



Grundlagen zur statischen Berechnung und Stand sicherheitsnachweis von ortsfesten Kryobehältern

IGV-PP-09B-Rev0

Stand: 24.05.2018

Haftungsausschluß: Diese Veröffentlichung entspricht dem Stand des technischen Wissens zum Zeitpunkt der Herausgabe. Der Verwender muss die Anwendbarkeit auf seinen speziellen Fall und die Aktualität der ihm vorliegenden Fassung in eigener Verantwortung prüfen. Eine Haftung des IGV und derjenigen, die an der Ausarbeitung beteiligt waren, ist ausgeschlossen.

© IGV 2018. Der IGV genehmigt hiermit die Vervielfältigung dieses Dokuments, vorausgesetzt, der Verband wird als Quelle angegeben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	3
2	Geltungsbereich	3
3	Begriffsbestimmung.....	4
4	Baurecht	5
5	Anzuwendende Richtlinien und Normen	6
6	Einwirkungen	6
7	Außergewöhnliche Einwirkungen	8
8	Grenzzustände	8
9	Bemessungssituationen und Kombination im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT - ULS)	9
10	Teilsicherheitsbeiwerte	9
11	Tragwiderstand	10
12	Anwendung für Kryobehälter:	10
12.1	Einwirkungen aus Wind.....	11
12.2	Einwirkung aus Erdbeben	11
12.3	Einwirkung aus Füllmedium	12
12.4	Einwirkung aus Schnee-/Eislast.....	12
12.5	Einwirkung aus Umgebungstemperatur	12
12.6	Festigkeitsnachweise	13
12.6.1	Verankerung und Behälterfüße.....	13
12.6.2	Stabilitätsnachweis	13
12.6.3	Festigkeitsnachweis.....	13
12.6.4	Sprödbruchsicherheitsnachweis	13
12.6.5	Design by Analysis (DBA) nach Eurocode	13
12.6.6	Ermüdungsnachweis	13
13	Prüfung des Standsicherheitsnachweises.....	14
14	Zusammenfassung	14
15	Referenzen	15

1. Einführung

Aufgrund der Zuständigkeit der Baubehörden und der anzuwendenden Regelwerke zur statischen Berechnung von ortsfesten Kryobehältern selbst und/oder der Verankerungen im Boden im Rahmen von Aufstellungen, können von Gaseunternehmen zusätzliche Nachweise gefordert werden, da die eingesetzten ortsfesten Kryobehältern teilweise vor Jahrzehnten gefertigt wurden und seither sich die technischen Baubestimmungen und die Landesbauordnungen geändert haben.

Ziel dieses Positionspapiers ist es, unterstützende Grundlagen zur statischen Berechnung und Standsicherheitsnachweisen von ortsfesten Kryobehältern zusammenzutragen, um so gemeinschaftlich für Hersteller und Besteller von ortsfesten Kryobehältern eine Basis für Spezifikationen für Einsätze in Deutschland zu schaffen. Im Rahmen einer Aufstellung kann der Fall auftreten, dass ein Behälter nach Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU (DGRL) mit CE Kennzeichnung oder ein Behälter nach altem Recht (Druckbehälterverordnung (DruckbehV) oder UVV Druckbehälter (VBG 17) ohne CE Kennzeichnung aufgestellt wird. Zwar wird inhaltlich in diesen Regelwerken auf äußere Einwirkungen und Tragfähigkeitsnachweise eingegangen, aber in der Praxis liegen diese Unterlagen teilweise nicht vor oder führen zu Diskussionen und Nachbearbeitung bei der Aufstellung. Für die statischen Berechnungen ist die Anwendung der gültigen Normen in Deutschland erforderlich. Diese sind in der Bauregelliste des Deutschen Institutes für Bautechnik (DIBt) oder den Technischen Baubestimmungen des betreffenden Bundeslandes enthalten (zum jeweiligen Zeitpunkt der Aufstellung); die Basis bilden grundsätzlich als Stand der Technik die harmonisierten Eurocode-Normenreihe EC0 bis EC9 (EN 1990 bis EN 1999) mit den dazugehörigen Nationalen Anhängen (NA), und schließlich die EN 13458-2 (jeweils in der aktuellen Ausgabe). In Deutschland zählen zum Stand der Technik auch noch die AD2000-Merkblätter, insbesondere die AD2000-Merkblätter S3 und S 3/1 bis S 3/7, auch hier sind die für einen Standsicherheitsnachweis wesentlichen Belastungen zusammen mit Hinweisen zur Ermittlung der Belastungsgrößen enthalten. Die entsprechenden gemeinsam wirkenden Belastungen werden unter Berücksichtigung ihrer Bedeutung für den Druckbehälter zu Lastfällen zusammengefasst.

2. Geltungsbereich

Das vorliegende Positionspapier enthält Empfehlungen zur Durchführung von statischen Berechnungen und zum Standsicherheitsnachweis von ortsfesten Kryobehältern, zur Erfüllung der Anforderungen in den Bauordnungen und Technischen Baubestimmungen der Bundesländer.

Für Kryobehälter welche die Genehmigungsgrenze nach Landesbauordnung überschreiten, sind statische Berechnungen und Standsicherheitsnachweise bei den lokalen Baubehörden einzureichen und von diesen vor Baubeginn zu genehmigen.

Die in Deutschland erforderlichen statischen Berechnungen und Standsicherheitsnachweise sind in der harmonisierten europäischen Druckgerätenorm für ortsfeste Kryobehälter EN 13458-2:2002+AC:2006 nicht explizit behandelt.

Für Aufstellungen im Ausland müssen ggf. die jeweils national geltenden Regelwerke und Nationalen Anhänge (NA) der Eurocode-Normenreihe berücksichtigt werden.

3. Begriffsbestimmung

Ausführliche Begriffsbestimmungen siehe EN 1990. Für dieses Dokument sind folgende Begriffe relevant, hier in verkürzter Formulierung.

- Einteilung der Einwirkungen (EN 1990, 1.5.3)
 - Einwirkung allgemein: aufgebrachte thermo-mechanische Beeinflussung zur Erzeugung von Spannung und/oder Stauchung in einer Konstruktion.
 - Ständige Einwirkungen: eine Einwirkung, von der vorausgesetzt wird, dass sie während der gesamten Nutzungsdauer wirkt und deren zeitliche Größenänderung gegenüber dem Mittelwert vernachlässigbar ist oder bei der die Änderung bis zum Erreichen eines bestimmten Grenzwertes immer in der gleichen Richtung (gleichmäßig) stattfindet z. B. Eigengewicht von Tragwerken.
 - Veränderliche Einwirkungen: eine Einwirkung, deren zeitliche Größenänderung nicht vernachlässigbar ist oder für die die Änderung nicht immer in der gleichen Richtung stattfindet z. B. Wind- und Schneelasten.
 - Außergewöhnliche Einwirkung: eine Einwirkung, die i. d. R. von kurzer Dauer, aber von bedeutender Größenordnung ist, und die während der geplanten Nutzungsdauer des Tragwerks jedoch mit keiner nennenswerten Wahrscheinlichkeit auftreten kann z. B.: Explosionen oder Fahrzeuganprall. Anmerkung: Anprall, Schnee, Wind und Erdbeben können als veränderliche oder außergewöhnliche Einwirkungen behandelt werden, je nach statistischem Auftreten.
- Lastfall: Kombination zusammenfallender Einwirkungen
- Beanspruchung: Reaktion (z. B. Spannung, Dehnung, Verformung, resultierende Kraft oder Moment, Vergleichsspannung) eines Bauteils auf eine bestimmte Einwirkung oder eine Kombination von Einwirkungen.
- Grenzzustand: Zustand bei dessen Überschreiten das Tragwerk seine auslegungsgemäßen Funktionsanforderungen nicht mehr erfüllt. Es ist zwischen den Grenzzuständen der Tragfähigkeit (GZT bzw. ULS für engl. ultimate limit state) und der Gebrauchstauglichkeit zu unterscheiden.
- Lagesicherheit: Umkippen, Gleiten, nicht ausreichende Befestigung oder Verankerung oder nicht ausreichendes Gegengewicht bei dem Auftreten von Zugkräften, nicht ausreichende Verankerung gegen Auftriebskräfte, Abheben von Lagern, seitliches Verrutschen von Lagern, Auftrieb, u. ä.
- Standsicherheitsnachweis:

Auszug aus“ *Verordnung über Bauvorlagen und bauaufsichtliche Anzeigen (Bauvorlagenverordnung – BauVorIV Bayern) vom 10. November 2007 - §10 Standsicherheitsnachweis:*“

...(2) Die statischen Berechnungen müssen die Standsicherheit der baulichen Anlagen und ihrer Teile nachweisen. Die Beschaffenheit des Baugrunds und seine Tragfähigkeit sind anzugeben.³Soweit erforderlich, ist nachzuweisen, dass die Standsicherheit anderer baulicher Anlagen und die Tragfähigkeit des Baugrunds der Nachbargrundstücke nicht gefährdet werden.

(3) Die Standsicherheit kann auf andere Weise als durch statische Berechnungen nachgewiesen werden, wenn hierdurch die Anforderungen an einen Standsicherheitsnachweis in gleichem Maße erfüllt werden.

4. Baurecht

Aktuelle grundsätzliche Fragestellungen und Entwicklungen:

Sind Kryobehälter mit ihren Trag-, Hebe-, Verankerungs- und Verbindungselementen als bauliche Anlagen oder als Bauprodukte gemäß Bauprodukteverordnung (CPR) 305/2011-EU einzustufen?

Aufgrund der unterschiedlichen Richtlinienkonzepte finden immer wieder umfangreiche Diskussionen zwischen Herstellern, Kunden, notifizierten Stellen und Behörden statt:

- Wo ist die Grenze in den Geltungsbereichen von DGRL und CPR?
- Welche Anforderungen werden an einen Standsicherheitsnachweis für ortsfeste Kryobehälter in den Bauordnungen gestellt?
- Sind Kryobehälter in die Bauwerksklasse 4 einzustufen?
-

(In der Vergütungsregelung für Prüfsachverständige für den Standsicherheitsnachweis gibt es in den Landesbauordnungen fünf Bauwerksklassen 1 bis 5 mit steigendem Schwierigkeitsgrad 1 bis 5 der Tragwerke)

Das neue VDMA Einheitsblatt 24408 liefert erste Hinweise und Empfehlungen:

VDMA 24408:2016-07 Abgrenzung verfahrenstechnischer Anlagen und Maschinen von der Europäischen Bauprodukteverordnung 305/2011/EU.

Teil 1: Allgemeines

Teil 2: Ergänzungen zu harmonisierten Normen im Umfeld der Druckgeräte-Richtlinie

Abgrenzung zur DGRL

(VDMA 24408-1:2016-07, Abschnitt 4.3)

Trag-, Hebe-, Verankerungs- und Verbindungselemente, die mit Druckgerät verbunden sind, sind keine Bauprodukte im Sinne der CPR (da kein Beitrag zur Erfüllung der Grundanforderungen an ein Bauwerk geleistet wird). Sie sind vielmehr als Teil des Sicherheitskonzepts des Druckgerätes auszulegen z. B. gemäß harmonisierter PED-Normen (Anwendung von CPR-Normen als technische Basis natürlich ebenfalls möglich).

Standsicherheitsnachweis

(VDMA 24408-2:2016-07, Abschnitt 4.1)

Sofern im Rahmen der Druckgeräteherstellung gefordert, zwei mögliche Ansätze:

- Gemäß Druckbehälterregelwerk (z. B. EN 13445-3, Abschnitt 22)
- Durchführung gemäß EN 1993

Anforderungen an die Ausführung von Trag-, Hebe-, Verankerungs- und Verbindungselemente
(VDMA 24408-2:2016-07, Abschnitt 4.3.1)

Funktionale Einheiten sind nach der vom Besteller spezifizierten Execution Class oder nach einer europäischen harmonisierten Druckgerätenorm zu bemessen. Ist keine Execution Class spezifiziert und hat die harmonisierte Druckgerätenorm keine Anforderungen, gilt EXC 2 und die Ausführung nach EN 1993. (Es gibt die vier Ausführungsklassen 1-4, bezeichnet als EXC1 bis EXC4 wobei die Anforderungen von EXC1 bis EXC4 ansteigen)

5. Anzuwendende Richtlinien und Normen

- Grundsätzlich ist die anzuwendende europäische Richtlinie die Druckgeräterichtlinie (Richtlinie 2014/68/EU (alte Richtlinie 97/23/EG)).
→ "Auslegung auf erforderliche Belastbarkeit" siehe Anhang I, 2.2
- EN 13458-2
- Eurocodes EC0, EC1, EC2, EC3 und EC8

6. Einwirkungen

Grundsätzlich sind die Einwirkungen in drei Gruppen zu unterteilen:

- | | | |
|------------------------------------|--------------------------|------------------|
| • ständige Einwirkungen (G) | Eigenlast | G_k |
| | Vorspannung | P_k |
| | Erddruck | $G_{k,E}$ |
| | Flüssigkeitsdruck | $G_{k,H}$ |
| • veränderliche Einwirkungen (Q) | Nutz- und Verkehrslast | Q_k |
| | Schnee- und Eislast | $Q_{k,S}$ |
| | Temperatureinwirkung | $Q_{k,T}$ |
| | Baugrundsetzung | $Q_{k,\Delta a}$ |
| | Flüssigkeitsdruck | $Q_{k,H}$ |
| • außergewöhnliche Einwirkungen(A) | Anprall-, Explosionslast | A_k |
| | Erdbebenlast | A_{E_k} |

Tabelle 1: Einwirkungen in verschiedenen Vorschriften.

	DGRL	EN 13445-3	EC	AD 2000
Eigengewicht (incl. Isolierung)		X	X	X
Füllgewicht	X	X	X	X
Außendruck	X	X	X	X
Windlast	X	X	X	X
Erdbebenlast	X	X	X	X
Umgebungstemp.	X	X	X	X
Schnee-/Eislast		X	X	X
Störfalllasten			X	
Setzungslasten			X	

Nach EN 13458-2 keine explizite Auflistung der Einwirkungen.

Welche Einwirkungen sollten für Kryobehälter berücksichtigt werden?

- Eigengewicht
- Füllgewicht
- Außendruck
- Wind
- Erdbeben
- Umgebungstemperatur (für Sprödbruchnachweis)
- Schnee- und Eislasten
-

Lasten aus Anschlüssen (konventionelle Nennweiten bei Kryobehältern) sowie Störfall und Setzungslasten werden nicht standardmäßig berücksichtigt. Eine mögliche Schiefstellung des Behälters durch Setzung des Fundaments muss vermieden werden.

Tabelle 2: Einwirkungen mit Verweis auf entsprechende Teile der EC's:

	Einwirkung	Bemessung und Konstruktion
Eigengewicht (incl. Isolierung)	EC1-1-1 und EC1-4	EC3-1-6 und EC3-1-8
Füllgewicht	EC1-1-1	EC3-1-6 und EC3-1-8
Außendruck	-	EC3-1-6
Windlast	EC1-1-4	EC3-1-6 und EC3-1-8
Erdbebenlast	EC8-1	EC 3-1-6 und EC8-4
Umgebungstemp.	EC1-1-5	EC3-4-2 und EC3-1-10
Schnee-/Eislast	EC1-1-3	EC3-1-6 und EC3-1-8
Störfalllasten		
Setzungslasten		

Zusätzlich gelten immer die entsprechenden Nationalen Anhänge (NA) (falls vorhanden).

7. Außergewöhnliche Einwirkungen

Wie im Abschnitt 3 erläutert ist eine außergewöhnliche Einwirkung definiert als:

eine Einwirkung, die i. d. R. von kurzer Dauer, aber von bedeutender Größenordnung ist, und die während der geplanten Nutzungsdauer des Tragwerks, jedoch mit keiner nennenswerten Wahrscheinlichkeit auftreten kann.

Anprall, Schnee, Wind und Erdbeben können als veränderliche oder außergewöhnliche Einwirkungen behandelt werden, je nach statistischem Auftreten.

Beispiel Wind:

Die Windeinwirkungen nach EC1-1-4 sind charakteristische Werte (siehe EN 1990, 4.1.2). Sie werden mit der Basiswindgeschwindigkeit oder dem entsprechenden Geschwindigkeitsdruck bestimmt. Die Basiswerte sind charakteristische Größen mit einer jährlichen Überschreitenswahrscheinlichkeit von 2 %, die einer mittleren Wiederkehrperiode von 50 Jahren entspricht. Wenn die charakteristischen Werte im Auftragsfall mit anderen Wiederkehrperioden ermittelt werden, kann gegebenenfalls der Windlastfall als außergewöhnlich betrachtet werden.

Wichtig für Erdbeben:

Eine Differenzierung der Zuverlässigkeit wird durch die Einteilung der Bauwerke in unterschiedliche Bedeutungskategorien erreicht. Jeder Bedeutungskategorie ist ein Bedeutungsbeiwert zugeordnet. Wenn möglich, sollte dieser Beiwert derart ermittelt werden, dass er einem höheren oder niedrigeren Wert der Wiederkehrperiode der Erdbebeneinwirkung entspricht (bezüglich der Referenz-Wiederkehrperiode), jeweils so, wie es für die Auslegung der jeweiligen Bauwerkskategorie angemessen ist (siehe EN 1998-1, 3.2.1(3)).

Die unterschiedlich hohen Zuverlässigkeitsstufen erhält man durch Multiplikation der Referenz-Erdbebeneinwirkung oder (bei linearer Berechnung) der entsprechenden Auswirkungen mit diesem Bedeutungsbeiwert. Ausführliche Hinweise auf die Bedeutungskategorien und die entsprechenden Bedeutungsbeiwerte sind in den einschlägigen Teilen von EN 1998 enthalten.

8. Grenzzustände

Es ist zwischen den Grenzzuständen der Tragfähigkeit (GZT bzw. ULS für engl. ultimate limit state) und der Gebrauchstauglichkeit zu unterscheiden. Der Nachweis für einen Grenzzustand darf entfallen, wenn er durch den jeweils anderen abgedeckt wird.

Der Standsicherheitsnachweis wird nach dem Grenzzustand der Tragfähigkeit geführt. Ausnahmen könnten Sauerstofftanks für z.B. Krankenhäuser sein. Im Lastfall Erdbeben ist allerdings darauf zu achten, dass die erhöhte Anforderung schon über die Bedeutungskategorie (siehe EC8) erfüllt wird.

Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT):

- Tragwerks- oder Querschnittsversagen (STR - structural)
(Bemessung für Biegung, Querkraft, Torsion, Durchstanzen)
- Lagesicherheit (EQU - equilibrium)
- Baugrundversagen (GEO – geotechnical)
- Ermüdungsversagen (FAT – fatigue)
- Baulicher Brandschutz
-

Für Kryobehälter sind die Nachweise für die Grenzzustände STR und EQU erforderlich. Nach EC0 6.4.1 (1) a, und b gilt:

- EQU: Verlust der Lagesicherheit des Tragwerks oder eines seiner Teile betrachtet als starrer Körper, bei dem die Festigkeit von Baustoffen und Bauprodukten oder des Baugrunds im Allgemeinen keinen Einfluss hat.
- STR: Versagen oder übermäßige Verformungen des Tragwerks oder seiner Teile einschließlich der Fundamente, Fundamentkörper, Pfähle, wobei die Tragfähigkeit von Baustoffen und Bauteilen entscheidend ist.

9. Bemessungssituationen und Kombination im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT - ULS)

Bei der Kombination der Einwirkungen werden die veränderlichen Einwirkungen mit Kombinationsbeiwerten multipliziert. Es wird davon ausgegangen, dass die maximalen Werte unabhängiger veränderlicher Einwirkungen wie zum Beispiel Schnee und Wind nicht gleichzeitig auftreten. Es wird deshalb eine voll wirkende Leiteinwirkung angesetzt und die restlichen Einwirkungen durch Multiplikation mit Kombinationswerten ψ reduziert.

Bei der Kombination für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen wird eine veränderliche Lastart in voller Größe (=Leiteinwirkung) berücksichtigt, alle anderen veränderlichen Lastarten werden mit dem Kombinationsbeiwert ψ_0 abgemindert:

$$E_d = E \left(\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \times G_{k,j} + \gamma_p \times P_k + \gamma_{Q,1} \times Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \times \psi_{0,i} \times Q_{k,i} \right)$$

Kombination für außergewöhnliche Bemessungssituationen:

$$E_{dA} = E \left(\sum_{j \geq 1} \gamma_{GA,j} \times G_{k,j} + \gamma_{pA} \times P_k + A_d + \psi_{1,1} \times Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \times Q_{k,i} \right)$$

Die Zahlenwerte für die Kombinationsbeiwerte können z.B. aus Tabelle NA.A.1.1 aus EN 1990/NA entnommen werden.

10. Teilsicherheitsbeiwerte

Bei den o.g. Bemessungssituationen werden Unsicherheiten in den Annahmen (System, Lasten, Material) durch Sicherheitsbeiwerte abgedeckt. Anstelle eines globalen Sicherheitsbeiwertes wie in den alten Vorschriften werden **Teilsicherheitsbeiwerte** benutzt.

Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen (Erhöhung der Lasten)

Teilsicherheitsbeiwerte für Material (Verminderung der Materialkennwerte)

Mit den Teilsicherheitsbeiwerten wird den Unsicherheiten gezielt dort begegnet, wo sie auftreten. Diese Vorgehensweise ist in allen Eurocodes enthalten. Da es unwahrscheinlich ist, dass alle veränderlichen Lasten (z. B. Wind und Schnee) gleichzeitig in voller Größe und ungünstigster Kombination wirken, dürfen die veränderlichen Lasten um einen **Kombinationsbeiwert** vermindert werden. Dieser hängt von dem zu untersuchenden Grenzzustand ab.

Die Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen zur strukturellen Sicherheit (STR) können der Tabelle NA.A.1.2(B) aus EN 1990/NA entnommen werden. Dabei ist zu beachten ob die Einwirkung stabilisierend oder destabilisierend wirkt.

Die Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen zur Lagesicherheit (EQU) können der Tabelle NA.A.1.2(B) aus EN 1990/NA entnommen werden.

11. Tragwiderstand

Die Baustoffeigenschaften werden ebenfalls durch charakteristische Werte (Index k) festgelegt. Diese können für Stahl dem EC3 -1-1 entnommen werden.

Die Bemessungswerte (Index d) ergeben sich durch Division der charakteristischen Werte durch die entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerte. Für Stahlbauten siehe EC3-1-1.

12. Anwendung für Kryobehälter:

Tabelle 3: Nachweis der Lagesicherheit (EQU).

Bemessungssituation	Ständige Einwirkungen (ungünstig) $G_{k,j}$	$\gamma_{G,j,sup}$	Leitende veränderliche Einwirkungen $Q_{k,1}$	γ_{Q1}	Unabhängige veränderliche Einwirkungen 2	γ_{Q2}	Unabhängige veränderliche Einwirkungen 3/4	γ_{Q3}
Betrieb	Eigengewicht, (Außendruck)	1,35 1,10	Füllung	1,5	$\Psi_{0,2}=0,6$ Wind	1,5	$\Psi_{0,3}=0,6$ Temp. $\Psi_{0,4}=0,5$ Schnee/Eis	1,5
Wind (voll)	Eigengewicht, (Außendruck)	1,35 1,10	Wind	1,5	$\Psi_{0,2}=1,0$ Füllung	1,5	$\Psi_{0,3}=0,6$ Temp. $\Psi_{0,4}=0,5$ Schnee/Eis	1,5
Wind (leer)	Eigengewicht, (Außendruck)	1,15 1,10	Wind	1,5	$\Psi_{0,2}=0,0$ Keine Füllung	1,5	$\Psi_{0,3}=0,6$ Temp. $\Psi_{0,4}=0,5$ Schnee/Eis	1,5
Temperatur	Eigengewicht, (Außendruck)	1,35 1,10	Temp.	1,5	$\Psi_{0,2}=1,0$ Füllung	1,5	$\Psi_{0,3}=0,6$ Wind $\Psi_{0,4}=0,5$ Schnee/Eis	1,5
Schnee/Eis	Eigengewicht, (Außendruck)	1,35 1,10	Schnee/Eis	1,5	$\Psi_{0,2}=1,0$ Füllung	1,5	$\Psi_{0,3}=0,6$ Wind $\Psi_{0,4}=0,6$ Temp	1,5

Tabelle 4: Nachweis der Lagesicherheit (EQU) für außergewöhnliche Situation.

Bemessungssituation	Ständige Einwirkungen (ungünstig) $G_{k,j}$	$\gamma_{G,j,sup}$	Leitende veränderliche Einwirkungen $Q_{k,1}$	γ_{Q1}	Unabhängige veränderliche Einwirkungen 2	γ_{Q2}	Unabhängige veränderliche Einwirkungen 3	γ_{Q3}
Erdbeben	Eigengewicht, (Außendruck)	1,0 1,0	Erdbeben	1,0	$\Psi_{2,2}=0,8$ Füllung	1,0	-	1,0

Tabelle 5: Nachweis gegen Versagen des Tragwerks (STR).

Bemesungssituation	Ständige Einwirkungen (ungünstig) $G_{k,j}$	$\gamma_{G,j,sup}$	Leitende veränderliche Einwirkungen $Q_{k,1}$	γ_{Q1}	Unabhängige veränderliche Einwirkungen 2	γ_{Q2}	Unabhängige veränderliche Einwirkungen 3	γ_{Q3}
Betrieb	Eigengewicht, Außendruck	1,35 1,35	Füllung	1,5	$\Psi_{0,2}=0,6$ Wind	1,5	$\Psi_{0,3}=0,6$ Temp. $\Psi_{0,4}=0,5$ Schnee/Eis	1,5
Wind (voll)	Eigengewicht, Außendruck	1,35 1,35	Wind	1,5	$\Psi_{0,2}=1,0$ Füllung	1,5	$\Psi_{0,3}=0,6$ Temp. $\Psi_{0,4}=0,5$ Schnee/Eis	1,5
Wind (leer)	Eigengewicht, Außendruck	1,35 1,35	Wind	1,5	$\Psi_{0,2}=0,0$ Keine Füllung	1,5	$\Psi_{0,3}=0,6$ Temp. $\Psi_{0,4}=0,5$ Schnee/ Eis	1,5
Temperatur	Eigengewicht, Außendruck	1,35 1,35	Temp.	1,5	$\Psi_{0,2}=1,0$ Füllung	1,5	$\Psi_{0,3}=0,6$ Wind $\Psi_{0,4}=0,5$ Schnee/Eis	1,5
Schnee/ Eis	Eigengewicht, (Außendruck	1,35 1,35)	Schnee/Eis	1,5	$\Psi_{0,2}=1,0$ Füllung	1,5	$\Psi_{0,3}=0,6$ Wind $\Psi_{0,4}=0,6$ Temp	1,5

12.1 Einwirkungen aus Wind

Einwirkungen entsprechend Kapitel 4 nach EC1-1-4 + NA

In Tabelle 5.1 nach EC1-1-4 ist das Vorgehen zur Berechnung der Windkraft angegeben. Der Grundwert der Basiswindgeschwindigkeit wird durch die entsprechenden Windzonen definiert. Eine Auflistung der Windzonen nach Verwaltungsgrenzen stellt das DIBt zur Verfügung.

Dieses Verfahren kann mit den vereinfachten Geschwindigkeitsdrücken nach Tabelle NA.B.3 nach EC 1-1-4/NA verkürzt werden.

12.2 Einwirkung aus Erdbeben

Einwirkungen entsprechend Kapitel 4 nach EC8-1 (EC8-4) jeweils +NA

Die Bemessungswerte der Beschleunigungen sind vom Auftraggeber zu bestimmen und dem Behälterhersteller zu übermitteln. Der Verhaltensbeiwert für das Tragwerk soll in Absprache mit dem Hersteller festgelegt werden.

Es ist vom Auftraggeber darauf zu achten, die Erdbebenparameter sorgfältig auszuwählen.

Beispiel:

- Aufstellungsort Deutschland Erdbebenzone 3
- Bedeutungskategorie IV für Krankenhaus
- Baugrundklasse C
- Untergrundklasse R
- Verhaltensbeiwert 1,5; für Verankerung 1

Ergebnis der horizontalen Bemessungsordinate:

$$a=2,8 \text{ m/s}^2 \text{ (für } q=1,5) \text{ und } 4,2 \text{ m/s}^2 \text{ (für } q=1,0)$$

Resultat: Hohe Kosten für Fundament, Verankerung und Kryobehälter.

Warum soll für den Nachweis der Verankerung $q=1$ gewählt werden?

Auszug aus "Erläuterung zum VCI-Leitfaden zur DIN EN 1998-1"

Es ist sicherzustellen, dass sich plastische Verformungen ausschließlich in der Komponente selbst oder ihrer Unterkonstruktion ausbilden, nicht aber in den Verankerungen. Mögliche Überfestigkeiten in der Komponente oder der Unterkonstruktion müssen berücksichtigt werden.

Für den rechnerischen Nachweis der Verankerungen / Verbindungsmittel bedeutet dies, dass die Beanspruchungsgrößen (z.B. Auflagerkräfte der Komponente) durch Ansatz des Bemessungsspektrums mit $q=1,0$ zu ermitteln sind (siehe auch DIN EN1998-1 [18] Absatz 4.4.2.6 (2)P). Es können auch die Beanspruchungsgrößen aus dem Nachweis der eigentlichen Komponente ($q > 1,0$) verwendet werden; in diesem Fall müssen diese Größen für den Nachweis der Verankerungen mit dem angesetzten q multipliziert bzw. erhöht werden.

12.3 Einwirkung aus Füllmedium

Da die meisten Kryobehälter für die gängigen Medien N₂, O₂, Ar, CO₂, und evtl. Distickstoffoxid geeignet sind, muss die maximal mögliche Wichte (in Abh. Druck, Temp.) angesetzt werden. Aus wirtschaftlichen Gründen kann es sinnvoll sein, Standsicherheitsnachweise für verschiedene Medien anzufertigen.

12.4 Einwirkung aus Schnee-/Eislast

Schneelasten müssen aus EC1-1-3 +NA entnommen werden. Das DIBt stellt auch hier eine Auflistung der Schneezonen nach Gemeinden zur Verfügung.

12.5 Einwirkung aus Umgebungstemperatur

Die niedrigste Auslegungswandtemperatur MDMT nach EC3-4-2 / 3.5.2.

MDMT → T_{ed} in EC3-1-10

*„Für den niedrigsten Tagesmittelwert LODMAT der Umgebungstemperatur sollte die niedrigste über einen Zeitraum von 24 Stunden gemittelte, aufgezeichnete Temperatur verwendet werden. Wenn ungenügend vollständige Aufzeichnungen verfügbar sind, darf für diese Durchschnittstemperatur der Mittelwert aus der höchsten und der tiefsten Temperatur oder ein gleichwertiger Wert verwendet werden
LODMAT → lowest one day mean ambient temperature“*

12.6 Festigkeitsnachweise

12.6.1 Verankerung und Behälterfüße

Ankerschrauben EC3-1-8 /3.3 und EC3-4-1 /5.4.7 und EC3-4-2 /5.4.7 und 11.5

Nach EC3-4-2 /5.4.7 (3): *„Wenn der Tank von einer starren Verankerung unterstützt wird und horizontalen Lasten ausgesetzt ist (z. B. Wind, Stoß), sollten die Ankerkräfte nach der Schalentheorie ermittelt werden. ANMERKUNG: Es sollte angemerkt werden, dass diese Kräfte örtlich viel größer sein können als die nach der Balkentheorie bestimmten Kräfte. Siehe Absatz (3) in EN 1993-4-1, 5.4.7.“*

Füße oder Zargen:	EC3-1-1 und EC3-4-1
Fuß auf Druck + Biegung in Fußplatte:	EC3-1-8 /6.2.5 und 6.2.6.10
Fuß auf Zug + Versagen der Verankerung:	EC3-1-8 /6.2.6.11 und 6.2.6.12
Querkkräfte oder Reibung zw. Fußplatte + Fundament:	EC3-1-8 /6.2.2
Beton (einschließlich Mörtel) mit Druckbeanspruchung:	EC3-1-8 / 6.2.6.9

12.6.2 Stabilitätsnachweis

Der Stabilitätsnachweis muss nach EC3-1-6 durchgeführt werden.

12.6.3 Festigkeitsnachweis

Für Schale (Mantel und Boden):	EC3-1-6
Füße oder Zargen:	EC3-1-1 und EC3-4-1
Schweißnähte an Tragelementen:	EC3-1-8 /4

12.6.4 Sprödbruchsicherheitsnachweis

Für den Sprödbruchnachweis muss die LODMAT verwendet werden: (siehe EC3-4-2)

12.6.5 Design by Analysis (DBA) nach Eurocode

Für FEM Nachweise gilt allgemein: EC3-1-6
Jedoch wird empfohlen, den Nachweis nach EN 13445-3 durchzuführen.

12.6.6 Ermüdungsnachweis

Ein Nachweis auf Ermüdung muss für den Außenbehälter nicht erbracht werden.
Ausnahme: Reihenanzordnung von schwingungsanfälligen Behältern.

13. Prüfung des Standsicherheitsnachweises

Aus AD 2000 Merkblatt S3/0 4.3.5:

Für die Prüfung des Standsicherheitsnachweises sind eine Darstellung des gesamten statischen Systems, die erforderlichen Konstruktionszeichnungen und die erforderlichen Berechnungen einschließlich der Berechnung gegen Innendruck vorzulegen. Über die mit positivem Ergebnis abgeschlossene Prüfung ist ein Prüfbericht zu erstellen, und die geprüften Nachweise sind mit einem Prüfvermerk zu versehen.

Für Kryobehälter ist die Berechnung gegen Innendruck nicht Bestandteil des Standsicherheitsnachweises, sehr wohl jedoch Lasteinleitungspunkte vom Innenbehälter in den Außenbehälter.

14. Zusammenfassung

Das vorliegende Positionspapier enthält Empfehlungen zur Durchführung von statischen Berechnungen und zum Standsicherheitsnachweis von ortsfesten Kryobehältern, zur Erfüllung der Anforderungen in den Technischen Baubestimmungen der Bundesländer.

Die im Positionspapier dargestellten Grundlagen wurden so zusammengestellt, dass dadurch der größte Teil der Aufstellungsorte von ortsfesten Kryobehältern in Deutschland abgedeckt sein sollte. Aufstellungsorte haben aufgrund ihrer geodätischen Höhe, Meeresnähe, Erbebenzone, Windzone, Bodenbeschaffenheiten oder direkten Umgebungsbedingungen Auswirkungen auf die Einwirkungen. Fälle, die hinsichtlich dieser genannten Parameter außerhalb der im Positionspapier beschriebenen Bereiche liegen, müssen gesondert berücksichtigt und betrachtet werden.

Die Rahmenbedingungen erheben nicht den Anspruch auf Vollständigkeit für jegliche Aufstellungsorte in Deutschland.

15. Referenzen

1. Richtlinie 2014/68/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Mai 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Druckgeräten auf dem Markt (DGRL) (engl: Pressure Equipment Directive (PED)).
2. Leitlinien zur Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU
3. Eurocode 0 (EC0) - EN 1990 – Grundlagen der Tragwerksplanung -Alle Teile und Nationale Anhänge (NA)
4. Eurocode 1 (EC1) - EN 1991 – Einwirkungen auf Tragwerke - Alle Teile und Nationale Anhänge (NA)
5. Eurocode 2 (EC2) - EN 1992 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Alle Teile und Nationale Anhänge (NA)
6. Eurocode 3 (EC3) - EN 1993 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Alle Teile und Nationale Anhänge (NA)
7. Eurocode 8 (EC8) - EN 1998 – Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Alle Teile und Nationale Anhänge (NA)
8. EN 13458-2:2002+AC:2006 Kryo-Behälter - Ortsfeste vakuum-isolierte Behälter - Teil 2: Bemessung, Herstellung und Prüfung
9. VDMA 24408-1:2016-07 Abgrenzung verfahrenstechnischer Anlagen und Maschinen von der Europäischen Bauprodukteverordnung 305/2011/EU – Teil 1: Allgemeines
10. VDMA 24408-2:2016-07 Abgrenzung verfahrenstechnischer Anlagen und Maschinen von der Europäischen Bauprodukteverordnung 305/2011/EU – Teil 2: Ergänzungen zu harmonisierten Normen im Umfeld der Druckgeräterichtlinie
11. Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten (engl.: Construction Products Regulation (CPR))
12. AD2000 – Merkblätter
13. Baumgart Rudolf, Hochschule Darmstadt „Sicherheitskonzept (DIN EN 1990 bis 1998)“ 2014