Streusalzsilos in Holz-Dauben-Bauweise

Einleitung

In den vergangenen Jahren sind in erheblicher Anzahl Streusalzsilos für Autobahnmeistereien und Straßenmeistereien in Holzbauweise erstellt worden, die heute i. d. R. auf einer Stahlunterkonstruktion ruhen.

Diese Silos dienen einerseits der Befüllung von Streufahrzeugen, andererseits der Entnahme von Salz zur Herstellung einer Salzsole, die dem Streugut beigemischt wird.

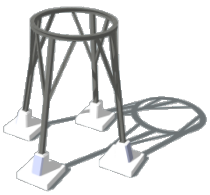
Aufgrund eines Schadensfalles in Niedersachsen wurde eine große Anzahl von Silos bezüglich möglicher Schiefstellungen überprüft. Dabei wurde festgestellt, dass viele von ihnen eine Schiefstellung von bis zu 1/50, bezogen auf die Konstruktionshöhe des Zylinders, aufweisen.

Im Rahmen einer Gutachterlichen Stellungnahme wurde versucht, mögliche Gründe für die festgestellten Schiefstellungen zu finden. Als Ursachen wurden folgende Möglichkeiten erörtert:

- andere Lastereignisse als in der Berechnung angenommen
- andere Materialeigenschaften des Füllgutes als in der Berechnung angenommen
- andere Steifigkeiten der Konstruktion als in der Berechnung angenommen
- unzureichende Berechnungsansätze / statische Modelle

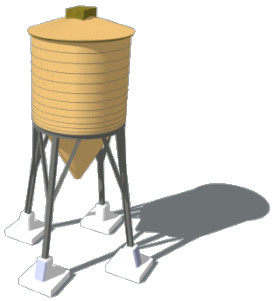
Aufbau der hier besprochenen Silos

Die Unterkonstruktion der Salzsilos besteht bei den neueren Modellen aus einem räumlichen Stahlrahmen mit einem kreisringförmigen Riegel zur Aufnahme der Holzkonstruktion.



Die Gründung erfolgt i. d. R. auf Einzelfundamenten.

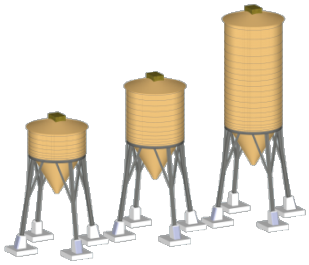
Das Silo selbst besteht aus einem kegelförmigen Trichter mit auf den Auslass zulaufenden trapezförmigen Holzdauben und einem darüber liegenden Zylinder aus vertikal angeordneten Holzdauben, die an ihrer Längsseite über Nut und Feder sowie über zusätzliche mechanische Verbindungen miteinander verbunden sind, sowie aus mehreren über die gesamte Höhe der Holzkonstruktion verteilten umlaufenden Stahlbändern / Spannringen.
Am oberen Rand des Zylinders werden die Dauben durch einen umlaufenden biegesteifen Ring bzw. eine Dachscheibe gehalten.



Grundlagen der Berechnung

Ursprünglich wurden die Silos nur mit geringem Volumen mit entsprechend geringer Zylinderhöhe gebaut. Die Berechnung und Konstruktion erfolgte bei vielen Siloanlagen nach teilweise stark vereinfachten Näherungsbetrachtungen auf der Basis der DIN 1055-6 : 2005-3. Zum Teil wurde in Anlehnung an die inzwischen in Niedersachsen zurückgezogene DIN 11622-3 (Gärfuttersilos und Gülle-behälter) versucht, die Aussteifung des Zylinders auf konstruktivem Weg sicher zu stellen.
Als Lastfälle wurden nach DIN 1055-6 Innendruck aus Füllgut, Teilflächenlasten zur Berücksichtigung unsymmetrischer Fließzustände sowie Windlasten angesetzt. Darüber hinaus wurden für die umlaufenden Stahlbänder Einflüsse aus Schwinden / Quellen, Vorspannung, Temperaturänderung etc. betrachtet.

Im Laufe der Zeit wurden Silos mit immer größerem Volumen und damit vergrößerter Konstruktionshöhe insbesondere des Zylinders erstellt. Die Veränderung der Dimensionen erfordert eine Überprüfung des bisherigen Nachweiskonzeptes bzw. der Randbedingungen der angewandten mechanischen Theorie. Im vorliegenden Fall betrifft dies vor allem das Tragverhalten der Konstruktion unter horizontalen Lasten (Teilflächenlasten und Windlast) und damit das Aussteifungskonzept.

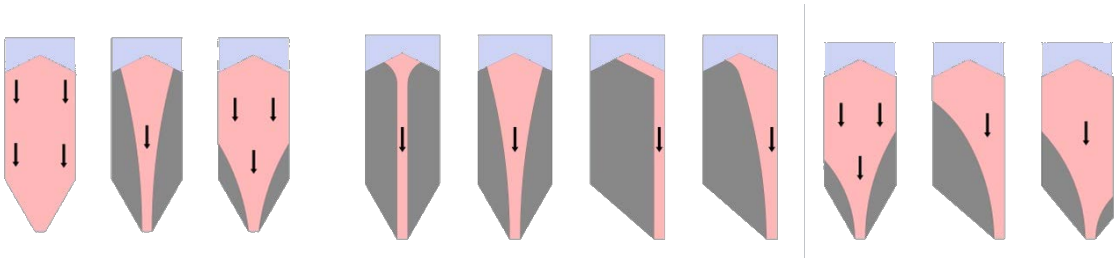


Für die Berechnung infolge des Innendrucks aus dem Füllgut war früher die DIN 1055 Teil 6 maßgebend, die inzwischen nahezu inhaltsgleich durch den EC 1 „Einwirkungen auf Tragwerke“-Teil 4 „Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter“ (DIN EN 1991-4:2010-12) ersetzt wurde.

Nach dieser Norm werden zylindrische Silos je nach Fassungsvolumen in die Anforderungsklassen 1 – 3 eingestuft, und sie werden in div. Schlankheitsgrade der Silos unterteilt. Zusätzlich wird zwischen dickwandigen und dünnwandigen Silos unterschieden.

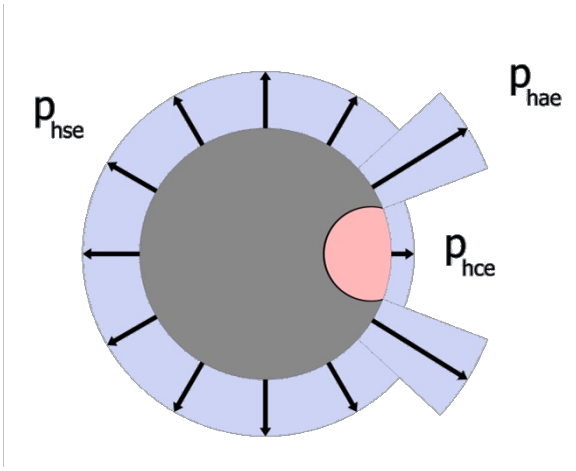
Die für eine statische Untersuchung erforderlichen Materialkennwerte können nicht direkt aus der Norm entnommen werden, da hier keine Werte für Streusalz angegeben werden. Sie sind daher (normkonform) in einem Gutachten von entsprechend geeigneten Fachleuten für Schüttguttechnik nach Regeln dieser Norm zu bestimmen. Die alternative Möglichkeit, ein in der Norm aufgeführtes „Allgemeines Schüttgut“ zu verwenden, führt zu nicht wirtschaftlichen Konstruktionen.

Für die konkreten Lastansätze aus dem Schüttgut ist es vor allem erforderlich, das Fließverhalten des Materials im Silo zu kennen. Dies hängt wesentlich von diversen Materialeigenschaften des Schüttgutes, von der Neigung und der Oberflächenbeschaffenheit des Trichters sowie von der Art der Entnahme (zentrisch/exzentrisch) ab.



(Massenfluss, Kernfluss /Schlotfluss, gemischtes Fließen,
innerer Schlotfluss (parallel/konvergent), exzentrischer Schlotfuss (parallel/konvergent),
konzentrisches bzw. voll/teilweise exzentrisches gemischtes Fließen)

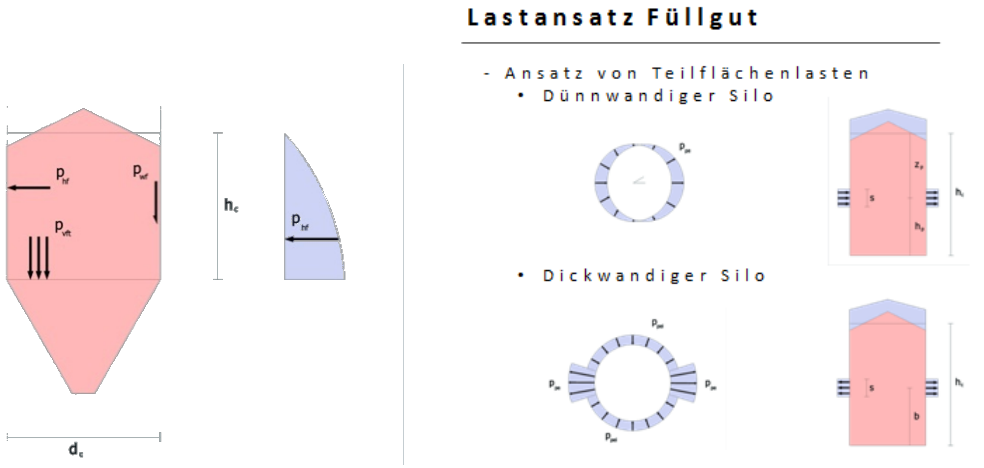
Für die hier besprochenen Holzdaubensilos ist es unter wirtschaftlichen und betriebstechnischen Aspekten erforderlich, dass Massenfluss sichergestellt ist, da ansonsten, je nach sich einstellendem Fließprofil, ggfls. stark unsymmetrische Lasten auf die Holzkonstruktion anzusetzen sind.



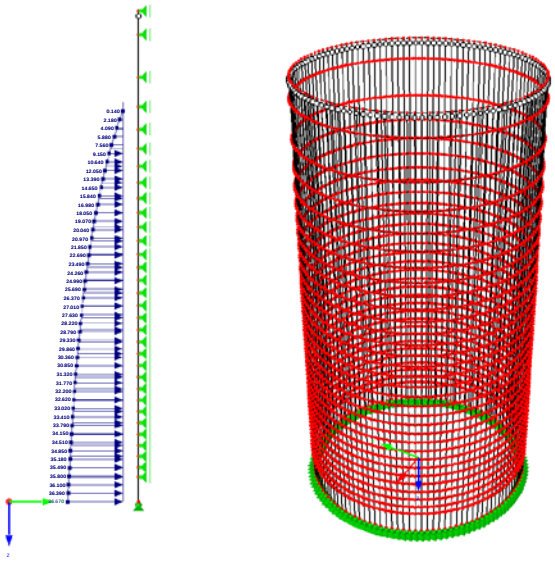
Die hier diskutierten Konstruktionen sind (ohne erheblichen zusätzlichen Aufwand) nicht in der Lage, diese stark unsymmetrischen Lasten aufzunehmen.

Um den notwendigen Massenfluss sicherzustellen ist es erforderlich, im Rahmen der Planung je nach Reibungswinkel des Schüttgutes und nach Wandreibungswinkel zwischen Trichterwandung (Holz, Beschichtung) und Schüttgut die erforderliche Neigung des Trichters vorzugeben. Diese Angaben sind ebenfalls in einem Gutachten von geeigneten Fachleuten für Schüttguttechnik zu ermitteln und über den Auftraggeber zur Verfügung zu stellen.
Darüber hinaus darf das Schüttgut nur zentrisch oder geringfügig exzentrisch ($e/d \leq 0{,}1$) entnommen werden, da ansonsten keine zuverlässige Aussage zu dem sich einstellenden Fließprofil möglich ist.

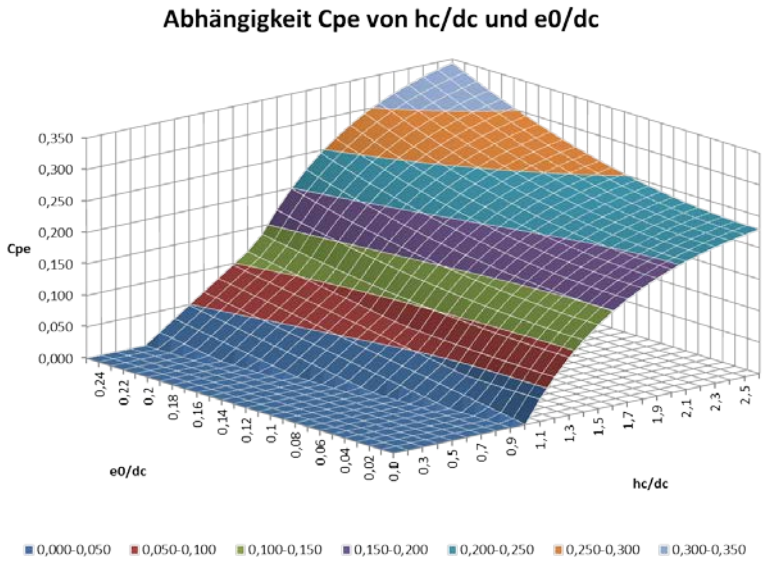
Sind diese Bedingungen (Beschichtung, ausreichende Trichterneigung, zentrische Entnahme) eingehalten, kann nach der Norm eine symmetrische Last für das Befüllen und das Entleeren des Silos als Innendruck ermittelt werden. Zusätzlich ist zur Berücksichtigung gewisser unplanmäßiger unsymmetrischer Lasten eine (geringe) Teilflächenlast auf die Zylinderwand anzusetzen, die unter bestimmten Umständen durch eine Erhöhung des symmetrischen Innendrucks ersetzt werden darf.



Für die symmetrischen Lasten aus Innendruck beim Füllen und Entleeren kann für das statische System der Dauben ausreichend genau ein Durchlaufträger angenommen werden. Die Lagerung der Dauben erfolgt dabei durch umlaufende Stahlbänder, die hieraus eine Zugbeanspruchung erhalten.



Für den Ansatz der Teilflächenlast wird in der Norm zwischen „dickwandigen“ und „dünnwandigen“ Silos unterschieden. Diese zusätzlich anzusetzenden Teilflächenlasten sind aufgrund von Schadensfällen an gebauten Silos und deren Ursachenerforschung in die Norm aufgenommen worden.
Nach Interpretation des Normentextes (DIN 1055) sowie nach Information durch den Normenausschuss wurde bei der Festlegung dieser Regelung gar nicht an Silos in Holzbauweise gedacht.
Mit dickwandigen Silos sind eindeutig Konstruktionen aus Stahlbeton, mit dünnwandigen Silos solche in Stahlbauweise gemeint.
Um die Norm in diesem Punkt adäquat anzuwenden wäre daher zu prüfen, ob sich Silos in der hier betrachteten Holzbauweise von ihrem Tragverhalten eher wie Stahlbetonsilos oder wie Stahlsilos verhalten. Im Zweifelsfall sollten beide Fälle betrachtet werden. Da aber die Teilflächenlast in der Regel durch eine Erhöhung des Innendruckes mit dem Faktor $(1 + c_{pe})$ ersetzt werden kann, soll dieser Aspekt hier nicht weiter erörtert werden.



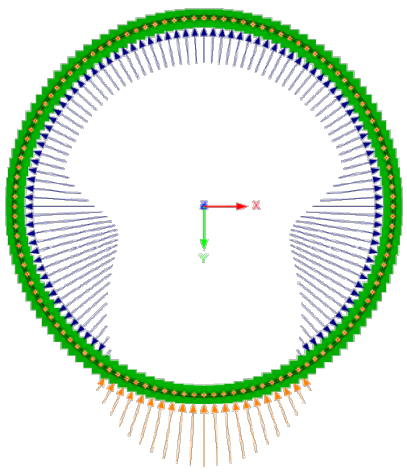
Lasterhöhung infolge Exzentizitäten e_0 im Lastfall Entleeren (Vorraussetzung: Massenfluss auch bei seitlicher Entnahme gesichert)

			$e_0 < 0{,}1d$	$0{,}1d < e_0 < 0{,}25d$
AK1	*Schlank 5.2*	dickwandig	nach 5.2.2.2 (2) Vernachlässigung der Teilflächenlast	nach 5.2.2.2 (2) Vernachlässigung der Teilflächenlast
		dünnwandig	nach 5.2.2.2 (2) Vernachlässigung der Teilflächenlast	nach 5.2.2.2 (2) Vernachlässigung der Teilflächenlast
	Mittelschlank 5.3	dickwandig	nach 5.3.2.2 (5) Vernachlässigung der Teilflächenlast	nach 7.3.2.2 (5) Vernachlässigung der Teilflächenlast
		dünnwandig	nach 5.3.2.2 (5) Vernachlässigung der Teilflächenlast	nach 7.3.2.2 (5) Vernachlässigung der Teilflächenlast
	Niedrig 5.3	dickwandig	nach 5.3.2.2 (4) Vernachlässigung der Teilflächenlast	nach 5.3.2.2 (4) Vernachlässigung der Teilflächenlast
		dünnwandig	nach 5.3.2.2 (4) Vernachlässigung der Teilflächenlast	nach 5.3.2.2 (4) Vernachlässigung der Teilflächenlast
AK2	*Schlank 5.2*	dickwandig	nach 5.2.2.3 Ansatz von Teilflächenlasten oder nach 5.2.3 (1) gleichförmige Erhöhung nach 5.2.3 (4)	nach 5.2.2.3 Ansatz von Teilflächenlasten oder nach 5.2.3 (1) gleichförmige Erhöhung nach 5.2.3 (4)
		dünnwandig	nach 5.2.2.4 Ansatz von Teilflächenlasten oder nach 5.2.3 (1) gleichförmige Erhöhung nach 5.2.3 (5)	nach 5.2.2.4 Ansatz von Teilflächenlasten oder nach 5.2.3 (1) gleichförmige Erhöhung nach 5.2.3 (5)
	Mittelschlank 5.3	dickwandig	nach 5.3.2.2 (7) gleichförmige Erhöhung nach 5.3.2.3 (2) --> 5.2.3 (4)	nach 5.3.2.2 (7) gleichförmige Erhöhung nach 5.3.2.3 (2) --> 5.2.3 (4)
		dünnwandig	nach 5.3.2.2 (7) gleichförmige Erhöhung nach 5.3.2.3 (2) --> 5.2.3 (5)	nach 5.3.2.2 (7) gleichförmige Erhöhung nach 5.3.2.3 (2) --> 5.2.3 (5)
	Niedrig 5.3	dickwandig	nach 5.3.2.2 (6) Vernachlässigung der Teilflächenlast	nach 5.3.2.2 (6) gleichförmige Erhöhung nach 5.3.2.3
		dünnwandig	nach 5.3.2.2 (6) Vernachlässigung der Teilflächenlast	nach 5.3.2.2 (6) gleichförmige Erhöhung nach 5.3.2.3
AK3	*Schlank 5.2*	dickwandig	nach 5.2.2.3 Ansatz von Teilflächenlsaten	nach 5.2.2.3 Ansatz von Teilflächenlsaten
		dünnwandig	nach 5.2.2.4 Ansatz von Teilflächenlsaten	nach 5.2.2.4 Ansatz von Teilflächenlsaten
	Mittelschlank 5.3	dickwandig	nach 5.3.2.2 (9) Teilflächenlasten nach 5.2.2.2 + 5.2.2.3	nach 5.3.2.2 (9) Teilflächenlasten nach 5.2.2.2 + 5.2.2.3
		dünnwandig	nach 5.3.2.2 (9) Teilflächenlasten nach 5.2.2.2 + 5.2.2.4	nach 5.3.2.2 (9) Teilflächenlasten nach 5.2.2.2 + 5.2.2.4
	Niedrig 5.3	dickwandig	nach 5.3.2.2 (8) vernachlässigung der Teilflächenlast	nach 5.3.2.2 (8) Teilflächenlast nach 5.2.2.2 + 5.2.2.3
		dünnwandig	nach 5.3.2.2 (8) vernachlässigung der Teilflächenlast	nach 5.3.2.2 (8) Teilflächenlast nach 5.2.2.2 + 5.2.2.4

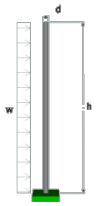
Wenn die Exzentrizität e_0 im Lastfall Entleeren größer als 0,25d ist, so sind nach 5.2.2.2 (4) zusätzliche Lastfälle zu berücksichtigen!

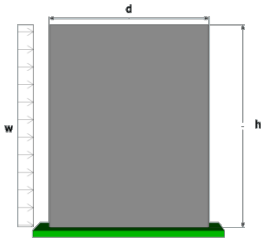
Schlank	$2{,}0 <= h_c/d_c$	*AK 1*	< 1000 kN
Mittelschlank	$1{,}0 < h_c/d_c < 2{,}$	*AK 2*	
Niedrig	$h_c/d_c <= 1{,}0$	*AK 3*	> 100.000 kN; > 10.000 kN und $e_0 > 0{,}25d_c$

Darüber hinaus sind noch statische Betrachtungen für den leeren Silo unter Windlast erforderlich. Hierzu wurde in der Vergangenheit der Zylinder i. d. R. als starrer, am Fuß eingespannter Stab berechnet und so die Biege-und Schubspannungen ermittelt. Dieser Ansatz ist jedoch zumindest bei größeren Silos nicht mehr gerechtfertigt.



Einerseits wird die Spannungsverteilung im Zylinder unter Windlast aufgrund des Verhältnisses von Spannweite (Höhe) und Querschnitt (Durchmesser) bei dieser vereinfachten Betrachtung nicht hinreichend genau erfasst, wie aus dem Vergleich des Spannungsverlaufes zwischen einer gedrungenen Scheibe und einem schlanken Biegeträger bekannt ist.





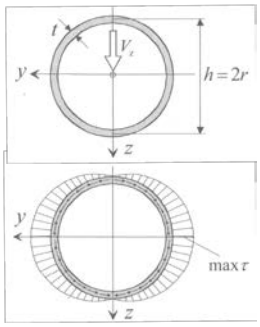
Andererseits ergeben sich aus der Lasteinleitung, die aufgrund der kostruktiven Randbedingungen (Verbindung der Dauben untereinander, Halterung der Dauben über die Höhe) nicht konform zur Schubspannungsverteilung in einem „starren“ Rohr erfolgt, zusätzliche Beanspruchungen in Umfangsrichtung, die auf die Verteilung der Biegespannungen und der Schubspannungen einen erheblichen Einfluss haben.

Die nachfolgend aufgeführte Berechnung der Schubbeanspruchung zwischen den Dauben entsprechend den Regeln der technischen Mechanik für Rohrquerschnitte mit schubkonformer Lasteinleitung gilt daher nicht mehr für Konstruktionen aus Holzdauben mit größerer Schlankheit.

Ermittlung der Schubbeanspruchung

Kragträger mit Kreisringquerschnitt unter Gleichlast

- Lasteinleitung Schubspannungskonform



$$\tau = \frac{V_z * S_y}{I_y * \sum t}$$

$$\max\tau = \frac{V_z}{\pi * r_m^3 * t}$$

$$\max T = \frac{V_z}{\pi * r_m^3}$$

$$\sum T = \frac{V_z}{\pi * r_m^3} * \frac{1}{2} * h$$

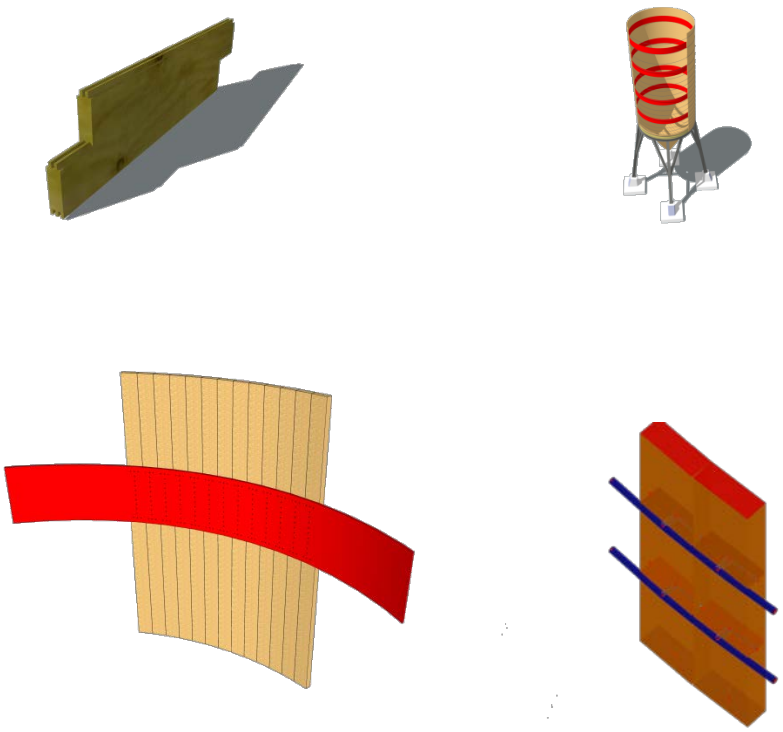
Zur Ermittlung der Schnittgrößen und Spannungen ist es daher erforderlich, das System als räumliches Stabwerk zu betrachten.

Für die Diskretisierung der Zylinderschale als Stabwerk wurden nachfolgend beschriebene Annahmen getroffen.

Die einzelnen Dauben sind am unteren Rand durch den Riegel der Stahlkonstruktion und am oberen Rand durch einen biegesteifen Ring oder eine Dachscheibe gehalten.

In den durchgeführten Parameterstudien wurden die Dauben untereinander in tangentialer Richtung auf Druck gekoppelt; auf Zug besteht keine direkte Verbindung untereinander. In Querrichtung wurde eine Querkraftkopplung angesetzt, die über das Nut-Feder-System realisiert wird, und in Längsrichtung wurde ebenfalls eine Querkraftkopplung angesetzt, die über eine mechanische Verbindung, z. B. mit Hilfe innen liegender Sperrholzstreifen und mechanischer Verbindungsmittel realisiert werden muss. Soll für diese Verbindung eine vorhandene Reibung in Ansatz gebracht werden, sind die erforderlichen Werte zunächst in bauteilrealistischen Versuchen zu ermitteln. Zusätzlich wurde eine sehr weiche biegesteife Kopplung der Dauben untereinander angesetzt, ohne die kein Gleichgewicht erreicht werden konnte.

Die den Zylinder umfassenden Zugstäbe wurden über Kontaktelemente so mit den Dauben verbunden, dass keine Querkraftübertragung zwischen den Zugbändern und den Dauben stattfinden kann. Durch eine geringe Vorspannung dieser Zugbänder wird für die Fuge zwischen den Dauben sichergestellt, dass die aus der angesetzten biegesteifen Kopplung der Dauben entstehenden Biegezugspannungen überdrückt werden. Es ist daher in regelmäßigen Abständen durch Nachspannen sicherzustellen, das ein sich einstellender Spannkraftverlust aus Schwinden bzw. Kriechen ausgeglichen wird.

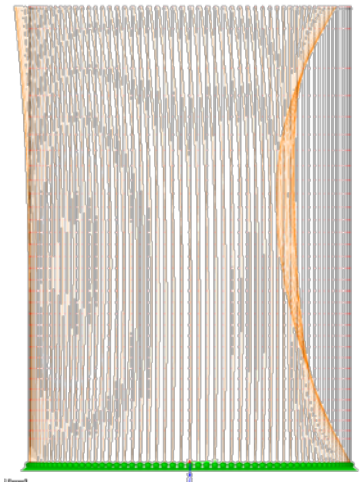


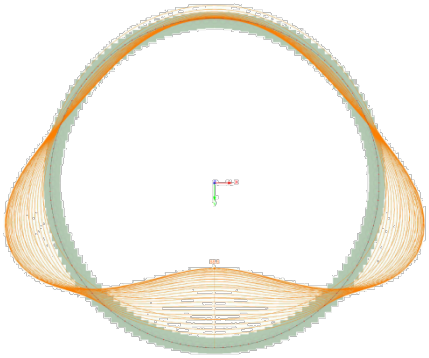
Neben der Übertragung der Schubkraft müssen die Verbindungsmittel auch das jeweilige Versatz - Moment (Querkraftzuwachs x Daubenbreite) in den Zylinder übertragen.

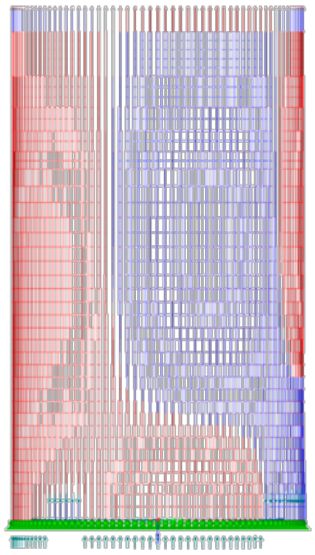
Ergebnisse exemplarischer Berechnungen

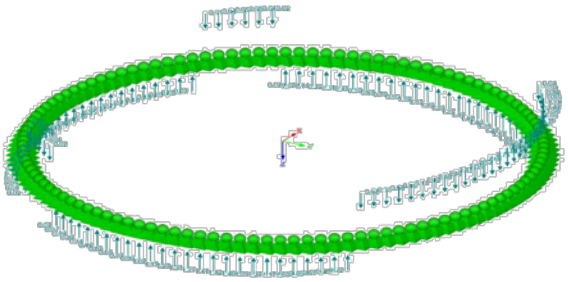
Es wurde ein System gerechnet, bei dem die Höhe der Zylinderschale ca. 12 m und der Durchmesser ca. 6 m beträgt. Die Gesamthöhe der Konstruktion incl. Stahlunterbau beträgt ca. 21 m ab OK Fundament.

Wie den nachfolgenden Darstellungen gut zu entnehmen ist, stellt sich im Zylinder ein Tragsystem ein, bei dem der Abtrag der Windlast durch zwei Teilsysteme mit jeweils Zug-und Druckkomponenten erfolgt. Entsprechend stellen sich auch die Auflagerreaktionen ein.
Durch die Lasteinleitung der Windlast in den Querschnitt entsteht Biegung in Daubenquerrichtung mit entsprechend großen lokalen Verformungen und einer zusätzlichen Schubbeanspruchung zwischen den Dauben.



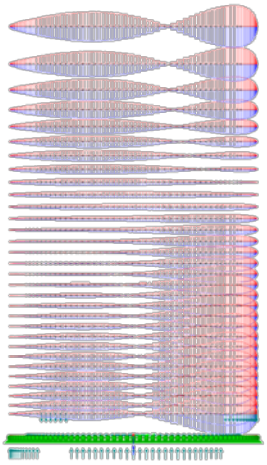




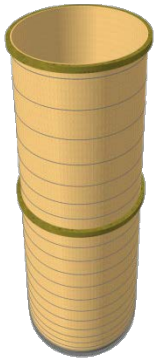


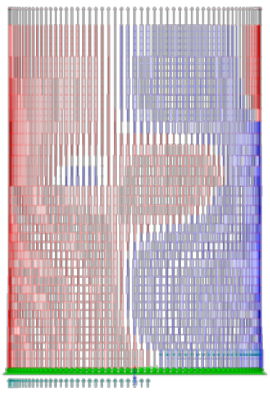
Man sieht an den exemplarischen Ergebnisdarstellungen deutlich den Unterschied der Verteilung der Zug-und Druckspannungen bzw. der Auflagerreaktionen im Vergleich zu einem schlanken Kragträger, bei dem bekanntlich auf der einen Seite Zug, auf der anderen Seite Druck entsteht.

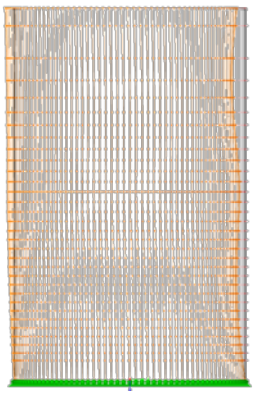
Die max. Schubbeanspruchung zwischen den Dauben war im dargestellten Beispiel ca. doppelt so hoch wie bei einem schlanken Kragträger, bei dem die Last schubspannungskonform in den Querschnitt eingeleitet wird.



Erheblich günstiger und damit einer vereinfachten statischen Betrachtung eher zugänglich gestaltet sich die Situation, wenn durch konstruktive Maßnahmen sowohl die Erhaltung der Querschnittsform unter Windlast als auch die schubkonforme Lasteinleitung in den Gesamtquerschnitt sichergestellt werden. Dies kann z. B. durch Einbau biegesteifer Ringe, verteilt über die Zylinderhöhe in einem Abstand ≤ dem Durchmesser, erfolgen.

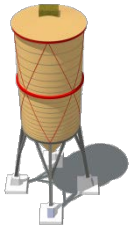


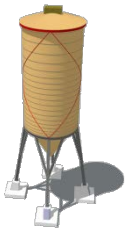


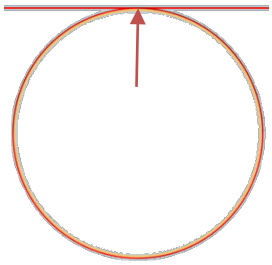


Für diesen Fall konnte durch Vergleichsrechnungen gezeigt werden, dass sich die Verteilung der Biege-und Schubspannungen (und der Auflagerreaktionen) durch eine Handrechnung gut abschätzen lässt.

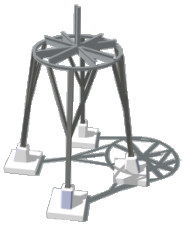
Alternativ kann zur Aufnahme der Beanspruchung aus Wind auch auf ein additives Tragsystem zurückgegriffen werden, bei dem zusätzliche äußere Diagonalen eingebaut werden. Hierbei ist es jedoch wichtig darauf zu achten, dass jeweils zwei entgegengesetzt orientierte Diagonalen an den Viertelspunkten des oberen Kreisringes angreifen. Bei Anordnung dieser Diagonalen an lediglich zwei gegenüberliegenden Seiten des Kreisringes sind diese nicht wirksam für den Fall, dass die betrachtete Windrichtung rechtwinklig zum Anschlusspunkt verläuft.

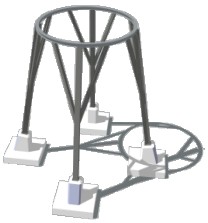






Abschließend sei (aus gegebenem Anlass) noch auf die Selbstverständlichkeit hingewiesen, dass die untere Stahlkonstruktion für die Stabilitätsbetrachtung im Rechenmodell realistisch abzubilden ist. Im Rechenmodell willkürlich zusätzlich eingebaute biegesteife Stäbe, mit denen eine evtl. vorh. stützende Wirkung des Schüttgutes modelliert werden soll, ist ohne adäquaten Beleg dieser Annahme, auch im Hinblick auf DIN EN 1991-4:2010-12, Absatz 4.1 (2), nicht zulässig.





Martin M. Speich, Prof. Dr.-Ing., Prüfingenieur für Baustatik, FH Lübeck

Robert Bernstein, M. Eng., **shl ingenieure** gmbh, Hannover