



Thomas Ummenhofer, Peter Knödel, Sven Nagel

Vergleichsberechnungen zu stehenden zylindrischen Tankbauwerken

Thomas Ummenhofer, Peter Knödel, Sven Nagel

**Vergleichsberechnungen zu
stehenden zylindrischen
Tankbauwerken**

T 3381

T 3381

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2021

ISBN 978-3-7388-0621-2

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

ABSCHLUSSBERICHT

161502 a

Vergleichsberechnungen zu stehenden zylindrischen Tankbauwerken

DIBt Geschäftszeichen: P52-5-19.82-1996/16

Projektförderer:	Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) Kolonnenstr. 30 B 10829 Berlin
Antragsteller:	Thomas Ummenhofer, Prof. Dr.-Ing. Ordinarius für Stahl- und Leichtbau +49 721 608 42205 Thomas.ummehofer@kit.edu
Institut:	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Kaiserstr. 12, D-76131 Karlsruhe
Förderzeitraum:	01.02.2017 - 31.10.2017

Ausgabedatum: 05.12.2019

Inhaltsverzeichnis

1	Berichtsverlauf	4
2	Ausgangspunkt und Ziel	5
3	Vorgehen	6
4	Begleitdokumente	7
4.1	Standsicherheitsnachweise nach EN 1993-4-2	7
4.2	Standsicherheitsnachweise nach DIN 4119	7
4.3	Hintergrund zu den Standsicherheitsnachweisen	7
4.4	Kommentierte Version der EN 1993-4-2	8
4.5	Vorschlag für eine Anlage zur M-VVTB, basierend auf EN 1993-4-2	8
5	Untersuchungstanks	8
5.1	Klein	9
5.2	Mittel	9
5.3	Groß	10
6	Vergleich EN 1993-4-2 mit DIN 4119	11
6.1	Anwendungsbereich	11
6.2	Einwirkungen	12
6.3	Bemessung des Mantels – LS 1	18
6.4	Bemessung des Mantels – LS 3	20
6.5	Steifen	40
6.6	Verankerung	41
6.7	Öffnungen	44
6.8	Bodenblech	46
7	Beurteilung des „vereinfachten Verfahrens“ nach Kapitel 11	48
7.1	Allgemeine Kommentare zum vereinfachten Verfahren	48
7.2	Bemessung des Mantelblechs – Abs. 11.3.1	49
7.3	Ringsteife – Abs. 11.3.2	49
7.4	Verankerung – Abs. 11.5	51
7.5	Dach – Abs. 11.2	52
7.6	Öffnungen – Abs. 11.3.3	54
7.7	Boden – Abs. 11.4	54
8	Weitere Anmerkungen und Vorschläge	55

8.1	Tanks aus Aluminium	55
8.2	Umgang mit Setzungen EN 1993-4-2 [3] Abs. 1.1 (2)	55
8.3	Kopplung von Schadensfolgeklassen und Berechnungsansätzen	55
8.4	Schadensfolgeklassen (SFK)	56
8.5	Teilsicherheitsbeiwerte	61
8.6	Ausführungsklassen	61
8.7	Fehlersammlung	62
9	Vergleich EN 1993-4-2 und EN 14015, EN 14620	62
9.1	Verweise aus EN 14015 [8] auf EN 1993-4-2 [3]	62
9.2	Verweise aus EN 1993-4-2 [3] auf EN 14015 [8]	62
9.3	Anwendungsbereiche	63
9.4	DIN EN 14620-2:2006 [9, 51] Verweise auf 1993-4-2 [3] / 1993-1-6 [4]	64
9.5	Berücksichtigung von EN 14015	64
9.6	Berücksichtigung von EN 14620	65
10	Empfehlungen an die Bauaufsicht	66
11	Zusammenfassung	68
12	Literatur	69
13	Anlage	73
13.1	Beulen des Dachs	73
13.2	Setzungen	74

1 Berichtsverlauf

Version 1:	No.: 161502	Ausgabedatum 05.08.2018
Revision 1:	No.: 161502 a	Ausgabedatum 05.12.2019

Die Revision 1 beinhaltet folgende Änderungen:

- Redaktionelle Überarbeitung der statischen Berechnungen und des Berichts. Dies hat keine Auswirkungen auf die Inhalte und Aussagen der Version 1 des Berichts.
- Aktuelle Literaturquellen wurden ergänzt.
- Berichtigung der rotationssymmetrischen Ersatzbeanspruchung der Windlast für den Umfangsbeulnachweis (statische Berechnungen Tabelle 5): Die Werte wurden von (klein $q_{eq,EK} = 0,28 \text{ kN/m}^2$; mittel $q_{eq,EK} = 0,35 \text{ kN/m}^2$; groß $q_{eq,EK} = 0,42 \text{ kN/m}^2$) auf (klein $q_{eq,EK} = 0,35 \text{ kN/m}^2$; mittel $q_{eq,EK} = 0,63 \text{ kN/m}^2$; groß $q_{eq,EK} = 0,83 \text{ kN/m}^2$) korrigiert. Dies erfolgte gleichermaßen in den Berechnungen nach DIN 4119 [1, 2] als auch nach EN 1993-4-2 [3]. Die größeren Beanspruchungen führen bei den außenstehenden Tanks zu höheren Ausnutzungsgraden im Umfangsbeul- und Interaktionsnachweis, sowie zu höheren Ankerlasten. Von einer Anpassung der Wanddicken wurde abgesehen, somit entstehen fiktive Ausnutzungsgrade $> 1,0$, die jedoch keinen Einfluss auf den Vergleich der Regelwerke und die abgeleiteten Aussagen haben. Die resultierenden Spannungen und Ausnutzungsgrade sind in den Kapiteln 6.4.2, 6.4.3 und 6.5 eingefügt und diskutiert.
- Berichtigung der Ankerlasten (statische Berechnungen Tabelle 25): Die Berechnungen erfolgt in beiden Fällen (EC und DIN) nach demselben Verfahren. Dies beeinflusst jedoch die in der Berichtsversion 1 getroffenen Aussagen nicht.
- Redaktionelle Überarbeitung der Kapitel 8.1 und 10.
- Die diesem Bericht zugrundeliegenden Vergleichsberechnungen erfolgen mit der Zielsetzung, das Sicherheitsniveau von EN 1993-4-2 [3] und deren Schwachpunkte im Vergleich zu der bislang bauaufsichtlich eingeführten DIN 4119 [1, 2] zu bewerten. Die durch die DIN EN 1993-1-6 [4] eröffneten numerischen Nachweis können im Vergleich zu gängigen, vereinfachten Bemessungsansätzen unberücksichtigte Phänomene aufzeigen. Ein Beispiel hierfür ist die Schnittgrößenermittlung für das Axialbeulen unter ungleichförmiger Winddruckverteilung. Die vorliegenden Berechnungen erfolgen in Anlehnung an [5], nach den Vorgaben aus DIN 4119-2:1961 [6] und gängiger Praxis nach Balkentheorie unter der Annahme ebenbleibender Querschnitte. Finite Element Berechnungen zeigen, dass durch Schalenverformungen, verglichen mit der Balkenlösung, lokal höhere Druckspannungen auftreten. Zudem kann der Beulwiderstand aufgrund der durch die Verformung hervorgerufenen Formabweichung reduziert werden vgl. Kap. 12 in [7]. Schadensfälle, die diese Unterschätzung als Ursache, haben sind den Autoren nicht

bekannt. Beim LS3 Interaktionsnachweis unterscheiden sich, abhängig von der Schlankheit, die Positionen der maximalen Beanspruchungen in Axial- und Umfangsrichtung.

2 Ausgangspunkt und Ziel

Im Zuge der Umstellung auf die Eurocodes wurde die lange bewährte Tankbaunorm DIN 4119 [1, 2] durch andere Normen ersetzt. Diese sind die DIN EN 1993-1-6 [4] als Grundnorm für Schalentragwerke und die EN 1993-4-2 [3] als Bemessungsnorm für Tanks. Weiterhin existieren als Anwendungsnormen für Tankbauwerke die EN 14015 [8] (nicht mandatiert) und für Tieftemperaturanwendungen die EN 14620 [9]. Darüber hinaus wurden in der Lastnorm DIN EN 1991-4 [10] für Tankbauwerke Lasten und Teilsicherheitsbeiwerte festgelegt, die von den bisherigen „alten“ Festlegungen abweichen.

Vor dem Hintergrund der bauaufsichtlichen Einführung ist derzeit unklar, welches Sicherheitsniveau bei einer Bemessung nach dem neuen Normenkontext, bestehend aus DIN EN 1991 (insbesondere Teil 4) und DIN EN 1993-4-2 [3] vorliegt. Eine Möglichkeit dies zu überprüfen, ist die Erstellung realistischer, prüffähiger Standsicherheitsnachweise auf Grundlage der jeweiligen Normen bzw. im Normenkontext. Hierbei können auch Positionen aufgedeckt werden, die in EN 1993-4-2 [3] nicht, unzureichend oder nicht praxistauglich geregelt sind. Solche Missstände wurden bereits in [11] dargestellt. Der Beitrag [11] ist jedoch in Teilen plakativ und soll bzw. kann nicht dem Anspruch genügen, eine lückenlose Bewertung von EN 1993-4-2 [3] darzustellen.

Anhand der Auswertung solcher Vergleichsberechnungen können Antworten auf folgende Fragen gefunden werden:

- Wird bei der Anwendung von DIN EN 1991 [12] und EN 1993-4-2 [3] das bisherige „alte“ Sicherheitsniveau erreicht? Sind und in welcher Weise wären Anpassungen erforderlich, z.B. durch Modifikationen in EN 1993-4-2/NA [13] Tabelle NA.1 ?
- Ist die DIN EN 1993-4-2 [3] ein gleichwertiger Ersatz für die DIN 4119 [1, 2] oder gibt es eine „Restmenge“, die durch die DIN EN 1993-4-2 [3] nicht (ausreichend) erfasst wird? Sind bei Verwendung der Eurocodes zusätzliche Regelungen erforderlich?
- Sind die DIN EN 14015 [8] und DIN EN 14620 [9] widerspruchsfrei zu den Regelungen in der DIN EN 1993-4-2 [3]? In welcher Weise sind ggfs. erforderliche Anpassungen erforderlich?
- Enthält die DIN EN 1991-4 [10] Abs. B.3 Lücken im Anwendungsbereich? Welche Regelungen wären zu treffen, um diese zu füllen?

3 Vorgehen

Zur Beurteilung des Sicherheitsniveaus der EN 1993-4-2 [3], in Verbindung mit dem zugehörigen nationalen Anhang [13] und den übergeordneten Grundnormen der Eurocodes, im Vergleich zur bestehenden DIN 4119 [1, 2] wurde das folgende Vorgehen angewandt.

Es wurden drei realitätsnahe „Untersuchungstankbauwerke“ definiert, die das Anwendungsspektrum der EN 1993-4-2 [3] so umfänglich wie möglich erfassen sollen. Details und Hintergründe zu diesen Untersuchungstankbauwerken sind in Kapitel 5 spezifiziert. Für die als „klein“, „mittel“ und „groß“ bezeichneten Bauwerke erfolgte zunächst eine statische Auslegung nach EN 1993-4-2 [3] (inkl. übergeordneter Normen). Diese beinhaltet mehrere Optimierungszyklen mit dem Ziel, wirtschaftliche und bautechnisch sinnvolle Tragstrukturen zu erhalten. Die so bestimmten Wanddicken, Anker-, Steifen- und Dacheigenschaften vervollständigen die Definition der Untersuchungstankbauwerke. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde festgestellt, dass die zu Beginn des Projekts gewählten hohen Schneelasten zu Sonderformen führen können, die nicht das gesamte Anwendungsgebiet der EN 1993-4-2 [3] umfassend abdecken. Um diesem Sachverhalt zu begegnen, wurden die Untersuchungstanks „klein“ und „mittel“ unter zwei äußeren Randbedingungen untersucht. Im Fall 1 – innen/eingehaust wird angenommen, dass der Tank im Inneren eines Gebäudes steht und ausschließlich durch Lasten aus dem Betrieb des Tanks und etwaigen Verkehrslasten auf dem Tankdach beansprucht wird. Fall 2 – außen – berücksichtigt zusätzlich die Lastfälle Schnee und Wind.

Die definierten Tankgeometrien wurden in einem zweiten Schritt gemäß DIN 4119 [1, 2] nachgewiesen. Der Vergleich der Sicherheitsniveaus erfolgte in erster Linie durch den Vergleich der Ausnutzungsgrade einzelner Bauteile. Zusätzlich wurden besonders relevante Punkte oder Varianten untersucht und kommentiert. Alle Untersuchungen hinsichtlich DIN 4119 [1, 2] beziehen sich auf die in der Anpassungsrichtlinie [14] aufgeführten Änderungen, das semiprobabilistische Sicherheitskonzept, die Einwirkungen nach der DIN 1055 [15] Normenreihe und die Stabilitätsnachweise nach DIN 18800-4 [16]. Sie repräsentieren damit den Normenstand unmittelbar vor der Umstellung auf den Eurocode (EC). Eine Kurzübersicht zu diesem Vorgehen ist in Abbildung 1 dargestellt.

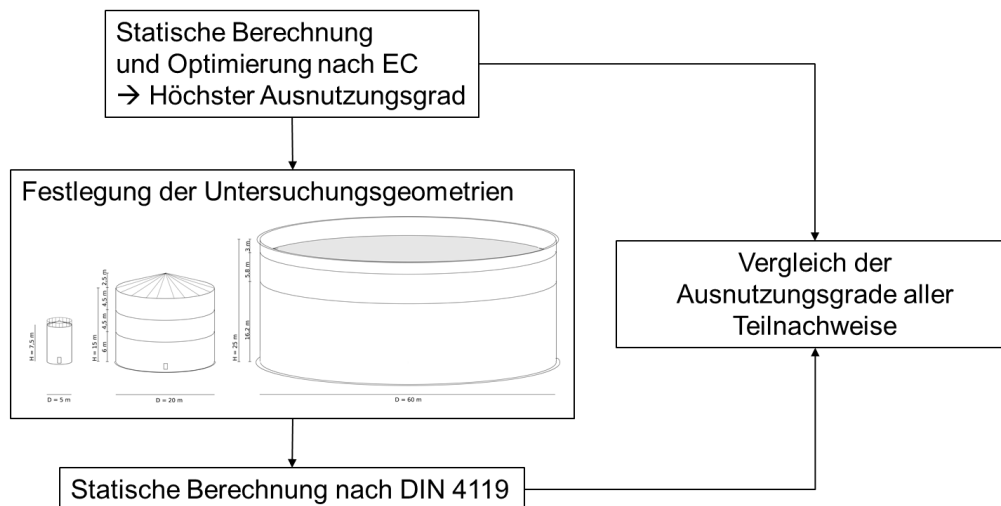


Abbildung 1: Vorgehen zur Beurteilung des Sicherheitsniveaus

Ergebnis der Arbeit ist die im „Kommentar_EN_1993-4-2.pdf“ kommentierte Version der EN 1993-4-2 [3], die als Diskussionsgrundlage für eine bauaufsichtliche Einführung dienen soll. Eine genaue Erläuterung und Aufstellung aller Dokumente ist in Kapitel 4 zusammengefasst.

4 Begleitdokumente

4.1 Standsicherheitsnachweise nach EN 1993-4-2

In den Dokumenten „EC_5x7,5_außen.pdf“ / „EC_5x7,5_innen.pdf“ / „EC_20x15_außen.pdf“ / „EC_20x15_innen.pdf“ / „EC_60x25.pdf“ sind die Standsicherheitsnachweise nach EN 1993-4-2 dargestellt. Die Zahlen im Dateinamen bezeichnen Durchmesser und Höhe des jeweiligen Tankbauwerks in Metern, sowie die zuvor beschriebenen Umgebungsbedingungen außen/innen. Hierbei handelt es sich um die Ergebnisse eines an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine entwickelten Excel-Tools, das eine einfache Optimierung erlaubt und die Möglichkeit bietet, schnell Anpassungen vorzunehmen.

4.2 Standsicherheitsnachweise nach DIN 4119

Nach dem selben Konzept, jedoch ohne Optimierung, sind in „DIN_5x7,5_außen.pdf“ / „DIN_5x7,5_innen.pdf“ / „DIN_20x15_außen.pdf“ / „DIN_20x15_innen.pdf“ / „DIN_60x25.pdf“ die zugehörigen Standsicherheitsnachweise nach DIN 4119 zu finden.

4.3 Hintergrund zu den Standsicherheitsnachweisen

Die statischen Berechnungen wurden mit Hilfe des an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine entwickelten Bemessungstools (VATANK) zur Auslegung und Optimierung von Flachbodentanks durchgeführt. Alle nicht direkt aus den Standsicherheitsnachweisen erkenntlichen Hintergrundinformationen, gewählte Berechnungsansätze und getroffene Annahmen sind in dem Hintergrunddokument „Dokumentation-VATANK.pdf“ aufgeführt.

4.4 Kommentierte Version der EN 1993-4-2

Die kommentierte Version des EN 1993-4-2 basiert auf dem Stand Dezember 2010 und den Änderungen A1 vom Oktober 2014. Sowohl redaktionelle Anpassungen als auch inhaltliche Änderungsvorschläge sowie offene Diskussionspunkte sind in die kommentierte Version eingetragen. Diese umfassen die Erkenntnisse aus den Vergleichsberechnungen und enthalten an relevanten Stellen Verweise auf diesen Abschlussbericht. Dabei werden folgende Markierungen verwendet.

Eingefügter Text

~~Gestrichener Text~~

Beibehaltener Text

Textbaustein nach EN 1993-4-2/A1:2014 ist mit [nach A1] gekennzeichnet

Bemerkungen:

Diskussionsbedarf

Hintergrundinformationen

4.5 Vorschlag für eine Anlage zur M-VVTB, basierend auf EN 1993-4-2

In diesem Dokument sind alle Kommentare aus „Kommentierte Version der EN 1993-4-2“ umgesetzt und die im Rahmen dieses Berichts diskutierten Themen als Vorschlag zur Normung eingearbeitet.

5 Untersuchungstanks

Im Rahmen der Vergleichsberechnungen wurden die Hauptabmessungen sowie weitere Spezifika von drei Untersuchungstanks definiert.

Tabelle 1: Auflistung der Untersuchungstanks

	D [M]	H [M]	WERKSTOFF	DACHART
„KLEIN“	5	7,5	S235	Kegeldach
„MITTEL“	20	15	S355	Sparrendach
„GROß“	60	25	S460	Schwimmdach

Folgende Randbedingungen für den Startort und die Füllung wurden festgelegt.

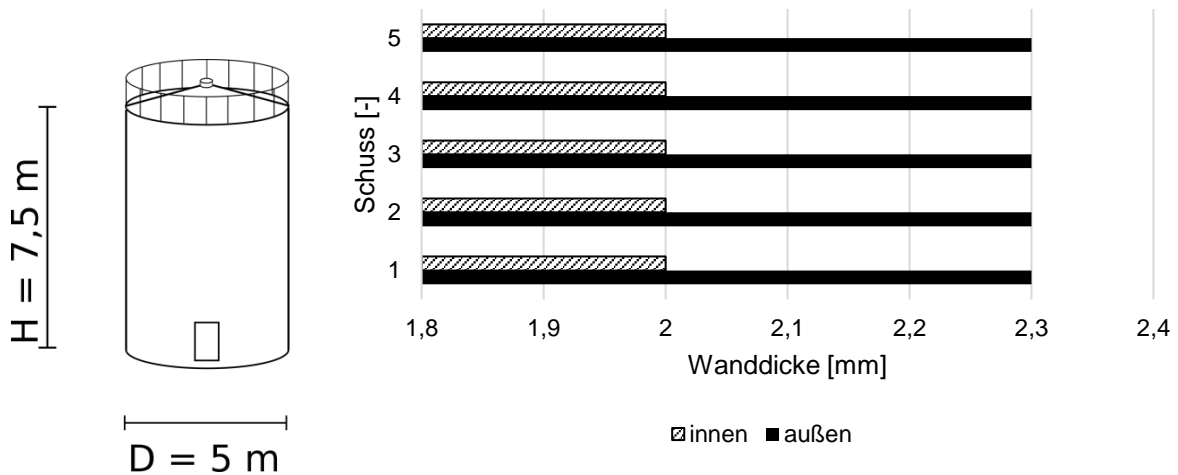
Füllung: Wasser

Schnee: 800 m + NN Schneelastzone 3

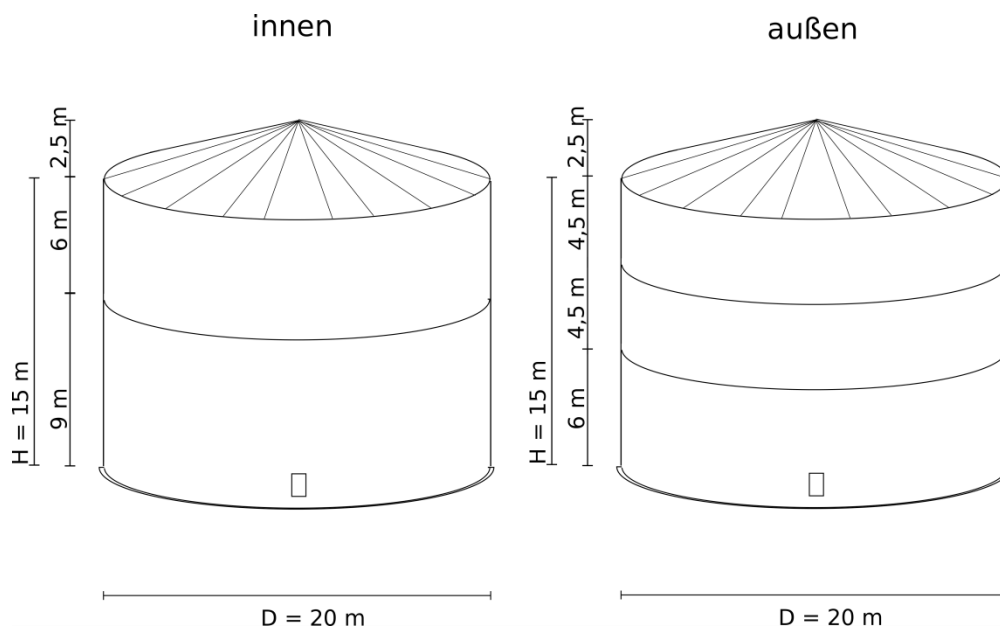
Wind: 800 m + NN Windzone 2 Geländekategorie 3

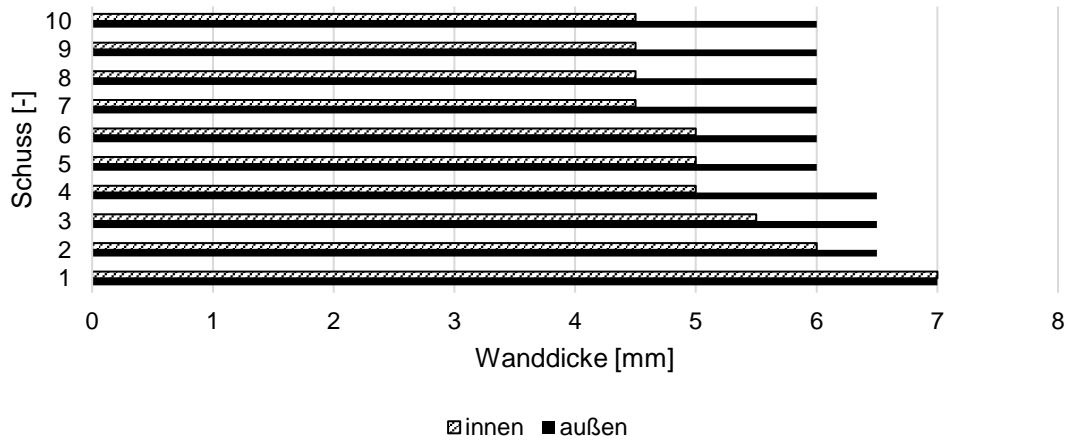
Gemäß den Ausführungen in Kapitel 3 erfolgt die Untersuchung für die Untersuchungsgeometrie „klein“ und „mittel“ zusätzlich für die Fälle „innen“ / „eingehaust“. Hierbei wird die Einwirkung aus Wind und Schnee zu „Null“ gesetzt. Nachfolgend sind die schussweisen Wanddicken und Steifenanordnungen aufgeführt.

5.1 Klein

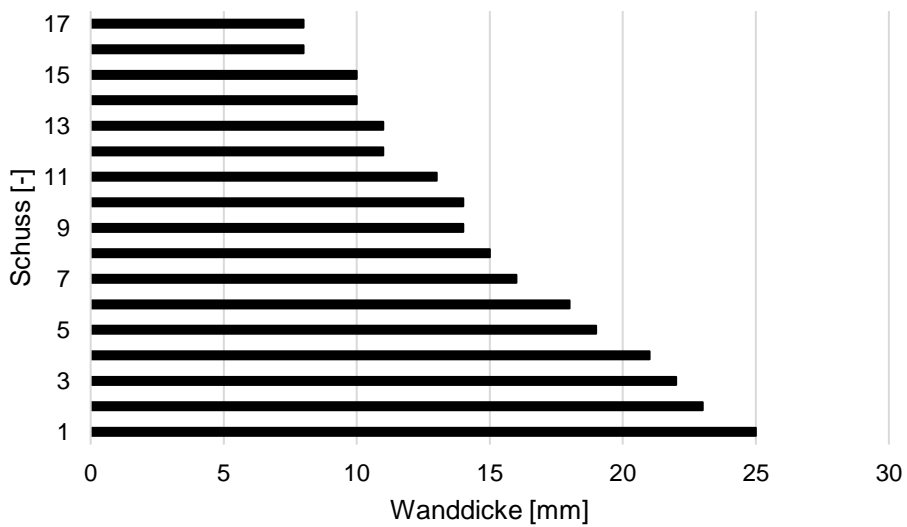
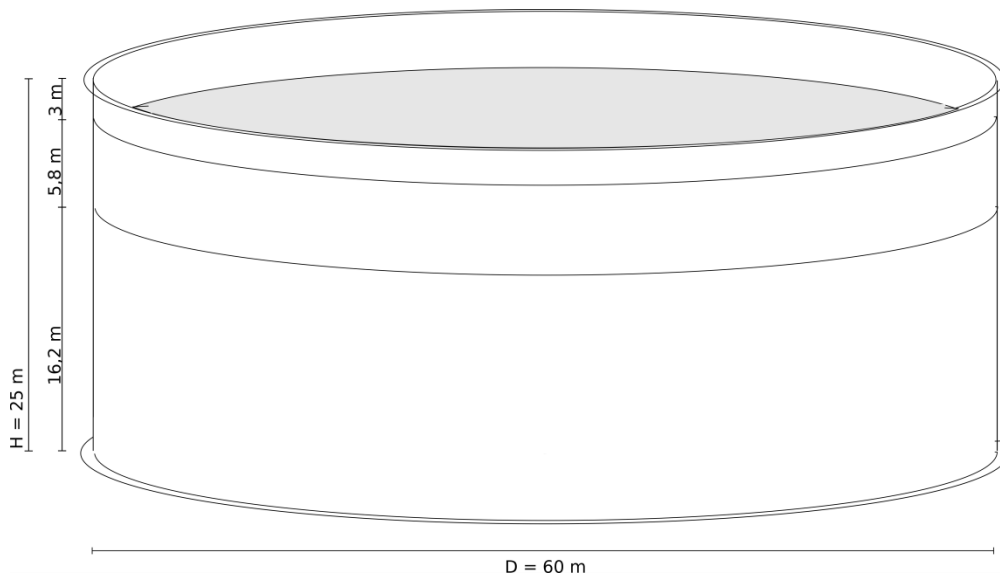


5.2 Mittel





5.3 Groß



6 Vergleich EN 1993-4-2 mit DIN 4119

6.1 Anwendungsbereich

Die ursprüngliche Fassung der DIN 4119 [2] von 1979 beinhaltet sowohl Stahl- als auch Aluminiumtanks. Die Änderungen in der Anpassungsrichtlinie [14] von 2002 beschränken sich laut Abschnitt 4.5 unter Punkt 1 „Die Festlegungen dieser Anpassungsrichtlinie gelten nur für Bauwerke aus Stahl“ auf den Werkstoff Stahl. EN 1993-4-2 [3] beschränkt sich ebenfalls auf stählerne Tragwerke. In Tabelle 2 ist eine ausführliche Auflistung der Unterschiede in den Anwendungsbereichen der einzelnen Normen dargestellt.

Tabelle 2: Vergleich der Anwendungsgrenzen

Eigenschaften	EN 1993-4-2	DIN 4119	EN 1993-4-2/A1	EN 1993-4-2/NA
oberirdisch	x	x		Keine Einschränkungen
zylindrisch	x (Tragwerk muss rotationssymm. sein, Einwirkungen und Auflagerung nicht)	x		
konisch			x	
lotrechtstehend				
aus Stahl	x			
von Flüssigkeiten	x	x		
voll aufliegender Boden		x		
gekühlte Gase in flüssigem Zustand bei atmosphärischem Druck		x		
bei geringen Über- oder Unterdrücken	-100 mbar bis 500 mbar	x	-100 mbar bis 500 mbar	
Temperatur	-50 °C bis 300 °C		abhängig von der Stahlsorte	
Temperatur bei dauerschwingbeanspruchten Tanks	max. 150 °C			
>100 m³			x	
Fertigung vor Ort			x	
Werksfertigung (mit konischen Böden, auf Standzargen oder Stützen stehend)			x	

6.2 Einwirkungen

6.2.1 Sonstige Einwirkungen

Angaben des Betreibers: Hier stellt sich die Frage, wie die durch den Betreiber vorgegebenen Beanspruchungen in Einklang mit dem Sicherheitskonzept nach EC 0 gebracht werden können (Stichpunkte: Berücksichtigung einer Auftretenswahrscheinlichkeit / Absicherung und Einordnung dieser Angaben).

In EN 1991-4 [10] wären rechnerische Mindestwerte für anzusetzende Unter- und Überdrücke in Abhängigkeit des Lagermediums nützlich, z.B. mit der Anmerkung: „sofern der Betreiber nicht kleinere Werte nachweislich sicherstellen kann“.

6.2.2 Schneelasten auf Tankdächern

Die Ermittlung der Schneelasten unterscheidet sich nicht zwischen den verglichenen Normen. Die Kommentare, warum eine ungleichmäßige Beanspruchung bei Sparrendächern nicht bemessungsrelevant wird, sind in [17] Abschnitt 11 aufgeführt. Zudem wird in [17] auf die Berechnungsverfahren nach EN 1993-4-1 [18] eingegangen. Demnach enthalten die Bemessungsansätze eine ungleichmäßige Verteilung. Eine Anmerkung hierzu könnte in EN1993-4-2 [3] sinnvoll aufgenommen werden.

6.2.3 Verkehrslasten auf Tankdächern

Die in EN 1993-4-2 [3] enthaltenen Sonderregeln zu Einwirkungen auf Tankbauwerke (Anhang A) verweisen auf die allgemeinen Regeln nach EN 1991-1-1 [12] und berücksichtigen die Sonderstellung der Dächer von Tankbauwerken als Arbeitsplatz nur ungenügend.

Nach EN 1991-1-1 [12] ist keine eindeutige Zuweisung der Tankdächer in die bestehenden Dachkategorien möglich und sinnvoll.

Kategorie H: „Nicht zugängliche Dächer, außer für übliche Unterhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen“ entspricht nicht der Beschreibung von Tankdächern, die üblicherweise einen Arbeitsplatz darstellen. Hierbei sind Lasten $q_k = 0,4 \text{ kN/m}^2$ und $Q_k = 1,0 \text{ kN}$ angegeben.

Kategorie I: „Zugängliche Dächer mit Nutzung nach Nutzungskategorie A bis G“.

Hiernach ist eine Zuordnung zu Flächen mit industrieller Nutzung (Kategorie E) möglich, diese enthält jedoch entweder Lasten für Gabelstaplerverkehr (E1) oder keine Angaben (E2). Hierbei leiten sich die Lasten aus den Lagergütern ab. Die Kategorien A-D gehen von Personenansammlungen aus und sind damit ebenfalls nicht anwendbar.

Kategorie K: „Zugängliche Dächer mit besonderer Nutzung, z.B. Hubschrauberlandeplätze“. Hier sind lediglich zusätzliche Lasten für den Hubschrauberbetrieb angegeben.

EN 1991-4 [10] enthält keine Angaben zu Verkehrslasten.

DIN 4119 [1]: Hier wird in Abs. 4.1.2.4 in drei Kategorien unterteilt. Flächenlasten werden dabei nicht berücksichtigt.

- | | |
|---|----------|
| a) „Stäbe und Gespärre, die die Dachhaut stützen“: | P = 1 kN |
| b) „Laufstege und Rolllaternen“: | P = 3 kN |
| Hierbei gelten Sonderregelungen für die Lastpositionen abhängig von der Treppenkonstruktion | |
| c) „Podeste“: | P = 3 kN |

ISO 14122 [19, 20]: Mindestlasten für Laufstege und Arbeitsbühnen:

$q = 2 \text{ kN/m}^2$ und $Q = 1,5 \text{ kN}$. Zudem werden in Abschnitt 4.2.5 weitere Punkte aufgeführt, die bei der Festlegung der Einwirkungen berücksichtigt werden müssen, sodass es sich bei den genannten Werten nur um Mindestlasten handelt.

Fazit:

Es erscheint sinnvoll, die in ISO 14122-2 [20] aufgeführten Anforderungen auf die Dächer von Tankbauwerken zu übertragen. Alternativ sollte Kategorie H nach EN 1991-1-1 [12] für nicht zugängliche Dächer angewendet werden. Die so gewählten Lasten liegen unter den Lastansätzen nach DIN 4119 [1], entsprechen jedoch dem aktuellen Lastverständnis besser.

6.2.4 Lasten aus Schiefstellung

DIN 4119 [1]: Abs.: 4.1.2.1.3 „Der Einfluss des Lagergutes bei einer Schiefstellung des Tanks auf seine Standsicherheit ist durch eine Mindestneigung von 10 ‰ in der Berechnung zu berücksichtigen“. Erläuterungen hierzu sind in [5] S. 25 gegeben. Für die betrachteten Untersuchungsgeometrien (gedrungene Zylinder) führt dies zu keiner relevanten Steigerung der Axial- oder Umfangsspannungen. Dies wurde durch eine zusätzliche numerische Parameterstudie (hier nicht dokumentiert) abgesichert.

EN 1993-4-2 [3]: Hier werden keine Angaben zu einer Schiefstellung gegeben.

6.2.5 Windeinwirkung auf Zylinder

Die Bestimmung der Winddrücke und resultierenden Kräfte auf den Tankmantel nach DIN 1055-4 [21] und EN 1991-1-4 [22] ist konsistent und führt zu keinen unterschiedlichen Einwirkungsgrößen. Dies gilt auch für den Innendruck aus Leersaugen.

Dennoch sind einige Ungereimtheiten aufgefallen. Diese werden im Weiteren erläutert.

a) Anwendbarkeit der Formeln auf Tankbauwerke:

Nach EN 1991-1-4 [22] Bild 7.36 muss ein Schlankheitsgrad der Konstruktion bestimmt werden. Der angegebene Grenzwert entspricht $h/d = 1,0$. Damit sind die häufig auftretenden, gedrunenen Tankbauwerke nicht erfasst.

Die Regelung nach der unter EN 1991-1-4 Abschnitt 7.13 aufgeführten Anmerkungen basiert auf Messungen in schwach turbulenten Bedingungen. Inwieweit sich diese Messungen auf reale Strömungsbedingungen übertragen lassen, ist zu klären. Zudem gilt die Grundannahme, dass die Überströmung an den Tankenden zu geringeren Strömungswiderständen führt und resultiert zudem aus der Betrachtung geschlossener Zylinder. Es ist zu klären, ob es sich um ein offenes Tankbauwerk oder einen Tank im Bauzustand handelt. Führt der in das offene Bauwerk einfallende Wind zu einer Zunahme der Gesamtbeanspruchung?

b) Definition kleiner Öffnungen für den Innendruckbeiwert aus Leersaugen:

Der Einfluss des Leersaugens bei einem Tank mit Öffnungen wird durch die Innendruckbeiwerte 0,4 und 0,6 berücksichtigt. Dabei ist der Wert 0,4 bei „kleinen Öffnungen“ anzuwenden. Jedoch fehlt jeglicher Anhaltswert, wann diese Bedingungen vorliegen. Beispielsweise wäre hier die Angabe eines Flächenverhältnisses sinnvoll.

c) Leersaugen alternativer Ansatz:

Ein Ansatz, der das Leersaugen genauer betrachtet und abhängig vom Flüssigkeitsspiegel, also dem vorhandenen Luftvolumen und den Windgeschwindigkeiten, Innendrucke ableitet, wird in [17] diskutiert.

d) Oberflächenrauigkeit:

Eine Diskussion zur Einordnung der Oberflächenrauigkeit realer Bauwerke und eine Einordnung in unterschiedliche Normen ist in [17] enthalten.

e) Bauteile:

[DIN EN 1991-1-4 Abs. 7.1.3] Der Abminderungsfaktor ψ wird nur für eine Schlankheit > 1 angegeben und bezieht sich auf Bauteile und nicht auf Bauwerke. Ein Großteil der Tanks weist eine geringere Schlankheit auf. Inwieweit eine Erweiterung zu wirtschaftlicheren Bauwerken führt oder ob bei offenen Tankbauwerken ein Einfallen der Strömung in den Tank (Druck auf die Rückwand) zu höheren Beanspruchungen führt, und damit für die Anwendung bei Tanks geeignet ist, ist nicht geklärt.

f) Differenzen zwischen EN 1993-1-6 [4] und EN 1993-4-2 [3] bei Umrechnung auf konstanten Umfangsdruck:

Für einen vereinfachten spannungsbasierten Nachweis gegen Umfangsbeulen erlauben beide Normen eine Reduktion des Spitzendrucks in Abhängigkeit von der Beulhalbwellenlänge. Eine detaillierte Erläuterung ist in [23] aufgeführt.

Ein Vergleich beider Verfahren ist in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellt.

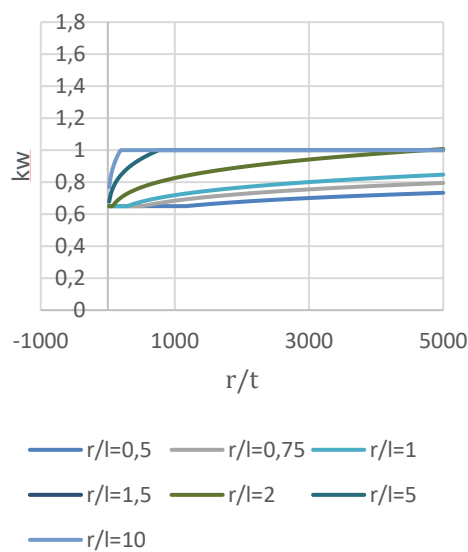


Abbildung 2: Abminderung des maximalen Winddrucks für konstante Verteilung EN 1993-1-6

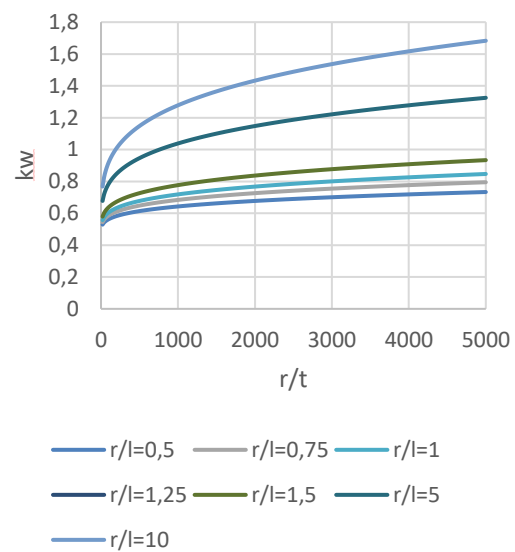


Abbildung 3: Abminderung des maximalen Winddrucks für konstante Verteilung EN 1993-4-2

Es zeigt sich, dass in EN 1993-4-2 ein Grenzwertkriterium vergessen wurde. Dünnwandige Tanks werden hiernach mit einem Außendruck beaufschlagt, der größer ist als der Maximalwert der ungleichförmigen Winddruckverteilung. Dies widerspricht den Grundlagen dieser Abminderung nach [23]. Der Ansatz in DIN 18800-4 [16] entspricht dem Verfahren nach DIN 1993-1-6 [4].

6.2.6 Innendrucke auf den Mantel bei offenen Tanks

Sowohl DIN 4119 [1] als auch EN 1993-4-2 [3] berücksichtigen einen aus dem Leersaugen eines Tanks resultierenden Unterdruck pauschal durch den Faktor $c_{pi} = 0,6$. Messungen von Eßlinger [24] sind auszugsweise in Abbildung 4 und Abbildung 5 wiedergegeben. Diese zeigen, dass abhängig von den geometrischen Bedingungen lokal deutlich höhere Unterdrücke $c_{pi} = 0,5$ bis $0,9$ auftreten. Trotz des lokalen Charakters müssen diese analog zu dem vereinfachten Ansatz des Außendrucks (vgl. Kapitel 6.2.4 f) behandelt werden. Die AS/NZS 1170.2 [25] wird diesem Sachverhalt gerecht und gibt in Abschnitt C5.2.3 einen Zusammenhang zwischen Innendruckbeiwert und H/D-Verhältnis des offenen Zylinders an. Eine Auswertung dieser Daten ist in Abbildung 6 dargestellt und zeigt eine deutlich bessere Übereinstimmungen mit den Messdaten.

Tabelle 2. Dimensionslose Differenzdrücke Δc_p am langen Zylinder ohne Dach.
 Differenzdruck: $\Delta p = \Delta c_p \cdot q$; q = Staudruck

	Punkt auf der Höhe											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	+1,565	+1,846	+1,916	+1,951	+1,941	+1,956	+1,922	+1,917	+1,922	+1,917	+1,872	+1,806
2	+1,530	+1,790	+1,835	+1,850	+1,830	+1,835	+1,835	+1,815	+1,775	+1,805	+1,760	+1,720

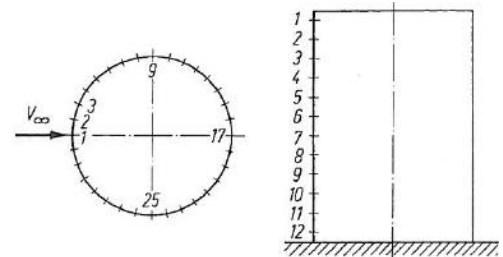


Abbildung 4: Dimensionsloser Differenzdruck am langen Behälter ($H/D = 1,4$) ohne Dach aus [24]

Tabelle 1. Dimensionslose Differenzdrücke Δc_p am kurzen Behälter Dach.
 Differenzdruck: $\Delta p = \Delta c_p \cdot q$; q = Staudruck

	Punkt auf der Höhe					
	1	2	3	4	5	6
1	+1,477	+1,762	+1,827	+1,837	+1,812	+1,7
2	+1,391	+1,556	+1,701	+1,716	+1,676	+1,5

Abbildung 5: Dimensionsloser Differenzdruck am kurzen Behälter ($H/D = 0,74$) ohne Dach aus [24]

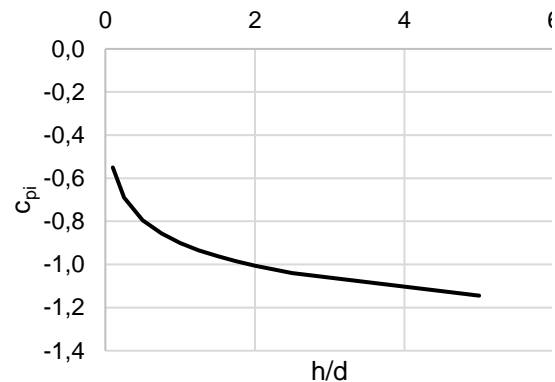


Abbildung 6: Darstellung der Innendruckbeiwerte in Abhängigkeit von den geometrischen Randbedingungen aus [25]

6.2.7 Windeinwirkung auf Dächer

Weder in EN 1991-1-4 [22], EN 1991-4 [10] noch in EN 1991-4-2 [3] werden Angaben zu Einwirkungen auf Kegeldächer gegeben. Einzig in EN 1991-1-4 [22] Abs. 7.2.8 sind Außendruckbeiwerte für Kuppeln mit kreisrunder Basis angegeben.

Alternative Ansätze, die den konkreten Anforderungen eines Kegeldachs gerecht werden, sind z.B. in der australischen und neuseeländischen Norm AS/NSZ 1170.2 [25] gegeben. Der Artikel [26] von Ruckenbrod und Kaldenhoff verweist auf Messergebnisse an einer konkreten Dachgeometrie. Die Anwendung des Verfahrens in [25] auf die in [26] verwiesene Geometrie führt zu Sogbeiwerten von -0,6 bis -0,65 und stimmt sehr gut mit den Messwerten überein.

Ein Vergleich der Außendruckbeiwerte und Windlasten nach den aufgeführten Normen ist in Abbildung 7 und Tabelle 3 zusammengestellt.

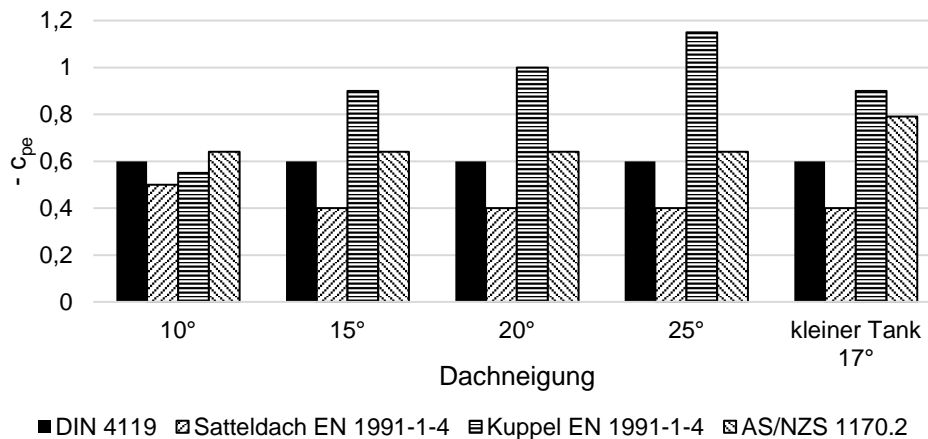


Abbildung 7: Vergleich der Außendruckbeiwerte auf Dächer bei unterschiedlicher Dachneigung und Norm für Tankgeometrie "mittel" und "klein"

Tabelle 3: Übersicht der Außendruckbeiwerte und Winddrücke auf Dächer

	DIN EN 1991-1-4				DIN 4119		AS/NZS 1170.2	
	Satteldach ^a		Kuppeldach ^b mittlerer Tank		Sattel- & Kuppel- dach ^c		Satteldach ^d	
Dachneigung	$c_{pe,10}$ [-]	w [KN/m ²]	$c_{pe,10}$ [-]	w [KN/m ²]	c_{pe} [-]	w [KN/m ²]	c_{pe} [-]	w [KN/m ²]
10°	-0,5	-0,35	-0,55	-0,44	-0,6	-0,43	-0,64	-0,45
15°	-0,4	-0,28	-0,9	-0,72	-0,6	-0,43	-0,64	-0,45
20°	-0,4	-0,28	-1	-0,8	-0,6	-0,43	-0,64	-0,45
25°	-0,4	-0,28	-1,15	-0,92	-0,6	-0,43	-0,64	-0,45
kleiner Tank								
Dachneigung	$c_{pe,10}$ [-]	w [KN/m ²]	$c_{pe,10}$ [-]	w [KN/m ²]	c_{pe} [-]	w [KN/m ²]	c_{pe} [-]	w [KN/m ²]
17°	-0,4	-0,23	-0,9	-0,89	-0,6	-0,35	-0,79	-0,46

Anhand dieses Vergleichs wird ersichtlich, dass die Anwendung der Winddruckbeiwerte nach EN 1991-1-4 [22] (Satteldach) zu einer Reduktion der Winddrücke um 16 - 33 % (im Bereich der untersuchten Geometrien) im Vergleich zu der DIN 4119 [1] führt. Alternativ das Kegeldach mit den Außendruckbeiwerten für Kuppeldächer (EN 1991-1-4 [22]) zu beaufschlagen, führt hingegen zu deutlich überkonservativen Ergebnissen, die auch stark von den in [26] vorgestellten Ergebnissen abweichen. Das Verfahren nach AS/NSZ 1170.2 [25] führt bei der mittleren Tankgröße zu ca. 7 % höheren Einwirkungen, verglichen mit der DIN 4119 [1]. Die Einwirkungen bei der kleinen Tankgeometrie weisen eine deutlich höhere Abweichung von 32 % zwischen den beiden Normen auf, dabei liefert die AS/NSZ 1170.2 [25] stets die höheren Beanspruchungen. Außer den Ausführungen in [26] sind keine weitergehenden Untersuchungen bekannt, die eine qualitative Bewertung der Verfahren zulassen.

Lastangriffspunkt:

Keine Norm der Eurocodereihe macht Angaben zu der Größe der Ausmitte des Dachsofs. Für den Anwender sinnvolle Regeln sind aus DIN 4119 [1] Bild 2 zu übernehmen.

6.3 Bemessung des Mantels – LS 1

Die Bemessung nach LS 1 erfolgte gemäß den Ausführungen in der „Dokumentation-VAT-ANK.pdf“. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Abbildung 8 bis Abbildung 12 dargestellt. Hier werden die Ausnutzungsgrade nach DIN 4119 [1] und EN 1993-4-2 [3] schussweise verglichen. In allen Fällen führt die Bemessung nach EC zu höheren oder identischen Ausnutzungsgraden und folglich höheren rechnerischen Sicherheiten. Dies setzt die Anwendung der Teilsicherheitsbeiwerte nach EN 1993-4-2/NA [13] voraus und gilt für den Nachweis nach EN 1993-1-6 [4] – spannungsbasiert. Anmerkungen zu dem vereinfachten Verfahren nach EN 1993-4-2 [3] Abschnitt 11 sind in Kapitel 7.2 gegeben. Die Gründe für die höheren Ausnutzungsgrade sind:

- a) die zusätzliche Berücksichtigung der Axialspannungen. Dieser Einfluss wird bei einer Gegenüberstellung der einghausten und der nicht einghausten Variante besonders deutlich;
- b) der höhere Teilsicherheitsbeiwert für den Überdruck nach EN 1993-4-2 [3, 13]. Nach DIN 4119 [1] kann dieser als eine „kontrollierte Einwirkung“ mit $\gamma_m = 1,35$ erhöht werden. Eine ähnliche Regelung ist in EN 1993-4-2 [3, 13] nicht gegeben. Damit wird der Überdruck mit $\gamma_m = 1,5$ als „Sonstige Einwirkung“ beaufschlagt;
- c) die Berücksichtigung des Einflusses der Biegestörung auf die Membranschnittgrößen. Dies zeigt sich in der größeren Abweichung der Ausnutzungsgrade im untersten Schuss.

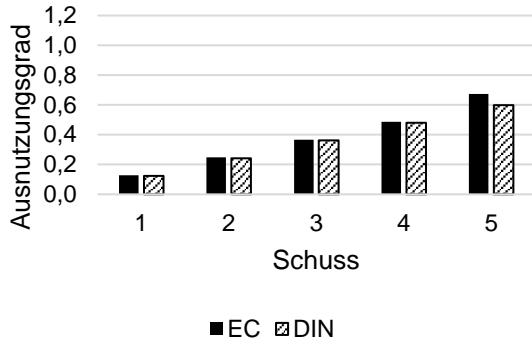


Abbildung 8: Vergleich Ausnutzungsgrad LS 1 DIN 4119 und EN 1993-4-2 - klein - innen

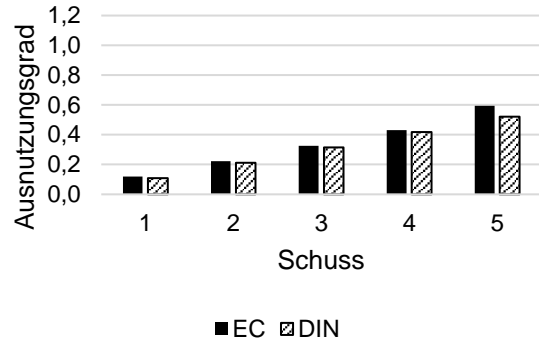


Abbildung 9: Vergleich Ausnutzungsgrad LS 1 DIN 4119 und EN 1993-4-2 - klein - außen

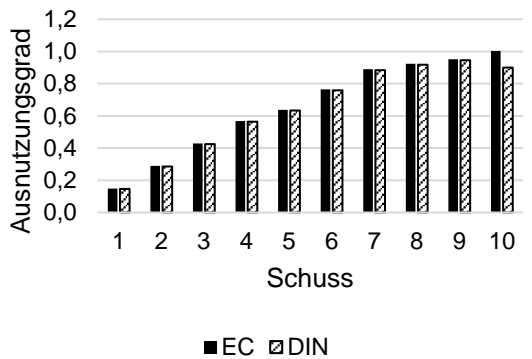


Abbildung 10: Vergleich Ausnutzungsgrad LS 1 DIN 4119 und EN 1993-4-2 - mittel - innen

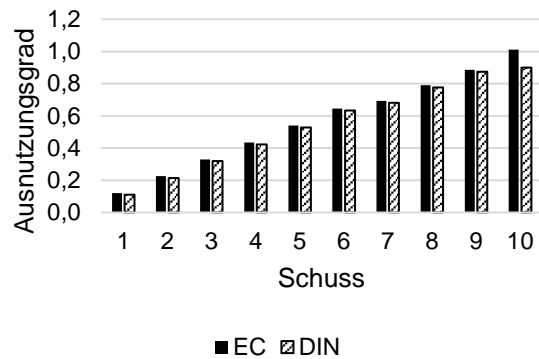


Abbildung 11: Vergleich Ausnutzungsgrad LS 1 DIN 4119 und EN 1993-4-2 - mittel - außen

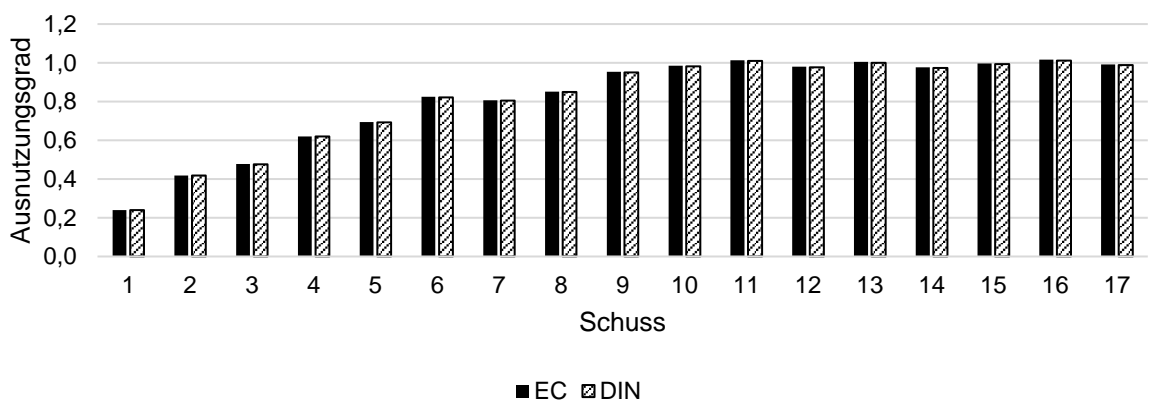


Abbildung 12: Vergleich Ausnutzungsgrad LS 1 DIN 4119 und EN 1993-4-2 - groß

6.3.1 Schweißnähte nach EC und nach DIN

DIN 18800-1 [27] bot die Möglichkeit, eine zerstörungsfreie Prüfung der Schweißnähte durch den Ansatz eines Abminderungsfaktors auf der Widerstandsseite zu umgehen. Dies trug besonders bei konstruktiven Nähten und solchen mit geringer Ausnutzung zu einer Steigerung der Gesamtwirtschaftlichkeit der Strukturen bei. Dies ist nach EN 1090 [28] nicht mehr zulässig. Weitere Unterschiede treten bei den stumpfgestoßenen Mantelblechen nicht auf.

6.4 Bemessung des Mantels – LS 3

6.4.1 Axialbeulen

Ein Vergleich der schussweisen Ausnutzungsgrade zwischen DIN 4119 [1] bzw. DIN 18800-4 [16] und EN 1993-4-2 [3] bzw. EN 1993-1-6 [4] ist in Abbildung 13 bis Abbildung 17 zusammengefasst. An allen Nachweisstellen liegen die nach EC berechneten Ausnutzungsgrade 15-90 % über denen nach DIN 4119 [1]. Eine genauere Betrachtung der in Tabelle 4 dargestellten Untersuchungstanks führt zu den Auswertungen in Abbildung 18 und Abbildung 19. Hier wird die einwirkende Axialspannung auf die einwirkende Axialspannung des äquivalenten Teilzylinders nach DIN 18800-4 mit $\sigma_{x,Ed} / \sigma_{x,Ed,DIN}$ bezogen. Analog wurde in Abbildung 19 mit den Bemessungswiderständen verfahren. Es ist zu erkennen, dass die Einwirkungen nach EN 1993-4-2 [3] etwa 3 % bis 25 % höher ausfallen. Gleichzeitig liegen die Bemessungswiderstände nach EN1993-4-2 [3] bei 60 % bis 95 % der Vergleichswerte nach DIN 18800-4 [16]. Die höheren Axiallasten schalgen vor allem bei den eingehausten Tanks zu Buche und sind auf die Teilsicherheitsbeiwerte bei innerem Unterdruck (DIN $\gamma_M = 1,35$ / EC $\gamma_M = 1,5$) zurückzuführen. In Tabelle 5 sind die Hintergründe beider Verfahren gegenübergestellt sowie die Abweichungen dargestellt und kommentiert. Damit werden die in Abbildung 19 zu beobachtenden Abweichungen belegt.

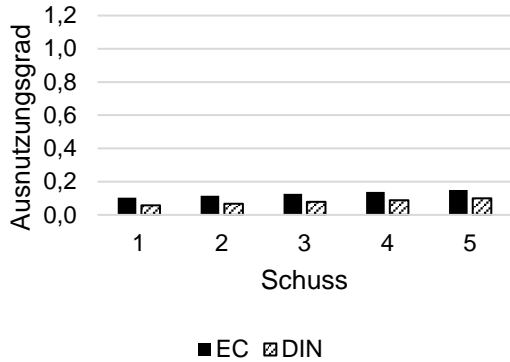


Abbildung 13: Vergleich Ausnutzungsgrad LS 3 Axialbeulen DIN 4119 und EN 1993-4-2 - klein - innen

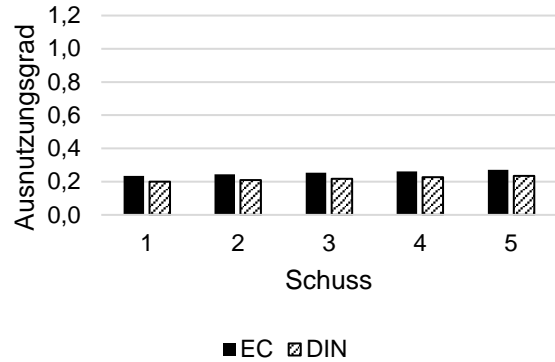


Abbildung 14: Vergleich Ausnutzungsgrad LS 3 Axialbeulen DIN 4119 und EN 1993-4-2 - klein - außen

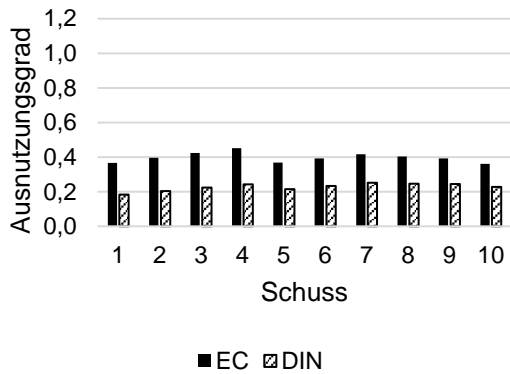


Abbildung 15: Vergleich Ausnutzungsgrad LS 3 Axialbeulen DIN 4119 und EN 1993-4-2 - mittel - innen

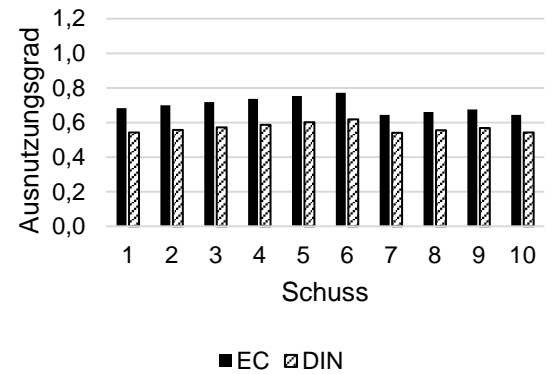


Abbildung 16: Vergleich Ausnutzungsgrad LS 3 Axialbeulen DIN 4119 und EN 1993-4-2 - mittel - außen

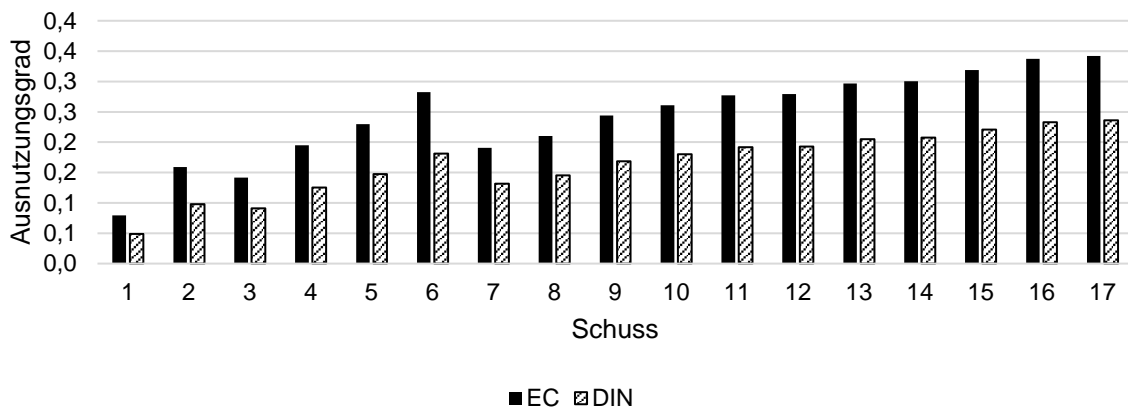


Abbildung 17: Vergleich Ausnutzungsgrad LS 3 Axialbeulen DIN 4119 und EN 1993-4-2 - groß

Tabelle 4: Übersicht der Teilzylinder

Teilzylinder	Tank	Teilzylinder	Durchmesser [m]	Höhe [m]	r/t	λ
1	klein - innen		5	7,5	1389	1,60
2	klein - außen		5	7,5	1191	1,48
3	mittel - außen	TZ 1/2	20	4,5	1667	2,16
4		TZ 3	20	6	1539	2,07
5	mittel - innen	TZ 1	20	6	2222	2,49
6		TZ 2	20	9	2000	2,36
7		TZ 1	60	2,9	3750	3,68
8	groß	TZ 2	60	5,9	3000	3,29
9		TZ 3	60	13,2	2307	2,89

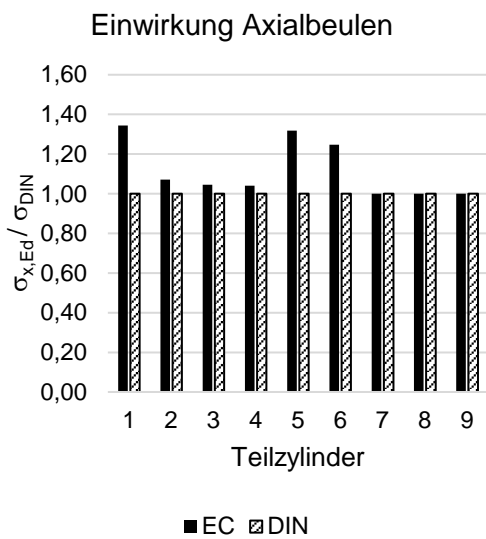


Abbildung 18: Vergleich der bezogenen einwirkenden Bemessungsaxialspannungen

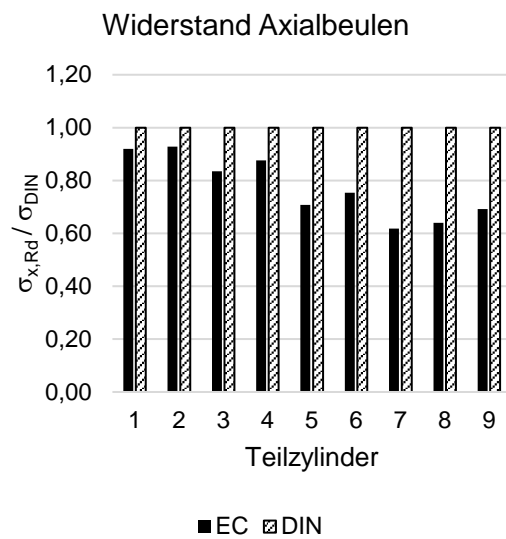


Abbildung 19: Vergleich der bezogenen Bemessungswiderstände gegen Axialbeulen

Tabelle 5: Vergleich der Bemessungswiderstände gegen Axialbeulen

EN 1993-1-6			DIN 18800-4	
Kein Nachweis gegen Axialbeulen erforderlich wenn:				
$\frac{r}{t} \leq 0,03 \frac{E}{f_{yk}}$			$\frac{r}{t} \leq \frac{E}{25 f_{y,k}}$	
Bemerkung: Der Grenzwert nach EN 1993-1-6, ab dem ein Nachweis geführt werden muss, liegt 25 % unter demjenigen nach DIN 18800-4.				
Ideelle Beulspannung:				
$\sigma_{x,Rd} = 0,605 E C_x \frac{t}{r}$			$\sigma_{x,Rd} = 0,605 C_x \cdot E \frac{t}{r}$	
kurz	mittellang	lang	Kurz / mittel	lang

$\omega \leq 1,7$ darf der Faktor C_x wie folgt $C_x = 1,36 - \frac{1,83}{\omega} + \frac{2,07}{\omega^2}$	$1,7 \leq \omega \leq 0,5 \frac{l}{r}$ sollte der Faktor C_x wie folgt $C_x = 1,0$	$\omega > 0,5 \frac{l}{r}$ sollte der Faktor C_x wie folgt $C_x = C_{xN}$ wobei C_{xN} der größere der folgenden beiden Werte ist $C_{xN1} = 1 + \frac{0,2}{C_{\text{cb}}} \left[1 - 2\omega \frac{l}{r} \right]$ und $C_{xN2} = 0,60$
$\frac{l}{r} \leq 0,5 \sqrt{\frac{r}{t}}$		
$C_x = 1 + 1,5 \left(\frac{r}{l} \right)^2 \frac{t}{r}$		
Für lange Kreiszyylinder nach Bedingung (29) ist der Beiwert C_η nach Tabelle 1 mit Gleichung (30a) zu bestimmen. $l/r > 0,5 (rt)^{0,5}$ $C_{xN} = 1 - [0,4(l/r)(rt)^{0,5} - 0,2]/\eta$ jedoch $C_{xN} \geq 0,6$. $C_x = C_{xN} (\sigma_{xN}/\sigma_x) + (\sigma_{xM}/\sigma_x)$ wenn $rt \leq 150$ und $(l/r) \leq 6$ erfüllt ist. Andernfalls gilt $C_x = C_{xN}$		

Bemerkung: Bei den untersuchten Teilzylindern handelte es sich in allen Fällen um mittellange Zylinder. Die Auswertung von C_x ergab in allen Fällen = 1,0. Damit entsprechen sich die ideellen Beulspannungen und Schlankheiten.

Beulspannung am imperfekten und materiell nichtlinearen Zylinder:

$\sigma_{x,Rk} = \chi_x \cdot f_{yk}$	$\sigma_{xS,R,k} = \kappa_2 \cdot f_{y,k}$
$\bar{\lambda}_x = \sqrt{f_{yk} / \sigma_{x,Rcr}}$	$\bar{\lambda}_{Sx} = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{xSi}}}$
$\chi = 1 - \beta \left(\frac{\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^\eta$ <p>wenn $\bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda} < \bar{\lambda}_p$</p> $\chi = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}^2}$ <p>wenn $\bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda}$</p> $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \beta}}$ <p>$\bar{\lambda}_{s0} = 0,20$ $\beta = 0,60$ $\eta = 1,0$</p> <p>(4) Bei langen Zylindern, die die besonderen Bedingungen von D.1.2 Grenzschlankheitsgrad $\bar{\lambda}_{s0}$ auch wie folgt ermittelt werden:</p> $\bar{\lambda}_{s0} = 0,20 + 0,10 \left(\frac{\sigma_{xEM}}{\sigma_{xE}} \right)$	<p>$\bar{\lambda}_s \leq 0,25$: $\kappa_2 = 1$</p> <p>$0,25 < \bar{\lambda}_s \leq 10$: $\kappa_2 = 1,233 - 0,933 \bar{\lambda}_s$</p> <p>$10 < \bar{\lambda}_s \leq 15$: $\kappa_2 = 0,3 / \bar{\lambda}_s^3$</p> <p>$1,5 < \lambda \leq 64 (f_y/E)^{0,5}$: $\kappa_2 = 0,2/\lambda^2$</p> <p>$2\,500 < rt \leq 5\,000$: $\kappa_2 = 0,82 / [1 + (rt)^{0,72}/91] \bar{\lambda}^2$</p> <div style="text-align: center;"> </div> <p style="text-align: center;">— ohne - - - mit</p>
<p>Abbildung 20: Auswirkung der Zusatzbedingung für sehr dünnwandige Schalen auf den Abminderungsfaktor κ_2</p> <p>Abbildung 20 zeigt, dass die Zusatzbedingung für sehr dünnwandige Tanks zu einer weiteren Reduktion des Widerstandes führt.</p>	

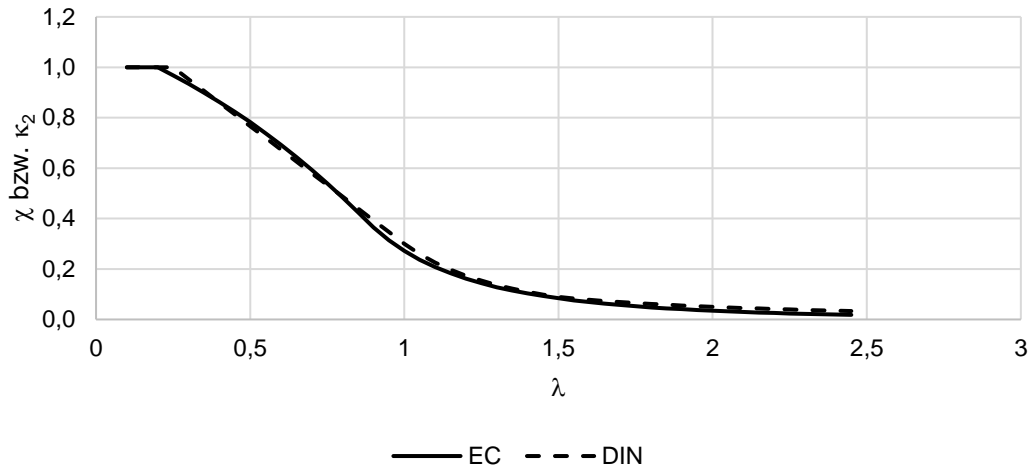


Abbildung 21: Vergleich der Kapazitätskurven - Axialbeulen

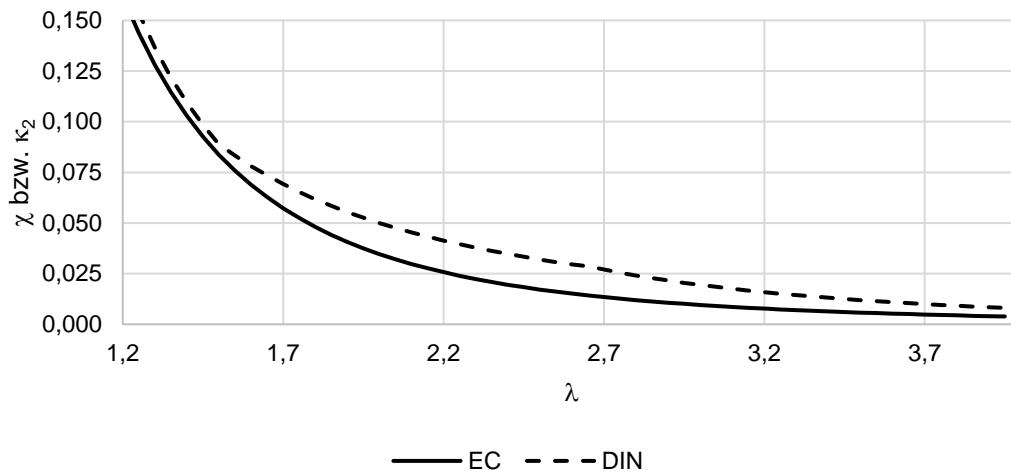


Abbildung 22: Vergleich der Kapazitätskurven - Axialbeulen - hohe Schlankheitsgrade -
Qualitätsklasse B

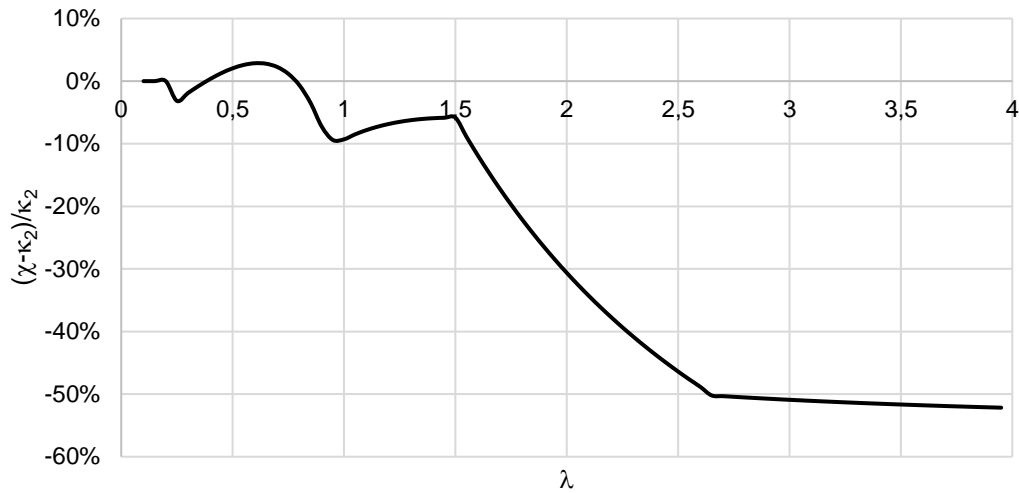


Abbildung 23: Abweichung zwischen den axialen Beulabminderungsfaktoren – Qualitätsklasse B (DIN als Bezugswert verwendet)

Die in Abbildung 22 und Abbildung 23 auftretenden großen Abweichungen bei sehr schlanken Zylindern und dem damit verbundenen elastischen Beulen sind Gegenstand der aktuellen Forschung. Jäger zeigt in [29] Abweichungen bis zum Faktor 4 zwischen numerischen Untersuchungen und den Bemessungswerten nach EC, dabei liegen die Bemessungsgleichungen auf der sicheren Seite.

$$\gamma_{M1} = 1,1$$

$$\bar{\lambda}_S \leq 0,25: \quad \gamma_{M2} = 1,1$$

$$0,25 < \bar{\lambda}_S < 2,00: \quad \gamma_{M2} = 1,1 \left(1 + 0,318 \frac{\bar{\lambda}_S - 0,25}{1,75} \right)$$

$$2,00 \leq \bar{\lambda}_S: \quad \gamma_{M2} = 1,45$$

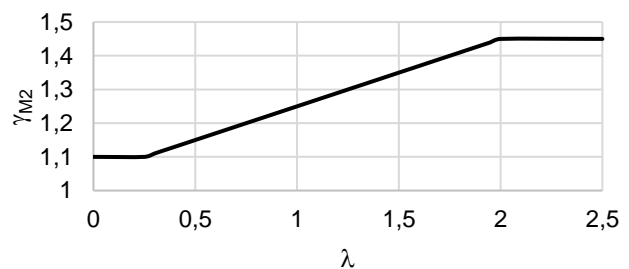


Abbildung 24: Verlauf des Teilsicherheitsbeiwerts für Axialbeulen nach DIN 18800-4

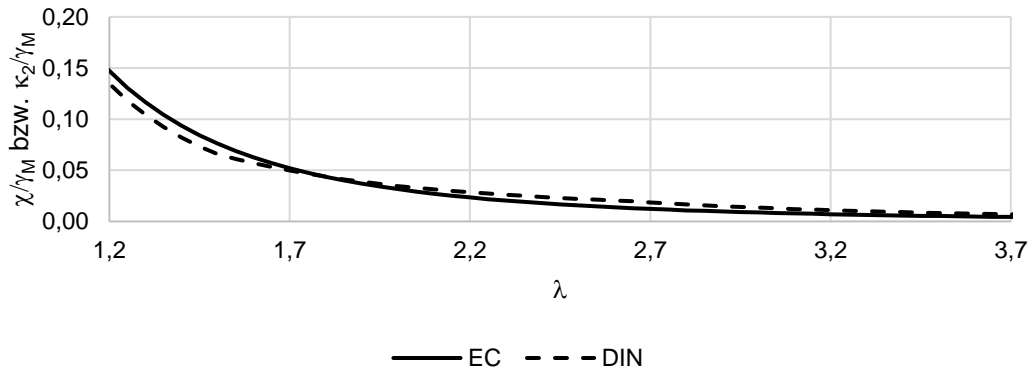


Abbildung 25: Vergleich Bemessungsabminderungsfaktoren für Axialbeulen

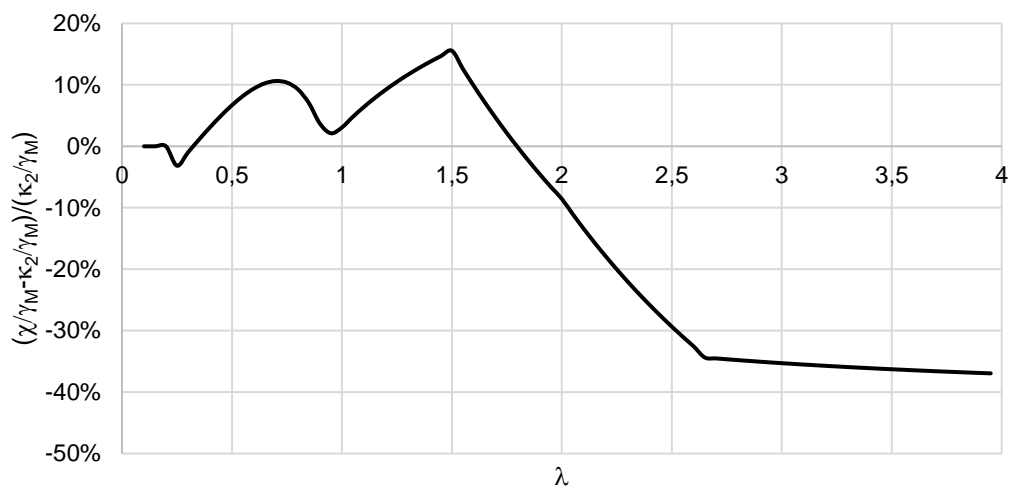


Abbildung 26: Abweichung der Bemessungsabminderungsfaktoren für Axialbeulen zwischen EC (Herstellerqualität B) und DIN

Bemerkung: Für einen genaueren Vergleich der Bemessungsabminderungsfaktoren χ/γ_M nach EN 1993-1-6 bzw. κ_2/γ_M nach DIN 18800-4 wurde die Abweichung in Abhängigkeit der Schlankheit berechnet und in Abbildung 26 dargestellt. Im Schlankheitsbereich der Teilzylinder liegt der EC auf der sicheren Seite. Betrachtet man gedrungene Zylinder, kehrt sich dies um. Damit reduziert der von der Schlankheit abhängige Teilsicherheitsbeiwert aus Abbildung 24 die Abweichung aus Abbildung 23, kehrt die Sicherheitsverhältnisse im Bereich der Untersuchungstanks jedoch nicht um.

$$\alpha_x = \frac{0,62}{1 + 1,91(\Delta w_x / t)^{1,44}} \quad \Delta w_x = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{r}{t}} \cdot t$$

Bemerkung: In EN 1993-1-6 kann die stabilisierende und destabilisierende Wirkung des Innendrucks berücksichtigt werden. Dies ist nach DIN 18800-4 nicht möglich.

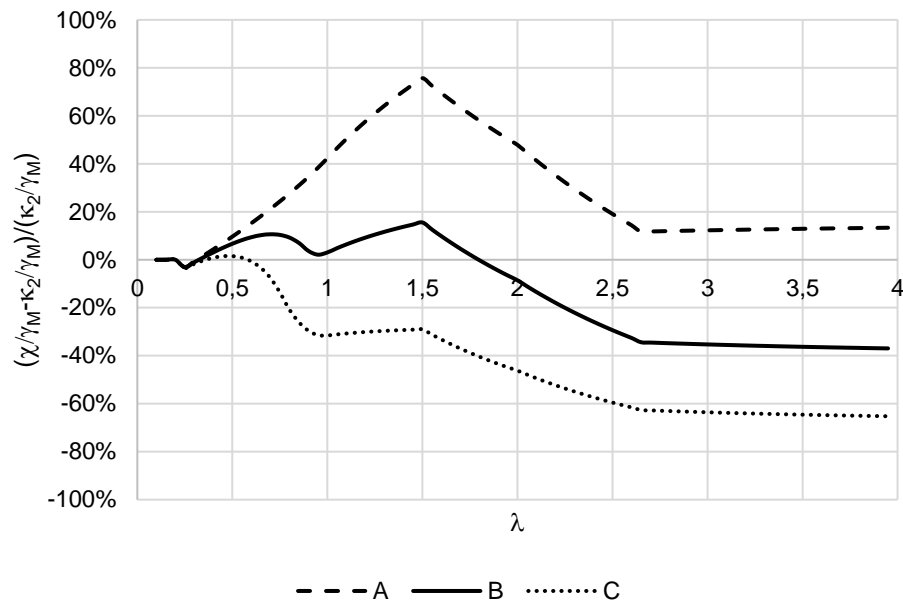


Abbildung 27: Abweichung der Bemessungsabminderungsfaktoren für Axialbeulen zwischen EC und DIN in Abhängigkeit von der Qualitätsklasse

Die zuvor beschriebenen Auswertungen aus Abbildung 26 wurden für einen Vergleich der Ausführungsklassen auf diese übertragen. Dabei ist ein nichtproportionaler Zusammenhang festzustellen.

6.4.2 Umfangsbeulen

Ein Vergleich der schussweisen Ausnutzungsgrade zwischen DIN 4119 [1], bzw. DIN 18800-4 [16] und EN 1993-4-2 [3], bzw. EN 1993-1-6 [4] ist in Abbildung 28 bis Abbildung 32 zusammengefasst. An allen Nachweisstellen des mittleren Tanks (außen) liegen die nach EC berechneten Ausnutzungsgrade unter den nach DIN 4119 [1] definierten. Das gilt auch für die oberen beiden Teilzylinder des großen Tanks. Im allen weiteren Bereichen verhalten sich die Ausnutzungsgrade umgekehrt. Eine genauere Betrachtung der in Tabelle 4 dargestellten Untersuchungstanks führt zu den Auswertungen in Abbildung 33. Hier wird die einwirkende Umfangsspannung auf die des äquivalenten Teilzylinders nach DIN 18800-4 mit $\sigma_{x,Ed} / \sigma_{x,Ed,DIN}$ bezogen. Die Bemessungsregeln nach EN 1993-4-2 [3] führen zu größeren Einwirkungen. Dies ist auf die unterschiedlichen Teilsicherheitsbeiwerte, vgl. Abs. 6.4.1, des Innendrucks zurückzuführen. Der Vergleich der Widerstände in Abbildung 34 ist nicht so eindeutig wie beim Axialbeulen, sondern berücksichtigt mehrere Varianten. Dies ist notwendig, da die unterschiedlichen Verfahren unterschiedliche Randbedingungen berücksichtigen. Die Unterschiede werden im Folgenden diskutiert.

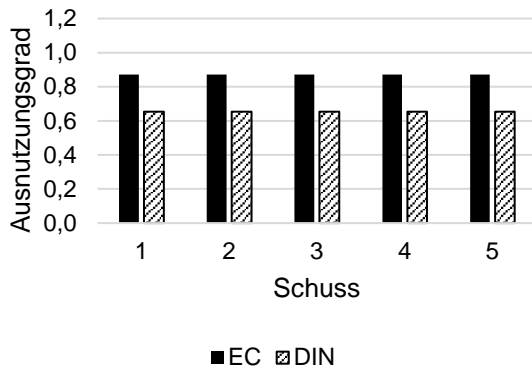


Abbildung 28: Vergleich Ausnutzungsgrad
 LS 3 Umfangsbeulen DIN 4119 und EN 1993-
 4-2 - klein - innen

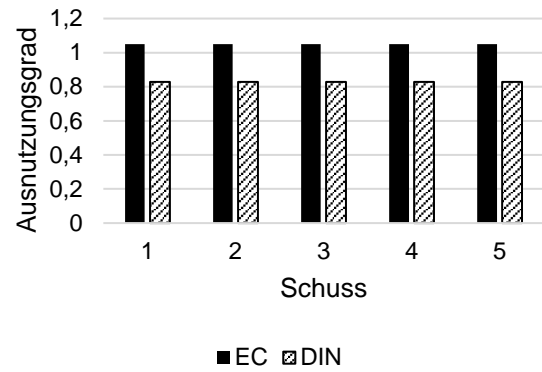


Abbildung 29: Vergleich Ausnutzungsgrad
 LS 3 Umfangsbeulen DIN 4119 und EN 1993-
 4-2 - klein - außen

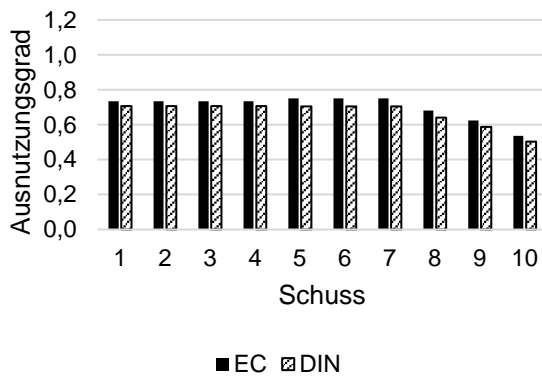


Abbildung 30: Vergleich Ausnutzungsgrad
 LS 3 Umfangsbeulen DIN 4119 und EN 1993-
 4-2 - mittel - innen

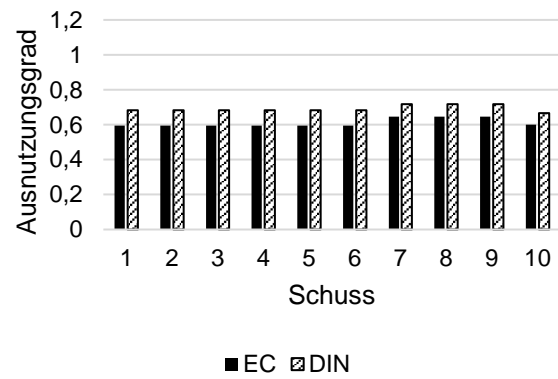


Abbildung 31: Vergleich Ausnutzungsgrad
 LS 3 Umfangsbeulen DIN 4119 und EN 1993-
 4-2 - mittel - außen

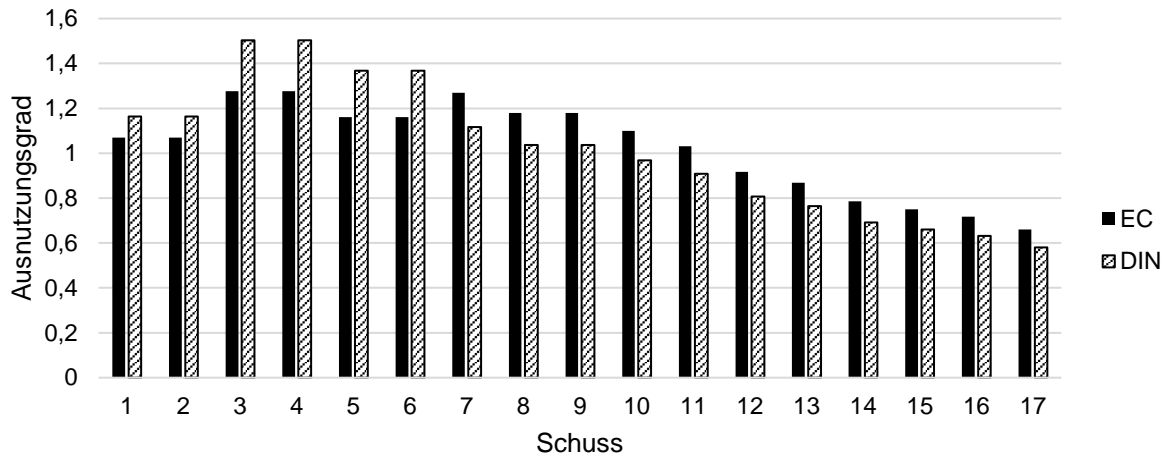


Abbildung 32: Vergleich Ausnutzungsgrad LS 3 Umfangsbeulen DIN 4119 und EN 1993-4-2 – groß (Zu Ausnutzungsgrade > 1,0 siehe Anmerkung in Kap. 1)

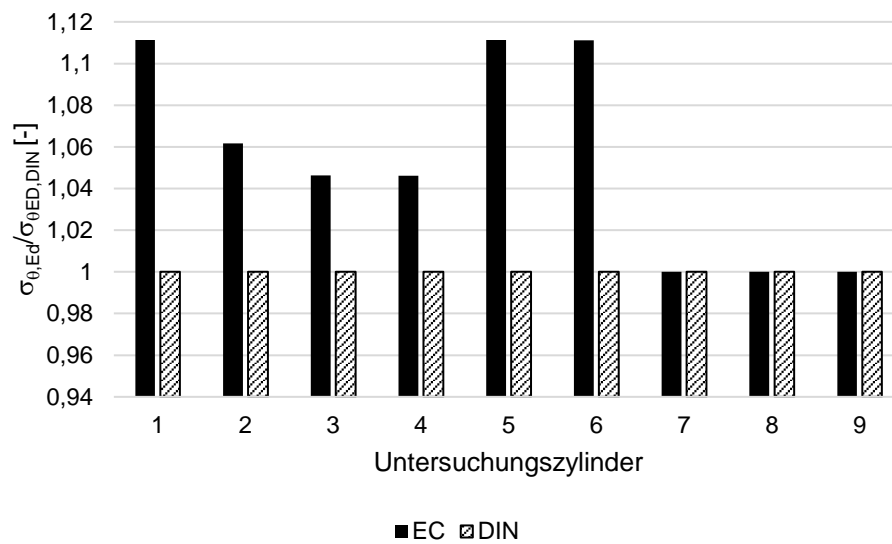


Abbildung 33: Vergleich der bezogenen einwirkenden Bemessungsumfangsspannungen

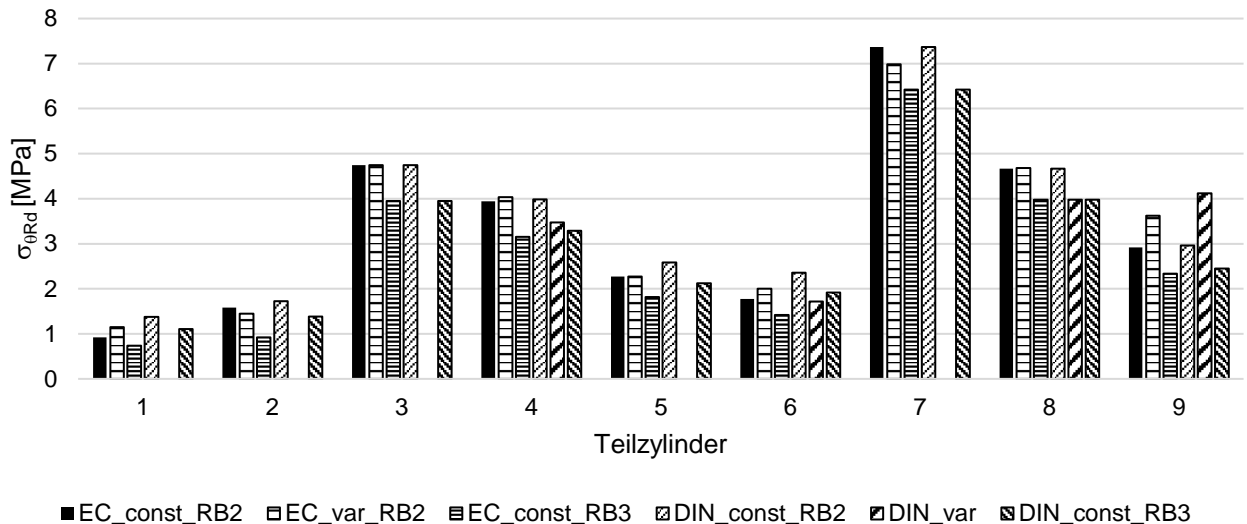


Abbildung 34: Bemessungswiderstand gegen Umfangsbeulen nach Teilzylinder in Abhängigkeit der Norm, Randbedingung und für konstante und variable Wanddicken

Abbildung 34 vergleicht die resultierenden Bemessungswiderstände nach DIN und EC für die zwei Randbedingungsfälle nach EN 1993-1-6 [4] Tabelle D.3 unter der Annahme einer konstanten Wanddicke oder dem Ansatz einer veränderlichen Wanddicke. Im Fall der konstanten Wanddicke entspricht diese der geringsten Dicke im jeweiligen Teilzylinder. Ein Vergleich der Widerstände unter konstanter Wanddicke und gleicher RB zwischen DIN und EC führt bei den meisten Teilzylindern zu den gleichen Werten. Eine Ausnahme stellt Teilzylinder 6 dar. Hier werden nach DIN höhere Widerstände erzielt. Dies lässt sich auf die Sonderregeln nach Gl. (7d) und (7e) aus DIN 18800-4 [16] zurückführen.

Übersichtlichere Vergleiche der Ergebnisse nach EC und DIN sind in Abbildung 35 und Abbildung 36 wiedergegeben.

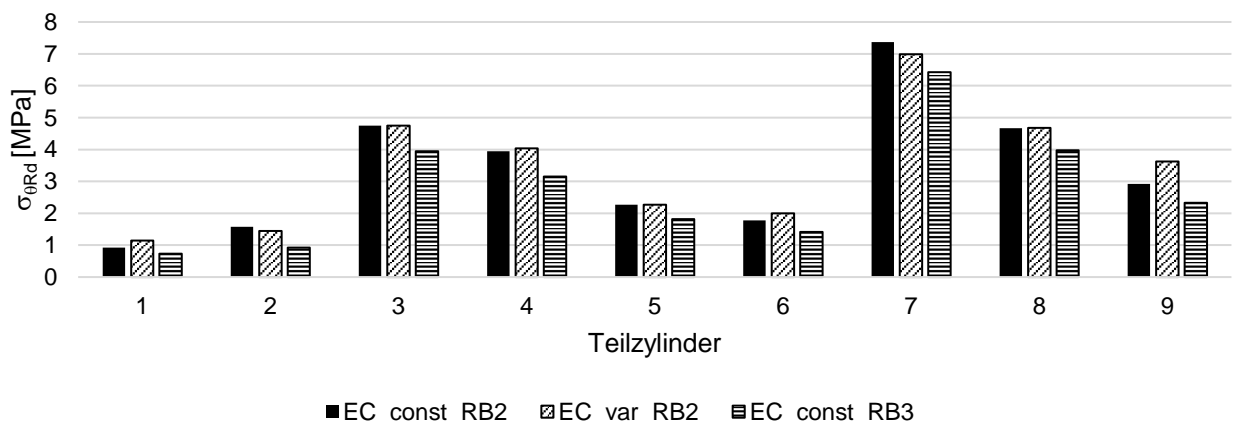


Abbildung 35: Bemessungswiderstand nach EC gegen Umfangsbeulen nach Teilzylinder in Abhängigkeit von den Randbedingungen für konstante und variable Wanddicken

Bei den Verfahren nach EC konnten folgende Punkte festgestellt werden:

- Das für die Berechnungen nach EC angewendete Verfahren Chen/Rotter [30–32] für variable Wanddicke nutzt RB Fall 2 mit $C_s = 1,25$ (Randbedingung nach Tabelle D.3 EN 1993-1-6).
- Bei mittellangen Teilzylindern mit konstanter oder nur wenig veränderlichen Wanddicke entsprechen die Ergebnisse des Verfahrens nach Chen/Rotter [32] denjenigen für konstante Wanddicken nach EN 1993-1-6.
- Bei stark veränderlichen Wanddicken innerhalb eines Teilzylinders (beispielsweise TZ 9) liefert das Verfahren nach Chen/Rotter [32] erwartungsgemäß höhere Widerstände als für konstante Wanddicken.
- Teilzylinder 7 ist mit einer konstanten Wanddicke ausgeführt. Der höhere Bemessungswiderstand in EC_const_RB2 Abbildung 35 resultiert daraus, dass dieser Teilzylinder als „kurzer Zylinder“ nach EN 1993-1-6 einen höheren Widerstand aufweist. Dies wird in dem Verfahren nach Chen/Rotter [32] nicht berücksichtigt.

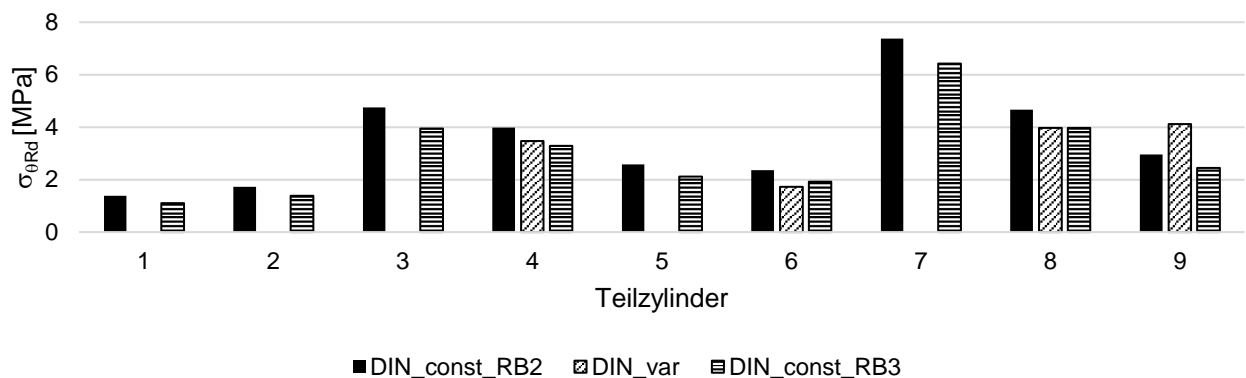


Abbildung 36: Bemessungswiderstand nach DIN gegen Umfangsbeulen nach Teilzylinder in Abhängigkeit von den Randbedingungen für konstante und variable Wanddicken

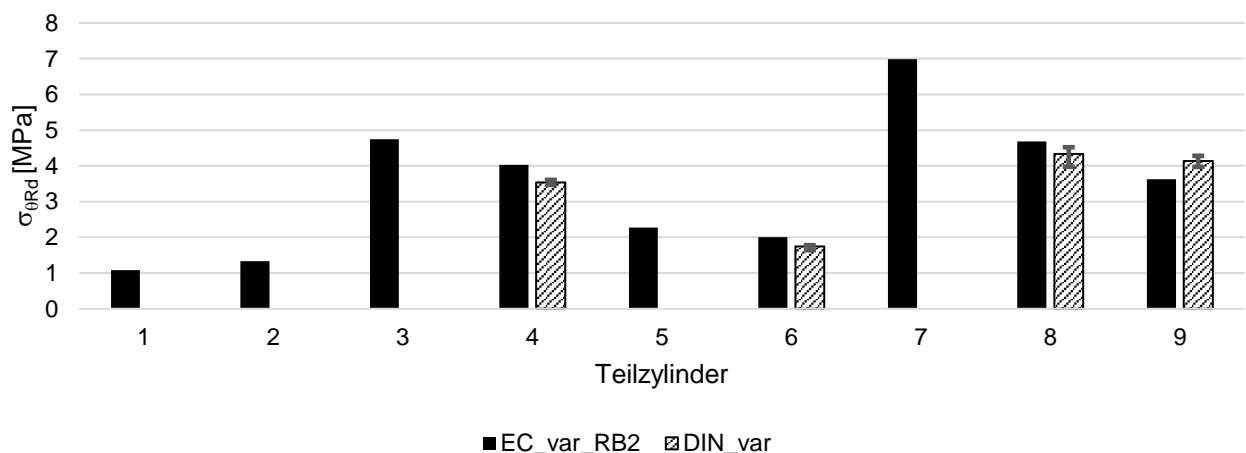


Abbildung 37: Vergleich der Widerstände bei veränderlicher Wanddicke nach Chen/Rotter (EC) und DIN

In Abbildung 37 sind die Bemessungswiderstände gegen Umfangsbeulen unter Berücksichtigung der veränderlichen Wanddicke nach Chen/Rotter [32] und DIN 18800-4 [16] gegenübergestellt. Da es sich bei dem Verfahren nach DIN 18800-4 um ein grafisches Verfahren handelt (Unschärfen beim Ablesen aus DIN 18800-4, Bild 20) wurden die Werte von 10 Probanden bestimmt. Der angegebene Widerstand entspricht dem Mittelwert. Der dargestellte Fehlerindex gibt den min-max-Bereich der resultierenden Ergebnisse wieder. Die Ergebnisse nach DIN 18800-4 liegen bis auf den Teilzylinder 9 unter den Werten nach Chen/Rotter. Dies kann auf die oben genannten Unterschiede im Umgang mit den Randbedingungen zurückgeführt werden. Teilzylinder 9 zeigt ein umgekehrtes Bild, der Widerstand nach DIN 18800-4 ist größer als nach Chen/Rotter. In diesem Teilzylinder tritt die größte Veränderung der Wanddicke auf ($t_{\min} = 13$ mm; $t_{\max} = 25$ mm). Dies motiviert weitere systematische Untersuchungen zum Einfluss der variablen Wanddicken auf die Widerstände nach den unterschiedlichen Verfahren.

Berücksichtigung der Randbedingungen: In Chen/Rotter wird argumentiert, dass angrenzende Schüsse oder Teilzylinder dieselbe Wirkung wie eine axiale Lagerung haben. Damit wird $C_0 = 1,25$ gewählt. Dies widerspricht den Randbedingungsszenario f) aus EN 1993-1-6 Bild 8.1. Hier nach soll Fall 3 mit $C_0 = 1,0$ angewendet werden. Die Berechnungen nach EC erfolgten in allen Teilzylindern mit $C_0 = 1,25$. Im Fall des untersten Teilzylinders des großen, unverankerten Tanks trifft dies auch zu, da der obere Rand dieses Teilzylinders ebenfalls axial gehalten ist und damit alle Forderungen für Fall 2 erfüllt sind. Nach DIN 18800-4 wird mit $C_0 = 1,0$ gerechnet, da dies als damaliger Kenntnisstand erachtet wird.

Ein ausführlicher Vergleich der Bemessungsverfahren für konstante Wanddicken nach DIN 18800-4 [16] und EN 1993-1-6 [4] ist im Folgenden aufbereitet. Dabei entsprechen sich die Widerstände für mittellange und lange Zylinder für die Qualitätsklasse B und können nach EC für kurze Zylinder angehoben und für andere Qualitätsklassen angepasst werden.

In Tabelle 6 sind die Hintergründe der Berechnungsverfahren nach EC und DIN für konstante Wanddicken gegenüberstellt.

Tabelle 6: Vergleich der Bemessungswiderstände gegen Umfangsbeulen

EN 1993-1-6	DIN 18800-4															
Kein Nachweis gegen Axialbeulen erforderlich wenn:																
$\frac{r}{t} \leq 0,21 \sqrt{\frac{E}{f_{yk}}}$	$\frac{r}{t} \leq \sqrt{\frac{E}{23 f_{y,k}}}$															
Bemerkung: Die Grenzwerte entsprechen sich.																
Ideelle Beulspannung:																
$\sigma_{\theta,Rk} = \chi_{\theta} f_{yk}$	$\sigma_{\varphi S,Rk} = \kappa_1 \cdot f_{y,k}$															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 33%;">kurz</th> <th style="width: 33%;">mittel</th> <th style="width: 33%;">lang</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">$20 \leq \frac{\omega}{C_{\theta}} \leq 163 \frac{r}{t}$</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">$\sigma_{\theta,Rcr} = 0,92 E \left(\frac{C_{\theta\theta}}{\omega} \right) \left(\frac{t}{r} \right)$</td> <td style="text-align: center;">$\sigma_{\theta,Rcr} = 0,92 E \left(\frac{C_{\theta}}{\omega} \right) \left(\frac{t}{r} \right)$</td> <td style="text-align: center;">$\sigma_{\theta,Rcr} = E \left(\frac{t}{r} \right)^2 \left[0,275 + 2,03 \left(\frac{C_{\theta}}{\omega} \right) \right]$</td> </tr> </tbody> </table>	kurz	mittel	lang		$20 \leq \frac{\omega}{C_{\theta}} \leq 163 \frac{r}{t}$		$\sigma_{\theta,Rcr} = 0,92 E \left(\frac{C_{\theta\theta}}{\omega} \right) \left(\frac{t}{r} \right)$	$\sigma_{\theta,Rcr} = 0,92 E \left(\frac{C_{\theta}}{\omega} \right) \left(\frac{t}{r} \right)$	$\sigma_{\theta,Rcr} = E \left(\frac{t}{r} \right)^2 \left[0,275 + 2,03 \left(\frac{C_{\theta}}{\omega} \right) \right]$	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">Kurz / mittel</th> <th style="width: 50%;">lang</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">$\frac{l}{r} \leq 163 C_{\varphi} \sqrt{\frac{r}{t}}$</td> <td style="text-align: center;">$\frac{l}{r} > 163 C_{\varphi} \sqrt{\frac{r}{t}}$</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">$\sigma_{\varphi Si} = 0,92 C_{\varphi} \cdot E \frac{r}{l} \left(\frac{t}{r} \right)^{1,5}$</td> <td style="text-align: center;">$\sigma_{\varphi Si} = E \left(\frac{t}{r} \right)^2 \left[0,275 + 2,03 \left(\frac{C_{\varphi}}{\frac{l}{r} \sqrt{\frac{r}{t}}} \right)^4 \right]$</td> </tr> </tbody> </table>	Kurz / mittel	lang	$\frac{l}{r} \leq 163 C_{\varphi} \sqrt{\frac{r}{t}}$	$\frac{l}{r} > 163 C_{\varphi} \sqrt{\frac{r}{t}}$	$\sigma_{\varphi Si} = 0,92 C_{\varphi} \cdot E \frac{r}{l} \left(\frac{t}{r} \right)^{1,5}$	$\sigma_{\varphi Si} = E \left(\frac{t}{r} \right)^2 \left[0,275 + 2,03 \left(\frac{C_{\varphi}}{\frac{l}{r} \sqrt{\frac{r}{t}}} \right)^4 \right]$
kurz	mittel	lang														
	$20 \leq \frac{\omega}{C_{\theta}} \leq 163 \frac{r}{t}$															
$\sigma_{\theta,Rcr} = 0,92 E \left(\frac{C_{\theta\theta}}{\omega} \right) \left(\frac{t}{r} \right)$	$\sigma_{\theta,Rcr} = 0,92 E \left(\frac{C_{\theta}}{\omega} \right) \left(\frac{t}{r} \right)$	$\sigma_{\theta,Rcr} = E \left(\frac{t}{r} \right)^2 \left[0,275 + 2,03 \left(\frac{C_{\theta}}{\omega} \right) \right]$														
Kurz / mittel	lang															
$\frac{l}{r} \leq 163 C_{\varphi} \sqrt{\frac{r}{t}}$	$\frac{l}{r} > 163 C_{\varphi} \sqrt{\frac{r}{t}}$															
$\sigma_{\varphi Si} = 0,92 C_{\varphi} \cdot E \frac{r}{l} \left(\frac{t}{r} \right)^{1,5}$	$\sigma_{\varphi Si} = E \left(\frac{t}{r} \right)^2 \left[0,275 + 2,03 \left(\frac{C_{\varphi}}{\frac{l}{r} \sqrt{\frac{r}{t}}} \right)^4 \right]$															
<p>— RB Fall 1 — RB Fall 2</p> <p>— RB Fall 3 — RB Fall 4</p>	<p>— RB Fall 1 — RB Fall 2</p> <p>— RB Fall 3 — RB Fall 4</p>															
Abbildung 38: Einfluss kurzer Zylinder auf die ideelle Beulspannung	Abbildung 39: Einfluss kurzer Zylinder auf die ideelle Beulspannung – Abweichung zu mittellangem Zylinder															
Abbildung 38 zeigt den Einfluss kurzer Zylinder auf die ideelle Beulspannung. Die Auswirkungen im Vergleich zur Regelung der DIN sind in Abbildung 39 zusammengefasst.																
Beulspannung am imperfekten und materiell nichtlinearem Zylinder:																
$\bar{\lambda}_{\theta} = \sqrt{f_{yk} / \sigma_{\theta,Rcr}}$	$\bar{\lambda}_{S\varphi} = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{\varphi Si}}}$															
$\chi = 1 - \beta \left(\frac{\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^{\eta}$ wenn $\bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda} < \bar{\lambda}_p$ $\chi = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}^2}$ wenn $\bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda}$ $\bar{\lambda}_{\theta 0} = 0,40$ $\beta = 0,60$ $\eta = 1,0$	Normal imperfektionempfindliche Schalenbeulfälle: $\bar{\lambda}_S \leq 0,4$: $\kappa_1 = 1$ $0,4 < \bar{\lambda}_S < 12$: $\kappa_1 = 1274 - 0,686 \bar{\lambda}_S$ $12 \leq \bar{\lambda}_S$: $\kappa_1 = 0,65 / \bar{\lambda}_S^2$ Bei Schalen mit $\bar{r}(r-t) \geq 600$ und $(r/t)(f/E)^{0,5} \geq 1,75$ darf in (7c) der Wert 0,65 durch α^* nach (7f) ersetzt werden $\alpha^* = 0,65 + (\alpha_{col} - 0,65) \{1 - 600 (r-t)/\bar{r}\}$ mit $\alpha_{col} = 1 / \{1 + 0,257 (t/r) (E/f_y)^{0,5}\}$															

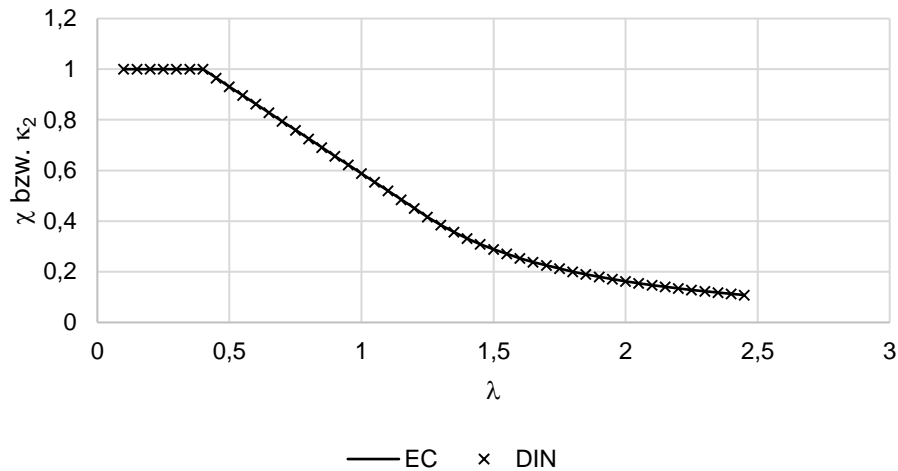


Abbildung 40: Vergleich der Kapazitätskurven für Umfangsbeulen – Qualitätsklasse B

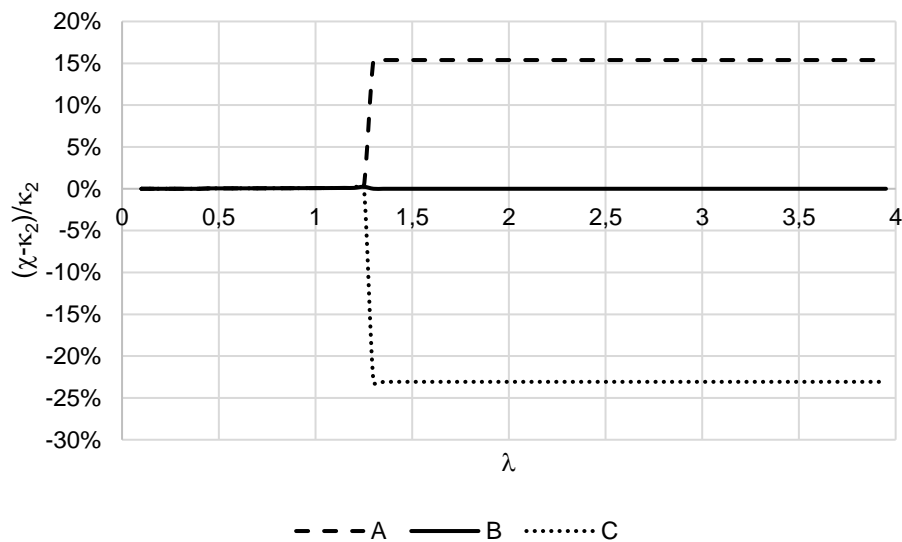


Abbildung 41: Auswirkungen der Qualitätsklassen

Abbildung 40 verdeutlicht, dass bei Qualitätsklasse B und mittleren (bei Tankbauwerken üblichen) Zylindern keine Unterschiede in den Bemessungswiderständen zu erkennen sind. Der Einfluss der Qualitätsklasse im Vergleich zum Bemessungswiderstand nach DIN sind in Abbildung 41 dargestellt. Qualitätsklasse A führt nach Überschreiten der plastischen Grenzschlankheit zu 15 % größeren, Qualitätsklasse C zu 22 % geringeren Widerständen. Ziólko et al. [33] zeigen, dass im Fall großer Schlankheiten erhebliche Differenzen zwischen einer GMINA und einem spannungsbasierten Nachweis auftreten.

6.4.3 Interaktion

Ein Vergleich der schussweisen Ausnutzungsgrade zwischen DIN 4119 [1] bzw. DIN 18800-4 [16] und EN 1993-4-2 [3] bzw. EN 1993-1-6 [4] ist in Abbildung 42 bis Abbildung 46 zusammengefasst.

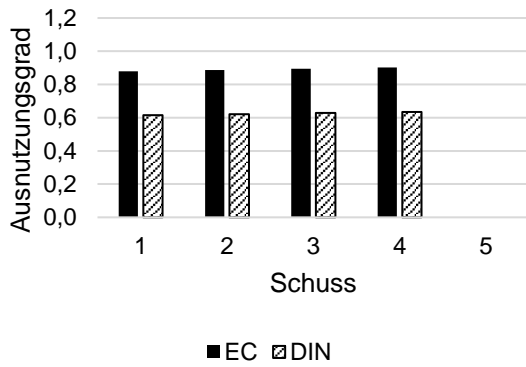


Abbildung 42: Vergleich Ausnutzungsgrad LS 3 Interaktion DIN 4119 und EN 1993-4-2 - klein - innen

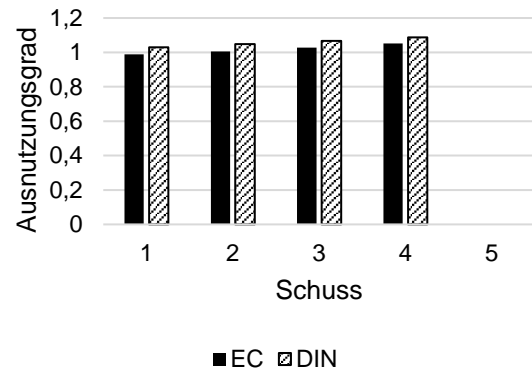


Abbildung 43: Vergleich Ausnutzungsgrad LS 3 Interaktion DIN 4119 und EN 1993-4-2 - klein - außen (Zu Ausnutzungsgrade > 1,0 siehe Anmerkung in Kap. 1)

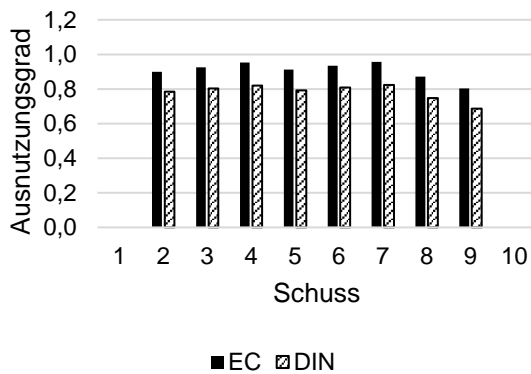


Abbildung 44: Vergleich Ausnutzungsgrad LS 3 Interaktion DIN 4119 und EN 1993-4-2 - mittel - innen

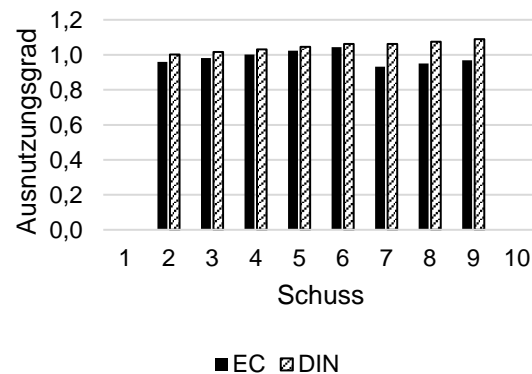


Abbildung 45: Vergleich Ausnutzungsgrad LS 3 Interaktion DIN 4119 und EN 1993-4-2 - mittel - außen (Zu Ausnutzungsgrade > 1,0 siehe Anmerkung in Kap. 1)

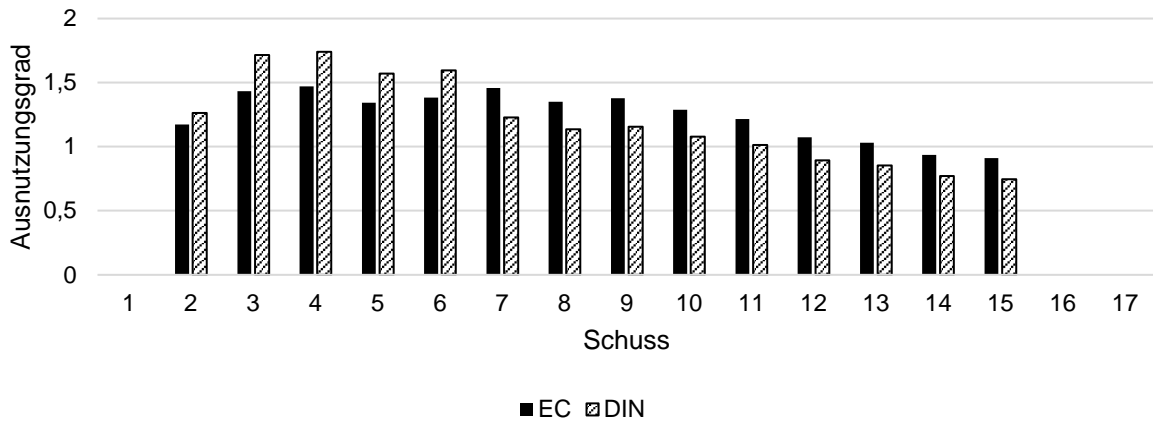


Abbildung 46: Vergleich Ausnutzungsgrad LS 3 Interaktion DIN 4119 und EN 1993-4-2 – groß (Zu Ausnutzungsgrade > 1,0 siehe Anmerkung in Kap. 1)

Einige der betrachteten Schüsse liegen die Ausnutzungsgrade nach DIN über denen nach EC. Für eine genauere Betrachtung werden die Untersuchungen auf die definierten Teilzylinder reduziert und in Abbildung 47 dargestellt. Abbildung 48 zeigt die relativen Abweichungen zwischen DIN und EC mit Bezug auf die DIN. In den meisten Fällen führt eine Berechnung nach DIN zu den höheren Sicherheiten. In diesen Fällen weichen die Ergebnisse nach EC weniger als 10 % ab. Führt die Berechnung nach EC zu höheren Ausnutzungen, liegen diese zwischen 15 % und 45 % über den nach DIN. Eine genauere Aufschlüsselung nach Einwirkungen und Widerständen ist in Abbildung 49 und Abbildung 50 dargestellt.

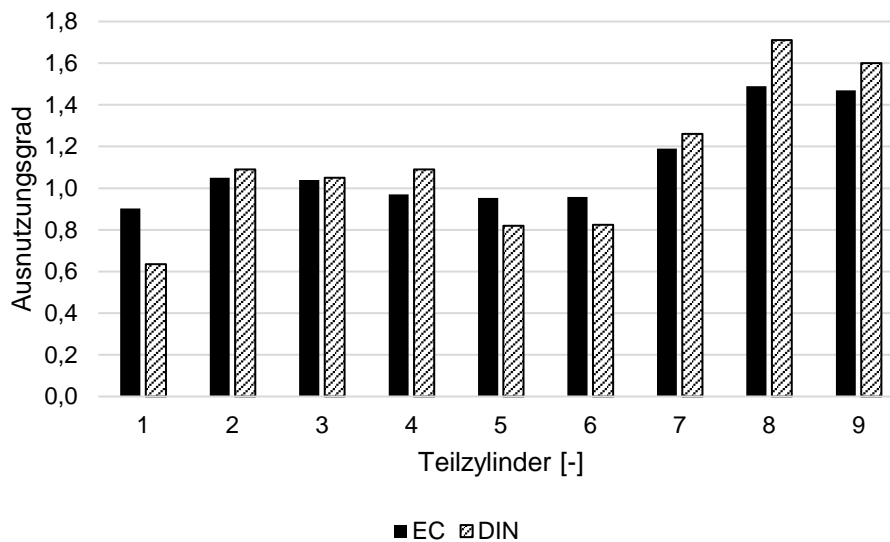


Abbildung 47: Vergleich Ausnutzungsgrad LS 3 Interaktion DIN 4119 und EN 1993-4-2 – nach Teilzylindern (Zu Ausnutzungsgrade > 1,0 siehe Anmerkung in Kap. 1)

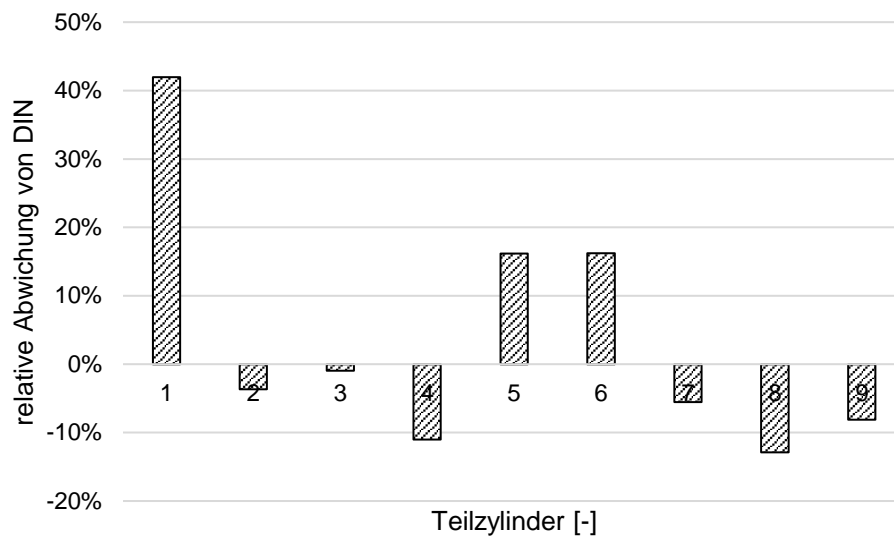


Abbildung 48: Relative Abweichung der Ausnutzungsgrade nach Teilzylinder zwischen EC und DIN bezogen auf DIN

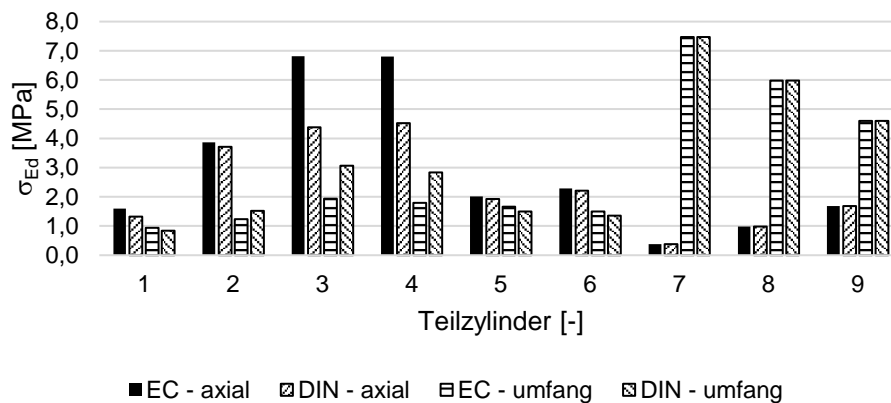


Abbildung 49: Einwirkungen im LS 3 - Interaktion nach Wirkungsrichtung und Norm

Eine Betrachtung der Membranspannungen in Umfangsrichtung zeigt größere Einwirkungen nach EC bei den eingehausten Zylindern. Hier dominiert der Lastfall Unterdruck und die Auswirkungen der unterschiedlichen Teilsicherheitsbeiwerte werden ersichtlich. Im Fall der nicht eingehausten Tanks führt die Regel zur Lastkombination nach DIN aus Wind und Unterdruck zu größeren Membranspannungen in Umfangsrichtung.

Bei Meridianspannungen treten in allen Fällen nach EC die höheren Einwirkungen auf. Im Fall des offenen Tanks mit den Teilzylindern 7 bis 9 entsprechen sich die Einwirkungen nach DIN und EC.

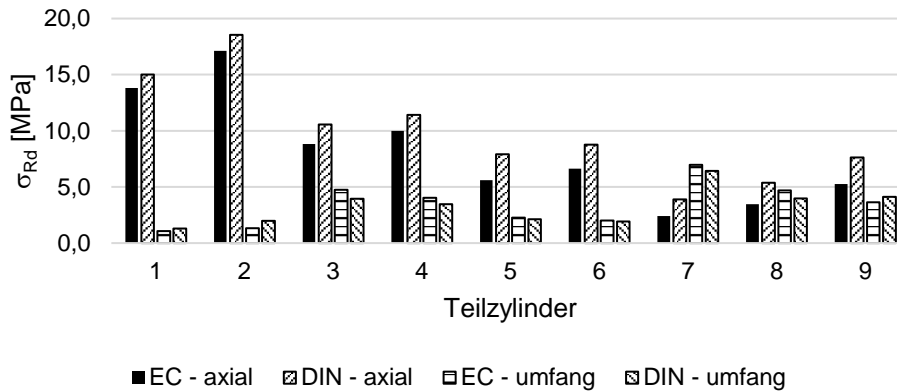


Abbildung 50: Widerstände im LS 3 - Interaktion nach Wirkungsrichtung und Norm

- Die Widerstände nach DIN gegen Axialbeulen sind, wie in Kapitel 6.4.1 erläutert, in allen Fällen größer als nach EC.
- Die Widerstände gegen Umfangsbeulen liegen nach EC in den Teilzylindern 1 und 2 wegen der Zusatzbedingungen nach Kapitel 6.4.2 unter denen nach DIN.
- Im Teilzylinder 9 ist der geringere Widerstand nach EC auf das Verfahren zur Bestimmung des Umfangsbeulwiderstands bei variabler Wanddicke zurückzuführen.
- In den restlichen Zylindern dominiert der in Kapitel 6.4.2 diskutierte Einfluss der Wahl der Randbedingungen.

In Abbildung 51 und Abbildung 52 sind die Teilausnutzungsgrade und der Gesamtausnutzungsgrad nach Norm und Teilzylinder dargestellt. Abbildung 51 umfasst alle Fälle, bei denen EC zu geringeren Ausnutzungsgraden führt, Abbildung 52 die übrigen.

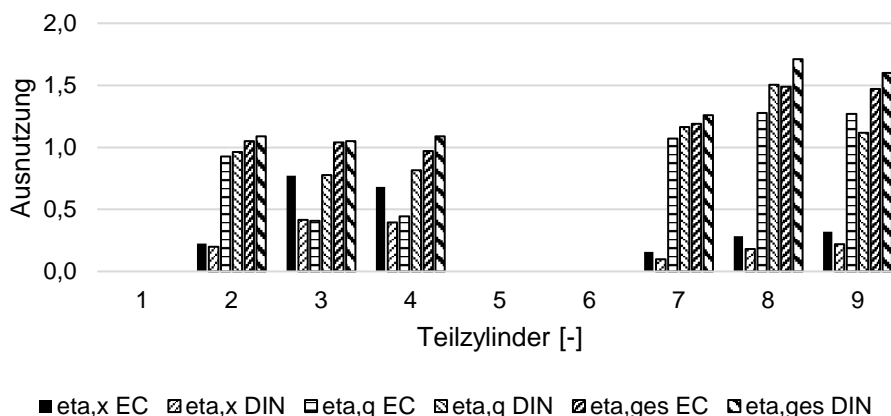


Abbildung 51: Vergleich der Ausnutzungsgrade – Beulen - Interaktion - Teilzylinder mit EC auf unsicherer Seite (Zu Ausnutzungsgrade > 1,0 siehe Anmerkung in Kap. 1)

- In den Fällen nach Abbildung 51 liegt die Summe der Teilausnutzungsgrade nach DIN über denen nach EC. Die Interaktionsbedingungen nach EN 1993-1-6 [4] (8.19) und DIN 18800-4 [16] (50) beeinflussen den Sachverhalt nur unwesentlich.

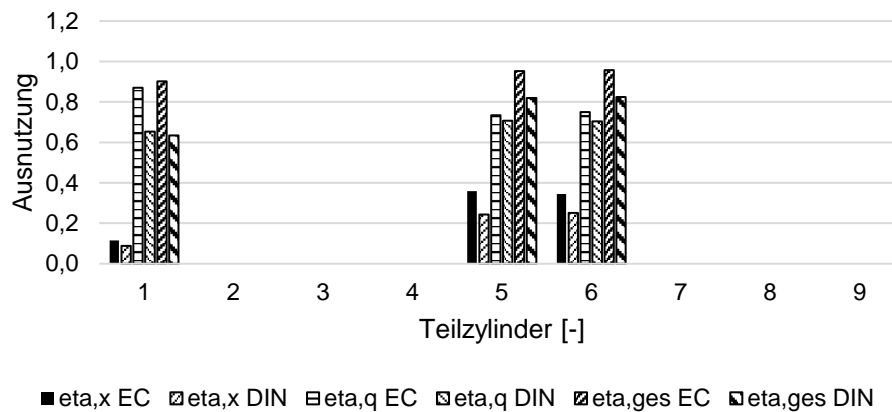


Abbildung 52: Vergleich der Ausnutzungsgrade – Beulen - Interaktion - Teilzylinder mit EC auf sicherer Seite

- Tabelle 7 fasst die bei den einzelnen Teilzylindern auftretenden k-Faktoren nach EN 1993-1-6 [4] zusammen. Nach DIN 18800-4 [16] sind diese konstant mit $k_x = 1,25$, $k_\theta = 1,25$ und $k_i = 0$.

Tabelle 7: Interaktionsparameter k_x , k_θ , k_i nach Teilzylinder

	k_x	k_θ	k_i
1	1,299	1,254	1,06E-07
2	1,310	1,255	2,48E-07
3	1,271	1,261	1,62E-07
4	1,273	1,259	1,50E-07
5	1,263	1,255	1,49E-08
6	1,265	1,255	1,61E-08
7	1,254	1,263	9,22E-09
8	1,256	1,258	8,55E-09
9	1,259	1,256	1,19E-08

Zur Untersuchung der Auswirkung der k-Faktoren nach EC auf den Gesamtausnutzungsgrad wurden die in den Teilzylindern auftretenden k-Werte auf die in Tabelle 8 aufgeführten generische Ausnutzungsgrade angewendet. Die so errechneten Gesamtausnutzungsgrade wurden anschließend in Relation zu dem konstanten Exponenten 1,25 nach DIN gesetzt. Die jeweils auftretenden maximalen Abweichungen sind ebenfalls in Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 8: Exemplarische Kombination von Ausnutzungsgraden in axialer und Umfangsrichtung inkl. auftretende Abweichungen zwischen EC und DIN.

	η_x	η_θ	Abw.
Fall 1	0,5	0,5	2%
Fall 2	0,25	0,25	0%
Fall 3	0,75	0,75	0%
Fall 4	1	1	0%
Fall 5	0,5	0,75	2%
Fall 6	0,75	0,5	1%
Fall 7	0,75	0,25	1%
Fall 8	0,25	0,75	2%
Fall 9	0	1	0%

Weitere Ausführungen zu den Unterschieden in den Interaktionsnachweisen sind in [34] angegeben.

6.5 Steifen

Weder in EN 1993-4-2 [3] (mit Ausnahme eines vereinfachten Ansatzes nach Abs. 11.3.2) noch in DIN 4119-2 [1] sind Bemessungshilfen für Ringsteifen enthalten. Die hier durchgeführten statischen Berechnungen wurden mit Hilfe des Verfahrens nach Schmidt und Greiner, Kapitel 17 in [7], angefertigt. Ein Vergleich zu etwaigen Ansätzen aus dem Flugzeugbau, wie z.B. [35, 36], wird im Rahmen dieses Projekts nicht durchgeführt. Die resultierenden Abmessungen sind in Tabelle 9 dargestellt. Ein Vergleich zwischen dem vereinfachten Ansatz nach Abs. 11.3.2 [3] und dem Verfahren in [7] wird in Kapitel 7.3 geführt. Unterschiede in den Tragfähigkeitsnachweisen sind in Abbildung 53 zusammengefasst, sie resultieren aus den unterschiedlichen Teilsicherheitsbeiwerten für den Unterdruck. Tabelle 9 fasst die geometrischen Eigenschaften der Ringsteifen und deren im Weiteren verwendeten Bezeichnungen zusammen.

Tabelle 9: Geometrische Eigenschaften der Ringsteifen

Tank		Steife	b [mm]	t [mm]	Bez. in Diagramm
mittel	innen	R1	50	7	1
	außen	R1	55	7	2
		R2	55	7	3
groß		R1	120	12	4
		R2	145	15	5
		H1	650	65	

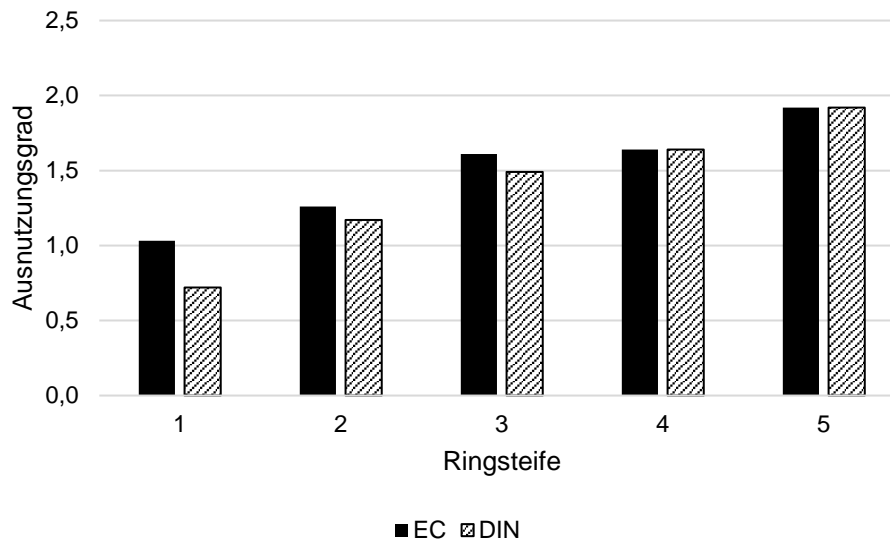


Abbildung 53: Vergleich der Ausnutzungsgrade – Nachweis der Ringsteifen nach Schmidt/Greiner [7] (Zu Ausnutzungsgrade > 1,0 siehe Anmerkung in Kap. 1)

Abbildung 53 vergleicht die Ausnutzungsgrade der Ringsteifen unter einer Einwirkung nach EC und nach DIN. Die Ausnutzungsgrade übersteigen die 100 % deutlich. Dies wird durch die Anpassung des aus Wind resultierenden Außendruckes in der Berichtsrevision 1 hervorgerufen. Im Rahmen der vergleichenden Untersuchungen wird von einer Modifikation der Querschnitte abgesehen und die Ergebnisse qualitativ verglichen. Dabei treten keine Abweichungen für die Ringsteifen 4 und 5 auf. Beide sind im großen, oben offenen Tank verbaut. Hier tritt kein Betriebsunterdruck auf, sodass die Auswirkungen in den Teilsicherheitsbeiwerten nach Kapitel 6.3 nicht relevant werden. In den anderen Fällen liegt die Abweichung zwischen den Ausnutzungsgraden zwischen 7 % und 30 %. Damit liegt hier kein linearer Zusammenhang vor. Insgesamt liegen die Einwirkungen auf die Ringsteifen nach EC im Vergleich zur DIN auf der sicheren Seite.

Für oben offene Tanks gilt nach EN 1993-4-2 [3] Abs. 11.3.2 (2), dass eine obere Ringsteife angebracht werden muss. Diese Forderung ist für einen vereinfachten Bemessungsansatz in Ordnung, lässt sich beim Nachweis der Bauzustände aber meist nicht gewährleisten. Die Ansätze nach EN 1993-1-6 [4] sehen hierfür Beulnachweise bei einer ausreichenden Verankerung vor.

6.6 Verankerung

Die EN 1993-4-2 [3] sieht nicht vor, dass es auch unverankerte Tanks gibt. Dies wurde in der kommentierten Version ergänzt. Eine Entscheidungsgrundlage, die zur Unterscheidung zwischen beiden Verfahren angewendet werden kann, ist in EN 1993-4-2 [3] Abs. 11.5 in Form von Lastfällen und einem Modellierungsansatz (Balkentheorie) gegeben. Es erscheint sinnvoll,

diese Regelungen in Abs. 11.5 in den Allgemeinen Teil, Abs. 5 gemäß der kommentierten Version zu verschieben. Anforderungen, die sich aus der Verankerung an den Mantel ergeben, sollten im allgemeinen Kapitel Mantelbemessung behandelt werden.

6.6.1 Normative Forderungen

[EN 1993-4-2 [3] Abs. 11.5 (4)] “Die Verankerung sollte in erster Linie am Tankmantel angeschlossen werden. ...” Diese Anweisung macht aus Sicht der Bearbeiter technisch keinen Sinn, spiegelt nicht die gebaute Praxis wieder und hat ihren Hintergrund in Bereich dickwandiger Tanks und den hier gebräuchlichen Standardlösungen durch Pratzen. Typische Argumente, wie z.B. die bessere Zugänglichkeit bei der Überprüfung auf Korrosion, scheinen bei genauerer Betrachtung nicht haltbar zu sein. Zudem ist zu klären, ob eine solche konstruktive Anweisung nicht in die Anwendungsnormen EN 14015 oder EN 14620 gehört.

Generell müssten abstützende Kräfte bei der Fußbemessung berücksichtigt werden. Diese wirken laststeigernd und werden bei blinder Anwendung des in EN 1993-4-1 [18] vorgesehenen Verfahrens ignoriert. Wird die Verankerung an der Mantelhaut angebracht, treten jedoch keine Abstützkräfte auf.

[EN 1993-4-2 [3] bzw. im Verweis auf EN 1993-4-1 [18], Abs. 5.4.7] In EN 1993-4-1 [18] sind Angaben zur Berechnung der Ankerkräfte unter Berücksichtigung über den Umfang veränderlicher Winddrücke enthalten. Die Angaben in EN 1993-4-2 [3] beziehen sich oft auf nachweislich [37] unzutreffende Ansätze nach der Balkentheorie.

Nach DIN 4119-2 [1] Abs. 7.2.3 dürfen ohne weitere Nachweise Bodenstreifen von 0,5 m Breite als entlastendes Gewicht gegen Abheben angesetzt werden. Ist das so aktivierte Eigengewicht (inkl. Mantel, Dach und Anbauten) nicht größer als die abhebende Last, muss die volle Zugkraft verankert werden. Ist keine Verankerung notwendig, muss das Abheben der Bodenecke unter der Wirkung von drei Lastfällen (Überdruck, Wind, Kombination) begrenzt werden. In DIN 4119 [1] sind keine Ansätze aufgeführt, nach denen die reale Winddruckverteilung bei der Berechnung der Ankerlasten berücksichtigt wird. Vielfach erfolgte in Anlehnung an DIN 4119-2:1961 [6] die Berechnung nach Balkentheorie. Dies liefert nachweislich zu geringe Werte für die Ankerkräfte. Schadensfälle, die auf diese Berechnungsmethodik zurückzuführen sind, sind den Autoren nicht bekannt und eine Begründung dafür ist in [37] angegeben. Zahlreiche Veröffentlichungen und Forschungsarbeiten, eine Auflistung ist in [38] gegeben, versuchten diese Lücke zu schließen. Aus diesen Arbeiten resultiert die Bemessungsregel in EN 1993-4-1 [18] Abs.5.4.7. Weder Einwirkungen noch Widerstände unterscheiden sich damit nach DIN inkl. weiteren Veröffentlichungen und EC. Daher kann auf einen Vergleich verzichtet werden. Dasselbe

gilt für einen umfangreichen Vergleich mit der Balkenlösung. Dies wurde in der in [38] zusammengefassten Literatur ausreichend dargestellt. Einige konzeptionelle Ansätze werden in den folgenden Teilabschnitten diskutiert.

6.6.2 Windbeanspruchung

EN 1993-4-1 [18] Abs.5.4.7 bietet einen analytischen Berechnungsansatz zur Bestimmung der Ankerkräfte unter realen Windbeanspruchungen („Wenn keine genauere numerische Untersuchung angestellt wird, sollte die Verankerung für folgende abhebende Kraft je Umfangslängeneinheit ausgelegt werden“). Das Verfahren lässt dabei offen, ob es sich bei dem berechneten Wert um die Normalkraft in der Schalenwand oder um den Bemessungswert der Ankerkräfte handelt. Betrachtet man die Norm als konsistent und folgt der Forderung, die Verankerung an den Tankmantel anzuschließen, entsprechen sich diese Werte. Wird eine Ausführung gewählt, bei dem der Anker am Fußring befestigt wird, treten zusätzlich Abstützkräfte auf, die zu einer Erhöhung der Ankerlasten führen.

6.6.3 Mindestankerabstände für RB1 – Beulen

In [17] Abs. 12.4 wird der in EN 1993-4-1 [18] Abs.8.5.3 gegebene Mindestankerabstand kritisch diskutiert und als unsicher eingestuft. Alternativ wird eine Formel, die ebenfalls in EN 1993-4-1/A1:2016 Entwurf Abs. 27 enthalten ist, begründet.

$$e_{Anker,A} < 4 \sqrt{RT}$$

EN 1993-4-1 Abs.8.5.3

$$e_{Anker,B} < 0,5 \sqrt[4]{L^2 RT}$$

EN 1993-4-1/A1:2016

Entwurf Abs. 27

In Abbildung 54 sind beide Berechnungsansätze für unterschiedliche L/D-Verhältnisse in dem nach EN 1993-1-6 [4] erfassten r/t-Bereich ausgewertet. Bei einem $L/D \geq 1$ liefert die ursprüngliche Formel ($e_{Anker,A}$) ab $r/t \geq 1000$ die geringeren Mindestabstände und ist damit für die hier betrachteten Tankgeometrien maßgebend. Bei gedrunenen Zylindern, hier bis $L/D = 0,5$, führt der neue Entwurf ($e_{Anker,B}$) über den gesamten Bereich zu geringeren Ankerabständen. Die Abweichungen (vgl. Abbildung 55) liegen im r/t Bereich 1000-4000 zwischen -30 % und -8 %. Für schlankere Zylinder führt der Ansatz ($e_{Anker,B}$) zu deutlich größeren (44 % bis 100 %), jedoch auf der unsicheren Seite liegenden Abweichungen. Die im Rahmen dieses Projekts erarbeiteten Tragsicherheitsnachweise wurden mit $e_{Anker,A}$ geführt. Weder DIN 4119-2 [1] noch DIN 18800-4

[16] machen hierzu Angaben. Ebenso sind keine aus der Verankerung resultierenden Regeln zur Mindeststeifigkeit des Fußrings enthalten.

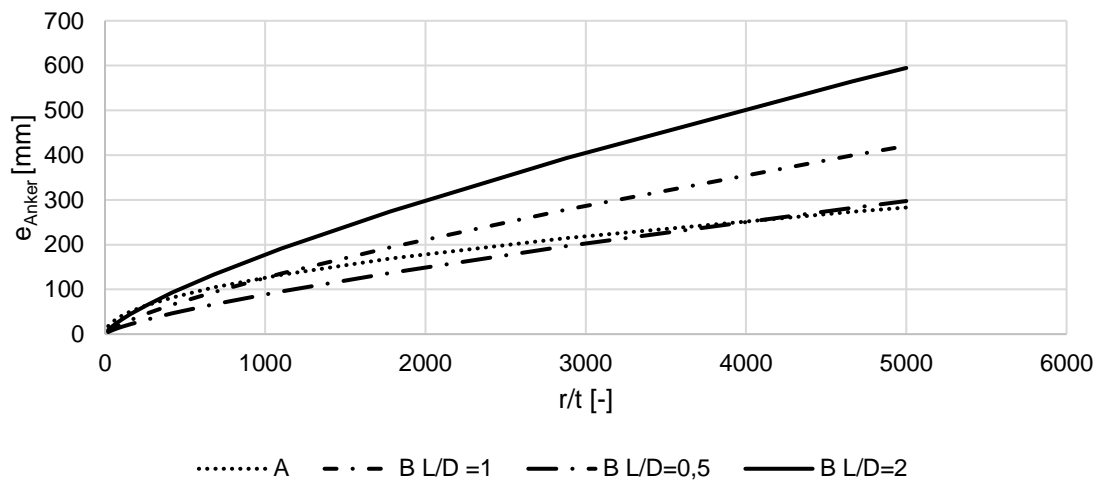


Abbildung 54: Vergleich der Mindestankerabstände

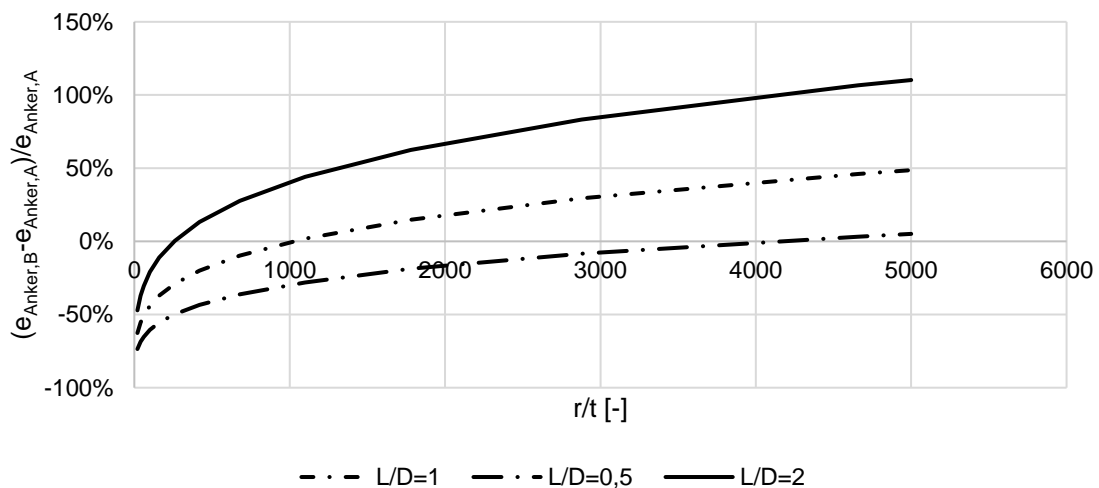


Abbildung 55: relative Abweichung zwischen $e_{\text{Anker,A}}$ und $e_{\text{Anker,B}}$

6.7 Öffnungen

Folgende normativen Regelungen zum Umgang mit Öffnungen liegen vor:

- DIN 4119-2 [1] Abs. 4.2.2 macht nur Angaben zum Spannungsnachweis (kein Kommentar zur Auswirkung auf das Stabilitätsverhalten).
- DIN 4119 macht keine Angaben zu dem Wirkungsbereich einer Verstärkung.
- EN 1993-4-2 [3] Abs.5.4.6 erlaubt zwei Methoden (Methode 1 = rechnerischer Ansatz durch Betrachtung der Ausfallfläche / Methode 2 = Mindestanforderungen an den Stüt-

zen unter Berücksichtigung der Spannungskonzentration) zur Bestimmung der Verstärkungseigenschaften und bietet drei Ausführungsmöglichkeiten. Kleine Öffnungen (Grenzkriterium) müssen nicht verstärkt und nachgewiesen werden.

- Wird eine Verstärkung analog zu DIN 4119-2 [1] in Form eines Verstärkungsblechs gewählt, muss nach EN 1993-4-2 [3] ein wirksamer Durchmesser eingehalten werden.

Auf eine formale Gegenüberstellung der Verfahren wird verzichtet und nur ausgewählte Fälle verglichen. Dabei wird jeder der Untersuchungstanks mit einer Öffnung $D = 600$ mm versehen. Folgende drei Punkte werden für die in Tabelle 10 aufgeführten Tanks untersucht:

Tabelle 10: Zuordnung der Untersuchungstanks

Untersuchungstank	Größe	Randbedingungen
1	klein	innen
2		außen
3	mittel	außen
4		innen
5	groß	außen

- Methode 1 nach EN 1993-4-2 [3] mit DIN 4119-2 [1]: Für eine direkte Vergleichbarkeit wird die Wanddicke des Stutzens nicht berücksichtigt. Hierbei wird in der Berechnung nach EN 1993-4-2 [3] die Geometrie der Verstärkung so gewählt, dass die Ausfallfläche abgedeckt wird und die Bedingungen für einen wirksamen Radius eingehalten sind. Nach DIN 4119-2 [1] wird die lokal vorhandene Manteldicke gewählt und das Verstärkungsblech in derselben Dicke vorgesehen.

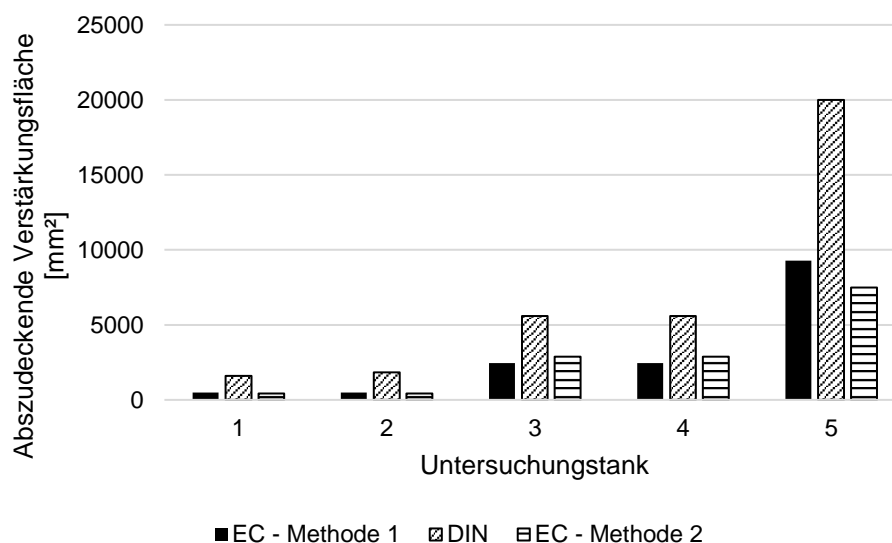


Abbildung 56: Abszudeckende Ausfallflächen nach Methode 1 nach EC mit DIN und Methode 2 nach EC

Abbildung 56 verdeutlicht, dass nach DIN 4119-2 [1] deutlich größere Verstärkungsflächen erforderlich sind. Dies hat zwei Gründe: Nach EN 1993-4-2 [3] (5.1) darf zum Einen nur 75 % der ausgefallenen Fläche berücksichtigt werden, zum Anderen wird die ausgefallene Fläche nicht über die tatsächlich vorhandene Manteldicke, sondern über die für LS1 erforderliche Manteldicke berechnet.

Ergänzend sind in Tabelle 11 die Mantel- und Verstärkungseigenschaften nach EN 1993-4-2 aufgeführt.

Tabelle 11: Zusammenstellung der Stutzeigenschaften nach EN 1993-4-2 – Methode 1

Untersuchungstank	t_{loc} [mm]	t_{LS1} [mm]	t_{Verst}	d_{Verst} [mm]	$D_{wirk,max}$ [mm]	$A_{verst,erf}$ [mm ²]
1	2	1,1	2,0	1088	1180	480
2	2,3	1,1	2,3	1025	1180	480
3	7	5,7	8,6	1200	1140	2448
4	7	5,7	8,6	1200	1140	2448
5	25	22,1	33,2	1200	1120	9276

- Methode 2 nach EN 1993-4-2 [3]. Hierbei werden basierend auf der Spannungskonzentration Mindestanforderungen an den Stützen gestellt.
 Eine Umrechnung der mit diesem Verfahren bestimmten Mindesteigenschaften an die Stützen in Form einer Ersatzfläche ist in Abbildung 56 mit den abzudeckenden Ausfallflächen nach Methode 1 EC und DIN dargestellt. Die Abweichungen zwischen den Methoden fallen bis auf den Tank 5 gering aus.
- Auflistung, bei welchen Teilzylindern nach EN 1993-4-2 [3] ein gesonderter Nachweis gegen Beulen notwendig ist. Ob diese mit Hilfe numerischer Verfahren oder durch geeignete theoretische Überlegungen erfolgen, bleibt dem Ingenieur überlassen.

Tabelle 12: Notwendigkeit für einen genaueren Stabilitätsnachweis zur Berücksichtigung der Öffnung.

Untersuchungstank	LS 3
1	genauer NW nötig
2	genauer NW nötig
3	genauer NW nötig
4	genauer NW nötig
5	keine gesonderte Stabilitätsuntersuchung

6.8 Bodenblech

Nach DIN 4119-2 [1] Abs. 7.1 ist kein Nachweis für das Bodenmittenblech notwendig („Die Dicke wird nach konstruktiven Erfordernissen bestimmt.“). Zusätzlich sind Mindestdicken angegeben.

Diese sind in Tabelle 13 den Mindestanforderungen nach EN 1993-4-2 [3] Tabelle 11.1 gegenübergestellt. Generelle Regeln neben dem vereinfachten Verfahren nach Abs. 11 sind nicht vorhanden. Ein Festigkeitsnachweis nach DIN 4119-2 [1] Abs. 7.1 ist bei den gewählten Geometrien nicht erforderlich, sodass hier die nach (4a) bestimmten Mindestdicken mit denen nach EN 1993-4-2 Abs. 11.4 in Tabelle 13 verglichen werden. Für den Vorschlag zur Anlage zur M-VVTB wird die Unterscheidung nach der Schweißnahtart gestrichen und die Werte für eine Stumpfschweißung angesetzt. Den Autoren sind keine Gründe bekannt, die diese Unterteilung im vorliegenden Kontext notwendig machen.

Tabelle 13: Mindestdicken des Bodenblechs

Werkstoff	Überlappschweißung	Stumpfschweißung
EC – Unlegierte Stähle	6 mm	5 mm
EC – Nichtrostende Stähle	5 mm	3 mm
DIN – ferritisch-perlitische Stähle	6,5 mm	5 mm

Die Berechnung der Dicke des Bodenmittenblechs nach EN erfolgt auf Basis der Forderung in EN 1993-4-2 [3] Abs. 11.4 (3), wonach das Bodenblech nicht abheben darf. Allgemeingültige Anforderungen außerhalb des Abs. 11 werden nicht getroffen. Auf weitergehende Membranbetrachtungen, bei denen ein abhebender Boden („fliegendes Bodenblech“) berücksichtigt wird, werden im Rahmen dieser Vergleichsberechnungen nicht angestellt. Das Bodenrandblech wird hier nach den Anforderungen in Abs. 11.4 (5) bestimmt. Ein Vergleich mit den Mindestanforderungen an eine ersatzweise angebrachte schwere Ringsteife ist den statischen Berechnungen zu entnehmen. Dieser Vergleich ist mit Vorsicht zu betrachten, da das durchgehende Bodenblech als starre Scheibe wirkt. Damit überschätzt die Auslegung als schwere Steife die Anforderungen an das Bodenrandblech.

Tabelle 14 stellt die Mindestdicken für die Bodenrandbleche nach DIN 4119-2 [1] und EN 1993-4-2 [3] gegenüber. Nach EC muss bei den kleinen Tanks kein Bodenrandblech vorgesehen werden. Eine ähnliche Regelung ist in DIN 4119-2 [1] nicht enthalten. Allgemein sind die Mindestdicken analog zu denen im Mittenblech nach DIN etwas höher. Eine Ausnahme stellt der kleine Tank dar. Hier existiert in DIN 4119 [1] keine explizite Beschränkung, dass das Bodenrandblech die Dicke des Bodenmittenblechs unterschreiten darf.

Tabelle 14: Mindestdicken des Bodenrandblechs [mm]

		EC	DIN
Klein	innen	5	2
	außen	5	2,3
Mittel	innen	6	6,5
	außen	6	6,5
Groß		6	6,5

Zusätzlich gelten die Anforderungen nach EN 1993-4-2 [3] Abs. 8. Hier wird durch den Verweis auf EN 1993-4-1 [18] eine Mindeststeifigkeit des Bodenrandblechs gefordert.

7 Beurteilung des „vereinfachten Verfahrens“ nach Kapitel 11

7.1 Allgemeine Kommentare zum vereinfachten Verfahren

Das vereinfachte Verfahren kann nach EN 1993-4-2 [3] Abs. 4.2.2.1 (3) unabhängig von der vorliegenden Schadensfolgeklasse angewendet werden. Damit wird eine parallele Bemessungswelt zugelassen, die teilweise nicht den Anforderungen nach EN 1993-1-6 [4] entspricht. Einige der Bauteilnachweise werden ausschließlich in diesem Abschnitt angesprochen. Ein sinnvoller Ansatz kann die Angliederung der vereinfachten Berechnungsverfahren an die jeweiligen Abschnitte des allgemeinen Teils (Abs. 5 bis Abs. 11) sein.

Anwendungsgrenzen:

[EN 1993-4-2 Vgl. Abs. 1.1 mit 11.1] Anwendungsbereich nach 1.1: „Maximale Auslegungsfüllhöhe nicht über dem oberen Rand des zylindrischen bzw. rechteckigen Tanks“. Anwendungsbereich nach 11.1 „die maximale Auslegungsfüllhöhe liegt nicht über dem oberen Rand des zylindrischen Mantels“. Die Grenze nach 11.1 ist damit unnötig, da die gesamte Norm auf diese Anwendung beschränkt ist.

Weitere Diskussionspunkte in Bezug auf die Anwendungsgrenzen

- j) Was bedeutet „geringer Abstand“?
- k) Gilt dies auch für den Flüssigkeitsdruck?

[EN 1993-4-2 Abs. 11] Was bedeutet „Tank entspricht der gegebenen Abbildung (Bild 11.1)“? Welches sind die relevanten Eigenschaften? H/D? Dachform? Aufbau des Mantels? Auffangta-sse? Hier muss eine klare Definition erfolgen.

Verweise auf dieses Verfahren:

Zahlreiche Verweise aus anderen Normen bzw. allgemeine Bemessungsansätze beziehen sich auf die hier enthaltenen Hilfsmittel. So sollte die Anwendung der vereinfachten Winddruckverteilung, die nach Abs. 11.3.1 (9) auf der sicheren Seite liegt, damit auch für die Bauwerke, die nicht nach diesem Verfahren bemessen werden, gültig sein. Damit beziehen sich die allgemeinen Fälle auf einen Sonderfall mit den in 11.1 definierten Anwendungsgrenzen. Beschränken sich diese Verweise damit nur auf die Sonderfälle oder erlangen diese damit allgemeine Gültigkeit? Hier sollte über eine Umstrukturierung nachgedacht werden.

Dasselbe gilt für spezielle Bauteilnachweise und konstruktiven Anforderungen, die ausschließlich innerhalb dieses vereinfachten Verfahrens definiert sind. Hinweise für den allgemeinen Fall sind nicht gegeben.

7.2 Bemessung des Mantelblechs – Abs. 11.3.1

Das Verfahren entspricht dem Vorgehen nach DIN 4119-2 [1] und bezieht sich nur auf die Membranspannungen. Die Anwendung des in EN 1993-4-2 [3] angegebenen Teilsicherheitsbeiwerts von $\gamma_M = 1,0$ führt zu unsichereren Ergebnissen als nach DIN 4119-2. Die Regelungen zu den Teilsicherheitsbeiwerten im Nationalen Anhang [13] gleichen diesen Unterschied wieder aus. Einen weiteren Unterschied stellt die Einwirkungsseite dar. Nach DIN 4119-2 kann der Überdruck über der Flüssigkeit p_{Ed} als „kontrollierte Einwirkung“ mit $\gamma = 1,35$ bestimmt werden. In der EC-Reihe ist eine solche Abminderung nicht vorgesehen und der planmäßige Überdruck wird als „Sonstige Einwirkung“ mit $\gamma = 1,5$ beaufschlagt.

Von der Möglichkeit, den Nachweis 30 cm über der Schussunterkante zu führen und damit etwas kleinere Spannungen zu erhalten, wurde im Rahmen dieser Untersuchung kein Gebrauch gemacht, da in den oberen Schüssen die Stabilitätslastfälle maßgebend werden und die Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit des Bauwerks vernachlässigbar erscheinen.

Kommentare zum Vergleich mit dem Sicherheitsniveau nach einer Berechnung gemäß EN 1993-1-6 [4] und dem vereinfachten Nachweis nach Abschnitt 11 entsprechen damit dem Vergleich in Kapitel 6.3 mit den aufgeführten Änderungen. Generell ist mit diesem Verfahren und der Anwendung des NA ein gleichbleibendes bzw. eine leichte Zunahme des Sicherheitsniveaus im Vergleich zur DIN 4119 gegeben.

7.3 Ringsteife – Abs. 11.3.2

a) Gesamtstabilität

Dieses Verfahren soll den Umfangsbeul- und den Beul-Interaktionsnachweis ersetzen und vereinfachen. Dazu wird eine vorhandene Ersatzlänge H_E des Mantels, die etwaige Wanddickensprünge berücksichtigt, bestimmt. Diese wird einer maximal ohne Steifen ertragbaren Höhe H_S entgegengestellt. H_S wird in Abhängigkeit von dem Bemessungsaußendruck, der vorherrschenden Axialspannung und der minimalen Wanddicke bestimmt.

Die folgende Studie zeigt anhand der Untersuchungstanks, dass das Verfahren in allen Fällen zu einer konservativen Bauteilauslegung im Vergleich zu den spannungsbasierten Stabilitätsnachweisen nach EN 1993-1-6 führt.

In einem ersten Schritt wurden die Teilzylinder der Untersuchungstanks (vgl. Tabelle 15) mit gleichmäßigem Außendruck bis zu einem Ausnutzungsgrad von 1,0 nach EN 1993-1-6 (Spannungsbasierter Nachweis & Spannungen nach Membrantheorie) beaufschlagt. Die Ausnutzungsgrade nach EN 1993-1-6 werden als $\eta_{1-6} = \sigma_{\theta Ed} / \sigma_{\theta Rd}$ berücksichtigt. In diesen Zuständen

wurde nach EN 1993-4-2 Abs. 11.3 die maximal ertragbare Länge H_S und die vorhandene Ersatzlänge H_E bestimmt. Daraus ergibt sich mit $\eta_{4-2Abs11} = H_E/H_S$ der zugehörige Ausnutzungsgrad. Abbildung 57 bestätigt den konservativen Charakter dieses Verfahrens für alle Teilzylinder, da kein Versagen nach EN 1993-1-6 bei der Anwendung des vereinfachten Verfahrens unbemerkt bleibt.

Tabelle 15: Auflistung der geometrischen Eigenschaften der Teilzylinder

Teilzylinder	Tank	Teilzylinder	D [mm]	R [mm]	t [mm]	H_{TZ} [mm]
1	klein innen		5.000	2.500	1,8	7.500
2	klein außen		5.000	2.500	2,1	7.500
3	mittel innen	1 TZ	20.000	10.000	4,5	6.000
4		2 TZ	20.000	10.000	5	9.000
5	mittel außen	1/2 TZ	20.000	10.000	6	4.500
6		3 TZ	20.000	10.000	6,5	6.000
7	groß außen	1 TZ	60.000	30.000	8	2.940
8		2 TZ	60.000	30.000	10	5.880
9		3 TZ	60.000	30.000	13	13.235

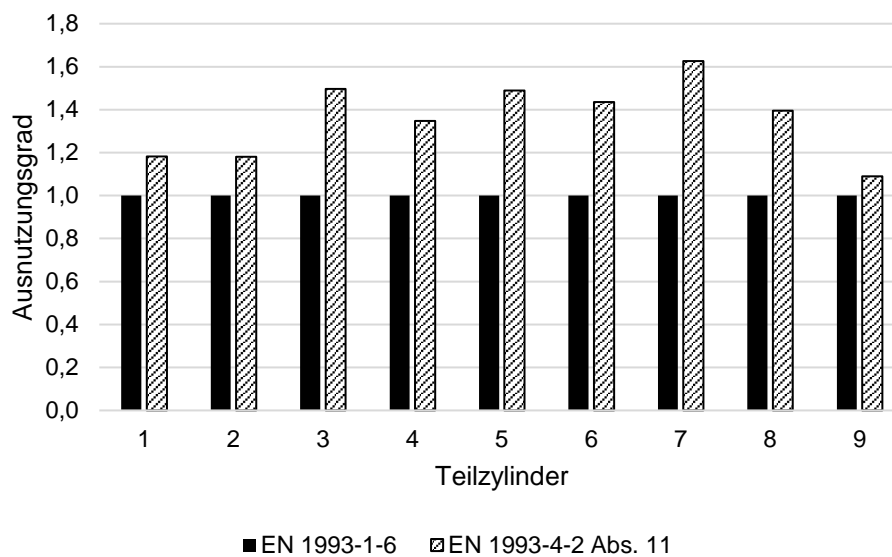


Abbildung 57: Ausnutzungsgrade nach EN 1993-1-6 und EN 1993-4-2 Abs. 11 – Umfangsbeulen – rechnerischer Grenzzustand nach EN 1993-1-6.

b) Steifigkeit der Ringsteife:

Es werden die in den Standsicherheitsnachweisen bestimmten Ringsteifen mit dem vereinfachten Ansatz nach Abs. 11 verglichen (Verfahren [7] S. 341 Kap. 17 Cylindrical shells with ring stiffeners under uniform external pressure nach Schmidt, Greiner).

Das vereinfachte Verfahren ist nicht klar definiert. In der Anwendung muss die Steifigkeit der steifsten vorhandenen Ringsteife I_{Rj} angesetzt werden. Da diese zunächst unbekannt ist, muss das Verfahren iterativ angewendet werden. In Abbildung 58 sind die resultierenden Steifigkeiten nach den unterschiedlichen Verfahren gegenübergestellt. In allen betrachteten Fällen führt die Lösung nach Schmidt/Greiner [7] zu sehr viel kleineren Ringsteifen (6 % - 14 % der Steifigkeit verglichen mit der Lösung nach Abs.11.3.2).

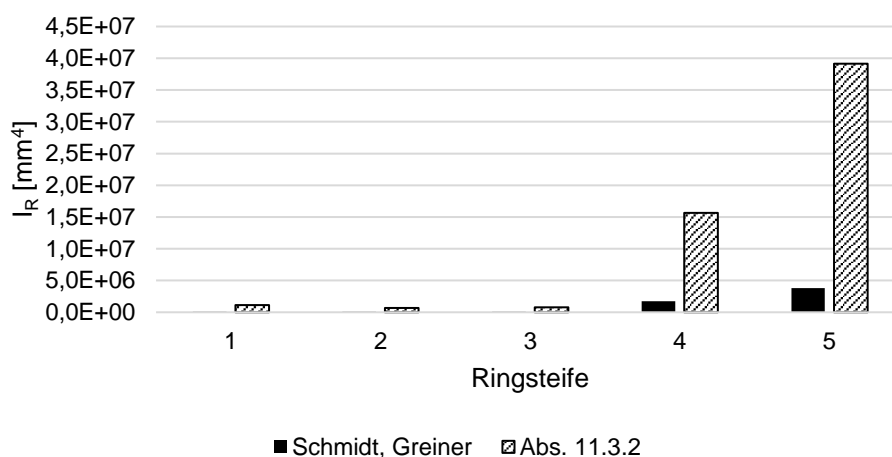


Abbildung 58: Vergleich der Steifigkeiten I_R der Ringsteifen nach Schmidt/Greiner [7] und nach dem vereinfachten Verfahren nach EN 1993-4-2 Abs. 11.3.2

7.4 Verankerung – Abs. 11.5

- Es sind vier Lastfälle definiert, die zeigen, ob eine Verankerung notwendig ist (unter Anwendung der Balkentheorie). Aufgrund folgender Widersprüche besteht hier Handlungsbedarf, da die aufgeführten Lastfälle, z.B. beim mittleren Untersuchungstank, zu einer Fehleinschätzung führen.
 - o Kleiner Tank: maßgebender Lastfall $\eta = 125 \%$, Kippen Starrkörper. Eine Betrachtung nach Balkentheorie zeigt ebenfalls eine resultierende abhebende Last. Die Ermittlung der Ankerlasten nach EN 1993-4-1 [18] Abs. 5.4.7 führt zu einer abhebenden Linienlast von 30 kN/m (ohne Abstützkräfte und Reduktion nach Knödel/Ummenhofer [37]). Das vereinfachte Verfahren nach Gehrig [38] liefert eine abhebende Linienlast von 20 kN/m.
 - o Mittlerer Tank: maßgebender Lastfall $\eta = 56 \%$ Kippen Starrkörper → nach diesem Ansatz müsste keine Verankerung vorgesehen werden. Nach Balkenlösung treten ebenfalls keine Ankerlasten auf.

Die Berechnung der Ankerlasten nach EN 1993-4-1 [18] Abs. 5.4.7 führt zu einer abhebenden Linienlast von 83 kN/m (ohne Abstützkräfte und Reduktion nach Knödel/Ummerhofer [37]). Das Verfahren nach Gehrig [38] führt zu einer abhebenden Linienlast von 19 kN/m.

- Angabe zu Korrosionszuschlag sowie einer Mindestquerschnittsfläche der Verankerung. Diese Angaben sind nicht sinnvoll. Erstere wird durch die Norm generell gefordert, Zweitere liefert als absoluter Wert keine allgemeingültige und sinnvolle Angabe.
- Gleichung (6) ist widersprüchlich. Hier wird gefordert, dass die Bemessung des Tankmantels für die lokale Beanspruchung nach EN 1993-4-1 [18] Abs. 5.4.6 und 5.4.7 geführt werden soll. Im gesamten Abschnitt ist keine Bemessungsregel für die Anker angegeben. Diese ist in EN 1993-4-1 [18] Abs. 5.4.7 aufgeführt.

7.5 Dach – Abs. 11.2

Unversteiftes Kegeldach – Abs. 11.2.1

Der Festigkeitsnachweis nach (11.3) entspricht einem einaxialen Nachweis gegen Umfangszugspannungen. Nach EN 1993-1-6 A.3.6 ergeben sich für die Spannungskomponenten σ_θ und σ_x folgende Werte.

$$\sigma_x = \frac{p}{2t} \frac{r}{\sin \alpha}$$
$$\sigma_\theta = \frac{p}{t} \frac{r}{\sin \alpha}$$

Damit ergibt sich σ_x ohne Berücksichtigung von Biegestörungen zu 0,5 σ_θ . Unter dem hier maßgebenden Lastfall Innendruck handelt es sich bei beiden Komponenten um Zugspannungen. Werden beide Komponenten in eine Vergleichsspannung unter der Annahme eines ebenen Spannungszustandes umgerechnet, ist eine im Vergleich zu σ_θ reduzierte Spannung festzustellen.

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_\theta^2 + \sigma_x^2 - \sigma_\theta \sigma_x}$$
$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_\theta^2 + \frac{\sigma_\theta^2}{4} - \sigma_\theta \frac{\sigma_\theta}{2}}$$
$$\sigma_v = 0,866 \sigma_\theta$$

Damit kann der Nachweis als konservative Näherung geführt werden.

Ein Vergleich der Festigkeitsnachweise für die beiden kleineren Tankgeometrien ist in Abbildung 59 zusammengefasst. Zusätzlich sind die Ausnutzungsgrade der Stabilitätsnachweise und der Dacheckringe (nur mittragende Breiten, ohne zusätzliche Verstärkung) aufgeführt. In beiden betrachteten Fällen sind die Ausnutzungsgrade der Festigkeitsnachweise so gering ($\leq 2\%$),

dass eine qualifizierte Auswertung nur nach Betrachtung weitere Geometrien und Lastfällen möglich ist.

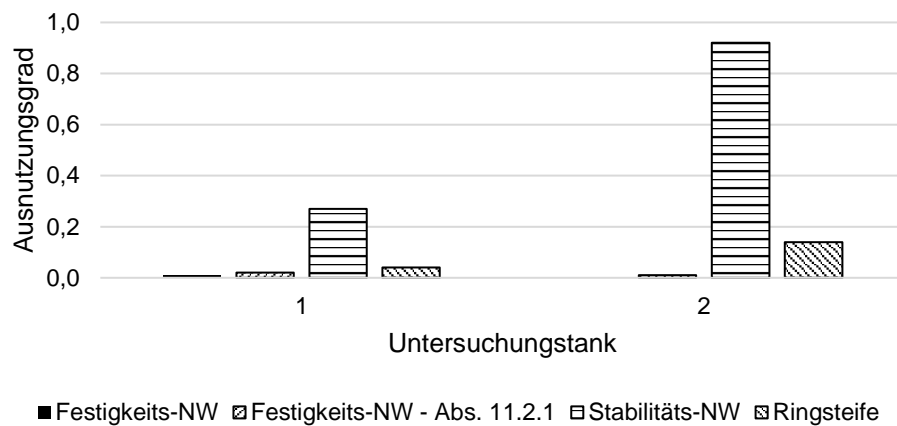


Abbildung 59: Vergleich der Ausnutzungsgrade - unversteiftes Dach

Der Stabilitätsnachweis hat nach EN 1993-4-1 [18] Abs. 7.3 zu erfolgen. Insofern liefert die Vereinfachung keine Hilfestellung. Hier widerspricht sich die EN 1993-4-1 [18] und ist nach der angefügten Mail von Prof. Rotter, Chairman der zuständigen Normenausschüsse vom 25.10.2017, Teil aktueller Überarbeitungen. Nach EN 1993-4-1 [18] Abs. 8.3.3 (4) stabilisieren sich Dach und Mantel bis zu einer Dachneigung gegen die Horizontale von $\alpha = 70^\circ$ (umgerechnet). Danach kann ein Stabilitätsnachweis des Systems aus Dacheckring und Dach entfallen. Das Verfahren nach EN 1993-4-1 [18] Abs. 7.3 ist dagegen nur für die Sonderfälle $\alpha \leq 40^\circ$ und $D \leq 5$ m anwendbar und würde nach der obigen Forderung entfallen. Dies würde dann auch für die Betrachtung des Dacheckrings nach EN 1993-4-2 [3] Abs. 11.2.5 (2) gelten.

Ungeachtet der vorigen Ausführungen sind die in EN 1993-4-2 [3] Abs. 11.2.5 (2) genannten maximalen Sparrenabstände, bis zu deren Erreichen Biegeeffekte im Dacheckring nicht zusätzlich betrachtet werden müssen, nicht allgemeingültig gewählt. Hier wäre ein steifigkeitsbasiertes Kriterium, das zu Maximalabständen führt, sinnvoller.

Unsymmetrische Beanspruchungen werden gemäß den Erläuterungen in <<Dokumentation VATANK.pdf>> nicht maßgebend bzw. sind in den Verfahren berücksichtigt.

Kugeldach – Abs. 11.2.1 & Abs. 11.2.2

Diese Dachform wurde im Rahmen dieser Vergleichsberechnungen nicht explizit behandelt. Damit beschränken sich die Ausführungen auf wenige Kommentare.

- In Gleichung (11.4) lässt sich die ideelle Beulspannung für Kugelschalen, umgerechnet auf einen Außendruck, identifizieren. Dies entspricht $1,22 E (t/R)^2$ [39]. Imperfektionen werden pauschal berücksichtigt, indem dieser kritische Außendruck auf 5 % reduziert

wird. Ein plastisches oder teilplastisches Verhalten wird damit nicht berücksichtigt. Die für Kugelschalen übliche maximale Abminderung auf 15 % wird dadurch großzügig überschritten. Damit liegt das Verfahren auf der sicheren Seite. Aktuelle Studien [40] versuchen diese Abminderung zu reduzieren und zuverlässig wirtschaftlichere Schalen bauen zu können.

- Die Hintergründe von Abs. 11.2.2 (7) sind unbekannt. Der vorhandene Sparrenabstand wird hier nicht berücksichtigt. Dennoch handelt es sich um ein praxisübliches Verfahren, auf das keine bekannten Schadensfälle zurückzuführen sind.

Dacheckring - Abs. 11.2.5

Die Angaben nach Abs. 11.2.5 sind das Resultat eines Kräftegleichgewichts an der Dachecke. Damit handelt es sich um eine reine Hilfestellung, ohne die der Ingenieur zum gleichen Ergebnis käme.

Anmerkung (2) fordert eine detaillierte Untersuchung des Sparrenanschlusspunktes ab einem Sparrenabstand $> 3,25$ m. Diese Regelung ist unstimmg und gilt nur für einen bestimmten Bereich von Tankdurchmessern. Hier wäre ein von dem Steifigkeitsverhältnis abhängiger Abstand, verglichen mit EN 1993-1-1 Abs. BB.3, allgemeingültiger und sinnvoller.

Bild 11.4 beschreibt die mitwirkenden Breiten in Mantel und Dach mit $0,6 \sqrt{R t}$. Nach EN 1993-4-2 [3] Abs. 4.2.2.3 (5) kann für die mittragende Breite $0,78 \sqrt{R t}$ angesetzt werden. Dies führt zu konsistenten Ansätzen und wirtschaftlicheren Lösungen. In [11] Abs. 9.3 wird dieser Ansatz kritisch diskutiert und gezeigt, dass diese Ansätze am Dacheckring den dort auftretenden Verformungsfiguren widersprechen. Hiernach müsste die mittragende Breite in diesem Bereich deutlich geringer ausfallen.

7.6 Öffnungen – Abs. 11.3.3

Es werden keine vereinfachenden Angaben zur Beurteilung von Öffnungen gegeben. Es wird auf EN 1993-4-2 [3] Abs. 5.4.6 verwiesen.

7.7 Boden – Abs. 11.4

Vgl. Abs. Kapitel 6.8

8 Weitere Anmerkungen und Vorschläge

8.1 Tanks aus Aluminium

Aluminiumtanks werden nach EN 1993-4-2 [3] formal nicht mehr erfasst. Deren Anwendbarkeit nach DIN 4119 [1] ist in Kapitel 6.1 diskutiert. Unter Berücksichtigung von materialspezifischen Eigenschaften und unter Anwendung der generischen Aluminiumnormen der Reihe EN 1999 [41] kann EN 1993-4-2 sinngemäß auch auf Tanktragwerke aus Aluminium übertragen werden. Es wird darauf hingewiesen, dass die Regeln zum Stabilitätsnachweis in EN 1999-1-5 fehlerhaft sind, siehe [17], allerdings liegen die Abweichungen auf der sicheren Seite.

8.2 Umgang mit Setzungen EN 1993-4-2 [3] Abs. 1.1 (2)

Zu den Auswirkungen von ungleichmäßigen Setzungen auf Tankbauwerke gibt es keine brauchbaren Bemessungsempfehlungen. Hintergründe zu der Problemstellung werden in [42] diskutiert. In wieweit die Ausarbeitung praktikabler Regeln möglich ist, muss diskutiert werden. Zudem werden in der angefügten Mail von Prof. Rotter die Auswirkungen der Regelung in EN 1993-4-2 [4] 7.4.2.2 (3) kommentiert.

8.3 Kopplung von Schadensfolgeklassen und Berechnungsansätzen

Aufgrund der Schadensfolgeklasse wird in EN 1993-4-2 [3] unter Bezug auf EN 1993-1-6 [4] das anzuwendende Berechnungsverfahren vorgegeben.

Einfache (Hand-)Rechenmodelle sollten generell so gestaltet sein, dass diese zu konservativen Lösungen führen und der erhebliche Mehraufwand einer numerischen Berechnung wirtschaftlichere Ergebnisse liefert. Verboten man die Handrechenmodelle für höhere Schadensfolgeklassen, steigert dies nicht das Sicherheitsniveau. In den meisten Fällen sinkt dies a) durch eine weniger konservative Lösung und b) durch das häufig fehlende Know-how [43].

Die Membranschnittgrößen eines Zylinders können unabhängig von der Größe mit Hilfe von Gleichgewichtsbedingungen der Kesselformel exakt ermittelt werden. Eine numerische Berechnung ist daher obsolet. Auch Biegestörungen lassen sich in einer Handrechnung für die Grundtypen der Randbedingungen (gelenkig, eingespannt) exakt ermitteln [17, 44]. Wird die Membrantragwirkung, z.B. durch komplexe Geometrien, Querschnittssprünge, Rippenanordnung oder Stützen, gestört und können diese nicht durch Ersatzmodelle abgebildet werden, sind numerische Untersuchungen erforderlich. Eine Verknüpfung des anzuwendenden Berechnungsverfahrens mit der Geometrie/Komplexität des Bauwerks und damit eine Entkopplung von der Schadensfolgeklasse wird daher als sinnvoller erachtet.

Aus Sicht der Bearbeiter und einiger Fachkollegen [45] sind Untersuchungen nach der GMNA/GMNIA (derzeit) für die konkrete Bauwerksbemessung aufgrund des verhältnismäßig hohen Aufwandes ungeeignet. Sie haben ihren Einsatzzweck eher im wissenschaftlichen Bereich, z.B. bei der Bestimmung von Interaktionsbeiwerten für einfachere Berechnungsverfahren

und bereiten den Weg für die Anwendung von komplexeren numerischen Simulationen im Bauwesen.

Die Anwendung des vereinfachten Verfahrens nach DIN EN 1993-4-2 [3] Abs. 11 hebt die Vorgaben des Berechnungsverfahrens aus. Demnach kann jeder Tank unabhängig von der Schadensfolgeklasse berechnet werden.

Die Auswirkungen von geometrischen Bedingungen, die stark von dem idealen Zylinder abweichen, z.B. durch lokale Versteifungen, wird in [23] anhand unterschiedlich versteifter Mantelöffnungen dargestellt. Hierbei wird der Membrankraftfluss so verändert, dass ein gezielter numerisch basierter Beulsicherheitsnachweis unabhängig von der Schadensfolgeklasse notwendig sein kann. Der vereinfachte Ansatz nach [46] ermöglicht für bestimmte Situationen eine händische Bemessung und wurde in DAST-Richtlinie 017 [47] übernommen.

8.4 Schadensfolgeklassen (SFK)

Die Schadensfolgeklasse sollte aus Sicht der Autoren ähnlich der Bedeutungskategorie nach EN 1998 [48] das globale Sicherheitsniveau (in Bezug auf Berechnung und Ausführung) definieren. Die Methode der Berechnung sollte davon unabhängig sein. So wird beispielsweise mit der Argumentation, der Tank sei für landwirtschaftliche Zwecke vorgesehen, dieser unabhängig gemacht von der Größe, der Explosionsgefahr oder der Art des Gefahrstoffs. Die Schadensfolge kann damit nicht abgeschätzt werden. Fraglich ist der Umgang mit Tanks im ländlichen Raum, die wassergefährdende Stoffe enthalten oder großen Wassertanks in städtischem oder ländlichem Gebiet, die im Versagensfall zu Flutwellen und Überschwemmungen führen können. Zudem birgt ein Löschwassertank, der auf dem Dach eines Hochhauses aufgestellt ist, aufgrund der höheren potentiellen Energie, eine höhere Schadensfolge im Vergleich zu dem gleichen sich auf dem Boden befindenden Tank.

Die Bestimmung der Schadensfolgeklasse sollte daher unabhängig vom Anwendungsbereich die tatsächliche Schadensfolge beschreiben. Aus Sicht der Autoren stellt die potentielle Energie des Lagermediums hierfür ein geeignetes Maß dar. Die Schadensfolge durch Wassergefährdende, brennbare, toxische oder explosive Lagermedien sollten zusätzlich durch Erhöhungsfaktoren berücksichtigt werden. Versagensformen (z.B. Umfangsbeulen bei einem leeren Tank), die nicht zum Austreten des Lagermediums führen, sollten mit einer geringeren Sicherheit belegt werden können.

Dies wird durch die Anmerkung in EN 1990 B.3.1 (3) „Zur Zeit sind die Zuverlässigkeitsanforderungen auf die einzelnen Teile eines Bauwerks bezogen.“ untermauert und in der Vorlage für die Anlage zur M-VVTB durch folgende Formulierung berücksichtigt:

- Kann nachgewiesen werden, dass ein Versagen einzelner Bauteile oder spezifische Versagensformen nicht zu einem Austreten des Lagermediums führen, können die Auswirkungen von (5) und (6) auf K_{Fi} bei Einzelnachweisen entfallen.

Die uneinheitlichen Definitionen (mit erheblichem Interpretationsspielraum) sind für die anzuwenden Schadensfolgeklassen nach EN 1993-4-2 [3] Abs. 2.2 (3) bzw. den Änderungen und dem deutschen Nationalen Anhang in [17] zusammengefasst und werden im Folgenden wiederholt und diskutiert.

8.4.1 Vergleich DIN EN 1993-4-2 [3] mit DIN EN 1993-4-2/NA [13]

Schadensfolgeklasse 1:

Bei beiden Normen ist die SFK 1 gleich definiert.

Schadensfolgeklasse 2:

Nach DIN EN 1993-4-2 [3] werden Tanks „mittlerer Größe“ (genauere Definition nach NA) zu dieser SFK zugeordnet, wohingegen im NA die Tanks genauer definiert („mit einem Lagervolumen von max. 500 m³“) sind. Beide Normen beziehen sich aber auf feuergefährliche oder wassergefährdende Flüssigkeiten in städtischen Gebieten.

Schadensfolgeklasse 3:

DIN EN 1993-4-2	DIN EN 1993-4-2/NA
Tanks, die Flüssigkeiten oder verflüssigte Gase enthalten, die giftig oder explosiv sind	Alle Tanks, die nicht von SFK 1 und/oder von der SFK 2 erfasst sind.
große Tanks mit feuergefährlichen oder wassergefährdenden Flüssigkeiten in städtischen Gebieten	
Störlastfall sollte berücksichtigt werden	

8.4.2 Vergleich mit DIN EN 1993-4-2/A1

Die Unterteilung der Schadensfolgeklassen nach diesem Entwurf orientiert sich an der Größe bzw. dem Inhalt des Tanks, als nach DIN EN 1993-4-2 [3] oder dem NA [13], so können z.B. auch große Wassertanks der SFK 3 zugeteilt werden. Dabei richtet sich das Kriterium indirekt nach der potentiellen Energie des Lagermediums. Die Kriterien, abzuleiten durch den Faktor $U = \sqrt{D \cdot H}$ und Hg, spiegeln jedoch keine physikalisch einordenbare Größe wieder. Zudem sind die Ausführungen sehr unübersichtlich.

Schadensfolgeklasse	Bemessungszustände
Schadensfolgeklasse 3	a) Tanks, die Flüssigkeiten oder Flüssiggase mit toxischem oder explosiven Potential; b) alle Flachboden-Tanks, die zur Lagerung von Flüssigkeiten auf einem Gebäude oder im oberen Teil eines Gebäudes verwendet werden; c) alle Tanks mit einem Untergestell mit einer Schwerpunkthöhe $H_g \geq H_{ga}$ (siehe Bild 2.1 b)); d) bodengelagerte Wassertanks mit dem Parameter U im Bereich $U > U_{3a}$; e) bodengelagerte Tanks, die wassergefährdende Flüssigkeiten lagern, mit dem Parameter U im Bereich $U > U_{3b}$; f) bodengelagerte Tanks, die brennbare Flüssigkeiten lagern, mit dem Parameter U im Bereich $U > U_{3c}$. Falls erforderlich sollten Störfalllasten bei diesen Bauwerken berücksichtigt werden, siehe A.2.14.
Schadensfolgeklasse 2	a) Alle Tanks mit einem Untergestell, die nicht zur Schadensfolgeklasse 3 gehören; b) bodengelagerte Wassertanks mit dem Parameter U im Bereich $U_{2a} < U \leq U_{3a}$; c) bodengelagerte Tanks, die wassergefährdende Flüssigkeiten lagern, mit dem Parameter U im Bereich $U_{2b} < U \leq U_{3b}$; d) bodengelagerte Tanks, die brennbare Flüssigkeiten lagern, mit dem Parameter U im Bereich $U_{2c} < U \leq U_{3c}$.
Schadensfolgeklasse 1	Alle weiteren Tankbauwerke innerhalb des Anwendungsbereiches dieser Norm.

Abbildung 60: Einteilung der SFK nach DIN EN 1993-4-2/A1

8.4.3 Vorschlag – Direkte Kopplung an die vorhandene potentielle Energie

Die Zuordnungen nach EN 1990 werden durch die folgenden tankspezifische Regelungen ersetzt.

Die potentielle Energie eines Lagermediums lässt sich über

$$W_{pot} = m \cdot g \cdot H_g = \frac{D^2}{4} \cdot \pi \cdot H \cdot \rho \cdot g \cdot H_g$$

bestimmen. Dabei ist D der Tankdurchmesser, H die maximale Füllhöhe der gelagerten Flüssigkeit, ρ die Dichte der Flüssigkeit und H_g die Schwerpunkthöhe der gelagerten Flüssigkeit.

Grenzwerte könnten nach Tabelle 16 gewählt werden. Eine Verknüpfung zu den K_{Fi} -Faktoren zur Differenzierung der Zuverlässigkeit nach EN 1990 Anhang B wird ebenfalls angegeben.

Tabelle 16: Empfohlene Werte für Klassengrenzen

Schadensfolgeklasse	Empfohlener Wertebereich	K_{Fi} -Faktor
CC 1	$W_{pot} < 35 \text{ MJ}$	0,9
CC 2	$35 \text{ MJ} \leq W_{pot} < 500 \text{ MJ}$	1,0
CC 3	$W_{pot} \geq 500 \text{ MJ}$	1,1

Neben der Lageenergie muss die vom Lagermedium an sich ausgehende Gefährdung bei der Einordnung der Schadensfolge berücksichtigt werden. Generell werden als Lagermedium mit besonderer Gefährdung, wassergefährdende, brennbare, toxische oder explosive Flüssigkeiten bezeichnet. Vorgeschlagen wird:

- Bei der Auslegung für wassergefährdende oder brennbare Flüssigkeiten bzw. Flüssiggase ist die nach (4) bestimmte Schadensfolgeklasse um den Wert Eins zu erhöhen.
- Tanks, die zur Lagerung von Flüssigkeiten oder Flüssiggasen mit toxischem oder explosiven Potential dienen, sind in allen Fällen der Schadensfolgeklasse 3 zuzuordnen.

In Abbildung 61 erfolgt ein Vergleich der unterschiedlichen Klassifizierungsansätze anhand systematisch gewählter Geometrien. In allen untersuchten Fällen befindet sich das Bauwerk auf dem Baugrund. Damit gilt $H_g = H/2$ und es ergeben sich die niedrigsten möglichen Schadensfolgeklassen. Die Kalibrieren der in Tabelle 17 vorgeschlagenen Werte orientiert sich an der Einteilung nach EN 1993-4-2/A1:2014 für ein Lagermedium ohne besondere Gefährdung. Eine Auswertung für den Fall – brennbare Flüssigkeit – ist in Abbildung 62 angegeben. In beiden Abbildungen gilt: grün = SFK 1 / gelb = SFK 2 / rot = SFK 3.

Das vorgeschlagene Verfahren vereinfacht den Auswahlprozess sowohl im Vergleich zu EN 1993-4-2/A1:2014 als auch zu EN 1993-4-2/A1:2014. Dabei werden die Tanks sehr ähnlich zu den Vorschlägen in EN 1993-4-2/A1:2014 klassifiziert. Der Anwender kann mit der Kopplung an die physikalische Größe – Energie – ein Gefühl für die Schadensfolge seiner Strukturen gewinnen. Der pauschale Ansatz von SFK1 für landwirtschaftliche Zwecke mit wassergefährdenden Flüssigkeiten oder Wassertanks mit hoher potentieller Energie ist damit nicht mehr möglich.

Die Konsistenz mit den Zuordnungen nach EN 1990 sollte dadurch erfolgen, dass ein Tank mit niedriger Folge für Menschenleben, sprich in Gebieten geringer Bebauung und ohne regelmäßigem Personenverkehr in der Einstufung reduziert werden kann (landwirtschaftliche Gebiete). Dies darf aber nur dann angewendet werden, solange nicht mit umweltbeeinträchtigenden Folgen, z.B. wie bei Lagermedien ohne besondere Gefährdung es der Fall ist, zu rechnen ist.

8.5 Teilsicherheitsbeiwerte

Teilsicherheitsbeiwerte (Einwirkungsseite) gehören formal nicht in die Anwendungsnorm sondern in EN 1990 [49] [28]. Eine ausführlichere Diskussion ist in [50]. Eine Kopplung der Teilsicherheitsbeiwerte für die Flüssigkeitseinwirkung an das gelagerte Medium wird als nur bedingt sinnvoll erachtet. Beulnachweise, Verankerungen usw. werden davon nicht beeinflusst, sodass das Sicherheitsniveau nur selektiv gesteigert wird. Alternativ wären maximale Ausnutzungsgrade, die für alle Nachweise eingehalten werden müssen und an die Schadensfolgeklasse gekoppelt sind, sinnvoller. Anregungen zu der physikalisch maximal möglichen Füllhöhe, die Auswirkungen von unterschiedlichen Nutzungsarten und Überlegungen zur Zuverlässigkeit werden in [17] diskutiert. „Füllstandmessung redundant ausbilden für Reduzierung der Sicherheitsbeiwerte. Eine Untersuchung innerhalb des Projektes sprengt den Rahmen“ (Protokoll vom 28.06.2016). Der Vorschlag konkreter Teilsicherheitsbeiwerte ist nach der Besprechung vom 17.8.2017 (Held, Eggert, Knödel, Nagel, DIBt, Berlin) nicht Teil dieses Projekts wurde in der Mail vom 17.01.2018 doch gewünscht. Die danach vorgeschlagenen Werte orientieren sich an den Ausführungen in [17] und berücksichtigen die Grundsätze zur Differenzierung der Zuverlässigkeit nach EN 1990 Anhang B.

Kann die maximale Füllhöhe physikalisch (z.B. bei einem offenen Tank oder redundanten Überläufen) nicht überschritten werden, wird $\gamma_F = 1,05$ als sinnvoll erachtet. Im Kontext der K_{Fi} -Faktoren stellt SFK2 die Basis der in der Norm aufgeführten Werte dar. Hierfür gilt gerundet: $\gamma_{F,SFK2} = 1,2$

Kann dies nicht sichergestellt werden, wird vorgeschlagen den Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{F,SFK2} = 1,3$ nach DIN EN 1993-4-2 zu übernehmen. Eine Reduktion bzw. Erhöhung durch K_{Fi} führt dann zu $\gamma_{F,SFK1} = 1,17$ bzw. $\gamma_{F,SFK3} = 1,43$.

8.6 Ausführungsklassen

Die Situation der Ausführungsklassen wird in [17] Abs. 2.1 wie folgt zusammengefasst: „4 Klassen, die niedrige bis hohe Anforderungen an den herstellenden Betrieb stellen; hierdurch werden z.B. die Qualifikationsanforderungen an die Schweißaufsicht und der Dokumentationsumfang in der WPK festgelegt. Bisher war die Ausführungsklasse nach der Schadensfolgeklasse in EC0 Tab. B.1 sowie der Beanspruchungskategorie in EN 1090-2 Tab. B.1 und der Herstellungskategorie in EN 1090-2 Tab. B.2 aus EN 1090-2 Tab. B.3 zu wählen. Nach der A1-Änderung 2014 zu EC3-1-1 Tab. C.1 wird die Ausführungsklasse nur noch nach RC bzw. CC und der Belastungsart ausgewählt, siehe Tabelle 1.“

8.7 Fehlersammlung

DIN EN 1993-1-6

B.1.3 (2) Die Definition der Randbedingungen ist fehlerhaft.

DIN EN 1993-4-2

11.2.1 (1) „and“

11.2.1 (3) „ j Beiwert für die Wirksamkeit der Verbindung“ → Verweis auf (4) fehlt. (Schweißnahtfaktor?).

11.3.2 (6) „Dicke eines jeden Schusses in Folge“ was ist damit genau gemeint?

DIN 18800-4

Lücken: Versteifte Schalen sowie ausschließlich numerisch gestützte Beulsicherheitsnachweise waren nicht erfasst [23]. Anhaltspunkte waren in der DASt-Richtlinie 017 [47] enthalten.

9 Vergleich EN 1993-4-2 und EN 14015, EN 14620

9.1 Verweise aus EN 14015 [8] auf EN 1993-4-2 [3]

10.3 Dachbleche mit Tragkonstruktion: *Bei Kugeldächern ist in Übereinstimmung mit ENV 1993-4-2 eine Vergrößerung des Abstandes auf 3,25 m zulässig.*

9.2 Verweise aus EN 1993-4-2 [3] auf EN 14015 [8]

1.1 Allgemeines / Anwendungsbereiche: *(2) Dieser Teil 4-2 behandelt nur die Anforderungen an Widerstand und Stabilität von Tankbauwerken aus Stahl. Sonstige Auslegungsanforderungen werden für Tankbauwerke bei Umgebungstemperatur in EN 14015 und für Tankbauwerke zur Lagerung tiefkalter Flüssigkeiten in EN 14620 sowie Betrachtungen zur Herstellung und Montage in EN 1090 behandelt. Diese sonstigen Anforderungen schließen Fundamente und Bodensetzung, Herstellung, Montage und Prüfung, Funktion und Details wie Mannlöcher, Flansche und Befüllvorrichtungen ein.*

1.3 Allgemeines / Annahmen: *Herstellung und Montage stimmen mit der jeweils zutreffenden Norm EN 1090, EN 14015 und EN 14620 überein.*

5.3 Widerstand der Schalenwand des Tanks: *(2) Der Schweißnahtfaktor für voll durchgeschweißte Stumpfnähte darf mit 1 angesetzt werden, wenn je nach Gültigkeit die Anforderungen von EN 14015 oder EN 14620 erfüllt sind.*

10. Anforderungen an die Herstellung, Ausführung und Montage von Seiten der Bemessung: *(1) Der Tank sollte je nach Gültigkeit nach EN 14015 oder EN 14620 hergestellt und montiert und nach EN 1090 ausgeführt werden.*

11.4 Bemessung des Bodens:

(2) Bodenbleche sollten überlappt oder stumpf gestoßen verschweißt werden. Einzelheiten zum Schweißen sind je nach Gültigkeit EN 14015 oder EN 14620 zu entnehmen.

(7) Die radialen Schweißnähte, die die Bodenrandbleche miteinander verbinden, sollten voll durchgeschweißte Stumpfnähte sein. Einzelheiten zum Schweißen sind je nach Gültigkeit EN 14015 oder EN 14620 zu entnehmen.

9.3 Anwendungsbereiche

Tabelle 17 stellt eine Erweiterung von Tabelle 2 und vergleicht die Anwendungsgrenzen der Bemessungs- und Anwendungsnormen.

Tabelle 17: Vergleich der Anwendungsgrenzen – erweitert um Anwendungsnormen

Eigenschaften	EN 1993-4-2	DIN 4119	EN 1993-4-2/A1	EN 14015	EN 14620
oberirdisch	x	x		x	x
zylindrisch	x	x		x	x
konisch			x		
lotrechtstehend					
aus Stahl	x			x	x
von Flüssigkeiten	x	x		x	x
vollaufliegender Boden		x			
gekühlte Gase in flüssigem Zustand bei atmosphärischem Druck		x			
bei geringen Überdrücken oder Unterdrücken	-100 mbar bis 500 mbar	x	-100 mbar bis 500 mbar	-20 mbar bis 500 mbar	bis 500 mbar
Temperatur	-50 °C bis 300 °C		Abhängig von der Stahlsorte	-40 °C bis 300 °C	-165 °C bis 0 °C
Temperatur bei dauererschwingbeanspruchten Tanks	bis 150 °C				
>100 m ³			x		
Fertigung vor Ort			x	x	x
geschweißt				x	
Maximale Spannung				260 N/mm ²	
Ausschluss von verflüssigtem Sauerstoff, Stickstoff und Argon					x
Werkstoff (mit konischen Böden, auf Standzargen oder Stützen stehend)			x		

9.4 DIN EN 14620-2:2006 [9, 51] Verweise auf 1993-4-2 [3] / 1993-1-6 [4]

Folgende Einschränkungen werden von Seiten der DIN EN 14620 [51] Abs. 5.1.3.1 an die übergeordneten Bemessungsnormen gestellt.

- Ausschluss des vereinfachten Verfahrens nach ENV 1993-4-2:1999. Die aktuelle EN 1993-4-2 [3] datiert jedoch aus 2010.
- EN 1993-1-6 wird für die Auslegung gegen Außendruck ausgeschlossen. Dabei werden Sonderanforderungen nach Abs. 5.2.1.3 gestellt. Dieser ist jedoch nicht auffindbar.

9.5 Berücksichtigung von EN 14015

Folgende Kapitel der EN 14015 enthalten Angaben zur Ausstattung, Herstellung und Einrichtung. Diese sind stehen nicht im Widerspruch zum Bemessungskonzept nach EC und können im Weiteren Übernommen werden.

- 4 Zu belegende Angaben und Anforderungen
- 8.4 Tankböden – Herstellung
- 9.3.1.10 Auslegung von Tankmänteln - Versteifungsringe
- 9.3.1.11 Auslegung von Tankmänteln - Versteifungsringe
- 9.4 Auslegung von Tankmänteln - Anforderungen der Mantelbleche
- 9.5 Auslegung von Tankmänteln - Mantelverbindungen
- 10.6 Anforderungen an das Ent- bzw. Belüftungssystem
- 13.3 Dachstützen
- 13.6 Bündige Reinigungsöffnungen und Tanksümpfe
- 13.10 Heiz- und Kühlsysteme
- 13.11.1 / 13.11.2 / 13.11.3 Treppen und Laufstege
- 13.12 Geländer
- 13.13 Leitern
- 13.14 Erdung

9.6 Berücksichtigung von EN 14620

Folgende Kapitel der EN 14620 enthalten Angaben zur Ausstattung, Herstellung und Einrichtung. Diese sind stehen nicht im Widerspruch zum Bemessungskonzept nach EC und können im Weiteren Übernommen werden.

- Teil 1 – Allgemeines: (gesamt mit Ausnahme von: Abs. 7.1.3, 7.1.4, 7.3 jedoch nicht 7.3.3.3)
- Teil 2 – Metallische Bauteile
 - 4.3.1.2
 - 4.3.1 Auswahl des Stahls
 - 4.3.2 Anforderungen an den Charpy-Kerbschlagbiegeversuch
 - 4.5.3 Rohrleitungseinbauteile
 - 5.2.1.1 Boden
 - 5.2.1.2.3 (a-c) Mantel – Weitere Anforderungen
 - 5.2.2.1 Membrantanks - Allgemeines
 - 5.5.5 Dachstützen
 - 5.6 Primär- und Sekundärsicherheitshülle, Bodenanschlüsse
 - 5.7 Verbindungen zwischen Behältern
 - 5.8.2 Tankschild
 - 6.2.2 Bodenrandblech
 - 6.2.3 Stützen
 - 9.3 Art der Prüfungen
 - 9.7 Unterdruckprüfungen mit Saugglocke
 - 9.8 Dichtheitsprüfung mit Ammoniak
 - 9.9 Blasenprüfung
 - 9.12 Annahmekriterien
- Teil 3 – Bauteile aus Beton (gesamt)
- Teil 4 – Dämmung (gesamt)
- Teil 5 – Prüfen, Trocknen, Inertisieren und Kaltfahren (gesamt)

10 Empfehlungen an die Bauaufsicht

Aus den im Rahmen dieser Vergleichsberechnungen gewonnenen Erkenntnissen leiten sich folgende Empfehlungen an die Bauaufsicht ab:

- Die Vergleichsberechnungen haben gezeigt, dass die Grundnormen EN 1993-1-1 [52] und EN 1993-1-6 [4] eine ausreichend sichere Basis für die Berechnung von Tankbauwerken liefern. Teilweise sind die Nachweisverfahren nach Eurocode umfangreicher und aufwändiger im Vergleich zu DIN 4119 [2]. Es ist jedoch möglich, diese Verfahren mit Hilfe von Tabellenkalkulationsprogrammen zu automatisieren. Nimmt man als Basis des Vergleichs der Sicherheitsniveaus die Ausnutzungsgrade, die für das gleiche mechanische Modell eines Tanks nach den unterschiedlichen Normen ermittelt wurden, so ergibt sich bei dem Großteil der Nachweise nach Eurocode eine vergleichbare oder höhere Sicherheit. Stellenweise, z.B. für das Umfangsbeulen, erlauben neue Erkenntnisse eine wirtschaftlichere Auslegung. Allgemein sind bei den durchgeführten Untersuchungen keine Risiken aufgefallen.
- Von einer Kopplung zwischen Schadensfolgeklasse und Berechnungsverfahren, wie dies in EN 1993-4-2 [3] vorgesehen ist, wird abgeraten. Allein die geometrischen Bedingungen, eventuell vorhandene Diskontinuitäten, das Muster der aufzubringenden Lasten und die Auflagerbedingungen sollten darüber entscheiden, welche Modellierungstiefe zu wählen ist.
- Eine Kopplung des Sicherheitsniveaus an die Schadensfolgeklasse wird bislang in EN 1993-4-2 [3] nur unzureichend geregelt. Dies sollte nach den Vorgaben in EN 1990 [49] durch, mit dem Faktor K_{FI} modifizierte, Teilsicherheitsbeiwerte auf Einwirkungsseite erfolgen.
- Die Bestimmung der Schadensfolgeklasse sollte ausschließlich auf der zu erwartenden Schadensfolge beruhen. Aus Sicht der Autoren stellt die potentielle Energie des Lagermediums hierfür ein geeignetes Maß dar. Gegenüber dem im neuesten Entwurf von EN 1993-4-2/A1 [53] eingeführten Parameter U wird hier der Vorteil größerer Transparenz gesehen. Die Erhöhung dieser Basisschadensfolge (Wasserfüllung) durch wassergefährdende, brennbare, toxische oder explosive Lagermedien kann dann zusätzlich durch Erhöhungsfaktoren berücksichtigt werden. Versagensformen (z.B. Beulen infolge Umfangsdruckspannungen bei leeren Tank aus Wind und Innendruck), die nicht zum Austreten des Lagermediums führen, sollten mit einem geringeren Teilsicherheitsbeiwert auf der Einwirkungsseite belegt werden können.
- Die in EN 1993-4-2 [3] Kap. 11, DIN EN 14015 [8] u. DIN EN 14620 [9] behandelten Bemessungsansätze spannen eine parallele überkommene Bemessungswelt auf. Diese ist nicht im Einklang mit dem Sicherheitskonzept und der Bemessungsphilosophie des Eurocodes. Ein Ausschluss dieser Regelungen wird daher als sinnvoll erachtet. Die dort

angegebenen Regelungen zur Ausführung, Prüfung, Ausstattung und bestimmte Konstruktionsdetails sind jedoch sinnvoll und notwendig. Sie sollten aus den genannten Regelwerken direkt oder per Verweis übernommen werden.

- Die untersuchten Bemessungsregeln für Stahltanks können unter Berücksichtigung der in EN 1999-1-1 [41] angegebenen Werkstoffeigenschaften und Unterschiede in der Ausführung aus Sicht der Autoren sinngemäß auch auf Tankbauwerke aus Aluminium übertragen werden (Vgl. Kap. 8.1). Die Regelungen in EN 1999-1-5 [54] sind fehlerhaft (siehe [17]), die Abweichungen liegen allerdings auf der sicheren Seite. Hierzu wird empfohlen, Nachweise nach EN 1993-1-6 [4] mit den für Aluminium zutreffend angesetzten Werkstoffkennwerten zuzulassen.
- Die in EN 1993-4-2 [3] formulierte Anwendungsgrenze „Tankbauwerke mit einem Fassungsvermögen größer als 100 m³“ wird aus technischer Sicht nicht für sinnvoll erachtet. Hierzu wird folgende Regelung empfohlen: „Die Volumen-Untergrenze entfällt, die Regeln sind auf alle Tanks anzuwenden, die in den bauaufsichtlichen Bereich fallen.“
- Windlasten auf kegelförmige oder kugelsegmentartige Tankdächer sind in EN 1991-1-4 nur unzureichend behandelt. Eine Anwendung der Regelungen aus AS/NZS 1170.2 [25] sowie der Berücksichtigung einer Lastausmitte in Anlehnung an DIN 4119 [2] werden empfohlen.
- Verkehrslasten auf Tankdächern werden durch die Kategorien in EN 1991-1-1 [12] nicht sinnvoll beschrieben. Aus Sicht der Autoren ist hier ISO 14122-2 [20] (vgl. Kap. 6.2.3) zutreffend. Übereinstimmend mit dieser Norm wird daher eine Ersatzflächenlast von $q_k = 2 \text{ kN/m}^2$ bzw. eine Einzellast von $Q_k = 1,5 \text{ kN}$ vorgeschlagen.

Zusammenfassend wird empfohlen, das Dokument „Vorschlag für Anlage zur M-VVTB, basierend auf EN 1993-4-2“ bauaufsichtlich als Ersatz für die DIN 4119 [2] einzuführen. In diesem Dokument sind die Darstellungen und Ergebnisse des vorliegenden Berichts umgesetzt.




Im Sinne einer sicheren und realistischen Beurteilung der Auswirkungen von Windbeanspruchungen auf beulrelevante Beanspruchungen besteht dringender Forschungsbedarf. Wie in Kapitel 1 angesprochen, treten Differenzen zwischen den nach Balkentheorie händisch berechneten (bislang gängige Praxis) und unter Berücksichtigung realer Winddruckverteilungen, numerisch bestimmten Axialspannungen auf. Dabei ist aufgrund der unterschiedlich ausgeprägten Spannungsverteilungen ein direkter Vergleich nicht möglich und die Auswirkungen auf die Gesamttragfähigkeit können nicht unmittelbar abgeschätzt werden. Um eine überkonservative Bemessung, z.B. durch Fehlinterpretation von numerischen Ergebnissen (z.B. bei unterschiedlich angenommenen Auflagern) auszuschließen, werden umfangreiche numerische Untersuchungen (beispielsweise auf Basis der GMNIA) als sinnvoll erachtet. Aus den Ergebnissen wäre dann ein händisches Bemessungskonzept abzuleiten.

11 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Vergleichsberechnungen zu stehenden zylindrischen Tanks“, beauftragt durch das Deutsche Institut für Bautechnik, wurden Schwachstellen in der EN 1993-4-2 [3] identifiziert, diskutiert und Vorschläge für eine Verbesserung der Richtlinie erarbeitet. Die Untersuchungen basieren auf drei Untersuchungsgeometrien typischer kleiner, mittlerer und großer Tankbauwerke und decken die üblichen nach EN 1993-4-2 [3] ausgelegten Tankgeometrien ab. Je fünf prüffähige statische Berechnungen nach DIN und EC liefern die Grundlage für einen Vergleich der Sicherheitsniveaus. Die Identifikation von Bauformen, die nicht mehr nach EN 1993-4-2 [3] geregelt sind, sowie Untersuchungen zu den Verweisen auf die Ausführungsnormen EN 14015 [8] bzw. EN 14620 [9] vervollständigen die Darstellungen.

Revisionsliste				
	Datum	Sachbearbeiter	Betroffene Abschnitte	Änderungen
Original	05.08.2018	S. Nagel		
Revision a	05.12.2019	S. Nagel	Darstellung in Kap. 1	Darstellung in Kap. 1

Karlsruhe, am 05.12.2019

Sachbearbeiter	Projektleiter	Leiter der Forschungsstelle
		
S. Nagel, M.Sc.	Prof. Dr.-Ing. P. Knödel	Univ.-Prof. Dr.-Ing. T. Ummenhofer

12 Literatur

- [1] DIN 4119-2. *Oberirdische zylindrische Flachboden-Tankbauwerke aus metallischen Werkstoffen - Teil 2: Berechnung*, 1980-02.
- [2] DIN 4119-1. *Oberirdische zylindrische Flachboden-Tankbauwerke aus metallischen Werkstoffen - Teil 1: Grundlagen, Ausführung, Prüfung*, 1979-06.
- [3] DIN EN 1993-4-2. *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 4-2: Tankbauwerke*, 2010-12.
- [4] DIN EN 1993-1-6. *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen*, 2010-12.
- [5] Bußhaus, L. *Die Standsicherheit von Flachbodentanks*. Schriftenreihe die Festigkeit und Stabilität von Metalltanks, ; Bd. 2. Werner, Düsseldorf, 2002.
- [6] DIN 4119-2. *Oberirdische zylindrische Flachboden-Tankbauwerke aus metallischen Werkstoffen - Teil 2: Berechnung*, 1961-10.
- [7] Rotter, J. M.; Schmidt, H. (Hrsg.). *Buckling of steel shells*; European design recommendations. ECCS, no. 125 (September 2013). ECCS - European Convention for Constructional Steelwork, Brussels, Belgium, 2013.
- [8] DIN EN 14015. *Auslegung und Herstellung standortgefertigter, oberirdischer, stehender, zylindrischer, geschweißter Flachboden-Stahl tanks für die Lagerung von Flüssigkeiten bei Umgebungstemperatur und höheren Temperaturen*, 2005-02.
- [9] DIN EN 14620-1. *Auslegung und Herstellung standortgefertigter, stehender, zylindrischer Flachboden-Stahl tanks für die Lagerung von tiefkalt verflüssigten Gasen bei Betriebstemperaturen zwischen 0 °C und -165 °C - Teil 1: Allgemeines*, 2006-12.
- [10] DIN EN 1991-4. *Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter*, 2010-12.
- [11] Knödel, P.; Heß, A.; Ummenhofer, T. *Stählerne Tankbauwerke nach DIN EN 1993-4-2*. Stahlbau Kalender (2013), S. 523–563.
- [12] DIN EN 1991-1-1. *Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau*, 2010-12.
- [13] DIN EN 1993-4-2/NA. *Nationaler Anhang - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 4-2: Tankbauwerke*, 2011-05.
- [14] Deutsches Institut für Bautechnik. *Anpassungsrichtlinie Stahlbau*. Ernst & Sohn, Berlin, 2002.
- [15] DIN 1055. *Einwirkungen auf Tragwerke*, 2010-11.
- [16] DIN 18800-4. *Stahlbauten - Teil 4: Stabilitätsfälle - Schalenbeulen*, 2008-11.

- [17] Knödel, P.; Ummenhofer, T.; Ruckebrod, C. *Silos und Tanks*. In: Kuhlmann, U. (Hrsg.): Stahlbau-Kalender 2017: Dauerhaftigkeit - Ingenieurtragwerke, S. 595–692. Ernst & Sohn, Berlin, 2017.
- [18] DIN EN 1993-4-1. *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 4-1: Silos*, 2010-12.
- [19] DIN EN ISO 14122-1. *Sicherheit von Maschinen - Ortsfeste Zugänge zu maschinellen Anlagen - Teil 1: Wahl eines ortsfesten Zugangs und allgemeine Anforderungen*, 2016-10.
- [20] DIN EN ISO 14122-2. *Sicherheit von Maschinen - Ortsfeste Zugänge zu maschinellen Anlagen - Teil 2: Arbeitstünnen und Laufstege*, 2016-10.
- [21] DIN 1055-4. *Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Windlasten*, 2005-03.
- [22] DIN EN 1991-1-4. *Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen, Windlasten*, 2010-12.
- [23] Schmidt, H. *Stabilität stählerner Schalenträgerwerke*. Stahlbau Kalender (2009), S. 529–612.
- [24] Eßlinger, M.; Ahmed, S. R.; Schröder, H.-H. *Stationäre Windbelastung offener und geschlossener kreiszylindrischer Silos*. Stahlbau 40 (1971), Heft 12, S. 361–368.
- [25] AS/NZS1170.2. *Australian/New Zealand Standard: Structural Design Actions Part 2 - Wind actions*, 2011.
- [26] Ruckebrod, C.; Kaldenhoff, M. *Einwirkungen auf Silos aus Metallwerkstoffen*. In: Kuhlmann, U. (Hrsg.): Stahlbau-Kalender 2009: Stabilität Membranträgerwerke, S. 614–706. Ernst & Sohn, Berlin, 2009.
- [27] DIN 18800-1. *Stahlbauten - Teil 1: Bemessung und Konstruktion*, 2008-11.
- [28] DIN EN 1090-2. *Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken- Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken*, 2011-10.
- [29] Jäger, A.; Pasternak, H. *Studien zum Beulverhalten von eng ringversteiften Kreiszyklinderschalen unter Axialdruck*. Bauingenieur 91 (2016), Heft 10, S. 401–409.
- [30] Chen, L.; Rotter, J. M.; Doerich, C. *Buckling of cylindrical shells with stepwise variable wall thickness under uniform external pressure*. Engineering Structures 33 (2011), S. 3570–3578.
- [31] Chen, L.; Rotter, J. M.; Doerich-Stavridis, C. *Practical Calculations for Uniform External Pressure Buckling in Cylindrical Shells with Stepped Walls*. Thin-Walled Structures 61 (2012), S. 162–168.
- [32] Rotter, J. M. *Proposal of amendments on EN 1993-1-6:2007 AM-1-5-2011-01*, 2016.

- [33] Ziólko, J.; Schneider, W.; Białek, T.; Heizig, T.; Gettel, M. *Längenabhängigkeit des Beulwiderstandes umfangsdruckbeanspruchter stählerner Kreiszyinderschalen*. Stahlbau 78 (2009), Heft 12, S. 947–951.
- [34] Winterstetter, T. A.; Schmidt, H. *Stabilität von Kreiszyinderschalen aus Stahl unter kombinierter Beanspruchung*. Stahlbau 70 (2001), Heft 6, S. 412–418.
- [35] Herber, K.-H. *Vorschlag von Berechnungsgrundlagen für Beul- und Traglasten von Schalen*. Stahlbau 35 (1966), Heft 5, S. 142–151.
- [36] Czerwenka, G. *Untersuchungen von dünnen kurzen Zylindern, die durch Ring-Kleinstprofile enger und mittlerer Teilung verstärkt sind und unter Manteldruck stehen*. Z. Flugwiss 9 (1961), Heft 6, S. 163–190.
- [37] Knödel, P.; Ummenhofer, T. *Ankerkräfte bei kurzen Zylinderschalen*. Stahlbau 75 (2006), Heft 9, S. 723–728.
- [38] Gehrig, H. *Verankerungskräfte windbelasteter geschlossener Kreiszyinderschalen*. Stahlbau 71 (2002), Heft 1, S. 39–46.
- [39] Hutchinson, J. W.; Thompson, J. M. T. *Nonlinear buckling behavior of spherical shells: barriers and symmetry-breaking dimples*. Submitted for publication Phil. Trans. R. Soc. A 29.8.2016.
- [40] Jiménez, F. L.; Marthelot, J.; Lee, A.; Hutchinson, J. W.; Reis, P. *Technical brief: Knock-down factor for the buckling of spherical shells containing large-amplitude geometric defects*. J. Appl. Mech. 84 (2017).
- [41] DIN EN 1999-1-1. *Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln*, 2010-05.
- [42] Holst, J. M. F. G.; Rotter, J. M. *Axially compressed cylindrical shells with local settlement*. Thin-Walled Structures 43 (2005), S. 811–825.
- [43] Knödel, P.; Ummenhofer, T. *Regeln für die Berechnung von Behältern mit der FEM*. Stahlbau 86 (2017), Heft 4, S. 325–339.
- [44] Knödel, P., Taras, A., Ummenhofer, T. *Kurzzeitermüdung aus Betriebszuständen im Fußbereich von Lagertanks*. TÜV Süd Tagung Flachbodentanks, 26.09.2019, Hamburg.
- [45] Schneider, W. *Die ungünstigste Imperfektionsform bei stählernen Schalentragwerken - eine Fiktion?* Bauingenieur 79 (2004), S. 436–442.
- [46] Knödel, P.; Schulz, U. *Zur Stabilität von Schornsteinen mit Fuchsöffnungen*. Stahlbau 57 (1988), Heft 1, S. 13–21.
- [47] DAST-Richtlinie 017 - Entwurf. *Beulsicherheitsnachweis für Schalen - spezielle Fälle*; Deutscher Ausschuss für Stahlbau DAST. Stahlbau Verlag, 1992.

- [48] EN 1998-1. *Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebenwirkungen und Regeln für Hochbauten*, 2010-12.
- [49] DIN EN 1990:2002 +A1:2005+ A1:2005/AC:2010. *Grundlagen der Tragwerksplanung*, 2010-12.
- [50] Knödel, P., Ummenhofer, T. *Remarks on the Safety Concept of Tank Structures*. 2nd International Conference on Cryogenic Storage Tanks, 11-12.12.2018, TÜV Süd München.
- [51] DIN EN 14620-2. *Auslegung und Herstellung standortgefertigter, stehender, zylindrischer Flachboden-Stahl tanks für die Lagerung von tiefkalt verflüssigten Gasen bei Betriebstemperaturen zwischen 0 °C und -165 °C - Teil 2: Metallische Bauteile*, 2006-12.
- [52] DIN EN 1993-1-1. *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*, 2010-12.
- [53] DIN EN 1993-4-2/A1. *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 4-2: Tankbauwerke*, 2014-10.
- [54] DIN EN 1999-1-5. *Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken - Teil 1-5: Schalenträgerwerke*, 2010-05.

13 Anlage

Korrespondenz:

Prof. John Michael Rotter, Chairman der Normenteile EC3-1-6, EC3-4-1, EC3-4-2

13.1 Beulen des Dachs

On 24/10/2017 18:17, Knödel, Peter (VAKA) wrote:

Dear Michael,
some time ago I asked you about the background of EC3-4-1 clause 8.3.3 (4). Your answer was like "I tried for 20 years to compute this situation into failure and I did not succeed".

Even before that information I liked this clause very much and used it on eaves rings as well, on tank roofs and on aluminium silos.

Currently, Sven and I are working on a report for the Deutsches Institut für Bautechnik in Berlin, where we have a closer look on EC3-4-2. We were discussing the attached sketch, where you have an uplift condition associated to wind load. Clearly, the externally loaded bin at the eaves ring is more critical than the internal pressure at all adjacent shell parts of the hopper junction.

Do you think it's risky to use this clause also for eaves rings?

Best regards

Peter

On 25/10/2017 05:58, Prof. J Michael Rotter wrote:

Dear Peter

Thank you for this interesting question, which will surely come up more forcefully when we revise EN 1993-4-2 under the M/515 Mandate, and when I hope very much that you will be deeply involved!!!

I definitely think that you are right about the tank under external pressure and the risk of buckling in an in-plane mode (8.3.3 (4)).

First, the roof is possibly a lighter structure than the hopper and its connection to the ring may not be made as strong as that of the hopper to ring junction, which must carry much of the weight of solid stored in the silo.

Second, the hopper junction is under axisymmetric loading (or nearly so), but the wind loaded tank has significant prebuckling deformations in a mode not too different from the in-plane mode.

But this brings us back to the question of whether the critical test for this eaves ring (curb angle) is the bending stress due to unsymmetrical loading (Richard Greiner's equations

in EN 1993-4-1 5.3.2.5 (12) or the stiffness required to prevent the ring participating in the buckling mode of the shell wall 5.3.2.5 (14). Whilst I think that the buckling issue is the more important of the two, that is just my opinion, and more evidence on this is definitely needed.

My PhD student Lei Chen did a lot of calculations on the required size of this ring to ensure that the upper boundary of the shell buckling mode guaranteed that the buckle attained the value given for the stiff ring boundary condition, but we never published the results yet, so if you are continuing in this area, I should have a look to see what I can say from his final conclusions.

Please let me know more of what you are planning in the study, and I will try to assist in any way I can.

With very best wishes

Michael

13.2 Setzungen

On 20/10/2017 12:22, Knödel, Peter (VAKA) wrote:

Dear Michael,

yesterday, Sven and I were discussing about some issues of EC3-4-2. Which kind of structure is meant by 7.4.2.2 (3)? We have difficulties in thinking about a tank-roof structure, which is supported by columns ... above the tank? - and which is sensitive to differential settlement of the columns.

Can you send us a picture or sketch or some enlightening remarks?

Best regards

Peter

On 20/10/2017 14:08, Prof. J Michael Rotter wrote:

Dear Peter

Thank you for the interesting question.

I must confess that I had not looked at this rule for a very long time, and am not very aware of its origin. Your former leader, Helmut Saal, most probably took this rule, and much of this section, from a different standard on tanks, though I cannot tell where.

However, in reflecting on this section, we must ask where differential settlement can have a bad effect. I did a lot of work in recent years on a set of perhaps 20 tanks built on a reclaimed mangrove swamp in South Africa, where differential settlement led to significant distortions of the tank walls during construction, leading to a fight between the client and constructor on whose fault it might be, and whether it was caused by the differential settlement or by bad workmanship. This site had former deep channels running

through it, which had been filled with soft material, with tree stumps and the like not removed before the tanks were built, and a poor geotech investigation leading to undetected local soft spots.

Had the roof been supported on columns as in this clause, and some of the columns placed on soft spots, with a stiff weak truss structure above the columns, I can picture some damage being caused to the roof by such settlement. The roof trusses are usually light, stiff and weak, so this part is credible.

But the most likely reasoning seems to me to be that the weight of fluid in the tank leads to dishing settlements of the base, especially over time, and a stiff truss roof supporting structure would not accommodate such imposed displacements very easily. So I think that this is the most likely reason for the provision, but I also think that it should be more explicitly stated as the kind of settlement to be considered.

I hope that this helps. We should change the rule, if you agree with this description.

With best wishes

Michael