasten (10/12) Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen; Windlasten (10/12) Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen; Temperatureinwirkungen (10/12) Teil 1-6: Allgemeine Einwirkungen; Einwirkungen während der Bauausführung (10/12) Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen; Außergewöhnliche Einwirkungen (10/12) Teil 2: Allgemeine Einwirkungen; Verkehrslasten auf Brücken (08/12) Teil 3: Allgemeine Einwirkungen; Einwirkungen infolge von Kranen und Maschinen (10/12) Teil 4: Allgemeine Einwirkungen; Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter (10/12)
DIN EN 1993	Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten (10/12)

DIN EN 1995	Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten (10/12)
DIN EN 1998	Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen (10/12)
DIN EN 10204	Bescheinigungen über Materialprüfungen (01/05)
DIN EN 13706	Spezifikation für pultrudierte Profile Teil 1: Bezeichnungen (02/03) Teil 2: Prüfverfahren und allgemeine Anforderungen (02/03) Teil 3: Besondere Anforderungen (02/03)
DIN EN 13501	Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten (08/17)
DIN EN ISO 1043	Kunststoffe, Kennbuchstaben und Kurzzeichen Teil 1: Basis-Polymere und ihre Eigenschaften (09/16) Teil 2: Füllstoffe und Verstärkungsstoffe (03/12) Teil 3: Weichmacher (03/17) Teil 4: Flammschutzmittel (09/16)
DIN EN ISO 9001	Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen (11/15)
DIN EN ISO 17020	Konformitätsbewertung - Anforderungen an den Betrieb verschiedener Typen von Stellen, die Inspektionen durchführen (07/12)
DIN EN ISO 17025	Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (03/18)
DIN EN ISO 17065	Konformitätsbewertung - Anforderungen an Stellen, die Produkte, Prozesse und Dienstleistungen zertifizieren (01/13)
EAD 260001-00-0303	Structural sections made from Fiber Reinforced Polymers (FRP/glass fiber composites) (04/16)

## 11.2 Stoffnormen

DIN 16945	Reaktionsharze, Reaktionsmittel und Reaktionsharzmasse (03/89)
DIN 16946	Reaktionsharzformstoffe, Gießharzformstoffe (03/89)
DIN 61853	Textilglas, Textilglasmatten für die Kunststoffverstärkung (04/87)

---

DIN 61854	Textilglas, Textilglasgewebe für die Kunststoffverstärkung (04/87)
DIN EN 1778	Charakteristische Kennwerte für geschweißte Thermoplast-Konstruktionen - Bestimmung der zulässigen Spannungen und Moduli für die Berechnung von Thermoplast-Bauteilen (12/99)
DIN EN 13121	Oberirdische GFK-Tanks und -Behälter Teil 1: Ausgangsmaterialien - Spezifikations- und Annahmebedingungen (10/13 und Entwurf 05/19) Teil 2: Verbundwerkstoffe; Chemische Widerstandsfähigkeit (01/04) Teil 3: Auslegung und Herstellung (10/16)
DIN EN 14020	Verstärkungsfasern – Spezifikation für Textilglasrovings (03/03)
DIN EN ISO 1163	Kunststoffe – Polyvinylchlorid (PVC) – Formmasse (10/99)
DIN EN ISO 8257	Kunststoffe – Polymethylmethacrylat (PMMA) – Formmasse (06/06)
DIN EN ISO 12162	Thermoplastische Werkstoffe für Rohre und Formstücke bei Anwendung unter Druck - Klassifizierung und Werkstoffkennzeichnung (04/10)
DIN EN ISO 17855	Kunststoffe, Polyethylen (PE)-Formmassen Teil 1: Bezeichnungssystem und Basis für Spezifikation (02/15) Teil 2: Herstellung von Probekörpern und Bestimmung von Eigenschaften (06/16)
DIN EN ISO 19069	Kunststoffe – Polypropylen (PP) – Formmasse (06/15)
DIN ISO 15014	Kunststoffe – Extrudierte Tafeln aus Polyvinylidenfluorid (PVDF) - Anforderungen und Prüfverfahren (12/15)

### 11.3 Prüfnormen

ASTM D7078	Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by V-Notched Rail Shear Method (2019) siehe auch: DIN EN ISO 20337
------------	---

---

DIN 16889-1	Bestimmung der chemischen Resistenzfaktoren aus Thermoplasten (06/89)
DIN 53436	Erzeugung thermischer Zersetzungsprodukte von Werkstoffen für ihre analytisch-toxikologische Prüfung Teil 2: Verfahren zur thermischen Zersetzung (12/15)
DIN 53766	Prüfung von Apparaten, Behältern und Rohren aus glasfaserverstärkten Kunststoffen Teil 1: Bestimmung der Haftfestigkeit im Stirnzugversuch (03/16)
DIN EN 59	Glasfaserverstärkte Kunststoffe - Bestimmung der Eindruckhärte mit einem Barcol-Härteprüfgerät (06/16)
DIN EN 1167	Rohre, Formstücke und Bauteilkombinationen aus thermoplastischen Kunststoffen für den Transport von Flüssigkeiten – Bestimmung der Widerstandsfähigkeit gegen inneren Überdruck Teil 1: Allgemeines Prüfverfahren (02/08)
DIN EN 2564	Luft- und Raumfahrt - Kohlenstofffaser-Laminat – Bestimmung der Faser-, Harz- und Porenanteile (12/18)
DIN EN 2850	Luft- und Raumfahrt - Unidirektionale Laminat aus Kohlenstofffasern und Reaktionsharz - Druckversuch parallel zur Faserrichtung (01/18)
DIN EN 13791	Bewertung von Druckfestigkeiten (06/18)
DIN EN 13820	Wärmedämmstoffe für das Bauwesen Bestimmung des Gehalts an organischen Bestandteilen (12/03)
DIN EN ISO 75	Kunststoffe - Bestimmung der Wärmeformbeständigkeitstemperatur Teil 1: Allgemeines Prüfverfahren (08/13 und Entwurf 03/19) Teil 2: Kunststoffe und Hartgummi (08/13) Teil 3: Hochbeständige härtbare Schichtstoffe und langfaserverstärkte Kunststoffe (08/04)
DIN EN ISO 178	Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften (09/13 und Entwurf 06/17)

---

DIN EN ISO 527	Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften Teil 1: Allgemeine Grundsätze (06/12 und Entwurf 08/18) Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen (06/12) Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe; (07/97) Teil 5: Prüfbedingungen für unidirektional faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe (01/10)
DIN EN ISO 604	Kunststoffe – Bestimmung von Druckeigenschaften (12/03)
DIN EN ISO 899	Kunststoffe – Bestimmung des Kriechverhaltens Teil 1: Zeitstand-Zugversuch (03/18) Teil 2: Zeitstand-Biegeversuch bei Dreipunkt-Belastung (06/15)
DIN EN ISO 1172	Textilverstärkte Kunststoffe, Kalzinierungsverfahren (12/98)
DIN EN ISO 1183	Kunststoffe - Verfahren zur Bestimmung der Dichte von nicht verschäumten Kunststoffen Teil 1: Eintauchverfahren, Verfahren mit Flüssigkeitspyknometer und Titrationsverfahren (04/13 und Entwurf 04/18)
DIN EN ISO 6721	Kunststoffe - Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften Teil 1: Allgemeine Grundlagen (08/11 und Entwurf 03/18) Teil 2: Torsionspendel-Verfahren (09/08 und Entwurf 03/18) Teil 3: Biegeschwingung; Resonanzkurven-Verfahren (12/96)
DIN EN ISO 11357	Kunststoffe - Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) Teil 1: Allgemeine Grundlagen (02/17) Teil 2: Bestimmung der Glasübergangstemperatur und der Glasübergangsstufenhöhe (07/14 und Entwurf 03/19) Teil 3: Bestimmung der Schmelz- und Kristallisationstemperatur und der Schmelz- und Kristallisationsenthalpie (07/18) Teil 4: Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität (10/14) Teil 5: Bestimmung von charakteristischen Reaktionstemperaturen und -zeiten, Reaktionsenthalpie und Umsatz (07/14) Teil 6: Bestimmung der Oxidations-Induktionszeit (isothermische OIT) und Oxidations-Induktionstemperatur (07/18) Teil 7: Bestimmung der Kristallisationskinetik (12/15)

---

DIN EN ISO 14125	Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften (05/11)
DIN EN ISO 14126	Faserverstärkte Kunststoffe - Bestimmung der Druckeigenschaften in der Laminebene (12/00)
DIN EN ISO 14129	Bestimmung des Schermoduls und der Scherfestigkeit in der Lagenebene mit dem $\pm 45^\circ$ Zugversuch (02/98)
DIN EN ISO 14130	Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit nach dem Dreipunktverfahren mit kurzem Balken (02/98)
DIN EN ISO 20337	Faserverstärkte Kunststoffe - Schubversuch mittels Schubrahmen zur Ermittlung der Schubspannungs-/Schubverformungskurve und des Schubmoduls in der Lagenebene (01/2020)
DIN EN ISO 22088	Kunststoffe – Bestimmung der Beständigkeit gegen umgebungsbedingte Spannungsrissbildung (11/06)
ISO 1887	Textilglas; Bestimmung des Glühverlustes (09/14)
ISO 8013	Elastomere; Bestimmung des Kriechens bei Druck- oder Schubbeanspruchung; (07/19)

## 11.4 Normen für Halbzeuge

DIN 4266	Sickerrohre für Deponien Teil 1: Rohre aus PE und PP (11/11)
DIN 8075	Rohre aus Polyethylen (PE) - PE 63, PE 80, PE 100; Allgemeine Güteanforderungen, Prüfungen (08/18)
DIN 16961	Rohre und Formstücke aus thermoplastischen Kunststoffen mit profilierter Wandung und glatter Rohrrinnenfläche Teil 1: Maße (08/18) Teil 2: Technische Lieferbedingungen (08/18)
DIN EN 14364	Kunststoff-Rohrleitungssysteme für Abwasserleitungen und – kanäle mit und ohne Druck – Glasfaserverstärkte duroplasti- sche Kunststoffe (GFK) auf der Basis von ungesättigtem Poly- esterharz (UP) – Festlegungen für Rohre, Formstücke und Ver- bindungen (05/13)

## 11.5 Bemessungsnormen

DIN 24531	Roste als Stufen, Teil 3: Kunststoffgitterroste (08/07)
DIN 24537	Roste als Bodenbelag, Teil 3: Kunststoffgitterroste (08/07)
DIN EN 1295	Statische Berechnung von erdverlegten Rohrleitungen Teil 1: Allgemeine Anforderungen (10/17)
DIN EN 13121	Oberirdische GFK-Tanks und –Behälter Teil 3: Auslegung und Herstellung (10/16)
EUROCOMP	Design Code and Handbook: „Structural Design of Polymer Composites”, The European Structural Polymeric Group, E & FN Spon, 1996

## 11.6 Richtlinien/Merkblätter

- AD 2000-Merkblatt N 1                      Druckbehälter aus textilglasverstärkten duroplastischen Kunststoffen, Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter (08/18)
- Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 127      Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungskanälen und -leitungen (08/00)
- Merkblatt ATV-M 127, Teil 1              Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungsleitungen für Sickerwasser aus Deponien (03/96)
- BauPrüVO      Verordnung über bautechnische Prüfungen (11/19)
- IfBt -              Bau- und Prüfgrundsätze für den Gewässerschutz, Schriften des Instituts für Bautechnik, Berlin (01/85)
- DIBt -              Richtlinie für den Nachweis der Standsicherheit von Metall-Kunststoff-Verbundprofilen, Deutsches Institut für Bautechnik (08/86)
- DIBt -              Vorläufige Zulassungsgrundsätze für Rohre aus thermoplastischen Werkstoffen in Basisentwässerungssystemen von Deponien, Deutsches Institut für Bautechnik (12/95)
- DIBt -              Vorläufige Bemessungsgrundsätze für Bauteile in Deponien und Rohrleitungen aus PE-HD für Basisentwässerungssysteme, Deutsches Institut für Bautechnik (11/95)
- DIBt -              Musterberechnung für Kunststoffbehälter zur Lagerung wassergefährdender Flüssigkeiten, Deutsches Institut für Bautechnik, Reihe B, Heft 4, (03/86)
- DIBt -              Berechnungsempfehlungen für stehende Behälter aus glasfaserverstärkten Kunststoffen (40 B 1), Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin (02/16)
- DIBt -              Berechnungsempfehlungen für auf Sattelschalen gelagerte Behälter aus glasfaserverstärkten Kunststoffen (40 B 1), Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin (12/12)
- DIBt-              Richtlinie für die Kennwertbestimmung, Zulassungsprüfung, Bemessung und Güteüberwachung von zulassungspflichtigen Bauteilen aus glasfaserverstärktem ungesättigtem Polyesterharz, Deutsches Institut für Bautechnik (12/88)
- DIBt -              Medienliste 40 für Behälter, Auffangvorrichtungen und Rohre aus Kunststoff, DIBt, Berlin (11/19)

- 
- DVS-Richtlinie 2201      Prüfen von Halbzeug aus Thermoplasten  
Teil 1 :    Grundlagen, Hinweise (01/20)
- DVS-Richtlinie 2203      Prüfen von Schweißverbindungen an Tafeln und Rohren aus thermoplastischen Kunststoffen  
Teil 1 :    Prüfverfahren – Anforderungen (01/03)
- DVS-Richtlinie 2204      Kleben von thermoplastischen Kunststoffen  
Teil 1 :    Kleben von thermoplastischen Kunststoffen (01/11)  
Teil 3 :    Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) (03/16)
- DVS-Richtlinie 2205      Berechnung von Behältern und Apparaten aus Thermoplasten,  
Teil 1 :    Kennwerte (02/15 und Entwurf 01/20)  
Teil 2 :    Stehende runde, drucklose Behälter (12/15 und Entwurf 01/20)  
Teil 4 :    Flanschverbindungen (11/88 und Entwurf 01/20)  
Teil 5 :    Rechteckbehälter (07/87 und Entwurf 01/20)
- DVS-Richtlinie 2207      Schweißen von thermoplastischen Kunststoffen  
Teil 1 :    Heizelementschweißen von Rohren, Rohrleitungsteilen und Tafeln aus PE-HD (08/15)  
Teil 3 :    Warmgaszieh- und Warmgasfächelschweißen von Rohren, Rohrleitungsteilen und Tafeln (12/19)  
Teil 4 :    Extrusionsschweißen von Tafeln und Rohren (12/19)  
Teil 5 :    Schweißen von PE-Mantelrohren (02/17)
- DVS-Richtlinie 2211      Schweißen von thermoplastischen Kunststoffen - Schweißzusätze - Kennzeichnung, Anforderungen, Prüfungen (10/19)
- DVS-Richtlinie 2212      Prüfung von Kunststoffschweißern (12/15)
- DVS-Richtlinie 2220      Prüfung von Kunststofflaminierern und -klebern - Laminat- sowie Laminat- und Klebverbindungen aus GFK (UP-GF und EP-GF) (05/11)
- EBGEO -                    Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrung aus Geokunststoffen, Entwurf (04/19)
- VDI-Richtlinie 2014      Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund  
Blatt 1 :    Grundlagen (07/89)  
Blatt 2 :    Konzeption und Gestaltung (09/93)  
Blatt 3 :    Berechnung (09/06).

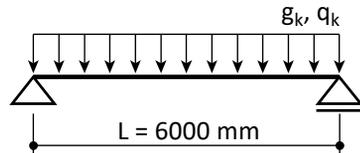
# 12 Beispiel 1 Profilerter Einfeldträger aus glasfaserverstärktem Laminat für eine Überdachung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manuel Krahwinkel, Dr.-Ing. Christian Gehmert

Vorlage: Prof. Dr.-Ing. Günther Ackermann

## 12.1 Statisches System, Bauwerksform

Statisches System



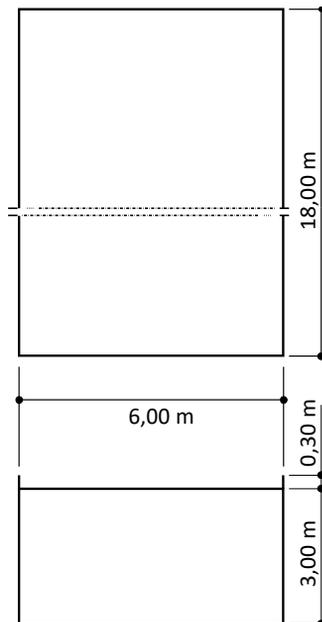
Anmerkung: Die Temperatur bewirkt in statisch bestimmten Systemen keine Schnittgrößen.

Bauwerksform

Grundriss

(alle Seiten geschlossen)

Schnitt



Die profilierten Träger werden im Handauflegeverfahren (Kontaktverfahren)<sup>2</sup> hergestellt, nebeneinander verlegt und an den Längsrändern durch Klemmleisten verbunden.

Bei der konstruktiven Durchbildung der Auflagerpunkte sind besonders die folgenden Punkte zu beachten:

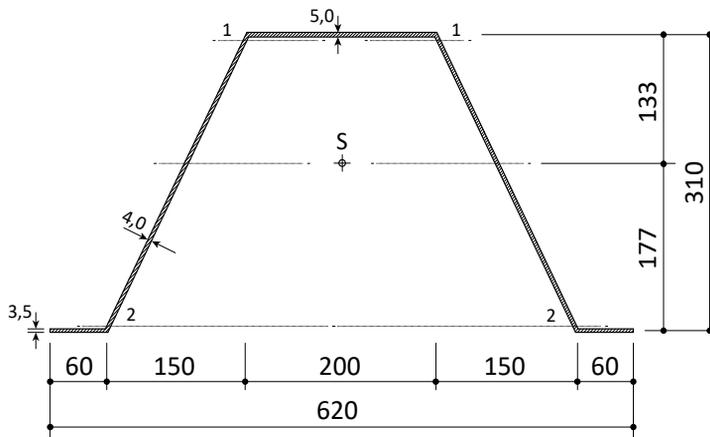
- die Verankerung der Träger gegen Windsogkräfte
- die Ausdehnung der Träger bei Temperaturänderung

Die Entwässerung der Dachfläche erfolgt durch eine geringe Längsneigung der Träger und eine Abführung an einem Auflager.

Das Betreten der Dachfläche zu Reparaturen ist nur über ausgelegte Bohlen gestattet.

## 12.2 Querschnitt, Werkstoff

### 12.2.1 Querschnittswerte



Querschnittsfläche	A:	41,7	cm <sup>2</sup>
Trägheitsmoment	I <sub>y</sub> :	5400	cm <sup>4</sup>
Widerstandsmomente	W <sub>unten</sub> :	303	cm <sup>3</sup>
	W <sub>oben</sub> :	405	cm <sup>3</sup>
Statisches Moment	S <sub>max</sub> :	211	cm <sup>3</sup> (in Höhe der Schwerachse)
	S <sub>1</sub> :	133	cm <sup>3</sup> (Unterkante Obergurt)
	S <sub>2</sub> :	74	cm <sup>3</sup> (Oberkante Untergurt)

Das Profil ist an den Rändern durch einen steifen Randwinkel seitlich gehalten. Eine Profilverformung in Querrichtung wird dadurch unterbunden.

<sup>2</sup> Die Verstärkungsmaterialien (Glasfasermatten und -gewebe) werden schichtweise in eine vorbereitete Form eingelegt und mit kalthärtendem Harz imprägniert, welches drucklos aushärtet.

### 12.2.2 Material

Wirrfaserlaminat M3, getempert

Matrix = ungesättigtes Polyesterharz (UP)

Nach DIN 18820-2– Tabelle 2 sind:

$m_G =$	540 g/m <sup>2</sup> /mm	Glasmasse je Flächeneinheit je mm Laminatdicke
$\psi =$	0,35	Glasmasseanteil ( $\delta$ )
$\rho =$	1,52 g/cm <sup>3</sup>	Dichte
$K_t =$	1,6	Faktor zur Abminderung der Kurzzeitbruchwerte infolge Langzeitbeanspruchung
$\varphi =$	0,7	Kriechfaktor
$E_0 =$	7300 N/mm <sup>2</sup>	E-Modul als 5 %-Quantile

Gemäß DIN 18820-2 Absatz 2.1.2 sind Wirrfaserlaminare in ihrer Ebene als isotrope Werkstoffe zu betrachten.

## 12.3 Einwirkungen (charakteristische Werte)

### 12.3.1 Eigenlast

$$\rho = 1,52 \text{ g/cm}^3 = 15,2 \cdot 10^{-3} \text{ N/cm}^3$$

$$g_k = 15,2 \cdot 10^{-3} \text{ N/cm}^3 \cdot 41,7 \text{ cm}^2 = 0,634 \text{ N/cm}$$

$$\mathbf{g_k = 63,4 \text{ N/m}}$$

### 12.3.2 Schneelast (DIN EN 1991-1-3)

Schneelastzone 2

Geländehöhe  $A$  über Meeresniveau -  $A = NN + 230 \text{ m}$

Dachneigung  $\alpha \leq 30^\circ$

$$s_i = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \quad (\text{DIN EN 1991-1-3 – Gl. 5.2})$$

$$\begin{aligned} \text{mit } s_k &= 0,25 + 1,91 \cdot ((A+140)/760)^2 && (\text{DIN EN 1991-1-3/NA – Gl. NA.2}) \\ &= 0,25 + 1,91 \cdot ((230+140)/760)^2 \\ &= 0,703 \text{ kN/m}^2 < \mathbf{0,85 \text{ kN/m}^2} \text{ (Sockelbetrag ist maßgebend)} \end{aligned}$$

$$\mu_1 = 0,8 \quad (\text{DIN EN 1991-1-3 – Tab. 5.2})$$

$$C_e = 1,0 \quad (\text{DIN EN 1991-1-3/NA – NDP zu 5.2(7)})$$

$$C_t = 1,0 \quad (\text{DIN EN 1991-1-3/NA – NDP zu 5.2(8)})$$

$$q_{k,l} = 0,8 \cdot 0,85 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,620 \text{ m} = 0,4216 \text{ kN/m}$$

$$\mathbf{q_{k,l} = 421,6 \text{ N/m}}$$

### 12.3.3 Windlast (DIN EN 1991-1-4)

Binnenland (Mischprofil der Geländekategorie II + III)

Windzone I

Bezugshöhe  $z_e = 3,3 \text{ m}$  ( $< 7,0 \text{ m}$ )

$$w_e = c_{pe} \cdot q_p(z_e) \quad (\text{DIN EN 1991-1-4 – Gl. 5.1})$$

$$\text{mit } q_p(z_e) = 1,5 \cdot q_b \quad (\text{DIN EN 1991-1-4/NA – Gl. NA.B.1})$$

$$q_b = 0,32 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{DIN EN 1991-1-4/NA – Bild NA.A.1})$$

$$q_p(z_e) = 0,480 \text{ kN/m}^2 = 480 \text{ N/m}^2$$

$$C_{pe,10} (\text{Zone G}) = -0,8 \quad (\text{Attika – } h_p/h = 0,10) \quad (\text{DIN EN 1991-1-4 – Tab. 7.2})$$

$$C_{pe,10} (\text{Zone I}) = +0,2 \quad (\text{DIN EN 1991-1-4 – Tab. 7.2})$$

Die erhöhten Werte von  $-1,2$  (Zone F) werden hier nicht betrachtet.

$$q_{k,2} = -0,8 \cdot 480 \text{ N/m}^2 \cdot 0,620 \text{ m} = -238 \text{ N/m}$$

$$\mathbf{q_{k,2} = -238 \text{ N/m}}$$

bzw.

$$q_{k,2} = +0,2 \cdot 480 \text{ N/m}^2 \cdot 0,620 \text{ m} = 59,5 \text{ N/m}$$

$$\mathbf{q_{k,2} = 59,5 \text{ N/m}}$$

### 12.3.4 Temperatur (DIN EN 1991-1-5)

entfällt

### 12.3.5 Einwirkungsdauer

Einstufung der Einwirkungen in KLED nach Tabelle 6-2

(TKB)

Eigenlast – ständig

Windlast – kurz

Schneelast – kurz

## 12.4 Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit

### 12.4.1 Festigkeit

#### 12.4.1.1 Nachweisformat

$$\sigma_d(t) \leq f_d = \frac{f_{k0,05}}{\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}} \quad (\text{TKB, Gl. 8.4})$$

#### 12.4.1.2 Einwirkungskombinationen und Bemessungswerte der Schnittgrößen

$$E_d = E \left\{ \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \oplus \gamma_P \cdot P_k \oplus \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \right\} \quad (\text{TKB, Gl. D.1})$$

#### Einwirkungskombination 1: Eigenlast

*KLED - Ständig*

*Fall B*

(TKB, Tabelle D-1)

*Ständige Einwirkungen, ungünstig*

$$\rightarrow \gamma_{G,\text{sup}} = 1,35$$

(TKB, Tabelle D-1)

$$e_{d,1} = \gamma_G \cdot g_k$$

$$e_{d,1} = 1,35 \cdot 63,4 \text{ N/m}$$

$$\underline{e_{d,1} = 85,6 \text{ N/m}}$$

$$x = 0 \quad \rightarrow \quad V_{d,1} = 85,6 \text{ N/m} \cdot 6,00 \text{ m} / 2 \quad = \quad \underline{256,8 \text{ N}}$$

$$x = L/2 \quad \rightarrow \quad \underline{M_{d,1}} = 85,6 \text{ N/m} \cdot (6,00 \text{ m})^2 / 8 \quad = \quad \underline{385,2 \text{ Nm}}$$

$$x = L/4 \quad \rightarrow \quad \underline{V_{d,1}} = 85,6 \text{ N/m} \cdot 6,00 \text{ m} / 4 \quad = \quad \underline{128,4 \text{ N}}$$

$$\rightarrow \quad \underline{M_{d,1}} = 3 \cdot 85,6 \text{ N/m} \cdot (6,00 \text{ m})^2 / 32 \quad = \quad \underline{288,9 \text{ Nm}}$$

#### Einwirkungskombination 2: Eigenlast + Schnee + Winddruck

*KLED - Kurz*

*Fall B*

(TKB, Tabelle D-1)

*Ständige Einwirkungen, ungünstig*

$$\rightarrow \gamma_{G,\text{sup}} = 1,35$$

(TKB, Tabelle D-1)

*Veränderliche Einwirkungen, ungünstig*

$$\rightarrow \gamma_{Q,\text{sup}} = 1,50$$

(TKB, Tabelle D-1)

*Kombinationsbeiwert Wind*

$$\rightarrow \psi_{0,2} = 0,6$$

(TKB, Tabelle D-2)

$$e_{d,2} = \gamma_G \cdot g_k + \gamma_{Q,1} \cdot q_{k,1} + \gamma_{Q,2} \cdot \Psi_{0,2} \cdot q_{k,2}$$

$$e_{d,2} = 1,35 \cdot 63,4 \text{ N/m} + 1,50 \cdot 421,6 \text{ N/m} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 59,5 \text{ N/m}$$

$$\underline{e_{d,2} = 771,5 \text{ N/m}}$$

$$\begin{aligned} x = 0 & \rightarrow V_{d,2} = 771,5 \text{ N/m} \cdot 6,00 \text{ m} / 2 = \underline{\underline{2314,6 \text{ N}}} \\ x = L/2 & \rightarrow M_{d,2} = 771,5 \text{ N/m} \cdot (6,00 \text{ m})^2 / 8 = \underline{\underline{3471,9 \text{ Nm}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x = L/4 & \rightarrow V_{d,2} = 771,5 \text{ N/m} \cdot 6,00 \text{ m} / 4 = \underline{\underline{1157,3 \text{ N}}} \\ & \rightarrow M_{d,2} = 3 \cdot 771,5 \text{ N/m} \cdot (6,00 \text{ m})^2 / 32 = \underline{\underline{2603,9 \text{ Nm}}} \end{aligned}$$

**Einwirkungskombination 3: Eigenlast + Windsog***KLED - Kurz**Fall A*

(TKB, Tabelle D-1)

Ständige Einwirkungen, günstig  $\rightarrow \gamma_{G,inf} = 0,90$  (TKB, Tabelle D-1)Veränderliche Einwirkungen, ungünstig  $\rightarrow \gamma_{Q,sup} = 1,50$  (TKB, Tabelle D-1)

$$e_{d,3} = \gamma_{G,inf} \cdot g_k + \gamma_{Q,2} \cdot q_{k,2}$$

$$e_{d,3} = 0,90 \cdot 63,4 \text{ N/m} - 1,50 \cdot 238 \text{ N/m}$$

$$\underline{\underline{e_{d,3} = -299,9 \text{ N/m}}}$$

$$x = 0 \rightarrow V_{d,3} = -299,9 \text{ N/m} \cdot 6,00 \text{ m} / 2 = \underline{\underline{-899,8 \text{ N}}}$$

$$x = L/2 \rightarrow M_{d,3} = -299,9 \text{ N/m} \cdot (6,00 \text{ m})^2 / 8 = \underline{\underline{-1349,7 \text{ Nm}}}$$

$$x = L/4 \rightarrow V_{d,3} = -299,9 \text{ N/m} \cdot 6,00 \text{ m} / 4 = \underline{\underline{-449,9 \text{ N}}}$$

$$\rightarrow M_{d,3} = 3 \cdot -299,9 \text{ N/m} \cdot (6,00 \text{ m})^2 / 32 = \underline{\underline{-1012,3 \text{ Nm}}}$$

**12.4.1.3 Bemessungswerte der Spannungen****Einwirkungskombination 1**

$$\begin{aligned} x = L/2 & \rightarrow \sigma_{d,1}^0 = -385,2 \text{ Nm} / 405 \text{ cm}^3 = \underline{\underline{-0,95 \text{ N/mm}^2}} \\ & \rightarrow \sigma_{d,1}^u = 385,2 \text{ Nm} / 303 \text{ cm}^3 = \underline{\underline{1,27 \text{ N/mm}^2}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x = 0 & \rightarrow \tau_{d,1}^x = 256,8 \text{ N} \cdot 211 \text{ cm}^3 / (5400 \text{ cm}^4 \cdot 0,4 \text{ cm} \cdot 2) = \underline{\underline{0,13 \text{ N/mm}^2}} \\ & \rightarrow \tau_{d,1}^1 = 256,8 \text{ N} \cdot 133 \text{ cm}^3 / (5400 \text{ cm}^4 \cdot 0,4 \text{ cm} \cdot 2) = \underline{\underline{0,08 \text{ N/mm}^2}} \\ & \rightarrow \tau_{d,1}^2 = 256,8 \text{ N} \cdot 74 \text{ cm}^3 / (5400 \text{ cm}^4 \cdot 0,35 \text{ cm} \cdot 2) = \underline{\underline{0,05 \text{ N/mm}^2}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x = L/4 & \rightarrow \sigma_{d,1}^0 = -288,9 \text{ Nm} / 405 \text{ cm}^3 = \underline{\underline{-0,71 \text{ N/mm}^2}} \\ & \rightarrow \sigma_{d,1}^u = 288,9 \text{ Nm} / 303 \text{ cm}^3 = \underline{\underline{0,95 \text{ N/mm}^2}} \\ & \rightarrow \tau_{d,1}^x = 128,4 \text{ N} \cdot 211 \text{ cm}^3 / (5400 \text{ cm}^4 \cdot 0,4 \text{ cm} \cdot 2) = \underline{\underline{0,06 \text{ N/mm}^2}} \\ & \rightarrow \tau_{d,1}^1 = 128,4 \text{ N} \cdot 133 \text{ cm}^3 / (5400 \text{ cm}^4 \cdot 0,4 \text{ cm} \cdot 2) = \underline{\underline{0,04 \text{ N/mm}^2}} \\ & \rightarrow \tau_{d,1}^2 = 128,4 \text{ N} \cdot 74 \text{ cm}^3 / (5400 \text{ cm}^4 \cdot 0,35 \text{ cm} \cdot 2) = \underline{\underline{0,03 \text{ N/mm}^2}} \end{aligned}$$

**Einwirkungskombination 2**

$$x = L/2 \quad \rightarrow \quad \sigma_{d,2}^0 = -3471,9 \text{ Nm} / 405 \text{ cm}^3 = -8,57 \text{ N/mm}^2$$

$$\quad \rightarrow \quad \sigma_{d,2}^u = 3471,9 \text{ Nm} / 303 \text{ cm}^3 = 11,46 \text{ N/mm}^2$$

$$x = 0 \quad \rightarrow \quad \tau_{d,2}^x = 2314,5 \text{ N} \cdot 211 \text{ cm}^3 / (5400 \text{ cm}^4 \cdot 0,4 \text{ cm} \cdot 2) = 1,13 \text{ N/mm}^2$$

$$\quad \rightarrow \quad \tau_{d,2}^1 = 2314,5 \text{ N} \cdot 133 \text{ cm}^3 / (5400 \text{ cm}^4 \cdot 0,4 \text{ cm} \cdot 2) = 0,71 \text{ N/mm}^2$$

$$\quad \rightarrow \quad \tau_{d,2}^2 = 2314,5 \text{ N} \cdot 74 \text{ cm}^3 / (5400 \text{ cm}^4 \cdot 0,35 \text{ cm} \cdot 2) = 0,45 \text{ N/mm}^2$$

$$x = L/4 \quad \rightarrow \quad \sigma_{d,2}^0 = -2603,9 \text{ Nm} / 405 \text{ cm}^3 = -6,43 \text{ N/mm}^2$$

$$\quad \rightarrow \quad \sigma_{d,2}^u = 2603,9 \text{ Nm} / 303 \text{ cm}^3 = 8,59 \text{ N/mm}^2$$

$$\quad \rightarrow \quad \tau_{d,2}^x = 1157,3 \text{ N} \cdot 211 \text{ cm}^3 / (5400 \text{ cm}^4 \cdot 0,4 \text{ cm} \cdot 2) = 0,57 \text{ N/mm}^2$$

$$\quad \rightarrow \quad \tau_{d,2}^1 = 1157,3 \text{ N} \cdot 133 \text{ cm}^3 / (5400 \text{ cm}^4 \cdot 0,4 \text{ cm} \cdot 2) = 0,36 \text{ N/mm}^2$$

$$\quad \rightarrow \quad \tau_{d,2}^2 = 1157,3 \text{ N} \cdot 74 \text{ cm}^3 / (5400 \text{ cm}^4 \cdot 0,35 \text{ cm} \cdot 2) = 0,23 \text{ N/mm}^2$$

**Einwirkungskombination 3**

$$x = L/2 \quad \rightarrow \quad \sigma_{d,3}^0 = 1349,7 \text{ Nm} / 405 \text{ cm}^3 = 3,33 \text{ N/mm}^2$$

$$\quad \rightarrow \quad \sigma_{d,3}^u = -1349,7 \text{ Nm} / 303 \text{ cm}^3 = -4,46 \text{ N/mm}^2$$

$$x = 0 \quad \rightarrow \quad \tau_{d,3}^x = -899,8 \text{ N} \cdot 211 \text{ cm}^3 / (5400 \text{ cm}^4 \cdot 0,4 \text{ cm} \cdot 2) = -0,44 \text{ N/mm}^2$$

$$\quad \rightarrow \quad \tau_{d,3}^1 = -899,8 \text{ N} \cdot 133 \text{ cm}^3 / (5400 \text{ cm}^4 \cdot 0,4 \text{ cm} \cdot 2) = -0,28 \text{ N/mm}^2$$

$$\quad \rightarrow \quad \tau_{d,3}^2 = -899,8 \text{ N} \cdot 74 \text{ cm}^3 / (5400 \text{ cm}^4 \cdot 0,35 \text{ cm} \cdot 2) = -0,18 \text{ N/mm}^2$$

$$x = L/4 \quad \rightarrow \quad \sigma_{d,3}^0 = 1012,3 \text{ Nm} / 405 \text{ cm}^3 = 2,50 \text{ N/mm}^2$$

$$\quad \rightarrow \quad \sigma_{d,3}^u = -1012,3 \text{ Nm} / 303 \text{ cm}^3 = -3,34 \text{ N/mm}^2$$

$$\quad \rightarrow \quad \tau_{d,3}^x = -449,9 \text{ N} \cdot 211 \text{ cm}^3 / (5400 \text{ cm}^4 \cdot 0,4 \text{ cm} \cdot 2) = -0,22 \text{ N/mm}^2$$

$$\quad \rightarrow \quad \tau_{d,3}^1 = -449,9 \text{ N} \cdot 133 \text{ cm}^3 / (5400 \text{ cm}^4 \cdot 0,4 \text{ cm} \cdot 2) = -0,14 \text{ N/mm}^2$$

$$\quad \rightarrow \quad \tau_{d,3}^2 = -449,9 \text{ N} \cdot 74 \text{ cm}^3 / (5400 \text{ cm}^4 \cdot 0,35 \text{ cm} \cdot 2) = -0,09 \text{ N/mm}^2$$

**12.4.1.4 Charakteristische Werte des Widerstandes**

Charakteristischer Wert der Kurzzeitbiegefestigkeit  $f_{k,0,05}$

Nach DIN 18820-2 Tabelle 2 folgt:

$$(\text{Bruchmoment} / \text{Breite}) / t^2 = 18 \text{ (Nm/m)/mm}^2 \quad (\cong 1/6 \text{ der Biegebruchspannung})$$

$$\hookrightarrow f_{k,0,05} = 6 \cdot (\text{Bruchmoment} / \text{Breite}) / t^2 = 6 \cdot 18 \text{ (Nm/m)/mm}^2$$

$$f_{k,0,05} = 108 \text{ N/mm}^2$$

Charakteristischer Wert der Kurzzeitzugfestigkeit  $f_{k,0,05}$

Nach DIN 18820-2 Tabelle 2 folgt:

$$(\text{Bruchkraft} / \text{Breite}) / t = 85 \text{ (N/mm)/mm} \quad (\triangleq \text{Bruchspannung})$$

$$\Downarrow \quad \mathbf{f_{k,0,05} = 85 \text{ N/mm}^2}$$

Charakteristischer Wert der Kurzzeitdruckfestigkeit  $f_{k,0,05}$

Nach DIN 18820-2 Absatz 2.4.1 ist die Bruchkraft je Breite unter Druckbeanspruchung mit der Bruchkraft je Breite unter Zugbeanspruchung gleichzusetzen:

$$\Downarrow \quad \mathbf{f_{k,0,05} = 85 \text{ N/mm}^2}$$

Charakteristischer Wert der Schubfestigkeit

Gemäß DIN 18820-2 Absatz 2.4.3 ist für alle Lamine die Schubfestigkeit in Laminebene und senkrecht dazu wie folgt einzuführen:

$$\Downarrow \quad \mathbf{f_{k,0,05} = 50 \text{ N/mm}^2}$$

Charakteristischer Wert der interlaminaren Scherfestigkeit

Gemäß TKB, 8.2.2 (3) ist für Lamine die interlaminare Scherfestigkeit wie folgt einzuführen:

$$\Downarrow \quad \mathbf{f_{k,0,05} = 8 \text{ N/mm}^2} \quad (\text{DIN 18820-2, Abschnitt (2.4.4)})$$

*Anmerkung: Wird hier nicht verwendet, da nur eine Laminebene vorhanden ist und nicht mehrere Schichten.*

#### 12.4.1.5 Teilsicherheitsbeiwerte, Einflussfaktoren

Teilsicherheitsbeiwert für das Material  $\gamma_M$

*Manuell gefertigte Faserverbundstoffe ( $\nu = 0,17$ )*

*Grundkombination - Festigkeit*

$$\gamma_M = 1,5 \quad (\text{TKB, Tabelle E-1})$$

Werkstoffspezifischer Einflussfaktor der Festigkeit

$$A_{\text{mod}}^f = A_1^f \cdot A_2^f \cdot A_3^f$$

Dauer der Einwirkung

$$A_{1,20J}^f = 1,6 \quad (\text{TKB, Abschnitt 8.2.1 bzw. Anhang B})$$

$$\Downarrow \text{ KLED - ständig : } A_1^f = 1,6^{(0,253 + 0,142 \cdot \lg(50 \cdot 365 \cdot 24))} = 1,64$$

$$\Downarrow \text{ KLED - kurz : } A_1^f = 1,6^{(0,253 + 0,142 \cdot \lg(7 \cdot 24))} = 1,31$$

Medieneinfluss

getempert, Flüssigkeiten mit „sehr geringem Einfluss“ (Wasser), Betriebstemperatur bis 30 °C, im Freien

$$A_2^f = 1,1 \quad (\text{TKB, Tabelle B-2})$$

Temperatureinfluss

Matrix = UP, 30 °C < 40 °C

$$A_3^f = 1,2 \quad (\text{TKB, Tabelle A-3b})$$

$$A_{\text{mod,KLED - ständig}}^f = 1,64 \cdot 1,1 \cdot 1,2 = \mathbf{2,165} \geq 1,75 \quad (\text{TKB, Absatz 5.5, Satz (3)})$$

$$A_{\text{mod,KLED - kurz}}^f = 1,31 \cdot 1,1 \cdot 1,2 = \mathbf{1,729}$$

### 12.4.1.6 Bemessungswerte des Widerstandes

KLED Ständig

#### Zug / Druck (Gurt oben und unten)

$$f_d = f_{k,0,05} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^f)$$

$$f_d = 85 / (1,5 \cdot 2,165)$$

$$\underline{f_d = 26,18 \text{ N/mm}^2}$$

#### Biegung (Steg)

$$f_d = f_{k,0,05} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^f)$$

$$f_d = 108 / (1,5 \cdot 2,165)$$

$$\underline{f_d = 33,26 \text{ N/mm}^2}$$

#### Schub (Steg)

$$f_d = f_{k,0,05} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^f)$$

$$f_d = 50 / (1,5 \cdot 2,165)$$

$$\underline{f_d = 15,40 \text{ N/mm}^2}$$

KLED kurz

#### Zug / Druck (Gurt oben und unten)

$$f_d = f_{k,0,05} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^f)$$

$$f_d = 85 / (1,5 \cdot 1,729)$$

$$\underline{f_d = 32,77 \text{ N/mm}^2}$$

#### Biegung (Steg)

$$f_d = f_{k,0,05} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^f)$$

$$f_d = 108 / (1,5 \cdot 1,729)$$

$$\underline{f_d = 41,64 \text{ N/mm}^2}$$

#### Schub (Steg)

$$f_d = f_{k,0,05} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^f)$$

$$f_d = 50 / (1,5 \cdot 1,729)$$

$$\underline{f_d = 19,28 \text{ N/mm}^2}$$

### 12.4.1.7 Nachweise

Grundmaterial

#### Einwirkungskombination 1 (KLED ständig)

$x = 0$ :

$$\text{Schubspannung: } \tau_d(t) = 0,13 \text{ N/mm}^2 \leq 15,40 \text{ N/mm}^2 \quad \checkmark \quad [0,008 \leq 1]$$

$x = L/2$ :

$$\text{Zugspannung: } \sigma_d(t) = 1,27 \text{ N/mm}^2 \leq 26,18 \text{ N/mm}^2 \quad \checkmark \quad [0,049 \leq 1]$$

$$\text{Druckspannung: } \sigma_d(t) = |-0,95 \text{ N/mm}^2| \leq 26,18 \text{ N/mm}^2 \quad \checkmark \quad [0,036 \leq 1]$$

#### Einwirkungskombination 2 (KLED kurz)

$x = 0$ :

$$\text{Schubspannung: } \tau_d(t) = 1,13 \text{ N/mm}^2 \leq 19,28 \text{ N/mm}^2 \quad \checkmark \quad [0,059 \leq 1]$$

$x = L/2$ :

$$\text{Zugspannung: } \sigma_d(t) = 11,46 \text{ N/mm}^2 \leq 32,77 \text{ N/mm}^2 \quad \checkmark \quad [0,350 \leq 1]$$

$$\text{Druckspannung: } \sigma_d(t) = |-8,57 \text{ N/mm}^2| \leq 32,77 \text{ N/mm}^2 \quad \checkmark \quad [0,262 \leq 1]$$

#### Einwirkungskombination 3 (KLED kurz)

$x = 0$ :

$$\text{Schubspannung: } \tau_d(t) = |-0,44| \text{ N/mm}^2 \leq 19,28 \text{ N/mm}^2 \quad \checkmark \quad [0,023 \leq 1]$$

$x = L/2$ :

$$\text{Zugspannung: } \sigma_d(t) = 3,33 \text{ N/mm}^2 \leq 32,77 \text{ N/mm}^2 \quad \checkmark \quad [0,102 \leq 1]$$

$$\text{Druckspannung: } \sigma_d(t) = |-4,45 \text{ N/mm}^2| \leq 32,77 \text{ N/mm}^2 \quad \checkmark \quad [0,136 \leq 1]$$

Überlagerung verschiedener Beanspruchungen

Im Rahmen des Beispiels wird zur Veranschaulichung eine Überlagerung der Beanspruchungen an der Stelle  $x = L/4$  durchgeführt.

$$\frac{E_{dN}}{R_{dN}} + \frac{E_{dM}}{R_{dM}} + \frac{E_{dV}}{R_{dV}} \leq 1$$

(TKB, Gl. 8.8)

Für die folgenden Nachweise wird aufgrund der Biegebeanspruchung des Steges der Wert der Kurzzeitbiegefestigkeit (vereinfachte Annahme für das verwendete Wirrfaserlaminat: Biegedruckfestigkeit = Biegezugfestigkeit) zugrunde gelegt.

### Einwirkungskombination 1 (KLED ständig)

$$x = L/4:$$

$$\text{oben} \quad \left\{ \frac{|-0,71| \text{ N/mm}^2}{33,26 \text{ N/mm}^2} + \frac{4,0 \text{ N/mm}^2}{15,40 \text{ N/mm}^2} \right\} \leq 1$$

$$0,024 \leq 1 \quad \checkmark$$

$$\text{unten} \quad \left\{ \frac{0,95 \text{ N/mm}^2}{33,26 \text{ N/mm}^2} + \frac{0,03 \text{ N/mm}^2}{15,40 \text{ N/mm}^2} \right\} \leq 1$$

$$0,030 \leq 1 \quad \checkmark$$

### Einwirkungskombination 2 (KLED kurz)

$$x = L/4:$$

$$\text{oben} \quad \left\{ \frac{|-6,43| \text{ N/mm}^2}{41,64 \text{ N/mm}^2} + \frac{0,36 \text{ N/mm}^2}{19,28 \text{ N/mm}^2} \right\} \leq 1$$

$$0,173 \leq 1 \quad \checkmark$$

$$\text{unten} \quad \left\{ \frac{8,59 \text{ N/mm}^2}{41,64 \text{ N/mm}^2} + \frac{0,23 \text{ N/mm}^2}{19,28 \text{ N/mm}^2} \right\} \leq 1$$

$$0,218 \leq 1 \quad \checkmark$$

### Einwirkungskombination 3 (KLED kurz)

$$x = L/4:$$

$$\text{oben} \quad \left\{ \frac{|-3,34| \text{ N/mm}^2}{41,64 \text{ N/mm}^2} + \frac{|-0,14| \text{ N/mm}^2}{19,28 \text{ N/mm}^2} \right\} \leq 1$$

$$0,087 \leq 1 \quad \checkmark$$

$$\text{unten} \quad \left\{ \frac{2,50 \text{ N/mm}^2}{41,64 \text{ N/mm}^2} + \frac{|-0,09| \text{ N/mm}^2}{19,28 \text{ N/mm}^2} \right\} \leq 1$$

$$0,065 \leq 1 \quad \checkmark$$

## 12.4.2 Stabilitätsversagen

### 12.4.2.1 Nachweisformat

$$\sigma_d(t) \leq \sigma_{cr,d}(t)$$

(TKB, Gl. 8.12)

### 12.4.2.2 Bemessungswerte der Spannungen

Siehe Kapitel 12.4.1.3

### 12.4.2.3 Charakteristischer Wert des E-Moduls

Der charakteristische Wert des E-Moduls als 5 %-Quantile ergibt sich gemäß DIN 18820-2, Tabelle 2 zu:

$$E_0 = 7300 \text{ N/mm}^2$$

### 12.4.2.4 Querdehnzahl $\mu$

Die Querdehnzahl für manuell gefertigte Profile (Variationskoeffizient  $v=0,17$ ) beträgt nach DIN 18820-2, Abs. 2.4.8:

$$\mu = 0,3$$

### 12.4.2.5 Teilsicherheitsbeiwert, Einflussfaktoren

Teilsicherheitsbeiwert für das Material  $\gamma_M$

Der Teilsicherheitsbeiwert für die Gesamtstabilität für manuell gefertigte Profile (Variationskoeffizient  $v=0,17$ ) wird wie folgt angesetzt:

$$\gamma_M = 1,4 \quad (\text{DIN EN 13121-3, Abschnitt 7.9.5.7})$$

(Anmerkung: örtliche Stabilität nur bei Deckschichten von Sandwich-Querschnitten)

Werkstoffspezifischer Einflussfaktor des E-Moduls

$$A^E_{\text{mod}} = \sqrt{A^{E_1} \cdot A^{E_2} \cdot A^{E_3}}$$

Für die Stabilitätsnachweise wird gemäß [3] mit  $\sqrt{A^{E_1}}$  gerechnet.

### Dauer der Einwirkung

Wirrfaserlaminat (mit  $\delta = 0,35$ )

getempert

$$A^E_{1,20J} = 2,4 - 2 \cdot \delta = 1,7 \quad (\text{TKB, Tabelle B-1b})$$

$$\hookrightarrow \text{KLED – ständig : } A^{E_1} = 1,7^{(0,253 + 0,142 \cdot \lg(50 \cdot 365 \cdot 24))} = 1,75$$

$$\sqrt{A^{E_1}} = 1,323$$

$$\hookrightarrow \text{KLED – kurz : } A^{E_1} = 1,7^{(0,253 + 0,142 \cdot \lg(7 \cdot 24))} = 1,35$$

$$\sqrt{A^{E_1}} = 1,150$$

### Medieneinfluss

getempert, Flüssigkeiten mit „sehr geringem Einfluss“ (Wasser), Betriebstemperatur bis 30 °C, im Freien

$$A^E_2 = 1,1 \quad (\text{TKB, Tabelle B-2})$$

Temperatureinfluss

Matrix = UP, 30 °C &lt; 40 °C

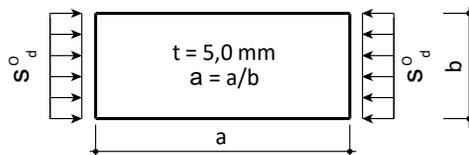
$$A^E_3 = 1,1$$

(TKB, Tabelle A-3b)

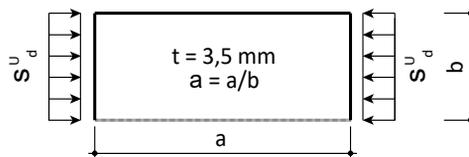
$$A^E_{\text{mod,KLED-ständig}} = 1,323 \cdot 1,1 \cdot 1,1 = \mathbf{1,601} \geq 1,35 \quad (\text{TKB, Absatz 5.5, Satz (3)})$$

$$A^E_{\text{mod,KLED-kurz}} = 1,150 \cdot 1,1 \cdot 1,1 = \mathbf{1,392}$$

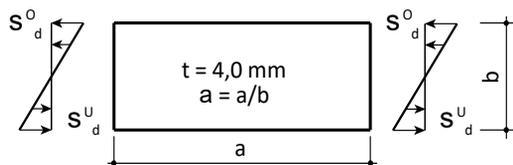
## 12.4.2.6 Beulfaktoren

Druckgurt – oben4-seitig gelagert;  $\alpha > 1$ 

$$\rightarrow k_\sigma = \mathbf{4,0} [2]$$

Druckgurt – unten3-seitig gelagert;  $\alpha > 1$ 

$$\rightarrow k_\sigma = \mathbf{0,43} [2]$$

Steg4-seitig gelagert;  $\alpha \approx 600 \text{ cm} / 34,4 \text{ cm} = 17,4$ 

$$\rightarrow k_\tau = \mathbf{5,35} [2]$$

$$\psi = W_{\text{unten}} / W_{\text{oben}} = -303 / 405$$

$$\rightarrow \psi = -0,75$$

$$\alpha > 1, \psi = -0,75 \rightarrow k_\sigma = 7,81 - 6,29 \cdot \psi + 9,78 \cdot \psi^2 \quad \rightarrow k_\sigma = \mathbf{18} [2]$$

### 12.4.2.7 Bemessungswerte der idealen Beulspannungen

Gemäß TKB, Absatz 8.2.3 (5) kann eine näherungsweise Ermittlung der idealen Beulspannungen nach DIN EN 1993-1-5 erfolgen. Es sind die für den entsprechenden Zeitpunkt geltenden Bemessungswerte zu verwenden.

$$\sigma_{cr,d} = k_{\sigma,p} \cdot \frac{\pi^2 \cdot E(t)_d}{12 \cdot (1-\mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (\text{DIN EN 1993-1-5 – Gl. A.1})$$

$$\tau_{cr,d} = k_{\tau} \cdot \frac{\pi^2 \cdot E(t)_d}{12 \cdot (1-\mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (\text{DIN EN 1993-1-5 – Gl. 5.4})$$

Für Werkstoffe mit einer gerichteten Faserverstärkung, wie z. B. im Pultrusionsverfahren hergestellte GFK-Profile, müssen die orthotropen Werkstoffeigenschaften bei der Bestimmung der Beulspannungen berücksichtigt werden. In diesem Fall können nicht Formeln der DIN EN 1993-1-5 für den isotropen Werkstoff Stahl verwendet werden. Hinweise zu Stabilitätsnachweisen für pultrudierte GFK-Profile findet man z. B. in [1] und [4].

#### Einwirkungskombination 1 (KLED ständig)

$$E(t)_d = 7300 \text{ N/mm}^2 / (1,4 \cdot 1,601)$$

$$E(t)_d = 3256,9 \text{ N/mm}^2$$

#### Druckgurt oben

$$\sigma_{cr,d}^0 = 4,0 \cdot (\pi^2 \cdot 3256,9 \text{ N/mm}^2) / (12 \cdot (1-0,3^2)) \cdot (5 \text{ mm} / 200 \text{ mm})^2$$

$$\sigma_{cr,d}^0 = 7,36 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Steg ( } L_{\text{Steg}} = \sqrt{310^2 + 150^2} = 344 \text{ mm )}$$

$$\sigma_{cr,d} = 18 \cdot (\pi^2 \cdot 3256,9 \text{ N/mm}^2) / (12 \cdot (1-0,3^2)) \cdot (4 \text{ mm} / 344 \text{ mm})^2$$

$$\sigma_{cr,d} = 7,16 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{cr,d} = 5,35 \cdot (\pi^2 \cdot 3256,9 \text{ N/mm}^2) / (12 \cdot (1-0,3^2)) \cdot (4 \text{ mm} / 344 \text{ mm})^2$$

$$\tau_{cr,d} = 2,13 \text{ N/mm}^2$$

#### Einwirkungskombination 2 (KLED kurz)

$$E(t)_d = 7300 \text{ N/mm}^2 / (1,4 \cdot 1,392)$$

$$E(t)_d = 3745,9 \text{ N/mm}^2$$

Druckgurt oben

$$\sigma_{cr,d}^0 = 4,0 \cdot (\pi^2 \cdot 3745,9 \text{ N/mm}^2) / (12 \cdot (1-0,3^2)) \cdot (5 \text{ mm} / 200 \text{ mm})^2$$

$$\sigma_{cr,d}^0 = \mathbf{8,46 \text{ N/mm}^2}$$

Steg

$$\sigma_{cr,d}^0 = 18 \cdot (\pi^2 \cdot 3745,9 \text{ N/mm}^2) / (12 \cdot (1-0,3^2)) \cdot (4 \text{ mm} / 344 \text{ mm})^2$$

$$\sigma_{cr,d}^0 = \mathbf{8,24 \text{ N/mm}^2}$$

$$\tau_{cr,d} = 5,35 \cdot (\pi^2 \cdot 3745,9 \text{ N/mm}^2) / (12 \cdot (1-0,3^2)) \cdot (4 \text{ mm} / 344 \text{ mm})^2$$

$$\tau_{cr,d} = \mathbf{2,44 \text{ N/mm}^2}$$

**Einwirkungskombination 3 (KLED kurz)**

$$E(t)_d = 7300 \text{ N/mm}^2 / (1,4 \cdot 1,392)$$

$$E(t)_d = \mathbf{3745,9 \text{ N/mm}^2}$$

Druckgurt unten

$$\sigma_{cr,d}^U = 0,43 \cdot (\pi^2 \cdot 3745,9 \text{ N/mm}^2) / (12 \cdot (1-0,3^2)) \cdot (3,5 \text{ mm} / 60 \text{ mm})^2$$

$$\sigma_{cr,d}^U = \mathbf{4,95 \text{ N/mm}^2}$$

Steg - analog EK 2

$$\sigma_{cr,d}^0 = \mathbf{8,24 \text{ N/mm}^2}$$

$$\tau_{cr,d} = \mathbf{2,44 \text{ N/mm}^2}$$

## 12.4.2.8 Nachweise

**Einwirkungskombination 1 (KLED ständig)**

$$\underline{x} = 0:$$

$$\tau_{d,1}^x = 0,13 \text{ N/mm}^2 \text{ (siehe 12.4.1.3)}$$

$$\tau_{d,1}^x = \mathbf{0,13 \text{ N/mm}^2} \leq \mathbf{2,13 \text{ N/mm}^2} = \tau_{cr,d} \quad \checkmark \quad [0,059 \leq 1]$$

$$\underline{x} = L/4:$$

$$\tau_{d,1}^1 = 0,04 \text{ N/mm}^2 \text{ (siehe 12.4.1.3)} \rightarrow 0,04 \text{ N/mm}^2 / 2,13 \text{ N/mm}^2 = 0,019$$

$$\sigma_{d,1}^0 = -0,71 \text{ N/mm}^2 \text{ (siehe 12.4.1.3)} \rightarrow 0,71 \text{ N/mm}^2 / 7,16 \text{ N/mm}^2 = 0,100$$

$$\text{Interaktion } \sigma \text{ und } \tau: \quad \rightarrow \mathbf{0,019 + 0,100 = 0,119} \leq \mathbf{1,0} \quad \checkmark$$

$$\underline{x = L/2:}$$

$$\sigma_{d,1}^o = -0,95 \text{ N/mm}^2 \text{ (siehe 12.4.1.3)}$$

$$\sigma_{d,1}^o = |-0,95 \text{ N/mm}^2| \leq 7,36 \text{ N/mm}^2 = \sigma_{cr,d} \quad \checkmark \quad [0,129 \leq 1]$$

### Einwirkungskombination 2 (KLED kurz)

$$\underline{x = 0:}$$

$$\tau_{d,2}^x = 1,13 \text{ N/mm}^2 \text{ (siehe 12.4.1.3)}$$

$$\tau_{d,2}^x = 1,13 \text{ N/mm}^2 \leq 2,44 \text{ N/mm}^2 = \tau_{cr,d} \quad \checkmark \quad [0,462 \leq 1]$$

$$\underline{x = L/4:}$$

$$\tau_{d,2}^1 = 0,36 \text{ N/mm}^2 \text{ (siehe 12.4.1.3)} \rightarrow 0,35 \text{ N/mm}^2 / 2,44 \text{ N/mm}^2 = 0,145$$

$$\sigma_{d,2}^o = -6,43 \text{ N/mm}^2 \rightarrow 6,43 \text{ N/mm}^2 / 8,24 \text{ N/mm}^2 = 0,780$$

$$\text{Interaktion } \sigma \text{ und } \tau: \rightarrow 0,145 + 0,780 = 0,925 \leq 1,0 \quad \checkmark$$

$$\underline{x = L/2:}$$

$$\sigma_{d,2}^o = -8,57 \text{ N/mm}^2 \text{ (siehe 12.4.1.3)}$$

$$\sigma_{d,2}^o = |-8,57 \text{ N/mm}^2| > 8,46 \text{ N/mm}^2 = \sigma_{cr,d} \quad \boxtimes \quad [1,040 > 1]$$

Beulnachweis nicht erfüllt, Überschreitung 4 %.

### Einwirkungskombination 3 (KLED kurz)

$$\underline{x = 0:}$$

$$\tau_{d,3}^x = -0,44 \text{ N/mm}^2 \text{ (siehe 12.4.1.3)}$$

$$\tau_{d,3}^x = |-0,44 \text{ N/mm}^2| \leq 2,44 \text{ N/mm}^2 = \tau_{cr,d} \quad \checkmark \quad [0,179 \leq 1]$$

$$\underline{x = L/4:}$$

$$\tau_{d,3}^2 = -0,09 \text{ N/mm}^2 \text{ (siehe 12.4.1.3)} \rightarrow 0,09 \text{ N/mm}^2 / 2,44 \text{ N/mm}^2 = 0,036$$

$$\sigma_{d,3}^u = -3,34 \text{ N/mm}^2 \text{ (siehe 12.4.1.3)} \rightarrow 3,34 \text{ N/mm}^2 / 8,24 \text{ N/mm}^2 = 0,405$$

$$\text{Interaktion } \sigma \text{ und } \tau: \rightarrow 0,036 + 0,405 = 0,441 \leq 1,0 \quad \checkmark$$

$$\underline{x = L/2:}$$

$$\sigma_{d,3}^u = -4,45 \text{ N/mm}^2 \text{ (siehe 12.4.1.3)}$$

$$\sigma_{d,3}^u = |-4,45 \text{ N/mm}^2| \leq 4,95 \text{ N/mm}^2 = \sigma_{cr,d} \quad \checkmark \quad [0,899 \leq 1]$$

## 12.5 Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

### 12.5.1 Durchbiegungsbegrenzung

#### 12.5.1.1 Nachweisformat

$$u_d(t) \leq u_{d,max} \quad (\text{TKB, Gl. 8.18})$$

#### 12.5.1.2 Einwirkungskombinationen

Aufgrund der geringen Eigenlast wird die seltene Kombination gewählt, da sie in diesem Fall die größten Durchbiegungen ergibt.

$$E_{d,rare} = E \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \oplus P_k \oplus Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \right\} \quad (\text{TKB, Gl. D.4})$$

#### Einwirkungskombination 1

*KLED - Ständig*

$$e_{d,rare,1} = g_k$$

$$\underline{e_{d,rare,1} = 63,4 \text{ N/m}}$$

#### Einwirkungskombination 2

*KLED - Kurz*

$$\text{Kombinationsbeiwert Wind} \quad \rightarrow \quad \psi_{0,2} = 0,6 \quad (\text{TKB, Tabelle D-2})$$

$$e_{d,rare,2} = g_k + q_{k,1} + \psi_{0,2} \cdot q_{k,2}$$

$$e_{d,rare,2} = 63,4 \text{ N/m} + 421,6 \text{ N/m} + 0,6 \cdot 59,5 \text{ N/m}$$

$$\underline{e_{d,rare,2} = 520,7 \text{ N/m}}$$

#### Einwirkungskombination 3

*KLED - Kurz*

$$e_{d,rare,3} = g_k + q_{k,2}$$

$$e_{d,rare,3} = 63,4 \text{ N/m} - 238 \text{ N/m}$$

$$\underline{e_{d,rare,3} = - 174,6 \text{ N/m}}$$

#### 12.5.1.3 Charakteristischer Wert des E-Moduls als Mittelwert

Nach DIN 18820-2 Tabelle 2 folgt:

$$E_B = 9100 \text{ N/mm}^2$$

#### 12.5.1.4 Teilsicherheitsbeiwert, Einflussfaktor

Teilsicherheitsbeiwert für das Material  $\gamma_M$

Der Teilsicherheitsbeiwert im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird für das Material wie folgt angesetzt:

$$\gamma_M = 1,0$$

Werkstoffspezifischer Einflussfaktor des E-Moduls

$$A_{\text{mod}}^E = A^{E_1} \cdot A^{E_2} \cdot A^{E_3}$$

$$A_{\text{mod,KLED-ständig}}^E = 1,75 \cdot 1,1 \cdot 1,1 = 2,118$$

$$A_{\text{mod,KLED-kurz}}^E = 1,35 \cdot 1,1 \cdot 1,1 = 1,634$$

### 12.5.1.5 Maßgebende Durchbiegung $u_d(t)$

#### Einwirkungskombination 1 (KLED Ständig)

##### E-Modul

$$E(t)_1 = 9100 / (1,0 \cdot 2,118)$$

$$\underline{E(t)_1 = 4296,5 \text{ N/mm}^2}$$

$$x = L/2:$$

$$u_{d,1}(t) = 5 \cdot e_{d,\text{rare},1} \cdot L^4 / (384 \cdot E(t) \cdot I)$$

$$u_{d,1}(t) = 5 \cdot 63,4 \text{ N/m} \cdot (6,0 \text{ m})^4 / (384 \cdot 4296,5 \text{ N/mm}^2 \cdot 5400 \text{ cm}^4)$$

$$\underline{u_{d,1}(t) = 0,46 \text{ cm}}$$

#### Einwirkungskombination 2 (KLED Kurz)

##### E-Modul

$$E(t)_2 = 9100 / (1,0 \cdot 1,634)$$

$$\underline{E(t)_2 = 5569,2 \text{ N/mm}^2}$$

$$x = L/2:$$

$$u_{d,2}(t) = 5 \cdot e_{d,\text{rare},2} \cdot L^4 / (384 \cdot E(t) \cdot I)$$

$$u_{d,2}(t) = 5 \cdot 520,7 \text{ N/m} \cdot (6,0 \text{ m})^4 / (384 \cdot 5569,2 \text{ N/mm}^2 \cdot 5400 \text{ cm}^4)$$

$$\underline{u_{d,2}(t) = 2,92 \text{ cm}}$$

#### Einwirkungskombination 3 (KLED Kurz)

##### E-Modul

$$E(t)_3 = 9100 / (1,0 \cdot 1,634)$$

$$\underline{E(t)_3 = 5569,2 \text{ N/mm}^2}$$

$$x = L/2:$$

$$u_{d,3}(t) = 5 \cdot e_{d,\text{rare},3} \cdot L^4 / (384 \cdot E(t) \cdot I)$$

$$u_{d,3}(t) = 5 \cdot -174,6 \text{ N/m} \cdot (6,0 \text{ m})^4 / (384 \cdot 5569,2 \text{ N/mm}^2 \cdot 5400 \text{ cm}^4)$$

$$\underline{u_{d,3}(t) = -0,98 \text{ cm}}$$

### 12.5.1.6 Bemessungswert $C_d$ zur Erfüllung der Durchbiegungsbegrenzung

Tragwerk mit normalen Anforderungen

Der Bemessungswert  $C_d$  der Durchbiegung ergibt sich wie folgt:

$$u_{d,max} = L/125 = 600 \text{ cm} / 125$$

(TKB, Tabelle 8-2)

$$u_{d,max} = 4,8 \text{ cm}$$

### 12.5.1.7 Nachweise

**Einwirkungskombination 1**

$$u_{d,1}(t) = 0,46 \text{ cm} \leq 4,8 \text{ cm} = u_{d,max} \quad \checkmark$$

**Einwirkungskombination 2**

$$u_{d,2}(t) = 2,92 \text{ cm} \leq 4,8 \text{ cm} = u_{d,max} \quad \checkmark$$

**Einwirkungskombination 3**

$$u_{d,3}(t) = -0,98 \text{ cm} \leq 4,8 \text{ cm} = u_{d,max} \quad \checkmark$$

## 12.6 Literatur zum Beispiel 1

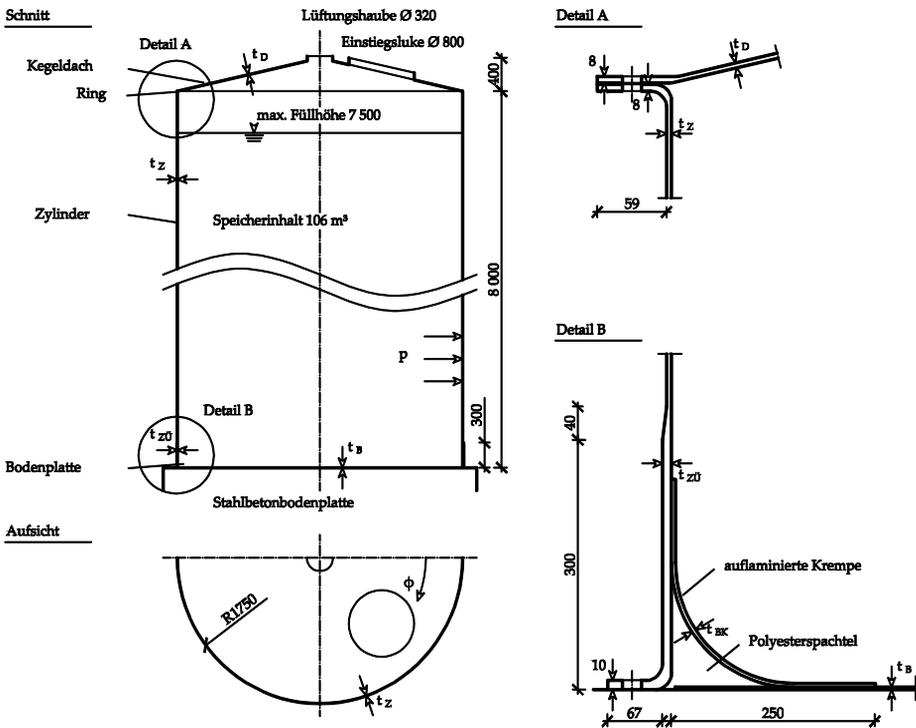
- [1] BANK, L. C.: Composites for construction. Structural design with FRP materials. Wiley & Sons, Hoboken, N.J. 2006.
- [2] BRUNE, Bettina: Stahlbaunormen, B Erläuterungen und Beispiele zu DIN 18800-3. In: Stahlbau-Kalender 2000, Berlin, Ernst & Sohn, S. 240-286.
- [3] DIN EN 13121-3 (2016-10): Oberirdische GFK-Tanks und –Behälter – Teil 3: Auslegung und Herstellung, Beuth-Verlag, Berlin.
- [4] TRUMPF, H.: Stabilitätsverhalten ebener Tragwerke aus pultrudierten faserverstärkten Polymerprofilen. RWTH Aachen, Dissertation am Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau, Shaker, Aachen 2006

# 13 Beispiel 2 Zylinderwand eines Behälters mit Kegeldach und Bodenplatte aus glasfaserverstärktem Laminat zur Speicherung von Wasser in einer Halle

Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers, Dr.-Ing. Markus Gabler, Dr.-Ing. Frédéric Waimer

Vorlage: Prof. Dr.-Ing. Günther Ackermann

## 13.1 Statisches System, Bauwerksform



Die Fertigung der Bodenplatte und des Kegeldaches erfolgt im Handlaminierverfahren im Werk. Der Zylinder wird im Wickelverfahren aus einem Stück mit den notwendigen Verbindungsflanschen am oberen und unteren Rand im Werk hergestellt. Die Bodenplatte wird mit dem Zylinder im Werk durch eine auflaminierte Krempe (Detail B) verbunden.

Nach dem Transport zur Baustelle erfolgen die Aufstellung des Zylinders und die Herstellung der Bolzenverbindung mit der Stahlbetonbodenplatte. Danach wird das Kegeldach aufgesetzt und die Bolzenverbindung (Detail A) hergestellt.

Der Zylinder ist oben mit dem Kegeldach und dem Ring sowie unten mit der Stahlbetonplatte gelenkig verbunden. Die Berechnung und Nachweisführung für die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit erfolgt hier nur für die Zylinderwand.

Für dieses Berechnungsbeispiel werden Kenngrößen der DIN 18820 herangezogen, wobei dort teilweise andere Variablen als in den BÜV-Empfehlungen verwendet werden. Es gilt:

$\delta$  Glasmassenanteil (entspricht  $\psi$  nach DIN 18820)

$v$  Glasvolumenanteil (entspricht  $V_G$  nach DIN 18820)

## 13.2 Querschnitt und Werkstoff

### 13.2.1 Laminatdicken

Wanddicke Dach	$t_D$ :	6 mm
Wanddicke Zylinder	$t_z$ :	6 mm
Wanddicke Zylinderfuß	$t_{zF}$ :	10 mm
Wanddicke Boden	$t_B$ :	4 mm
Wanddicke Krempe	$t_{BK}$ :	5 mm

### 13.2.2 Zylinder

Wickellaminat FM4, Matrix aus ungesättigtes Polyesterharz (UP), getempert

17 Einzelschichten  $n = 17$  ( $p = 7$ ), Glasmassenanteil  $\delta = 0,50$  (Annahmen)

Nach DIN 18820-2 (1991-03) sind:

$N_{||} = 1109 \text{ N/mm}$  Zug-/Druckfestigkeit in Ringrichtung (parallel zur Faser)

$M_{||} \cdot v = 389 \text{ Nm/m}$  Biegefestigkeit (Tabelle 5 der DIN 18820-2)

$N_{\perp} = 648 \text{ N/mm}$  Zug-/Druckfestigkeit in Längsrichtung (senkr. zur Faser)

$M_{\perp} \cdot v = 260 \text{ N/mm}$

$t \cdot v = 2,0 \text{ mm}$  relative Dicke, Tabellenwert nach DIN 18820-2

$E_{Z||} = 15430 \text{ N/mm}^2$  E-Modul bei Zug-/Druckbelastung in Ringrichtung  $||$

$E_{B||} = 14690 \text{ N/mm}^2$  E-Modul bei Biegebeanspruchung in Ringrichtung  $||$

$E_{Z\perp} = 12420 \text{ N/mm}^2$  E-Modul bei Zug-/Druckbelastung in Längsrichtung  $\perp$

$E_{B\perp} = 12290 \text{ N/mm}^2$  E-Modul bei Biegebeanspruchung in Längsrichtung  $\perp$

$m_G = 450 + 7 \cdot (120+450) + 120 + 450 = 5010 \text{ g/m}^2$  Glasmasse je Fläche

$v = 0,50 / (2 - 0,50) = 0,333$  Faservolumenanteil aus  $\delta = 0,5$

$t_z = m_G / (\rho_G \cdot v) = 5010 \text{ g/m}^2 / (2,5 \text{ g/cm}^3 \cdot 0,333) = 0,601 \text{ cm} \approx 6,0 \text{ mm}$

$\nu = 0,3$  Querdehnzahl nach DIN 18820-2, Abs. 2.4.8

### 13.2.3 Zylinderfuß

Wickellaminat FM4, Matrix aus ungesättigtes Polyesterharz (UP), getempert

29 Einzelschichten  $n = 29$  ( $p = 13$ ), Glasmassenanteil  $\delta = 0,50$

Nach DIN 18820-2 (1991-03) sind:

$$N_{\parallel} = 1886 \text{ N/mm}$$

$$M_{\parallel} \cdot v = 1065 \text{ Nm/m}$$

Biegefestigkeit (Tabelle 5 der DIN 18820-2)

$$N_{\perp} = 1080 \text{ N/mm}$$

$$M_{\perp} \cdot v = 685 \text{ Nm/m}$$

$$t \cdot v = 3,37 \text{ mm}$$

relative Dicke (Tabellenwert nach DIN 18820-2)

$$E_{Z\parallel} = 15480 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{B\parallel} = 14870 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{Z\perp} = 12410 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{B\perp} = 12300 \text{ N/mm}^2$$

$$m_G = 450 + 13 \cdot (120+450) + 120 + 450 = 8430 \text{ g/m}^2 \quad \text{Glasmasse je Fläche}$$

$$v = 0,50 / (2 - 0,50) = 0,333 \quad \text{Faservolumenanteil aus } \delta = 0,5$$

$$t_z = m_G / (\rho_G \cdot v) = 8430 \text{ g/m}^2 / (2,5 \text{ g/cm}^3 \cdot 0,333) = 1,013 \text{ cm} \approx 10,0 \text{ mm}$$

$$v = 0,3 \quad \text{Querdehnzahl nach DIN 18820-2, Abs. 2.4.8}$$

## 13.3 Einwirkungen und Schnittgrößen

### 13.3.1 Übersicht

**Tabelle Beispiel 2-1:** Untersuchte Lastfälle

Nr.	Name	KLED (TKB Tabelle 6-2)	Art der veränderlichen Last
LF 10	Eigenlast	Ständig	-
LF 20	Füllgut	Lang <sup>3</sup>	Nutzlast Kategorie E <sup>4</sup>
LF 21	Verkehrslast auf Kegelschale	Kurz	Verkehrslast
LF 22	Betriebsdruck	Kurz	Sonstige Einwirkung
LF 30	Temperatur	Lang	Temperatureinwirkung

Es treten keine Schneelasten auf, da der Tank in einer geschlossenen Halle steht.

### 13.3.2 LF 10 Eigenlast

#### 13.3.2.1 Kegeldach

$$\gamma_k = 15,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$s = \sqrt{R^2 + H_D^2} = \sqrt{(1,75\text{m})^2 + (0,40\text{m})^2} = 1,80\text{m}$$

$$G_K = 1,1 \cdot \pi \cdot R \cdot s \cdot t_D \cdot \gamma_k$$

$$G_K = 1,1 \cdot \pi \cdot 1,75\text{m} \cdot 1,80\text{m} \cdot 0,006\text{m} \cdot 15,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 0,99\text{kN}$$

(10 % Zuschlag für Verbindungen und Öffnungen, Wichte nach Herstellerangabe)

#### 13.3.2.2 Zylinder

$$\gamma_g = (25,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 0,333 + 12,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot (1 - 0,333)) \cdot 10 = 16,7 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$G_Z = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot H_Z \cdot t_z \cdot \gamma_g$$

$$G_Z = 2 \cdot \pi \cdot 1,75\text{m} \cdot 8,00\text{m} \cdot 0,06\text{m} \cdot 16,7 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 8,81\text{kN}$$

(Wichte für Glasfasern: 25,0 kN/m<sup>3</sup>; Wichte für UP-Harz: 12,5 kN/m<sup>3</sup>; Faservolumenanteil: 0,33)

<sup>3</sup> In diesem Fall korreliert die Temperatureinwirkung mit dem Füllgut (warmes Wasser), es ist daher in Übereinstimmung mit dem Füllgut von einer langen Einwirkungsdauer (KLED) auszugehen.

<sup>4</sup> Abminderung der Nutzlast gemäß DIN 1055-6 (03/2005) A.2.1(2) für Silos und Flüssigkeitsbehälter wird nicht angewendet

### 13.3.3 LF 20 Füllgut

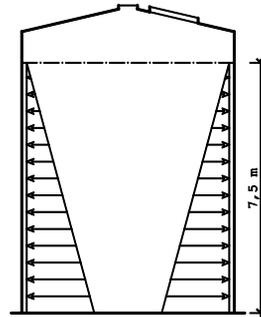
Wichte Wasser  $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$

Einstauhöhe 7,50m

Rechnerische Höhe bis Unterkante Ring  $H_Z = 8,00\text{m}$

$$q_F = \gamma_w \cdot x = 10,00 \text{ kN/m}^3 \cdot x \quad 0 \leq x \leq 8,00\text{m}$$

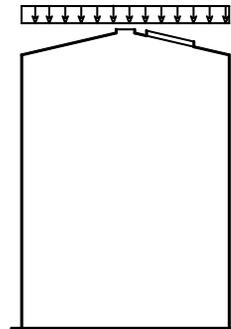
(Sollwert der Füllhöhe ist 7,5 m, es ist jedoch mit Überfüllung zu rechnen)



### 13.3.4 LF 21 Verkehrslast auf Kegelschale

Ersatzlast bei Reparaturarbeiten, bezogen auf die Grundrissfläche

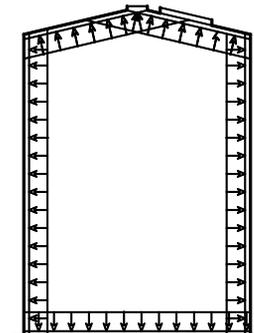
$$q_D = 1,0 \text{ kN/m}^2$$



### 13.3.5 LF 22 Betriebsdruck

Überdruck  $p_U = 2 \text{ kN/m}^2$

Unterdruck  $p_U = -0,5 \text{ kN/m}^2$



### 13.3.6 LF 30 Temperatur

Gleichmäßig verteilt über die Zylinderwand  $t_z$

Gleichmäßig verteilt in x- und  $\varphi$ -Richtung

Temperaturausdehnungskoeffizient  $\alpha_T = 30 \cdot 10^{-6} / \text{K}$

für Wickellaminat, senkrecht zur Faserorientierung

Aufstelltemperatur +15 °C

Betriebstemperatur +40 °C

### 13.3.7 Lastkombinationen

Die überlagerten Schnittgrößenverläufe werden im Folgenden für die maßgebenden Lastkombinationen dargestellt.

Die Lastkombinationen ergeben sich aus den unterschiedlichen Belastungsszenarien für das Bauwerk, hier der Regelbetrieb (LK 1, 2, 3), der leere Behälter unter Unterdruck (LK 4) und die Wartung (LK 5). Der Regelbetrieb wird in 3 unterschiedlichen Kombinationen betrachtet, da die vorhandene Einwirkungsdauer für den späteren Nachweis relevant ist. So tritt die Gleichzeitigkeit aller Lastfälle (10, 20, 22, 30) nur über eine kurze Dauer auf, während die reine Eigenlast ständig wirkt. Zwar treten bei der ersten Kombination höhere Schnittgrößen auf, dafür ist der Einflussfaktor auf der Widerstandsseite geringer. Es kann im Voraus nicht abgeschätzt werden, welche der Kombinationen bemessungsrelevant wird. Für die Szenarien „Unterdruck“ und „Wartung“ können diese Überlegungen entfallen, da das alleinige Auftreten der Eigenlast bereits abgedeckt ist.

**Tabelle Beispiel 2-2:** Untersuchte Lastkombinationen

Lastkombination	Anzusetzende Lasten	Lastfälle
LK 1: $g \oplus q_F \oplus q_{\text{üb}} \oplus \Delta T$ (regulärer Betrieb)	kurz	LF 10 Eigenlast LF 20 Füllgut LF 22 Betriebsdruck, Überdruck LF 30 Temperatur <sup>1)</sup>
LK 2: $g \oplus q_F \oplus \Delta T$ (regulärer Betrieb)	lang	LF 10 Eigenlast LF 20 Füllgut LF 30 Temperatur <sup>1)</sup>
LK 3: $g$ (regulärer Betrieb)	ständig	LF 10 Eigenlast
LK 4 <sup>2)</sup> : $g \oplus q_{\text{Un}} \oplus p_d$ (leer, Wartung + Unterdruck)	kurz	LF 10 Eigenlast LF 21 Verkehrslast auf Kegelschale LF 22 Betriebsdruck, Unterdruck

- 1) die Temperaturlast ist in diesem Fall keine klimatische Einwirkung, sondern geht mit dem Lastfall „Füllgut“ einher, sie ist daher als „lang“ einzustufen
- 2) LK 4 beschreibt den Lastfall mit maximaler Beulgefahr, diese tritt bei der Kombination von Wartung und Unterdruck auf, wobei letztere als begleitende Veränderliche mit dem Kombinationsbeiwert 0,8 abgemindert werden darf

### 13.3.8 Bemessungswerte der Schnittgrößen

Normale Bemessungssituation (Grundkombination)

$$E_d = E \left\{ \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \oplus \gamma_P \cdot P_k \oplus \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \right\} \quad (\text{TKB, D.1})$$

Es wurden alle Lastkombinationen überprüft. Im Folgenden sind nur noch solche Kombinationen aufgelistet, die maßgebende Schnittgrößen und Spannungen hervorrufen.

**Lastkombination 1:**

$$\gamma_G \cdot g + \gamma_Q \cdot (q_F + \Delta T) + \gamma_Q \cdot \psi_{0,2} \cdot q_{\text{Üb}}$$

$$\gamma_G \cdot \text{LF10} + \gamma_Q \cdot (\text{LF20} + \text{LF30}) + \gamma_Q \cdot \psi_{0,2} \cdot \text{LF22}$$

KLED - Kurz

Fall B (TKB, Tabelle D-1)

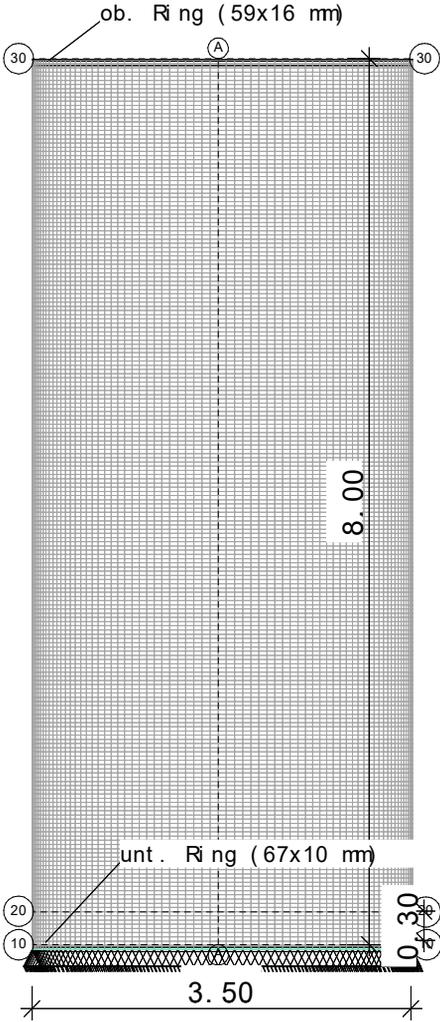
Ständige Einwirkungen, günstig  $\rightarrow \gamma_{G,\text{inf}} = 1,00$  (TKB, Tabelle D-1)

Ständige Einwirkungen, ungünstig  $\rightarrow \gamma_{G,\text{sup}} = 1,50$  (TKB, Tabelle D-1)

Veränderliche Einwirkungen, ungünstig  $\rightarrow \gamma_{Q,\text{sup}} = 1,35$  (TKB, Tabelle D-1)

Kombinationsbeiwert sonstige Einwirkungen  $\rightarrow \psi_{0,2} = 0,8$  (TKB, Tabelle D-2)

Die Schnittgrößenermittlung erfolgt mit FEM-Software SOFISTIK [2] und zwar nach Theorie 1. Ordnung mit den Mittelwerten der E-Moduln. Der Beulnachweis wird in Kapitel 4.2 erbracht. Das statische System gliedert sich in den Zylinder, den Zylinderfuß (0,3 m von unten) und zwei Ringträger. Die E-Moduln und deren Orientierung sind wie in Kapitel 13.2.2 und 13.2.3 angegeben generiert.



### 13.3.9 Bemessungswerte der Spannungen

**Tabelle Beispiel 2-3:** Bemessungswerte der Spannungen für alle Lastkombinationen 1 bis 4

FEM-Berechnung	Zylinderwand			Zylinderfuß		
	$\sigma_{x,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ] (Ring- richt.)	$\sigma_{y,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ] (Längs- richt.)	$T_{y,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ] (Längs- richt.)	$\sigma_{x,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ] (Ring- richt.)	$\sigma_{y,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ] (Längs- richt.)	$T_{y,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ] (Längs- richt.)
LK 1 g ⊕ (q <sub>F</sub> + ΔT) ⊕ q <sub>üb</sub>	34,4	±2,8	0,6 <sup>1)</sup>	34,4	±20,0	1,1 <sup>1)</sup>
LK 2 g ⊕ (q <sub>F</sub> + ΔT)	33,7	±2,4	0,6 <sup>1)</sup>	33,7	±19,7	1,0 <sup>1)</sup>
LK 3 g	0,0	-0,2	0,0	0,0	-0,1	0,0
LK 4 g ⊕ q <sub>un</sub> ⊕ p <sub>d</sub>	-0,2	-0,6	0,0	-0,2	-0,3	0,0

<sup>1)</sup> aus den Ergebnissen für die Querkraft  $V_y$  ermittelt nach  $\tau = 1,5 \cdot V_y / (t \cdot b)$

Die Spannungen in Ringrichtung werden von Normalkraftbeanspruchung dominiert, die Spannungen in Längsrichtung von Biegung (Symbol ±).

## 13.4 Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit

### 13.4.1 Festigkeit

#### 13.4.1.1 Nachweisformat

$$\sigma_d(t) \leq \frac{f_k}{\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^f} = f_d \quad (\text{TKB, Gl. 8.4})$$

#### 13.4.1.2 Charakteristische Werte des Widerstandes

In der DIN 18820 sind die Festigkeiten als aufnehmbare Schnittgrößen, N, M angegeben. Die aufnehmbaren Spannungen können vereinfachend wie folgt abgeleitet werden:

Biegefestigkeit  $f_{B,k} = 6 \cdot M / t^2$

Zugfestigkeit  $f_{Z,k} = N_Z / t$

Druckfestigkeit  $f_{D,k} = N_D / t$

Da faserverstärkte Kunststoffe jedoch inhomogen geschichtet sind, handelt es sich dabei nur um fiktive Spannungen. Für einen genaueren Nachweis ist eine Laminatanalyse erforderlich.

**Tabelle Beispiel 2-4:** Charakteristischer Wert der Kurzzeit-Biegefestigkeit

	<b>Zylinderwand <math>t_z = 6 \text{ mm}</math></b>	<b>Zylinderfuß <math>t_{z\ddot{u}}=10 \text{ mm}</math></b>
Längsrichtung	$M_{\perp,k} \cdot v = 260 \text{ Nm/m}$ $v = 0,333$ $M_{\perp,k} = 260 / 0,333 = 781 \text{ Nm/m}$ $f_{\perp,B,k} = 6 \cdot M_{\perp,k} / t_z^2 = 6 \cdot 781 / 6^2$ $= \underline{130,2 \text{ N/mm}^2}$	$M_{\perp,k} \cdot v = 685 \text{ Nm/m}$ $v = 0,333$ $M_{\perp,k} = 685 / 0,333 = 2057 \text{ Nm/m}$ $f_{\perp,B,k} = 6 \cdot M_{\perp,k} / t_{z\ddot{u}}^2 = 6 \cdot 2057 / 10^2$ $= \underline{123,4 \text{ N/mm}^2}$
Ringrichtung	$M_{\parallel} \cdot v = 389 \text{ Nm/m}$ $v = 0,333$ $M_{\parallel} = 389 / 0,333 = 1168 \text{ Nm/m}$ $f_{\parallel,B,k} = 6 \cdot M_{\parallel} / t_z^2 = 6 \cdot 1168 / 6^2$ $= \underline{194,7 \text{ N/mm}^2}$	$M_{\parallel} \cdot v = 1065 \text{ Nm/m}$ $v = 0,333$ $M_{\parallel} = 1065 / 0,333 = 3198 \text{ Nm/m}$ $f_{\parallel,B,k} = 6 \cdot M_{\parallel} / t_{z\ddot{u}}^2 = 6 \cdot 3198 / 10^2$ $= \underline{191,9 \text{ N/mm}^2}$

**Tabelle Beispiel 2-5:** Charakteristischer Wert der Kurzzeit-Zugfestigkeit

	<b>Zylinderwand <math>t_z = 6 \text{ mm}</math></b>	<b>Zylinderfuß <math>t_{z\ddot{u}}=10 \text{ mm}</math></b>
Längsrichtung	$N_{\perp,k} = 648 \text{ N/mm}$ $f_{\perp,Z,k} = 648 \text{ N/mm} / 6 \text{ mm}$ $= \underline{108,0 \text{ N/mm}^2}$	$N_{\perp,k} = 1080 \text{ N/mm}$ $f_{\perp,Z,k} = 1080 \text{ N/mm} / 10 \text{ mm}$ $= \underline{108,0 \text{ N/mm}^2}$
Ringrichtung	$N_{\parallel,k} = 1109 \text{ N/mm}$ $f_{\parallel,Z,k} = 1109 \text{ N/mm} / 6 \text{ mm}$ $= \underline{184,8 \text{ N/mm}^2}$	$N_{\parallel,k} = 1886 \text{ N/mm}$ $f_{\parallel,Z,k} = 1886 \text{ N/mm} / 10 \text{ mm}$ $= \underline{188,6 \text{ N/mm}^2}$

Charakteristischer Wert der Kurzzeitdruckfestigkeit

Nach DIN 18820-2 Abschnitt 2.4.1 ist die Bruchkraft je Breite unter Druckbeanspruchung mit der Bruchkraft je Breite unter Zugbeanspruchung gleichzusetzen.

$$f_{\perp,D,k} = f_{\perp,Z,k}; f_{\parallel,D,k} = f_{\parallel,Z,k}$$

Charakteristischer Wert der Schubfestigkeit

Gemäß DIN 18820-2 Abschnitt 2.4.3 ist für alle Lamine die Schubfestigkeit in Laminebene und senkrecht dazu wie folgt einzuführen:

$$f_{S,k} = 50 \text{ N/mm}^2$$

### 13.4.1.3 Charakteristischer Wert der interlaminaren Scherfestigkeit (ILS)

Gemäß TKB, 8.2.2 (3) ist für Lamine die interlaminare Scherfestigkeit wie folgt einzuführen:

$$f_{ILS,k} = 8 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{DIN 18820-2, Abschnitt (2.4.4)})$$

### 13.4.1.4 Teilsicherheitsbeiwerte und Einflussfaktoren

Teilsicherheitsbeiwert für das Material  $\gamma_M$

Manuell gefertigte Faserverbundstoffe, Grundkombination - Festigkeit

$$\gamma_M = 1,5$$

(TKB, Tabelle E-1)

Werkstoffspezifische Einflussfaktoren der Festigkeit

$$A_{\text{mod}}^f = A_1^f \cdot A_2^f \cdot A_3^f$$

### Dauer der Einwirkung

Wickelfaserlaminat FM parallel zur Wickelrichtung

$$A_{1,20J}^f = 1,8 - \delta = 1,8 - 0,5 = 1,3$$

(TKB, Tabelle B-1a)

Wickelfaserlaminat FM4, senkrecht zur Wickelrichtung,  $\epsilon \leq 0,2 \%$

$$A_{1,20J}^f = 1,7$$

(TKB, Tabelle B-1a)

**Tabelle Beispiel 2-6:** Einflussfaktor  $A_1$  in Abhängigkeit der Lastdauer

ständig ( $t_a=50$ Jahre)	lang ( $t_a=10$ Jahre)	Kurz ( $t_a=1$ Woche)
$A_{1,\text{ständig}}^{\parallel} = 1,32$	$A_{1,\text{lang}}^{\parallel} = 1,28$	$A_{1,\text{kurz}}^{\parallel} = 1,16$
$A_{1,\text{ständig}}^{\perp} = 1,75$	$A_{1,\text{lang}}^{\perp} = 1,66$	$A_{1,\text{kurz}}^{\perp} = 1,35$

(mit TKB, Gl. 8.2 bzw. Tabelle 8-1 oder Abb. 8-1)

### Medieneinfluss

Medium: Wasser, Betriebstemperatur: 40 °C, getempert

$$A_2^f = 1,2$$

(TKB, Tabelle B-2)

„Tempern“ ist eine Nachhärtung des Bauteils unter erhöhten Temperaturen nach dem vollständigen Aushärten des Harzes, dadurch wird vor allem die Medienresistenz des Faserverbundwerkstoffs erhöht. Soweit möglich, sind alle Faserverbundbauteile zu tempern.

### Temperatureinfluss

Matrix = UP, 40 °C Betriebstemperatur

$$A_3^f = 1,2$$

(TKB, Tabelle A-3b)

### Zusammenfassung

**Tabelle Beispiel 2-7:** Zusammenstellung der Einflussfaktoren

$A_{\text{mod}}^f = A_1^f \cdot A_2^f \cdot A_3^f$	Ständig	Lang	Kurz
zur Faser (Ringrichtung)	$1,32 \cdot 1,2 \cdot 1,2$ = <u>1,90</u> = $A_{\text{mod},\parallel,\text{ständig}}^f$	$1,28 \cdot 1,2 \cdot 1,2$ = <u>1,84</u> = $A_{\text{mod},\parallel,\text{lang}}^f$	$1,16 \cdot 1,2 \cdot 1,2$ = <u>1,67</u> = $A_{\text{mod},\parallel,\text{kurz}}^f$
⊥ zur Faser (Längsrichtung)	$1,75 \cdot 1,2 \cdot 1,2$ = <u>2,52</u> = $A_{\text{mod},\perp,\text{ständig}}^f$	$1,66 \cdot 1,2 \cdot 1,2$ = <u>2,39</u> = $A_{\text{mod},\perp,\text{lang}}^f$	$1,35 \cdot 1,2 \cdot 1,2$ = <u>1,94</u> = $A_{\text{mod},\perp,\text{kurz}}^f$

$$A_{\text{mod,II,ständig}}^f = 1,90 \geq 1,75 \quad (\text{TKB, Absatz 5.5, Satz (3)})$$

$$A_{\text{mod,I,ständig}}^f = 2,52 \geq 1,75 \quad (\text{TKB, Absatz 5.5, Satz (3)})$$

### 13.4.1.5 Bemessungswerte des Widerstandes

#### KLED ständig

##### Biegung

Zylinderwand in Längsrichtung

$$f_{\perp,B,d} = f_{\perp,B,k} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod,}\perp,\text{ständig}}^f)$$

$$f_{\perp,B,d} = 130,2 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 2,52)$$

$$\underline{f_{\perp,B,d} = 34,4 \text{ N/mm}^2}$$

Zylinderfuß in Längsrichtung

$$f_{\perp,B,d} = f_{\perp,B,k} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod,}\perp,\text{ständig}}^f)$$

$$f_{\perp,B,d} = 123,4 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 2,52)$$

$$\underline{f_{\perp,B,d} = 32,6 \text{ N/mm}^2}$$

Zylinderwand in Ringrichtung

$$f_{\parallel,B,d} = f_{\parallel,B,k} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod,}\parallel,\text{ständig}}^f)$$

$$f_{\parallel,B,d} = 194,7 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 1,90)$$

$$\underline{f_{\parallel,B,d} = 68,3 \text{ N/mm}^2}$$

Zylinderfuß in Ringrichtung

$$f_{\parallel,B,d} = f_{\parallel,B,k} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod,}\parallel,\text{ständig}}^f)$$

$$f_{\parallel,B,d} = 191,9 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 1,90)$$

$$\underline{f_{\parallel,B,d} = 67,3 \text{ N/mm}^2}$$

##### Zug / Druck

Zylinderwand in Längsrichtung

$$f_{\perp,Z,d} = f_{\perp,Z,k} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod,}\perp,\text{ständig}}^f)$$

$$f_{\perp,Z,d} = 108,0 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 2,52)$$

$$\underline{f_{\perp,Z,d} = 28,6 \text{ N/mm}^2}$$

Zylinderfuß in Längsrichtung

$$f_{\perp,Z,d} = f_{\perp,Z,k} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod,}\perp,\text{ständig}}^f)$$

$$f_{\perp,Z,d} = 108,0 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 2,52)$$

$$\underline{f_{\perp,Z,d} = 28,6 \text{ N/mm}^2}$$

Zylinderwand in Ringrichtung

$$f_{\parallel,Z,d} = f_{\parallel,Z,k} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod,}\parallel,\text{ständig}}^f)$$

$$f_{\parallel,Z,d} = 184,8 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 1,90)$$

$$\underline{f_{||,Z,d}} = 64,8 \text{ N/mm}^2$$

Zylinderfuß in Ringrichtung

$$\begin{aligned} f_{||,Z,d} &= f_{||,Z,k} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod},||,\text{ständig}}^f) \\ f_{||,Z,d} &= 188,6 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 1,90) \\ \underline{f_{||,Z,d}} &= 66,2 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Die Schubfestigkeit sowie die interlaminare Scherfestigkeit werden vor allem über die Eigenschaften der Matrix definiert, daher werden die Faktoren ‚senkrecht zur Wickelrichtung‘ verwendet, da auch diese von der Matrix, weniger den Fasern dominiert sind.

Schubfestigkeit

$$\begin{aligned} f_{S,d} &= f_k / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod},\perp,\text{ständig}}^f) \\ f_{S,d} &= 50 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 2,52) \\ \underline{f_{S,d}} &= 13,2 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Interlaminare Scherfestigkeit (ILS)

$$\begin{aligned} f_{ILS,d} &= f_k / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod},\perp,\text{ständig}}^f) \\ f_{ILS,d} &= 8 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 2,52) \\ \underline{f_{ILS,d}} &= 2,12 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

**KLED lang**

Biegung

Zylinderwand in Längsrichtung

$$\begin{aligned} f_{\perp,B,d} &= f_{\perp,B,k} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod},\perp,\text{lang}}^f) \\ f_{\perp,B,d} &= 130,2 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 2,39) \\ \underline{f_{\perp,B,d}} &= 36,3 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Zylinderfuß in Längsrichtung

$$\begin{aligned} f_{\perp,B,d} &= f_{\perp,B,k} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod},\perp,\text{lang}}^f) \\ f_{\perp,B,d} &= 123,4 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 2,39) \\ \underline{f_{\perp,B,d}} &= 34,4 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Zylinderwand in Ringrichtung

$$\begin{aligned} f_{||,B,d} &= f_{||,B,k} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod},||,\text{lang}}^f) \\ f_{||,B,d} &= 194,7 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 1,84) \\ \underline{f_{||,B,d}} &= 70,5 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Zylinderfuß in Ringrichtung

$$f_{||,B,d} = f_{||,B,k} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod},||,\text{lang}}^f)$$

$$f_{||,B,d} = 191,9 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 1,84)$$

$$\underline{f_{||,B,d} = 69,5 \text{ N/mm}^2}$$

### Zug / Druck

Zylinderwand in Längsrichtung

$$f_{\perp,Z,d} = f_{\perp,Z,k} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod},\perp,\text{lang}}^f)$$

$$f_{\perp,Z,d} = 108,0 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 2,39)$$

$$\underline{f_{\perp,Z,d} = 30,1 \text{ N/mm}^2}$$

Zylinderfuß in Längsrichtung

$$f_{\perp,Z,d} = f_{\perp,Z,k} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod},\perp,\text{lang}}^f)$$

$$f_{\perp,Z,d} = 108,0 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 2,39)$$

$$\underline{f_{\perp,Z,d} = 30,1 \text{ N/mm}^2}$$

Zylinderwand in Ringrichtung

$$f_{||,Z,d} = f_{||,Z,k} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod},||,\text{lang}}^f)$$

$$f_{||,Z,d} = 184,8 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 1,84)$$

$$\underline{f_{||,Z,d} = 67,0 \text{ N/mm}^2}$$

Zylinderfuß in Ringrichtung

$$f_{||,Z,d} = f_{||,Z,k} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod},||,\text{lang}}^f)$$

$$f_{||,Z,d} = 188,6 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 1,84)$$

$$\underline{f_{||,Z,d} = 68,3 \text{ N/mm}^2}$$

### Schubfestigkeit

$$f_{S,d} = f_k / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod},\perp,\text{lang}}^f)$$

$$f_{S,d} = 50 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 2,39)$$

$$\underline{f_{S,d} = 13,9 \text{ N/mm}^2}$$

### Interlaminare Scherfestigkeit (ILS)

$$f_{ILS,d} = f_k / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod},\perp,\text{lang}}^f)$$

$$f_{ILS,d} = 8 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 2,39)$$

$$\underline{f_{ILS,d} = 2,23 \text{ N/mm}^2}$$

## **KLED Kurz**

### Biegung

Zylinderwand in Längsrichtung

$$f_{\perp,B,d} = f_{\perp,B,k} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod},\perp,\text{kurz}}^f)$$

$$f_{\perp,B,d} = 130,2 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 1,94)$$

$$\underline{f_{\perp,B,d} = 44,7 \text{ N/mm}^2}$$

**Zylinderfuß in Längsrichtung**

$$\begin{aligned} f_{\perp,B,d} &= f_{\perp,B,k} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod},\perp}^f, \text{ kurz}) \\ f_{\perp,B,d} &= 123,4 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 1,94) \\ \underline{f_{\perp,B,d}} &= \underline{42,4 \text{ N/mm}^2} \end{aligned}$$

**Zylinderwand in Ringrichtung**

$$\begin{aligned} f_{\parallel,B,d} &= f_{\parallel,B,k} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod},\parallel}^f, \text{ kurz}) \\ f_{\parallel,B,d} &= 194,7 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 1,67) \\ \underline{f_{\parallel,B,d}} &= \underline{77,7 \text{ N/mm}^2} \end{aligned}$$

**Zylinderfuß in Ringrichtung**

$$\begin{aligned} f_{\parallel,B,d} &= f_{\parallel,B,k} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod},\parallel}^f, \text{ kurz}) \\ f_{\parallel,B,d} &= 191,9 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 1,67) \\ \underline{f_{\parallel,B,d}} &= \underline{76,6 \text{ N/mm}^2} \end{aligned}$$

**Zug / Druck****Zylinderwand in Längsrichtung**

$$\begin{aligned} f_{\perp,Z,d} &= f_{\perp,Z,k} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod},\perp}^f, \text{ kurz}) \\ f_{\perp,Z,d} &= 108,0 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 1,94) \\ \underline{f_{\perp,Z,d}} &= \underline{37,1 \text{ N/mm}^2} \end{aligned}$$

**Zylinderfuß in Längsrichtung**

$$\begin{aligned} f_{\perp,Z,d} &= f_{\perp,Z,k} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod},\perp}^f, \text{ kurz}) \\ f_{\perp,Z,d} &= 108,0 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 1,94) \\ \underline{f_{\perp,Z,d}} &= \underline{37,1 \text{ N/mm}^2} \end{aligned}$$

**Zylinderwand in Ringrichtung**

$$\begin{aligned} f_{\parallel,Z,d} &= f_{\parallel,Z,k} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod},\parallel}^f, \text{ kurz}) \\ f_{\parallel,Z,d} &= 184,8 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 1,67) \\ \underline{f_{\parallel,Z,d}} &= \underline{73,8 \text{ N/mm}^2} \end{aligned}$$

**Zylinderfuß in Ringrichtung**

$$\begin{aligned} f_{\parallel,Z,d} &= f_{\parallel,Z,k} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod},\parallel}^f, \text{ kurz}) \\ f_{\parallel,Z,d} &= 188,6 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 1,67) \\ \underline{f_{\parallel,Z,d}} &= \underline{75,3 \text{ N/mm}^2} \end{aligned}$$

**Schubfestigkeit**

$$\begin{aligned} f_{S,d} &= f_k / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod},\perp}^f, \text{ kurz}) \\ f_{S,d} &= 50 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 1,94) \\ \underline{f_{S,d}} &= \underline{17,2 \text{ N/mm}^2} \end{aligned}$$

interlaminare Scherfestigkeit (ILS)

$$f_{ILS,d} = f_k / (\gamma_M \cdot A_{mod, \perp, kurz}^f)$$

$$f_{ILS,d} = 8 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 1,94)$$

$$f_{ILS,d} = 2,75 \text{ N/mm}^2$$

Zusammenfassung**Tabelle Beispiel 2-8:** Bemessungswert des Materialwiderstands

Bemessungswert des Materialwiderstands [N/mm <sup>2</sup> ] Zylinderwand (Zylinderfuß)		Ständig	Lang	Kurz
Längsrichtung $\perp$	Biegung (M)	34,4 (32,6)	36,3 (34,4)	44,7 (42,4)
	Zug & Druck (N)	28,6 (28,6)	30,1 (30,1)	37,1 (37,1)
Ringrichtung $\parallel$	Biegung (M)	68,3 (67,3)	70,5 (69,5)	77,7 (76,6)
	Zug & Druck (N)	64,8 (66,2)	67,0 (68,3)	73,8 (75,3)
Längsrichtung $\perp$	Schubfestigkeit (V)	13,2	13,9	17,2
	interlaminare Scherfestigkeit (ILS)	2,12	2,23	2,75

**13.4.1.6 Nachweise**

Die Nachweise erfolgen tabellarisch, in dem die Einwirkungen den Widerständen gegenübergestellt werden. Die Normalspannungen gliedern sich dabei in normalkraftdominierte Belastungsszenarien (N) und in biegedominierte Belastungen (M), es sind also die entsprechenden Widerstände zu verwenden.

**Tabelle Beispiel 2-9:** Spannungsnachweis

FEM-Berechnung	Zylinderwand			Zylinderfuß		
	$\sigma_{x,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ] (Ringricht.)	$\sigma_{y,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ] (Längsricht.)	$T_{y,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ] (Längsricht.)	$\sigma_{x,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ] (Ringricht.)	$\sigma_{y,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ] (Längsricht.)	$T_{y,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ] (Längsricht.)
LK 1 kurz	73,8 $\geq$ 34,4 (N)	44,7 $\geq$ 2,8 (M)	17,2 $\geq$ 0,6 (V)	75,3 $\geq$ 34,4 (N)	42,4 $\geq$ 20,0 (M)	17,2 $\geq$ 1,1 (V)
LK 2 lang	67,0 $\geq$ 33,7 (N)	36,3 $\geq$ 2,4 (M)	17,2 $\geq$ 0,6 (V)	68,3 $\geq$ 33,7 (N)	34,4 $\geq$ 19,7 (M)	17,2 $\geq$ 1,0 (V)
LK 3 ständig	0,0	34,4 $\geq$ 0,2 (M)	0,0	0,0	32,6 $\geq$ 0,1 (M)	0,0
LK 4 kurz	73,8 $\geq$ 0,2 (N)	44,7 $\geq$ 0,6 (M)	0,0	75,3 $\geq$ 0,2 (N)	42,4 $\geq$ 0,3 (M)	0,0

Würden sich die Normalspannungen sowohl aus Normalkraft und Biegung zusammensetzen, ist ein summierter Nachweis erforderlich:

$$\frac{N/A}{f_N} + \frac{M/W}{f_M} \leq 1$$

Die aufnehmbaren Querkräfte (V, ILS) sind unabhängig vom betrachteten Laminat.

Vereinfachter Interaktionsnachweis

Es wird der vereinfachte Interaktionsnachweis nach BÜV-Empfehlungen angesetzt:

$$\frac{E_{dN}}{R_{dN}} + \frac{E_{dM}}{R_{dM}} + \frac{E_{dV}}{R_{dV}} \leq 1 \quad (\text{TKB, GL. 8.8})$$

Zylinderwand, LK 1

$$\frac{34,4 \text{ N/mm}^2}{73,8 \text{ N/mm}^2} + \frac{2,8 \text{ N/mm}^2}{44,7 \text{ N/mm}^2} + \frac{0,6 \text{ N/mm}^2}{17,2 \text{ N/mm}^2} = 0,56 \leq 1$$

Zylinderfuß, LK 1

$$\frac{34,4 \text{ N/mm}^2}{75,3 \text{ N/mm}^2} + \frac{20,0 \text{ N/mm}^2}{42,4 \text{ N/mm}^2} + \frac{1,1 \text{ N/mm}^2}{17,2 \text{ N/mm}^2} = 0,99 \leq 1$$

Zylinderwand, LK 2

$$\frac{33,7 \text{ N/mm}^2}{67,0 \text{ N/mm}^2} + \frac{2,4 \text{ N/mm}^2}{36,3 \text{ N/mm}^2} + \frac{0,6 \text{ N/mm}^2}{17,2 \text{ N/mm}^2} = 0,60 \leq 1$$

Zylinderfuß, LK 2

$$\frac{33,7 \text{ N/mm}^2}{68,3 \text{ N/mm}^2} + \frac{19,7 \text{ N/mm}^2}{34,3 \text{ N/mm}^2} + \frac{1,0 \text{ N/mm}^2}{17,2 \text{ N/mm}^2} = 1,13 > 1 (!)$$

Der vereinfachte Interaktionsnachweis ist nicht erfüllt, es ist ein genauerer Nachweis zu erbringen oder die Dimensionierung anzupassen.

Zylinderwand, LK 3

$$0 + \frac{0,2 \text{ N/mm}^2}{34,4 \text{ N/mm}^2} + 0 = 0,01 \leq 1$$

Zylinderfuß, LK 3

$$0 + \frac{0,1 \text{ N/mm}^2}{32,6 \text{ N/mm}^2} + 0 = 0,00 \leq 1$$

Zylinderwand, LK 4

$$\frac{0,2 \text{ N/mm}^2}{73,8 \text{ N/mm}^2} + \frac{0,6 \text{ N/mm}^2}{44,7 \text{ N/mm}^2} + 0 = 0,02 \leq 1$$

Zylinderfuß, LK 4

$$\frac{0,2 \text{ N/mm}^2}{75,3 \text{ N/mm}^2} + \frac{0,3 \text{ N/mm}^2}{42,4 \text{ N/mm}^2} + 0 = 0,01 \leq 1$$

Interaktion gemäß Klassischer Laminattheorie

Gemäß der Klassischen Laminattheorie sind die Spannungen für die Einzelschichten zu ermitteln und dort ein entsprechender Nachweis zu erbringen.

Der Nachweis wird exemplarisch durchgeführt für die Lastkombination, bei der der vereinfachte Nachweis nicht erfüllt werden konnte.

**Laminataufbau Zylinderfuß**

Wickellaminat FM4,  $n = 29$ ,  $\delta = 0,50$  ( $v = 0,333$ )

Der Faservolumenanteil von  $v = 0,333$  gilt im Mittel für das gesamte Laminat, er liegt jedoch bei der Wirrfasermatte (M) geringer als bei der unidirektionalen Faserlage (F). Es wird angenommen, dass der Faseranteil in der unidirektionalen Schicht 50 % höher ist. Die E-Moduln der Einzelschichten und die Querdehnzahl  $v_{21}$  werden über die Mischungsregel in Abhängigkeit des Faservolumenanteils  $v$  bestimmt. Dabei wird angenommen:

Glasfaser:  $E_f = 73\,000 \text{ N/mm}^2$ ,  $v_f = 0,22$

Ungesättigtes Polyesterharz:  $E_m = 4400 \text{ N/mm}^2$ ,  $v_m = 0,35$

*Unidirektionale Schicht*

F: radiale Faserlage  $120 \text{ g/m}^2$ ,  $v = 0,465$  (Annahme) (VDI 2014-1, Abs. 6.2.1)

$$t = 120 \text{ g/m}^2 / (2,5 \text{ g/cm}^3 \cdot 0,465) = 0,144 \text{ mm}$$

$$E_1 = 36299 \text{ N/mm}^2$$

$$E_2 = 12126 \text{ N/mm}^2$$

$$v_{21} = 0,304$$

$$G_{21} = 4749 \text{ N/mm}^2$$

*Wirrfaserschicht*

$$E_1 = E_f \cdot v \cdot E_m \cdot (1-v) \quad (\text{VDI 2014-1, Abs. 6.2.2})$$

M: Wirrfasermatte  $450 \text{ g/m}^2$ ,  $v = 0,31$  (Annahme)

$$t = 450 \text{ g/m}^2 / (2,5 \text{ g/cm}^3 \cdot 0,310) = 0,540 \text{ mm}$$

$$E_1 = E_2 = 12152 \text{ N/mm}^2$$

$$v_{21} = 0,534$$

$$G_{21} = 3962 \text{ N/mm}^2$$

Daraus werden die Steifigkeitsmatrices  $Q_k$  der einzelnen Schichten ermittelt.

$$[Q_k] = \frac{1}{1 - \nu_{21}^2 \cdot (E_2/E_1)} \begin{bmatrix} E_1 & \nu_{21} \cdot E_2 & 0 \\ \nu_{21} \cdot E_2 & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 - \nu_{21}^2 \cdot (E_2/E_1) G_{21} \end{bmatrix} \quad (\text{VDI 2014-3, Abs. 4.2.1})$$

**Tabelle Beispiel 2-10:** Exemplarische Auflistung der Einzelschichten

Nr.	Bez.	T[mm]	Ingenieurkonstanten [N/mm <sup>2</sup> , -]				Steifigkeitsmatrix [Q <sub>k</sub> ]			
			E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	G <sub>21</sub>	ν <sub>21</sub>	Q <sub>11</sub>	Q <sub>12</sub>	Q <sub>22</sub>	Q <sub>33</sub>
1	M	0,540	12152	12152	3962	0,534	16999,5	9077,7	16999,5	3962,0
2	F	0,144	36229	12126	4749	0,304	37385,4	3804,0	12513,1	4749,0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
29	M	0,540	12152	12152	3962	0,534	16999,5	9077,7	16999,5	3962,0

Aus den Einzelsteifigkeiten lässt sich die Gesamtsteifigkeitsmatrix des Laminats ermitteln. Die Belastungen für den untersuchten Lastfall betragen:

### Zylinderfuß, LK 2

#### **Ergebnisse der Schnittgrößenermittlung (Anhang):**

$$n_1 = n_x = 264,2 \text{ kN/m}$$

$$n_2 = n_y = -1,3 \text{ kN/m}$$

$$n_{12} = n_{xy} = 0$$

$$m_1 = m_x = 0,119 \text{ kNm/m}$$

$$m_2 = m_y = 0,330 \text{ kNm/m}$$

$$m_{12} = m_{xy} = 0$$

$$v_x = 0$$

$$v_y = -7,0 \text{ kN/m}$$

Damit ergibt sich folgendes Dehnungs- und Verzerrungsbild:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5,789 & -2,883 & 0 \\ -2,883 & 7,577 & 0 \\ 0 & 0 & 24,001 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{kN}} \cdot \begin{bmatrix} n_1 = 264,2 \text{ kN/m} \\ n_2 = -1,3 \text{ kN/m} \\ n_{12} = 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,533 \\ -0,771 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3}$$

$$\begin{bmatrix} \kappa_1 \\ \kappa_2 \\ \kappa_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,7016 & -0,3523 & 0 \\ -0,3523 & 0,8926 & 0 \\ 0 & 0 & 2,827 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\text{kNm}} \cdot \begin{bmatrix} m_1 = 0,119 \text{ kNm/m} \\ m_2 = 0,330 \text{ kNm/m} \\ m_{12} = 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0328 \\ 0,253 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{1}{\text{m}}$$

(VDI 2014-3, Abs. 5.1.2)

**Tabelle Beispiel 2-11:** Ermittlung der Widerstände für KLED lang

[N/mm <sup>2</sup> ]	faserdominiert				matrixdominiert							
	$\sigma_{11,Rd}^t$		$\sigma_{11,Rd}^c$		$\sigma_{22,Rd}^t$		$\sigma_{22,Rd}^c$		$\tau_{12,Rd}$		$e_{m11}$ [%]	
	zur Faser				⊥ zur Faser							
$\gamma_M \cdot A_{mod}$	1,5 · 1,84				1,5 · 2,39							
Einzelschicht	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M
charakt. Festigkeit	800	100 <sup>2)</sup>	426	100 <sup>2)</sup>	31	100 <sup>2)</sup>	104	100 <sup>2)</sup>	52	50	0,23 <sup>3)</sup>	0,23 <sup>3)</sup>
Bemessungswert	289,9	36,2	154,3	36,2	8,6	27,9	29,0	27,9	14,5	13,9	0,23 <sup>4)</sup>	0,23 <sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Festigkeitswerte für unidirektionale Schicht berechnet auf Grundlage der VDI 2014-3 mit dem Programm „Compositor“ der RWTH Aachen

<sup>2)</sup> Festigkeitswerte für Wirrfaserlaminare nach DIN 18820-2, Tabelle 2, 40 % Glasmassenanteil

<sup>3)</sup> Grenzdehnung nach DIN EN 13121-3 (06/10) Abs. 8.2.4

<sup>4)</sup> Grenzdehnung ist nicht zu faktorisieren

Aus dem Verzerrungszustand können nun die Dehnungen der Einzelschichten ermittelt werden. Innerhalb einer Einzelschicht gilt dann:

Bedingung (1) - Versagen der Verstärkungsfasern:

$$\frac{\sigma_{11,Sd}}{\sigma_{11,Rd}} \leq 1 \quad \text{mit} \quad \sigma_{11,Rd} = \begin{cases} \sigma_{11,Rd}^t & \text{für } \sigma_{11,Sd} > 0 \\ \sigma_{11,Rd}^c & \text{für } \sigma_{11,Sd} < 0 \end{cases} \quad (\text{TKB, GL. 8.9})$$

Bedingung (2) - Versagen der Matrix:

$$\left( \frac{\sigma_{22,Sd}}{\sigma_{22,Rd}} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{12,Sd}}{\tau_{12,Rd}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{11,Sd}}{E_{11} \cdot e_{m11}} \right)^2 < 1 \quad \text{mit} \quad \sigma_{22,Rd} = \begin{cases} \sigma_{22,Rd}^t & \text{für } \sigma_{22,Sd} > 0 \\ \sigma_{22,Rd}^c & \text{für } \sigma_{22,Sd} < 0 \end{cases} \quad (\text{TKB, GL. 8.10})$$

Tabelle Beispiel 2-12: Festigkeitsnachweis für die Einzelschichten

Nr.	Bez	zk [mm]	Dehnungen [ $10^{-4}$ ]		Eingenieurk. [N/mm <sup>2</sup> ; -]			Einwirkung [N/mm <sup>2</sup> ]			Widerstände [N/mm <sup>2</sup> , %]				Nachweis	
			$\epsilon_{1N} + \epsilon_{1M}$	$\epsilon_{2N} + \epsilon_{2M}$	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	$\nu_{21}$	$\sigma_{1,Sd}$	$\sigma_{2,Sd}$	$\tau_{12,Sd}$	$\sigma_{1,Rd}$	$\sigma_{2,Rd}$	$\tau_{12,Rd}$	$em_{11}$	1	2
1	M	-4,788	1,690	-1,982	12152	12152	0,534	10,7	-18,4	0,108	36,2	36,2	27,9	0,23	0,30	0,40
2	F	-4,446	1,679	-1,896	36229	12126	0,304	55,6	-17,3	0,236	289,9	29	14,5	0,23	0,19	0,80
3	M	-4,104	1,668	-1,809	12152	12152	0,534	11,9	-15,6	0,355	36,2	36,2	27,9	0,23	0,33	0,37
4	F	-3,762	1,656	-1,723	36229	12126	0,304	55,4	-15,3	0,464	289,9	29	14,5	0,23	0,19	0,72
5	M	-3,420	1,645	-1,636	12152	12152	0,534	13,1	-12,9	0,563	36,2	36,2	27,9	0,23	0,36	0,35
6	F	-3,078	1,634	-1,550	36229	12126	0,304	55,2	-13,2	0,654	289,9	29	14,5	0,23	0,19	0,65
7	M	-2,736	1,623	-1,463	12152	12152	0,534	14,3	-10,1	0,734	36,2	36,2	27,9	0,23	0,40	0,34
8	F	-2,394	1,612	-1,377	36229	12126	0,304	55,0	-11,1	0,805	289,9	29	14,5	0,23	0,19	0,59
9	M	-2,052	1,600	-1,290	12152	12152	0,534	15,5	-7,4	0,867	36,2	36,2	27,9	0,23	0,43	0,35
10	F	-1,710	1,589	-1,204	36229	12126	0,304	54,8	-9,0	0,919	289,9	29	14,5	0,23	0,19	0,53
11	M	-1,368	1,578	-1,117	12152	12152	0,534	16,7	-4,7	0,962	36,2	36,2	27,9	0,23	0,46	0,37
12	F	-1,026	1,567	-1,031	36229	12126	0,304	54,6	-6,9	0,995	289,9	29	14,5	0,23	0,19	0,49
13	M	-0,684	1,555	-0,944	12152	12152	0,534	17,9	-1,9	1,019	36,2	36,2	27,9	0,23	0,49	0,41
14	F	-0,342	1,544	-0,858	36229	12126	0,304	54,5	-4,9	1,033	289,9	29	14,5	0,23	0,19	0,46
15	M	0,000	1,533	-0,771	12152	12152	0,534	19,1	0,8	1,038	36,2	36,2	27,9	0,23	0,53	0,47
16	F	0,342	1,522	-0,684	36229	12126	0,304	54,3	-2,8	1,033	289,9	29	14,5	0,23	0,19	0,44
17	M	0,684	1,511	-0,598	12152	12152	0,534	20,3	3,5	1,019	36,2	36,2	27,9	0,23	0,56	0,54
18	F	1,026	1,499	-0,511	36229	12126	0,304	54,1	-0,7	0,995	289,9	29	14,5	0,23	0,19	0,43
19	M	1,368	1,488	-0,425	12152	12152	0,534	21,4	6,3	0,962	36,2	36,2	27,9	0,23	0,59	0,62
20	F	1,710	1,477	-0,338	36229	12126	0,304	53,9	1,4	0,919	289,9	8,6	14,5	0,23	0,19	0,45
21	M	2,052	1,466	-0,252	12152	12152	0,534	22,6	9,0	0,867	36,2	36,2	27,9	0,23	0,63	0,72
22	F	2,394	1,454	-0,165	36229	12126	0,304	53,7	3,5	0,805	289,9	8,6	14,5	0,23	0,19	0,58
23	M	2,736	1,443	-0,079	12152	12152	0,534	23,8	11,8	0,734	36,2	36,2	27,9	0,23	0,66	0,83
24	F	3,078	1,432	0,008	36229	12126	0,304	53,6	5,5	0,654	289,9	8,6	14,5	0,23	0,18	0,83
25	M	3,420	1,421	0,094	12152	12152	0,534	25,0	14,5	0,563	36,2	36,2	27,9	0,23	0,69	0,96
26	F	3,762	1,410	0,181	36229	12126	0,304	53,4	7,6	0,464	289,9	8,6	14,5	0,23	0,18	1,20
27	M	4,104	1,398	0,267	12152	12152	0,534	26,2	17,2	0,355	36,2	36,2	27,9	0,23	0,72	1,11
28	F	4,446	1,387	0,354	36229	12126	0,304	53,2	9,7	0,236	289,9	8,6	14,5	0,23	0,18	1,68
29	M	4,788	1,376	0,440	12152	12152	0,534	27,4	20,0	0,108	36,2	36,2	27,9	0,23	0,76	1,26

Der Querkraftverlauf wird aus der einwirkenden Querkraft  $v_y = 7,0$  kN/m berechnet, der Verlauf ist parabolisch.

Es zeigt sich, dass in den Schichten 26 ... 29 die Matrix versagt (Nachweis (2)), während die Fasern nicht überbelastet werden (Nachweis (1)). Die höchste Auslastung liegt in Schicht Nr. 28 vor, wo die unidirektionale Faserlage senkrecht zur Faserrichtung beansprucht wird. Es ist hier eine örtliche Bauteilverstärkung erforderlich.

## 13.4.2 Stabilitätsversagen

### 13.4.2.1 Nachweisformat

Der Nachweis erfolgt in Anlehnung an DIN EN 13121-3

Oberirdische GFK-Tanks und -Behälter – Teil 3: Auslegung und Herstellung

Dort ist in Absatz 10.3. der Nachweis von Zylinderschalen unter Druckbelastung geregelt. Dabei wird unterschieden in:

- kritische Beullast in axialer Richtung
- kritischer Beuldruck in Umfangsrichtung
- kombinierte axiale und radiale Drucklasten

Die herangezogene DIN EN 13121-3 beruht auf anderen Einflussfaktoren (dort als Auslegungsfaktoren bezeichnet) als die BÜV-Empfehlungen für TKB. Insbesondere geht der Faktor, der die Einwirkungsdauer widerspiegelt in der DIN EN 13121-3 beim Beulnachweis mit der Wurzel seines Wertes ein. Im Gegensatz zur Empfehlung werden dort nicht die E-Moduln abgemindert, sondern aus den Auslegungsfaktoren ein globaler Beiwert generiert, dieser beinhaltet auch einen Sicherheitsbeiwert von 2,0.

Im Folgenden werden die Werte der BÜV-Empfehlungen für TKB verwendet, der Faktor  $A_1$  geht jedoch mit dem Wert der Wurzel in die Berechnung ein. Die Einflussfaktoren und der globale Sicherheitsbeiwert werden durch die Reduktion des E-Moduls berücksichtigt. Es wird der 5 %-Quantilwert des E-Moduls herangezogen.

### 13.4.2.2 Charakteristische Werte des E-Moduls

Der Mittelwert des E-Moduls sich gemäß DIN 18820-2, Tabelle 4 (Wickellaminat FM4;  $t_z = 6$  mm) zu:

$$E_{B,\parallel} = 14690 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{B,\perp} = 12290 \text{ N/mm}^2$$

Die 5 %-Quantile sind gemäß DIN 18820-2, Abschnitt 2.1.5 als 0,8-fache Mittelwerte anzusetzen:

$$E_{B,\parallel,k} = 0,8 \cdot 14690 \text{ N/mm}^2 = 11752 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{B,\perp,k} = 0,8 \cdot 12290 \text{ N/mm}^2 = 9832 \text{ N/mm}^2$$

### 13.4.2.3 Globaler Sicherheitsbeiwert und Einflussfaktoren

Teilsicherheitsbeiwert für das Material  $\gamma_M$

Der Teilsicherheitsbeiwert für die Gesamtstabilität wird wie folgt angesetzt:

$$\gamma_M = 1,4 \quad (\text{TKB, Anhang E})$$

(Anmerkung: die DIN EN 13121-3 geht von einem Teilsicherheitsbeiwert von 2,0 aus)

Werkstoffspezifische Einflussfaktoren des E-Moduls

Die maßgebende Lastkombination für den Beulnachweis ist die Kombination aus Wartung (LK 5 – höchste axiale Druckkraft) bei gleichzeitigem Unterdruck (LK 4 – Druckkraft in Umfangsrichtung). Beide Laststellungen sind „kurz“.

$$A_{\text{mod}}^E = \sqrt{(A^{E_1}) \cdot A^{E_2} \cdot A^{E_3}}$$

Dauer der EinwirkungWickelfaserlaminat FM4 mit  $\delta = 0,50$ 

ungetempert

Biegung (maßgebend)

$$A_{1,20l.,B}^{\parallel} = 1,85 - \delta = 1,85 - 0,5 = 1,35$$

(TKB, Tabelle B-1b)

$$A_{1,20l.}^{\perp} = 2,15 - \delta = 2,15 - 0,5 = 1,65$$

(TKB, Tabelle B-1b)

Kurz	$t_a = 1$ Woche $T = 0,57$
$A_{1,kurz}^{\parallel} = 1,19$	
$A_{1,kurz}^{\perp} = 1,33$	

(TKB, Gl. 8.2 bzw. Tabelle 8-1 oder Abb. 8-1)

Medieneinfluss

Wasser

$$A_2^E = 1,2$$

(TKB, Tabelle B-2)

(Betriebstemperatur: 40 °C, getempert)

Temperatureinfluss

$$\text{Matrix} = \text{UP}, 40 \text{ °C} \quad A_3^E = 1,1$$

(TKB, Tabelle A-3b)

$A_{mod}^E = \sqrt{(A_1^E) \cdot A_2^E \cdot A_3^E}$	Kurz
zur Faser (Umfangsrichtung)	$\sqrt{(1,19) \cdot 1,2 \cdot 1,1}$ $= 1,44 = A_{mod,  ,kurz,beul}^E$
⊥ zur Faser (Meridianrichtung)	$\sqrt{(1,33) \cdot 1,2 \cdot 1,1}$ $= 1,52 = A_{mod,⊥,kurz,beul}^E$

Beim Beulnachweis geht  $\sqrt{(A_1)}$  in die Berechnung ein.

$$E_{B,||,d} = 11752 \text{ N/mm}^2 / (1,4 \cdot 1,44) = 5829 \text{ N/mm}^2$$

(entspricht Biegemodul in Umfangsrichtung  $E_{\phi b}$ )

$$E_{B,\perp,d} = 9832 \text{ N/mm}^2 / (1,4 \cdot 1,52) = 4620 \text{ N/mm}^2$$

(entspricht Axialmodul  $E_x$ )

### 13.4.2.4 Nachweise

#### Kritische Beullast in axialer Richtung

$$u_c = k \cdot \sqrt{E_{\phi b} \cdot E_x} \cdot \frac{t^2}{D} \quad (\text{DIN EN 13121-3:2010-06, Gleichung 18})$$

wobei:  $k = \frac{0,84}{\sqrt{1 + \frac{D}{200 \cdot t}}}$  (keine Durchbrüche berücksichtigt)

$u_c$  aufnehmbare Membrankraft in Axialrichtung [kN/m]

$E_{\phi b}$  Biegemodul in Umfangsrichtung

$E_x$  „Axialmodul“ (E-Modul in axiale Richtung, unter zentrischem Zug)

$t$  Wandstärke

$D$  Durchmesser des Zylinders

Hinweis: Im Gegensatz zur DIN EN 13121-3 werden die E-Moduln mit den Einflussfaktoren abgemindert. Dem entsprechend darf die einwirkende Last  $q_{xc}$  gleich der aufnehmbaren Last  $u_c$  sein (vgl. Abs. 13.4.2.1).

$$k = \frac{0,84}{\sqrt{1 + \frac{3500\text{mm}}{200 \cdot 6\text{mm}}}} = 0,42$$

$$u_c = 0,42 \cdot \sqrt{5829 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 4620 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} \cdot \frac{(6\text{mm})^2}{3500\text{mm}} = 22,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}} = 22,4 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{\text{xcd}} = |n_d(\text{LK4})| = |-3,50 \frac{\text{kN}}{\text{m}}| \leq u_c = 22,4 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

(Schnittgröße für Lastkombination 4 aus dem Anhang, dort als n-yy bezeichnet)

#### Kritischer Beuldruck in Umfangsrichtung

Es handelt sich um einen kurzen Zylinder da das Verhältnis von Länge  $L_s$  zu Durchmesser  $D$  kleiner 6 ist.

$$\frac{L_s}{D} = \frac{8000\text{mm}}{3500\text{mm}} = 2,3 \leq 6 (!)$$

$$p_c = 2,40 \cdot \sqrt[4]{E_{\phi b}^3 \cdot E_x} \cdot \frac{D}{L_s} \cdot \left(\frac{t}{D}\right)^{2,5} \quad (\text{DIN EN 13121-3:2010-06, Gleichung 21})$$

$p_c$  aufnehmbarer Unterdruck [N/m<sup>2</sup>]

$E_{\phi b}$  Biegemodul in Umfangsrichtung

$E_x$  Axialmodul

$t$  Wandstärke

D Durchmesser des Zylinders

$L_s$  Zylinderhöhe zwischen Aussteifungen

$$p_c = 2,40 \cdot \sqrt[4]{\left(5829 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right)^3 \cdot 4620 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{3500\text{mm}}{8000\text{mm}} \cdot \left(\frac{6\text{mm}}{3500\text{mm}}\right)^{2,5}} = 703 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$p_{Dd} = 1,5 \cdot 0,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 750 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} > p_c = 703 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} (!)$$

(Für Lastkombination 4 wird mit einem Innendruck von  $-0,5 \text{ kN/m}^2$  gerechnet)

Der Nachweis für den LK4 (Unterdruck) kann nicht erfüllt werden, es ist mittig eine ringförmige Aussteifung anzubringen, dadurch halbiert sich die Länge  $L_s$  zu:

$$L_s = 4000 \text{ mm}$$

$$\rightarrow p_c = 1406 \text{ N/m}^2 \geq 750 \text{ N/m}^2 = p_{Dd}$$

Der Nachweis ist somit erfüllt.

#### Kombinierte axiale und radiale Drucklasten

Bei gleichzeitigem Auftreten axialer und radialer Lasten muss folgende Bedingung erfüllt sein:

$$\left(\frac{q_{xc} \cdot F}{u_c}\right)^{1,25} + \left(\frac{p_D \cdot F}{p_c}\right)^{1,25} \leq 1 \quad (!) \quad (\text{DIN EN 13121-3:2010-06, Gleichung 23})$$

$q_{xc}$  vorhandene Membrankraft in Axialrichtung [kN/m]

$u_c$  aufnehmbare Membrankraft in Axialrichtung [kN/m]

$p_D$  vorhandener Unterdruck [N/m<sup>2</sup>]

$p_c$  aufnehmbarer Unterdruck [N/m<sup>2</sup>]

F Auslegungsfaktor, bei der Beachtung der Einflussfaktoren durch Herabsetzung des E-Moduls kann  $F = 1,0$  angenommen werden

$$\left(\frac{2,473\text{kN} \cdot 1,0}{22,4\text{kN}}\right)^{1,25} + \left(\frac{750 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 1,0}{1406 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}\right)^{1,25} = 0,11^{1,25} + 0,53^{1,25} = 0,52 \leq 1$$

## 13.5 Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

### 13.5.1 Durchbiegungsbegrenzung

#### 13.5.1.1 Nachweisformat

$$wd(t) \leq wd_{max} \quad (\text{TKB, Gl. 8.18})$$

Es wird die Verformung senkrecht zur Schalenebene untersucht, daher Index w.

#### 13.5.1.2 Einwirkungskombinationen

Seltene Kombination

$$E_{d,rare} = E \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \oplus P_k \oplus Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \right\} \quad (\text{TKB, D.4})$$

Kombinationsbeiwerte  $\psi_{0,i}$  gemäß TKB 2014, Tab. D-2

Lastkombination 1:

$$g + (q_F + \Delta T) + \psi_{0,2} \cdot q_{Üb}$$

$$LF10 + (LF22 + LF30) + \psi_{0,2} \cdot LF20$$

*KLED – Kurz*

Kombinationsbeiwert Nutzlast Kategorie E  $\rightarrow \psi_{0,2} = 1,0$  (TKB, Tabelle D-2)

Lastkombination 2:

$$g + (q_F + \Delta T)$$

$$LF10 + (LF22 + LF30)$$

*KLED – Lang*

Lastkombination 3:

$$g$$

$$LF10$$

*KLED – Ständig*

Die Berechnungsergebnisse sind im Anhang dargestellt.

	Verformung in Ringrichtung w [mm]
LK 1	4,0
LK 2	4,0
LK 3	0,0

### 13.5.1.3 Teilsicherheitsbeiwerte und Einflussfaktoren

Teilsicherheitsbeiwert für das Material  $\gamma_M$

Der Teilsicherheitsbeiwert im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird für das Material wie folgt angesetzt:

$$\gamma_M = 1,0$$

Werkstoffspezifische Einflussfaktoren des E-Moduls

Werkstoffspezifische Einflussfaktoren des E-Moduls

$$A_{\text{mod}}^E = A_1^E \cdot A_2^E \cdot A_3^E$$

Ermittlung der Einflussfaktoren

Die Ermittlung der Abminderungsbeiwerte erfolgt analog zum Stabilitätsnachweis.

#### Dauer der Einwirkung

Wickelfaserlaminat FM4 mit  $\delta = 0,50$

ungetempert

Biegung (maßgebend)

$$A_{1,20l,B}^{\parallel} = 1,85 - \delta = 1,85 - 0,5 = 1,35 \quad (\text{TKB, Tabelle B-1b})$$

$$A_{1,20l}^{\perp} = 2,15 - \delta = 2,15 - 0,5 = 1,65 \quad (\text{TKB, Tabelle B-1b})$$

ständig: $t_a = 50$ Jahre T = 1,05	lang: $t_a = 10$ Jahre T = 0,95	kurz: $t_a = 1$ Woche T = 0,57
$A_{1,\text{kurz}}^{\parallel} = 1,37$	$A_{1,\text{kurz}}^{\parallel} = 1,33$	$A_{1,\text{kurz}}^{\parallel} = 1,19$

(TKB, Gl. 8.2 bzw. Tabelle 8-1 oder Abb. 8-1)

#### Medieneinfluss

Wasser

$$A_2^E = 1,2$$

(TKB, Tabelle B-2)

(Betriebstemperatur: 40 °C, getempert)

#### Temperatureinfluss

Matrix = UP, 40 °C

$$A_3^E = 1,1$$

(TKB, Tabelle A-3b)

$A_{\text{mod}}^E = A_1^E \cdot A_2^E \cdot A_3^E$	ständig	lang	kurz
zur Faser (Umfangsrichtung)	$1,37 \cdot 1,2 \cdot 1,1 = 1,81$	$1,33 \cdot 1,2 \cdot 1,1 = 1,76$	$1,19 \cdot 1,2 \cdot 1,1 = 1,57$

Für die Verformungsberechnung ist lediglich der Zug-E-Modul in Umfangsrichtung von Interesse, es wird der Mittelwert herangezogen.

$$E_{Z||} = 15430 \text{ N/mm}^2 \quad \text{E-Modul bei Zug-/Druckbelastung in Ringrichtung } ||$$

Bemessungswerte des E-Moduls

$E_d = \frac{E_k}{\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^E}$	<b>ständig</b>	<b>lang</b>	<b>kurz</b>
zur Faser (Umfangsrichtung)	$E_{Z  ,\text{ständig}}$ = $15430 / (1,0 \cdot 1,81)$ = $8525 \text{ N/mm}^2$	$E_{Z  ,\text{lang}}$ = $15430 / (1,0 \cdot 1,76)$ = $8767 \text{ N/mm}^2$	$E_{Z  ,\text{kurz}}$ = $15430 / (1,0 \cdot 1,57)$ = $9828 \text{ N/mm}^2$

#### 13.5.1.4 Bemessungswerte der Einwirkungen

Die zeitabhängigen Verformungen können näherungsweise aus dem Verhältnis  $E(t=0) / E(t)$  berechnet werden. Für  $E(t=0) = 15430 \text{ N/mm}^2$  wurde für die statische Berechnung der Schnittgrößen und der Verformungen für den Zylinder durchgeführt.

Verformung aus Eigenlast (ständig):

$$\text{Lastkombination 3:} \quad \mathbf{w(t)_{d,\text{ständig}} = 15430 / 8525 \cdot 0,00 \text{ mm} = 0,0 \text{ mm}}$$

Verformung aus Eigenlast + Verkehrslast (lang):

$$\text{Lastkombination 2:} \quad \mathbf{w(t)_{d,\text{lang}} = 15430 / 8767 \cdot 4,00 \text{ mm} = 7,0 \text{ mm}}$$

Verformung aus Eigenlast + Verkehrslast + Überdruck (kurz):

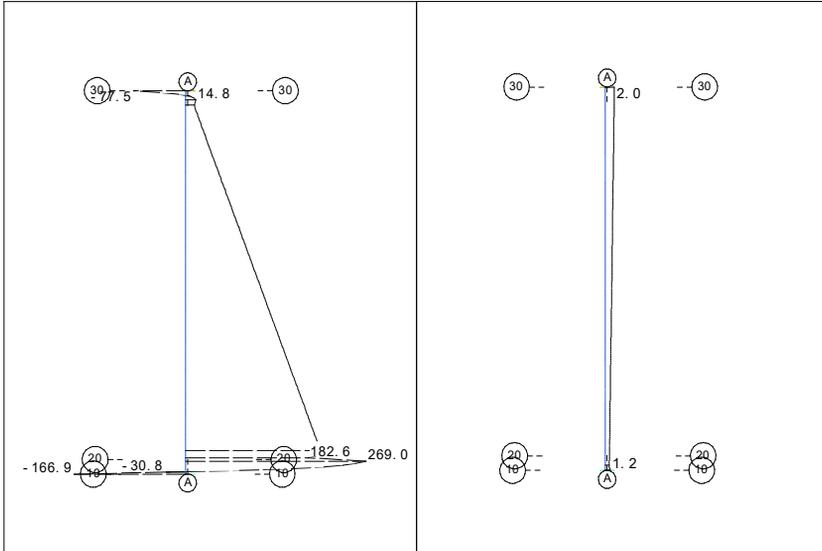
$$\text{Lastkombination 1:} \quad \mathbf{w(t)_{d,\text{kurz}} = 15430 / 9828 \cdot 4,00 \text{ mm} = 6,3 \text{ mm}}$$

Größter Wert ist bemessungsrelevant:  $\mathbf{w(t)_d = 7,0 \text{ mm}}$

Die Lastkombination 2 mit der KLED lang ist für die Verformungen maßgebend.

### 13.6 Berechnungsergebnisse

#### 13.6.1 Lastkombination 1 (Schnittgrößen faktorisiert, Verformungen nicht faktorisiert)

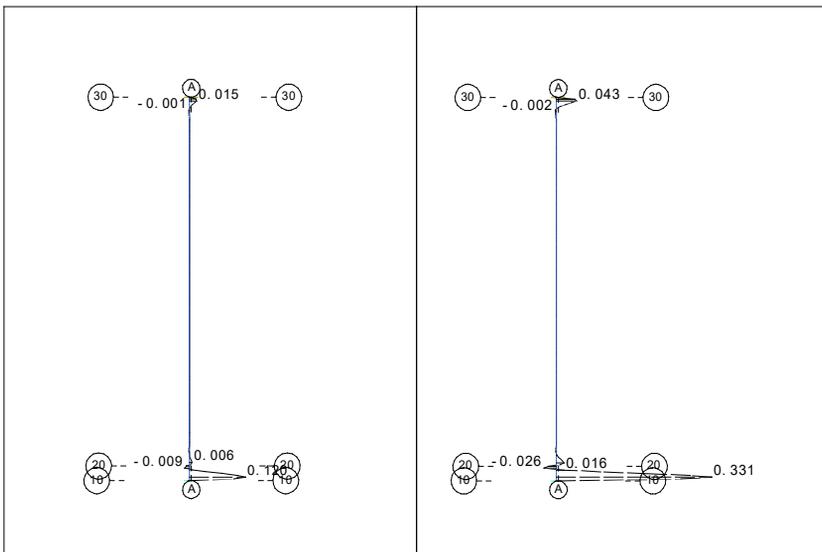


Systemausschnitt  
 Membrankraft  $n_{xx}$  in lokal x im  
 Knoten  $\leftrightarrow$ , nicht linearer Lastfall

M 1 : 100

Systemausschnitt  
 Membrankraft  $n_{yy}$  in lokal y im  
 Knoten  $\downarrow$ , nicht linearer Lastfall

M 1 : 100

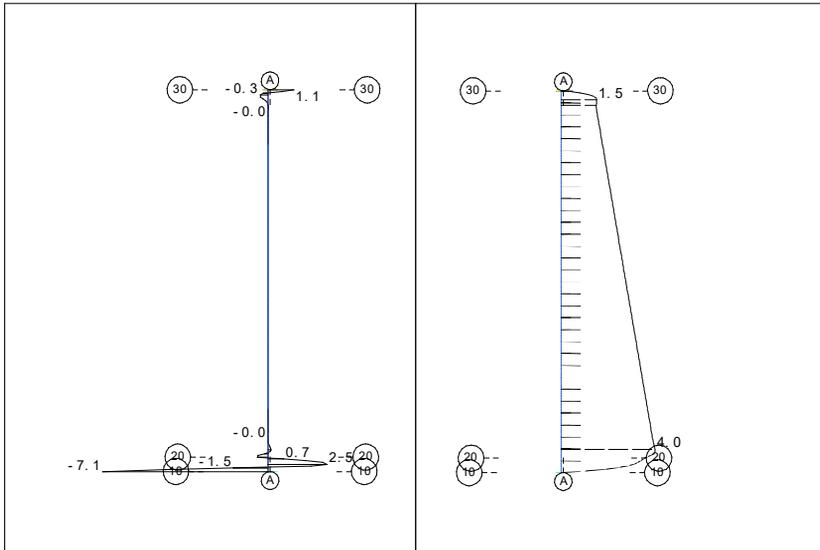


Systemausschnitt  
 Biegemoment  $m_{xx}$  in lokal x im  
 Knoten  $\leftrightarrow$ , nicht linearer Lastfall

M 1 : 100

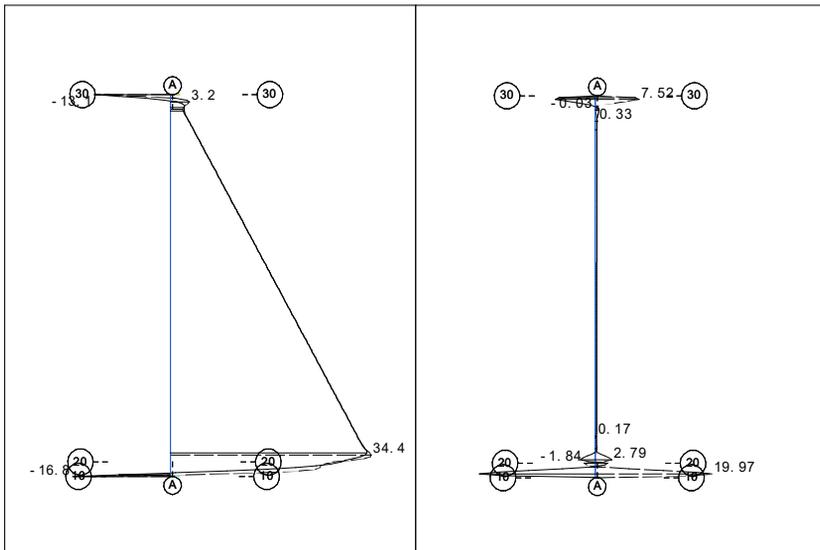
Systemausschnitt  
 Biegemoment  $m_{yy}$  in lokal y im  
 Knoten  $\downarrow$ , nicht linearer Lastfall

M 1 : 100



Systemausschnitt  
 Querkraft  $|v-y|$  im Knoten  $\updownarrow$ ,  
 nichtlinearer Lastfall 101 LK1  
 M 1 : 100

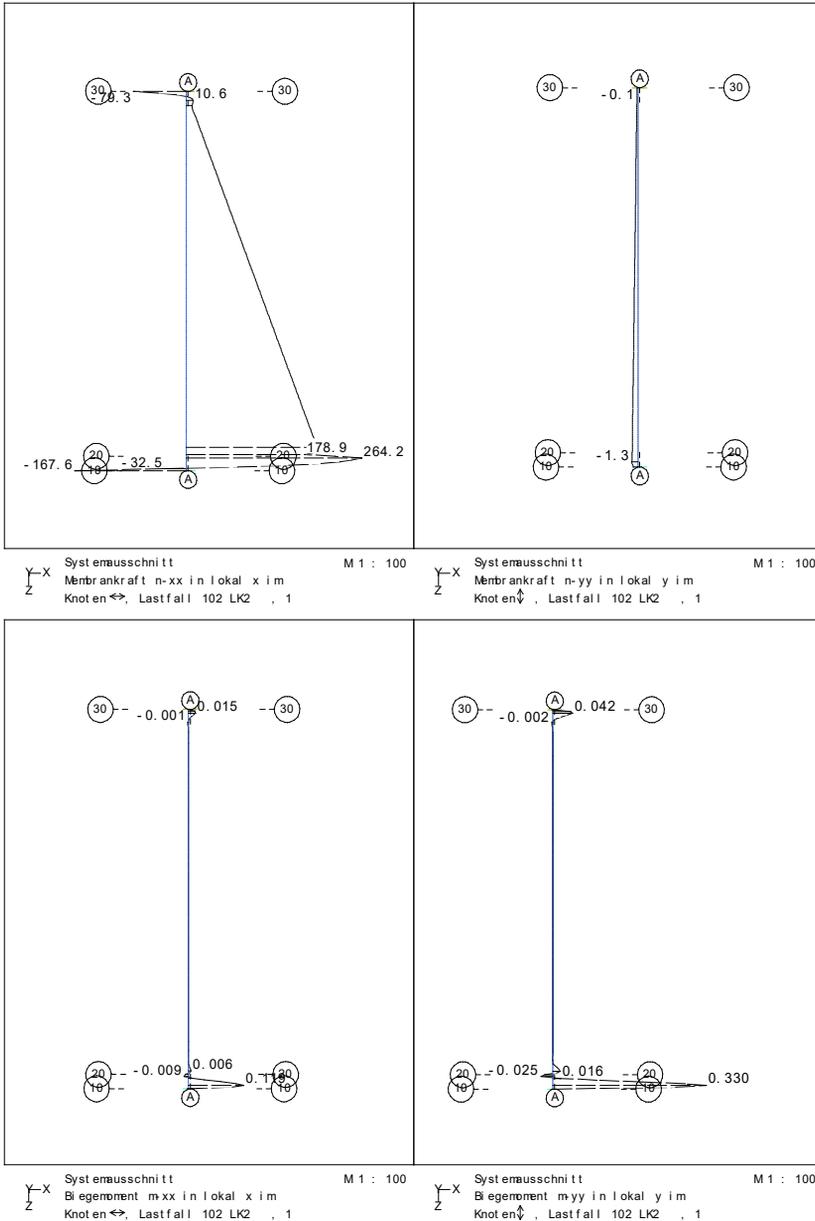
Systemausschnitt  
 Flächenelemente, Verschiebung in  
 lokal z im Knoten  $\leftrightarrow$ , Lastfall 201  
 M 1 : 100

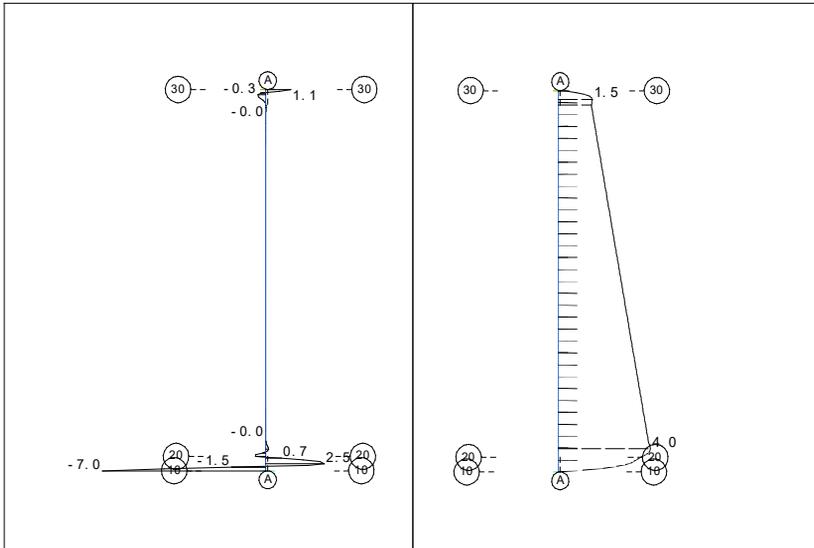


Systemausschnitt  
 Spannung unten in lokal x im  
 Knoten  $\leftrightarrow$ , nichtlinearer Lastfall  
 M 1 : 100

Systemausschnitt  
 Spannung unten in lokal y im  
 Knoten  $\updownarrow$ , nichtlinearer Lastfall  
 M 1 : 100

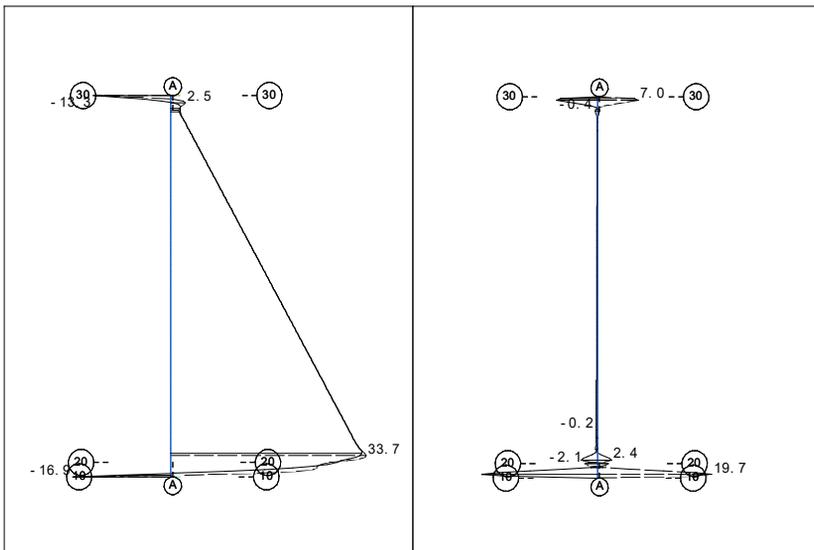
### 13.6.2 Lastkombination 2 (Schnittgrößen faktorisiert, Verformungen nicht faktorisiert)





Systemausschnitt  
 Querkraft  $|v-y|$  im Knoten  $\downarrow$ ,  
 nichtlinearer Lastfall 102 LK2  
 M 1 : 100

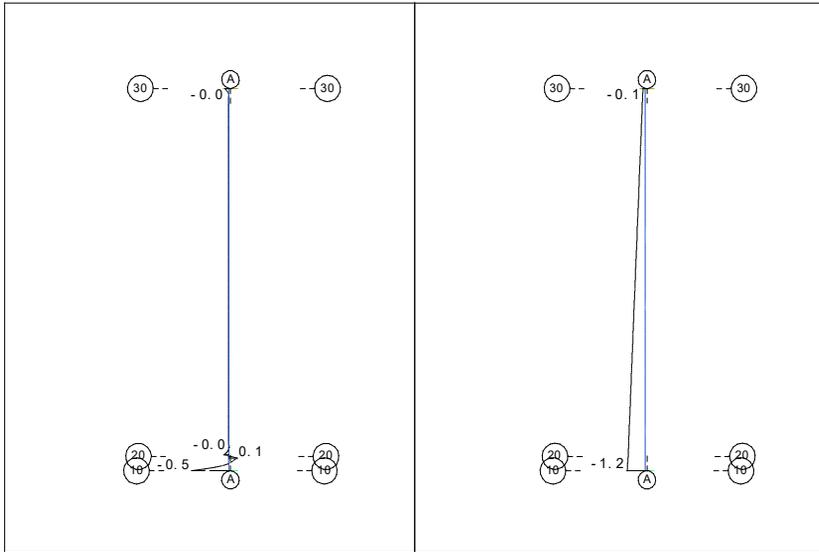
Systemausschnitt  
 Flächenelemente, Verschiebung in  
 lokal z im Knoten  $\leftrightarrow$ , Lastfall 202  
 M 1 : 100



Systemausschnitt  
 Spannung unten in lokal x im  
 Knoten  $\leftrightarrow$ , nichtlinearer Lastfall  
 M 1 : 100

Systemausschnitt  
 Spannung unten in lokal y im  
 Knoten  $\downarrow$ , nichtlinearer Lastfall  
 M 1 : 100

### 13.6.3 Lastkombination 3 (Schnittgrößen faktorisiert, Verformungen nicht faktorisiert)

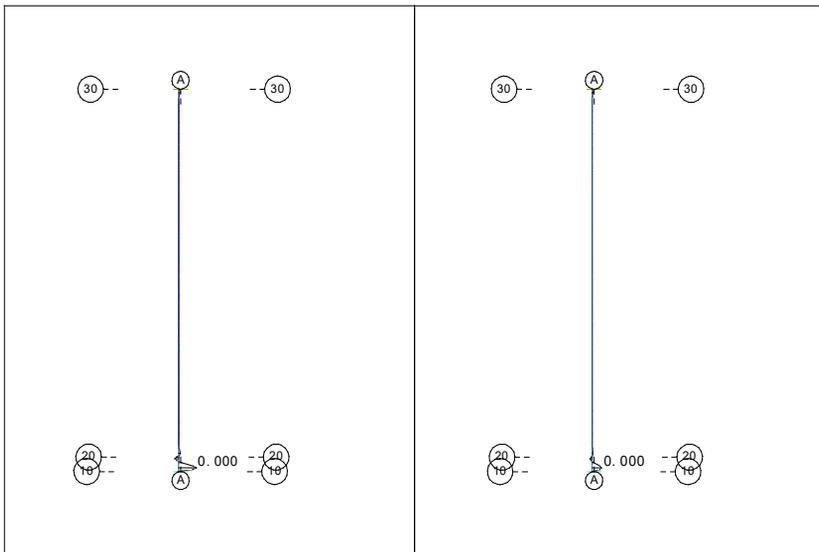


Systemausschnitt  
 Membrankraft  $n_{xx}$  in lokal  $x$  im  
 Knoten  $\leftrightarrow$ , Lastfall 103 LK3, 1

M 1 : 100

Systemausschnitt  
 Membrankraft  $n_{yy}$  in lokal  $y$  im  
 Knoten  $\downarrow$ , Lastfall 103 LK3, 1

M 1 : 100

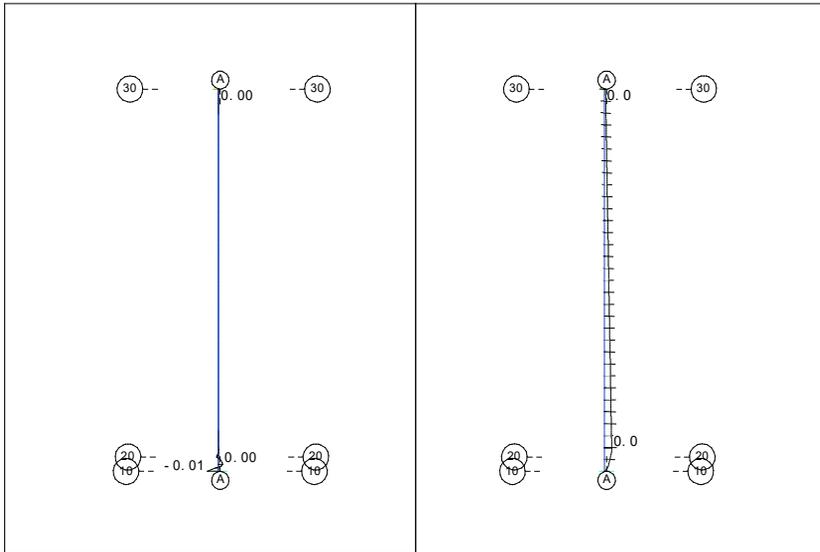


Systemausschnitt  
 Biegemoment  $m_{xx}$  in lokal  $x$  im  
 Knoten  $\leftrightarrow$ , Lastfall 103 LK3, 1

M 1 : 100

Systemausschnitt  
 Biegemoment  $m_{yy}$  in lokal  $y$  im  
 Knoten  $\downarrow$ , Lastfall 103 LK3, 1

M 1 : 100

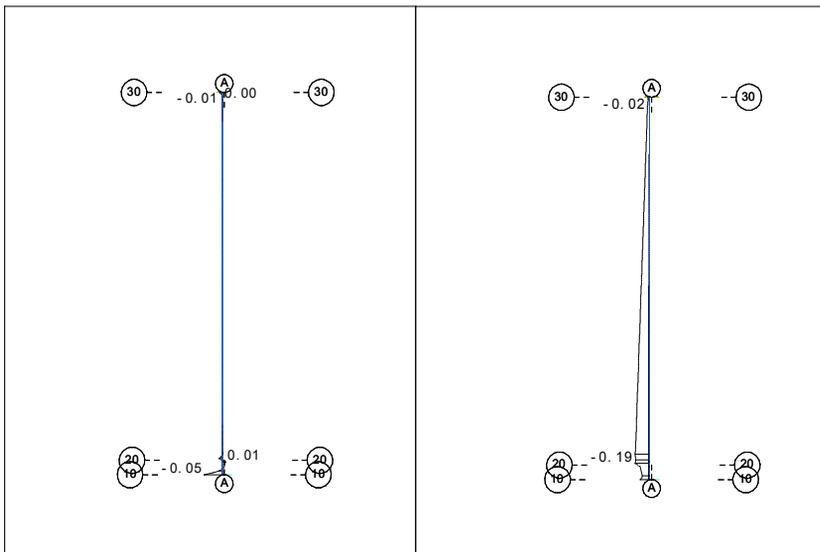


Systemausschnitt  
 Querkraft  $|v-y|$  im Knoten  $\updownarrow$ ,  
 nichtlinearer Lastfall 103 LK3

M 1 : 100

Systemausschnitt  
 Flächenelemente, Verschiebung in  
 lokal z im Knoten  $\leftrightarrow$ , Lastfall 203

M 1 : 100



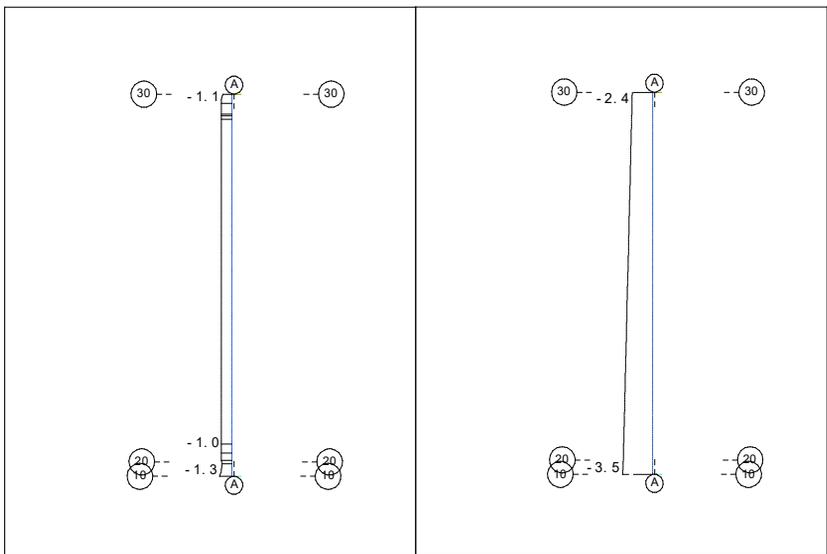
Systemausschnitt  
 Spannung unten in lokal x im  
 Knoten  $\leftrightarrow$ , nichtlinearer Lastfall

M 1 : 100

Systemausschnitt  
 Spannung unten in lokal y im  
 Knoten  $\downarrow$ , nichtlinearer Lastfall

M 1 : 100

### 13.6.4 Lastkombination 4 (Schnittgrößen faktorisiert, Verformungen nicht faktorisiert)

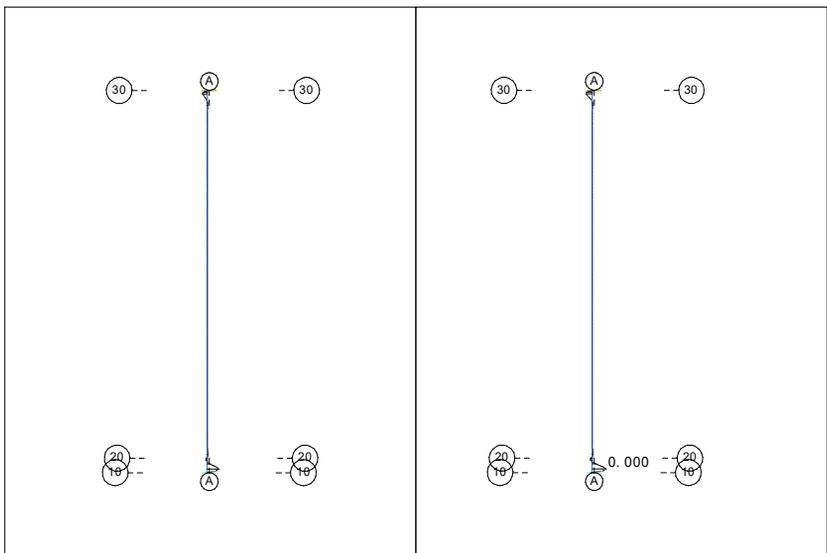


Systemausschnitt  
 Membrankraft  $n_{xx}$  in lokal  $x$  im  
 Knoten  $\leftrightarrow$ , Lastfall 104 LK4, 1

M 1 : 100

Systemausschnitt  
 Membrankraft  $n_{yy}$  in lokal  $y$  im  
 Knoten  $\downarrow$ , Lastfall 104 LK4, 1

M 1 : 100

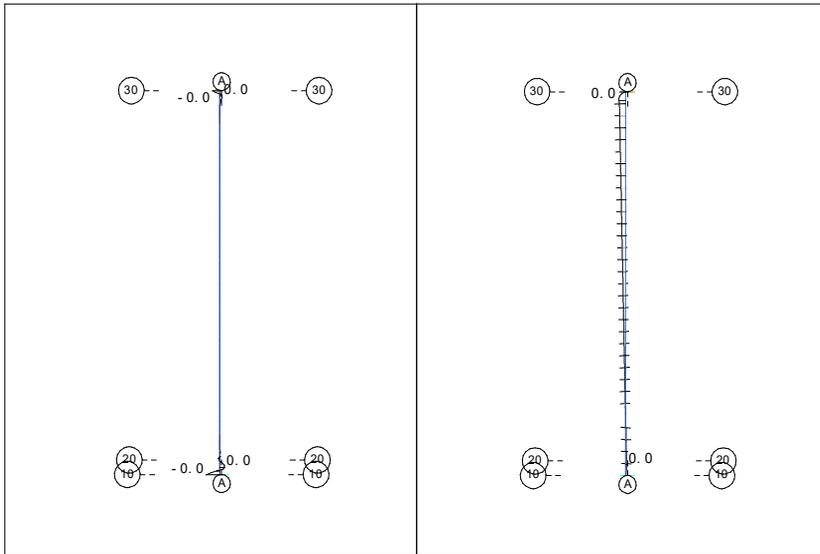


Systemausschnitt  
 Biegemoment  $m_{xx}$  in lokal  $x$  im  
 Knoten  $\leftrightarrow$ , Lastfall 104 LK4, 1

M 1 : 100

Systemausschnitt  
 Biegemoment  $m_{yy}$  in lokal  $y$  im  
 Knoten  $\downarrow$ , Lastfall 104 LK4, 1

M 1 : 100

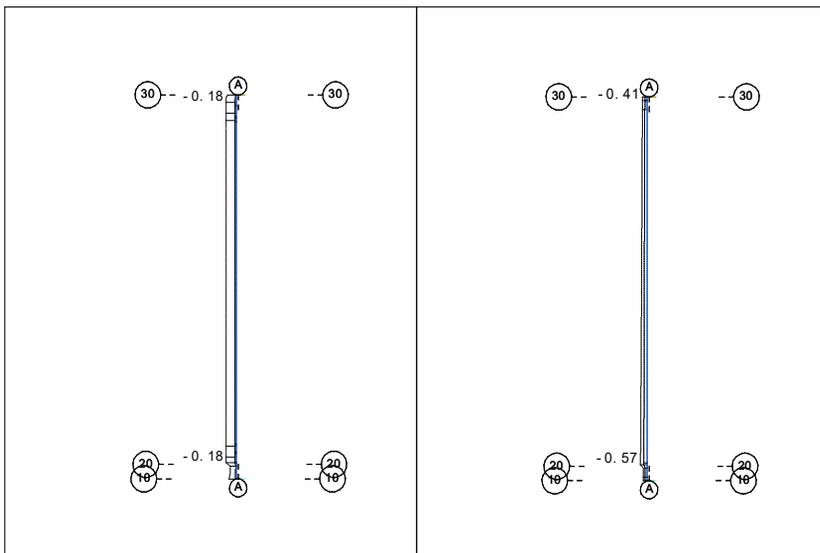


Systemausschnitt  
 Querkraft  $|v-y|$  im Knoten  $\updownarrow$ ,  
 nichtlinearer Lastfall 104 LK4

M 1 : 100

Systemausschnitt  
 Flächenelemente, Verschiebung in  
 Lokal z im Knoten  $\leftrightarrow$ , Lastfall 204

M 1 : 100



Systemausschnitt  
 Spannung unten in lokal x im  
 Knoten  $\leftrightarrow$ , nichtlinearer Lastfall

M 1 : 100

Systemausschnitt  
 Spannung unten in lokal y im  
 Knoten  $\updownarrow$ , nichtlinearer Lastfall

M 1 : 100

### **13.7 Literatur zum Beispiel 2**

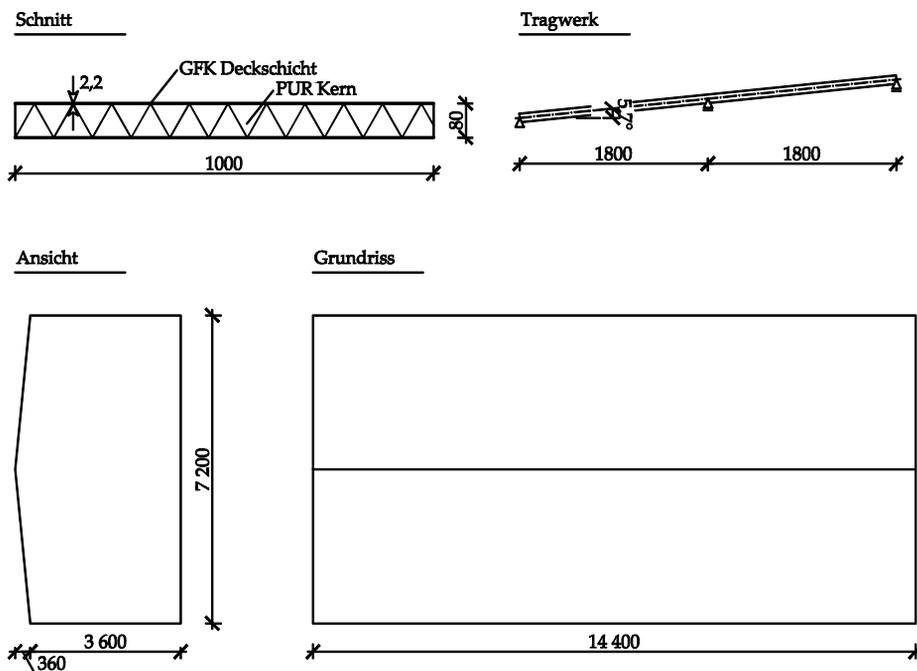
- [1] VDI-Richtlinie 2014: Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund  
Blatt 1: Grundlagen (07/89); Blatt 3: Berechnung (09/06)
- [2] SOFISTIK, FEM-Software der Sofistik AG, Berechnung räumlicher Falwerke
- [3] Compositor: Berechnungsalgorithmen in Excel-Format RWTH Aachen, IKV

## 14 Beispiel 3 Dreischichtige Zweifeldplatte mit Deckschichten aus glasfaserverstärktem Laminat und einer Kernschicht aus PUR-Hartschaum für eine Überdachung

Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers, Dr.-Ing. Markus Gabler, Dr.-Ing. Frédéric Waimer

Vorlage: Prof. Dr.-Ing. Günther Ackermann

### 14.1 Statisches System, Bauwerksform



Die Herstellung der Sandwichbauteile erfolgt kontinuierlich in einer Doppelbandanlage. Zur Verbindung untereinander werden an den offenen Längsrändern aufgesetzte, verzinkte Stahlblechprofile angeordnet, die durch Verbindungsbolzen zusammengepresst und durch selbstklebende Bänder abgedichtet sind. Die Befestigung der Bauteile an den Pfetten erfolgt durch die

vorgenannten Verbindungsbolzen. An First und Traufe werden die Endflächen der Bauteile durch spezielle Abdeckbleche gesichert.

Für dieses Berechnungsbeispiel werden Kenngrößen der DIN 18820 herangezogen, wobei dort teilweise andere Variablen als für die BÜV-Empfehlungen verwendet werden. Es gilt:

$\delta$  Glasmassenanteil (entspricht  $\psi$  nach DIN 18820)

$v$  Glasvolumenanteil (entspricht  $V_G$  nach DIN 18820)

## 14.2 Querschnitt und Werkstoff

### 14.2.1 Laminatdicken

GFK –Deckschicht:  $t_{\text{GFK}} = 2,2 \text{ mm}$

PUR-Kernschicht:  $t_{\text{PUR}} = 80 \text{ mm}$

Breite:  $b = 1 \text{ m}$

### 14.2.2 Material

#### 14.2.2.1 Deckschichten

Wirrfaserlaminat M1, Matrix aus ungesättigtes Polyesterharz (UP), getempert, maschinell gefertigt

Glasmassenanteil  $\delta = 0,25$  (Annahme)

Nach DIN 18820-2 – Tabelle 2 sind:

$m_G$	$= 360 \text{ g/m}^2/\text{mm}$	Glasmasse je Flächeneinheit je mm Laminatdicke
$\rho$	$= 1,43 \text{ g/cm}^3$	Dichte
$\omega_t$	$= 1,0$	Kriechfaktor
$E_k$	$= 5500 \text{ N/mm}^2$	E-Modul als 5 %-Fraktile
$E_m$	$= 6800 \text{ N/mm}^2$	E-Modul als Mittelwert
$f_{Z,k}$	$= 60 \text{ N/mm}^2$	Bruchkraft je Breite und Schichtdicke
$f_{S,k}$	$= 50 \text{ N/mm}^2$	Schubfestigkeit (Allgemeinwert nach DIN 18820)
$\alpha_T$	$= 30 \cdot 10^{-6} / \text{K}$	Wärmeausdehnungskoeffizient für Wirrfaserlaminat

#### 14.2.2.2 Kernschicht

Polyurethan-Hartschaum (PUR) mit Raumgewicht  $\rho = 50 \text{ kg/m}^3$

Nach BÜV-Empfehlungen TKB, Anhang F, Tabelle F-2 gilt:

$E_D$	$= 8 \text{ N/mm}^2$	E-Modul als Mittelwert für Druckbeanspruchung
$G$	$= 4,5 \text{ N/mm}^2$	Schubmodul als Mittelwert
$f_{D,k}$	$= 0,4 \text{ N/mm}^2$	Festigkeit für Druckbeanspruchung
$f_{S,k}$	$= 0,2 \text{ N/mm}^2$	Festigkeit für Schubbeanspruchung

## 14.3 Einwirkungen und Schnittgrößen

### 14.3.1 Übersicht

Nr.	Name	KLED (TKB Tabelle 6-2)
LF 10	Eigenlast	Ständig
LF 20	Verkehrslast	
LF 31 ... LF 34	Temperatur	Mittel <sup>5</sup>
LF 40 und 45	Schneelast	Kurz
LF 51, LF 52	Windlast	kurz

### 14.3.2 LF 10 Eigenlast

$$\gamma_{\text{GFK}} = 14,3 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{\text{PUR}} = 0,50 \text{ kN/m}^3$$

### 14.3.3 LF 31 ... LF 34 Temperatur (DIN EN 1991-1-5)

#### 14.3.3.1 Lufttemperatur

Minimale Außenlufttemperatur  $-24 \text{ }^\circ\text{C}$

Maximale Außenlufttemperatur  $+37 \text{ }^\circ\text{C}$

#### 14.3.3.2 Sommerzustand

Oberfläche, außen, ohne Wind  $T_a = +79 \text{ }^\circ\text{C}$  (DIN EN 1991-1-5 – Tab. 5.2)

Oberfläche, außen, mit Wind  $T_a = +37 \text{ }^\circ\text{C}$  (entspricht Außenlufttemperatur)

Oberfläche, innen  $T_i = +20 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperaturdifferenz, ohne Wind  $\Delta T = +20 \text{ }^\circ\text{C} - 79 \text{ }^\circ\text{C} = -59 \text{ }^\circ\text{C}$  (LF 31)

Temperaturdifferenz, mit Wind  $\Delta T = +20 \text{ }^\circ\text{C} - 37 \text{ }^\circ\text{C} = -17 \text{ }^\circ\text{C}$  (LF 32)

#### 14.3.3.3 Winterzustand

Oberfläche, außen, ohne Schnee/Wind  $T_a = -24 \text{ }^\circ\text{C}$  (DIN EN 1991-1-5 – Tab. 5.2)

Oberfläche, außen, mit Schnee/Wind  $T_a = -5 \text{ }^\circ\text{C}$  (standortabhängig angenommen)

Oberfläche, innen  $T_i = +25 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperaturdifferenz, ohne Schnee/Wind  $\Delta T = +25 \text{ }^\circ\text{C} + 24 \text{ }^\circ\text{C} = +49 \text{ }^\circ\text{C}$  (LF 33)

Temperaturdifferenz, mit Schnee/Wind  $\Delta T = +25 \text{ }^\circ\text{C} + 5 \text{ }^\circ\text{C} = +30 \text{ }^\circ\text{C}$  (LF 34)

<sup>5</sup> tägliche Amplitude ist maßgebend, weil DLT mit Schnittgrößen aus Temperaturgefälle über die Querschnittshöhe

### 14.3.4 LF 40 Schneelast (DIN EN 1991-1)

Schneelastzone 2, Geländehöhe über Meeresebene  $A = NN + 230 \text{ m}$

Dachneigung  $\alpha [30^\circ]$

$$s_i = \mu_i \cdot s_k \quad (\text{DIN EN 1991-1-3 – Gl. 5.3})$$

$$s_k = 0,25 + 1,91 \cdot ((A+140)/760)^2 \geq 0,85 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{DIN EN 1991-1-3/NA – NA. 2})$$

$$s_k = 0,25 + 1,91 \cdot ((230+140)/760)^2 = 0,703 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow s_k = 0,85 \text{ kN/m}^2$$

$$\mu_i = 0,8 \quad (\text{DIN EN 1991-1-3 – Tab. 5.2})$$

$$s_{i,k} = 0,8 \cdot 0,85 \text{ kN/m}^2 = \underline{0,68 \text{ kN/m}^2}$$

### 14.3.5 LF 51 + LF 52 Windlast (DIN EN 1991-1)

Binnenland (Mischprofil der Geländekategorie II + III), Windzone 1

Bezugshöhe  $z_e = 3,60 \text{ m} + 0,36 \text{ m} = 3,96 \text{ m} (\leq 7,0 \text{ m})$

$$w_e = c_{pe} \cdot q(z_e) \quad (\text{DIN 1055-4 – Gl.4})$$

$$q(z) = 1,5 \cdot q_{ref} = \rho_{Luft} \cdot v_{ref}^2 / 2 \quad (\text{DIN 1055-4 – Gl. 10})$$

$$\rho_{Luft} = 1,25 \text{ kg/m}^3; v_{ref} = 22,5 \text{ m/s} \quad (\text{DIN 1055-4 – Bild A.1})$$

$$q(z_e) = 1,5 \cdot 1,25 \text{ kg/m}^3 \cdot (22,5 \text{ m/s})^2 / 2 = \underline{0,475 \text{ kN/m}^2}$$

Winddruckbeiwerte  $c_{pe,10}$  bei allseitig geschlossener Halle, für Flachdächer, scharfkantiger Traufbereich:

maßgebender Sogbeiwert (Bereich G): <u>kN/m<sup>2</sup> (LF 51)</u>	$c_{pe,10} = -1,2$	$\rightarrow \underline{w_{e,Sog} = -0,57}$
--	--------------------	---

maßgebender Druckbeiwert (Bereich I): <u>kN/m<sup>2</sup> (LF 52)</u>	$c_{pe,10} = +0,2$	$\rightarrow \underline{w_{e,Druck} = 0,10}$
--	--------------------	--

### 14.3.6 Lastkombinationen

Zur Bildung der Lastkombinationen (LK) wird zwischen dem Winterzustand (LK 1, 2) und dem Sommerzustand unterschieden (LK 3, 4, 5).

Die Zustände werden in unterschiedlichen Kombinationen betrachtet, da die vorhandene Einwirkungsdauer für den späteren Nachweis relevant ist. So tritt die Gleichzeitigkeit aller Lastfälle nur über eine kurze Dauer auf, während die reine Eigenlast ständig wirkt. Zwar treten bei der

ersten Kombination höhere Schnittgrößen auf, dafür ist der Einflussfaktor auf der Widerstandsseite geringer. Es kann im Voraus nicht abgeschätzt werden, welche der Kombinationen bemessungsrelevant ist. Für das Szenario „Winterzustand“ kann die Betrachtung von ausschließlich Eigenlast entfallen, da das alleinige Auftreten der Eigenlast bereits abgedeckt ist.

Es werden folgende Kombinationen gebildet:

Lastkombination	KLED	maßg. Temp. f. Einflußfaktor $A_3$	Lastfälle
Winterzustand			
LK 1: $g \oplus \Delta T \oplus s \oplus w$	kurz	$T_{\max} = 25 \text{ °C}$ (Oberfläche innen) $T_{\min} = -5 \text{ °C}$ (Oberfläche außen)	LF 10 Eigenlast LF 34 Temperatur (Winter/Schnee) LF 40 Schnee LF 52 Wind (Druck)
LK 2: $g \oplus \Delta T$	mittel	$T_{\max} = 25 \text{ °C}$ (Oberfläche innen) $T_{\min} = -24 \text{ °C}$ (Oberfläche außen)	LF 10 Eigenlast LF 33 Temperatur (Winter)
Sommerzustand			
LK 3: $g$	ständig	$T = 25 \text{ °C}$	LF 10 Eigenlast
LK 4: $g \oplus \Delta T \oplus w$	kurz	$T_{\max} = 37 \text{ °C}$ (Oberfläche außen) $T_{\min} = 20 \text{ °C}$ (Oberfläche innen)	LF 10 Eigenlast LF 32 Temperatur (Sommer/Wind) LF 51 Wind (Sog)
LK 5: $g \oplus \Delta T$	mittel	$T_{\max} = 79 \text{ °C}$ (Oberfläche außen) $T_{\min} = 20 \text{ °C}$ (Oberfläche innen)	LF 10 Eigenlast LF 31 Temperatur (Sommer)

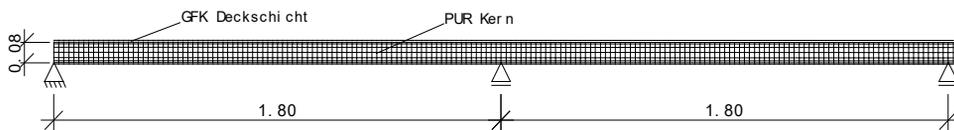
Eigenlast, Wind und Temperatur treten jeweils auf beiden Feldern auf. Für Schneelast wird auch eine halbseitige Belastung berücksichtigt (Lastfall LF 45 bzw. LK 1a), welche nicht für die Tragfähigkeit, jedoch für die Verformung maßgebend wird.

### 14.3.7 Bemessungswerte der Schnittgrößen

$$E_d = E \left\{ \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \oplus \gamma_P \cdot P_k \oplus \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \right\} \quad (\text{TKB, D.1})$$

Ständige Einwirkungen,	ungünstig	$\gamma_{G,\text{sup}} = 1,35$	(TKB, Tabelle D-1)
	günstig	$\gamma_{G,\text{inf}} = 1,0$	
Veränderliche Einwirkungen,	ungünstig	$\gamma_Q = 1,50$	
Kombinationsbeiwert Schnee (< 1000 m)		$\chi_{0,S} = 0,5$	(TKB, Tabelle D-2)
Kombinationsbeiwert Wind		$\psi_{0,W} = 0,6$	
Kombinationsbeiwert Temperatur		$\psi_{0,T} = 0,6$	

In allen Fällen ist die Temperatureinwirkung die maßgebende veränderliche Einwirkung ( $Q_1$ ), alle anderen Veränderlichen werden daher mit dem Kombinationsbeiwert abgemindert.



Die Ermittlung der Schnittgrößen erfolgt mit linear-elastischer FEM-Berechnung. Auf der sicheren Seite wird mit dem mittleren E-Modul unter Raumtemperatur gerechnet; es erfolgt keine Abminderung infolge hoher Temperaturen.

### 14.3.8 Bemessungswerte der Spannungen

Die Berechnungsergebnisse sind im Abschnitt 16.5.2 dargestellt.

Lastkombination	GFK-Deckschicht Membranspannung $\sigma_{sd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	PUR-Kern Schubspannung $T_{sd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
LK 1 „kurz“	16,66 kN/m / 22 cm <sup>2</sup> = <u>7,6 N/mm<sup>2</sup></u>	<u>0,024 N/mm<sup>2</sup></u>
LK 2 „mittel“	22,44 kN/m / 22 cm <sup>2</sup> = <u>10,2 N/mm<sup>2</sup></u>	<u>0,019 N/mm<sup>2</sup></u>
LK 3 „ständig“	0,62 kN/m / 22 cm <sup>2</sup> = <u>0,3 N/mm<sup>2</sup></u>	<u>0,003 N/mm<sup>2</sup></u>
LK 4 „kurz“	9,40 kN/m / 22 cm <sup>2</sup> = <u>4,3 N/mm<sup>2</sup></u>	<u>0,013 N/mm<sup>2</sup></u>
LK 5 „mittel“	25,81 kN/m / 22 cm <sup>2</sup> = <u>11,7 N/mm<sup>2</sup></u>	<u>0,028 N/mm<sup>2</sup></u>

## 14.4 Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit

### 14.4.1 Festigkeit

#### 14.4.1.1 Nachweisformat

$$\sigma_d(t) \leq \frac{f_k}{\gamma_M \cdot A_{mod}^f} = f_d \quad (\text{TKB, Gl. 8.4})$$

## 14.4.1.2 Charakteristische Werte des Widerstands

	<b>GFK-Deckschicht Wirrfaserlaminat M1</b>	<b>PUR-Kern Hartschaum, 50 kg/m<sup>3</sup></b>
Zug-/Druckfestigkeit	$f_{z,k} = 60 \text{ N/mm}^2$	$f_{D,k} = 0,40 \text{ N/mm}^2$
Schubfestigkeit	$f_{S,k} = 50 \text{ N/mm}^2$	$f_{S,k} = 0,20 \text{ N/mm}^2$

## 14.4.1.3 Teilsicherheitsbeiwerte und Einflussfaktoren

Teilsicherheitsbeiwert für das Material  $\gamma_M$

GFK-Deckschicht

Maschinell gefertigte Faserverbundstoffe, Grundkombination - Festigkeit

$$\gamma_M = 1,2 \quad (\text{TKB, Tabelle E-1})$$

PUR-Kern

Grundkombination – Schaumstoffe auf Schub

$$\gamma_M = 1,5 \quad (\text{TKB, Tabelle E-1})$$

Grundkombination – Schaumstoffe auf Druck

$$\gamma_M = 1,2 \quad (\text{TKB, Tabelle E-1})$$

Werkstoffspezifische Einflussfaktoren der Festigkeit (GFK-Deckschicht)

$$A_{\text{mod}}^f = A_1^f \cdot A_2^f \cdot A_3^f$$

Dauer der Einwirkung

$$A_{1,20j}^f = 1,6 \quad (\text{TKB, Tabelle B-1a})$$

$$A_1^f(t) = A_{1,20j}^f{}^T \quad \text{mit} \quad T = 0,253 + 0,142 \cdot \lg(t_a) \quad (\text{TKB, Gl. 8.2})$$

KLED – ständig ( $t_a=50a$ ):

$$T = 0,253 + 0,142 \cdot \lg(438000 \text{ h}) = 1,05 \rightarrow \underline{A_1^f} = 1,6^{1,05} = \underline{1,64}$$

KLED – mittel ( $t_a=0,5a$ ):

$$T = 0,253 + 0,142 \cdot \lg(4380 \text{ h}) = 0,77 \rightarrow \underline{A_1^f} = 1,6^{0,77} = \underline{1,44}$$

KLED – kurz ( $t_a=7 \text{ d}$ ):

$$T = 0,253 + 0,142 \cdot \lg(168 \text{ h}) = 0,57 \rightarrow \underline{A_1^f} = 1,6^{0,57} = \underline{1,31}$$

Medieneinfluss

Sehr geringer Medieneinfluss, getempert  $\rightarrow A_2^f = 1,1$  (TKB, Tabelle B-2)

Es wird vereinfachend und auf der sicheren Seite liegend der Beiwert für beide Deckschichten angesetzt.

Temperatureinfluss

Vereinfachend wird für die Ermittlung der Einflussfaktoren für die Innenschale des Sandwichs mit  $T = 20\text{ °C}$  gerechnet, auch wenn im Rahmen der Schnittgrößenermittlung von einer erhöhten Innenraumtemperatur von  $20\text{ °C}$  ausgegangen wird.

Innenschale und Außenschale (Winter):  $T \leq +20\text{ °C} \rightarrow \underline{A_3^f = 1,00}$  (TKB, Tabelle A-3b)

Außenschale (Sommer + Wind):  $T_a = +37\text{ °C} \rightarrow \underline{A_3^f = 1,17}$  (interpoliert)

Außenschale (Sommer):  $T_a = +79\text{ °C} \rightarrow \underline{A_3^f = 2,70}$  (interpoliert)

$A_{\text{mod}}^f = A_1^f \cdot A_2^f \cdot A_3^f$	Kurz	Mittel	Ständig
$T \leq +20\text{ °C} (25\text{ °C})$	$1,31 \cdot 1,1 \cdot 1,0 = \underline{1,44}$	$1,44 \cdot 1,1 \cdot 1,0 = \underline{1,58}$	$1,64 \cdot 1,1 \cdot 1,0 = \underline{1,80}$
$T = +37\text{ °C}$	$1,31 \cdot 1,1 \cdot 1,17 = \underline{1,69}$	$1,44 \cdot 1,1 \cdot 1,17 = \underline{1,85}$	$1,64 \cdot 1,1 \cdot 1,17 = \underline{2,11}$
$T = +79\text{ °C}$	$1,31 \cdot 1,1 \cdot 2,70 = \underline{3,89}$	$1,44 \cdot 1,1 \cdot 2,70 = \underline{4,28}$	$1,64 \cdot 1,1 \cdot 2,70 = \underline{4,87}$

$$A_{\text{mod,ständig}}^f = 1,80 \geq 1,75 \quad (\text{TKB, Absatz 5.5, Satz (3)})$$

Werkstoffspezifische Einflussfaktoren der Schubfestigkeit (PUR-Kern)

$$A_{\text{mod}}^f = A_1^f \cdot A_2^f \cdot A_3^f$$

Dauer der Einwirkung

Für Schaumstoffe liegt der Grundwert des Langzeiteinflusses  $A_{1,20J}$  nicht vor, sondern nur Angaben für 1000 h, 5000 h und 10 000 h (TKB, Anhang C, Tabelle C-1). Hier gilt:

$$t_a = 1000\text{ h}: \underline{A_1^f = 1,8} \quad (\text{TKB, Tabelle C-1})$$

$$t_a = 5000\text{ h}: \underline{A_1^f = 1,9}$$

$$t_a = 10\,000\text{ h}: \underline{A_1^f = 2,1}$$

Um diese Werte mit dem Nachweiskonzept in Einklang zu bringen, muss zunächst ein passender Grundwert  $A_{1,20J}$  ermittelt werden. Werden die diskreten Zeitangaben  $t_a$  den angegebenen Einflussfaktoren gegenübergestellt, ergibt sich im konkreten Fall für die einzelnen Zeitwerte folgende Grundwerte  $A_{1,20J}$ :

$$t_a = 1000\text{ h}: A_{1,20J} = 2,37$$

$$t_a = 5000\text{ h}: A_{1,20J} = 2,28$$

$$t_a = 10\,000\text{ h}: A_{1,20J} = 2,46$$

Die Bestimmung des Grundwert  $A_{1,20J}$  wird exemplarisch für  $t_a=1000h$  vorgeführt:

Allgemein gilt:

$$A_1(t_a) = (A_{1,1000h})^T; T = a + b \cdot \lg(t_a)$$

$$\text{Zum Zeitpunkt } t = 1\text{min: } 0 = a + b \cdot \lg(0,0166 \text{ h})$$

$$\text{Zum Zeitpunkt } t = 1000\text{h: } 1 = a + b \cdot \lg(1000 \text{ h})$$

Es ergibt sich für  $b=0,173$  und  $a=0,308$ , somit gilt für  $t_a=20J$ :

$$T = 0,372 + 0,209 \cdot \lg(175200) = 1,47$$

und:

$$A_1(t_a=20J) = (1,8)^{1,215} = 2,37$$

Aus den 3 Grundwerten  $A_{1,20J}$  folgt der Mittelwert zu:

$$A_{1,20J} \approx 2,37$$

Und für die akkumulierte Einwirkungsdauer  $t_a$  die Gleichung:

$$A_1^f(t) = A_{1,20J}^T \quad \text{mit} \quad T = 0,253 + 0,142 \cdot \lg(t_a)$$

Daraus können nun die einzelnen Einflussfaktoren abgeschätzt werden:

KLED – ständig ( $t_a=50a$ ):

$$T = 0,253 + 0,142 \cdot \lg(438000 \text{ h}) = 1,05 \rightarrow \underline{A_1^f} = 2,37^{1,05} = \underline{2,47}$$

KLED – mittel ( $t_a=0,5a$ ):

$$T = 0,253 + 0,142 \cdot \lg(4380 \text{ h}) = 0,77 \rightarrow \underline{A_1^f} = 2,36^{0,77} = \underline{1,94}$$

KLED – kurz ( $t_a=7 \text{ d}$ ):

$$T = 0,253 + 0,142 \cdot \lg(168 \text{ h}) = 0,57 \rightarrow \underline{A_1^f} = 2,36^{0,57} = \underline{1,64}$$

#### Medieneinfluss

Medienklasse I  $A_2^f = 1,2$  (TKB, Tabelle C-2)

(infolge Freibewitterung über 25 Jahre und durch Deckschichten geschützt)

#### Temperatureinfluss

Für die Kerntemperatur wird die jeweils maximale Temperatur der beiden Deckplatten angenommen, da GFK im Vergleich zum PUR-Hartschaum eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit besitzt.

Werte für Hartschaum 50 kg/m<sup>3</sup>, Schubfestigkeit.

Innenschale und Außenschale (Winter):  $T \leq + 20 \text{ °C} \rightarrow \underline{A_3^f = 1,00}$  (TKB, Tabelle C-3)

Außenschale (Sommer + Wind):  $T_a = + 37 \text{ °C} \rightarrow \underline{A_3^f = 1,1}$  (Wert für 40 °C)

Außenschale (Sommer):  $T_a = + 79 \text{ °C} \rightarrow \underline{A_3^f = 1,9}$  (Wert für 80 °C)

$A_{\text{mod}}^f = A_1^f \cdot A_2^f \cdot A_3^f$	Kurz	Mittel	Ständig
$T \leq + 20 \text{ °C} (25 \text{ °C})$	$1,64 \cdot 1,2 \cdot 1,0 = \underline{1,97}$	$1,94 \cdot 1,2 \cdot 1,0 = \underline{2,33}$	$2,47 \cdot 1,2 \cdot 1,0 = \underline{2,96}$
$T = + 37 \text{ °C}$	$1,64 \cdot 1,2 \cdot 1,1 = \underline{2,16}$	$1,94 \cdot 1,2 \cdot 1,1 = \underline{2,56}$	$2,47 \cdot 1,2 \cdot 1,1 = \underline{3,26}$
$T = + 79 \text{ °C}$	$1,64 \cdot 1,2 \cdot 1,9 = \underline{3,74}$	$1,94 \cdot 1,2 \cdot 1,9 = \underline{4,42}$	$2,47 \cdot 1,2 \cdot 1,9 = \underline{5,63}$

$A_{\text{mod,ständig}}^f = 2,96 \geq 1,75$  (TKB, Absatz 5.5, Satz (3))

#### 14.4.1.4 Bemessungswerte des Widerstandes

Zug- und Druckfestigkeit der GFK-Deckschicht

$f_d = f_k / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^f)$	Kurz	Mittel	Ständig
$T \leq + 20 \text{ °C} (25 \text{ °C})$	$60 / (1,2 \cdot 1,44) = \underline{34,7 \text{ N/mm}^2}$	$60 / (1,2 \cdot 1,58) = \underline{31,6 \text{ N/mm}^2}$	$60 / (1,2 \cdot 1,80) = \underline{27,8 \text{ N/mm}^2}$
$T = + 37 \text{ °C}$	$60 / (1,2 \cdot 1,69) = \underline{29,6 \text{ N/mm}^2}$	$60 / (1,2 \cdot 1,85) = \underline{27,0 \text{ N/mm}^2}$	$60 / (1,2 \cdot 2,11) = \underline{23,7 \text{ N/mm}^2}$
$T = + 79 \text{ °C}$	$60 / (1,2 \cdot 3,89) = \underline{12,9 \text{ N/mm}^2}$	$60 / (1,2 \cdot 4,28) = \underline{11,7 \text{ N/mm}^2}$	$60 / (1,2 \cdot 4,87) = \underline{10,3 \text{ N/mm}^2}$

Schubfestigkeit des PUR-Kerns

$f_d = f_k / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^f)$	Kurz	Mittel	Ständig
$T \leq + 20 \text{ °C} (25 \text{ °C})$	$0,20 / (1,97 \cdot 1,5) = \underline{0,068 \text{ N/mm}^2}$	$0,20 / (2,33 \cdot 1,5) = \underline{0,057 \text{ N/mm}^2}$	$0,20 / (2,96 \cdot 1,5) = \underline{0,045 \text{ N/mm}^2}$
$T = + 37 \text{ °C}$	$0,20 / (2,16 \cdot 1,5) = \underline{0,062 \text{ N/mm}^2}$	$0,20 / (2,56 \cdot 1,5) = \underline{0,052 \text{ N/mm}^2}$	$0,20 / (3,26 \cdot 1,5) = \underline{0,041 \text{ N/mm}^2}$
$T = + 79 \text{ °C}$	$0,20 / (3,74 \cdot 1,5) = \underline{0,036 \text{ N/mm}^2}$	$0,20 / (4,42 \cdot 1,5) = \underline{0,030 \text{ N/mm}^2}$	$0,20 / (5,63 \cdot 1,5) = \underline{0,024 \text{ N/mm}^2}$

### 14.4.1.5 Nachweise

#### Spannungsnachweise

Lastkombination	GFK-Deckschicht Membranspannung $\sigma_{sd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	PUR-Kern Schubspannung $\tau_{sd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
LK 1 (kurz, 25 °C)	7,6 N/mm <sup>2</sup> ≤ 34,7 N/mm <sup>2</sup>	0,024 N/mm <sup>2</sup> ≤ 0,068 N/mm <sup>2</sup>
LK 2 (mittel, 25 °C)	10,2 N/mm <sup>2</sup> ≤ 31,6 N/mm <sup>2</sup>	0,019 N/mm <sup>2</sup> ≤ 0,057 N/mm <sup>2</sup>
LK 3 (ständig, 25 °C)	0,3 N/mm <sup>2</sup> ≤ 27,8 N/mm <sup>2</sup>	0,003 N/mm <sup>2</sup> ≤ 0,045 N/mm <sup>2</sup>
LK 4 (kurz, 37 °C)	4,3 N/mm <sup>2</sup> ≤ 29,6 N/mm <sup>2</sup>	0,013 N/mm <sup>2</sup> ≤ 0,062 N/mm <sup>2</sup>
LK 5 (mittel, 79 °C)	11,7 N/mm <sup>2</sup> ≤ 11,7 N/mm <sup>2</sup>	0,028 N/mm <sup>2</sup> ≤ 0,030 N/mm <sup>2</sup>

#### Vereinfachter Interaktionsnachweis

$$\frac{E_{dN}}{R_{dN}} + \frac{E_{dM}}{R_{dM}} + \frac{E_{dV}}{R_{dV}} \leq 1 \quad (\text{TKB, Gl. 8.8})$$

Dieser Nachweis kann hier entfallen, da die Anteile aus Biegung über die Deckschichten, die Querkraft über die Kernschicht abgetragen werden. Im Bauteil wird somit keine überlagerte Beanspruchung angesetzt.

#### Verbindung zwischen Deckschichten und Kernschichten

Im Herstellungsprozess ist durch geeignete Maßnahmen an den Innenseiten der Deckschichten sowie durch die Zusammensetzung des Schaumstoffes und den technologischen Parametern im Aufschäumprozess zu gewährleisten, dass eine einwandfreie Verklebung stattfindet und damit kein Bruch in dieser Verbindungsfuge entsteht.

## 14.4.2 Stabilitätsversagen

### 14.4.2.1 Nachweisformat

Es wird im Folgenden die Knickstabilität der Deckschicht untersucht, die Klasse der Lasteinwirkungsdauer KLED spielt hier eine entscheidende Rolle, weshalb die Kennwerte in Abhängigkeit der Einwirkungsdauer  $t_a$  untersucht werden.

Für das lokale Knittern der Deckschicht gilt:

$$\sigma_d(t_a) [ \sigma_{cr}(t_a) ] \quad (\text{TKB, Gl. 8.12})$$

Dabei ist die theoretische kritische Spannung:

$$\sigma_{cr,d}(t) = 0,82 \cdot \sqrt[3]{E_{D,d}(t_a) \cdot E_{K,d}(t_a) \cdot G_{K,d}(t_a)} \quad \text{Literatur [3]}$$

$E_{D,d}(t_a)$ . zeitabhängiger Bemessungswert des E-Moduls der Deckschicht

$E_{K,d}(t_a)$ . zeitabhängiger Bemessungswert des E-Moduls der Kernschicht

$G_{K,d}(t_a)$ . zeitabhängiger Bemessungswert des G-Moduls der Kernschicht

### 14.4.3 Charakteristische Werte des E-Moduls

Mittelwerte der Moduln:

$$E_{D,m} = 6800 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{vgl. 2.2.1 – GFK-Deckschicht})$$

$$E_{K,m} = 8 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{vgl. 2.2.2 - PUR-Kernschicht})$$

$$G_{K,m} = 4,5 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{vgl. 2.2.2 – PUR-Kernschicht})$$

Für die GFK-Deckschicht ist der charakteristische Wert  $E_{0,05}$  bereits bekannt.

$$E_{D,k} = 5500 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{vgl. 2.2.1 – GFK-Deckschicht})$$

Für die Kernschicht erfolgt die Abschätzung der 5 %-Quantile in Anlehnung an DIN 18820-2, Abschnitt 2.1.5 durch Faktorisierung mit 0,8.

$$E_{K,k} = 0,8 \cdot 8 \text{ N/mm}^2 = 6,4 \text{ N/mm}^2$$

$$G_{K,k} = 0,8 \cdot 4,5 \text{ N/mm}^2 = 3,6 \text{ N/mm}^2$$

#### 14.4.3.1 Teilsicherheitsbeiwert, Einflussfaktoren

Teilsicherheitsbeiwert für das Material  $\gamma_M$

Deckschicht, Maschinell gefertigte Faserverbundstoffe, Grundkombination – örtliche Stabilität

$$\gamma_M = 1,4 \quad (\text{TKB, Tabelle E-1})$$

Kernschicht, Schaumstoffe auf Schub, Grundkombination – örtliche Stabilität

$$\gamma_M = 1,7 \quad (\text{TKB, Tabelle E-1})$$

Kernschicht, Schaumstoffe auf Druck, Grundkombination – örtliche Stabilität

$$\gamma_M = 1,4 \quad (\text{TKB, Tabelle E-1})$$

Werkstoffspezifische Einflussfaktoren des E-Moduls (GFK-Deckschicht)

$$A_{mod}^E = \sqrt{(A^{E_1}) \cdot A^{E_2} \cdot A^{E_3}}$$

Dauer der Einwirkung –  $A_1$ 

Grundwert:  $\underline{A_{1,20}^E} = 2,4 - 2 \cdot \delta = 2,4 - 2 \cdot 0,25 = \underline{1,9}$  (TKB, Tabelle B-1b)

$A_1^E(t_a) = A_{1,20}^E \cdot T$  mit  $T = 0,253 + 0,142 \cdot \lg(t_a)$  (TKB, Gl. 8.2)

KLED – ständig ( $t_a=50a$ )

$T = 0,253 + 0,142 \cdot \lg(438000 \text{ h}) = 1,05 \rightarrow \underline{A_{1,50a}^E} = 1,9^{1,05} = \underline{1,96}$

KLED – mittel ( $t_a=0,5a$ )

$T = 0,253 + 0,142 \cdot \lg(4380 \text{ h}) = 0,77 \rightarrow \underline{A_{1,0,5a}^E} = 1,9^{0,77} = \underline{1,64}$

KLED – kurz ( $t_a=7 \text{ d}$ )

$T = 0,253 + 0,142 \cdot \lg(168 \text{ h}) = 0,57 \rightarrow \underline{A_{1,7d}^E} = 1,9^{0,57} = \underline{1,44}$

Medieneinfluss –  $A_2$ 

Sehr geringer Medieneinfluss, getempert  $\rightarrow A_2^E = 1,1$  (TKB, Tabelle B-2)

Es wird vereinfachend und auf der sicheren Seite liegend der Beiwert für beide Deckschichten angesetzt.

Temperatureinfluss –  $A_3$ 

Vereinfachend wird für die Ermittlung der Einflussfaktoren für die Innenschale des Sandwichs mit  $T = 20 \text{ °C}$  gerechnet, auch wenn im Rahmen der Schnittgrößenermittlung von einer erhöhten Innenraumtemperatur von  $20 \text{ °C}$  ausgegangen wird.

Innenschale und Außenschale (Winter):  $T \leq +20 \text{ °C} \rightarrow \underline{A_{3,T \leq 20}^E} = 1,0$  (TKB, Tabelle A-3b)

Außenschale (Sommer + Wind):  $T_a = +37 \text{ °C} \rightarrow \underline{A_{3,T_a=37}^E} = 1,1$  (interpoliert)

Außenschale (Sommer):  $T_a = +79 \text{ °C} \rightarrow \underline{A_{3,T_a=79}^E} = 1,43$  (interpoliert)

$A_{\text{mod}}^E = \sqrt{(A_{1,T}^E) \cdot A_2^E \cdot A_3^E}$	Kurz	Mittel	Ständig
$T \leq +20 \text{ °C} (25 \text{ °C})$	$\sqrt{(1,44) \cdot 1,1 \cdot 1,0}$ $= \underline{1,32}$	$\sqrt{(1,64) \cdot 1,1 \cdot 1,0}$ $= \underline{1,41}$	$\sqrt{(1,96) \cdot 1,1 \cdot 1,0}$ $= \underline{1,54}$
$T = +37 \text{ °C}$	$\sqrt{(1,44) \cdot 1,1 \cdot 1,1}$ $= \underline{1,45}$	$\sqrt{(1,64) \cdot 1,1 \cdot 1,1}$ $= \underline{1,55}$	$\sqrt{(1,96) \cdot 1,1 \cdot 1,1}$ $= \underline{1,69}$
$T = +79 \text{ °C}$	$\sqrt{(1,44) \cdot 1,1 \cdot 1,43}$ $= \underline{1,89}$	$\sqrt{(1,64) \cdot 1,1 \cdot 1,43}$ $= \underline{2,01}$	$\sqrt{(1,96) \cdot 1,1 \cdot 1,43}$ $= \underline{2,20}$

$A_{\text{mod,ständig}}^E = 1,54 \geq 1,35$

(TKB, Absatz 5.5, Satz (3))

Werkstoffspezifische Einflussfaktoren der E- und G-Moduln (PUR-Kern)

$$A_{\text{mod}}^E = \sqrt{(A^{E_1}) \cdot A^{E_2} \cdot A^{E_3}}$$

$$A_{\text{mod}}^G = \sqrt{(A^{G_1}) \cdot A^{G_2} \cdot A^{G_3}}$$

### Dauer der Einwirkung – $A_1$

Für Schaumstoffe liegt der Grundwert des Langzeiteinflusses  $A_{1,20J}$  nicht vor, sondern nur Angaben für 1000 h, 5000 h und 10 000 h (TKB, Anhang C, Tabelle C-1). Hier gilt:

$$t_a = 1000 \text{ h:} \quad \underline{A_{1,20J}^E = 2,0} \quad \underline{A_{1,20J}^G = 2,6} \quad (\text{TKB, Tabelle C-1})$$

$$t_a = 5000 \text{ h:} \quad \underline{A_{1,20J}^E = 3,0} \quad \underline{A_{1,20J}^G = 3,9}$$

$$t_a = 10000 \text{ h:} \quad \underline{A_{1,20J}^E = 3,4} \quad \underline{A_{1,20J}^G = 4,4}$$

Um diese Werte mit dem Nachweiskonzept in Einklang zu bringen, muss zunächst ein passender Grundwert  $A_{1,20J}$  ermittelt werden. Werden die diskreten Zeitangaben  $t_a$  den angegebenen Einflussfaktoren gegenübergestellt und wie in 4.1.3.3 exemplarisch berechnet, ergeben sich im konkreten Fall für die einzelnen Zeitwerte folgende Grundwerte  $A_{1,20J}$ :

$$t_a = 1000 \text{ h:} \quad \underline{A_{1,20J}^E = 2,77} \quad \underline{A_{1,20J}^G = 2,6}$$

$$t_a = 5000 \text{ h:} \quad \underline{A_{1,20J}^E = 4,09} \quad \underline{A_{1,20J}^G = 3,9}$$

$$t_a = 10000 \text{ h:} \quad \underline{A_{1,20J}^E = 4,42} \quad \underline{A_{1,20J}^G = 4,4}$$

Daraus folgt der Mittelwert für die Grundwerte:

$$A_{1,20J}^E \approx 3,76 \text{ und } A_{1,20J}^G \approx 3,28$$

Und für die akkumulierte Einwirkungsdauer  $t_a$  die Gleichung:

$$A_1^f(t) = A_{1,20J}^T \quad \text{mit} \quad T = 0,253 + 0,142 \cdot \lg(t_a)$$

Daraus können nun die einzelnen Einflussfaktoren abgeschätzt werden:

KLED – ständig ( $t_a=50a$ ):

$$T = 0,253 + 0,142 \cdot \lg(438000 \text{ h}) = 1,05 \rightarrow \underline{A_{1,20J}^E = 3,76^{1,05} = 4,02} \quad \underline{A_{1,20J}^G = 3,28^{1,05} = 3,74}$$

KLED – mittel ( $t_a=0,5a$ ):

$$T = 0,253 + 0,142 \cdot \lg(4380 \text{ h}) = 0,77 \rightarrow \underline{A_{1,20J}^E = 3,76^{0,77} = 2,77} \quad \underline{A_{1,20J}^G = 3,28^{0,77} = 2,60}$$

KLED – kurz ( $t_a=7 \text{ d}$ ):

$$T = 0,253 + 0,142 \cdot \lg(168 \text{ h}) = 0,57 \rightarrow \underline{A_{1,20J}^E = 3,76^{0,57} = 2,13} \quad \underline{A_{1,20J}^G = 3,28^{0,57} = 2,58}$$

### Medieneinfluss – $A_2$

Infolge Freibewitterung über 25 Jahre und durch Deckschicht geschützt:

$$A^E = A^G = 1,2 \quad (\text{TKB, Tabelle C-2})$$

Temperatureinfluss – A<sub>3</sub>

Für die Kerntemperatur wird die jeweils maximale Temperatur der beiden Deckplatten angenommen, da GFK im Vergleich zum PUR-Hartschaum eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit besitzt. Werte für Hartschaum 50 kg/m<sup>3</sup>:

Innenschale und Außenschale (Winter):  $T \leq + 20 \text{ °C}$

$$\underline{A^E_3 = A^G_3 = 1,0} \quad (\text{TKB, Tabelle C-3})$$

Außenschale (Sommer + Wind):  $T_a = + 37 \text{ °C}$

$$\underline{A^E_3 = 1,2} \quad \underline{A^G_3 = 1,1} \quad (\text{Werte für } 40 \text{ °C})$$

Außenschale (Sommer):  $T_a = + 79 \text{ °C}$

$$\underline{A^E_3 = 1,4} \quad \underline{A^G_3 = 1,9} \quad (\text{Werte für } 80 \text{ °C})$$

Kernschicht $A^E_{\text{mod}} = \sqrt{A^E_1} \cdot A^E_2 \cdot A^E_3$ $A^G_{\text{mod}} = \sqrt{A^G_1} \cdot A^G_2 \cdot A^G_3$	Kurz		Mittel		Ständig	
	$A^E_{\text{mod}}$	$A^G_{\text{mod}}$	$A^E_{\text{mod}}$	$A^G_{\text{mod}}$	$A^E_{\text{mod}}$	$A^G_{\text{mod}}$
$T \leq + 20 \text{ °C}$ (25 °C)	$\sqrt{(2,13) \cdot 1,2 \cdot 1,0} = \underline{1,75}$	$\sqrt{(2,58) \cdot 1,2 \cdot 1,0} = \underline{1,93}$	$\sqrt{(2,77) \cdot 1,2 \cdot 1,0} = \underline{2,00}$	$\sqrt{(3,60) \cdot 1,2 \cdot 1,0} = \underline{2,28}$	$\sqrt{(4,02) \cdot 1,2 \cdot 1,0} = \underline{2,41}$	$\sqrt{(5,74) \cdot 1,2 \cdot 1,0} = \underline{2,87}$
$T = + 37 \text{ °C}$	$\sqrt{(2,13) \cdot 1,2 \cdot 1,2} = \underline{2,10}$	$\sqrt{(2,58) \cdot 1,2 \cdot 1,1} = \underline{2,12}$	$\sqrt{(2,77) \cdot 1,2 \cdot 1,2} = \underline{2,40}$	$\sqrt{(3,60) \cdot 1,2 \cdot 1,1} = \underline{2,50}$	$\sqrt{(4,02) \cdot 1,2 \cdot 1,2} = \underline{2,89}$	$\sqrt{(5,74) \cdot 1,2 \cdot 1,1} = \underline{3,16}$
$T = + 79 \text{ °C}$	$\sqrt{(2,13) \cdot 1,2 \cdot 1,4} = \underline{2,45}$	$\sqrt{(2,58) \cdot 1,2 \cdot 1,9} = \underline{3,66}$	$\sqrt{(2,77) \cdot 1,2 \cdot 1,4} = \underline{2,80}$	$\sqrt{(3,60) \cdot 1,2 \cdot 1,9} = \underline{4,33}$	$\sqrt{(4,02) \cdot 1,2 \cdot 1,4} = \underline{3,37}$	$\sqrt{(5,74) \cdot 1,2 \cdot 1,9} = \underline{5,46}$

$$A^E_{\text{mod,ständig}} = 2,41 \geq 1,35 \quad (\text{TKB, Absatz 5.5, Satz (3)})$$

$$A^G_{\text{mod,ständig}} = 2,87 \geq 1,35 \quad (\text{TKB, Absatz 5.5, Satz (3)})$$

## 14.4.3.2 Nachweise

Bemessungswerte der E-Modul

Die mit Abstand höchste Druckkraft in der Deckschicht tritt unter Lastkombination LK 5 (Eigenlast und Temperatur, Sommer) auf. Die KLED ist mittel. Die obere Deckplatte ist am Zwischenaufleger knittergefährdet. Die Bauteiltemperatur beträgt 79 °C.

Bemessungswert des E-Moduls der Deckschicht, Temp.: 79 °C, mittel:

$$\underline{E_{D,d}(t_a)} = 5500 \text{ N/mm}^2 / (1,4 \cdot 2,01) = \underline{1995 \text{ N/mm}^2}$$

Bemessungswert des E-Moduls der Kernschicht, Temp.: 79 °C, mittel

$$\underline{E}_{K,d}(t_a) = 6,4 \text{ N/mm}^2 / (1,4 \cdot 2,8) = \underline{1,63 \text{ N/mm}^2}$$

Bemessungswert des G-Moduls der Kernschicht, Temp.: 79 °C, mittel

$$\underline{G}_{K,d}(t_a) = 3,6 \text{ N/mm}^2 / (1,7 \cdot 4,33) = \underline{0,49 \text{ N/mm}^2}$$

Kritische Spannungen in der Deckschicht

Die Widerstandswerte für maschinell gefertigte Deckschichten ohne Berücksichtigung von Vorverformungen werden nach [3] ermittelt.

$$\sigma_{cr}(t_a) = 0,82 \cdot \sqrt[3]{E_{D,d}(t_a) \cdot E_{K,d}(t_a) \cdot G_{K,d}(t_a)} = 0,82 \cdot \sqrt[3]{1995 \cdot 1,63 \cdot 0,49} = 9,58 \text{ N/mm}^2$$

Für LK 5 gilt (Abschnitt 14.3.8 ):

$$\sigma_{Ed, \text{ Stütz, mittel}} = 11,7 \text{ N/mm}^2 > 9,6 \text{ N/mm}^2 = \sigma_{cr}(t_a)$$

Die Bemessungsspannungen sind um ca. 6 % höher als die aufnehmbaren Spannungen. Es sind also zusätzliche Aussteifungen nötig.

## 14.5 Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

### 14.5.1 Durchbiegungsbegrenzung

#### 14.5.1.1 Nachweisformat

$$w_k(t_a) \leq w_{d, \text{ max}} \quad (\text{TKB, Gl. 8.18})$$

#### 14.5.1.2 Berechnungsergebnisse

Die FEM-Berechnung erfolgte mit mittlerem E-Modul  $E_m$  zum Zeitpunkt  $t = 0$ , also ohne Auswirkung des Kriechverhaltens. Die Verformungen wurden gemäß den Kombinationsvorschriften für die „seltene Kombination“ überlagert. Die Schneelast ist nur in einem Feld aufgebracht, alle anderen Lasten gleichmäßig über den Träger. Aus der Berechnung (Abschnitt 16.6) folgt:

LK1 (g+s+w+ $\Delta T_{\text{wint}}$ ):	w = 3,7 mm (kurz)
LK2 (g+ $\Delta T_{\text{wint}}$ ):	w = 3,0 mm (mittel)
LK3 (g):	w = 0,3 mm (ständig)
LK 4 (g+w+ $\Delta T_{\text{somm}}$ )	w = -1,6 mm (kurz)
LK 5 (g+ $\Delta T_{\text{somm}}$ )	w = -3,0 mm (mittel)

#### 14.5.1.3 Einfluss des Kriechverhaltens

Das Kriechverhalten wird über den Einflussfaktor  $A_1$  erfasst. Außerdem tragen Witterung und Temperatur ebenfalls zu einer Erhöhung der Verformungen bei (Einflussfaktoren  $A_2, A_3$ ). Die

Einflüsse auf den Schubmodul der Kernschicht (entspr.:  $A_{\text{mod}}^G$ ) und auf den E-Modul der Deckschicht (entspr.  $A_{\text{mod}}^E$ ) sind nicht identisch. Für eine exakte Berechnung sind beide Moduln mit den jeweiligen Faktoren abzumindern und eine darauf basierende Berechnung durchzuführen.

Vereinfachend wird jedoch im Folgenden angenommen, dass die Verformungen affin zur Veränderung des E-Moduls der Deckschicht sind. Die bereits durchgeführten Berechnungen mit den mittleren Werten des E- und G-Moduls werden mit den Einflussfaktoren skaliert.

Werkstoffspezifischer Einflussfaktor des E-Moduls:

$$A_{\text{mod}}^E = A_1^E \cdot A_2^E \cdot A_3^E$$

Die Einzelwerte der Einflussfaktoren sind identisch mit denen in Abschnitt 14.4.3.1. Da die Verformungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ermittelt werden, ist wie im Holzbau der Mittelwert des E-Moduls  $E_m$  zu Grunde zulegen.

$$E_m = 6800 \text{ N/mm}^2$$

$E_{D,m}(t_a) = E_m / A_{\text{mod}}^E(t_a)$	Kurz	Mittel	Ständig
$T \leq + 20 \text{ }^\circ\text{C}$	$6800 / (1,44 \cdot 1,0 \cdot 1,0)$ <u>= 4722 N/mm<sup>2</sup></u>	$6800 / (1,64 \cdot 1,0 \cdot 1,0)$ <u>= 4146 N/mm<sup>2</sup></u>	$6800 / (1,96 \cdot 1,0 \cdot 1,0)$ <u>= 3469 N/mm<sup>2</sup></u>
$T = + 37 \text{ }^\circ\text{C}$	$6800 / (1,44 \cdot 1,0 \cdot 1,1)$ <u>= 4293 N/mm<sup>2</sup></u>	$6800 / (1,64 \cdot 1,0 \cdot 1,1)$ <u>= 3769 N/mm<sup>2</sup></u>	$6800 / (1,96 \cdot 1,0 \cdot 1,1)$ <u>= 3154 N/mm<sup>2</sup></u>
$T = + 79 \text{ }^\circ\text{C}$	$6800 / (1,44 \cdot 1,0 \cdot 1,43)$ <u>= 3302 N/mm<sup>2</sup></u>	$6800 / (1,64 \cdot 1,0 \cdot 1,43)$ <u>= 2900 N/mm<sup>2</sup></u>	$6800 / (1,96 \cdot 1,0 \cdot 1,43)$ <u>= 2426 N/mm<sup>2</sup></u>

#### 14.5.1.4 Bemessungswerte der Verformungen

Die Berechnung mittels FEM-Software erfolgte mit dem mittleren E-Modul:

$$E_m = 6800 \text{ N/mm}^2$$

Die Berechnungsergebnisse werden skaliert mit dem Quotienten:

$$w_k(t_a) = w_m \cdot (E_m / E_{D,m}(t_a))$$

$$\text{LK1 (g+s+w+\Delta T}_{\text{wint}}\text{): } w_k(t_a) = 3,7 \text{ mm} \cdot (6800 / 4722) = \underline{5,3 \text{ mm}}$$

(kurz, 20 °C)

$$\text{LK2 (g+\Delta T}_{\text{wint}}\text{): } w_k(t_a) = 3,0 \text{ mm} \cdot (6800 / 4146) = \underline{4,9 \text{ mm}}$$

(mittel, 20 °C)

$$\text{LK3 (g): } w_k(t_a) = 0,3 \text{ mm} \cdot (6800 / 3469) = \underline{0,59 \text{ mm}}$$

(ständig, 20 °C)

$$\text{LK 4 (g+w+\Delta T}_{\text{somm}}\text{): } w_k(t_a) = -1,6 \text{ mm} \cdot (6800 / 3302) = \underline{-3,29 \text{ mm}}$$

(kurz, 79 °C)

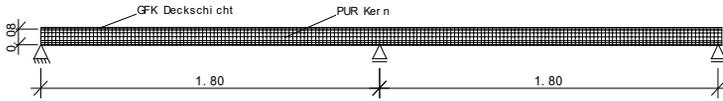
$$\text{LK 5 (g+ \Delta T}_{\text{somm}}\text{): } w_k(t_a) = -3,0 \text{ mm} \cdot (6800 / 3769) = \underline{-5,4 \text{ mm}}$$

(mittel, 37 °C)

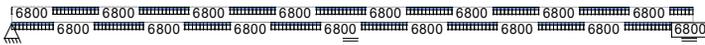
Die maximalen Verformungen sind also +5,3 mm bzw. -5,4 mm. Dies liegt unter  $L/250$ .

## 14.6 Berechnungsergebnisse

### 14.6.1 System und Lasteingabe



Flächenelemente, Elementnummern (Max=18004) M1 : 25

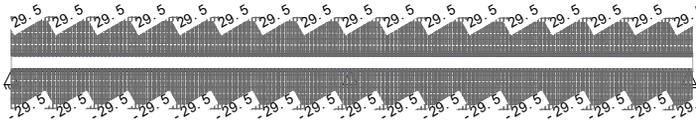


GFK Deckschicht

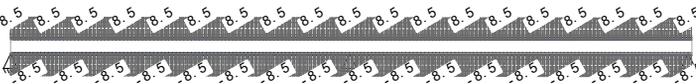
Stabelemente, E-Modul, 1 cm im Raum = 57148. MPa (Max=6800.) M1 : 25



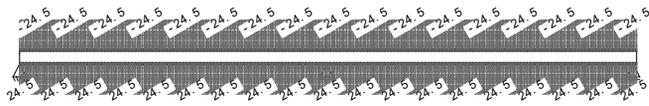
Flächenelemente, Schubmodul in MPa (Max=4.50) M1 : 25



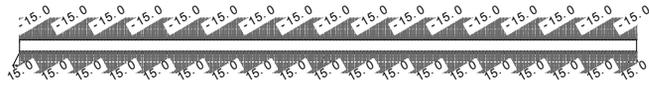
Alle Lasten, Lastfall 31 T\_SOMER, (1 cm im Raum = Unit) Stablinienlast  
(Gleichförmige Temperaturänderung) (Unit=37.7 °C)  $\langle \rightarrow \rangle$  (Mn=-29.5) (Max=29.5) M1 : 25



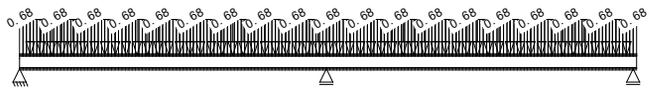
Alle Lasten, Lastfall 32 T\_SOMER+WIND, (1 cm im Raum = Unit) Stablinienlast  
(Gleichförmige Temperaturänderung) (Unit=20.0 °C)  $\langle \rightarrow \rangle$  (Mn=-8.50) (Max=8.50) M1 : 25



Alle Lasten, Lastfall 33 T\_WINTER , (1 cm im Raum = Unit) Stablinienlast  
 (Gleichförmige Temperaturänderung) (Unit=37.7 °C) (Mn=-24.5) (Max=24.5) M 1 : 25



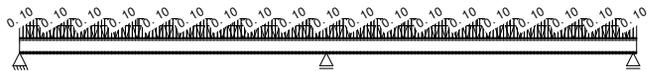
Alle Lasten, Lastfall 34 T\_WINTER+SCHNEE+WIND , (1 cm im Raum = Unit) Stablinienlast  
 (Gleichförmige Temperaturänderung) (Unit=32.7 °C) (Mn=-15.0) (Max=15.0) M 1 : 25



Stablast in global Y, Lastfall 40 S , (1 cm im Raum = Unit) Stablinienlast (Kraft) in  
 global Y (Unit=0.832 kN/m) (Mx=0.680) M 1 : 25

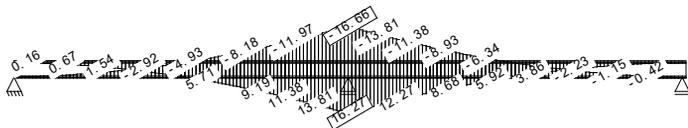


Stablast in global Y, Lastfall 51 W\_SOG , (1 cm im Raum = Unit) Stablinienlast (Kraft)  
 in global Y (Unit=0.801 kN/m) (Mn=-0.570) (Mx=0) M 1 : 25

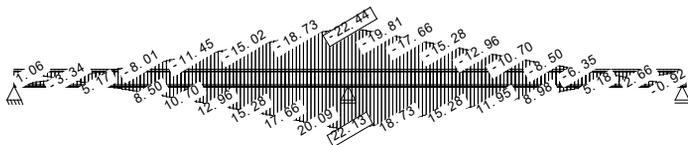


Stablast in global Y, Lastfall 52 W\_DRUCK , (1 cm im Raum = Unit) Stablinienlast  
 (Kraft) in global Y (Unit=0.216 kN/m) (Mx=0.100) M 1 : 25

### 14.6.2 Membrankräfte der GFK-Deckschicht (faktoriert)



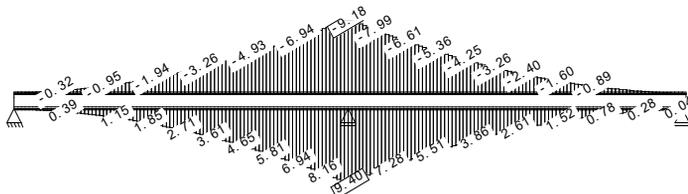
Stabelement e, Normalkraft  $N_k$ , Lastfall 101 LK1, 1 cm im Raum = 15.4 kN ( $M_n=19.2$ ) (Max=18.6) M 1 : 25



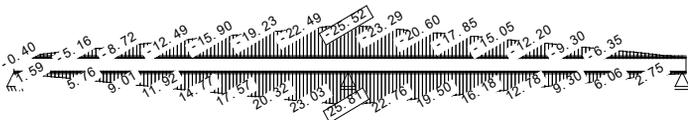
Stabelement e, Normalkraft  $N_k$ , Lastfall 102 LK2, 1 cm im Raum = 18.0 kN ( $M_n=22.4$ ) (Max=22.1) M 1 : 25



Stabelement e, Normalkraft  $N_k$ , Lastfall 103 LK3, 1 cm im Raum = 0.770 kN ( $M_n=0.620$ ) (Max=0.578) M 1 : 25

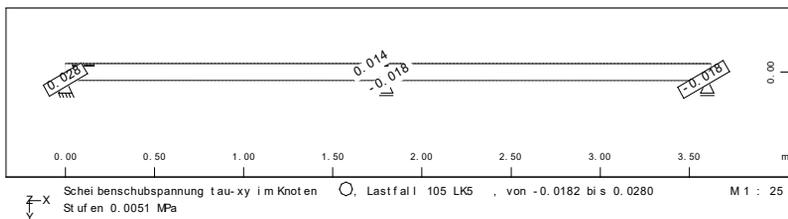
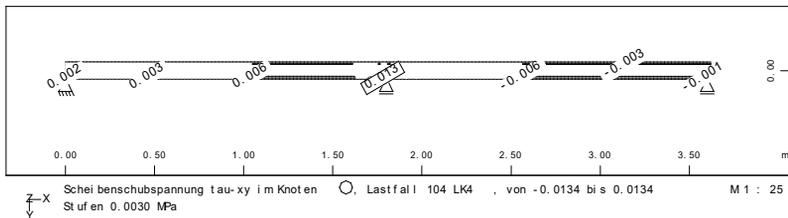
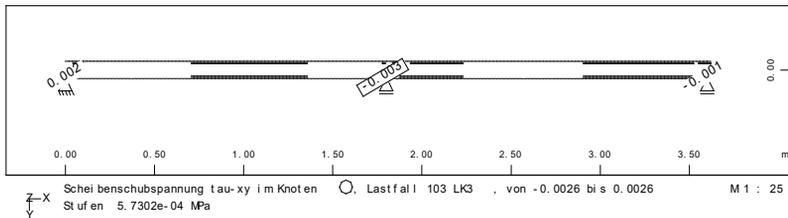
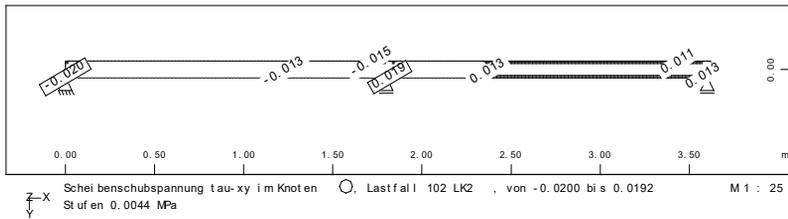
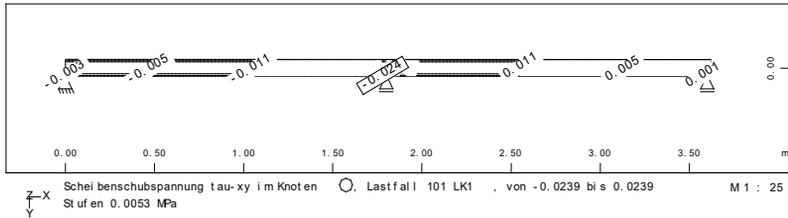


Stabelement e, Normalkraft  $N_k$ , Lastfall 104 LK4, 1 cm im Raum = 12.0 kN ( $M_n=10.6$ ) (Max=10.9) M 1 : 25



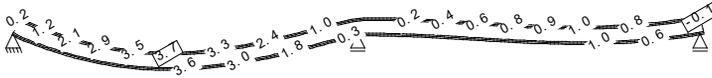
Stabelement e, Normalkraft  $N_k$ , Lastfall 105 LK5, 1 cm im Raum = 37.7 kN ( $M_n=25.5$ ) (Max=25.8) M 1 : 25

### 14.6.3 Schubspannungen des PUR-Kerns (faktoriert)



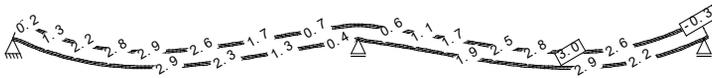
### 14.6.4 Verformungen (nicht faktorisiert)

(In LK 1 ist die Schneelast nur halbseitig aufgebracht; Schnee ist die leitende Veränderliche)



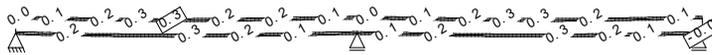
Versobene Struktur aus LF 201 LK1 in 50.0-facher Überhöhung  
Knotenverschiebung in global Y in mm Lastfall 201 LK1 ( $M_n = -0.191$ ) ( $M_x = 3.94$ )

M 1 : 25



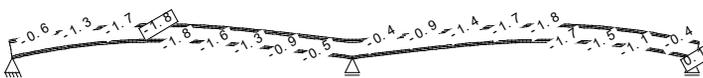
Versobene Struktur aus LF 202 LK2 in 50.0-facher Überhöhung  
Knotenverschiebung in global Y in mm Lastfall 202 LK2 ( $M_n = -0.307$ ) ( $M_x = 2.98$ )

M 1 : 25



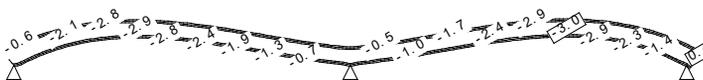
Versobene Struktur aus LF 203 LK3 in 50.0-facher Überhöhung  
Knotenverschiebung in global Y in mm Lastfall 203 LK3 ( $M_n = -0.0049$ ) ( $M_x = 0.273$ )

M 1 : 25



Versobene Struktur aus LF 204 LK4 in 50.0-facher Überhöhung  
Knotenverschiebung in global Y in mm Lastfall 204 LK4 ( $M_n = -2.14$ ) ( $M_x = 0.107$ )

M 1 : 25



Versobene Struktur aus LF 205 LK5 in 50.0-facher Überhöhung  
Knotenverschiebung in global Y in mm Lastfall 205 LK5 ( $M_n = -3.02$ ) ( $M_x = 0.375$ )

M 1 : 25

## 14.7 Literatur zum Beispiel 3

- [1] Ackermann, G.: Ergebnisse zur Berechnung des zeitabhängigen Tragverhaltens dreischichtiger durchlaufender Träger. In: *Wiss.Z. Hochschule Archit. Bauwesen Weimar* 30 (1984), S. 301-311.
- [2] Hintersdorf, G.: *Tragwerke aus Plaste*. Berlin, Verlag für Bauwesen.
- [3] Klein, B.: *Leichtbau-Konstruktion*. Wiesbaden, Vieweg & Teubner, 2009



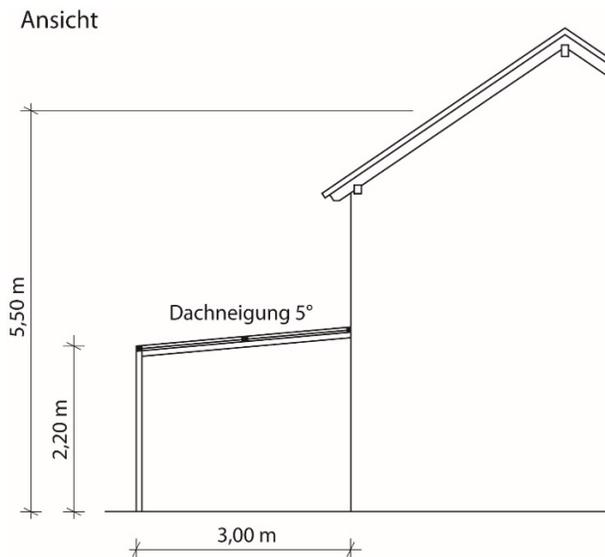
## 15 Beispiel 4 Vierseitig gelenkig gelagerte Platte aus PMMA für ein Vordach

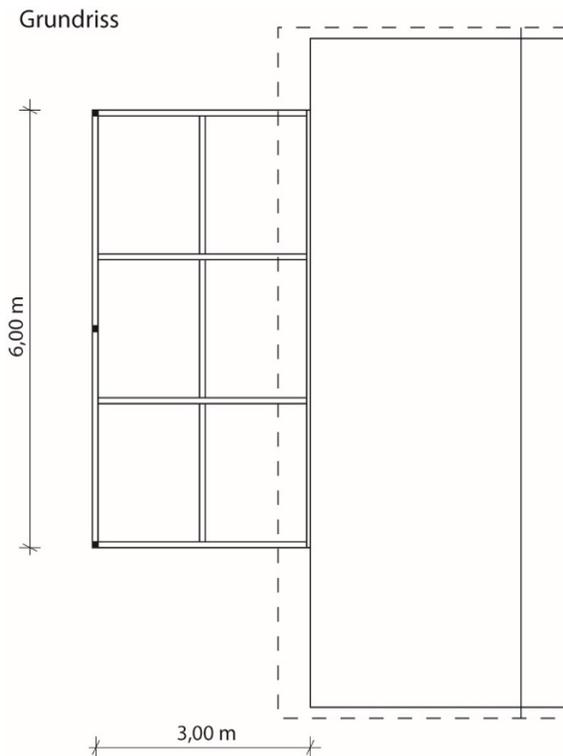
Dr.-Ing. Jochen A. Stahl, P.Eng., Fast + Epp GmbH

### 15.1 Bauteilabmessungen, statisches System, Bauwerksform

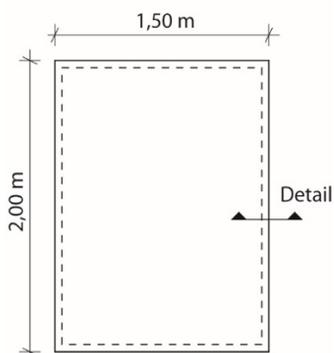
Es wird eine vierseitig linienförmig, gelenkig gelagerte Platte mit den Außenabmessungen 200 cm x 150 cm betrachtet. Das vor dem Eingang eines Gebäudes montierte Vordach ist um  $5^\circ$  gegenüber der Horizontalen geneigt.

#### Bauteilabmessungen und Bauwerksform





### Statisches System



Anmerkung: Die Temperatur bewirkt in statisch bestimmten Systemen keine Schnittgrößen. Die Haltekonstruktion der Platte muss folglich in der Lage sein, die sich infolge von Temperaturschwankungen ergebenden Verformungen aufzunehmen. Es wird ein verschraubtes Halteprofil mit EPDM-Dichtung ausgeführt (Detail siehe Abschnitt 6).

## 15.2 Querschnitt, Werkstoff

### 15.2.1 Querschnittswerte

gewählte Materialstärke:  $t = 20 \text{ mm}$

gewähltes Plattenformat:  $1,50 \text{ m} \times 2,00 \text{ m}$

### 15.2.2 Material

Die Mindestanforderungen an die mechanischen Eigenschaften von extrudierten Tafeln aus PMMA werden in DIN EN ISO 7823-2 definiert. Während in Tabelle 3 dieser Norm die erforderlichen Werte angegeben werden, enthält Tabelle 4 typische Werte für die Materialeigenschaften. Da in beiden Tabellen lediglich Wertebereiche angegeben sind, wird im Rahmen dieses Beispiels auf die Technische Information eines Herstellers von PMMA-Tafeln zurückgegriffen ([1]).

Gewähltes Material:	extrudiertes PMMA	(PLEXIGLAS® XT)
$E_{k0,05} = 3.300 \text{ N/mm}^2$	Elastizitätsmodul (Kurzzeitwert)	(Richtwert gemäß [1])
$\nu = 0,37$	Querdehnzahl (Kurzzeitwert)	(Richtwert gemäß [1])

## 15.3 Einwirkungen (charakteristische Werte)

### 15.3.1 Eigenlast der Platte

Dichte PMMA  $\rho = 1,19 \text{ g/cm}^3$  (Richtwert gemäß [1])

Materialstärke  $t = 2,0 \text{ cm}$

Eigenlast:  $g_k = 0,24 \text{ kN/m}^2$

$$\rho = 1,19 \text{ g/cm}^3 = 11,9 \cdot 10^{-3} \text{ N/cm}^3$$

$$g_k = 11,9 \cdot 10^{-3} \text{ N/cm}^3 \cdot 2,0 \text{ cm} = 24 \cdot 10^{-3} \text{ N/cm}^2$$

$$\underline{g_k = 0,24 \text{ kN/m}^2}$$

### 15.3.2 Schneelast (DIN EN 1991-1-3)

Schneelastzone 2

Geländehöhe  $A$  über Meeresniveau -  $A = NN + 150 \text{ m}$

Dachneigung  $\alpha = 5^\circ$

$$s_i = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k$$

(DIN EN 1991-1-3, Gl. 5.1)

$$\begin{aligned}
 \text{mit } s_k &= 0,25 + 1,91 \cdot ((A+140)/760)^2 && (\text{DIN EN 1991-1-3/NA, Gl. NA.2}) \\
 &= 0,25 + 1,91 \cdot ((150+140)/760)^2 \\
 &= 0,528 \text{ kN/m}^2 < \underline{0,85 \text{ kN/m}^2} \text{ (Sockelbetrag ist maßgebend)}
 \end{aligned}$$

$$\mu_1 = 0,8 \text{ (Flachdach)} \quad (\text{DIN EN 1991-1-3, Tab. 5.2})$$

$$C_e = 1,0 \quad (\text{DIN EN 1991-1-3/NA, NDP zu 5.2(7)})$$

$$C_t = 1,0 \quad (\text{DIN EN 1991-1-3/NA, NDP zu 5.2(8)})$$

$$q_{k,1} = 0,8 \cdot 0,85 \text{ kN/m}^2$$

$$\underline{\mathbf{q_{k,1} = 0,68 \text{ kN/m}^2}}$$

Anmerkung: Schneeansammlungen werden hier nicht berücksichtigt.

### 15.3.3 Windlast (DIN EN 1991-1-4)

Zusätzlich zu der oben aufgeführten Lastnorm werden noch die Ausführungen zu Windlasten auf Vordächer gemäß den Anlagen zu der Musterliste der Technischen Baubestimmungen des DIBt berücksichtigt (siehe [2]). Bei Vordächern sind grundsätzlich zwei Lastfälle zu untersuchen: Eine abwärts gerichtete (positive) und eine aufwärts gerichtete (negative) Kraftwirkung.

*Binnenland (Mischprofil der Geländekategorie II + III)*

*Windzone 2*

*Bezugshöhe  $z_e = 5,50 \text{ m} (< 7,0 \text{ m})$*

$$w_e = c_{p,\text{net}} \cdot q_p(z_e) \quad (\text{DIN EN 1991-1-4, Gl. 5.1})$$

$$\text{mit } q_p(z_e) = 1,5 \cdot q_b \quad (\text{DIN EN 1991-1-4/NA, Gl. NA.B.1})$$

$$q_b = 0,39 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{DIN EN 1991-1-4/NA, Bild NA.A.1})$$

$$q_p(z_e) = 0,59 \text{ kN/m}^2$$

Druckbeiwerte nach [1]:

$$h_1 = 2,20 \text{ m} \quad \text{Höhe des Vordachs}$$

$$d_1 = 3,00 \text{ m} \quad \text{Länge des Vordachs}$$

$$h = 5,50 \text{ m} \quad \text{mittlere Gebäudehöhe}$$

$$h_1 / h = 0,40$$

$$h_1 / d_1 = 0,73 < 1,0$$

$$\text{Abwärtslast: } c_{p,\text{net}} = +0,7$$

Aufwärtslast:  $c_{p,net} = -1,0$

$$q_{k,2} = + 0,7 \cdot 0,59 \text{ kN/m}^2$$

**$q_{k,2} = 0,41 \text{ kN/m}^2$**  (Abwärtslast)

bzw.

$$q_{k,2} = - 1,0 \cdot 0,59 \text{ kN/m}^2$$

**$q_{k,2} = - 0,59 \text{ kN/m}^2$**  (Aufwärtslast)

Anmerkung: Für dieses Bemessungsbeispiel werden auf der sicheren Seite liegend die erhöhten Windlasten auf die Randbereiche als konstant über das Bauteil angesetzt. Dynamische Wirkungen werden darüber hinaus nicht betrachtet.

### 15.3.4 Temperaturlast (DIN EN 1991-1-5)

Da die Platte zwangungsfrei gelagert wird, finden Temperaturlasten hier keine Berücksichtigung. Auch ungleichmäßige Erwärmungen werden an dieser Stelle nicht betrachtet, da die Platte nur 20 mm stark ist und sich über die Dicke sehr schnell gleichmäßig aufheizt.

### 15.3.5 Einwirkungsdauer

Einstufung der Einwirkungen in KLED nach Tabelle 6-2 (TKB)

Eigenlast	–	ständig
Windlast	–	kurz
Schneelast	–	kurz

## 15.4 Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit

### 15.4.1 Festigkeit

#### 15.4.1.1 Nachweisformat

$$\sigma_d(t) \leq f_d = \frac{f_{k0,05}}{\gamma_M \cdot A_{mod}^f} \quad (\text{TKB, Gl. 8.4})$$

#### 15.4.1.2 Einwirkungskombinationen und Bemessungswerte der Belastungen

$$E_d = E \left\{ \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \oplus \gamma_P \cdot P_k \oplus \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \right\} \quad (\text{TKB, Gl. D.1})$$

**Einwirkungskombination 1:****Eigenlast***KLED - Ständig**Fall B*

(TKB, Tabelle D-1)

*Ständige Einwirkungen, ungünstig*

$\rightarrow \gamma_{G,sup} = 1,35$

(TKB, Tabelle D-1)

$$e_{d,1} = \gamma_G \cdot g_k$$

$$e_{d,1} = 1,35 \cdot 0,24 \text{ kN/m}^2$$

$$\underline{e_{d,1} = 0,32 \text{ kN/m}^2}$$

**Einwirkungskombination 2:****Eigenlast + Schnee + Winddruck (Winter)***KLED - Kurz**Fall B*

(TKB, Tabelle D-1)

*Ständige Einwirkungen, ungünstig*

$\rightarrow \gamma_{G,sup} = 1,35$

(TKB, Tabelle D-1)

*Veränderliche Einwirkungen, ungünstig*

$\rightarrow \gamma_{Q,sup} = 1,50$

(TKB, Tabelle D-1)

*Kombinationsbeiwert Wind*

$\rightarrow \psi_{0,2} = 0,6$

(TKB, Tabelle D-2)

$$e_{d,2} = \gamma_G \cdot g_k + \gamma_{Q,1} \cdot q_{k,1} + \gamma_{Q,2} \cdot \psi_{0,2} \cdot q_{k,2}$$

$$e_{d,2} = 1,35 \cdot 0,24 \text{ kN/m}^2 + 1,50 \cdot 0,68 \text{ kN/m}^2 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 0,41 \text{ kN/m}^2$$

$$\underline{e_{d,2} = 1,71 \text{ kN/m}^2}$$

**Einwirkungskombination 3:****Eigenlast + Windsog (Sommer)***KLED - Kurz**Fall A*

(TKB, Tabelle D-1)

*Ständige Einwirkungen, günstig*

$\rightarrow \gamma_{G,inf} = 0,90$

(TKB, Tabelle D-1)

*Veränderliche Einwirkungen, ungünstig*

$\rightarrow \gamma_{Q,sup} = 1,50$

(TKB, Tabelle D-1)

$$e_{d,3} = \gamma_{G,inf} \cdot g_k + \gamma_{Q,2} \cdot q_{k,2}$$

$$e_{d,3} = 0,90 \cdot 0,24 \text{ kN/m}^2 - 1,50 \cdot 0,59 \text{ kN/m}^2$$

$$\underline{e_{d,3} = -0,67 \text{ kN/m}^2}$$

**Einwirkungskombination 4:****Eigenlast + Winddruck (Sommer)***KLED - Kurz**Fall B*

(TKB, Tabelle D-1)

*Ständige Einwirkungen, ungünstig*

$\rightarrow \gamma_{G,sup} = 1,35$

(TKB, Tabelle D-1)

*Veränderliche Einwirkungen, ungünstig*

$\rightarrow \gamma_{Q,sup} = 1,50$

(TKB, Tabelle D-1)

$$e_{d,4} = \gamma_G \cdot g_k + \gamma_{Q,2} \cdot q_{k,2}$$

$$e_{d,4} = 1,35 \cdot 0,24 \text{ kN/m}^2 + 1,50 \cdot 0,41 \text{ kN/m}^2$$

$$\mathbf{e_{d,4} = 0,94 \text{ kN/m}^2}$$

### 15.4.1.3 Charakteristische Werte des Widerstandes

Charakteristischer Wert der Kurzzeitbiegezugfestigkeit  $f_{k,0,05}$

$$\mathbf{f_{k,0,05} = 105 \text{ N/mm}^2}$$

(Richtwert gemäß [1])

### 15.4.1.4 Teilsicherheitsbeiwerte, Einflussfaktoren

Teilsicherheitsbeiwert für das Material  $\gamma_M$

*Thermoplaste unter einer Zugbeanspruchung*

*Grundkombination - Festigkeit*

$$\gamma_M = 1,5$$

(TKB, Tabelle E-1)

### 15.4.1.5 Werkstoffspezifischer Einflussfaktor der Festigkeit

$$A_{\text{mod}}^f = A_1^f \cdot A_2^f \cdot A_3^f$$

#### Dauer der Einwirkung

$$A_{1,20J}^f = 2,30$$

(TKB, Tabelle A-1)

↳ KLED – ständig :

$$A_1^f = 2,30$$

(TKB, Abschnitt 8.2.1)

↳ KLED – kurz :

$$A_1^f = (A_{1,20J}^f)^T = 2,30^T = 1,61$$

(TKB, Abschnitt 8.2.1)

$$\text{mit: } T = 0,253 + 0,142 \cdot \lg(7 \cdot 24)$$

Unverstärkte Kunststoffe werden nur auf eine Lebensdauer von 20 Jahren ausgelegt. Bei einer Belastungsdauer > 20 Jahren fällt die Festigkeit deutlich ab (Zeitstandkurven nach DIN 1778 beachten).

(TKB, Abschnitt 5.2.1 (2))

Da Tabelle A-2 von TKB keine Angaben für den Werkstoff PMMA macht und auf Versuche verweist, wird im Folgenden als Anhaltspunkt ein Auszug aus [3] abgedruckt.

**Tabelle Beispiel 4-1:** Einflussfaktoren A nach [3]

	Randbedingung	Faktor
$A_1^f$	bis 20 Jahre	2,3
$A_1^E$	bis 20 Jahre	2,5
$A_2^f$	in Wasser	3,1
$A_2^f$	Bewitterung (inklusive Temperaturen bis 60 °C)	5,4
$A_3^f$	bis 40 °C	1,3
$A_3^E$	bis 40 °C	1,2
$A_3^f$	bis 60 °C	2,1
$A_3^E$	bis 60 °C	1,5

Medien- und Temperatureinfluss

Bewitterung bis 60 °C  $A_2^f \cdot A_3^f = 5,4$  (Tabelle 1)

(Gemäß [2] berücksichtigt der angegebene Tabellenwert sowohl den Medien- als auch den Temperatureinfluss.)

Bewitterung bis 20 °C  $A_2^f \cdot A_3^f = 5,4 / 2,1 = 2,6$  (Tabelle 1)

$$A_{\text{mod,KLED - ständig}}^f = 2,30 \cdot 5, = 12,42$$

$$A_{\text{mod,KLED - kurz, 60 °C}}^f = 1,61 \cdot 5,4 = 8,69$$

$$A_{\text{mod,KLED - kurz, 20 °C}}^f = 1,61 \cdot 2,6 = 4,19$$

**15.4.1.6 Bemessungswerte des Widerstandes**

KLED Ständig

**Biegezug**

$$f_d = f_{k,0,05} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^f)$$

$$f_d = 105 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 12,42)$$

$$\underline{f_d = 5,64 \text{ N/mm}^2}$$

KLED Kurz

**Biegezug (Temperatur bis 60 °C)**

$$f_d = f_{k0,05} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^f)$$

$$f_d = 105 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 8,69)$$

$$\underline{f_d = 8,06 \text{ N/mm}^2}$$

**Biegezug (Temperatur bis 20 °C)**

$$f_d = f_{k0,05} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^f)$$

$$f_d = 105 \text{ N/mm}^2 / (1,5 \cdot 4,19)$$

$$\underline{f_d = 16,71 \text{ N/mm}^2}$$

**15.4.1.7 Zeitabhängigkeit der Schnittgrößen und Verformungen**

Die Schnittgrößen und Verformungen in einer biegesteifen Platte hängen von dem Elastizitätsmodul  $E$  und der Querdehnzahl  $\nu$  ab. Beide Materialwerte sind abhängig von der Zeit. Wenn sich der  $E$ -Modul bei einer langzeitigen Einwirkung auf  $E(t)$  verändert, so ändert sich auch die Querdehnzahl auf  $\nu(t)$ . Unter der Annahme eines zeitkonstanten Kompressionsmoduls  $K$  kann die Zeitabhängigkeit der Querdehnzahl  $\nu(t)$  nach [TKB], Abschnitt 7 durch die folgende Beziehung ermittelt werden.

$$\nu(t_i) = 0,50 - \frac{E(t_i)}{6 \cdot K}$$

Der Bemessungswert des  $E$ -Moduls wird im Abschnitt 5 dieses Beispiels für die einzelnen Beanspruchungssituationen hergeleitet. Die einzelnen Ergebnisse können den Kapiteln 5.1.3 und 5.1.4 entnommen werden. Da sie aber an dieser Stelle benötigt werden, sollen sie im Folgenden kurz zusammengestellt werden:

$$A_{\text{mod,KLED}}^E - \text{ständig} = 3,00$$

$$A_{\text{mod,KLED}}^f - \text{kurz, } 40 \text{ °C} = 2,02$$

$$A_{\text{mod,KLED}}^f - \text{kurz, } 20 \text{ °C} = 1,68$$

und

$$E_{\text{KLED}} - \text{ständig} = 1.100 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{\text{KLED}} - \text{kurz, } 40 \text{ °C} = 1.634 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{\text{KLED}} - \text{kurz, } 20 \text{ °C} = 1.964 \text{ N/mm}^2.$$

Mit den bekannten Werten für den kurzzeitigen Elastizitätsmodul und die dazugehörige Querdehnzahl lässt sich der Kompressionsmodul wie folgt bestimmen:

$$E_{k0,05} = 3.300 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Elastizitätsmodul (Kurzzeitwert)}$$

$$\nu = 0,37 \quad \text{Querdehnzahl (Kurzzeitwert)}$$

$$K = \frac{E}{6 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} = \frac{3.300}{3 \cdot (1 - 2 \cdot 0,37)} \text{ N/mm}^2 = 4.231 \text{ N/mm}^2$$

Damit ergeben sich die folgenden Werte für den zeitabhängigen E-Modul und die Querdehnzahl:

VKLED – ständig	= <b>0,457</b>
VKLED – kurz, 40 °C	= <b>0,436</b>
VKLED – kurz, 20 °C	= <b>0,423.</b>

#### 15.4.1.8 Bemessungswerte der Spannungen

Die Berechnung der Spannungen in der Platte infolge der oben beschriebenen Lastkombinationen erfolgt mit einem kommerziellen Finite-Element-Programm (RFEM von Dlubal). Zunächst wurde eine lineare Berechnung mit einer Netzweite von 2 cm zur Bestimmung der maßgebenden Lastkombination durchgeführt. In einem späteren Schritt soll noch kurz auf Modellierungsvarianten eingegangen werden.

Die PMMA-Platte ist umlaufend in vertikaler Richtung gehalten. In der Scheibenebene ist sie statisch-bestimmt gelagert. Die leichte Neigung wird vereinfachend in diesem Beispiel vernachlässigt.

In der folgenden Tabelle sind die berechneten Hauptzugspannungen zusammengestellt. Für jede Lastsituation wurden die entsprechenden Materialkennwerte des vorangegangenen Abschnitts verwendet.

**Tabelle Beispiel 4-2:** Zusammenstellung der berechneten Spannungen

Einwirkungs-kombination	Hauptzugspannung $\sigma_d$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Widerstand Biegezug $f_d$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Materialausnutzung [%]
1	0,83	5,64	14,7
2	4,37	16,71	26,1
3	1,72	8,06	21,3
4	2,41	8,06	29,9

#### 15.4.1.9 Nachweise

Maßgebend für die Bemessung ist die Lastkombination 4. Bei der gleichzeitigen Wirkung von Eigenlast und Winddruck treten die größten Materialausnutzungen (29,9 %) auf. Der Nachweis der Tragfähigkeit ist allerdings deutlich eingehalten.

## 15.5 Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

### 15.5.1 Durchbiegungsbegrenzung

#### 15.5.1.1 Nachweisformat

$$u_d(t) \leq u_{d,\max} \quad (\text{TKB, Gl. 8.18})$$

#### 15.5.1.2 Einwirkungskombinationen

Aufgrund der geringen Eigenlast wird die seltene Kombination gewählt, da sie in diesem Fall die größten Durchbiegungen ergibt.

$$E_{d,\text{rare}} = E \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \oplus P_k \oplus Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \right\} \quad (\text{TKB, Gl. D.4})$$

#### **Einwirkungskombination 1: Eigenlast**

*KLED - Ständig*

$$e_{d,\text{rare},1} = g_k$$

$$\underline{e_{d,\text{rare},1} = 0,24 \text{ kN/m}^2}$$

#### **Einwirkungskombination 2: Eigenlast + Schnee + Winddruck**

*KLED - Kurz*

$$\text{Kombinationsbeiwert Wind} \quad \rightarrow \quad \psi_{0,2} = 0,6 \quad (\text{TKB, Tabelle D-2})$$

$$e_{d,\text{rare},2} = g_k + q_{k,1} + \psi_{0,2} \cdot q_{k,2}$$

$$e_{d,\text{rare},2} = 0,24 \text{ kN/m}^2 + 0,68 \text{ kN/m}^2 + 0,6 \cdot 0,41 \text{ kN/m}^2$$

$$\underline{e_{d,\text{rare},2} = 1,17 \text{ kN/m}^2}$$

#### **Einwirkungskombination 3: Eigenlast + Windsog**

*KLED - Kurz*

$$e_{d,\text{rare},3} = g_k + q_{k,2}$$

$$e_{d,\text{rare},3} = 0,24 \text{ kN/m}^2 - 0,59 \text{ kN/m}^2$$

$$\underline{e_{d,\text{rare},3} = -0,35 \text{ kN/m}^2}$$

#### **Einwirkungskombination 4: Eigenlast + Winddruck**

*KLED - Kurz*

$$e_{d,\text{rare},4} = g_k + q_{k,2}$$

$$e_{d,\text{rare},4} = 0,24 \text{ kN/m}^2 + 0,41 \text{ kN/m}^2$$

$$\underline{e_{d,\text{rare},4} = 0,65 \text{ kN/m}^2}$$

### 15.5.1.3 Charakteristischer Wert des E-Moduls als Mittelwert

$$E_{k0,05} = 3.300 \text{ N/mm}^2$$

### 15.5.1.4 Teilsicherheitsbeiwert, Einflussfaktor

Teilsicherheitsbeiwert für das Material  $\gamma_M$

Der Teilsicherheitsbeiwert im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird für das Material wie folgt angesetzt:

$$\gamma_M = 1,0$$

Werkstoffspezifischer Einflussfaktor des E-Moduls

$$A_{\text{mod}}^E = A^{E_1} \cdot A^{E_2} \cdot A^{E_3}$$

#### Dauer der Einwirkung

$$A_{1,20J}^{E_1} = 2,5 \quad (\text{TKB, Tabelle A-1})$$

$$\hookrightarrow \text{KLED – ständig : } A^{E_1} = 2,50 \quad (\text{TKB, Abschnitt 8.2.1})$$

$$\hookrightarrow \text{KLED – kurz : } A^{E_1} = 1,68 \quad (\text{TKB, Abschnitt 8.2.1})$$

Unverstärkte Kunststoffe werden nur auf eine Lebensdauer von 20 Jahren ausgelegt. Bei einer Belastungsdauer > 20 Jahren fällt die Tragfähigkeit deutlich ab (Zeitstandkurven nach DIN 1778 beachten). (vgl. TKB, Abschnitt 5.2.1 (2))

#### Medien- und Temperatureinfluss

$$\text{Bewitterung bis } 40 \text{ }^\circ\text{C} \quad A^{E_2} \cdot A^{E_3} = 1,0 \cdot 1,2 = 1,2 \quad (\text{TKB, Tabelle A-3})$$

$$\text{Bewitterung bis } 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad A^{E_2} \cdot A^{E_3} = 1,0 \cdot 1,0 = 1,0 \quad (\text{TKB, Tabelle A-3})$$

$$A_{\text{mod,KLED – ständig}}^E = 2,50 \cdot 1,2 = \mathbf{3,00}$$

$$A_{\text{mod,KLED – kurz, } 40 \text{ }^\circ\text{C}}^E = 1,68 \cdot 1,2 = \mathbf{2,02}$$

$$A_{\text{mod,KLED – kurz, } 20 \text{ }^\circ\text{C}}^E = 1,68 \cdot 1,0 = \mathbf{1,68}$$

### 15.5.1.5 Bemessungswerte des E-Moduls

KLED Ständig

$$E_{\text{KLED – ständig}} = E_{k0,05} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod,KLED – ständig}}^E)$$

$$E_{\text{KLED – ständig}} = 3.300 \text{ N/mm}^2 / (1,0 \cdot 3,00)$$

$$\underline{\underline{E_{\text{KLED – ständig}} = 1.100 \text{ N/mm}^2}}$$

KLED kurz

**(Temperatur bis 40 °C)**

$$E_{\text{KLED - kurz, 40}^\circ} = E_{k0,05} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod,KLED - kurz,40}^\circ}^E)$$

$$E_{\text{KLED - kurz, 40}^\circ} = 3.300 \text{ N/mm}^2 / (1,0 \cdot 2,02)$$

$$\underline{E_{\text{KLED - kurz, 40}^\circ} = 1.634 \text{ N/mm}^2}$$

**(Temperatur bis 20 °C)**

$$E_{\text{KLED - kurz, 20}^\circ} = E_{k0,05} / (\gamma_M \cdot A_{\text{mod,KLED - kurz,20}^\circ}^E)$$

$$E_{\text{KLED - kurz, 20}^\circ} = 3.300 \text{ N/mm}^2 / (1,0 \cdot 1,68)$$

$$\underline{E_{\text{KLED - kurz, 20}^\circ} = 1.964 \text{ N/mm}^2}$$

**15.5.1.6 Maßgebende Durchbiegung  $u_d(t)$** 

Die Berechnung der Verformungen der Platte infolge der oben beschriebenen Lastkombinationen erfolgt wieder mit dem gleichen Finite- Element- Programm unter Verwendung der beschriebenen zeitabhängigen Materialkennwerte und Netzgeometrie.

**15.5.1.7 Bemessungswert  $C_d$  zur Erfüllung der Durchbiegungsbegrenzung**

*Tragwerk mit geringen Anforderungen*

Der Bemessungswert  $C_d$  der Durchbiegung ergibt sich wie folgt:

$$u_{d,\max} = L/80 = 1.500 \text{ mm} / 80 \quad (\text{TKB, Tabelle 8-2})$$

$$\underline{u_{d,\max} = 18,75 \text{ mm}}$$

**15.5.1.8 Nachweise**

In der Tabelle Beispiel 4-3 sind die berechneten Maximalverformungen zusammengestellt.

**Tabelle Beispiel 4-3:** Zusammenstellung der berechneten Verformungen

Einwirkungs- kombination	Maximale Durchbiegung $\sigma_d$ [mm]	Grenzdurchbiegung $u_{d,\max}$ [mm]	Materialausnutzung
			[%]
1	8,63	18,75	46,0
2	<b>24,61</b>	<b>18,75</b>	<b>131,3</b>
3	8,80	18,75	46,9
4	16,28	18,75	86,8

Maßgebend für die Bemessung ist nun die Lastkombination 2. Bei der gleichzeitigen Wirkung von Eigenlast, Schnee und Winddruck treten die größten Verformungen auf. Der Nachweis der Durchbiegung ist somit nicht eingehalten, obwohl lediglich geringe Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit des Tragwerks gestellt werden. Im nächsten Schritt sollte das weitere Vor-

gehen mit der Bauherrschaft bzw. den Nutzern des Gebäudes abgestimmt und z. B. die Möglichkeit von Schneeräumungen geprüft werden. Gegebenenfalls muss eine Erhöhung der Plattenstärke auf 25 mm oder mehr erfolgen.

## 15.6 Modellierungsvarianten für die PMMA-Platte

### 15.6.1 Allgemein

In diesem Abschnitt soll kurz auf das Thema Modellbildung eingegangen werden. Je nach dem Grad der Genauigkeit und dem damit verbundenen Modellierungsaufwand variieren auch die Berechnungsergebnisse zum Teil stark. Im Folgenden wird eine Übersicht über verschiedene Modellierungsvarianten gegeben und die jeweiligen Ergebnisse werden dargestellt und miteinander verglichen. Dazu werden im Weiteren lediglich die maßgebenden Lastkombinationen 4 für den Tragfähigkeitsnachweis bzw. 2 für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis betrachtet.

### 15.6.2 Einachsig gespannte Platte

Dieser sehr konservative Ansatz vernachlässigt die Tragwirkung der zweiten, größeren Spannrichtung der Platte. Es werden die bekannten Berechnungsgleichungen der Balkentheorie verwendet:

$$M = \frac{q \cdot l^2}{8} = \frac{0,94 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,5^2 \text{ m}^2}{8} = 0,264 \text{ kNm/m}$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{0,264 \text{ kNm/m}}{100/6 \cdot 2^2 \text{ cm}^3/m} = 3,97 \text{ N/mm}^2$$

$$u = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot l^4}{E \cdot I} = \frac{5}{384} \cdot \frac{1,17 \text{ N/(mm} \cdot \text{m)} \cdot 1500^4 \text{ mm}^4}{1964 \text{ N/mm}^2 \cdot 1000/12 \cdot 20^3 \text{ mm}^4/m} = 58,9 \text{ mm} \gg u_{d,\max}$$

### 15.6.3 Zweiachsig gespannte, linear-elastische Platte mit Tabellenwerk

Hier wird auf die bekannten Tabellenwerke zur Plattentheorie zurückgegriffen, um die maximalen Spannungen und Verformungen zu berechnen. Nichtlinearitäten und verschiedene Querdehnzahlen bleiben dabei unberücksichtigt. Für dieses Beispiel wird „Roark's Formulas of stress and strain“ verwendet. Die angenetzte Querdehnzahl beträgt  $\nu = 0,30$ .

$$\frac{a}{b} = \frac{2 \text{ m}}{1,5 \text{ m}} = 1,33$$

Daraus folgen die Berechnungsparameter:

$$\alpha = 0,0719$$

$$\beta = 0,4274$$

$$\gamma = 0,470$$

Die maximale Spannung und Durchbiegung ergibt sich dann zu:

$$\max \sigma = \frac{\beta \cdot q \cdot b^2}{t^2} = \frac{0,4274 \cdot 0,94 \cdot 1,5^2 \cdot 1000}{20^2} \text{ N/mm}^2 = 2,26 \text{ N/mm}^2$$

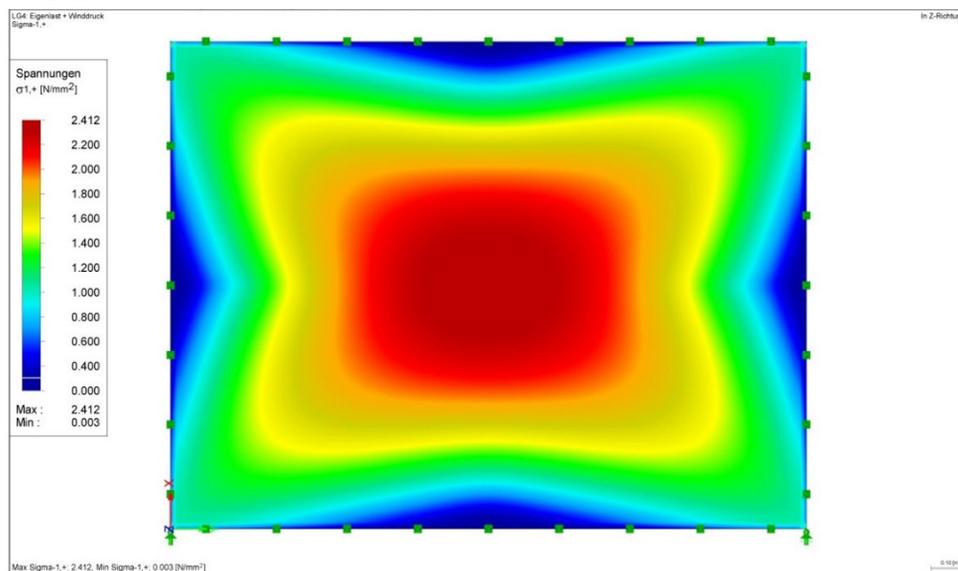
Da die maximale Spannung mit abnehmendem  $v$  auch kleiner wird, unterschätzt dieser Ansatz ( $v = 0,30$ ) die tatsächlich auftretenden Spannungen für  $v = 0,448$  geringfügig.

$$\max u = \frac{\alpha \cdot q \cdot b^4}{E \cdot t^3} = \frac{0,0719 \cdot 1,17 \cdot 1500^4}{1964 \cdot 20^3 \cdot 1000} \text{ mm} = 27,1 \text{ mm} \gg u_{d,\max}$$

### 15.6.4 Lineare Finite-Element-Berechnung

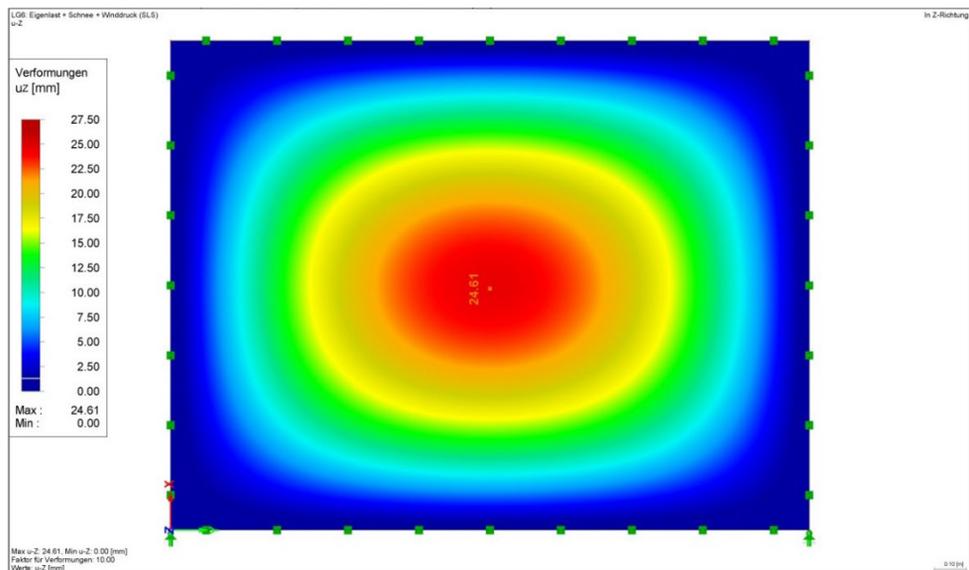
In diesem Abschnitt werden noch mal die Ergebnisse für die Hauptspannungen der maßgebenden Lastkombinationen grafisch dargestellt. Sie entsprechen den zuvor in den Kapiteln 5 bzw. 6 tabellarisch angegebenen Werten. Die zeitabhängigen Materialkennwerte finden bei dieser Modellierungsvariante eine Berücksichtigung.

Hauptspannungen [N/mm<sup>2</sup>]:



$\max \sigma = 2,41 \text{ N/mm}^2$

Verformungen [mm]:

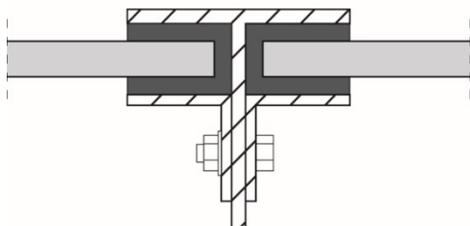


max  $u = 24,6$  mm

### 15.6.5 Nichtlineare Finite- Element- Berechnung mit abhebenden Ecken

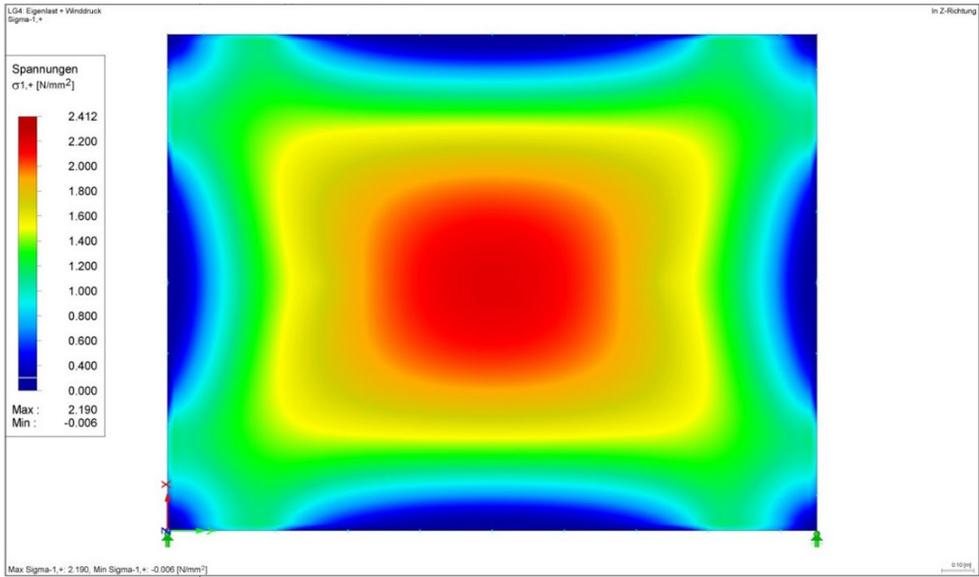
Bei dieser Modellierungsvariante wird das geometrisch nichtlineare Verhalten genauso berücksichtigt wie das nichtlineare Materialverhalten und eine weiche Lagerung durch Translationsfedern, die ein Abheben der Plattenecken erlauben. Dabei wird eine möglichst realistische Abbildung der Lagerungsbedingungen angestrebt, wodurch sich die Verteilung der Spannungen in der Platte gegenüber der zuvor vorgestellten Variante deutlich verändert. Die Linienlagerung der PMMA-Platte erfolgt durch ein Klemmprofil mit einem weichen EPDM-Dichtmaterial. Der E-Modul des Dichtprofils wird mit  $5 \text{ N/mm}^2$  angenommen. In der folgenden Abbildung ist eine Prinzipskizze der Plattenlagerung dargestellt.

Lagerungsdetail



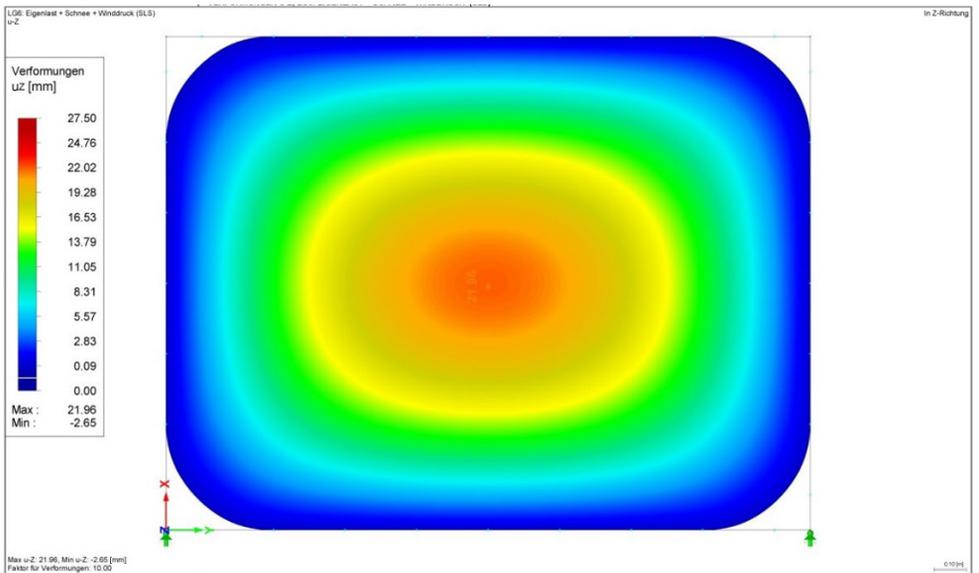
Die Berechnungsergebnisse für die maßgebenden Lastkombinationen sind den Ausdrücken aus dem Finite-Element-Programm zu entnehmen.

Hauptspannungen [N/mm<sup>2</sup>]:



$\max \sigma = 2,19 \text{ N/mm}^2$

Verformungen [mm]:



$\max u = 22,0 \text{ mm}$

Da für die beiden Varianten jeweils die gleiche Skalierung verwendet wurde, kann man anhand der Farbverläufe auf den ersten Blick erkennen, dass sowohl die Spannungen als auch die Verformungen bei der letzten Variante deutlich reduziert werden konnten und durch die genauere

Modellierung günstigere, d. h. auch wirtschaftlichere Bemessungs-ergebnisse erzielt werden konnten. Wenngleich auch aus dieser Berechnung noch immer zu große Verformungen resultieren.

### 15.6.6 Vergleich der Berechnungsergebnisse

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse für die verschiedenen Modellierungsvarianten noch einmal zusammenfassend dargestellt.

**Tabelle Beispiel 4-4:** Vergleich der Modellierungsvarianten

Modellierungsvariante	Max. Hauptzugspannung $\sigma_d$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Ausnutzung [%]	Maximale Verformung $u_d$ [mm]	Ausnutzung [%]
1-achsig gespannte Platte (Handformeln)	3,97	49,3	58,9	314,1
2-achsig gespannte Platte (Tabellenwerk)	2,26	28,0	27,1	144,5
Lineare Finite- Element- Berechnung	2,41	29,9	24,6	131,2
Nichtlin. FE-Berechnung (abheb. Ecken)	2,19	27,2	22,0	117,3

Die exemplarisch durchgeführte Vergleichsrechnung macht deutlich, wie stark das Bemessungsergebnis von der gewählten Modellvorstellung abhängt. Die sehr starke Vereinfachung durch Ignorieren des zweiachsigen Lastabtrags ergibt zwar sehr schnelle Ergebnisse durch einfache Handformeln, erscheint aber als zu konservativ und im Sinne einer wirtschaftlichen Bemessung als ungeeignet. Die Verwendung von Tabellenwerken erlaubt es nicht, die zeitabhängigen Materialeigenschaften genau zu berücksichtigen, liefert aber für eine Querschnittsabschätzung im Zuge der Vorbemessung befriedigende Resultate.

Der Modellierungsaufwand für eine einfache Rechteckplatte mit einem kommerziellen Finite-Element-Programm hält sich in Grenzen, wenngleich aufgrund der unterschiedlichen Materialkennwerte mehrere Modelle generiert werden müssen. Bei der nichtlinearen Berechnung nimmt sowohl der Modellierungsaufwand als auch die Rechenzeit deutlich zu. Allerdings reduzieren sich die maximalen Spannungen und Durchbiegungen bei dem dargestellten Beispiel um etwa 10 Prozent.

## 15.7 Literatur zum Beispiel 4

- [1] Evonik Industries AG: Technische Information Plexiglas®, Januar 2013
- [2] DIBT: Anlage zu der Musterliste der technischen Baubestimmungen des DIBT.
- [3] GLEITER, Uwe: Einsatz von transparenten Thermoplasten im Bauwesen, Dissertation, Institut für Statik, TU Darmstadt, 2002



## 16 Beispiel 5 Sickerwasserschacht aus PE-HD

Dipl.-Ing. Rolf Schadow

### 16.1 System, Bauteilmaße, Querschnittswerte, Annahmen

#### Aufgabenstellung

Geplant ist ein erdversetztes Schachtbauwerk aus Polyethylen hoher Dichte (PE-HD). Der Schacht aus Vollwandmaterial steht am Rande einer Deponie und nicht in einer Böschung.

Die Beanspruchung resultiert im Wesentlichen aus den folgenden Einwirkungen :

- Unabhängige ständige Einwirkung aus :
  - Konstruktionseigenlast
  - Erddruck in horizontaler und vertikaler Richtung
- Unabhängige veränderliche Verkehrslast seitlich vom Schachtmantel

Bemessungsstand des Sickerwassers : Schachtsohle

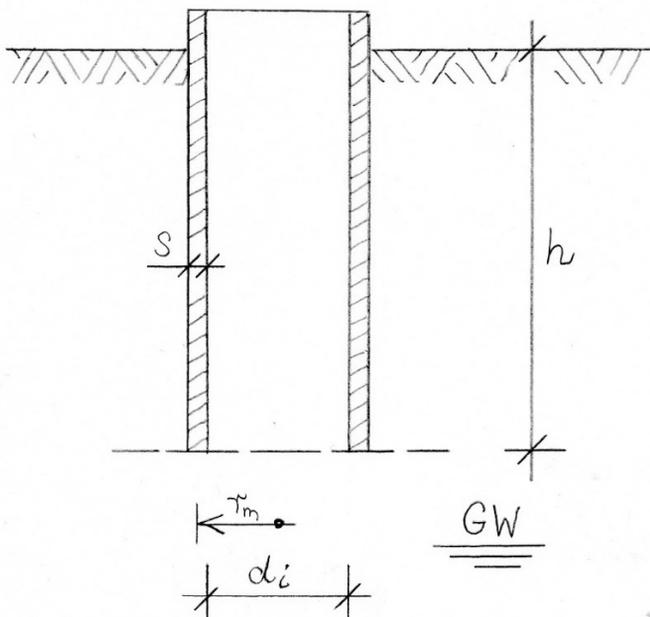
Das Aufstauen des Sickerwassers innerhalb des Schachtes wird in diesem Beispiel ausgeschlossen.

Umgebungsbedingungen :

- Bemessungswandtemperatur :  $T = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Füllmedium : Sickerwasser

Nutzungsdauer : 20 Jahre

Die Schachtdecke und die Schachtsohle sind nicht Gegenstand der Statik.

**Einbauskizze**

Einbautiefe	$h$	=	4,70 m
Innendurchmesser	$d_i$	=	1500 mm
Wanddicke	$s$	=	55 mm
↳ mittlerer Radius	$r_m$	=	777,5 mm

**Querschnittswerte**

in Umfangsrichtung

Querschnittsfläche	$A_r$	=	550 cm <sup>2</sup> /m
Widerstandsmoment	$W$	=	504 cm <sup>3</sup> /m
Trägheitsmoment	$I$	=	1386 cm <sup>4</sup> /m

in Axialrichtung

Querschnittsfläche	$A_a$	=	550 cm <sup>2</sup> /m
--------------------	-------	---	------------------------

Schwächungen durch Stutzen (Öffnungen) werden vernachlässigt.

**Annahmen**

Wichte des Bodens :	$\gamma_B$	=	20 kN/m <sup>3</sup>
---------------------	------------	---	----------------------

Einbettung :	Bodengruppe	G2
	Verdichtungsgrad	97 %
	Bettungsfaktor	$\beta = 2$
Anstehender Boden :	Bodengruppe	G 2
	Verdichtungsgrad	97 %
Verkehrslast neben dem Schacht :		$q = 16,7 \text{ kN/m}^2$ (charakteristischer Wert)
Vorverformung aus struktureller Imperfektion :		$\delta_s = 0,50 \%$
Vorverformung aus geometrischer Imperfektion :		$\delta_g = 0,50 \%$
Ungleichförmigkeitsfaktor zur Berücksichtigung der Unsymmetrien beim Einbau :		$\Omega = 0,7$
Innerer Boden-Reibungswinkel :		$\varphi = 30^\circ$
Mantelreibung mit 1/3 Boden-Reibungswinkel :		$\delta_a = 10^\circ$
Rohrmaterial:		
Thermoplast PE 80 nach DIN 8075, ein in Deutschland zugelassener Werkstoff, vgl. [TKB], Tabelle D-1, Fußnote <sup>1)</sup>		
Querkontraktionszahl bei PE-HD :		$\nu = 0,38$
Durchbiegungsbegrenzung und Einwirkungskombination, vergleiche [TKB], Absatz 8.3.3 Satz (2) :		$u_{d,max} = 6 \%$ bei einer quasi-ständigen Kombination

## 16.2 Einwirkungen

### 16.2.1 Charakteristische Werte

Vertikale Bodenspannung an Schachtoberkante aus Verkehr :

$$e_{q,k} = 16,7 \text{ kN/m}^2$$

Vertikale Bodenspannung am Schachtfuß :

$$\begin{aligned} \text{aus Boden} \quad e_{g,k} &= 4,70 \cdot 20 = 94,0 \text{ kN/m}^2 \\ \text{aus Verkehr} \quad e_{q,k} &= 16,7 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

### 16.2.2 Bemessungswerte in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit

Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkung nach

[TKB], Tabelle D-1, Zeile 3, im Anhang D :  $\gamma_G = 1,35$ ,  $\gamma_Q = 1,50$

Horizontaler Erddruckbeiwerte nach DIN 4085, Gleichung (7) aufgrund der Nachgiebigkeit der PE-Schachtmantels mit aktiven Ansatz unter Berücksichtigung einer Wandneigung  $\alpha = 0$  und Geländeneigung  $\beta = 0$  :

$$K_{ah} = \frac{\cos^2 \phi}{1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta_a) \cdot \sin \phi}{\cos(-\delta_a)}}} = 0,304$$

Horizontale Bodenspannung am Schachtfuß aus Boden und Verkehr  
nach [TKB], Gleichung (D.1) im Anhang D :

$$\begin{aligned} e_{d,g} &= 1,35 \cdot 94,0 \cdot 0,304 = 38,58 \text{ kN/m}^2 \\ e_{d,q} &= 1,50 \cdot 16,7 \cdot 0,304 = 7,62 \text{ kN/m}^2 \\ e_d &= 38,58 + 7,62 = 46,2 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

### 16.2.3 Repräsentative Werte im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Quasi-ständige Einwirkungskombination gemäß Annahme

Kombinationsbeiwert nach [TKB], Tabelle D-2, Kategorie E im Anhang D

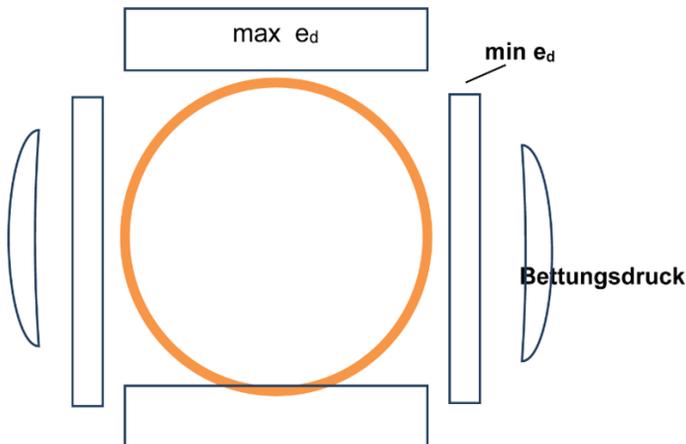
$$\psi_{2,i} = 0,8$$

Horizontale Bodenspannung am Schachtfuß aus Boden und Verkehr :  
nach [TKB], Gleichung (D.6) im Anhang D :

$$\begin{aligned} e_{d,perm,g} &= 94,0 \cdot 0,304 = 28,58 \text{ kN/m}^2 \\ e_{d,perm,q} &= 0,8 \cdot 16,7 \cdot 0,304 = 4,06 \text{ kN/m}^2 \\ e_{d,perm} &= 28,58 + 4,06 = 32,6 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

## 16.3 Schnittgrößen am Schachtfuß

### 16.3.1 Schnittgrößen im Grenzzustand der Tragfähigkeit



- Radiale unsymmetrische Erddruckverteilung des biegeweichen Schachts nach [3] aus Nebenrechnung an der Seite des Schachtmantels in Analogie zu [4] und [6]

$$\text{mit } e_{d,g} = 38,58 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{und} \quad e_{d,q} = 7,62 \text{ kN/m}^2$$

$$\begin{aligned} \hookrightarrow \text{Biegemoment : } m_d &= 0,56 \text{ kNm/m (Zug innen bei max } e_d) \\ \text{Normalkraft : } n_d &= -31,7 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

- Axial im Schachtmantel wirkende Last :

aus Nebenrechnung am Schachtfuß in Analogie zu [4] und [6]

$$\hookrightarrow \text{Normalkraft : } n_d = -19,0 \text{ kN/m}$$

### 16.3.2 Schnittgrößen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

- Radiale Erddruckverteilung des biegeweichen Schachts nach [3]

aus Nebenrechnung an der Seite des Schachtmantels in Analogie zu [4]

$$\begin{aligned} \text{mit} \quad e_{d,perm,g} &= 28,58 \text{ kN/m}^2 \\ \text{und} \quad e_{d,perm,q} &= 4,06 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hookrightarrow \text{Biegemoment : } m_{perm,d} &= 0,39 \text{ kNm/m (Zug innen bei max } e_d) \\ \text{Normalkraft : } n_{perm,d} &= -22,46 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

- Axial im Schachtmantel wirkende Last

aus Nebenrechnung am Schachtfuß

$$\hookrightarrow \text{Normalkraft : } n_{perm,d} = -14,8 \text{ kN/m}$$

## 16.4 Nachweis in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit

### 16.4.1 Bemessungswerte des Baustoffs

Teilsicherheitsbeiwerte nach [TKB], Tabelle E-1 im Anhang E :

$$\text{Festigkeit} \quad \gamma_M = 1,3$$

$$\text{Örtliche Stabilität} \quad \gamma_M = 1,4$$

Herstellerangaben der charakteristischen Kurzzeit-Eigenschaftsgrößen :

$$\text{Elastizitätsmodul : } E_{k 0,05} = 650 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{k 0,50} = 800 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Biegezugfestigkeit : } f_{BZ,k 0,05} = 16 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Druckfestigkeit : } f_{D,k 0,05} = 20 \text{ N/mm}^2$$

**Einflussfaktoren** infolge Belastungsdauer von 20 Jahren :

nach [TKB], Tabelle A-1 im Anhang A

$$\text{PE 80, Zug} \quad A_{1,20J}^f = 1,7$$

PE 80, Druck	$A_{1,20J}^f$	=	1,5
PE 80, E-Modul	$A_{1,20J}^E$	=	4,7

**Einflussfaktoren** infolge Medieneinfluss (Sickerwasser) :  
nach [TKB], Tabelle A-2 im Anhang A

PE 80, Zug	$A_2^f$	=	1,1
PE 80, Druck	$A_2^f$	=	1,0
PE 80, E-Modul	$A_2^E$	=	1,1

**Einflussfaktoren** infolge Temperatureinfluss bei = 40 °C :  
nach [TKB], Tabelle A-3a im Anhang A

PE 80, Festigkeit	$A_3^f$	=	1,4
PE 80, E-Modul	$A_3^E$	=	1,3

### Belastungsdauerabhängiger Elastizitätsmodul

Kurzzeit - Elastizitätsmodul beim Nachweis der Stabilität

[TKB], Gleichung (8.14)

$$E_K = \frac{E_{k0,05}}{\sqrt{A_1^E \cdot A_2^E \cdot A_3^E}} = \frac{650}{\sqrt{1,0 \cdot 1,1 \cdot 1,3}} = 455 \text{ N/mm}^2$$

Langzeit - Elastizitätsmodul beim Nachweis der Stabilität

$$E_L = \frac{E_{k0,05}}{\sqrt{A_1^E \cdot A_2^E \cdot A_3^E}} = \frac{650}{\sqrt{4,7 \cdot 1,1 \cdot 1,3}} = 210 \text{ N/mm}^2$$

Gewichteter Elastizitätsmodul beim Nachweis der Stabilität  
im Verhältnis der dauernden und kurzzeitigen Einwirkung

$$E_{\text{gewichtet}} = \frac{455 \cdot 7,62 + 210 \cdot 38,58}{46,2} = 250 \text{ N/mm}^2$$

### Bemessungswerte des Widerstands

Langzeit-Grenzspannungen nach [TKB], Gleichung (5.3)

Biegezug

$$f_{BZ,L,d} = \frac{f_{BZ,k0,05}}{\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^f} = \frac{16}{1,3 \cdot 1,7 \cdot 1,1 \cdot 1,4} = 4,7 \text{ N/mm}^2$$

Druck

$$f_{D,L,d} = \frac{f_{D,k0,05}}{\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^f} = \frac{-20}{1,3 \cdot 1,5 \cdot 1,0 \cdot 1,4} = -7,3 \text{ N/mm}^2$$

**Kontrolle der Abminderung** nach [TKB], Absatz 5.5, Satz (3)

Für Festigkeitsnachweise gelten für „ständig“ wirkende Lasten :

$$A_1^f \cdot A_2^f \cdot A_3^f \geq 1,75$$

Im Nachweis für Druckfestigkeit gilt :

$$1,5 \cdot 1,0 \cdot 1,4 = 2,1 > 1,75$$

### 16.4.2 Nachweis der Biegetragfähigkeit

auf der Basis der Spannung nach [TKB], Gleichung (8.4), Langzeit  
Der Kurzzweitnachweis ist nicht maßgebend.

**Spannungsnachweis in Umfangsrichtung** unter radialem Druck

$$\sigma_{\phi,D,L,d} = -\frac{31,7 \cdot 10}{550} - \frac{0,56 \cdot 10^3}{504} = -1,69 \text{ N/mm}^2 < -7,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\phi,BZ,L,d} = -\frac{31,7 \cdot 10}{550} + \frac{0,56 \cdot 10^3}{504} = +0,53 \text{ N/mm}^2 < 4,7 \text{ N/mm}^2$$

**Spannungsnachweis in Axialrichtung** unter axialem Druck

$$\sigma_{z,D,L,d} = -\frac{19,0 \cdot 10}{550} = -0,35 \text{ N/mm}^2 < -7,3 \text{ N/mm}^2$$

**Überlagerung der Beanspruchungsarten nach [5]**

$$\sigma_{v,d} = \frac{m-1}{2 \cdot m} \cdot (\sigma_{z,d} + \sigma_{\phi,d}) \pm \frac{m+1}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot m} \sqrt{(\sigma_{z,d} - \sigma_{\phi,d})^2 + \sigma_{z,d}^2 + \sigma_{\phi,d}^2 + 4 \cdot \tau_d^2}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{v,d} &= \frac{1,25-1}{2 \cdot 1,25} \cdot (-0,35 - 1,69) \pm \frac{1,25+1}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,25} \sqrt{(-0,35 + 1,69)^2 + 0,35^2 + 1,69^2} \\ &= 1,91 \text{ N/mm}^2 < 4,7 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

**Berücksichtigung der Krümmung der Randfasern**

Der Korrekturfaktor  $\alpha = 1 \pm \frac{s}{3 \cdot r_m}$

zur Berücksichtigung der Krümmung der inneren bzw. äußeren Randfaser wurde bei der Biegespannung vernachlässigt.

### 16.4.3 Stabilitätsversagen

Der Stabilitätsnachweis in **Ufangsrichtung** unter radialem Druck mit gewichtetem Elastizitätsmodul.

Kritischer ideal-elastischer Beuldruck nach DSV 2205-2, siehe [TKB], Abschnitt 8.2.3, Satz (14)

$$\sigma_{cr} = 0,67 \cdot E_{\text{gewichtet}} \cdot \frac{r_m}{h} \cdot \left( \frac{s}{r_m} \right)^{2,5}$$

Realer Beultragdruck auf der Grundlage nach [1] :

$$\sigma_{Rcr} = 0,75 \cdot \frac{E_{\text{gewichtet}} \cdot I}{r_m^3} \cdot m^2 + \frac{1}{m^2} \cdot \frac{r_m \cdot \pi^2}{48} k_s (1-x)^2 \cdot (2+x)$$

mit  $x = c - \sqrt{c^2 - 1}$

$$c = 1 + \frac{2}{m \left( \frac{r_m^2 \cdot k_s}{E_{\text{gewichtet}} \cdot A_r} + 1 \right) - 1}$$

Die Periodenzahl  $m$  dient zur Abschätzung der Länge der Einzelwelle und wird über eine Minimumberechnung über eine Nebenrechnung bestimmt:

$$m = 4,90$$

Die Bettungszahl  $k_s$  wird, wie im Tunnelbau üblich, mit

$$k_s = 0,6 \cdot \frac{E_{\text{gewichtet}}}{r_m} \text{ berechnet.}$$

$$\sigma_{Rcr} = 175,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Bemessungswert des realen Beultragdrucks :

$$\sigma_{Rcr,d} = \frac{\sigma_{Rcr}}{\gamma_M} = \frac{175,0}{1,4} = 125,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Maximaler radialer Druck aufgrund Erd- und Verkehrslasten:

$$e_d = 46,2 \text{ kN/m}^2 < 125,0 \text{ kN/m}^2$$

Der Stabilitätsnachweis in **Axialrichtung** unter axialem Druck mit gewichtetem Elastizitätsmodul:

Kritische ideal-elastische Beulspannung nach [2], siehe [TKB], Abschnitt 8.2.3, Satz (16) :

$$\sigma_{cr} = \frac{E_{\text{gewichtet}} \cdot s}{\sqrt{3(1-\nu^2)} r_m}$$

Reale Beultragspannung bei mittellangen, elastisch gebetteten Kreiszyllindern in Anlehnung an [3] :

$$\sigma_{Rcr} = \alpha \cdot \beta \cdot \frac{E_{\text{gewichtet}} \cdot s}{\sqrt{3(1-\nu^2)} r_m}$$

mit dem Abminderungsfaktor zur Erfassung der baupraktischen Einflüsse

$$\alpha = \frac{0,52}{\sqrt{1 + \frac{r_m}{100 \cdot s}}}$$

Bettungsfaktor der Kiesummantelung

$$\beta = 2$$

$$\sigma_{Rcr} = 10,75 \frac{N}{mm^2}$$

Bemessungswert der realen Beultragspannung :

$$\sigma_{Rcr,d} = \frac{\sigma_{Rcr}}{\gamma_M} = \frac{10,75}{1,4} = 7,68 \frac{N}{mm^2}$$

Vorhandene Axialspannung :

$$\sigma_d = 0,35 \text{ N/mm}^2 < 7,68 \text{ N/mm}^2$$

Überlagerung der Beanspruchungsarten nach [TKB], Absatz 8.2.3, Satz (17)

$$\left( \frac{46,2}{125,0} \right)^{1,25} \pm \left( \frac{0,35}{7,68} \right)^{1,25} = 0,31 < 1,0$$

## 16.5 Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

### 16.5.1 Bemessungswerte des Baustoffs

Nach [TKB], Absatz 5.5, Satz (1) beträgt der Teilsicherheitsbeiwert für den Elastizitätsmodul bei Berücksichtigung von Unsicherheiten in den geometrischen Eigenschaften und im Tragwiderstandsmodell  $\gamma_M = 1,1$ .

Charakteristischer mittlerer Elastizitätsmodul  $E_{k0,50}$  sowie Einflussfaktoren  $A^{E_1}$ ,  $A^{E_2}$  und  $A^{E_3}$  siehe Abschnitt 4.1.

Kurzzeit - Elastizitätsmodul beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

$$E_{K,d} = \frac{E_{k0,50}}{\gamma_M \cdot A^E} = \frac{800}{1,1 \cdot 1,0 \cdot 1,1 \cdot 1,3} = 509 \frac{N}{mm^2}$$

Langzeit - Elastizitätsmodul beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

$$E_{L,d} = \frac{E_{k0,50}}{\gamma_M \cdot A^E} = \frac{800}{1,1 \cdot 4,7 \cdot 1,1 \cdot 1,3} = 108 \frac{N}{mm^2}$$

Gewichteter Elastizitätsmodul beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit im Verhältnis der dauernden und kurzzeitigen Einwirkung

$$E_{gewichtet,d} = \frac{509 \cdot 4,06 + 108 \cdot 28,58}{32,6} = 158 \frac{N}{mm^2}$$

### 16.5.2 Maßgebende Verformung $u_d$

Mit gewichtetem Elastizitätsmodul ergibt sich aus Nebenrechnung in Analogie zu [4], Abschnitt 8.4 mit  $e_{d,perm,g} = 28,58 \text{ kN/m}^2$

und  $e_{d,perm,q} = 4,06 \text{ kN/m}^2$   
 die Durchmesseränderung aus Erddruck : 3,3 %

Vorverformungen nach Annahmen im Abschnitt 1

Aufgrund struktureller Imperfektion : 0,5 %

Aufgrund geometrischer Imperfektion : 0,5 %

$$\hookrightarrow u_{d,perm} = 4,3 \%$$

### 16.5.3 Bemessungswert zur Erfüllung der Durchbiegungsbegrenzung

Bemessungswert gemäß Annahme :  $u_{d,max} = 6 \%$

$\hookrightarrow$  nach [TKB], Gleichung (8.18) :  $u_{d,perm} = 4,3 \% < u_{d,max} = 6 \%$

## 16.6 Literatur zum Beispiel 5

- [1] G. Sonntag: Die Stabilität dünnwandiger Rohre im kohäsionslosen Kontinuum, Felsmechanik und Ingenieurgeologie, Vol. IV/3, 1966, Springer-Verlag, Wien / New-York
- [2] DIN EN 1993-1-6 : 2010-12: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten Festigkeit und Stabilität von Schalen
- [3] Empfehlungen des Arbeitskreises „Geotechnik der Deponiebauwerke“ E 2-34 Statische Berechnung von vertikalen Schächten in Deponien
- [4] Entwurf Arbeitsblatt DWA-A 127-2  
 Statische Berechnung von Entwässerungsanlagen  
 Teil 2: Vollwandrohre in offener Bauweise
- [5] Bardenheier, R.: Mechanisches Versagen von Polymerwerkstoffen,  
 Kunststoffe Fortschrittsbericht, Carl Hanser Verlag, München (1982)
- [6] Entwurf Merkblatt DWA-M 127-4  
 Statische Berechnung von zylindrischen, erdeingebauten Schächten



# 17 Beispiel 6 Pultrusionsprofil aus glasfaserverstärktem Kunststoff als Einfeldträger für eine Überdachung

Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Nordhues

## 17.1 Aufgabenstellung, statisches System

Aufgabenstellung:

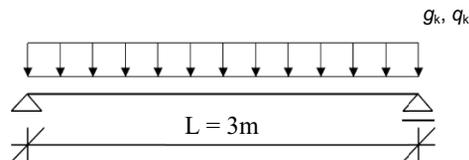
Es soll ein Pultrusionsprofil aus glasfaserverstärktem Kunststoff als Einfeldträger für eine Überdachung berechnet werden.

Für dieses Beispiel wird ein Pultrusionsprofil der Fa. Fiberline Composites mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (Nr. Z-10.9-299) gewählt.

Um das Vorgehen nach TKB und den entsprechenden Normen zu zeigen, werden hier aber nur die Querschnittswerte und Materialwerte der abZ entnommen. Fehlende Angaben werden als Annahmen ergänzt.

Wegen der besseren Übersichtlichkeit werden hier nur die Eigenlasten des Profils und Schneelasten berücksichtigt.

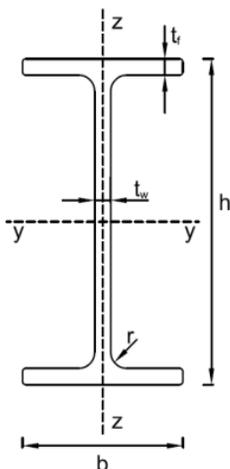
Statisches System:



## 17.2 Querschnitt, Werkstoff

### 17.2.1 Querschnittswerte

I-Profil von „Fiberline Composites“ der Höhe  $H = 300\text{mm}$



Höhe	h [mm]	300
Breite	b [mm]	150
Flanschdicke	$t_f$ [mm]	15
Stegdicke	$t_w$ [mm]	15
Ausrundung	r [mm]	15
Querschnittsfläche	A [mm <sup>2</sup> ]	8740
Trägheitsmoment um y-Achse	$I_y$ [mm <sup>4</sup> ]	$119 \cdot 10^6$
Trägheitsmoment um z-Achse	$I_z$ [mm <sup>4</sup> ]	$8,54 \cdot 10^6$
Stegfläche	$A_{\text{Steg}}$ [mm <sup>2</sup> ]	4050

Querschnittswerte aus abZ (Nr. Z-10.9-299) vom 22.12.2011 – Fiberline Composites „Pultrudierte Profile aus glasfaserverstärkten Kunststoffen“

### 17.2.2 Material

nach abZ Nr. Z-10.9-299:

- Matrix: ungesättigtes Polyesterharz UP (Harz P4506)
- Spezifisches Gewicht  $g = 15,7$  kg/m je Meter Profillänge

Annahmen:

- $\delta = 0,35$  Glasmasseanteil
- Profil getempert

## 17.3 Einwirkungen (charakteristische Werte)

### 17.3.1 Eigenlast

Eigenlast des I-Profiles:  $g_k = 0,157$  kN/m (abZ Nr. Z-10.9-299)

### 17.3.2 Schneelast

Annahme einer resultierenden Schneelast aus der Einzugsfläche des Trägers:

Schneelast:  $q_k = 2,5$  kN/m

### 17.3.3 Temperatur

Entfällt, da statisch bestimmtes System.

### 17.3.4 Einwirkungsdauer

Kunststoffe zeigen ein besonders zeitabhängiges Verhalten, weswegen der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit unter Beachtung der Einwirkungsdauer geführt wird. Die Einwirkungen werden in „Klassen der Lasteinwirkungsdauer“ (KLED) eingeteilt:

**Eigenlast:** ständige Einwirkung; KLED = ständig (50 Jahre)  
(TKB, Tab. 6-2, Tab. 8-1)

**Schnee:** veränderliche Einwirkung; KLED = kurz (1 Woche)  
(TKB, Tab. 6-2, Tab. 8-1)

## 17.4 Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit

### 17.4.1 Teilsicherheitsbeiwerte

#### 17.4.1.1 Eigenlast

##### Nachweiskriterium:

Fall B (Versagen des Tragwerks oder der tragenden Bauteile, einschließlich Fundamente, Pfahlgründungen usw.);

Auswirkung der Einwirkung: ungünstig:  $\gamma_{G,sup} = 1,35$  (TKB, Tab. D-1)

#### 17.4.1.2 Schnee

##### Nachweiskriterium:

Fall B (Versagen des Tragwerks oder der tragenden Bauteile, einschließlich Fundamente, Pfahlgründungen usw.);

Auswirkung der Einwirkung: ungünstig:  $\gamma_{Q,sup} = 1,5$  (TKB, Tab. D-1)

#### 17.4.1.3 Material

Maschinell gefertigte Faserverbundstoffe ( $\nu = 0,10$ ): (TKB, Tab. E-1)

Festigkeit  $\gamma_M = 1,35$

Gesamtstabilität  $\gamma_M = 1,35$

### 17.4.2 Einwirkungskombinationen

$$E_d = E \left\{ \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \oplus \gamma_P \cdot P_k \oplus \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \right\}$$

#### 17.4.2.1 Einwirkungskombination 1: Eigenlast (ständig)

$$E_{d,1} = \gamma_G \cdot g_k = 1,35 \cdot 0,157 \text{ kN/m} = 0,212 \text{ kN/m} = 212 \text{ N/m}$$

### 17.4.2.2 Einwirkungskombination 2: Eigenlast + Schnee (kurz)

$$E_{d,2} = \gamma_G \cdot g_k + \gamma_Q \cdot q_k = 1,35 \cdot 0,157 \text{ kN/m} + 1,5 \cdot 2,5 \text{ kN/m} = 3,962 \text{ kN/m} = 3962 \text{ N/m}$$

### 17.4.3 Bemessungsschnittgrößen (Einfeldträger)

$$M_{\max} = \frac{E_d \cdot L^2}{8} \qquad V_{\max} = \frac{E_d \cdot L}{2}$$

$$M_{(x=L/4)} = \frac{E_d \cdot L^2 \cdot 3}{32} \qquad V_{(x=L/4)} = \frac{E_d \cdot L}{4}$$

#### 17.4.3.1 KLED – ständig (EK1)

**Moment:**  $M_{\max} = E_{d,1} \cdot L^2 / 8 = 212 \text{ N/m} \cdot (3 \text{ m})^2 / 8 = \mathbf{238,5 \text{ Nm} = 238500 \text{ Nmm}}$

$$M_{(x=L/4)} = 3/32 \cdot L^2 \cdot E_{d,1} = 3/32 \cdot (3\text{m})^2 \cdot 212\text{N/m} = \mathbf{178,9 \text{ Nm} = 178900 \text{ Nmm}}$$

**Querkraft:**  $V_{\max} = E_{d,1} \cdot L / 2 = 212 \text{ N/m} \cdot 3 \text{ m} / 2 = \mathbf{318 \text{ N}}$

$$V_{(x=L/4)} = E_{d,1} \cdot L / 4 = 212 \text{ N/m} \cdot 3 \text{ m} / 4 = \mathbf{159 \text{ N}}$$

**Normalkraft:**  $N = \mathbf{0}$

#### 17.4.3.2 KLED – kurz (EK2)

**Moment:**  $M_{\max} = E_{d,2} \cdot L^2 / 8 = 3962 \text{ N/m} \cdot (3 \text{ m})^2 / 8 = \mathbf{4457,3 \text{ Nm} = 4457300 \text{ Nmm}}$

$$M_{(x=L/4)} = 3/32 \cdot L^2 \cdot E_{d,2} = 3/32 \cdot (3 \text{ m})^2 \cdot 3962 \text{ N/m} = \mathbf{3342,9 \text{ Nm} = 3342900 \text{ Nmm}}$$

**Querkraft:**  $V_{\max} = E_{d,2} \cdot L / 2 = 3962 \text{ N/m} \cdot 3 \text{ m} / 2 = \mathbf{5943 \text{ N}}$

$$V_{(x=L/4)} = E_{d,2} \cdot L / 4 = 3962 \text{ N/m} \cdot 3 \text{ m} / 4 = \mathbf{2972 \text{ N}}$$

**Normalkraft:**  $N = \mathbf{0}$

## 17.4.4 Werkstoffspezifische Einflussfaktoren

### 17.4.4.1 Werkstoffspezifischer Einflussfaktor der Festigkeit

$$A^f_{\text{mod}} = A^f_1 \cdot A^f_2 \cdot A^f_3$$

#### Einflussfaktor infolge Belastungsdauer $A^f_1$

Materialtyp: Pultrusionsprofile P mit Glasanteil  $\delta = 35 \%$

$$A^f_{1,20\text{Jahre,parallel}} = 1,8 - 0,35 = 1,45 \qquad (\text{TKB, Tab. B-1a})$$

$$A^f_{1,20\text{Jahre,senkr.}} = 1,9 \qquad (\text{TKB, Tab. B-1a})$$

Aus TKB, Gleichung 8.2:

$$\text{KLED – ständig: } A^f_{1,\text{parallel}} = 1,45^{(0,253 + 0,142 \cdot \lg(50 \cdot 365 \cdot 24))} = 1,45^{1,054} = 1,48$$

$$A^f_{1,\text{senkr.}} = 1,9^{1,054} = 1,97$$

$$\text{KLED – kurz: } A_{1,\text{parallel}}^f = 1,45^{(0,253 + 0,142 \cdot \lg(7 \cdot 24))} = 1,45^{0,569} = 1,24$$

$$A_{1,\text{senkr.}}^f = 1,9^{0,569} = 1,44$$

### Einflussfaktor infolge Medieneinfluss $A_2^f$

getempert, Flüssigkeit mit sehr geringem Einfluss,

$$\text{in Gebäuden oder im Freien, } < 30 \text{ }^\circ\text{C} \quad \rightarrow A_2^f = 1,1 \quad (\text{TKB, Tab. B-2})$$

### Einflussfaktor infolge Umgebungstemperatur $A_3^f$

$$\text{Material: UP (Ungesättigtes Polyesterharz); } 30 \text{ }^\circ\text{C} \quad \rightarrow A_3^f = 1,1 \text{ (interpoliert)}$$

(TKB, Tab. A-3b)

### Modifikationsbeiwert $A_{\text{mod}}^f$

$$\text{KLED-ständig: } A_{\text{mod,KLED-ständig,parallel}}^f = 1,48 \cdot 1,1 \cdot 1,1 = 1,79$$

$$A_{\text{mod,KLED-ständig,senkr.}}^f = 1,97 \cdot 1,1 \cdot 1,1 = 2,38$$

$$\text{KLED-kurz: } A_{\text{mod,KLED-kurz,parallel}}^f = 1,24 \cdot 1,1 \cdot 1,1 = 1,50$$

$$A_{\text{mod,KLED-kurz,senkr.}}^f = 1,44 \cdot 1,1 \cdot 1,1 = 1,74$$

#### 17.4.4.2 Werkstoffspezifischer Einflussfaktor des E-Moduls

$$A_{\text{mod}}^E = A_1^E \cdot A_2^E \cdot A_3^E \quad (\text{Allgemein}) \quad (\text{TKB, Gl. 8.1})$$

$$A_{\text{mod}}^E = \sqrt{A_1^E \cdot A_2^E \cdot A_3^E} \quad (\text{Stabilitätsnachweis}) \quad (\text{TKB, Gl. 8.14})$$

### Einflussfaktor infolge Belastungsdauer $A_1^E$

Materialtyp: Pultrusionsprofile P mit Glasanteil  $\delta = 35 \%$ , getempert

$$A_{1,20\text{Jahre,parallel}}^E = 1,80 - 0,35 = 1,45 \quad (\text{TKB, Tab. B-1b})$$

$$A_{1,20\text{Jahre,senkrecht}}^E = 1,90 - 0,35 = 1,55 \quad (\text{TKB, Tab. B-1b})$$

Aus TKB, Gleichung 8.2:

$$\text{KLED – ständig: } A_{1,\text{parallel}}^E = 1,45^{(0,253 + 0,142 \cdot \lg(50 \cdot 365 \cdot 24))} = 1,45^{1,054} = 1,48$$

$$A_{1,\text{senkr.}}^E = 1,55^{1,054} = 1,59$$

$$\text{KLED – kurz: } A_{1,\text{parallel}}^E = 1,45^{(0,253 + 0,142 \cdot \lg(7 \cdot 24))} = 1,45^{0,569} = 1,24$$

$$A_{1,\text{senkr.}}^E = 1,55^{0,569} = 1,28$$

### Einflussfaktor infolge Medieneinfluss $A_2^E$

getempert, Flüssigkeit mit sehr geringem Einfluss,

in Gebäuden oder im Freien, < 30 °C  $\rightarrow A^{E_2} = 1,1$  (TKB, Tab. B-2)

### Einflussfaktor infolge Umgebungstemperatur $A^{E_3}$

Material: UP (Ungesättigtes Polyesterharz); 30 °C  $\rightarrow A^{E_3} = 1,05$  (interpoliert)  
(TKB, Tab. A-3b)

### Modifikationsbeiwert $A^{E_{mod}}$

Allgemein

$$\text{KLED-ständig: } A^{E_{mod, \text{KLED-ständig, parallel}}} = 1,48 \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 1,71$$

$$A^{E_{mod, \text{KLED-ständig, senkr.}}} = 1,59 \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 1,84$$

$$\text{KLED-kurz: } A^{E_{mod, \text{KLED-kurz, parallel}}} = 1,24 \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 1,43$$

$$A^{E_{mod, \text{KLED-kurz, senkrecht}}} = 1,28 \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 1,48$$

Stabilitätsnachweis

$$\text{KLED-ständig: } A^{E_{mod, \text{KLED-ständig, parallel}}} = (1,48)^{1/2} \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 1,41$$

$$A^{E_{mod, \text{KLED-ständig, senkrecht}}} = (1,59)^{1/2} \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 1,46$$

$$\text{KLED-kurz: } A^{E_{mod, \text{KLED-kurz, parallel}}} = (1,24)^{1/2} \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 1,29$$

$$A^{E_{mod, \text{KLED-kurz, senkrecht}}} = (1,28)^{1/2} \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 1,31$$

## 17.4.5 Festigkeitsnachweise

### 17.4.5.1 Charakteristische Werte des Widerstandes

Alle Werte für die Festigkeiten wurden der abZ Nr. Z-10.9-299 entnommen.

#### Charakteristischer Wert der Kurzzeitbiegefestigkeit

$$\text{axiale Biegezugfestigkeit: } f_{k, 0,05} = 240 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{transversale Biegezugfestigkeit: } f_{k, 0,05} = 60 \text{ N/mm}^2$$

#### Charakteristischer Wert der Kurzzeitzugfestigkeit

$$\text{axiale Zugfestigkeit: } f_{k, 0,05} = 240 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{transversale Zugfestigkeit: } f_{k, 0,05} = 35 \text{ N/mm}^2$$

#### Charakteristischer Wert der Kurzzeitdruckfestigkeit

$$\text{axiale Druckfestigkeit: } f_{k, 0,05} = 240 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{transversale Druckfestigkeit: } f_{k, 0,05} = 90 \text{ N/mm}^2$$

**Charakteristischer Wert der Schubfestigkeit**Scherfestigkeit in Laminebene:  $f_{k\,0,05} = 40 \text{ N/mm}^2$ **Charakteristischer Wert der interlaminaren Scherfestigkeit**interlaminare Scherfestigkeit  $f_{k\,0,05} = 20 \text{ N/mm}^2$ **17.4.5.2 Bemessungswerte des Widerstands (Festigkeit  $f_d$ )**

$$f_d = \frac{f_{k\,0,05}}{\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^f} \quad \gamma_M = 1,35 \quad (\text{TKB, Gl. 5.3})$$

**KLED – ständig ( $A_{\text{mod,ständig,parallel}}^f = 1,79 / A_{\text{mod,ständig,senkr.}}^f = 2,38$ )**Biegung (Steg / Gurte):  $f_d = 240 \text{ N/mm}^2 / (1,35 \cdot 1,79) = 99,32 \text{ N/mm}^2$ Schub (Steg):  $f_d = 40 \text{ N/mm}^2 / (1,35 \cdot 2,38) = 12,45 \text{ N/mm}^2$ **KLED – kurz: ( $A_{\text{mod,kurz,parallel}}^f = 1,50 / A_{\text{mod,kurz,senkr.}}^f = 1,74$ )**Biegung (Steg / Gurte):  $f_d = 240 \text{ N/mm}^2 / (1,35 \cdot 1,50) = 118,52 \text{ N/mm}^2$ Schub (Steg):  $f_d = 40 \text{ N/mm}^2 / (1,35 \cdot 1,74) = 17,03 \text{ N/mm}^2$ **17.4.5.3 Bemessungswerte der Spannungen**

$$\text{Normalspannung: } \sigma_d = \frac{M_{\text{max}}}{I_y} \cdot z \quad \left( \text{mit } z = \frac{h}{2} \right)$$

$$\text{Schubspannung: } \tau_d = \frac{V_{\text{max}}}{A_{\text{Steg}}}$$

$$(h = 300 \text{ mm } I_y = 119 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \text{ } A_{\text{Steg}} = 4050 \text{ mm}^2)$$

**Einwirkungskombination 1: Eigenlast (ständig)**Normalspannung:  $\sigma_d^1 = 238500 \text{ Nmm} / (119 \cdot 10^6 \text{ mm}^4) \cdot (300 \text{ mm} / 2) = \mathbf{0,30 \text{ N/mm}^2}$ Schubspannung:  $\tau_d^1 = 318 \text{ N} / (4050 \text{ mm}^2) = \mathbf{0,08 \text{ N/mm}^2}$ **Einwirkungskombination 2: Eigenlast + Schnee (kurz)**Normalspannung:  $\sigma_d^2 = 4457300 \text{ Nmm} / (119 \cdot 10^6 \text{ mm}^4) \cdot (300 \text{ mm} / 2) = \mathbf{5,62 \text{ N/mm}^2}$ Schubspannung:  $\tau_d^2 = 5943 \text{ N} / (4050 \text{ mm}^2) = \mathbf{1,47 \text{ N/mm}^2}$ **17.4.5.4 Nachweise Grundmaterial**

$$\sigma_d(t) \leq f_d = \frac{f_{k\,0,05}}{\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^f} \quad \text{und} \quad \tau_d(t) \leq f_d = \frac{f_{k\,0,05}}{\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}^f} \quad (\text{TKB, Gl. 8.4})$$

**KLED – ständig (EK1)**

Auflager: Moment = 0, Querkraft wird maximal

$$\tau_d^1 = 0,08 \text{ N/mm}^2 < 12,45 \text{ N/mm}^2 = f_d$$

Nachweis erbracht

Mitte des Trägers ( $x = L/2$ ): Querkraft = 0, Moment wird maximal

$$\sigma_d^1 = 0,30 \text{ N/mm}^2 < 99,32 \text{ N/mm}^2 = f_d$$

Nachweis erbracht

**KLED – kurz (EK2)**

Auflager: Moment = 0, Querkraft wird maximal

$$\tau_d^2 = 1,47 \text{ N/mm}^2 < 17,03 \text{ N/mm}^2 = f_d$$

Nachweis erbracht

Mitte des Trägers ( $x = L/2$ ): Querkraft = 0, Moment wird maximal

$$\sigma_d^2 = 5,62 \text{ N/mm}^2 < 118,52 \text{ N/mm}^2 = f_d$$

Nachweis erbracht

**17.4.5.5 Interaktionsnachweis**

$$\frac{\sigma_d(t)}{f_d} + \frac{\tau_d(t)}{f_d} \leq 1 \quad (\text{TKB, Gl. 8.8})$$

Für den Steg muss ein Interaktionsnachweis geführt werden, da sich dort Querkraft und Biegung überlagern. Beispielfhaft wird hier der Nachweis an der Stelle  $x = L/4$  geführt.**KLED – ständig (EK1)**

$$\sigma_d^1 = M / I \cdot z = 178900 \text{ Nmm} / (119 \cdot 10^6 \text{ mm}^4) \cdot (300 \text{ mm} / 2) = 0,23 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_d^1 = V / A_{\text{Steg}} = 159 \text{ N} / 4050 \text{ mm}^2 = 0,04 \text{ N/mm}^2$$

$$0,23 \text{ N/mm}^2 / 99,32 \text{ N/mm}^2 + 0,04 \text{ N/mm}^2 / 12,45 \text{ N/mm}^2 \leq 1$$

$$0,006 \leq 1$$

Nachweis erbracht

**KLED – kurz (EK2)**

$$\sigma_d^2 = M / I \cdot z = 3342900 \text{ Nmm} / (119 \cdot 10^6 \text{ mm}^4) \cdot (300 \text{ mm} / 2) = 4,21 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_d^2 = V / A_{\text{Steg}} = 2972 \text{ N} / 4050 \text{ mm}^2 = 0,73 \text{ N/mm}^2$$

$$4,21 \text{ N/mm}^2 / 118,52 \text{ N/mm}^2 + 0,73 \text{ N/mm}^2 / 17,03 \text{ N/mm}^2 \leq 1$$

$$0,078 \leq 1$$

Nachweis erbracht

**17.4.6 Stabilitätsnachweise**

Die Nachweise werden nach Quelle 1 „Trumpf, H.: Stabilitätsverhalten ebener Tragwerke aus pultrudierten faserverstärkten Polymerprofilen. RWTH Aachen, Dissertation am Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau, Shaker, Aachen 2006.“ geführt.

Es wird der Nachweis für das Biegedrillknicken geführt. Durch die Einteilung in Querschnittsklassen und Berücksichtigung von effektiven Querschnittsgrößen und maximalen Randspannungen wird auch das Plattenbeulen der Querschnittsteile berücksichtigt.

### 17.4.6.1 Charakteristischer Wert des E-Moduls und der Querdehnzahl

Die Werte für E-Modul und Querdehnzahl wurden der abz Nr. Z-10.9-299 entnommen.

#### Charakteristischer Wert des Druckmodul

axialer Druckmodul:  $E_{cx} = 24000 \text{ N/mm}^2$

transversaler Druckmodul:  $E_{cy} = 10000 \text{ N/mm}^2$

#### Charakteristischer Wert der Querdehnzahl

axialer Querdehnzahl:  $\nu_{cx} = 0,23$

transversaler Querdehnzahl:  $\nu_{cy} = 0,07$

Verhältnis der E-Module entspricht ungefähr dem Verhältnis  $E_{cx} / E_{cy} = 2,45$ , das den Tabellen in [1] zu Grunde liegt.

### 17.4.6.2 Einordnung der Querschnittsklasse

(nach [1], Tabellen 5.1 und 5.2)

Druckgurt – oben:  $c = b_{I\text{-Profil}} / 2 - t_w / 2 = 75 \text{ mm} - 7,5 \text{ mm} = 67,5 \text{ mm}$   $t_f = 15 \text{ mm}$

$$c/t_f = 67,5 \text{ mm} / 15 \text{ mm} = 4,5 > 1,13 \rightarrow \text{QK 4}$$

Steg:  $d = h - 2t_f = 300 \text{ mm} - 30 \text{ mm} = 270 \text{ mm}$

$$t_w = 15 \text{ mm}$$

$$d/t_w = 270 \text{ mm} / 15 \text{ mm} = 18 > 11,23 \rightarrow \text{QK 4}$$

Es sind die effektiven Querschnittsgrößen und maximalen Randspannungen zu berücksichtigen.

### 17.4.6.3 Kritische Beulspannungen

Kritische Beulspannung:

$$\sigma_{crx,p} = k_{\alpha} \cdot \frac{\pi^2 \cdot \sqrt{E_{cx} \cdot E_{cy}}}{12 \cdot (1 - \nu_{yx} \cdot \nu_{xy})} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad ([1], \text{S.171})$$

#### Druckflansch – oben:

Beulfaktor:

([1], Tabelle 5.2)

einseitig gestützte Querschnittsteile, ;  $\chi = 1 \rightarrow k_{\alpha} = 0,18$

$$t/b = 1/4,5$$

kritische Beulspannung:

$$\sigma_{crx,p} = 0,18 \cdot \frac{\pi^2 \cdot \sqrt{24000 \text{ N/mm}^2 \cdot 10000 \text{ N/mm}^2}}{12 \cdot (1 - 0,23 \cdot 0,07)} \cdot \left(\frac{1}{4,5}\right)^2$$

$$\sigma_{crx,p} = 115,11 \text{ N/mm}^2$$

#### Steg:

Beulfaktor:

([1], Tabelle 5.1)

beidseitig gestützte Querschnittsteile, ;  $\chi = -1$   $\rightarrow k_{\sigma_x} = 18,08$

$t / b = 1 / 18$

kritische Beulspannung:

$$\sigma_{crx,p} = 18,08 \cdot \frac{\pi^2 \cdot \sqrt{24000 \text{ N/mm}^2 \cdot 10000 \text{ N/mm}^2}}{12 \cdot (1 - 0,23 \cdot 0,07)} \cdot \left(\frac{1}{18}\right)^2$$

$$\sigma_{crx,p} = 722,65 \text{ N/mm}^2$$

#### 17.4.6.4 Maximale Randspannungen

##### Druckflansch – oben (schwächeres Beulfeld):

bezogene Plattenschlankheit:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{f_{cx}}{\sigma_{crx,p}}} \quad ([1], \text{ S.145})$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{240 \text{ N/mm}^2}{115,11 \text{ N/mm}^2}} = 1,44$$

$$\Phi = 0,5 \cdot \left(1 + \alpha_p \cdot (\bar{\lambda}_p - 0,37) + \bar{\lambda}_p^\gamma\right) \quad ([1], \text{ S.145})$$

mit  $\gamma = 1$ ,  $\alpha_p = 1$

$$\Phi = 0,5 \cdot (1 + 1 \cdot (1,44 - 0,37) + 1,44) = 1,755$$

Abminderungsfaktor  $\chi_p$  ([1], S.145)

$$\chi_p = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_p^\gamma}} = \frac{1}{1,755 + \sqrt{1,755^2 - 1,44}} = 0,329$$

maximale Randspannung:

$$f_{ux1} = \chi_p \cdot f_{cx} = 0,329 \cdot 240 \text{ N/mm}^2 = 78,96 \text{ N/mm}^2$$

##### Steg (stärkeres Beulfeld):

bezogene Plattenschlankheit:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{f_{cx}}{\sigma_{crx,p}}} \quad ([1], \text{ S.145})$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{240 \text{ N/mm}^2}{722,65 \text{ N/mm}^2}} = 0,576$$

$$\Phi = 0,5 \cdot \left(1 + \alpha_p \cdot (\bar{\lambda}_p - 0,37) + \bar{\lambda}_p^\gamma\right) \quad ([1], \text{ S.145})$$

mit  $\gamma = 2$ ,  $\alpha_p = 1,15$

$$\Phi = 0,5 \cdot (1 + 1,15 \cdot (0,576 - 0,37) + 0,576^2) = 0,784$$

Abminderungsfaktor  $\chi_p$

([1], S.145)

$$\chi_p = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda_p^{\gamma}}} = \frac{1}{0,784 + \sqrt{0,784^2 - 0,576^2}} = 0,760$$

maximale Randspannung:

$$f_{ux2} = \chi_p \cdot f_{cx} = 0,760 \cdot 240 \text{ N/mm}^2 = \mathbf{182,40 \text{ N/mm}^2}$$

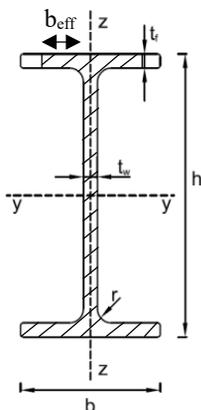
#### 17.4.6.5 Effektive Querschnittswerte

Abminderung der Querschnittswerte nach folgender Gleichung

$$A_{\text{eff},i} = A_i \cdot f_{uxi} / f_{ux2}$$

([1], S.145)

Abminderung der Querschnittsfläche nach [1], Tabelle 5.4



$$b_{\text{eff}} = c \cdot f_{ux1} / f_{ux2} = 67,5 \text{ mm} \cdot 78,96 \text{ N/mm}^2 / 182,40 \text{ N/mm}^2 = 29,2 \text{ mm}$$

$$\Delta A = (67,5 \text{ mm} - 29,2 \text{ mm}) \cdot 15 \text{ mm} \cdot 2 = 38,3 \text{ mm} \cdot 15 \text{ mm} \cdot 2 = 1149,0 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{eff}} = 8740 \text{ mm}^2 - 1149 \text{ mm}^2 = 7591 \text{ mm}^2$$

Verschiebung des Flächenschwerpunktes

$$\Delta z = \Delta A \cdot (150 \text{ mm} - 7,5 \text{ mm}) / A_{\text{eff}} = 1149 \text{ mm}^2 \cdot (150 \text{ mm} - 7,5 \text{ mm}) / 7591 \text{ mm}^2 = 21,6 \text{ mm}$$

Effektives Trägheitsmoment

$$I_{y,\text{eff}} = 119 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 + 8740 \text{ mm}^2 \cdot (21,6 \text{ mm})^2 - 2 \cdot (38,3 \text{ mm} \cdot (15 \text{ mm})^3 / 12 + 38,3 \text{ mm} \cdot 15 \text{ mm} \cdot (150 \text{ mm} - 7,5 \text{ mm} + 21,6 \text{ mm})^2)$$

$$I_{y,\text{eff}} = 123,1 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 - 31,0 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 = 92,1 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Effektives Widerstandsmoment

$$W_{y,\text{eff}} = 92,1 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 / (150 \text{ mm} + 21,6 \text{ mm}) = 536713 \text{ mm}^3$$

### 17.4.6.6 Ermittlung der orthotropen Steifigkeiten

$$I_z = 8,54 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_y = 119 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_\omega = t_f \cdot b^3 \cdot (h - t_f)^2 / 24 = 15 \text{ mm} \cdot (150 \text{ mm})^3 \cdot (300 \text{ mm} - 15 \text{ mm})^2 / 24$$

$$I_\omega = 171333,98 \cdot 10^6 \text{ mm}^6$$

$$I_T = 2/3 \cdot t_f^3 \cdot (b - 0,633 \cdot t_f) + t_w^3 / 3 \cdot (h - 2 \cdot t_f) + ((r + t_w / 2)^2 + (r + t_f) \cdot 2 - r \cdot 2) / (2 \cdot r + t_f)^4 \cdot 0,49 = 683893,0 \text{ mm}^4$$

$$E_{cy} \cdot I_\omega = 10000 \text{ N/mm}^2 \cdot 1,713 \cdot 10^{11} \text{ mm}^6 = 1,71 \cdot 10^{15} \text{ Nmm}^4$$

$$E_{cy} \cdot I_z = 10000 \text{ N/mm}^2 \cdot 8,54 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 = 8,54 \cdot 10^{10} \text{ Nmm}^2$$

$$G \cdot I_T = 3000 \text{ N/mm}^2 \cdot 6,84 \cdot 10^5 \text{ mm}^4 = 2,05 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2$$

### 17.4.6.7 Ideales Biegedrillknickmoment

$$M_{cry,lt} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E_{cy} \cdot I_z}{L^2} \cdot \left( \sqrt{\left( k_w \cdot \frac{E_{cy} \cdot I_\omega}{E_{cy} \cdot I_z} + \frac{G \cdot I_T \cdot L^2}{\pi^2 \cdot E_{cy} \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_p^M)^2 \right)} + C_2 \cdot z_p^M \right)$$

Systembeiwerte:

Das System ist ein Einfeldträger mit einer parabelförmigen Momentenfläche. Die Enden sind wölbfrei gelagert. Die Systemlänge beträgt  $L = 3\text{m}$ .

Die Beiwerte ergeben sich zu:  $C_1 = 1,15$ ;  $C_2 = 0,47$ ;  $k_w = 1,0$  [1, Tab. 3.7]

Der Abstand des Lastangriffspunktes zum Schwerpunkt des Querschnitts beträgt  $z_p^M = -15 \text{ cm}$

$$M_{cry,lt} = 1,15 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 8,54 \cdot 10^{10} \text{ Nmm}^2}{(3000 \text{ mm})^2} \cdot \left( \sqrt{\left( 1,0 \cdot \frac{1,71 \cdot 10^{15} \text{ Nmm}^4}{8,54 \cdot 10^{10} \text{ Nmm}^2} + \frac{2,05 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2 \cdot (3000 \text{ mm})^2}{\pi^2 \cdot 8,54 \cdot 10^{10} \text{ Nmm}^2} + (-0,47 \cdot 150 \text{ mm})^2 \right)} - 0,47 \cdot 150 \text{ mm} \right)$$

$$M_{cry,lt} = 15726853,5 \text{ Nmm} = 15,73 \text{ kNm}$$

### 17.4.6.8 Bemessungswert der Beanspruchbarkeit

Schlankheit des Obergurtes

$$\bar{\lambda}_{Fl} = \sqrt{\frac{N_{fix2}}{N_{cr,z}}}$$

$$N_{fix2} = A_{eff} \cdot f_{ux2} = 7591 \text{ mm}^2 \cdot 182,4 \text{ N/mm}^2 = 1384598 \text{ N} = 1385 \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} = \frac{E_{cy} \cdot I_z \cdot \pi^2}{L^2} = \frac{8,54 \cdot 10^{10} \text{ Nmm}^2 \cdot \pi^2}{(3000 \text{ mm})^2} = 93651,6 \text{ N} = 93,7 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_{Fl} = \sqrt{\frac{1385 \text{ kN}}{93,7 \text{ kN}}} = 3,84$$

Bezogene Schlankheit des Trägers:

$$\bar{\lambda}_{lt} = \sqrt{\frac{M_{fix2}}{M_{cry,lz}}}$$

$$M_{fix2} = W_{y,eff} \cdot f_{ux2} = 536,7 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 \cdot 182,4 \text{ N/mm}^2 = 97,9 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 97,9 \text{ kNm}$$

$$M_{cry,lt} = 15,73 \text{ kNm}$$

$$\bar{\lambda}_{lt} = \sqrt{\frac{97,9 \text{ kN}}{15,73 \text{ kN}}} = 2,49 > 0,5$$

Abminderungsbeiwert:

Aus dem Verhältnis der E-Module und den Knickspannungslinien ergibt sich der Imperfektionsbeiwert  $\alpha_f = 0,5$  und die Plateaulänge  $\bar{\lambda}_{f,0} = 0,5$ .

$$\Phi = 0,5 \cdot \left( 1 + \frac{\bar{\lambda}_{lt}^2}{\bar{\lambda}_{Fl}^2} \cdot \alpha_f \cdot (\bar{\lambda}_{lt} - \bar{\lambda}_{f,0}) + \bar{\lambda}_{lt}^2 \right)$$

$$\Phi = 0,5 \cdot \left( 1 + \frac{2,49^2}{3,84^2} \cdot 0,5 \cdot (2,49 - 0,5) + 2,49^2 \right) = 3,81$$

$$\chi_{lt} = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_{lt}^2}} = \frac{1}{3,81 + \sqrt{3,81^2 - 2,49^2}} = 0,149$$

Bemessungswert der Beanspruchbarkeit:

KLED-ständig:

$$M_{lt,ständig,Rd} = \frac{\chi_{lt} \cdot W_{y,eff} \cdot f_{ux2}}{A_{mod,ständig}^f \cdot \gamma_{M,lt}} = \frac{0,149 \cdot 536,7 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 \cdot 182,40 \text{ N/mm}^2}{1,79 \cdot 1,35} = 6036093 \text{ Nmm} = 6,04 \text{ kNm}$$

KLED-kurz:

$$M_{lt,kurz,Rd} = \frac{\chi_{lt} \cdot W_{y,eff} \cdot f_{ux2}}{A_{mod,kurz}^f \cdot \gamma_{M,lt}} = \frac{0,149 \cdot 536,7 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 \cdot 182,40 \text{ N/mm}^2}{1,50 \cdot 1,35} = 720307 \text{ Nmm} = 7,20 \text{ kNm}$$

#### 17.4.6.9 Bemessungsmoment

Aus 4.3:  $M_{\max,ständig} = 238500 \text{ Nmm} = 0,24 \text{ kNm}$

$$M_{\max, \text{kurz}} = 4457300 \text{ Nmm} = 4,46 \text{ kNm}$$

#### 17.4.6.10 Nachweise

**KLED-ständig:**  $M_{\max, \text{ständig}} = 0,24 \text{ kNm} < M_{\text{It, ständig, Rd}} = 6,04 \text{ kNm} \rightarrow \text{Nachweis erbracht}$

**KLED-kurz:**  $M_{\max, \text{kurz}} = 4,46 \text{ kNm} < M_{\text{It, kurz, Rd}} = 7,20 \text{ kNm} \rightarrow \text{Nachweis erbracht}$

## 17.5 Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

### 17.5.1 Teilsicherheitsbeiwert

Der Teilsicherheitsbeiwert im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird für das Material wie folgt angesetzt:  $\gamma_M = 1,0$

### 17.5.2 Einwirkungskombinationen

Es wird die seltene Kombination gewählt, da das Eigenlast sehr gering ist und bei der seltenen Kombination die veränderliche (hier Schnee) Last nicht abgemindert.

$$E_{d, \text{rare}} = E \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{k, j} \oplus P_k \oplus Q_{k, 1} \oplus \sum_{i > 1} \psi_{0, i} \cdot Q_{k, i} \right\} \quad (\text{TKB, Gl. D.4})$$

#### Einwirkungskombination 1: Eigenlast (ständig)

$$e_{d, \text{rare}, 1} = g_k = 0,157 \text{ kN/m}$$

#### Einwirkungskombination 2: Eigenlast + Schnee (kurz)

$$e_{d, \text{rare}, 2} = g_k + q_k = 0,157 \text{ kN/m} + 2,5 \text{ kN/m} = 2,657 \text{ kN/m}$$

### 17.5.3 Charakteristischer Wert des E-Moduls als Mittelwert

Werte wurden der abz Z-10.9-299 entnommen.

#### Charakteristische Modulwerte

effektiver Biegemodul:  $E_{\text{eff}} = 24000 \text{ N/mm}^2$

axialer Zugmodul:  $E_{\text{xt}} = 24000 \text{ N/mm}^2$

transversaler Zugmodul:  $E_{\text{yt}} = 7000 \text{ N/mm}^2$

axialer Druckmodul:  $E_{\text{xc}} = 24000 \text{ N/mm}^2$

transversaler Druckmodul:  $E_{\text{yc}} = 10000 \text{ N/mm}^2$

## 17.5.4 Werkstoffspezifischer Einflussfaktor des E-Moduls

### Modifikationsbeiwert $A_{\text{mod}}^E$ in Pultrusionsrichtung

$$\text{Allgemein} \quad A_{\text{mod}}^E = A_1^E \cdot A_2^E \cdot A_3^E$$

$$\text{KLED-ständig:} \quad A_{\text{mod,KLED-ständig}}^E = 1,48 \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 1,71$$

$$\text{KLED-kurz:} \quad A_{\text{mod,KLED-kurz}}^E = 1,25 \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 1,43$$

## 17.5.5 Durchbiegungsbegrenzung

### 17.5.5.1 Bemessungswert des zeitabhängigen E-Moduls

Es wird der werkstoffspezifische Einflussfaktor sowie der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M = 1,0$  berücksichtigt.

$$E(t)_d = \frac{E_0}{\gamma_{M,E} \cdot A_{\text{mod,KLED-ständig}}^E}$$

**KLED-ständig: ( $A_{\text{mod,KLED-ständig}}^E = 1,71$ )**

$$E(t)_d = \frac{24000 \text{ N/mm}^2}{1,0 \cdot 1,71} = 14035 \text{ N/mm}^2$$

**KLED-kurz: ( $A_{\text{mod,KLED-kurz}}^E = 1,43$ )**

$$E(t)_d = \frac{24000 \text{ N/mm}^2}{1,0 \cdot 1,43} = 16783 \text{ N/mm}^2$$

### 17.5.5.2 Maßgebende Durchbiegung

$$u(t)_d = \frac{5 \cdot e_{d,rare} \cdot L^4}{384 \cdot E(t)_d \cdot I}$$

#### Einwirkungskombination 1: Eigenlast (ständig)

$$u(t)_d^1 = 5 \cdot 0,157 \text{ N/mm} \cdot (3000 \text{ mm})^4 / (384 \cdot 14035 \text{ N/mm}^2 \cdot 119 \cdot 10^6 \text{ cm}^4)$$

$$u(t)_d^1 = 0,10 \text{ mm}$$

#### Einwirkungskombination 2: Eigenlast + Schnee (kurz)

$$u(t)_d^2 = 5 \cdot 2,657 \text{ N/mm} \cdot (3000 \text{ mm})^4 / (384 \cdot 16783 \text{ N/mm}^2 \cdot 119 \cdot 10^6 \text{ cm}^4)$$

$$u(t)_d^2 = 1,40 \text{ mm}$$

### 17.5.5.3 Bemessungswert $C_d$ zur Erfüllung der Durchbiegungsbegrenzung

Tragwerk mit normalen Anforderungen

Der Bemessungswert  $C_d$  der Durchbiegung ergibt sich wie folgt:

$$u_{d,max} = L/125 = 3000 \text{ mm} / 125$$

(TKB, Tabelle 8-2)

$$u_{d,max} = \mathbf{24 \text{ mm}}$$

### 17.5.5.4 Nachweise

Einwirkungskombination 1

$$u(t)_d^1 = 0,10 \text{ mm} < 24 \text{ mm} = u_{d,max}$$

Einwirkungskombination 2

$$u(t)_d^2 = 1,40 \text{ mm} < 24 \text{ mm} = u_{d,max}$$

→ **Nachweise erbracht!**

## 17.6 Literatur zum Beispiel 6

[1] TRUMPF, H.: Stabilitätsverhalten ebener Tragwerke aus pultrudierten faserverstärkten Polymerprofilen. RWTH Aachen, Dissertation am Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau, Shaker, Aachen 2006.



# 18 Beispiel 7 Pultrusionsprofil aus glasfaserverstärktem Kunststoff als Stütze für einen Industriebau

Dr.-Ing. Heiko Trumpf

## 18.1 Aufgabenstellung und statisches System

Aufgabenstellung:

Es soll ein Pultrusionsprofil aus glasfaserverstärktem Kunststoff als Stütze für einen Industriebau nachgewiesen werden.

Für dieses Beispiel wird ein Pultrusionsprofil der Fa. Fiberline Composites AS mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (Nr. Z-10.9-299) [ 1 ] gewählt.

Es werden lediglich die Materialkennwerte und Querschnittsabmessungen aus der abZ übernommen – der statische Nachweis erfolgt nicht nach der abZ sondern nach der vorliegenden TKB.

Als Lastannahmen werden Eigenlasten, Ausbaulasten (Technikinstallationen) und Schneelasten angesetzt.

Der Industriebau steht im Außenbereich mit natürlicher Bewitterung.

Der Bauwerksstandort wird mit  $< 1000\text{m}$  berücksichtigt.

Der Medieneinfluss infolge ‚Wasser‘ wird gemäß DIN 18820-3 als sehr gering eingestuft.

Die Betriebstemperatur beträgt  $< 30\text{ °C}$ .

Die Nachweise werden gemäß TKB Kapitel 8.2.3 Stabilitätsversagen, nach:

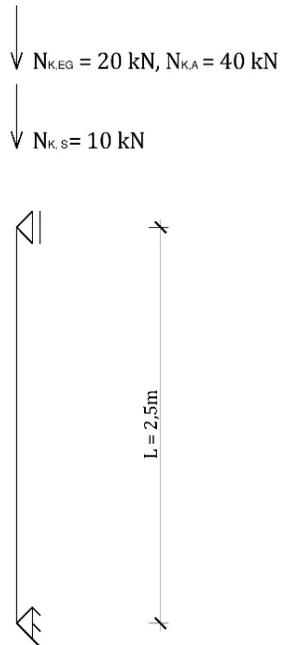
- Absatz (6): Ersatzstabverfahren nach [ 2 ], Trumpf, H.: Stabilitätsverhalten ebener Tragwerke aus pultrudierten faserverstärkten Polymerprofilen. RWTH Aachen, Dissertation am Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau, Shaker, Aachen 2006,

und

- Absatz (2): Vereinfachter Stabilitätsnachweis nach Gleichung (TKB, 8.11)

geführt.

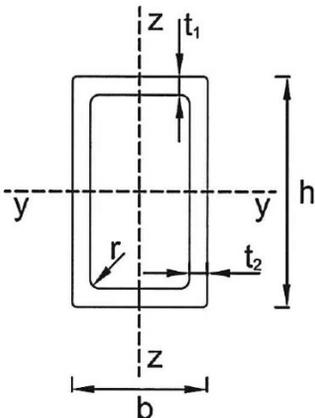
Statisches System:



## 18.2 Querschnitt, Werkstoff

### 18.2.1 Querschnittswerte

Vierkanthohlprofil von ‚Fiberline Composites A/S‘ mit den Abmessungen **114 x 114 x 8**



Höhe	h [mm]	114
Breite	b [mm]	114
Flanschdicke	$t_f$ [mm]	8
Stegdicke	$t_w$ [mm]	8
Ausrundung	r [mm]	4
Querschnittsfläche	A [mm <sup>2</sup> ]	3400
Trägheitsmoment um y-Achse	$I_y$ [mm <sup>4</sup> ]	$6,41 \cdot 10^6$
Trägheitsmoment um z-Achse	$I_z$ [mm <sup>4</sup> ]	$6,41 \cdot 10^6$
Stegfläche	$A_{Steg}$ [mm <sup>2</sup> ]	1660
Gewicht pro laufenden m	g [kg/m]	6,12

Querschnittswerte aus abZ (Nr. Z-10.9-299) vom 23.03.2018 – ‚Fiberline Composites A/S‘  
 „Pultrudierte Profile aus glasfaserverstärkten Kunststoffen“

### 18.2.2 Material

Die charakteristischen Festigkeiten und Steifigkeiten sowie Materialkennwerte werden der abZ Nr. Z-10.9-299 entnommen:

- Matrix: ungesättigtes Polyesterharz UP (Harz P4506)
- Spezifisches Gewicht  $g = 6,12 \text{ kg/m}$  je Meter Profillänge

Ansatz:

- $\delta = 0,60$  Glasmasseanteil
- Profil getempert

## 18.3 Einwirkungen (charakteristische Werte)

### 18.3.1 Eigenlast aus Struktur und Profil

Eigenlast der Struktur:  $G_{k,EG} = 20 \text{ kN}$

inkl. Eigenlast des □-Profils:  $g_k = 0,041 \text{ kN/m}$  (abZ Nr. Z-10.9-299)

### 18.3.2 Eigenlast aus Ausbau (Technikinstallation)

Eigenlast aus Ausbau:  $G_{k,A} = 40 \text{ kN}$

### 18.3.3 Schneelast

Annahme einer resultierenden Schneelast aus der Einzugsfläche des Trägers:

Schneelast:  $Q_{k,s} = 10 \text{ kN}$

### 18.3.4 Temperatur

Entfällt, da statisch bestimmtes System.

### 18.3.5 Einwirkungsdauer

Kunststoffe zeigen ein besonders zeitabhängiges Verhalten, weswegen der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit unter Beachtung der Einwirkungsdauer geführt wird. Die Einwirkungen werden in „Klassen der Lasteinwirkungsdauer“ (KLED) eingeteilt:

**Eigenlast:** ständige Einwirkung; KLED = ständig (50 Jahre) (TKB, Tab. 6-2)

**Schnee:** veränderliche Einwirkung; KLED = kurz (1 Woche) (TKB, Tab. 6-2)

## 18.4 Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit

### 18.4.1 Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsbeiwerte Einwirkung

#### 18.4.1.1 Eigenlast

##### Teilsicherheitsbeiwert:

Fall B (Versagen des Tragwerks oder der tragenden Bauteile, einschließlich Fundamente, Pfahlgründungen usw.);

Auswirkung der Einwirkung: ungünstig:  $\gamma_{G,sup} = 1,35$  (TKB, Tab. D-1)

#### 18.4.1.2 Schnee

##### Teilsicherheitsbeiwert:

Fall B (Versagen des Tragwerks oder der tragenden Bauteile, einschließlich Fundamente, Pfahlgründungen usw.);

Auswirkung der Einwirkung: ungünstig:  $\gamma_{Q,sup} = 1,5$  (TKB, Tab. D-1)

##### Kombinationsbeiwert:

Schnee- und Eislasten, Orte bis NN +1000m

Kombinationsbeiwert:  $\psi_0 = 0,5$  (TKB, Tab. D-2)

Der Kombinationsbeiwert ist im vorliegenden Beispiel nicht erforderlich, da nur eine veränderliche Last vorliegt und somit die Leiteinwirkung darstellt.

### 18.4.2 Teilsicherheitsbeiwerte Widerstand

#### 18.4.2.1 Material

Maschinell gefertigte Faserverbundstoffe ( $\nu = 0,10$ ): (TKB, Tab. E-1)

Festigkeit  $\gamma_M = 1,35$

Gesamtstabilität  $\gamma_M = 1,35$

### 18.4.3 Einwirkungskombinationen

$$E_d = E \left\{ \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \oplus \gamma_P \cdot P_k \oplus \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \right\}$$

**18.4.3.1 Einwirkungskombination 1: Eigenlast (ständig)**

$$N_{Ed,1} = \gamma_G \cdot G_k = 1,35 \cdot (20 + 40) \text{ kN} = \mathbf{81 \text{ kN}}$$

**18.4.3.2 Einwirkungskombination 2: Eigenlast + Schnee (kurz)**

$$N_{Ed,2} = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_k = 1,35 \cdot (20 + 40) \text{ kN} + 1,5 \cdot 10 \text{ kN} = \mathbf{96 \text{ kN}}$$

**18.4.4 Werkstoffspezifische Einflussfaktoren****18.4.4.1 Werkstoffspezifischer Einflussfaktor der Festigkeit**

$$A^f_{\text{mod}} = A^f_1 \cdot A^f_2 \cdot A^f_3$$

**Einflussfaktor infolge Belastungsdauer  $A^f_1$** 

Materialtyp: Pultrusionsprofile P mit Glasanteil  $\delta = 60 \%$

$$A^f_{1,20\text{Jahre,parallel}} = 1,8 - 0,60 = 1,20 \quad (\text{TKB, Tab. B-1a})$$

$$A^f_{1,20\text{Jahre,senkr.}} = 1,9 \quad (\text{TKB, Tab. B-1a})$$

Aus TKB, Gleichung 8.2:

$$\text{KLED – ständig: } A^f_{1,parallel} = 1,2^{(0,253 + 0,142 \cdot \lg(50 \cdot 365 \cdot 24))} = 1,2^{1,054} = 1,21$$

$$A^f_{1,senkr.} = 1,9^{1,054} = 1,97$$

$$\text{KLED – kurz: } A^f_{1,parallel} = 1,2^{(0,253 + 0,142 \cdot \lg(7 \cdot 24))} = 1,2^{0,569} = 1,11$$

$$A^f_{1,senkr.} = 1,9^{0,569} = 1,44$$

**Einflussfaktor infolge Medieneinfluss  $A^f_2$** 

getempert

sehr geringer Einfluss, natürliche Witterung,  $< 30 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow A^f_2 = 1,1$

(TKB, Tab. B-2)

**Einflussfaktor infolge Umgebungstemperatur  $A^f_3$** 

Material: UP (Ungesättigtes Polyesterharz);  $< 30 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow A^f_3 = 1,1$  (interpoliert)

(TKB, Tab. A-3b)

**Modifikationsbeiwert  $A^f_{\text{mod}}$**  (TKB, Gl. 8.1)

$$\text{KLED-ständig: } A^f_{\text{mod,KLED-ständig,parallel}} = 1,21 \cdot 1,1 \cdot 1,1 = 1,46$$

$$A^f_{\text{mod,KLED-ständig,senkr.}} = 1,97 \cdot 1,1 \cdot 1,1 = 2,38 \geq 1,75$$

$$\text{KLED-kurz: } A^f_{\text{mod,KLED-kurz,parallel}} = 1,11 \cdot 1,1 \cdot 1,1 = 1,34$$

$$A^f_{\text{mod,KLED-kurz,senkr.}} = 1,44 \cdot 1,1 \cdot 1,1 = 1,74$$

#### 18.4.4.2 Werkstoffspezifischer Einflussfaktor des E-Moduls

$$A^E_{\text{mod}} = A^E_1 \cdot A^E_2 \cdot A^E_3 \quad (\text{Allgemein}) \quad (\text{TKB, Gl. 8.1})$$

$$A^E_{\text{mod}} = \sqrt{A^E_1} \cdot A^E_2 \cdot A^E_3 \quad (\text{Stabilitätsnachweis}) \quad (\text{TKB, Gl. 8.14})$$

$\geq 1,35$  für ständige Lasten

#### **Einflussfaktor infolge Belastungsdauer $A^E_1$**

Materialtyp: Pultrusionsprofile P mit Glasanteil  $\delta = 60 \%$ , getempert

Belastung: Normalkraft

$$A^E_{1,20\text{Jahre,parallel}} = 1,80 - 0,60 = 1,20 \quad (\text{TKB, Tab. B-1b})$$

$$A^E_{1,20\text{Jahre,senkrecht}} = 1,90 - 0,60 = 1,30 \quad (\text{TKB, Tab. B-1b})$$

Aus TKB 2014, Gleichung 8.2:

$$\text{KLED – ständig: } A^E_{1,\text{parallel}} = 1,20^{(0,253 + 0,142 \cdot \lg(50 \cdot 365 \cdot 24))} = 1,20^{1,054} = 1,21$$

$$A^E_{1,\text{senkr.}} = 1,30^{1,054} = 1,32$$

$$\text{KLED – kurz: } A^E_{1,\text{parallel}} = 1,20^{(0,253 + 0,142 \cdot \lg(7 \cdot 24))} = 1,20^{0,569} = 1,11$$

$$A^E_{1,\text{senkr.}} = 1,30^{0,569} = 1,16$$

#### **Einflussfaktor infolge Medieneinfluss $A^E_2$**

getempert

sehr geringer Einfluss, natürliche Witterung,  $< 30 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow A^E_2 = 1,1$  (TKB, Tab. B-2)

#### **Einflussfaktor infolge Umgebungstemperatur $A^E_3$**

Material: UP (Ungesättigtes Polyesterharz);  $< 30 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow A^E_3 = 1,05$  (interpoliert)

(TKB, Tab. A-3b)

**Modifikationsbeiwert  $A^E_{\text{mod}}$** 

Allgemein

$$\text{KLED-ständig: } A^E_{\text{mod,KLED-ständig,parallel}} = 1,21 \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 1,40$$

$$A^E_{\text{mod,KLED-ständig,senkr.}} = 1,32 \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 1,52$$

$$\text{KLED-kurz: } A^E_{\text{mod,KLED-kurz,parallel}} = 1,11 \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 1,28$$

$$A^E_{\text{mod,KLED-kurz,senkrecht}} = 1,16 \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 1,34$$

Stabilitätsnachweis

$$\text{KLED-ständig: } A^E_{\text{mod,KLED-ständig,parallel}} = (1,21)^{1/2} \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 1,27$$

&lt; 1,35 für ständige Lasten

$$\Leftrightarrow A^E_{\text{mod,KLED-ständig,parallel}} = 1,35$$

$$A^E_{\text{mod,KLED-ständig,senkrecht}} = (1,32)^{1/2} \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 1,32$$

&lt; 1,35 für ständige Lasten

$$\Leftrightarrow A^E_{\text{mod,KLED-ständig, senkrecht}} = 1,35$$

$$\text{KLED-kurz: } A^E_{\text{mod,KLED-kurz,parallel}} = (1,11)^{1/2} \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 1,22$$

$$A^E_{\text{mod,KLED-kurz,senkrecht}} = (1,16)^{1/2} \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 1,24$$

**18.4.5 Festigkeitswerte***18.4.5.1 Charakteristische Werte des Widerstandes*

Alle Werte für die Festigkeiten wurden der abZ Nr. Z-10.9-299 entnommen.

**Charakteristischer Wert der Kurzzeitdruckfestigkeit  $f_{k,0,05}$** 

$$\text{axiale Druckfestigkeit: } f_{k,0,05} = f_{cx} = 240 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{transversale Druckfestigkeit: } f_{k,0,05} = f_{cx} = 90 \text{ N/mm}^2$$

**Charakteristischer Wert der Kurzzeitzugfestigkeit  $f_{k,0,05}$** 

$$\text{axiale Zugfestigkeit: } f_{k,0,05} = f_{tx} = 240 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{transversale Zugfestigkeit: } f_{k,0,05} = f_{tx} = 35 \text{ N/mm}^2$$

**Charakteristischer Wert der Kurzzeitbiegefestigkeit  $f_{k,0,05}$** 

axiale Biegezugfestigkeit:  $f_{k,0,05} = f_{bx} = 240 \text{ N/mm}^2$

transversale Biegezugfestigkeit:  $f_{k,0,05} = f_{bx} = 60 \text{ N/mm}^2$

**Charakteristischer Wert des Druck-Elastizitätsmoduls  $E_{cx}$** 

– axialer Druckmodul:  $E_{cx} = 24.000 \text{ N/mm}^2$

– transversaler Druckmodul:  $E_{cy} = 10.000 \text{ N/mm}^2$

Das Verhältnis der E-Module entspricht ungefähr dem Verhältnis  $E_{cx} / E_{cy} = 2,45$ , das den Tabellen in [2] zu Grunde liegt.

**Charakteristischer Wert der Querdehnzahl  $\nu$** 

– axialer Querdehnzahl:  $\nu_{cx} = 0,23$

– transversaler Querdehnzahl:  $\nu_{cy} = 0,07$

**18.4.5.2 Bemessungswerte des Widerstandes (Festigkeit  $f_d$ )**

$$f_d = \frac{f_{k,0,05}}{\gamma_M \cdot A_{mod}^f} \quad \gamma_M = 1,35 \quad (\text{TKB, Gl. 5.3})$$

**KLED – ständig ( $A_{mod,ständig,parallel}^f = 1,46$ )**

Druck:  $f_d = f_{cx,d} = 240 \text{ N/mm}^2 / (1,35 \cdot 1,46) = 121,77 \text{ N/mm}^2$

**KLED – kurz: ( $A_{mod,kurz,parallel}^f = 1,34$ )**

Druck  $f_d = f_{cx,d} = 240 \text{ N/mm}^2 / (1,35 \cdot 1,34) = 132,67 \text{ N/mm}^2$

**18.4.5.3 Bemessungswerte des Widerstandes (Steifigkeit  $E_d$ )**

$$E_d(t_a) = \frac{E_k}{\gamma_M \cdot \sqrt{A_1^E \cdot A_2^E \cdot A_3^E}} = \frac{E_k}{\gamma_M \cdot A_{mod}^E}$$

mit  $\gamma_M = 1,35$  (TKB, Gl. 8.14)

**KLED – ständig ( $A_{mod,ständig,parallel}^E = 1,35$  für Stabilität)**

Druck:  $E_d = E_{cx,d} = 24000 \text{ N/mm}^2 / (1,35 \cdot 1,35) = 13.169 \text{ N/mm}^2$

**KLED – kurz: ( $A_{mod,kurz,parallel}^E = 1,22$  für Stabilität)**

Druck :  $E_d = E_{cx,d} = 24000 \text{ N/mm}^2 / (1,35 \cdot 1,22) = 14.572 \text{ N/mm}^2$

## 18.5 Querschnittsklassifikation

### 18.5.1 Einordnen in Querschnittsklasse

(nach [2], Tabellen 5.1 und 5.2)

Voraussetzungen:  $E_{cx} / E_{cy} = 2,45$  und  $f_{cx} / f_{cy} = 2,85$

Flansch- und Stegquerschnitt identisch

$$\bar{b} = d = h - 2 \cdot t_f - r = 114 \text{ mm} - 2 \cdot 8 \text{ mm} - 4 \text{ mm} = 94 \text{ mm}$$

$$t_w = 8 \text{ mm}$$

$$\bar{b}/t_w = 94 \text{ mm} / 8 \text{ mm} = 11,75 > 4,49 \rightarrow \text{QK 4} \quad ([2], \text{Tab. 5.1})$$

Querschnittsklasse 4 erfordert die Berücksichtigung von effektiven Breiten  $b_{\text{eff}}$

### 18.5.2 Ermittlung der kritischen Beulspannung

Kritische Beulspannung:

([2], S. 171)

$$\sigma_{crx,p} = k_{\sigma x} \cdot \frac{\pi^2 \cdot \sqrt{E_{cx} \cdot E_{cy}}}{12 \cdot (1 - \nu_{yx} \cdot \nu_{xy})} \cdot \left(\frac{t}{\bar{b}}\right)^2$$

#### Druckflansche:

Beulfaktor:

([2], Tabelle 5.2)

beidseitig gestützte Querschnittsteile, ;  $\chi = 1 \rightarrow k_{\sigma x} = 2,89$

$$t/\bar{b} = 8/94$$

kritische Beulspannung:

$$\sigma_{crx,p} = 2,89 \cdot \frac{\pi^2 \cdot \sqrt{24000 \text{ N/mm}^2 \cdot 10000 \text{ N/mm}^2}}{12 \cdot (1 - 0,23 \cdot 0,07)} \cdot \left(\frac{8 \text{ mm}}{94 \text{ mm}}\right)^2$$

$$\sigma_{crx,p} = 271,1 \text{ N/mm}^2$$

### 18.5.3 Ermittlung der effektiven Breiten

#### 18.5.3.1 Bezogene Plattenschlankheit

([2], S.145/171)

$$\bar{\lambda}_{p1} = \sqrt{\frac{f_{cx}}{\sigma_{crx,p}}}$$

$$\bar{\lambda}_{p1} = \sqrt{\frac{240}{271,1}} = 0,94$$

### 18.5.3.2 Ermittlung Beultragspannung aus Beultraglastkurve

Beiwert  $\Phi$ :

$$\Phi = 0,5 \cdot (1 + \alpha_p \cdot (\bar{\lambda}_p - 0,37) + \bar{\lambda}_p^\gamma) \quad ([2], \text{S.145/171})$$

für beidseitig gestützte Querschnittsteile mit  $\alpha_p = 1,15$  und  $\gamma = 2,0$  sowie  $\bar{\lambda}_{p,0} = 0,37$

$$\Phi = 0,5 \cdot (1 + 1,15 \cdot (0,94 - 0,37) + 0,94^2) = 1,27$$

Abminderungsfaktor  $\chi_p$ :

([2], S.145/171)

$$\chi_p = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_p^\gamma}}$$

$$\chi_p = \frac{1}{1,27 + \sqrt{1,27^2 - 0,94^2}} = 0,47$$

Beultragspannung  $f_{ux}$ :

([2], S.145/171)

$$f_{ux1} = \chi_p \cdot f_{cx} = 0,47 \cdot 240 \text{ N/mm}^2 = \mathbf{112,8 \text{ N/mm}^2}$$

Da beim vorliegenden quadratischen Vierkantprofil alle vier Seiten die gleiche Baultragspannung aufnehmen können, wird  $f_{ux2} = f_{k\ 0,05} = f_{cx} = \mathbf{240 \text{ N/mm}^2}$  angesetzt.

### 18.5.3.3 Ermittlung effektiver Beiten $b_{eff}$

Abminderung der Querschnittsfläche nach [2], Tabelle 5.3

$$b_{eff} = f_{ux1} / f_{ux2} \cdot \bar{b} \quad ([2], \text{S.171})$$

$$b_{eff} = 112,8 / 240 \cdot 94 \text{ mm} = 0,47 \cdot 94 \text{ mm} = 44,18 \text{ mm} \quad \text{mit } \bar{b} = 94 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = b_{e2} = 0,5 \cdot b_{eff} = 44,18 / 2 = 22,09 \text{ mm}$$

Effektive Querschnittsfläche

$$\Delta A = 4 \cdot (94 \text{ mm} - 44,18 \text{ mm}) \cdot 8 \text{ mm} = 1594,2 \text{ mm}^2$$

(Länge Querschnittsausfall pro Seite 49,82 mm)

$$A_{eff} = 3400 \text{ mm}^2 - 1594,2 \text{ mm}^2 = \mathbf{1.805,6 \text{ mm}^2}$$

Keine Verschiebung des Flächenschwerpunktes  $\Delta z$

Effektives Trägheitsmoment

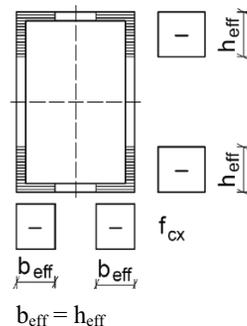
$$I_{y,eff} = 6,41 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$- 2 \cdot (49,8 \cdot 8^3 / 12)$$

$$- 2 \cdot (8 \cdot 49,8^3 / 12)$$

$$- 2 \cdot (114/2 \cdot 4)^2 \cdot (49,8 \cdot 8)$$

$$= \mathbf{4.002.864 \text{ mm}^4}$$



## 18.6 Biegeknicken nach dem Ersatzstabverfahren

### 18.6.1 Nachweisformat

Der Stabilitätsnachweis Biegeknicken wird nach dem Ersatzstabverfahren nach [ 2 ] geführt.

Die Biegeknickspannungslinien wurden getrennt für Vierkantprofile, I-Profile und U-Profile um die schwache und starke Achse unter Berücksichtigung von lokalem Beulen  $f_{ix}$ ; aufgestellt und nach EN 1990 Anhang D statistisch ausgewertet.

Die Versuchsergebnisse zeigen eine einheitliche Plateaulänge der Biegeknickkurve von  $\bar{\lambda}_{f,0} = 0,5$  aber unterschiedliche Imperfektionsbeiwerte (Eigenspannungen infolge Pultrusionsprozess) auf – z.B. Vierkantprofil  $\alpha_f = 0,4$ .

### 18.6.2 Ermittlung der Eingangsparameter für das Ersatzstabverfahren

#### 18.6.2.1 Knicklänge

Ermittlung der Knicklänge in der betrachteten Ebene

Eulerfall 2: Knicklängenbeiwert  $\beta = 1,0$

$$l_{cr} = \beta \cdot l = 1,0 \cdot 2,5\text{m} = 2,5\text{m}$$

#### 18.6.2.2 Ideale Verzweigungslast

Ermittlung der idealen Verzweigungslast  $N_{cr}$

$$N_{crf} = \frac{E_{cx} \cdot I \cdot \pi^2}{l_{cr}^2} = \frac{24000 \text{ N/mm}^2 \cdot 6,41 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \cdot \pi^2}{(2500\text{mm})^2} = 242,9 \text{ kN}$$

#### 18.6.2.3 Schlankheit

Ermittlung der Schlankheit  $\lambda_1$

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E_{cx}}{f_{cx}}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{24000 \text{ N/mm}^2}{240 \text{ N/mm}^2}} = 31,41$$

### 18.6.3 Biegeknicknachweis mit Knickspannungslinie

#### 18.6.3.1 Knickspannungslinie

Die folgenden Parameter werden [ 2 ] Tabelle 5.6 bzw. Seite 151 bzw. 172 entnommen:

- Plateaulänge von  $\bar{\lambda}_{f,0} = 0,5$
- Imperfektionsbeiwert Vierkanthohlprofil  $\alpha_f = 0,4$

### 18.6.3.2 Bezogene Schlankheit

Für die Querschnittsklasse 4 ist die bezogene Schlankheit  $\bar{\lambda}_f$  wie folgt definiert, ([ 2 ], Seite 151 bzw. 172)

$$\bar{\lambda}_f = \sqrt{\frac{N_{fux2}}{N_{crf}}}$$

$$\bar{\lambda}_f = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_{ux2}}{N_{crf}}} = \sqrt{\frac{1.805,6 \text{ mm}^2 \cdot 240 \text{ N/mm}^2}{242.900 \text{ N}}} = 1,34 > \bar{\lambda}_{f,0} = 0,5$$

### 18.6.3.3 Ermittlung Abminderungsbeiwert $\chi_f$ aus Knickspannungslinie

Abminderungsbeiwert  $\chi_f$  gemäß ([ 2 ], Seite 151 bzw. 172)

$$\chi_f = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_f^2}} \quad \chi_f \leq 1,0$$

mit

$$\phi = 0,5 \cdot (1 + \alpha_f \cdot (\bar{\lambda}_f - \bar{\lambda}_{f,0}) + \bar{\lambda}_f^2)$$

$$\phi = 0,5 \cdot (1 + 0,4 \cdot (1,34 - 0,5) + 1,34^2) = 1,57$$

$$\chi_f = \frac{1}{1,57 + \sqrt{1,57^2 - 1,34^2}} = 0,42$$

### 18.6.3.4 Ermittlung Biegeknicklast

Bestimmung der Biegeknicklast gemäß ([ 2 ], Seite 151 bzw. 172)

**KLED – ständig ( $A_{mod,ständig,parallel}^f = 1,46$  für Stabilität)**

$$N_{f,Rd} = \frac{\chi_f \cdot A_{eff} \cdot f_{ux2}}{(A_{mod}^f \cdot \gamma_{M,f})} = \frac{\chi_f \cdot A_{eff} \cdot f_{ux2}}{(A_{mod,ständig,parallel}^f \cdot \gamma_{M,f})}$$

$$N_{f,Rd} = \frac{0,42 \cdot 1805,6 \text{ mm}^2 \cdot 240 \text{ N/mm}^2}{(1,46 \cdot 1,35)} = 92,34 \text{ kN}$$

**KLED – kurz ( $A_{mod,kurz,parallel}^f = 1,34$  für Stabilität)**

$$N_{f,Rd} = \frac{\chi_f \cdot A_{eff} \cdot f_{ux2}}{(A_{mod}^f \cdot \gamma_{M,f})} = \frac{\chi_f \cdot A_{eff} \cdot f_{ux2}}{(A_{mod,kurz,parallel}^f \cdot \gamma_{M,f})}$$

$$N_{f,Rd} = \frac{0,42 \cdot 1805,6 \text{ mm}^2 \cdot 240 \text{ N/mm}^2}{(1,34 \cdot 1,35)} = 100,61 \text{ kN}$$

**18.6.3.5 Nachweis Biegeknicken****KLED – ständige Lastkombination 1**

$$N_{Ed,1} = 81 \text{ kN}$$

$$N_{f,Rd} = 92 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed,1}}{N_{f,Rd}} = 0,88 \leq 1,0$$

Nachweis erbracht ✓

**KLED – kurze Lastkombination 2**

$$N_{Ed,2} = 96 \text{ kN}$$

$$N_{f,Rd} = 101 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed,2}}{N_{f,Rd}} = 0,95 \leq 1,0$$

Nachweis erbracht ✓

## 18.7 Vereinfachter Stabilitätsnachweis Biegeknicken

gemäß TKB, Abschnitt 8.2.3

### 18.7.1 Nachweisformat

Der Nachweis erfolgt auf der Basis der Schnittgrößen

$$E_d(t) \leq F_{cr}(t) \quad (\text{TKB, Gl. 8.11})$$

### 18.7.2 Einwirkung

gemäß Abschnitt 18.4.3

#### 18.7.2.1 Einwirkungskombination 1: Eigenlast (ständig)

$$E_d(t) = N_{Ed,1} = \gamma_G \cdot G_k = 1,35 \cdot (20 + 40) \text{ kN} = \mathbf{81 \text{ kN}}$$

#### 18.7.2.2 Einwirkungskombination 2: Eigenlast + Schnee (kurz)

$$E_d(t) = N_{Ed,2} = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_k = 1,35 \cdot (20 + 40) \text{ kN} + 1,5 \cdot 10 \text{ kN} = \mathbf{96 \text{ kN}}$$

### 18.7.3 Verzweigungslast unter Berücksichtigung $A^E_{\text{mod}}$ (Stabilität)

#### 18.7.3.1 $A^E_{\text{mod}}$ für Stabilitätsnachweise

gemäß Abschnitt 18.4.4.2

$$A^E_{\text{mod}} = \sqrt{A^E_1 \cdot A^E_2 \cdot A^E_3} \quad (\text{Stabilitätsnachweis}) \quad (\text{TKB, Gl. 8.14})$$

$$\text{KLED-ständig: } A^E_{\text{mod,KLED-ständig,parallel}} = (1,21)^{1/2} \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 1,27$$

< 1,35 für ständige Lasten

$$\Leftrightarrow A^E_{\text{mod,KLED-ständig,parallel}} = 1,35$$

$$A^E_{\text{mod,KLED-ständig,senkrecht}} = (1,32)^{1/2} \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 1,32$$

< 1,35 für ständige Lasten

$$\Leftrightarrow A^E_{\text{mod,KLED-ständig,senkrecht}} = 1,35$$

$$\text{KLED-kurz: } A^E_{\text{mod,KLED-kurz,parallel}} = (1,11)^{1/2} \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 1,22$$

$$A^E_{\text{mod,KLED-kurz,senkrecht}} = (1,16)^{1/2} \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 1,24$$

18.7.3.2 Bemessungswert des Widerstandes Steifigkeit  $E_d(t_a)$ 

gemäß Abschnitt 18.4.5.3

$$E_d(t_a) = \frac{E_k}{\gamma_M \cdot \sqrt{A_1^E \cdot A_2^E \cdot A_3^E}} = \frac{E_k}{\gamma_M \cdot A_{mod}^E}$$

mit  $\gamma_M=1,35$ 

(TKB, Gl. 8.14)

**KLED – ständig ( $A_{mod,ständig,parallel}^E = 1,35$  für Stabilität)**Druck:  $E_d = E_{ex,d} = 24000 \text{ N/mm}^2 / (1,35 \cdot 1,35) = 13.168 \text{ N/mm}^2$ **KLED – kurz ( $A_{mod,kurz,parallel}^E = 1,22$  für Stabilität)**Druck :  $E_d = E_{ex,d} = 24000 \text{ N/mm}^2 / (1,35 \cdot 1,22) = 14.572 \text{ N/mm}^2$ 18.7.3.3 Ideale Verzweigungslast  $F_{cr}(t) = N_{cr}$ Ermittlung der idealen Verzweigungslast  $F_{cr}(t) = N_{cr}$ 

$$N_{cr} = \frac{E_d(t) \cdot I_{eff,y} \cdot \pi^2}{l_{cr}^2}$$

mit  $I_{eff,y} = 4,00 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$  gemäß 18.5.3.3**KLED – ständig**

$$F_{cr}(t) = N_{cr,1} = \frac{13.168 \text{ N/mm}^2 \cdot 4,00 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \cdot \pi^2}{(2500\text{mm})^2} = 83,15 \text{ kN}$$

**KLED – kurz**

$$F_{cr}(t) = N_{cr,2} = \frac{14.572 \text{ N/mm}^2 \cdot 4,00 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \cdot \pi^2}{(2500\text{mm})^2} = 92,03 \text{ kN}$$

## 18.7.3.4 Nachweis Biegeknicken

**KLED – ständige Lastkombination 1**

$$N_{Ed,1} = 81 \text{ kN}$$

$$N_{cr,1} = 83 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed,1}}{N_{cr,1}} = 0,98 \leq 1,0$$

Nachweis erbracht  $\checkmark$

**KLED – kurze Lastkombination 2**

$$N_{Ed,2} = 96 \text{ kN}$$

$$N_{cr,2} = 92 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed,2}}{N_{cr,2}} = 1,04 \approx 1,0$$

**Nachweis nicht erbracht** (Überschreitung vertretbar)

**18.8 Literatur zum Beispiel 7**

[1] ALLGEMEINE BAUAUFSICHTLICHE ZULASSUNG: abZ (Nr. Z-10.9-299) vom 23.03.2018, Pultrudierte Querschnitte aus glasfaserverstärkten Kunststoffen; Doppel-T-Profil, U-Profil, Winkelprofil, Vierkantprofil, Flachprofil, Handlaufprofil; Deutsches Institut für Bautechnik.

[2] TRUMPF, H.: Stabilitätsverhalten ebener Tragwerke aus pultrudierten faserverstärkten Polymerprofilen. RWTH Aachen, Dissertation am Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau, Shaker, Aachen 2006.



## 19 Beispiel 8 Nachweise „Geschraubte Verbindungen“

Dr.-Ing. Matthias Oppe

### 19.1 Aufgabenstellung

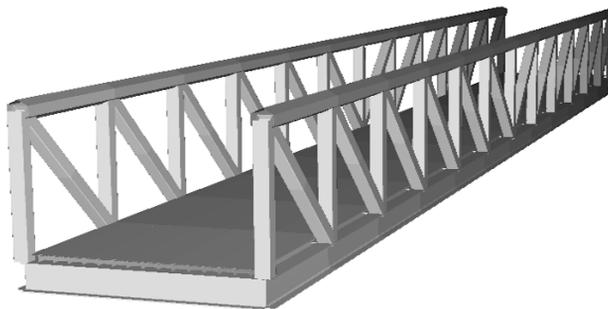
Es soll ein geschraubter Anschluss einer Fachwerkbrücke mit einer Spannweite von 13,50 m nachgewiesen werden.

Die Fachwerke sind aus Ober- und Untergurten, die mittels Diagonal- und Vertikalstreben verbunden sind, zusammengesetzt. Der Untergurt besteht aus zwei U-Profilen die an beiden Seiten der Streben verschraubt sind. Es werden ausschließlich glasfaserverstärkte Pultrusionsprofile, die unter Verwendung von ungesättigtem Polyesterharz (UP) maschinell hergestellt werden, verwendet.

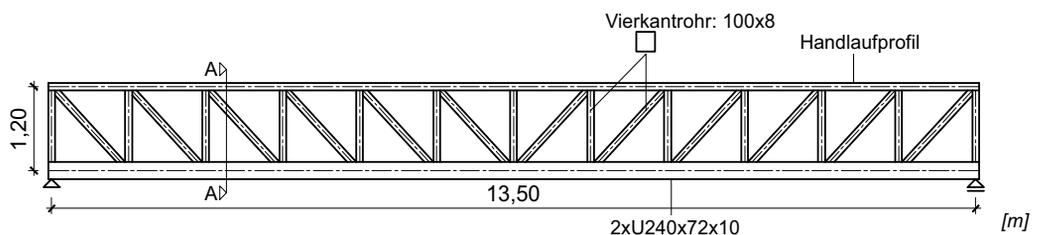
Die Fahrbahnplanken sind auf Querträger geklebt. Horizontale Kräfte werden durch die Fahrbahnplatte in die Widerlager abgeführt.

### 19.2 System

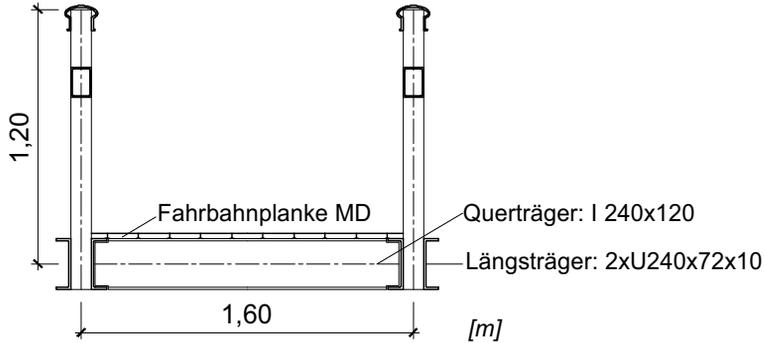
Perspektivische Darstellung



Ansicht



Querschnitt (A-A)



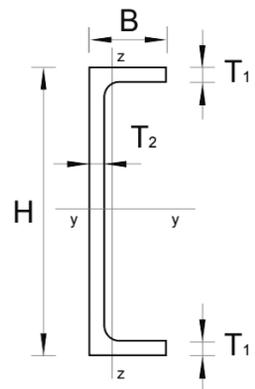
### Geometrie

Spannweite	$L = 13,5 \text{ m}$
Querträgerabstand	$L^* = 1,125 \text{ m}$ (12 Felder)
Brückenbreite	$B = 1,60 \text{ m}$
Höhe Plankenprofil MD	$h_c = 4 \text{ cm}$
Dicke des Fahrbahnbelags	$h_{fa} = 0,5 \text{ cm}$

### Querschnittsabmessungen

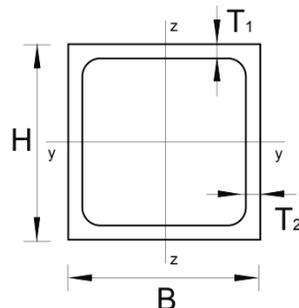
#### Untergurt: U240×72×10

Höhe	$H = 240 \text{ mm}$
Breite	$B = 72 \text{ mm}$
Flanschdicke	$T_1 = 10 \text{ mm}$
Stegdicke	$T_2 = 10 \text{ mm}$
Querschnittsfläche	$A = 3,64 \times 10^3 \text{ mm}^2$
	$A_{s,z} = 2,09 \times 10^3 \text{ mm}^2$
	$A_{s,y} = 0,645 \times 10^3 \text{ mm}^2$
Querschnittsgewicht	$g = 6,92 \text{ kg/m}$
Trägheitsmoment (y-y)	$I_y = 27,92 \times 10^6 \text{ mm}^4$
Trägheitsmoment (z-z)	$I_z = 1,48 \times 10^6 \text{ mm}^4$

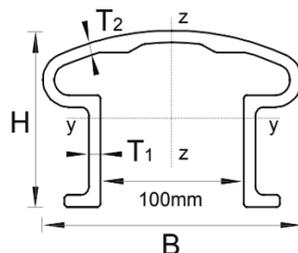


Diagonale & Pfosten: Vierkanthohlprofil 100×100×8

Höhe	$H = 100 \text{ mm}$
Breite	$B = 100 \text{ mm}$
Flanschdicke	$T_1 = 8 \text{ mm}$
Stegdicke	$T_2 = 8 \text{ mm}$
Ausrundungsradius	$r = 4 \text{ mm}$
Querschnittsfläche	$A = 2,96 \times 10^3 \text{ mm}^2$
	$A_{s,z} = 1,44 \times 10^3 \text{ mm}^2$
	$A_{s,y} = 1,44 \times 10^3 \text{ mm}^2$
Querschnittsgewicht	$g = 5,32 \text{ kg/m}$
Trägheitsmoment (y-y)	$I_y = 4,21 \times 10^6 \text{ mm}^4$
Trägheitsmoment (z-z)	$I_z = 4,21 \times 10^6 \text{ mm}^4$

Obergurt/Handlauf: Profil 120 mm der Firma Fiberline Composites

Höhe	$H = 120 \text{ mm}$
Breite	$B = 180 \text{ mm}$
Stegdicke	$T_1 = 8 \text{ mm}$
Flanschdicke	$T_2 = 8 \text{ mm}$
Querschnittsfläche	$A = 3,61 \times 10^3 \text{ mm}^2$
Querschnittsgewicht	$g = 5,35 \text{ kg/m}$
Trägheitsmoment (y-y)	$I_{yy} = 5,55 \times 10^6 \text{ mm}^4$
Trägheitsmoment (z-z)	$I_{zz} = 11,95 \times 10^6 \text{ mm}^4$

**19.3 Charakteristische Werte der einwirkenden Lasten****19.3.1 Allgemeines**

Die Ermittlung der einwirkenden Lasten erfolgt nach den relevanten Teilen des Eurocode (DIN EN) unter Berücksichtigung der Nationalen Anhänge für Deutschland.

**19.3.2 Ständige Einwirkungen**Eigenlast der Konstruktion

Die Eigenlast der Konstruktion wird mit einer Dichte von  $19,0 \text{ kN/m}^3$  berücksichtigt. Um mögliche Lasten der Schrauben und Anschlüsse zu berücksichtigen, wird die Dichte pauschal um 15 % erhöht.

Ausbaukosten

$g_{\text{Elektroleitung, Beleuchtung, Entwässerung}}$	$= 0,07 \text{ kN/m}^2$ (Annahme)
$g_{\text{Kunststoffbelag, } d = 5 \text{ mm}}$	$= 0,06 \text{ kN/m}^2$
$g_{\text{Fiberline Planke MD}}$	$= 0,17 \text{ kN/m}^2$
$g_{\text{Ausbau}}$	$= 0,30 \text{ kN/m}^2$

Dauer der Lasteinwirkung: ständig

**19.3.3 Veränderliche Einwirkungen**Verkehrslast – Gleichmäßig verteilte Last

Die Spannweite von der Fußgängerbrücke beträgt 13,5 m ( $\geq 10,0$  m).

Damit beträgt die Nutzlast:

$$q_{fk} = 2,0 + \frac{120}{L_{sj} + 30} = 4,76 \text{ kN/m}^2 \leq 5,0 \text{ kN/m}^2$$

Verkehrslast - Einzellast

Die Einzellast  $Q_{f_{wk}}$  beträgt 10 kN und hat eine quadratische Aufstandsfläche mit einer Seitenlänge von 0,10 m. Die Einzellast wird nur bei dem Nachweis für lokale Einwirkungen relevant.

Die Verkehrsflächenlast und Einzellast treten nicht gemeinsam auf.

Verkehrslast - Horizontal

Der charakteristische Wert der Horizontalkraft  $Q_{flk}$  wird bei Fußgänger- und Radwegbrücken mit 10 % der Vertikallast berücksichtigt. Die Horizontalkraft wirkt dabei in Brückenachse und in Oberkante des Belages.

Somit ist der charakteristische Wert:

$$Q_{flk} = 0,1 \times 4,76 \text{ kN/m}^2 \times 13,5 \text{ m} \times 1,6 \text{ m} = 10,3 \text{ kN}$$

Die Horizontallast wirkt gleichzeitig mit der zugehörigen Vertikallast.

Dauer der Lasteinwirkung: kurz

**19.3.4 Einwirkungen auf Geländer**

Gemäß DIN EN 1991-2 wird eine horizontal wirkende Linienlast von  $q_{hk} = 1,0 \text{ kN/m}$  an der Oberkante des Geländers, horizontal nach außen und innen wirkend,

berücksichtigt. Diese horizontale Linienlast wirkt gleichzeitig mit der gleichmäßig verteilten Vertikallast.

### 19.3.5 Schnee- und Windlasten

Schnee- und Windlasten werden vernachlässigt.

### 19.3.6 Temperatureinwirkungen und Medieneinfluss

Da das System statisch bestimmt ist, erzeugt die Temperatur keine Schnittgrößen und damit muss sie nicht berücksichtigt werden. Die maximale Umgebungstemperatur beträgt 30 °C, die Konstruktion befindet sich im Freien und kommt lediglich mit Flüssigkeiten mit 'sehr geringem Einfluss' (Wasser) in Kontakt.

### 19.3.7 Außergewöhnliche Einwirkungen

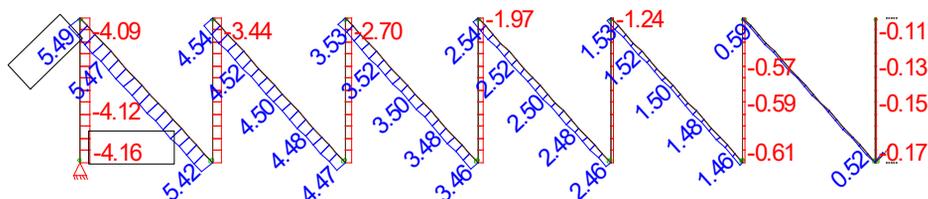
Es gibt dauerhafte Absperreinrichtungen welche Fahrzeuge am Befahren der Brücke hindern. Daher kann eine unplanmäßige Anwesenheit von Fahrzeugen auf der Brücke ausgeschlossen werden.

## 19.4 Schnittgrößen (Theorie I Ordnung)

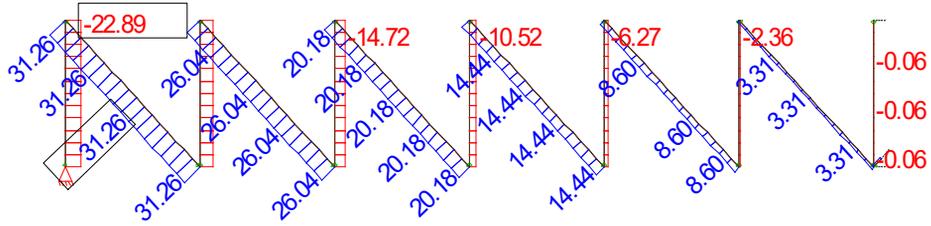
In den folgenden Abbildungen werden lediglich die für den Nachweis der geschraubten Verbindung zwischen Diagonalstrebe und Untergurt relevanten Schnittgrößen für die halbe Konstruktion dargestellt.

Normalkräfte,  $N_k$  [kN]: Diagonalstreben und Druckpfosten (charakteristisch)

- Eigengewicht und Ausbau



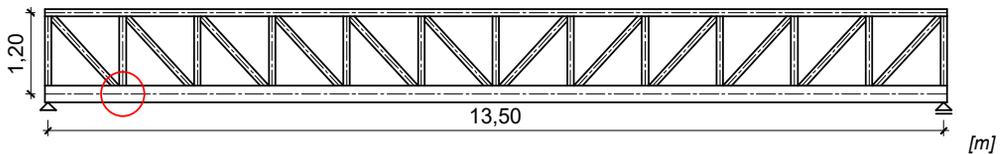
-Verkehrslast



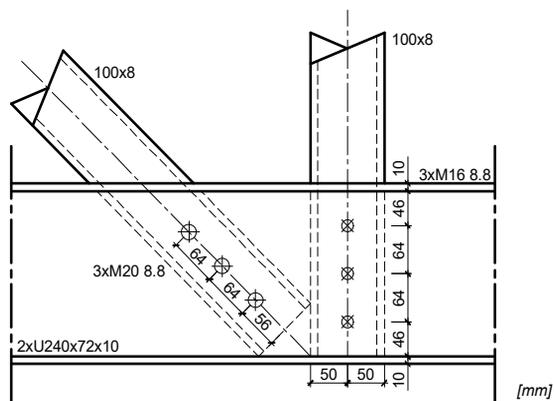
## 19.5 Randbedingungen

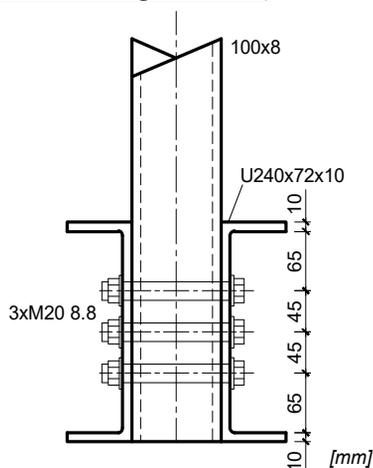
Folgende Randbedingungen sind gemäß BÜV-Richtlinie Kapitel 8.4.2 einzuhalten:

- Maximale Schrauben nebeneinander: 2
- Maximale Schrauben hintereinander: 5



Detail (Anschluss Diagonale – Vertikale an Untergurt)



Vertikalschnitt (zeigt Anschluss der Diagonalstrebe)**19.6 Materialkennwerte**

- Lochleibungsfestigkeit
  - in Pultrusionsrichtung  $f_{pb,||0,05} = 200 \text{ N/mm}^2$
  - senkrecht zur Pultrusionsrichtung  $f_{pb,\perp 0,05} = 120 \text{ N/mm}^2$
- Schubfestigkeit
  - in Laminebene  $f_{\tau 0,05} = 40 \text{ N/mm}^2$
  - senkrecht zur Laminat- bzw. Bauteilebene  $f_{\tau \perp || 0,05} = 1,25 \times f_{\tau 0,05} = 50 \text{ N/mm}^2$  (Kap. 8.4.2)
- Zugfestigkeit
  - in Pultrusionsrichtung  $f_{ik,||} = 240 \text{ N/mm}^2$
  - senkrecht zur Pultrusionsrichtung  $f_{ik,\perp} = 50 \text{ N/mm}^2$
- Glasmassegehalt  $\delta = 0,65$

**19.7 Teilsicherheitsbeiwert**

- Verbindungen  $\gamma_M = 1,5$  (Tabelle E-1)

## 19.8 Einfluss- und Modifikationsfaktoren

### Einwirkungsdauer $A_1$

- Einflussfaktor für Einwirkungsdauer (20 Jahre)
  - in Pultrusionsrichtung  $A_1^f = 1,8 - \delta$  (Tabelle B-1a)  
 $= 1,8 - 0,65$   
 $= 1,15$
  - senkrecht zur Pultrusionsrichtung  $A_1^f = 1,9$  (Tabelle B-1a)
- Einflussfaktoren für Einwirkungsdauer (50 Jahre - ständig)
  - in Pultrusionsrichtung  $A_1^f = 1,16$  (Formel 8.2)
  - senkrecht zur Pultrusionsrichtung  $A_1^f = 2,1$  (Formel 8.2)
- Einflussfaktoren für Einwirkungsdauer (1 Woche - kurz)
  - in Pultrusionsrichtung  $A_1^f = 1,09$  (Formel 8.2)
  - senkrecht zur Pultrusionsrichtung  $A_1^f = 1,53$  (Formel 8.2)
  - senkrecht zur Laminebene  $A_1^f = 1,53$  (Formel 8.2)

### Medieneinfluss $A_2$

- Einflussfaktor für Medieneinfluss  $A_2^f = 1,1$  (Tabelle B-2)

### Umgebungstemperatur $A_3$

- Einflussfaktor für Umgebungstemperatur  $A_3^f = 1,2$  (Tabelle A-3b)

### Modifikationsfaktor $A_{\text{mod}}^f$

- Einwirkungsdauer (50 Jahre - ständig )
  - in Pultrusionsrichtung  
 $A_{\text{mod}}^f = A_1^f \times A_2^f \times A_3^f = 1,16 \times 1,1 \times 1,2 = 1,53$   
  
 gemäß Kapitel 5.5 gilt  
 $A_{\text{mod}}^f = A_1^f \times A_2^f \times A_3^f \geq 1,75$
  - senkrecht zur Pultrusionsrichtung  
 $A_{\text{mod}}^f = A_1^f \times A_2^f \times A_3^f = 2,1 \times 1,1 \times 1,2 = 2,78$
- Einwirkungsdauer (1 Woche - kurz)
  - in Pultrusionsrichtung  
 $A_{\text{mod}}^f = A_1^f \times A_2^f \times A_3^f = 1,09 \times 1,1 \times 1,2 = 1,43$
  - senkrecht zur Pultrusionsrichtung  
 $A_{\text{mod}}^f = A_1^f \times A_2^f \times A_3^f = 1,53 \times 1,1 \times 1,2 = 2,01$
  - senkrecht zur Laminebene  
 $A_{\text{mod}}^f = A_1^f \times A_2^f \times A_3^f = 1,53 \times 1,1 \times 1,2 = 2,01$

## 19.9 Lastfallkombinationen

Folgende Lastfallkombinationen sind im GZT zu berücksichtigen:

1,35 g (ständig)

1,35 g + 1,5 q (kurz)

### 19.10 Nachweis Zugdiagonale 100×100×8

#### 19.10.1 Einwirkungen

$$\text{Schraubenkraft } P_{S,d} = \gamma_F \times P_{s,k}$$

Lasteinwirkungsdauer (ständig)

$$\begin{aligned} \text{Schraubenkraft } P_{S,d} &= \gamma_F \times P_{s,k} \\ &= 1,35 \times 5,4 \text{ kN} / 6 = 1,2 \text{ kN je Schraube und Scherfuge} \end{aligned}$$

Lasteinwirkungsdauer (kurz)

$$\begin{aligned} \text{Schraubenkraft } P_{S,d} &= \gamma_F \times P_{s,k} \\ &= (1,35 \times 5,4 \text{ kN} + 1,5 \times 31,3 \text{ kN}) / 6 = 9,0 \text{ kN} \end{aligned}$$

#### 19.10.2 Tragfähigkeiten

##### Allgemein

In Kunststoffbauteilen sind die Tragfähigkeiten in Laminebene für die verschiedenen Versagensmechanismen zunächst getrennt voneinander zu bestimmen (vgl. auch Kapitel 8.4.2.)

- Lochleibungsversagen (vor dem Schaft)

$$P_{S,Rd}(t) = \frac{d \times k_{cc} \times t \times f_{pko,05}}{\gamma_M \times A_{mod}^f} = \frac{d \times t \times f_{pko,05}}{\left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \times \gamma_M \times A_{mod}^f} \quad (\text{Formel 8.22a})$$

- Schubversagen

$$P_{S,Rd}(t) = \frac{2e_{1,II} \times t \times f_{\tau 0,05}}{\gamma_M \times A_{mod}^f} \quad (\text{Formel 8.22b})$$

- Zug in Längsrichtung (neben dem Schraubenschaft) – Versagen im Nettoquerschnitt

$$P_{S,Rd}(t) = \frac{(2e_{2,\perp} - d_0) \times t \times f_{tk0^\circ,0,05}}{k_{tc} \times \gamma_M \times A_{mod}^f} \quad (\text{Formel 8.22c})$$

- Zug in Querrichtung (vor dem Schaft)

$$P_{S,Rd}(t) = \frac{b \times t \times f_{tk90^\circ,0,05}}{\gamma_M \times A_{mod}^f} \quad (\text{Formel 8.22d})$$

Lasteinwirkungsdauer (ständig) – Beanspruchung in Pultrusionsrichtung

*Lochleibungsversagen*

$$\begin{aligned} P_{S,Rd}(t) &= \frac{d \times k_{cc} \times t \times f_{pko,05}}{\gamma_M \times A_{mod}^f} = \frac{d \times t \times f_{pko,05}}{\left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \times \gamma_M \times A_{mod}^f} \\ &= \frac{20 \times 8 \times 200}{\left(\frac{21}{20}\right)^2 \times 1,5 \times 1,75} \times \frac{1}{1000} = 11,1 \text{ kN} \end{aligned}$$

*Schubversagen*

$$P_{S,Rd}(t) = \frac{2e_{1,II} \times t \times f_{\tau 0,05}}{\gamma_M \times A_{mod}^f} = \frac{2 \times 56 \times 8 \times 40}{1,5 \times 2,78} = 8,6 \text{ kN (hier maßgebend)}$$

*Zugversagen im Nettoquerschnitt bzw. Zug in Querrichtung wird für diesen Profiltyp (quadratisches Hohlprofil) nicht maßgebend*

Lasteinwirkungsdauer (kurz) – Beanspruchung in Pultrusionsrichtung

*Lochleibungsversagen*

$$\begin{aligned} P_{S,Rd}(t) &= \frac{d \times k_{cc} \times t \times f_{pko,05}}{\gamma_M \times A_{mod}^f} = \frac{d \times t \times f_{pko,05}}{\left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \times \gamma_M \times A_{mod}^f} \\ &= \frac{20 \times 8 \times 200}{\left(\frac{21}{20}\right)^2 \times 1,5 \times 1,43} \times \frac{1}{1000} = 13,5 \text{ kN} \end{aligned}$$

*Schubversagen*

$$P_{S,Rd}(t) = \frac{2e_{1,II} \times t \times f_{to,05}}{\gamma_M \times A_{mod}^f} = \frac{2 \times 56 \times 8 \times 40}{1,5 \times 2,01} \times \frac{1}{1000}$$

$$= 11,9 \text{ kN (hier maßgebend)}$$

*Zugversagen im Nettoquerschnitt bzw. Zug in Querrichtung wird für diesen Profiltyp (quadratisches Hohlprofil) nicht maßgebend*

**19.10.3 Nachweise**Lasteinwirkungsdauer (ständig)

$$P_{S,d} = 1,2 \text{ kN} < 8,6 \text{ kN} = P_{S,Rd}$$

Lasteinwirkungsdauer (kurz)

$$P_{S,d} = 9,0 \text{ kN} < 11,9 \text{ kN} = P_{S,Rd}$$

**19.11 Nachweis Untergurt 240×72×10****19.11.1 Einwirkungen**

Schraubenkraft  $P_{S,d} = \gamma_F \times P_{s,k}$

Lasteinwirkungsdauer (ständig)

Schraubenkraft  $P_{S,d} = \gamma_F \times P_{s,k}$

$$= 1,35 \times 5,4 / 6 = 1,2 \text{ kN je Schraube und Scherfuge}$$

Winkel zwischen Diagonalstrebe und Untergurt = 45°, daher Aufteilung der Kraft wie folgt:

in Pultrusionsrichtung  $P_{S,d \ 0^\circ} = 1,2 \text{ kN} / \sqrt{2} = 0,9 \text{ kN}$

senkrecht zur Pultrusionsrichtung  $P_{S,d \ 90^\circ} = 1,2 \text{ kN} / \sqrt{2} = 0,9 \text{ kN}$

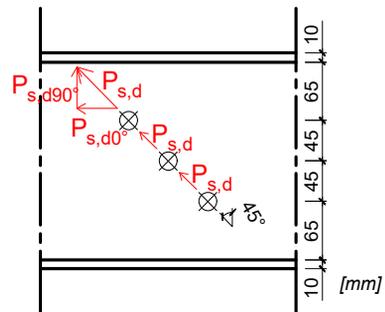
Lasteinwirkungsdauer (kurz)

Schraubenkraft  $P_{S,d} = \gamma_F \times P_{s,k}$

$$= (1,35 \times 5,4 \text{ kN} + 1,5 \times 31,3 \text{ kN}) / 6 = 9,0 \text{ kN}$$

in Pultrusionsrichtung  $P_{S,d \ 0^\circ} = 9,0 \text{ kN} / \sqrt{2} = 6,4 \text{ kN}$

senkrecht zur Pultrusionsrichtung  $P_{S,d \ 90^\circ} = 9,0 \text{ kN} / \sqrt{2} = 6,4 \text{ kN}$



### 19.11.2 Tragfähigkeiten

#### Allgemein

In [1] wird vorgeschlagen den Lastangriffswinkel  $\alpha$  über das folgende Interaktionskriterium ins Bemessungskonzept einzubeziehen.

$$\left(\frac{P_{S,Ed,0^\circ}}{P_{S,Rd,0^\circ}}\right)^2 + \left(\frac{P_{S,Rd,90^\circ}}{P_{S,Rd,90^\circ}}\right)^2 \leq 1,0 \quad (\text{Formel 8.23})$$

Auf der sicheren Seite liegend können die Nachweise bei einem Lastangriffswinkel  $\alpha = 45^\circ$  alternativ auch mit dem folgenden vereinfachten Nachweisformat geführt werden:

$$P_{S,Rd} = \min(P_{\text{Lochleibung},90^\circ}, P_{\text{Querzugversagen}}) \quad (\text{Formel 8.24b})$$

- Lochleibungsversagen (vor dem Schaft)

$$P_{S,Rd}(t) = \frac{d \times k_{cc} \times t \times f_{pko,05}}{\gamma_M \times A_{mod}^f} = \frac{d \times t \times f_{pko,05}}{\left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \times \gamma_M \times A_{mod}^f} \quad (\text{Formel 8.22a})$$

- Querzugversagen (Zugversagen neben dem Schraubenschaft)

Für breite Bauteile bei denen  $2e_{2\perp} > e_{1,II}$  ist, entspricht die maßgebende Breite  $w^*$  bzw. der maßgebende Randabstand  $e_{2\perp}^*$  dem kleinsten Abstand in beliebiger Richtung vom Zentrum der Bohrung bis zum Profilrand [1], vgl. Abbildung 8-5.

$$P_{S,Rd}(t) = \frac{(2e_{2\perp} - d_0) \times t \times f_{tk0^\circ,05}}{k_{tc} \times \gamma_M \times A_{mod}^f} \quad (\text{Formel 8.22c})$$

Lasteinwirkungsdauer (ständig)Beanspruchung in Pultrusionsrichtung (0°)

Lochleibungsversagen (maßgebend, da Randabstände sehr groß)

$$P_{S,Rd}(t) = \frac{d \times k_{cc} \times t \times f_{pko,05}}{\gamma_M \times A_{mod}^f} = \frac{d \times t \times f_{pko,05}}{\left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \times \gamma_M \times A_{mod}^f}$$

$$= \frac{20 \times 10 \times 200}{\left(\frac{21}{20}\right)^2 \times 1,5 \times 1,75} \times \frac{1}{1000} = 13,8 \text{ kN}$$

Beanspruchung senkrecht zur Pultrusionsrichtung (90°)

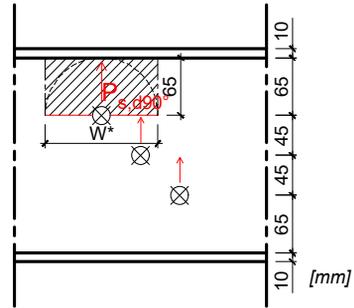
Lochleibungsversagen

$$P_{S,Rd}(t) = \frac{d \times k_{cc} \times t \times f_{pko,05}}{\gamma_M \times A_{mod}^f}$$

$$= \frac{d \times t \times f_{pko,05}}{\left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \times \gamma_M \times A_{mod}^f}$$

$$= \frac{20 \times 10 \times 120}{\left(\frac{21}{20}\right)^2 \times 1,5 \times 2,78} \times \frac{1}{1000}$$

$$= 5,2 \text{ kN (maßgebend)}$$

Querzugversagen

$$P_{S,Rd}(t) = \frac{(2e_{2,\perp} - d_0) \times t \times f_{tk0^\circ,05}}{k_{tc} \times \gamma_M \times A_{mod}^f} = \frac{(2 \times 65 - 21) \times 10 \times 50}{1,82 \times 1,5 \times 2,78} \times \frac{1}{1000}$$

$$= 7,2 \text{ kN}$$

$k_{tc}$  wird gemäß Tabelle 8-3 ermittelt, wobei hier gilt:

$$e_{1,II}/w = e_{1,II}/w^* = 65 / (2 \times 65) = 0,5$$

$$w/d = w^*/d = 2 \times 65 / 20 = 6,5$$

$$k_{tc} = 1,76 + (1,99 - 1,76) / 4 = 1,82 \text{ (geradlinig interpoliert)}$$

Zugversagen in Querrichtung nicht maßgebend, da Randabstände sehr groß

Lasteinwirkungsdauer (kurz)Beanspruchung in Pultrusionsrichtung (0°)

Lochleibungsversagen (maßgebend, da Randabstände sehr groß)

$$P_{S,Rd}(t) = \frac{d \times k_{cc} \times t \times f_{pko,05}}{\gamma_M \times A_{mod}^f} = \frac{d \times t \times f_{pko,05}}{\left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \times \gamma_M \times A_{mod}^f}$$

$$= \frac{20 \times 10 \times 200}{\left(\frac{21}{20}\right)^2 \times 1,5 \times 1,43} \times \frac{1}{1000} = 16,9 \text{ kN}$$

Beanspruchung senkrecht zur Pultrusionsrichtung (90°)

Lochleibungsversagen

$$P_{S,Rd}(t) = \frac{d \times k_{cc} \times t \times f_{pko,05}}{\gamma_M \times A_{mod}^f} = \frac{d \times t \times f_{pko,05}}{\left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \times \gamma_M \times A_{mod}^f}$$

$$= \frac{20 \times 10 \times 120}{\left(\frac{21}{20}\right)^2 \times 1,5 \times 2,01} \times \frac{1}{1000} = 7,2 \text{ kN (maßgebend)}$$

Querzugversagen

$$P_{S,Rd}(t) = \frac{(2e_{2,\perp} - d_0) \times t \times f_{tk0^\circ,05}}{k_{tc} \times \gamma_M \times A_{mod}^f} = \frac{(2 \times 65 - 21) \times 10 \times 50}{1,82 \times 1,5 \times 2,01} \times \frac{1}{1000}$$

$$= 9,9 \text{ kN}$$

**19.11.3 Nachweise**Lasteinwirkungsdauer (ständig)

vereinfachter Nachweis gemäß Formel 8.24b

$$P_{S,Rd} = \min(P_{Lochleibung,90^\circ}; P_{Querzugversagen}) = \min(5,2 \text{ kN}; 7,2 \text{ kN}) \quad (\text{Formel 8.24b})$$

$$P_{S,d} = 1,2 \text{ kN} < 5,2 \text{ kN} = P_{S,Rd}$$

Lasteinwirkungsdauer (kurz)

vereinfachter Nachweis gemäß Formel 8.24b

$$P_{S,Rd} = \min(P_{Lochleibung,90^\circ}; P_{Querzugversagen}) = \min(7,2 \text{ kN}; 9,9 \text{ kN}) \quad (\text{Formel 8.24b})$$

$$P_{S,d} = 9,1 \text{ kN} > 7,2 \text{ kN} = P_{S,Rd}$$

Vereinfachter Nachweis konnte nicht erbracht werden, daher genauer Nachweis unter Berücksichtigung der Interaktion gemäß Formel 8.23 erforderlich.

$$\left(\frac{P_{S,Ed,0^\circ}}{P_{S,Rd,0^\circ}}\right)^2 + \left(\frac{P_{S,Rd,90^\circ}}{P_{S,Rd,90^\circ}}\right)^2 = \left(\frac{6,4}{16,9}\right)^2 + \left(\frac{6,4}{7,2}\right)^2 = 0,38^2 + 0,89^2 = 0,94 < 1,0$$

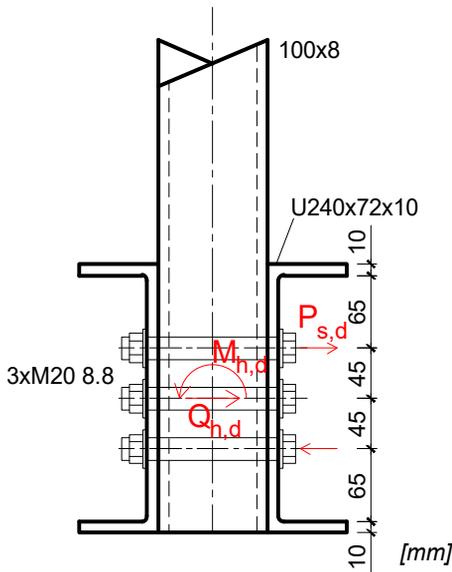
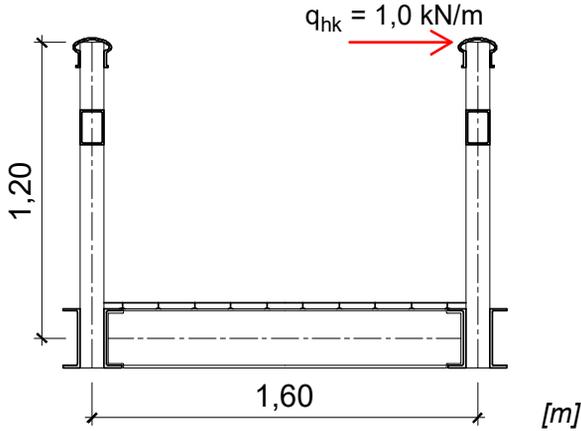
## 19.12 Nachweis Untergurt 240×72×10 am Anschluss Druckpfosten infolge Holmlast

### 19.12.1 Einwirkungen

Holmlast	$q_{h,k}$	= 1,0 kN/m
Pfostenabstand	$a$	= 1,125 m
Horizontalkraft	$Q_{h,k}$	= $a \times q_{h,k}$ = 1,125 × 1,0 = 1,125 kN
Einspannmoment	$M_{h,k}$	= 1,2 m × $Q_{h,k}$ = 1,2 m × 1,125 kN = 1,35 kNm
Schraubenkraft	$P_{s,k}$	= $Q_{h,k} / 3 + M_{h,k} / (2 \times 45 \text{ mm})$ = 1,125 / 3 + 1,35 × 1000 / (2 × 45) = 0,375 + 15 = 15,375 kN
	$P_{S,d}$	= $\gamma_F \times P_{s,k}$

#### Lasteinwirkungsdauer (kurz)

$$P_{S,d} = \gamma_F \times P_{s,k} = 1,5 \times 15,375 = 23,1 \text{ kN}$$



### 19.12.2 Tragfähigkeiten

Der Durchstanzwiderstand des Kunststoffes wird gemäß Formel 8-25 ermittelt.

Lasteinwirkungsdauer (kurz) – Beanspruchung senkrecht zur Laminatdicke

$$P_{S,Rd\perp}(t) = \frac{\pi \times d_u \times t \times f_{t\perp II 0,05}}{\gamma_M \times A_{mod}^f} = \frac{\pi \times 37 \times 10 \times 50}{1,5 \times 2,01} = 19,3 \text{ kN}$$

### 19.12.3 Nachweise

#### Lasteinwirkungsdauer (kurz)

$$P_{S,d} = 23,1 \text{ kN} < 19,3 \text{ kN} = P_{S,Rd}$$

Nachweis konnte unter Berücksichtigung der Verwendung von Standardunterlegscheiben ( $d_u = 37 \text{ mm}$  bei M20) nicht erbracht werden. Daher werden Unterlegscheiben mit einem Durchmesser  $d_u \geq 45 \text{ mm}$  verwendet.

Somit gilt:

$$P_{S,Rd\perp}(t) = \frac{\pi \times d_u \times t \times f_{\tau\perp II 0,05}}{\gamma_M \times A_{mod}^f} = \frac{\pi \times 45 \times 10 \times 50}{1,5 \times 2,01} = 23,5 \text{ kN}$$

$$P_{S,d} = 23,1 \text{ kN} < 23,5 \text{ kN} = P_{S,Rd}$$

### 19.13 Literatur zum Beispiel 8

- [1] OPPE, M.: Zur Bemessung geschraubter Verbindungen von pultrudierten faserverstärkten Polymerprofilen, Dissertation, Schriftenreihe Stahlbau, Heft 66, Shaker-Verlag Aachen, ISBN: 978-3-8322-8247-9

# Anhang

## Anhang A: Einflussfaktoren (Richtwerte) für unverstärkte Kunststoffe

Die Einflussfaktoren sind stark abhängig von den äußeren Einwirkungen und müssen für den Einzelfall ermittelt werden. Nachfolgende Tabellen geben lediglich Richtwerte der Einflussfaktoren wieder. Grundlage sind Erfahrungswerte einzelner Arbeitskreismitglieder.

**Tabelle A-1:** Einflussfaktor  $A^f$ ,  $A^E$  bzw.  $A^D$  infolge Belastungsdauer von 20 Jahren

	unverstärkte						
	Thermoplaste					Duroplaste	
	PP-H	PVC-NI	PVDF	PMMA	PE 80	UP	EP
$A^f$ (Festigkeit)	2,0 <sup>(4)</sup>	1,9 <sup>(4)</sup>	1,2 <sup>(4)</sup>	2,3 <sup>(10)</sup>	Druck: 1,5 <sup>(6)</sup>	1,6 <sup>(8)</sup>	1,5 <sup>(8)</sup>
					Zug: 1,7 <sup>(6)</sup>		
$A^E$ (E-Modul)	5,8 <sup>(3)</sup>	1,9 <sup>(3)</sup>	1,1 <sup>(4)</sup>	2,5 <sup>(8)</sup>	4,7 <sup>(3)</sup>	1,7 <sup>(8)</sup>	2,0 <sup>(8)</sup>
$A^D$ (Dehngrenze)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Bei einer Belastungsdauer > 20 Jahre sind die Zeitstandkurven in der DIN EN 1778 zu beachten.

**Tabelle A-2:** Einflussfaktor  $A^f$ ,  $A^E$  bzw.  $A^D$  infolge Medieneinfluss für Deponiebauwerke

	unverstärkte						
	Thermoplaste					Duroplaste	
	PP-H	PVC-NI	PVDF	PMMA	PE 80	UP	EP
$A^f$ (Festigkeit)	1,1 <sup>(5)</sup>	1,0 <sup>(5)</sup>	k.A. <sup>(9)</sup>	k.A. <sup>(9)</sup>	Druck: 1,0 <sup>(6)</sup>	k.A. <sup>(9)</sup>	k.A. <sup>(9)</sup>
					Zug: 1,1 <sup>(6)</sup>		
$A^E$ (E-Modul)	1,1 <sup>(1)</sup>	1,4 <sup>(1)</sup>	k.A. <sup>(9)</sup>	k.A. <sup>(9)</sup>	1,1 <sup>(1)</sup>	k.A. <sup>(9)</sup>	k.A. <sup>(9)</sup>
$A^D$ (Dehngrenze)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Der Medieneinfluss für andere Bauwerke kann z. B. DIN EN 1778, Tabelle A.1.3 oder der EBGEO entnommen werden.

**Tabelle A-3a:** Einflussfaktor  $A^f$ ,  $A^E$  bzw.  $A^D$  für Thermoplaste infolge Temperatureinfluss bei 40 °C

	unverstärkte Thermoplaste				
	PP-H	PVC-NI	PVDF	PMMA	PE 80
$A^f$ (Festigkeit)	1,3 <sup>(4)</sup>	1,6 <sup>(4)</sup>	1,2 <sup>(4)</sup>	1,3 <sup>(10)</sup>	1,4 <sup>(6)</sup>
$A^E$ (E-Modul)	1,2 <sup>(2)</sup>	1,3 <sup>(2)</sup>	1,5 <sup>(4)</sup>	1,2 <sup>(10)</sup>	1,3 <sup>(2)</sup>
$A^D$ (Dehngrenze)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Sind Temperaturen > 40°C zu erwarten, dann ist der notwendige Einflussfaktor grundsätzlich durch Materialprüfung des Werkstoffes zu ermitteln.

**Tabelle A-3b:** Einflussfaktor  $A^f$ ,  $A^E$  bzw.  $A^D$  für Duroplaste infolge Temperatureinfluss bis zur Anwendungsgrenze

	unverstärkte und faserverstärkte Duroplaste												
	UP Ungesättigtes Polyesterharz			EP Epoxidharz			VE (PHA) Vinylesterharz, Phenacrylatharz			PF Phenolharz			
°C	≤ 20	40	100*	≤ 20	40	100*	≤ 20	40	100*	≤ 20	40	100	250*
$A^f$ (Festigkeit)	1,0	1,2	3,5	1,0	--	--	1,0	--	--	1,0	1,1	1,8	4,0
$A^E$ (E-Modul)	1,0	1,1	1,6	1,0	--	--	1,0	1,1	1,3	1,0	1,0	1,1	1,1
$A^D$ (Dehngrenze)	1,0												
* Anwendungsgrenze Zwischenwerte sind linear zu interpolieren													
Die Einflussfaktoren für den Festigkeitseinfluss ( $A^f$ ) gelten für Druckbelastung und dauernder Einwirkung, sie sind unabhängig von einer möglichen Faserverstärkung. Bei Vorlage von Versuchsergebnissen für spezielle Geometrien und Faserverstärkungen können abweichende Werte angewendet werden.													

Quelle: [27] + [47]

In den Tabellen ist:

PP-H Homo-Polypropylen, hergestellt aus Formmasse nach DIN EN ISO 1873

PVC-NI Polyvinylchlorid, normal schlagzäh, hergestellt aus Formmasse nach DIN EN ISO 1163

PVDF Polyvinylidenfluorid, hergestellt nach DIN EN ISO 15014

PMMA Polymethylmethacrylat, hergestellt aus Formmasse nach DIN EN ISO 8257

PE 80 Polyethen hoher Dichte, hergestellt aus Formmasse nach DIN EN ISO 17855

UP Polyesterharz

EP	Epoxidharz
VE	Vinylester
PF	Phenol

Die Werte sind in Anlehnung entnommen aus:

- (1) DIN 4266-1, Abschnitt 5.1.3, Sickerrohre für Deponien
- (2) DIN 4266-1, Tabelle 4, Sickerrohre für Deponien
- (3) Mitteilungen DIBt 1995, Seite 146
- (4) DIN EN 1778 Charakteristische Kennwerte für Thermoplast-Konstruktionen
- (5) DIN EN 1778, Anhang A, Tabelle A.1 Abminderungsfaktor für den Medieneinfluss
- (6) DIBt: Vorläufige Bemessungsgrundsätze für Bauteile in Deponien
- (7) Langzeit-Deformationsverhalten von Plastwerkstoffen, Institut für Leichtbau und ökonomische Verwendung von Werkstoffen, Dresden, Schriftenreihe „Materialökonomie“, Heft 32
- (8) keine Angaben, Versuche sind erforderlich
- (9) siehe Literaturverzeichnis [15]

## Anhang B: Einflussfaktoren für faserverstärkte Kunststoffe

**Tabelle B-1a** Einflussfaktor  $A^f_1$  infolge Belastungsdauer von 20 Jahren  
(Bezeichnungen M, MW, FM und FMU gemäß DIN 18820)

Materialtyp	$A^f_1$					
Wirrfaserlamine M	1,6					
Mischlamine MW	2,0 - $\delta$					
Wickellamine FM parallel zur Wickelrichtung	1,8 - $\delta$					
Wickellaminat FM senkrecht zur	FM 1	FM 2	FM 3	FM 4	FM 5	FM 6
Wickelrichtung	1,8	2,15	2,75	1,7	2,0	2,4
mit $\varepsilon_z > 0,2 \%$	2,4	2,9	3,9	2,1	2,6	2,8
Wickellamine FMU parallel zur Wickelrichtung	1,8 - $\delta$					
Wickellaminat FMU senkrecht zur	FMU 1		FMU 2		FMU 3	
Wickelrichtung	1,9		1,7		1,6	
Pultrusionsprofile P parallel zur Pultrusionsrichtung	1,8 - $\delta$					
Pultrusionsprofile P senkrecht zur Pultrusionsrichtung	1,9					
Pultrusionsprofile P parallel zur Pultrusionsrichtung mit $\varepsilon_z > 0,2 \%$	2,0					
Pultrusionsprofile P senkrecht zur Pultrusionsrichtung mit $\varepsilon_z > 0,2 \%$	3,0					

$\delta$  Glasmassenanteil

$\varepsilon_z$  Dehnung bei Zugbeanspruchung senkrecht zur Wickelrichtung

Die Werte basieren auf DIN 18820-2.

Pultrusionsprofile **P** sind jedoch nicht in der DIN 18820-2 enthalten, die Werte basieren auf der Fiberline-Zulassung Z-10.9-299.

**Tabelle B-1b:** Einflussfaktor  $A^{E_1}$  und  $A^{D_1}$  infolge Belastungsdauer von 20 Jahren (Bezeichnungen M, MW, FM und FMU gemäß DIN 18820)

Materialtyp	$A^{E_1}$ und $A^{D_1}$					
	getempert			ungetempert		
Wirrfaserlamine M	2,4 - 2 $\delta$			2,6 - 2 $\delta$		
Mischlamine MW	getempert			ungetempert		
	2,3 - 2 $\delta$			2,5 - 2 $\delta$		
Wickellamine FM parallel zur Wickelrichtung	1,80 - $\delta$			1,85 - $\delta$		
Wickellaminat FM senkrecht zur	FM 1	FM 2	FM 3	FM 4	FM 5	FM 6
Wickelrichtung	2,2 - $\delta$	2,45 - $\delta$	3,0 - $\delta$	2,15 - $\delta$	2,3 - $\delta$	3,2 - 2 $\delta$
mit $\epsilon_z > 0,2 \%$	2,7 - $\delta$	3,1 - $\delta$	4,1 - $\delta$	2,6 - $\delta$	2,8 - $\delta$	4,0 - 2 $\delta$
Wickellamine FMU parallel zur Wickelrichtung	1,80 - $\delta$			1,85 - $\delta$		
Wickellaminat FMU senkrecht zur	FMU 1		FMU 2		FMU 3	
Wickelrichtung	2,3 - $\delta$		1,9 - $\delta/2$		1,8 - $\delta/2$	
Pultrusionsprofile P parallel zur Pultrusionsrichtung	1,80 - $\delta$			1,85 - $\delta$		
Pultrusionsprofile P senkrecht zur Pultrusionsrichtung	1,90 - $\delta$			1,85		
Pultrusionsprofile P senkrecht zur Pultrusionsrichtung mit $\epsilon_z > 0,2 \%$	2,3			2,5		

$\delta$  Glasmassenanteil

$\epsilon_z$  Dehnung bei Zugbeanspruchung senkrecht zur Wickelrichtung

Die Werte basieren auf DIN 18820-2.

Pultrusionsprofile **P** sind jedoch nicht in der DIN 18820-2 enthalten, die Werte basieren auf der Fiberline-Zulassung Z-10.9-299.

**Tabelle B-2:** Einflussfaktor  $A^f_2$ ,  $A^E_2$  bzw.  $A^D_2$  infolge Medieneinfluss

$A^f_2, A^E_2, A^D_2$		Einfluss		
getempert	ungetempert	einwirkende Flüssigkeit <sup>3)</sup>	Temperatureinschränkung	Randbedingungen bzw. zulässige Harze <sup>1)</sup>
1,0	1,0	- ohne -	---	---
1,1	1,2	Flüssigkeiten mit „sehr geringem Einfluss“ gemäß Tabelle 1 der DIN 18820-3, z. B. Wasser und Meerwasser	Betriebstemperatur bis 30 °C	in Gebäuden oder im Freien
1,2	1,3			Harze der Gruppe 0 <sup>1)</sup> , in Gebäuden oder im Erdreich
1,2	1,3		Betriebstemperatur über 30 °C bis 40 °C	---
1,2	1,3	Flüssigkeiten mit „geringem Einfluss“ gemäß Tabelle 2 der DIN 18820-3	Betriebstemperatur bis 30 °C	---
1,3	1,4		Betriebstemperatur über 30 °C bis 40 °C <sup>2)</sup>	---

<sup>1)</sup> Soweit nicht explizit angeführt, sind für tragende Strukturen nur Harze der Gruppen 1 bis 6 nach DIN 18820-1 Tabelle 1 zugelassen

<sup>2)</sup> Harze der Gruppe 1 dürfen nicht verwendet werden.

<sup>3)</sup> Aggressive Medien nach DIN 18820-3 Tabelle 5 erfordern eine Chemieschutzschicht von mindestens 2,5 mm Dicke oder eine thermoplastische Auskleidung, welche nicht dem tragenden Laminat zuzurechnen sind.

Für besondere Anwendungsbereiche gilt die vom DIBt herausgegebene Medienliste 40-2.1.1.

## Anhang C: Einflussfaktoren für Schaumstoffe

**Tabelle C-1:** Einflussfaktor  $A^f_1$  bzw.  $A^G_1$ ,  $A^E_1$  infolge Belastungsdauer

		PUR				Quelle
		$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	Belastungsdauer			
			1000 h	5000 h	10000 h	
$A^f_1$	Schubfestigkeit	50 100	1,8 -	1,9 -	2,1 -	[7]
	Druckfestigkeit	50 100	- -	- -	2,1 -	[7]
$A^G_1$	Schubmodul	50 100	2,6 1,7	3,9 -	4,4 --	[22] [21] [20]
$A^E_1$	Druckmodul	50 100	2,0 1,8	3,0 -	3,4 -	[22] [21] [20]

**Tabelle C-2:** Einflussfaktor  $A^f_2$  bzw.  $A^G_2$ ,  $A^E_2$  infolge Freibewitterung über 25 Jahre durch **Deckschichten** geschützt

		PUR		Quelle
		$\rho$ kg/m <sup>3</sup>		
$A^f_2$	Schubfestigkeit	50	1,2	[22]
	Druckfestigkeit			
$A^G_2$	Schubmodul	100	1,2	
$A^E_2$	Druckmodul			

**Tabelle C-3:** Einflussfaktor  $A^f_3$  bzw.  $A^G_3$ ,  $A^E_3$  infolge Temperatureinfluss

		PUR				Quelle
		$\rho$ kg/m <sup>3</sup>				
			40 °C	60 °C	80 °C	
$A^f_3$	Schubfestigkeit	50 100	1,1 -	1,4 -	1,9 -	[6]
	Druckfestigkeit	50 100	1,1 -	1,15 -	1,4 -	[23]
$A^G_3$	Schubmodul	50 100	1,1 -	- 1,5	1,9 1,7	[21]
$A^E_3$	Druckmodul	50 100	1,2 1,1	1,2 -	1,4 -	[6]

## Anhang D: Bemessungswerte der Einwirkungen

(1) Zur Ermittlung der Bemessungswerte  $E_d$  der Beanspruchungen werden die einzelnen Einwirkungen nach der Teilsicherheitsmethode wie folgt in Anlehnung an DIN EN 1990/NA kombiniert:

### Grenzzustand der Tragfähigkeit:

für die „normalen“ Bemessungssituationen (Grundkombinationen)

$$E_d = E \left\{ \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \oplus \gamma_P \cdot P_k \oplus \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \right\} \quad (\text{D.1})$$

für die außergewöhnlichen Bemessungssituationen

$$E_{dA} = E \left\{ \sum_{j \geq 1} \gamma_{GA,j} \cdot G_{k,j} \oplus P_k \oplus \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \oplus A_d \right\} \quad (\text{D.2})$$

für die Erdbebenbemessung

$$E_{dAE} = E \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \oplus P_k \oplus \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \oplus \gamma_I \cdot A_{Ed} \right\} \quad (\text{D.3})$$

### Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit:

seltene Kombination

$$E_{d,rare} = E \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \oplus P_k \oplus Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \right\} \quad (\text{D.4})$$

häufige Kombination

$$E_{d,frequ} = E \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \oplus P_k \oplus \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right\} \quad (\text{D.5})$$

Quasi-ständige Kombination

$$E_{d,perm} = E \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \oplus P_k \oplus \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right\} \quad (\text{D.6})$$

mit:

- $\oplus$  „in Kombination mit“
- $G_{k,j}$  Charakteristische Werte der ständigen Einwirkungen
- $Q_{k,i}$  Charakteristische Werte der veränderlichen Einwirkungen
- $P_k$  Charakteristischer Wert einer Vorspannung
- $A_d$  Bemessungswert einer außergewöhnlichen Einwirkung

$A_{Ed}$	Bemessungswert der Erdbebeneinwirkung nach DIN EN 1998-1
$\gamma_{G,j}$	Teilsicherheitsbeiwerte für ständige Einwirkungen nach Tabelle D-1
$\gamma_{Q,i}$	Teilsicherheitsbeiwerte für veränderliche Einwirkungen nach Tabelle D-1
$\gamma_l$	Wichtungsfaktor nach DIN EN 1998-1 (Erdbeben)
$\psi_{0,i}, \psi_{1,i}, \psi_{2,i}$	Kombinationsbeiwerte nach den <b>Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.</b> , D-3 bzw. D-4

**Tabelle D-1:** Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_F$  der Einwirkungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit auf Grundlage von DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.2 (A) bis (C)

Spalte Zeile	1	2	3	4	5
	Nachweis- kriterium	Auswirkung der Einwirkung	Ständige Einwir- kungen $\gamma_G$ bzw. $\gamma_{GA}$	Veränderliche Einwirkungen $\gamma_Q$ bzw. $\gamma_{QA}$	Außerge- wöhnliche Einwirkun- gen $\gamma_A$
1	Fall A <sup>1)</sup>	ungünstig $\gamma_{F,sup}$	$1,1 \cdot 1,35 = 1,50$	1,50	1,00
2		günstig $\gamma_{F,inf}$	$0,9 \cdot 1,00 = 0,90$	i. d. R. 0 <sup>4)</sup>	0,95
3	Fall B <sup>2)</sup>	ungünstig $\gamma_{E,sup}$	1,35	1,50	1,00
4		günstig $\gamma_{F,inf}$	1,00	i. d. R. 0 <sup>4)</sup>	1,00
5	Fall C <sup>3)</sup>	ungünstig $\gamma_{F,sup}$	1,00	1,30	1,00
6		günstig $\gamma_{F,inf}$	1,00	i. d. R. 0 <sup>4)</sup>	1,00
7	Bauzustand		1,15	1,15	
<sup>1)</sup> Fall A: Verlust des statischen Gleichgewichts <sup>2)</sup> Fall B: Versagen des Tragwerks oder der tragenden Bauteile, einschließlich Fundamente, Pfahlgründungen usw. <sup>3)</sup> Fall C: Versagen des Baugrunds durch Böschungs- oder Geländebruch <sup>4)</sup> sofern in DIN EN 1990 nicht anders angegeben					

**Tabelle D-2:** Kombinationsbeiwerte  $\psi$  für den Hochbau  
(in Anlehnung an DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.1)

Einwirkungen	Kombinationsbeiwerte		
	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Nutzlasten für Hochbauten <sup>1) 2)</sup> Kategorie A,B Wohngebäude, Balkone, Büroräume, Verkaufsräume bis 50m <sup>2</sup> , Räume in Krankenhäusern und Schulen, Flure (soweit nicht anders angegeben)	0,7	0,5	0,3
Kategorie C,D Garagen und Parkhäuser, Versammlungsräume, Turnhallen, Flure in Labor- und Lehrgebäuden, Tribünen, Büchereien, Archive sowie Geschäfts- und Warenhäuser, Ausstellungs- und Verkehrsräume ab 50m <sup>2</sup>	0,7	0,7	0,6
Kategorie E *) Lagerräume, Behälterbauten, Deponien und Industrieanlagen	1,0	0,9	0,8
Verkehrslasten Kategorie F, Fahrzeuglast $\leq 30$ kN Kategorie G, $\leq 30$ kN $\leq$ Fahrzeuglast $\leq 160$ kN Kategorie H – Dächer	0,7 0,7 0	0,7 0,5 0	0,6 0,3 0
Schnee- und Eislasten Orte bis NN + 1000 m Orte über NN + 1000 m	0,5 0,7	0,2 0,5	0 0,2
Windlasten	0,6	0,5 <sup>3)</sup>	0
Temperatureinwirkungen (-20 °C $\leq$ T $\leq$ 60 °C)	0,6	0,5	0
Baugrundsetzungen	1,0	1,0	1,0
Sonstige Einwirkungen <sup>2)</sup>	0,8	0,7	0,5
<p><sup>1)</sup> Abminderungsbeiwerte für Nutzlasten in mehrgeschossigen Hochbauten siehe DIN EN 1991-1-1</p> <p><sup>2)</sup> <math>\psi</math>-Beiwerte für Maschinenlasten und Flüssigkeitsdruck sind betriebsbedingt / standort-bestimmt festzulegen.</p> <p><sup>3)</sup> <math>\psi_1</math>-Beiwert für Windlasten bewusst gegenüber DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.1, erhöht von <math>\psi_1 = 0,2</math> auf <math>\psi_1 = 0,5</math>.</p>			

**Tabelle D-3:** Kombinationsbeiwerte  $\psi$  für Straßenbrücken  
(in Anlehnung an DIN EN 1990, Tabelle A2.1)

Einwirkung	Bezeichnung	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$	$\Psi_1 \times 1^1)$	
Verkehrslasten	gr 1 (LM1) <sup>4)</sup>	TS	0,75	0,75	0	0,80
		UDL <sup>3)</sup>	0,40	0,40	0	0,80
	Einzelachse (LM 2)	0	0,75	0	0,80	
	gr 2 (Horiz. Lasten)	0	0	0	0	
	gr 3 (Fußg. Lasten)	0	0,40	0	0,80	
Horizontallasten		0	0	0	0	
Windlasten	$F_{Wk}$	0,60	0,50 <sup>6)</sup>	0	0,60	
Temperatur	$T_k$	0,60 <sup>5)</sup>	0,60	0,50	0,80	

- 1)  $\Psi_1'$  ist ein  $\Psi$ -Beiwert zur Bestimmung der nicht häufigen Lasten nach Anmerkung 2 im Abschnitt A2.2.6 der DIN EN 1990
- 3) Die Beiwerte für die gleichmäßig verteilte Belastung beziehen sich nicht nur auf die Flächenlast des LM 1, sondern auch auf die abgeminderte Last aus Fußgänger- und Radwegbrücken.
- 4) Die Lastgruppe gr 1 (LM 1) besteht aus den Elementen TS und UDL, die wenn ungünstig wirkend, immer gemeinsam anzusetzen sind.
- 5) Falls nicht nachweisrelevant, kann  $\Psi_0=0$  gesetzt werden, siehe hierzu die relevanten Bemessungsnormen.
- 6)  $\Psi_1$ - Beiwert für Windlasten bewusst gegenüber DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.1, erhöht von  $\Psi_1=0,2$  auf  $\Psi_1=0,5$ .

**Tabelle D-4:** Kombinationsbeiwerte  $\psi$  für Fußgänger- und Radwegbrücken  
(in Anlehnung an DIN EN 1990, Tabelle A2.2)

Einwirkung	Bezeichnung	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$	$\Psi_1 \cdot 1^1)$
Verkehrslasten	gr 1	0,40	0,40	0,20	0,80
	$Q_{fWk}$	0	0	0	0
	gr 2	0	0	0	1,00
Windlasten	$F_{Wk}$	0,3	0,50 <sup>3)</sup>	0	0,60
Temperatur	$T_k$	0,6 <sup>2)</sup>	0,60	0,50	0,80

- 1)  $\Psi_1'$  ist ein  $\Psi$ -Beiwert zur Bestimmung der nicht häufigen Lasten nach Anmerkung 2 im Abschnitt A2.2.6 der DIN EN 1990.
- 2) Falls nicht nachweisrelevant, kann  $\Psi_0=0$  gesetzt werden, siehe hierzu die relevanten Bemessungsnormen.
- 3)  $\Psi_1$ - Beiwert für Windlasten bewusst gegenüber DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.1, erhöht von  $\Psi_1=0,2$  auf  $\Psi_1=0,5$ .

Bei Berücksichtigung nur einer veränderlichen Einwirkung gilt:

$$E_d = E \left\{ \sum_j \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \oplus 1,5 \cdot Q_{k,1} \right\} \quad (\text{D.7})$$

Bei Berücksichtigung aller ungünstig wirkenden veränderlichen Einwirkungen gilt:

$$E_d = E \left\{ \sum_j \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \oplus 1,35 \cdot \sum_i Q_{k,i} \right\} \quad (\text{D.8})$$

Der ungünstigere Wert ist maßgebend.

## Anhang E: Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_M$

**Tabelle E-1:** Empfohlene Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M$  im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach Ackermann

Bedingungen	Grundkombination				Außergewöhnliche Bemessungssituationen			
	Festigkeit	Örtliche Stabilität <sup>2)</sup>	Gesamtstabilität	Verbindungen	Festigkeit	örtliche Stabilität <sup>2)</sup>	Gesamtstabilität	Verbindungen
maschinell gefertigte Faserverbundwerkstoffe ( $\nu=0,10$ )	1,35 <sup>3)</sup>	1,5	1,35	1,5	1,0	1,2	1,0	1,2
manuell gefertigte Faserverbundwerkstoffe ( $\nu=0,17$ )	1,5	2,0	1,5	2,0	1,25	1,7	1,25	1,7
Thermoplaste	1,3 <sup>1)</sup>	1,4	1,3	1,4	1,0	1,2	1,0	1,2
Schaumstoffe auf Schub	1,5	1,7	1,2	1,7	-	-	-	-
Schaumstoffe auf Druck	1,2	1,4	1,2	1,4	-	-	-	-
$\nu$ Variationskoeffizient								

<sup>1)</sup> Der Wert ist entnommen der Richtlinie DVS 2205-1, Abschnitt 2.1. Für in Deutschland nicht durch das DIBt zugelassene Werkstoffe gilt  $\gamma_M = 1,5$ .

<sup>2)</sup> Örtliche Stabilität = z. B. Knittern von Deckschichten bei Sandwichplatten

<sup>3)</sup> entspricht auch der Zulassung Fiberline

Der Teilsicherheitsbeiwert im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit kann nach Abschnitt 5.5, Satz (1) verwendet werden.

## Anhang F: Mechanische Eigenschaften zu Fasern und Sandwichkernen

### Fasereigenschaften

Die Zugfestigkeit sowie der E-Modul einiger Fasern sind in Tabelle F-1 angegeben.

**Tabelle F-1:** Fasereigenschaften

Faser	$E_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit $\sigma_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Aramid	80.000-186.000	1.800-3.800
Carbon	225.000-950.000	2.700-6.400
Glas	73.000-80.000	1.500-3.500

### Sandwichkerne

Die mechanischen Eigenschaften einiger Polymer-Hartschäume sind in Tabelle F-2 angegeben.

**Tabelle F-2:** Mechanische Eigenschaften einiger Polymer-Hartschäume für Sandwichkerne (Richtwerte für die Mittelwerte)

	Raumgewicht [kg/m <sup>3</sup> ]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Schubfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	G-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]
Polyurethan (PUR)	50 100	0,3-0,5 0,6-1,0	ca. 0,2 0,3-0,5	6-10 ca. 30	4-5 ca. 10
Polyvinylchlorid (PVC) - vernetzt -	40 80	0,5-0,8 1,2-2,0	0,3-0,4 0,7-1,0	20-30 60-90	ca. 10 20-30
- linear -	80	ca. 0,9	0,5-1,0	ca. 50	ca. 20
Polymethacrylimid (PMI)	30 70	ca. 0,5 ca. 1,5	ca. 0,3 ca. 1,0	ca. 30 ca. 90	ca. 15 ca. 30

## Literatur

- [1] Ackermann, G.; Beutner, M.: Dünnwandige einschichtige Konstruktionen aus Plastwerkstoffen, In: Bauforschung Baupraxis (1982), Heft 104, Abschnitt 2 Seite 7
- [2] Ackermann, G.; Beutner, M.: Viskoelastische Flächentragwerke, Schriftenreihe der Bauforschung, Heft 62, Bauinformation – DDR – Berlin 1973
- [3] Ackermann, G.; Beutner, M.: Viskoelastische Stabtragwerke, Schriftenreihe der Bauforschung, Heft 50, Bauinformation – DDR – Berlin 1972
- [4] Ackermann, G.: Turmartige Bauwerke aus glasfaserverstärkten Plasten, Plaste und Kautschuk 30 (1983), Heft 12, S. 693, Abschnitt 3 Seite 694
- [5] Ackermann, G.: Zum zeitabhängigen Tragverhalten dreischichtiger Träger unter Quer- und Längsbeanspruchung, Bauplanung-Bautechnik 39 (1985), H.7, S.319-324
- [6] Berner, K.: Stahl / Polyurethan-Sandwichtragwerke unter Temperatur- und Brandbeanspruchung, Dissertation D 17; Darmstadt 1978
- [7] Burkhardt, S.: Zeitabhängige Verformungen von Sandwichelementen, Bauingenieur 64 (1989)
- [8] Deutsches Institut für Normung e.V.: Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen (GruSiBau), Beuth-Verlag Berlin, 1.Auflage 1981
- [9] Drey, K.-D.; Müller, E.; Pabjanek, A.: Methoden der Viskoplastizität, VEB Fachbuchverlag Leipzig 1972
- [10] Ehrenstein, G.W.: Faserverbund-Kunststoffe, Hanser Verlag München, Wien, 1992
- [11] Einsfeld, U.: Bemessung von Tragwerken aus Kunststoffen, In: Der Ingenieurbau: Grundwissen (Hrsg.: G. Mehlhorn), Abschnitt 3.2, Seite 768, Verlag Ernst & Sohn, 1998
- [12] Erhard, G.: Konstruieren mit Kunststoffen, Hanser Verlag München, Wien, 1999
- [13] Franke, L.: Schadensakkumulation und Restfestigkeit im Licht der Bruchmechanik, Fortschritte im konstruktiven Ingenieurbau, Rehm - Festschrift (1984)
- [14] Franke, L.; Meyer, H.-J.: Schadensakkumulation bei GFK, Endbericht zum Forschungsvorhaben, Berlin, Dez. 1991
- [15] Gleiter, U.: Einsatz von transparenten Thermoplasten im Bauwesen, Dissertation, TU Darmstadt, 2002
- [16] Großkopf, P.; Winkler, Th.: Auslegung von GFK / Hartschaum Verbundwerkstoffen Kunststoffe 63 (1973), 881-888

- [17] Habenicht, G.: Kleben – Grundlagen, Technologie, Anwendungen, Springer Verlag, 1997
- [18] Haferkamp, H.; Winkler, T.: Design, Testing and Long-Term Experience with Sandwich Materials on Plastics Basis in the Building Sector Proceedings of the Fourth International Conference on Composite Materials, ICCM-IV Oct. 25-27, 1982 TOKYO JAPAN
- [19] Hintersdorf, G.: Tragwerke aus Plaste, Verlag für Bauwesen Berlin, 1969
- [20] Höninger, H.; Reichelt, E.: Langzeit-Deformationsverhalten von Plastwerkstoffen, Institut für Leichtbau, Schriftenreihe „Materialökonomie“ Heft 32
- [21] Jungbluth, O.: Verbund- und Sandwichtragwerke, Tragverhalten, Feuerwiderstand, Bauphysik; Springer-Verlag, Berlin 1986
- [22] Just, M.: Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Sandwichplatten mit CO<sub>2</sub>-getriebenen Polyurethan-Schaumstoffkernen, Forschungsvorhaben Nr. 10011B, IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH, Hermann-Reichelt-Str. 01109 Dresden
- [23] Just, M.: Zum Langzeitverhalten von Sandwichplatten mit einem Polyurethan-Hartschaumkern, Bauingenieur 67, 1992
- [24] Just, M.: Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zum Langzeitverhalten von PUR-Hartschaumstoff – Stützkernbauteilen und Schlussfolgerungen für die Anwendung  
1030.Mitteilung aus dem Institut für Leichtbau und ökonomische Verwendung von Werkstoffen, Dresden, IfL-Mitteilungen 22 (1983), Heft 3, 95-104
- [25] Just, M.; Gerbet; Kraaz: Auswertung und Zusammenfassung der europaweiten Versuche und Untersuchungen zum Kriechverhalten halogenfreier PUR-Isolierungen von Kunststoffmantelrohren, Abschlußbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 9931 B, IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH, Hermann-Reichelt-Straße; 01109 Dresden
- [26] Kuhlmann, U.: Stahlbau Kalender 2000, Verlag Ernst & Sohn, 2. Jahrgang, Seite 250, Tab.7
- [27] Ludwig, C.: Glasfaserverstärkte Kunststoffe unter hoher thermischer und mechanischer Belastung. Forschungsberichte des Instituts für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE), Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers, Universität Stuttgart, 2009
- [28] Malmeister, A.; Tamuzs, V.; Teters, G.: Mechanik der Polymerwerkstoffe, Akademie-Verlag Berlin 1977
- [29] Mehlhorn, G.: Bemessung, Grundwissen, Bemessung von Tragwerken aus Kunststoffen Faser-Kunststoff-Verband, Seite 750 – 923, Verlag Ernst und Sohn, Berlin, 1998

- [30] Meyer, H.-J.: Reihe Werkstofftechnik, Zur Bemessung von GFK-Bauteilen unter Zuhilfenahme der Linear-Elastischen Bruchmechanik und probabilistischer Versagenskriterien, Verlag Shaker
- [31] Michaeli; Huybrechts; Wegener: Dimensionieren mit Faserverbundkunststoffen, Hanser Verlag München, Wien, 1994
- [32] Mini, P.; Miller, S.: Versuche an Klebeverbindungen mit GFK-Profilen. Bericht Professur für Tragkonstruktionen, Prof. Dr. O. Künzle, 2000
- [33] Oppe, M.: Zur Bemessung geschraubter Verbindungen von pultrudierten faserverstärkten Polymerprofilen, Schriftenreihe Stahlbau, Heft 66, Shaker-Verlag Aachen, ISBN: 978-3-8322-8247-9, 2009
- [34] Peters, S.: Kleben von GFK und Glas für baukonstruktive Anwendungen. Forschungsbericht 27, Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen, Prof. Dr.-Ing. J. Knippers, Universität Stuttgart, 2006
- [35] Puck, A.: Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten. München, Wien, Hanser, 1996
- [36] Rabotnow, Ju. N.; Iljuschin, A. A.: Methoden der Viskoelastizitätstheorie, VEB Fachbuchverlag Leipzig 1969
- [37] Roderic, S. Lakes: Viscoelastic Solids, CRC Press Boca Raton 1999
- [38] Saechtling: Kunststoff Taschenbuch, Hanser Verlag München, Wien, 29. Aufl., 2005
- [39] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Springer-Verlag, Berlin, 2005
- [40] Schulz, U.: Tragverhalten von vorgespannten und nicht vorgespannten Schraubenverbindungen mit Füge-teilen aus Glasfaserverstärktem Kunststoff. Bericht T867 der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität Karlsruhe, IRB-Verlag Stuttgart
- [41] Schulz, U.: Kleben von glasfaserverstärkten Kunststoffen, Bautechnik 9/1971, S. 308-312
- [42] Stamm, K.; Witte, H.: Sandwichkonstruktionen, Springer Verlag, Wien / New York 1974
- [43] Structural Design of Polymer Composites, EUROCOMP Design Code and Handbook, Edited by John L. Clarke, E & FN SPON, Chapman & Hall, London, 1996
- [44] Taprogge, R.: Konstruieren mit Kunststoffen, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1971; Band T21
- [45] Trumpf, H.: Stabilitätsverhalten ebener Tragwerke aus pultrudierten faserverstärkten Polymerprofilen, Shaker Verlag Aachen 2006

- 
- [46] Vallée, T.: Adhesively bonded Lap Joints of pultruded GFRP shapes. Dissertation, ETH Lausanne, CCLab, 2003
- [47] Eabsy, R.C. et al.: Failure model for phenolic and polyester pultrusions under load in fire. *Plastics, Rubber and Composites*, Vol. 36, No. 9, S. 379ff., 2007
- [48] Bank, L. C.: *Composites for construction. Structural design with FRP materials*. Wiley & Sons, Hoboken, N.J. 2006.
- [49] DIBt – Medienliste 40 für Behälter, Auffangvorrichtungen und Rohre aus Kunststoff, DIBt, Berlin (05/05)
- [50] Krahwinkel, M.; Gehmert, C.: Bemessung von tragenden Bauteilen aus Kunststoffen im Bauwesen – die neue BÜV-Empfehlung TKB (2010-08), *Bautechnik* 88/2011
- [51] Bardenheier, R.: *Mechanisches Versagen von Polymerwerkstoffen*, *Kunststoffe Fortschrittsbericht*, Carl Hanser Verlag, München (1982)
- [52] Henning, F.; Moeller, E.: *Autorenkollektiv: Handbuch Leichtbau - Methoden, Werkstoffe, Fertigung*, Carl Hanser Verlag (2011)

# Sachwortverzeichnis

Aramidfaser .....	15	Duroplaste .....	16, 22
Auflagerung .....	61	Eigenschaft	
Ausführung .....	63	mechanische .....	256
Bauausführung .....	69	Eigenüberwachung .....	64
Baubeschreibung .....	4	Einfeldträger .....	85, 193
Baustoff		Einflussfaktor .....	243, 246, 249
nicht genormter .....	2	Einwirkung .....	250
Bauteil .....	58	außergewöhnliche .....	27, 30
absturzsicherndes .....	61	ständige .....	27, 28
plattenförmiges .....	59	veränderliche .....	27, 28
schalenförmiges .....	59	Einwirkungskollektiv .....	7
Beanspruchung		Elastomere .....	16
nicht ruhende .....	2	Ersatzbeanspruchung .....	9, 10, 11
<b>Beanspruchungsart</b> .....	40	Faser .....	256
Beanspruchungsverteilung .....	12	Faserverbundkunststoff .....	62
Behälter .....	59	Fläche .....	57
Belastung		Fremdüberwachung .....	66
nicht ruhende .....	2	Geschraubte Verbindungen .....	225
Bemessungsnorm .....	81	Glasfaser .....	15
Bemessungswert .....	250	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit .....	47
Berechnung		Grenzzustand der Tragfähigkeit .....	35
statische .....	3	Grundnorm .....	75
<b>Bodenplatte</b> .....	104	Halbzeug .....	68
Brandverhalten .....	1	Hohlbauteil .....	58
Brücke .....	61	Hohlkasten .....	58
Carbonfaser .....	15	<b>Kernschicht</b> .....	141
Deckschicht .....	141	Klebstoff .....	55
Dehnungsbeschränkung .....	47, 48	Kombinationsbeiwert .....	253
Delaminierung .....	9	Kunststoff	
Dichtheit .....	1	faserverstärkter .....	22, 55, 246
Durchbildung		unverstärkter .....	21, 62, 243
bauliche .....	57	Laminat	

- glasfaserverstärktes ..... 85, 141  
 Materialeigenschaft ..... 19  
 Materialkennwert..... 1  
 Merkblatt ..... 82  
 Miner-Regel ..... 9  
 Nachweisverfahren ..... 6  
 Norm ..... 75  
 PE-HD ..... 183  
**PMMA**..... 165  
 Polyurethan-Hartschaum (PUR-Schaum)  
     ..... 17  
 Polyvinylchloridschaum (PVC-Schaum) 17  
 Probenentnahme ..... 67  
 Prüfnorm..... 77  
 Pultrusionsprofil ..... 193, 209  
**PUR-Hartschaum** ..... 141  
 Regelverfahren ..... 6  
 Richtlinie ..... 75, 82  
 Richtwert ..... 243  
 Riss ..... 9  
 Rohprodukt..... 63  
 Sandwichkern ..... 256  
 Sandwichkonstruktion ..... 24, 60  
 Schadensakkumulation ..... 7, 11  
 Schadensakkumulationsregel ..... 9, 11  
 Schaumstoff..... 16, 249  
 Scherbeanspruchung  
     interlaminare ..... 39  
 Scherfestigkeit  
     interlaminare ..... 39  
 Schnittgröße ..... 33  
**Schweißen**..... 55  
 Sicherheitskonzept..... 5  
 Sicherheitsnachweis ..... 6  
 Sickerwasserschacht ..... 183  
 Spalte ..... 57  
 Spannung ..... 33  
 Stabilitätsversagen..... 43  
 Stoffnorm ..... 76  
 Stütze..... 209  
 Teilsicherheitsbeiwert ..... 255  
 Temperatur  
     erhöhte ..... 1  
 Temperaturbereich ..... 1  
 Thermoplaste ..... 16, 21  
 Toxizität ..... 2  
**Überdachung** ..... 85, 141, 193  
**Überlaminieren**..... 54  
 Überwachung ..... 63, 70  
 Unterlagen  
     bautechnische ..... 3  
 Verbindung..... 49, 61  
     lösbare ..... 49  
     nicht lösbare ..... 54  
 Verbindungsmittel..... 54, 68  
 Verformung ..... 33  
 Verformungsbegrenzung ..... 48  
 Versagen..... 5  
 Versagenswahrscheinlichkeit ..... 5  
**Vordach**  
     Platte ..... 165  
 Zeichnung..... 3  
 Zeitstandbeanspruchbarkeit..... 8  
 Zeitstandbeanspruchung ..... 7  
 Zeitstandbelastung..... 12  
 Zeitstandfestigkeitsnachweis ..... 7  
 Zugfestigkeit  
     interlaminare ..... 40  
 Zustandsklassifizierung ..... 72  
 Zweifeldplatte..... 141  
 Zylinderwand ..... 104