

DIN CEN/TR 13121-5

ICS 23.020.10

**Oberirdische GFK-Tanks und -Behälter –
Teil 5: Berechnungsbeispiel für einen Behälter aus GFK;
Deutsche Fassung CEN/TR 13121-5:2017**

GRP tanks and vessels for use above ground –
Part 5: Example calculation of a GRP-vessel;
German version CEN/TR 13121-5:2017

Gesamtumfang 62 Seiten

DIN-Normenausschuss Chemischer Apparatebau (FNCA)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (CEN/TR 13121-5:2017) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 210 „GFK--Tanks und -Behälter“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN (Deutschland) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Gemeinschaftsarbeitsausschuss NA 012-00-07 GA „Gemeinschaftsarbeitsausschuss FNCA/NATank: Behälter und Apparate aus GFK“ im DIN-Normenausschuss Chemischer Apparatebau (FCNA).

Das vorliegende Dokument wurde nach den Verfahrensregeln eines Fachberichts erstellt.

Technische Reports sind nicht Bestandteil des Deutschen Normenwerks.

Erfahrungen mit diesem Technischen Report sind erbeten:

- vorzugsweise als Datei per E-Mail an fnca@din.de in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter <http://www.din.de/stellungnahme> abgerufen werden;
- oder in Papierform an den Normenausschuss Chemischer Apparatebau, Saatwinkler Damm 42-43, 13627 Berlin.

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

Deutsche Fassung

Oberirdische GFK-Tanks und -Behälter — Teil 5: Berechnungsbeispiel für einen Behälter aus GFK

GRP tanks and vessels for use above ground —
Part 5: Example calculation of a GRP-vessel

Dieser Technische Bericht wurde vom CEN am 18. April 2017 angenommen. Er wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 210 erstellt.

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



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

CEN-CENELEC Management-Zentrum: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort.....	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich.....	7
2 Allgemeines.....	7
3 Tankabmessungen.....	8
4 Materialien	9
5 Belastungen (9).....	9
6 Grenzdehnungen der Lamine (8.2.2)	11
7 Einflussfaktoren (7.9.5.2)	11
8 Teilsicherheitsfaktoren (Tabelle 12)	12
9 Kombinationsbeiwerte (Tabelle 11)	12
10 Berechnung des Zylinders.....	13
10.1 Einflussfaktor A_5	13
10.2 Charakteristische Festigkeitskennwerte	13
10.3 E-Module	14
10.4 Berechnung des Zylinders in axialer Richtung.....	14
10.4.1 Festigkeitsnachweis (Grenzzustand der Tragfähigkeit)	15
10.4.2 Dehnungsnachweis (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit)	17
10.4.3 Stabilitätsnachweis (Grenzzustand der Tragfähigkeit).....	19
10.5 Berechnung des Zylinders in Umfangsrichtung	21
10.5.1 Festigkeitsnachweis (Grenzzustand der Tragfähigkeit)	21
10.5.2 Dehnungsnachweis (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit)	23
10.5.3 Stabilitätsnachweis der Zylinderschale tangential (Grenzzustand der Tragfähigkeit)	24
10.5.4 Kritischer Beuldruck von Versteifungsringen (Grenzzustand der Tragfähigkeit)	25
10.6 Erdbebenberechnung des Zylinders.....	26
10.6.1 Berechnung des Zylinders in Axialrichtung	26
10.6.2 Bemessung des Zylinders in Umfangsrichtung.....	30
11 Ausschnitte im Zylinder.....	30
11.1 Berechnung in Umfangsrichtung	31
11.1.1 Festigkeitsnachweis	31
11.1.2 Dehnungsnachweis.....	32
11.2 Berechnung in Axialrichtung.....	32
11.2.1 Festigkeitsnachweis	32
11.2.2 Dehnungsnachweis.....	33
12 Berechnung der Zarge	33
12.1 Schnittlasten der Zarge	34
12.2 Festigkeitsnachweis (Grenzzustand der Tragfähigkeit)	35
12.2.1 Bemessungswerte der Einwirkungen.....	35
12.2.2 Bemessungswert des zugehörigen Widerstandes.....	35
12.2.3 Nachweis	36
12.3 Dehnungsnachweis (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit)	36

12.3.1	Bemessungswerte der Einwirkungen.....	36
12.3.2	Bemessungsgrenzwert für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis.....	36
12.3.3	Nachweis	36
12.4	Stabilitätsnachweis (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit)	37
12.4.1	Bemessungswerte der Einwirkungen.....	37
12.4.2	Bemessungswerte der zugehörigen Widerstände.....	37
12.4.3	Nachweis	37
12.5	Erdbebenbemessung der Zarge	38
12.5.1	Schnittlasten im Erdbebenfall.....	38
12.5.2	Festigkeitsnachweis (Grenzzustand der Tragfähigkeit)	38
12.5.3	Dehnungsnachweis (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit)	39
12.5.4	Stabilitätsnachweis (Grenzzustand der Tragfähigkeit).....	39
13	Überlaminatverbindung Zarge - Behälter	40
13.1	Festigkeitsnachweis (Grenzzustand der Tragfähigkeit)	40
13.1.1	Bemessungswerte der Einwirkungen.....	40
13.1.2	Bemessungswert des zugehörigen Widerstandes	41
13.1.3	Nachweis	41
13.2	Dehnungsnachweis (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit)	41
13.2.1	Bemessungswerte der Einwirkungen.....	41
13.2.2	Bemessungsgrenzwert für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis.....	42
13.2.3	Nachweis	42
13.3	Erdbebenberechnung des Zargenüberlaminats.....	42
13.3.1	Festigkeitsnachweis (Grenzzustand der Tragfähigkeit)	42
13.3.2	Dehnungsnachweis (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit)	42
14	Berechnung des Bodens	43
14.1	Einflussfaktor A_5	43
14.2	Charakteristische Festigkeitskennwerte.....	43
14.3	E-Module	43
14.4	Einwirkungen, die Schnittlasten am Boden hervorrufen.....	43
14.5	Festigkeitsnachweis (Grenzzustand der Tragfähigkeit)	44
14.5.1	Bemessungswert der Einwirkungen	44
14.5.2	Dehnungsnachweis (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit)	45
14.5.3	Stabilitätsnachweis des Bodens (Grenzzustand der Tragfähigkeit).....	47
15	Unterer Zylinderbereich (Region 1)	47
15.1	Festigkeitsnachweis (Grenzzustand der Tragfähigkeit)	47
15.1.1	Bemessungswert der zugehörigen Widerstände	48
15.1.2	Nachweis	48
15.2	Dehnungsnachweis (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit)	49
15.2.1	Bemessungswert der Einwirkungen	49
15.2.2	Bemessungsgrenzwert für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis.....	49
15.2.3	Nachweis	49
15.3	Erdbebennachweis Region 1 (Grenzzustand der Tragfähigkeit).....	50
15.3.1	Festigkeitsnachweis (Grenzzustand der Tragfähigkeit)	50
15.3.2	Dehnungsnachweis (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit)	51
16	Oberer Zargenbereich (Region 2)	51
16.1	Festigkeitsnachweis (Grenzzustand der Tragfähigkeit)	52
16.1.1	Bemessungswert des zugehörigen Widerstands	52
16.1.2	Nachweis	52
16.2	Dehnungsnachweis (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit)	52
16.2.1	Bemessungswerte der Einwirkungen.....	52
16.2.2	Bemessungsgrenzwert für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis.....	53
16.2.3	Nachweis	53
16.3	Erdbebenbemessung von Region 2 (Grenzzustand der Tragfähigkeit).....	53

16.3.1	Festigkeitsnachweis (Grenzzustand der Tragfähigkeit)	53
16.3.2	Bemessungswert des zugehörigen Widerstands	53
16.3.3	Nachweis	54
16.4	Dehnungsnachweis (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit)	54
16.4.1	Bemessungswert der Einwirkungen	54
16.4.2	Bemessungsgrenzwert für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis	54
16.4.3	Nachweis	54
17	Flanschbemessung.....	54
18	Verankerung	59
18.1	Verankerung für Windlasten (ständige/vorübergehende Situation)	59
18.1.1	Ankerzuglast.....	59
18.1.2	Ankerquerkraft.....	59
18.2	Verankerung für Erdbebenlasten (Bemessungssituation bei Erdbeben).....	60
18.2.1	Ankerzuglast.....	60
18.2.2	Ankerquerkraft.....	60

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (CEN/TR 13121-5:2017) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 210 „GFK-Tanks und -Behälter“ erarbeitet, dessen Sekretariat von SFS gehalten wird.

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

Einleitung

EN 13121 beinhaltet folgende Teile:

- EN 13121-1, *Oberirdische GFK-Tanks und -Behälter — Teil 1: Ausgangsmaterialien — Spezifikations- und Annahmebedingungen*
- EN 13121-2, *Oberirdische GFK-Tanks und -Behälter — Teil 2: Verbundwerkstoffe — Chemische Widerstandsfähigkeit*
- EN 13121-3, *Oberirdische GFK-Tanks und -Behälter — Teil 3: Auslegung und Herstellung*
- EN 13121-4, *Oberirdische GFK-Tanks und -Behälter — Teil 4: Auslieferung, Aufstellung und Instandhaltung*
- CEN/TR 13121-5, *Oberirdische GFK-Tanks und -Behälter — Teil 5: Berechnungsbeispiel für einen Behälter aus GFK* (dieser Bericht)

Die fünf Teile legen gemeinsam die Zuständigkeiten des Herstellers der Tanks oder Behälter und die bei deren Herstellung zu verwendenden Materialien fest.

EN 13121-1 legt die Anforderungen und Annahmebedingungen für die Ausgangswerkstoffe fest — Harze, Härter, thermoplastische Auskleidungen, Verstärkungs- und Zusatzwerkstoffe. Diese Anforderungen sind notwendig, um die nach EN 13121-2 ermittelten Eigenschaften der chemischen Widerstandsfähigkeit und die in EN 13121-3 bestimmten mechanischen, thermischen und konstruktiven Eigenschaften zu ermitteln. Zusammen mit den in Teil 3 bestimmten Grundsätzen für die Bauausführung stellen die Anforderungen und die Annahmebedingungen für die Ausgangswerkstoffe sicher, dass Tank bzw. Behälter den konstruktiven Anforderungen entsprechen. EN 13121-4 legt Empfehlungen für die Auslieferung, Handhabung, Aufstellung und Instandhaltung von GFK-Tanks und -Behältern fest. Dieser Teil von EN 13121 gibt Hinweise zur Anwendung der Norm. Aufgrund der Komplexität der Normen und um zu verstehen, wie die Norm die Grundsätze und Anforderungen von EN 1990 für Sicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit von Strukturen erfüllt, hat CEN/TC 210 es für notwendig erachtet, eine Beispielberechnung eines Behälters nach EN 13121-3 zu veröffentlichen.

Bei der Konstruktion und Herstellung von GFK-Tanks und -Behältern kommen verschiedene Materialien wie Harze, Thermoplaste und Verstärkungsfasern sowie eine Reihe verschiedener Herstellungsverfahren zum Einsatz. Es wird davon ausgegangen, dass Behälter und Tanks, die unter diese Norm fallen, nur von Herstellern hergestellt werden, die kompetent und entsprechend ausgerüstet sind, sodass sie alle Anforderungen dieser Norm erfüllen, und dabei Werkstoffe verwendet werden, die von kompetenten und erfahrenen Werkstoffherstellern stammen.

Metallbehälter und solche aus anderen isotropen, homogenen Werkstoffe werden in geeigneter Weise durch das Berechnen zulässiger Lasten auf der Grundlage gemessener zug- und dehntechnischer Eigenschaften konstruiert. GFK ist andererseits ein laminarer Werkstoff, der durch fortlaufenden Auftrag einzelner Verstärkungsschichten hergestellt wird. Daraus ergeben sich viele mögliche Kombinationen von Verstärkungstypen, die in jedem Fall die bautechnischen Anforderungen an eine einheitliche Konstruktion erfüllen. Dies ermöglicht dem Konstrukteur die Wahl derjenigen Laminatkonstruktion, die am besten für die verfügbaren Produktionsstätten geeignet und daher am kostengünstigsten ist.

1 Anwendungsbereich

Dieser Technische Report enthält eine Anleitung für die Bemessung eines Behälters nach EN 13121-3. Die Berechnung erfolgt nach dem in EN 13121-3:2016, 7.9.3, angegebenen fortgeschrittenen Bemessungsverfahren mit geprüften Laminaten und statistisch abgesicherten Lamineigenschaften.

2 Allgemeines

Behälter oder Behälterstrukturen können strukturelle Elemente oder Lösungen enthalten, für die diese Norm keine ausreichende Anleitung bietet. In diesem Fall müssen andere Verfahren verwendet werden, um eine sichere Struktur zu erhalten.

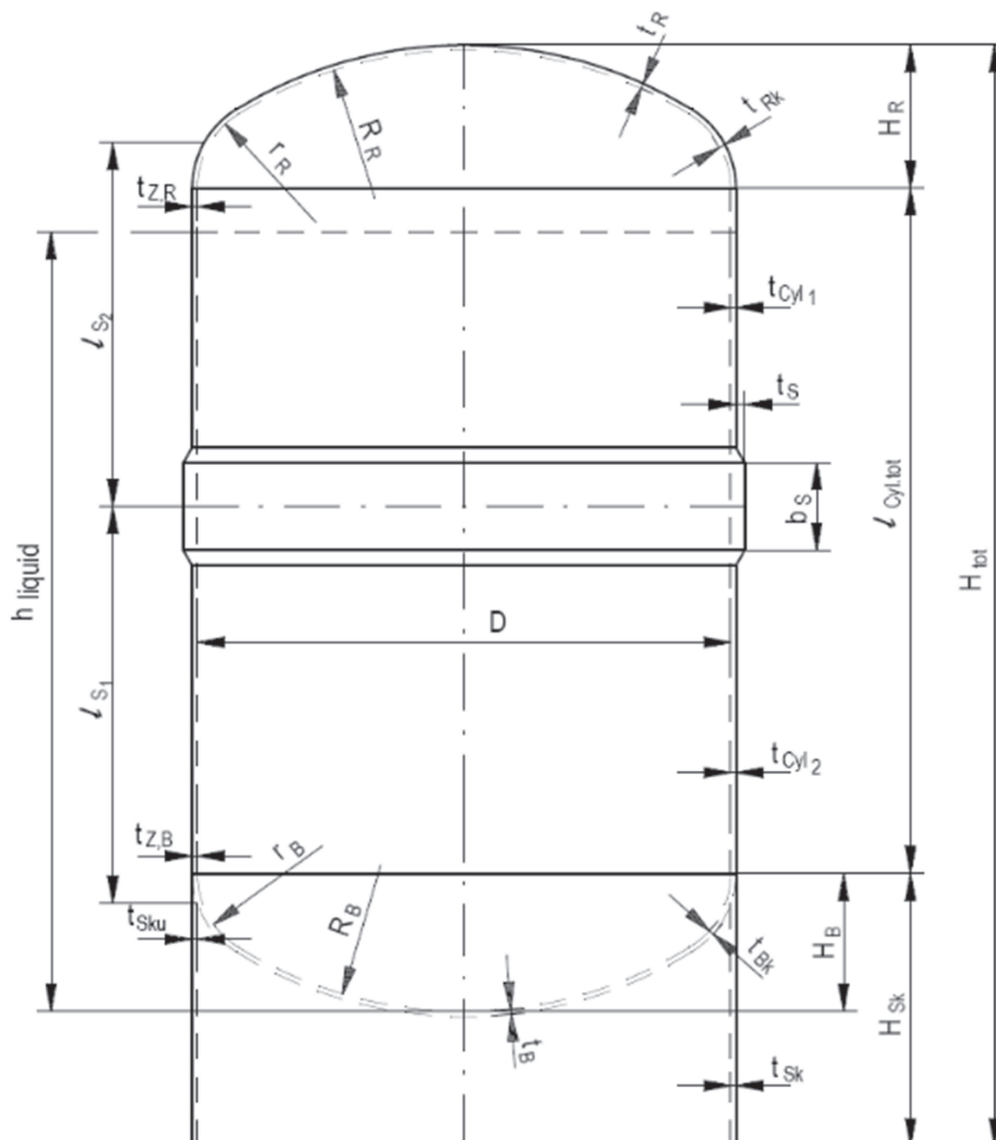
Dieses Berechnungsbeispiel basiert auf einem GFK-Druckbehälter mit einem Innendurchmesser von D 3 000 mm. Die zylindrischen Teile des Behälters sind im Wickelverfahren hergestellt. Der Boden und das Dach sind torisphärische gewölbte Böden, Klöpper- oder Korbbogenböden, die aus einem Mischlaminat per Handauflegeverfahren hergestellt werden. Ein Schutz gegen Medienangriff erfolgt durch eine chemische Widerstandsschicht (CSS, Chemieschutzschicht).

Der Behälter ist im Freien in einem erdbebengefährdeten Gebiet aufgestellt.

WICHTIG — Dieses Beispiel deckt nicht alle notwendigen Nachweise für die Berechnung des GFK-Tanks ab. Zusätzliche Nachweise müssen eventuell für das Dach, den oberen Zylinder usw. durchgeführt werden.

3 Tankabmessungen

Skizze der Tankabmessungen:



Hauptabmessungen:

Durchmesser:	D	=	3 000 mm
Gesamthöhe:	H_{tot}	=	8 000 mm

Zylinder:

Dicke Zylinder 1:	$t_{Cyl,1}$	=	$t_{C1} = 9,2$ mm
Dicke Zylinder 2:	$t_{Cyl,2}$	=	$t_{C2} = 11,7$ mm
Dicke Zylinder am Übergang Dach:	$t_{Z,R}$	=	30,0 mm
Dicke Zylinder am Übergang Boden:	$t_{Z,B}$	=	46,1 mm
Gesamte Zylinderlänge:	$l_{Cyl,tot}$	=	6 610 mm
Abstand zwischen den Beulsteifen:	$l_{s,1}$	=	3 700 mm
	$l_{s,2}$	=	3 303 mm

Dicke der Beulsteifen:	t_S	= 20 mm
Breite der Beulsteifen:	b_S	= 260 mm

Zarge:

Zargendicke:	t_{Sk}	= 17,0 mm
Dicke Überlaminat:	t_{02}	= 7,0 mm
Zargenhöhe:	H_{Sk}	= 890 mm

Dach:

Kalottendicke:	t_R	= 13,0 mm
Radius der Kalotte:	R_R	= 3 000 mm
Krempendicke:	t_{Rk}	= 30,0 mm
Radius der Krempe:	r_{Rk}	= 300 mm
Höhe des Daches:	H_R	= 590 mm

Boden:

Kalottendicke:	t_B	= 16,5 mm
Radius der Kalotte:	R_B	= 3 000 mm
Krempendicke:	t_{Bk}	= 45,0 mm
Radius der Krempe:	r_{Bk}	= 300 mm
Höhe des Bodens:	H_B	= 590 mm

4 Materialien

Harz Typ: UP-Harz, Harzgruppe 4

5 Belastungen (9)

LC 1: Eigengewicht

Die angenommenen Eigengewichte der einzelnen Tankbauteile sind:

Dach:	$W_{R,k}$	= 4 kN	Flächenlast:	$w_{R,k}$	= 0,57 kN/m ²
Zylinder + Ringe:	$W_{C,k}$	= 19 kN			
Boden:	$W_{B,k}$	= 4 kN	Flächenlast:	$w_{B,k}$	= 0,57 kN/m ²
Zarge:	W_{Sk}	= 3 kN			

Gesamtes Eigengewicht des Behälters: $W_{tot} = 30$ kN

LC 2: Flüssigkeitsfüllung

Dichte des Mediums	ρ_{liquid}	= 1,30 kg/dm ³
Füllhöhe	h_{liquid}	= 7 000 mm
Volumen	V	= 52,0 m ³

LC 3: Langzeitiger Auslegungsüberdruck

Auslegungsdruck $PS_{op,l} = 2,000 \text{ bar} \equiv 0,20 \text{ N/mm}^2$

LC 4: Kurzzeitiger Auslegungsüberdruck

Auslegungsdruck $PS_{op,s} = 2,500 \text{ bar} \equiv 0,25 \text{ N/mm}^2$

LC 5: Langzeitiger Auslegungsunterdruck

Auslegungsdruck $PS_{ep,l} = 0,000 \text{ bar} \equiv 0,00 \text{ N/mm}^2$

LC 6: Kurzzeitiger Auslegungsunterdruck

Auslegungsdruck $PS_{ep,s} = 0,050 \text{ bar} \equiv 0,005 \text{ N/mm}^2$

LC 7: Wind (9.2.2)

Staudruck $q_p = 0,8 \text{ kN/m}^2$ (EN 1991-1-4)

Kraftbeiwert (Zylindrischer Tank) $c_f = 0,8$

Unterdruck aus Wind: $p_{wind} = 0,6 \cdot q_p = 0,6 \cdot 0,8 = 0,48 \text{ kN/m}^2$

LC 8: Schnee (9.2.1)

Charakteristische Schneelast $s_k = 0,85 \text{ kN/m}^2$ (EN 1991-1-3)

Formbeiwert $\mu = 0,80$

Schneelast $p_{snow} = s_k \cdot \mu = 0,85 \cdot 0,8 = 0,68 \text{ kN/m}^2$

LC 9: Verkehrslasten (Begehungslasten durch Personen) (9.2.8)

Verkehrslasten auf dem Dach $p_{access} = 1,5 \text{ kN/m}^2$

LC 10: Temperatur

Auslegungstemperatur $TS = 50 \text{ °C}$

Temperaturdifferenz $\Delta T = 20 \text{ K}$

LC 11: Erdbeben (9.2.3.4)

Grundwert der Bodenbeschleunigung $a_{gR} = 1,00 \text{ m/s}^2$

Bedeutungsbeiwert $\gamma_1 = 1,4$

Bemessungswert der Bodenbeschleunigung $a_g = a_{gR} \cdot \gamma_1 = 1,00 \cdot 1,4 = 1,40 \text{ m/s}^2$

Untergrundklasse nach EN 1998-1

D

Viskose Dämpfung 5 %

Kontrollperioden des Antwortspektrums $T_B = 0,20 \text{ s}$ $T_C = 0,8 \text{ s}$ $T_D = 2,0 \text{ s}$

Baugrundfaktor $S = 1,35$

Verhaltensbeiwert $q = 1,5$

Biege-E-Modul Zylinder tangential $E_{\phi,b} = 19\,000 \text{ N/mm}^2$

Biege-E-Modul Zylinder axial $E_{x,b} = 12\,000 \text{ N/mm}^2$

Biege-E-Modul für kurzzeitige
Einwirkungen $E_e = 1,5 \cdot \sqrt{E_{\phi,b} \cdot E_{x,b}} = 1,5 \cdot \sqrt{19\,000 \cdot 12\,000}$
 $= 22\,650 \text{ N/mm}^2$

Zylinderdicke im unteren Drittel

$t_{1/2}$ näherungsweise $t_{Sk} = 17 \text{ mm}$

Schwingzeit

$$T = \sqrt{\frac{\rho_{\text{liquid}} \cdot h_{\text{liquid}}}{E_e \cdot t_{1/2}}} = D \cdot \left[0,628 \cdot \left(\frac{h_{\text{liquid}}}{D} \right)^2 + \frac{2 \cdot h_{\text{liquid}}}{D} + 1,49 \right]$$

$$T = \sqrt{\frac{1,33 \cdot 7\,200}{22\,650 \cdot 17,0 \cdot 10^3}} \cdot 3,0 \cdot \left[0,628 \cdot \left(\frac{7\,200}{3\,000} \right)^2 + \frac{2 \cdot 7\,200}{3\,000} + 1,49 \right] = 0,15 \text{ s}$$

Designwert des
Antwortspektrums
 $T \leq T_C$
(Plateauwert):

$$S_D(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} = 1,40 \cdot 1,35 \cdot \frac{2,5}{1,5} = 3,15 \text{ m/s}^2$$

Gesamtmasse des
Behälters
(näherungsweise)

$$W_G = \frac{W_{\text{tot}}}{g} + V \cdot \rho_{\text{liquid}} = \frac{30}{9,81} + 52 \cdot 1,30 = 70,66 \text{ Tonnen}$$

Horizontallast
(Scherfuge zum
Fundament)

$$H_{AE} \cong S_D(T) \cdot W_G = 3,15 \cdot 70,66 = 222,6 \text{ kN}$$

Kippmoment

$$M_{AE,\text{tot}} \cong \left[V \cdot \rho_{\text{liquid}} \cdot \left(\frac{h_{\text{liquid}}}{2} + H_{Sk} - H_B \right) + \frac{W_{\text{tot}}}{g} \cdot \frac{H_{\text{tot}}}{2} \right] \cdot S_D(T)$$

$$M_{AE,\text{tot}} \cong \left[52 \cdot 1,30 \cdot \left(\frac{7\,000}{2} + 800 - 590 \right) \cdot 10^{-3} + \frac{30}{9,81} \cdot \frac{8\,000}{2} \cdot 10^{-3} \right] \cdot 3,15 = 828,5 \text{ kNm}$$

6 Grenzdehnungen der Lamine (8.2.2)

Für das verwendete UP-Harz ergibt sich:

Das Dach wird aus einem Mischlaminat
gefertigt

$$\epsilon_{\text{lim},R} = \epsilon_{d,R} = 0,25 \%$$

Der Boden wird aus einem Mischlaminat
gefertigt

$$\epsilon_{\text{lim},B} = \epsilon_{d,B} = 0,25 \%$$

Der Zylinder wird aus einem Wickellaminat
0°/90° hergestellt

$$\epsilon_{\text{lim},x,\text{Cyl}} = \epsilon_{d,x,\text{Cyl}} = 0,20 \% \quad \epsilon_{\text{lim},\phi,\text{Cyl}} = \epsilon_{d,\phi,\text{Cyl}} = 0,27 \%$$

Die Zarge wird aus einem Wickellaminat
0°/90° hergestellt

$$\epsilon_{\text{lim},x,\text{Sk}} = \epsilon_{d,x,\text{Sk}} = 0,20 \% \quad \epsilon_{\text{lim},\phi,\text{Sk}} = \epsilon_{d,\phi,\text{Sk}} = 0,27 \%$$

7 Einflussfaktoren (7.9.5.2)

Einflussfaktor A_1 $A_1 = 1,0$

Einflussfaktor A_2 $A_2 = 1,4$ (EN 13121-2, Tabelle A.4)

Medien der Kategorie 2, $T_d = 50 \text{ °C}$

HDT des Harzes $\text{HDT} = 90 \text{ °C}$

$$A_3 = 1,00 + 0,4 \cdot \left(\frac{TS - 20 \text{ °C}}{\text{HDT} - 30 \text{ °C}} \right) = 1,00 + 0,4 \cdot \left(\frac{50 - 20}{90 - 30} \right) = 1,20$$

Einflussfaktor A_4 $A_4 = 1,0$

Einflussfaktor A_5 Der Einflussfaktor A_5 ist vom Laminattyp abhängig und wird für jede Art von Laminat separat ausgewählt.

8 Teilsicherheitsfaktoren (Tabelle 12)

Einwirkung	Symbol	Situation	
		P/T	A/AE
unabhängige ständige Einwirkungen (s.a):			
ungünstig	$\gamma_{G,sup}$	1,35	1,00
günstig	$\gamma_{G,inf}$	1,00	1,00
für Flüssigkeitsfüllung			
ungünstig	$\gamma_{G,sup}$	1,35	1,00
günstig	$\gamma_{G,inf}$	0	0
unabhängige veränderliche Einwirkungen:			
ungünstig	$\gamma_{Q,sup}$	1,50	1,00
günstig	$\gamma_{Q,inf}$	0	0
außergewöhnliche Einwirkungen:	γ_A		1,00
Erdbebeneinwirkungen:	γ_{AE}		1,00

9 Kombinationsbeiwerte (Tabelle 11)

In der folgenden Tabelle sind die für dieses Beispiel maßgebenden Ψ -Faktoren angegeben.

Einwirkung	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Drücke:			
- langzeitige Drücke	1,0	1,0	1,0
- kurzzeitige Drücke	0	0	0
Nutzlasten im Hochbau, Kategorie (EN 1991-1-1)			
- Kategorie H: Dächer	0	0	0
Schneelasten im Hochbau (EN 1991-1-3)^{a)}:			
übrige CEN-Mitgliedstaaten, - für Orte mit $H \leq 1\,000$ m ü. NN	0,5	0,2	0
Windlasten im Hochbau (EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Temperatur ohne Brand (im Hochbau) (EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0

10 Berechnung des Zylinders

Der Zylinder wird aus einem Wickellaminat 0°/90° hergestellt. Für mechanische Kennwerte wurden Prüfergebnisse genutzt. Sie werden durch Prüfungen nach 7.9.3 nachgewiesen.

10.1 Einflussfaktor A_5

— für den Spannungsnachweis

25 Jahre:	a)	axial	$A_{5B.Cyl.25y.x} = 1,60$	b) tangential	$A_{5B.Cyl.25y.\phi} = 1,20$
3 Monate:			$A_{5B.Cyl.3m.x} = 1,40$		$A_{5B.Cyl.3m.\phi} = 1,15$
Kurzzeitig:			$A_{5B.Cyl.sh.x} = 1,00$		$A_{5B.Cyl.sh.\phi} = 1,00$

— für den Stabilitätsnachweis

25 Jahre:	a)	axial	$A_{5I.Cyl.25y.x} = 1,60$	b) tangential	$A_{5I.Cyl.25y.\phi} = 1,20$
3 Monate:			$A_{5I.Cyl.3m.x} = 1,40$		$A_{5I.Cyl.3m.\phi} = 1,15$
Kurzzeitig:			$A_{5I.Cyl.sh.x} = 1,00$		$A_{5I.Cyl.sh.\phi} = 1,00$

Überprüfung, ob der Mindestwert der Auslegungsfaktoren K und F eingehalten ist:

Beträgt der Wert des Auslegungsfaktors K allein für langzeitige Lasten nicht mindestens 4 (weiterentwickelte Auslegung), sollten die A_{5B} -Werte erhöht werden.

Minimum

$$A_{5B} = \frac{K}{(A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot \gamma_M \cdot \gamma_{F,i})} = \frac{4}{(1,0 \cdot 1,4 \cdot 1,20 \cdot 1,0 \cdot 1,4 \cdot 1,5)} = 1,13$$

Beträgt der Wert des Auslegungsfaktors F allein für langzeitige Lasten nicht mindestens 2,7 (weiterentwickelte Auslegung), sollten die A_{5I} -Werte erhöht werden.

Minimum

$$A_{5I} = \left(\frac{F}{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot \gamma_M \cdot \gamma_{F,i}} \right)^2 \geq 1,0 = \left(\frac{2,7}{1,0 \cdot 1,4 \cdot 1,20 \cdot 1,0 \cdot 1,4 \cdot 1,5} \right)^2 \geq 1,0 = 1,0$$

Alle A_5 -Werte sind größer als die A_5 -Mindestwerte.

10.2 Charakteristische Festigkeitskennwerte

— für Zug

a) axial	$f_{Cyl.x.t.k} = 130 \text{ N/mm}^2$	b) tangential	$f_{Cyl.\phi.t.k} = 400 \text{ N/mm}^2$
----------	--------------------------------------	---------------	---

— für Biegung

a) axial	$f_{Cyl.x.b.k} = 150 \text{ N/mm}^2$	b) tangential	$f_{Cyl.\phi.b.k} = 480 \text{ N/mm}^2$
----------	--------------------------------------	---------------	---

10.3 E-Module

— für Zug

$$\text{a) axial} \quad E_{\text{Cyl x.t}} = 12\,500 \text{ N/mm}^2 \quad \text{b) tangential} \quad E_{\text{Cyl.}\phi.\text{t}} = 21\,000 \text{ N/mm}^2$$

— für Biegung

$$\text{a) axial} \quad E_{\text{Cyl x.b}} = 12\,000 \text{ N/mm}^2 \quad \text{b) tangential} \quad E_{\text{Cyl.}\phi.\text{b}} = 19\,000 \text{ N/mm}^2$$

10.4 Berechnung des Zylinders in axialer Richtung

1. Schritt: Berechnung sämtlicher charakteristischer Schnittlasten durch die Einwirkungen, die Schnittlasten in axialer Richtung verursachen können.

LC 1 Eigengewicht:
$$n_{\text{x.W}} = \frac{W_{\text{R,k}} + W_{\text{Cyl,k}}}{D \cdot \pi} = \frac{4 + 19}{3\,000 \cdot \pi} \cdot 10^3 = 2,44 \text{ N/mm}$$

LC 2 Flüssigkeitsfüllung:
$$n_{\text{x,hp}} = 0$$

LC 3 Langzeitiger Auslegungsüberdruck:
$$n_{\text{x.PS.op.l}} = PS_{\text{op.l}} \cdot \frac{D}{4} = 0,20 \cdot \frac{3\,000}{4} = 150,00 \text{ N/mm}$$

LC 4 Kurzzeitiger Auslegungsüberdruck:
$$n_{\text{x.PS.op.s}} = PS_{\text{op.s}} \cdot \frac{D}{4} = 0,25 \cdot \frac{3\,000}{4} = 187,50 \text{ N/mm}$$

LC 5 Langzeitiger Auslegungsunterdruck:
$$n_{\text{x.PS.ep.l}} = PS_{\text{ep.l}} \cdot \frac{D}{4} = 0,000 \cdot \frac{3\,000}{4} = 0,00 \text{ N/mm}$$

LC 6 Kurzzeitiger Auslegungsunterdruck:
$$n_{\text{x.PS.ep.s}} = PS_{\text{ep.s}} \cdot \frac{D}{4} = 0,005 \cdot \frac{3\,000}{4} = 3,75 \text{ N/mm}$$

LC 7 Wind: Wind verursacht Schnittlasten aus Druck und Biegemoment.

LC 7 A Windmoment:

$$M_{\text{Cyl.wind}} = \frac{c_f \cdot q_p \cdot (l_{\text{cyl.tot}} + H_R)^2 \cdot D}{2} = \frac{0,8 \cdot 0,8 \cdot (6\,610 + 590)^2 \cdot 3\,000}{2} \cdot 10^{-9} = 49,77 \text{ kNm}$$

$$n_{\text{x.M.wind}} = \frac{4 \cdot M_{\text{Cyl.Wnd}}}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 49,77}{\pi \cdot 3\,000^2} \cdot 10^6 = 7,04 \text{ N/mm}$$

LC 7 B Winddruck:
$$n_{\text{x.M.wind}} = p_{\text{wind}} \cdot \frac{D}{4} = 0,48 \cdot \frac{3\,000}{4} \cdot 10^3 = 0,36 \text{ N/mm}$$

LC 8 Schnee:

$$n_{\text{x.psnow}} = p_{\text{snow}} \cdot \frac{D}{4} = 0,68 \cdot \frac{3\,000}{4} \cdot 10^3 = 0,51 \text{ N/mm}$$

LC 9 Verkehrslast (Begehungslast durch Personen):
$$n_{\text{x.paccess}} = p_{\text{access}} \cdot \frac{D}{4} = 1,5 \cdot \frac{3\,000}{4} \cdot 10^3 = 1,13 \text{ N/mm}$$

LC 10 Temperatur: Der Zylinder kann sich frei ausdehnen. Es entstehen keine Axiallasten.

10.4.1 Festigkeitsnachweis (Grenzzustand der Tragfähigkeit)

10.4.1.1 Bemessungswerte der Einwirkungen

2. Schritt: Ermittlung der maßgebenden Einwirkungskombinationen.

Grundkombination für ständige oder vorübergehende Bemessungssituationen

$$E_d = \sum \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \cdot A_5^{\text{langzeitig}} \oplus \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} \cdot A_5^{\text{Belastungsdauer}} \oplus \sum \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{o,i} \cdot Q_{k,i} \cdot A_5^{\text{Belastungsdauer}}$$

Um die maßgebende Kombination der einzelnen Einwirkungen zu finden, werden alle Einwirkungen in die E-Matrix eingetragen.

Da man für den Festigkeitsnachweis $A_{5B} \gamma_F$ -fache Lasten benötigt, werden die Einwirkungen mit $A_{5B} \gamma_F$ multipliziert.

Die γ_F -Faktoren sind EN 13121-3, Tabelle 12, zu entnehmen.

Die $A_{5B} \gamma_F$ -fachen Lasten werden wie folgt bestimmt: $n_{x,d,R} = n_{x,k} \cdot \gamma_F \cdot A_{5B}$

Als nächstes wird die Ψ -Matrix mit den zu den jeweiligen Lastfällen zugehörigen Ψ -Faktoren erstellt.

Die Ψ -Faktoren sind EN 13121-3, Tabelle 11, zu entnehmen.

In diesem Beispiel werden 4 Kombinationen für Drucklasten und 2 Kombinationen für Zuglasten erzeugt.

Mit dieser Anzahl an Kombinationen werden alle Möglichkeiten zur Bestimmung der maximalen Schnittlast $n_{x,d,R}$ überprüft.

Jede veränderliche Einwirkung ist einmal die vorherrschende veränderliche Einwirkung mit $\Psi = 1,0$.

In den Spalten der Ψ -Matrix wird bestimmt, welche Lastfälle mit welchem Ψ -Faktor in der jeweiligen Kombination überlagert werden.

Da die Flüssigkeitssäule für diese Art von Behälter keine Axiallasten hervorruft, sind alle Ψ -Faktoren für den Lastfall LC 2 gleich 0. Dies wäre z. B. anders, wenn der Behälter in einem Tragring aufgehängt wäre.

Der Berechnungsweg ist im folgenden Beispiel mit einer Tabellenkalkulation aufgeführt.

E-Matrix					
LC	Einwirkung	$n_{x,k}$	γ_F	A_{5B}	$n_{x,d,R}$
		[N/mm]			[N/mm]
LC 1	$n_{x,W} =$	2,44	1,35	1,60	5,27
LC 2	$n_{x,hp} =$	61,31	1,35	1,60	132,4
LC 3	$n_{x,op,l} =$	150,0	1,50	1,60	360,0
LC 4	$n_{x,op,s} =$	187,5	1,50	1,00	281,3
LC 5	$n_{x,ep,l} =$	0,00	1,50	1,60	0,00
LC 6	$n_{x,ep,s} =$	3,75	1,50	1,00	5,63
LC 7A	$n_{x,M.wind} =$	7,04	1,50	1,00	10,56
LC 7B	$n_{x,p.wind} =$	0,36	1,50	1,00	0,54
LC 8	$n_{x,psnow} =$	0,51	1,50	1,40	1,07
LC 9	$n_{x,paccess} =$	1,13	1,50	1,00	1,69
LC 10	$n_{x,\Delta}^T =$	0,00	1,00	1,60	0,00

ψ_0 -Matrix					
CO.1	CO.2	CO.3	CO.4	CO.5	CO.6
1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0
1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0
1,0	0,6	0,6	0,0	1,0	0,0
1,0	0,6	0,6	0,0	0,0	0,0
0,5	1,0	0,5	0,5	0,0	0,0
0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

$n_{x,d,R} * \psi$ -Matrix					
Druck				Zug	
CO.1	CO.2	CO.3	CO.4	CO.5	CO.6
[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]
5,27	5,27	5,27	5,27	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	360,0	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	281,3
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	5,63	0,00	0,00
10,56	6,34	6,34	0,00	10,56	0,00
0,54	0,32	0,32	0,00	0,00	0,00
0,54	1,07	0,54	0,54	0,00	0,00
0,00	0,00	1,69	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\Sigma =$	16,9	13,0	14,2	11,4	370,6

Die Schnittlast $n_{x,d,R}$ eines Lastfalls muss mit jedem zugehörigen ψ -Faktor multipliziert werden, wie es in der $n_{x,d,R} * \psi$ -Matrix darunter gezeigt ist. Anschließend werden die Spalten der einzelnen Kombinationen aufsummiert.

Der Maximalwert der Summen der Kombinationen (Spalte) 1 bis 4 ergibt die maßgebende Drucklast $n_{x,d,R}$ und ist rot markiert. Der Maximalwert der Summen der Kombinationen (Spalte) 5-6 gibt die maßgebende Zuglast $n_{x,d,R}$ wieder und ist gelb markiert.

Maßgebende Bemessungsaxiallast: $n_{x,d,R} = 370,6 \text{ N/mm}$ (aus C0.5)

10.4.1.2 Bemessungswert der zugehörigen Tragfähigkeit

Charakteristischer Wert der Grenzeinheitslast: $U_{\text{Lam,Cyl,x,k}} = f_{\text{Cyl.x.t.k}} \cdot t_{\text{Cyl}} = 130 \cdot 11,7 = 1\,521 \text{ N/mm}$

Bemessungswert der Grenzeinheitslast

$$U_{\text{Lam,Cyl,x,Rd}} = \frac{U_{\text{Lam,Cyl,x,k}}}{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot \gamma_M} = \frac{1\,521}{1,0 \cdot 1,4 \cdot 1,20 \cdot 1,0 \cdot 1,4} = 647 \text{ N/mm}$$

10.4.1.3 Nachweis

Es ist nachzuweisen, dass: $E_d \leq R_d$

Somit ergibt sich die Ausnutzung aus: $\eta = \frac{E_d}{R_d} \leq 1 = \frac{371}{647} = 0,57 \leq 1$

10.4.2 Dehnungsnachweis (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit)

10.4.2.1 Bemessungswert der Einwirkungen

Charakteristische Kombination (wird zum Nachweis der Grenzdehnung herangezogen)

$$E_{d,\text{rare}} = \sum G_{k,j} \oplus \sum Q_{k,1} \oplus \sum \psi_{0,1} \cdot Q_{k,i}$$

Die charakteristische Kombination wird ohne Berücksichtigung von A_5 - oder γ_F -Faktoren bestimmt.

Die Bemessungsschnittlasten werden wie folgt bestimmt: $n_{x,d,\varepsilon} = n_{x,k}$

Der Weg, um die maßgebende Lastkombination zu bestimmen, ist der gleiche wie der für den Grenzzustand der Tragfähigkeit.