

Spannbetonsilos mit hohen Vorspanngraden unter instationären Temperatureinwirkungen

Dipl.-Ing. Dieter Lippold

Spannbetonsilos mit hohen Vorspanngraden unter instationären Temperatureinwirkungen

Bei der Vorspannung zylindrischer Silowände in Ringrichtung wird im Allgemeinen ein Kompromiss zwischen zwei Grenzzuständen gesucht: Bei leerem Silo treten große Ringdruckkräfte auf, denen sich bei Beginn der Füllung mit heißem Schüttgut Zwangsspannungen infolge des Temperaturunterschiedes über die Wanddicke überlagern. Dies bedeutet maximale Druckspannungen in Ringrichtung auf der Wandinnenseite. Bei vollem Silo überlagern sich Ringzugkräfte und Zwangsmomente infolge des heiß eingefüllten Schüttguts zu maximalen Zugspannungen auf der Wandaußenseite. Zu große Druckspannungen können den Wandbeton schädigen, zu große Zugspannungen führen zu unzulässig breiten Rissen, die die Dauerhaftigkeit gefährden.

Während bisher keine Hinweise auf Schäden auf der Wandinnenseite infolge hoher Druckspannungen gefunden wurden, weisen Schäden (Delaminierungen) auf der Wandaußenseite von sehr hoch vorgespannten Silowänden auf eine möglicherweise bisher unterschätzte Schadensursache hin. Die instationären Temperaturspannungen aus Sonneneinstrahlung überlagern sich den Druckspannungen aus Vorspannung und verursachen sehr große Querspannungen im Bereich zwischen äußerer Wandbewehrung und den Ringspanngliedern, wie nicht-lineare Berechnungen mit dem FE-Programm MASA 3 ergaben. Werden in Kombination mit weiteren Einflüssen aus dem Silobetrieb die aufnehmbaren Zugspannungen überschritten, erklärt dies möglicherweise die beobachteten Delaminierungen an der Außenseite hoch vorgespannter Silowände, die intensiver Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind.

1 Allgemeines

In den 60iger und 70iger Jahren des letzten Jahrhunderts wurden in der Zementindustrie immer größere Klinkersilos und Klinkerlager geplant und gebaut. Mit zunehmenden Durchmessern und immer größeren Füllhöhen stiegen auch die Ringzugkräfte in den Silowänden signifikant an. Da in den meisten Fällen die durchschnittlichen Klinkertemperaturen beim Befüllen 100 °C und mehr betragen, treten zusätzlich zu den Ringzugkräften aus der Füllung hohe Temperaturunterschiede über die Wanddicke auf, die außer den Ringzugspannungen noch große Zwangsspannungen in den Wänden verursachen.

Schnell ergaben sich hieraus Schnittgrößen, die mit der bisher üblichen Betonstahlbewehrung nicht mehr aufgenommen werden konnten, sondern den Einsatz von Vorspannung in Ringrichtung erforderlich machten. Früh ergaben sich in der Fachwelt Diskussionen, welcher Vor-

Post-tensioned silo walls with high post-tensioning degree and transient temperature effects

When post-tensioning a cylindrical silo wall in ring direction usually a compromise of two limit states has to be considered: For an empty silo high compression stresses will occur in combination with high restraint stresses due to the temperature difference between inside and outside when filling the silo with hot bulk material. This means a maximum for the compression stresses in ring direction at the inner face of the wall. When the silo is filled to capacity circumferential tension and restraint bending moments due to the hot bulk material will cause maximum tensile stresses at the outer face of the wall. Excessive compression stresses can damage the wall concrete, while excessive tensile stresses cause wide cracks, which endanger the durability.

Until now no indications were found for damages at the inner face of silo walls due to excessive compression stresses in ring direction, but damages (delaminations) at the outer face of some silo walls with very high post-tensioning suggest a risk, which has been underestimated until now eventually. Transient temperature stresses due to the sun radiation will increase the compression stresses due to post-tensioning, which causes very high transverse tensile stresses in the range between outer reinforcement and tendons. This was proved by a non-linear analysis with the FE-program MASA 3. If further influence from silo operation causes tensile stresses above the ultimate limit state, this might be an explanation for the delaminations, which have been detected at the outer face of silo walls with high post-tensioning degree and intensive sun radiation.

spanngrad für solchermaßen belastete Silowände sinnvoll sei. Da zur damaligen Zeit in der Bundesrepublik Deutschland für Bauwerke im Freien unter länger wirkenden Verkehrslasten nur volle Vorspannung zugelassen war, schien der Weg vorgegeben, die kombinierten Zugspannungen infolge Ringzug und Temperaturzwang auf der Wandaußenseite durch Ringvorspannung vollständig zu überdrücken. Aufgrund der hohen Zwangsspannungen infolge des Temperaturunterschieds in der Wand ergaben sich aus dieser Vorgabe sehr hohe erforderliche Vorspannkräfte.

Bereits in ihren damaligen Veröffentlichungen zur Berechnung und Bemessung von Silowänden verwiesen die Autoren Prof. Dr.-Ing. JÖRG PETER und Dipl.-Ing. GEORG LOCHNER darauf, dass hierbei in vielen Fällen eine unwirtschaftliche Bemessung die Folge wäre und zudem die zulässigen Druckspannungen in horizontaler Richtung auf der Wandinnenseite überschritten würden – haupt-

sächlich bei niedrigen Füllständen während des Einfüllens von heißem Klinker [1].

PETER und LOCHNER befürchteten, dass hierdurch Schäden an der Wand verursacht werden könnten und empfahlen als Alternative die bereits in der Schweiz verwendete teilweise Vorspannung. Hauptaugenmerk sollten hierbei nicht zulässige Zugspannungen, sondern die Einhaltung zulässiger Rissbreiten sein, die die Dauerhaftigkeit der Wände sicherstellen sollte.

Zusammen mit Dr.-Ing. RAINER KOCH von der Universität Stuttgart wurden für diesen Spezialfall Bemessungsdiagramme entwickelt, die eine bautechnisch überzeugende und gleichzeitig wirtschaftliche Wandbemessung mit wesentlich geringeren Vorspannkräften als bei voller Vorspannung erlaubten [2]. Dieser Bemessungsansatz wurde seitdem vom Büro Peter und Lochner konsequent umgesetzt [3, 5], und die meisten Tragwerksplaner in Deutschland übernahmen diese Methode im Grundsatz. Bei einer Vielzahl seit dieser Zeit ausgeführter Klinkersilos und Klinkerlager wurde dieses Prinzip erfolgreich eingesetzt, und es sind dem Verfasser keine Schäden bekannt, die auf dieses Konzept zurückzuführen gewesen wären.

Da in den Zement- und Kraftwerken auch die Silos für Zement, Kalksteinmehl, Flugasche etc. immer größer wurden und gleichzeitig die Anforderungen aus dem Silobetrieb immer ungünstigere Beanspruchungen der Silowände mit hohen Biegemomenten und Querkräften ergaben, wurde in den letzten Jahren die teilweise Vorspannung der Wände auch bei diesen Silotypen immer häufiger verwendet, nachdem lange Jahre fast nur „schlaff“ bewehrte Wände zum Einsatz gekommen waren.

Auch hier war diese Methode bisher sehr erfolgreich, nachdem es zuvor zu einigen massiven Schäden an nicht vorgespannten Silowänden bis hin zum Einsturz ganzer Silos gekommen war. So platzte z. B. im Jahr 2005 in einem Zementwerk nahe der Stadt Davao auf den Philippinen die Silowand eines großen Rohmehlsilos oberhalb des kegelförmigen Silobodens regelrecht auf und stürzte in sich zusammen – übrig blieb ein Berg aus Betontrümmern vermischt mit Rohmehl, aus dem nur noch die Spitze des kegelförmigen Bodens herausragte. Beim Einsturz wurden weitere Bauwerke in der Nachbarschaft schwer in Mitleidenschaft gezogen, und die betreffende Ofenlinie musste lange Zeit außer Betrieb genommen werden (nicht veröffentlichter Schadensfall).

Gleichzeitig hatte das Büro Peter und Lochner in den letzten zehn Jahren Siloschäden im außereuropäischen Ausland zu begutachten und instandzusetzen, bei denen ungewöhnlich hohe Vorspannkräfte zur horizontalen Vorspannung der Wände verwendet worden waren. In allen Fällen betrug die Druckspannung allein infolge Vorspannung mehr als 10 MPa bei Betondruckfestigkeiten in der Größenordnung von 35–40 MPa. Im Vergleich zu der von PETER und LOCHNER verwendeten Bemessungs-

methode betragen die hier vorliegenden Vorspannkräfte mehr als das Doppelte.

Nach dem früheren Bemessungskonzept mit globaler Sicherheit und zulässigen Druckspannungen wären bei einer Kombination von Vorspannung und Temperaturzwang, wie sie z. B. mit Beginn des Füllens eines Silos auftreten kann, die zulässigen Druckspannungen auf der Wandinnenseite deutlich überschritten worden.

Bemisst man nach aktuellen Normen mit dem Teilsicherheitskonzept, so ergibt sich in diesen Fällen eine horizontale Druckbewehrung. Beachtet man, dass bei Silowänden, die im Gleitverfahren hergestellt werden, die horizontale Bewehrung normalerweise in der äußersten Lage liegt, ergeben sich hieraus konstruktive Probleme, die schwere Schäden verursachen können, hauptsächlich im Bereich der Übergreifungsstöße. Hier ist zu befürchten, dass die Betondeckung infolge hoher Spaltzugspannungen im Stoßbereich geschädigt wird und abplatzt, wenn keine sorgfältige Verbügelung erfolgt.

Leider war in keinem der begutachteten Schadensfälle eine statische Berechnung zu erhalten bzw. hatten sich die Tragwerksplaner auf Nachweise für volle Silos beschränkt, ohne dass weitere Erläuterungen zum Bemessungskonzept gemacht wurden. Hinweise auf die erwähnten kritischen Zustände waren in keinem Fall zu finden und auch keine Begründung für die hohen Vorspannkräfte. So lässt sich nur vermuten, dass die Überlegung, keine Risse auf der Wandaußenseite zuzulassen, der Grund für die Wahl der außerordentlich hohen Vorspannkräfte war. In einem Fall wurde argumentiert, die gültigen Normen hätten einen Vorspanngrad, bei dem Risse auftreten könnten, nicht zugelassen.

2 Beschreibung der begutachteten Schäden

Insgesamt lagen aus Sicht des Verfassers ausreichend deutliche rechnerische Hinweise dafür vor, dass die gewählte Höhe der Vorspannkräfte zu Problemen auf der Wandinnenseite führen könnte. Tatsächlich waren dann auch nach einigen Jahren Betriebszeit Schäden aufgetreten, allerdings nicht wie vermutet an der Innenseite der Wände, sondern an deren Außenseite. Schalenartige Bereiche der äußeren Wandoberfläche mit einer Dicke von bis zu ca. 10 cm platzten großflächig ab (Bild 1). Teilweise lief ein Trennriss zwischen den äußeren horizontalen und vertikalen Bewehrungslagen und den Spanngliedern, teilweise waren die äußerste horizontale und die folgende vertikale Bewehrungslage voneinander getrennt.

Je nach Lage des Risses waren die Abdrücke der Bewehrungsstäbe auf der anderen Seite zu sehen bzw. waren stellenweise sogar die Hüllrohre der Spannglieder sichtbar (Bild 2). Die Trennrisse zwischen Wandkern und der äußeren abgeplatzten Schale liefen im Wesentlichen parallel zur Wandmittelfläche, an den Rändern der abgeplatzten Bereiche liefen die Risse in einem sehr spitzen



Bild 1 Blick von oben auf eine Abplatzung an einer vorgespannten Silowand
View from top on a delamination at a post-tensioned silo wall



Bild 3 Kernbohrung im Bereich einer Abplatzung an einer vorgespannten Silowand
Core boring at a delamination at a post-tensioned silo wall



Bild 2 Unterer Rand einer Abplatzung mit Ringbewehrung und Hüllrohr eines Spannglieds
Bottom edge of a delamination with ring reinforcement and tendon



Bild 4 Papierdünn auslaufender Rand einer abgeplatzten Zone
Wafer-thin edge of a delamination

Winkel zur Wandoberfläche aus oder endeten an Rissen, die senkrecht zur Wandoberfläche verliefen (Bilder 3 und 4). An diesen Rissen waren beim Abklopfen mit einem Hammer abgeplatzte Bereiche als hohl klingende Zonen von ungerissenen, normal klingenden Bereichen scharf getrennt.

Die sehr spitzwinklig an der Oberfläche auslaufenden Abplatzungen endeten mit einer papierdünnen Zone aus Zementleim an einem irregulär wellenförmig bzw. stark kurvig verlaufenden Riss. Sie unterschieden sich hierdurch deutlich von den Rissen, die üblicherweise durch Ringzugspannungen verursacht werden. Diese verlaufen meist in vertikalen, annähernd geraden Linien und dringen weitgehend senkrecht zur Oberfläche in den Wandbeton ein.

Glücklicherweise waren die abgeplatzten Bereiche durch die äußeren Bewehrungslagen noch soweit mit dem Wandkern verbunden, dass sie nicht abstürzten, obwohl sie bis zu 50 m² groß waren. Der Absturz solcher tonnenschweren Betonteile hätte weitere schwere Schäden zur Folge haben können, weshalb weiträumige Absperungen vorgenommen werden mussten.

Die Bilder 5 und 6 zeigen Fälle, bei denen der Kernbeton samt äußerer Bewehrung großflächig freiliegt und an denen die für die Bilder 1 bis 4 beschriebene Ausbildung der Schäden ebenfalls an vielen Stellen abzulesen ist. So lassen sich in den Bildern 5 und 6 die spitzwinklig zur Oberfläche auslaufenden Risse erkennen, in Bild 6 sind deutlich vom Kernbeton abgelöste Stäbe der Ringbewehrung samt ihren Abdrücken auf der Gegenseite zu sehen. Der



Bild 5 Großflächige Delaminierung an einem Spannbetonsilo (Foto: ALLVIA)
Large delaminated area at a post-tensioned silo wall (Photo: ALLVIA)



Bild 6 Delaminierung an einem Spannbetonsilo mit teilweise zerstörtem Verbund der Ringbewehrung (Foto: ALLVIA)
Delamination at a post-tensioned silo wall, bond of ring reinforcement destroyed partly (Photo: ALLVIA)

Beton wurde hier großflächig entfernt, nachdem einzelne (bis zu 50 kg schwere) Teile bereits abgestürzt waren. Bild 7 zeigt einen schematischen Querschnitt durch einen weiteren beschädigten Spannbetonsilo mit Angabe der vom Betreiber vorläufig aufgenommenen Risse im Bereich des Zentralkegels.

3 Mögliche Schadensursachen

Auf den ersten Blick waren in keinem der begutachteten Fälle die Ursachen für die Abplatzungen erkennbar, die mitten in den Wänden ohne äußerlich sichtbare Störzonen wie z. B. Kiesnester und Betonierfugen oder sonstige Unre-

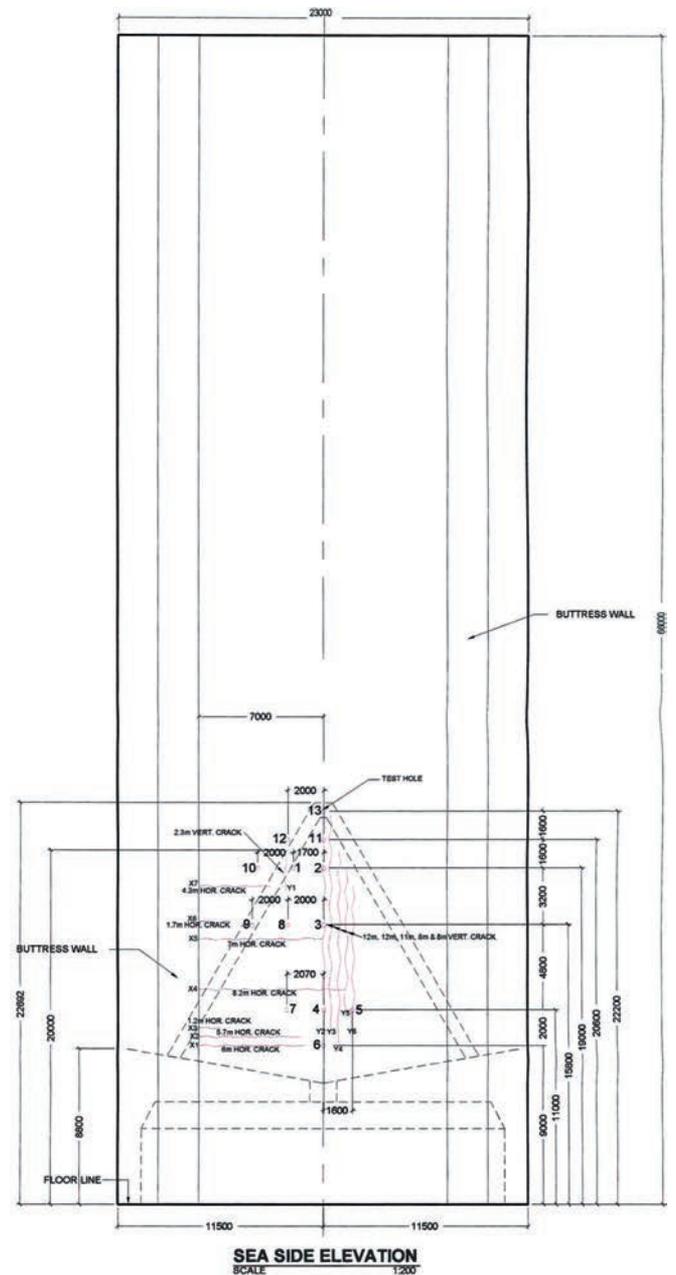


Bild 7 Schematischer Querschnitt durch ein Spannbetonsilo mit vorläufiger Rissaufnahme
Vertical section of a post-tensioned silo with preliminary mapping of cracks

gelmäßigkeiten wie Einbauteile, Öffnungen und Ähnliches auftraten. Eine Wand war z. B. klar erkennbar mittels Kletterschalung in ringförmigen Abschnitten hergestellt worden. Hier liefen die Trennrisse zum Teil über mehrere Arbeitsfugen hinweg, was gegen einen Zusammenhang von Trennriss und Arbeitsfuge sprach. Auffällig und allen Schäden gemein war, dass sie im Wesentlichen in den Zonen mit der höchsten Vorspannung auftraten, bei denen die Hüllrohre der Ringspannglieder untereinander teilweise nur noch einen Achsabstand von ca. 25 cm hatten.

Überlegungen zum Spannungszustand in der äußeren Wandhälfte gaben erste Hinweise auf mögliche Schadensursachen:

a) Einleitung der Spanngliedkräfte

Die Vorspannung wird über Umlenkkräfte der ringförmig gekrümmten Spannglieder in den Kernbeton eingeleitet. Die Umlenkkräfte erzeugen hierbei Druckspannungen senkrecht zur Schalenmittelfläche, die auf den Betonbereich innerhalb der Spanngliedhüllrohre wirken. Dieser Wandteil wird also von außen zusammengedrückt und erhält so die Vorspannung in Umfangsrichtung.

Der Wandbereich außerhalb und zwischen den Hüllrohren muss aus Gründen der Verträglichkeit (Kompatibilität) die gleiche Verformung wie die innere Wandzone erhalten. Die hierfür erforderlichen anteiligen Umlenkkräfte können nur durch Zugspannungen im Beton quer zur Schalenmittelfläche eingeleitet werden.

Mit einer einfachen Gleichgewichtsbetrachtung lassen sich am Beispiel, das für die weitere Untersuchung benutzt wurde, mittlere Quersugspannungen abschätzen: Bei $V_0 = -3150 \text{ kN/m}$ und zwei Spanngliedern je Meter Wandhöhe mit ca. 80 mm Hüllrohrdurchmesser erhält man bei 15,20 m mittlerem Wandradius als Umlenkkraft

$$u_1 = 3150/15,2 = 207 \text{ kN/m}$$

für einen 1 m hohen Wandabschnitt (Bild 8).

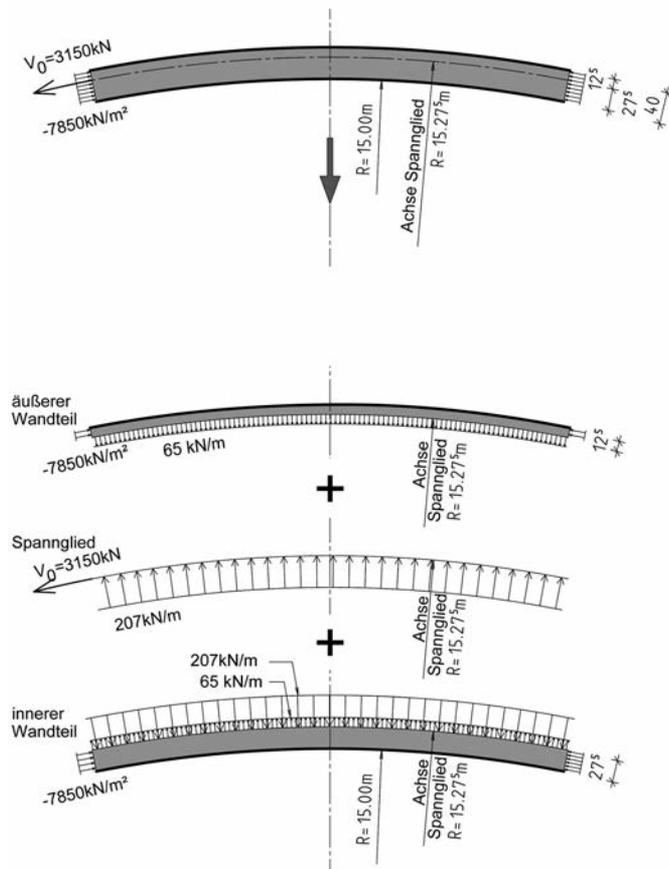


Bild 8 Gleichgewichtsbetrachtung an einem gekrümmten Wandstück mit Vorspannung
Reflection on equilibrium for a curved part of a post-tensioned wall

Betrachtet man den äußeren Wandteil außerhalb der Achse Spannglied, ergibt sich bei einem Spanngliedradius von 15,275 m eine Querschnittsfläche von

$$12,5/40 \cdot 100 = 31,25 \%,$$

die über Quersug „aktiviert“ werden muss.

Damit beträgt die anteilige Umlenkkraft

$$0,3125 \cdot 207 = 65 \text{ kN/m.}$$

Hieraus ergibt sich in Achse Spannglieder eine mittlere Quersugspannung von

$$65/(1,00-2 \cdot 0,08) = 77 \text{ kN/m}^2.$$

Verdoppelt man die Zahl der Spannglieder und damit auch V_0 , so ergibt sich entsprechend eine mittlere Quersugspannung von

$$2 \cdot 65/(1,00-4 \cdot 0,08) = 190 \text{ kN/m}^2 = 0,19 \text{ MPa.}$$

Dies bedeutet eine Spannungssteigerung um den Faktor 2,5 bei Erhöhung der Vorspannung um den Faktor 2,0.

Auf den ersten Blick erscheint der Mittelwert von 0,19 MPa für die Quersugspannung unbedenklich, aber betrachtet man die genaue Geometrie des gewählten Querschnitts, so ist offensichtlich, dass mit wesentlich höheren Werten im Bereich örtlicher Spannungsspitzen gerechnet werden muss.

b) Weitere Einflüsse, die zusätzliche Quersugspannungen bewirken:

- Die Stahlspannungen der Ringbewehrung sind im Verhältnis E_s/E_c erhöht, was örtlich höhere Umlenkkräfte und damit auch höhere Quersugspannungen bedeutet.
- Ein Teil der Vorspannkraft erzeugt bereits beim Vorspannvorgang Druckspannungen in der Ringbewehrung.
- Durch Kriechen und Schwinden des Betons lagert sich ein weiterer Teil der Vorspannkraft in die Ringbewehrung um, was eine weitere Spannungssteigerung in der äußeren Ringbewehrung bewirkt.
- Im Bereich von Übergreifungsstößen der Ringbewehrung treten zusätzliche Spaltzugspannungen auf, die sich den Quersugspannungen überlagern.
- Beim Auftreten von Fließkanälen während des Entleerens entstehen zusätzliche Quersugspannungen im Querschnitt.

Diese Effekte werden prinzipiell bereits bisher bei Entwurfsüberlegungen berücksichtigt, indem konstruktive Grundregeln eingehalten werden. Beispielsweise werden Temperatureinflüsse aus heißem Füllgut, die innen Druck- und außen Zugspannungen bewirken, üblicherweise beim Nachweis der Rissbreitenbeschränkung beachtet.

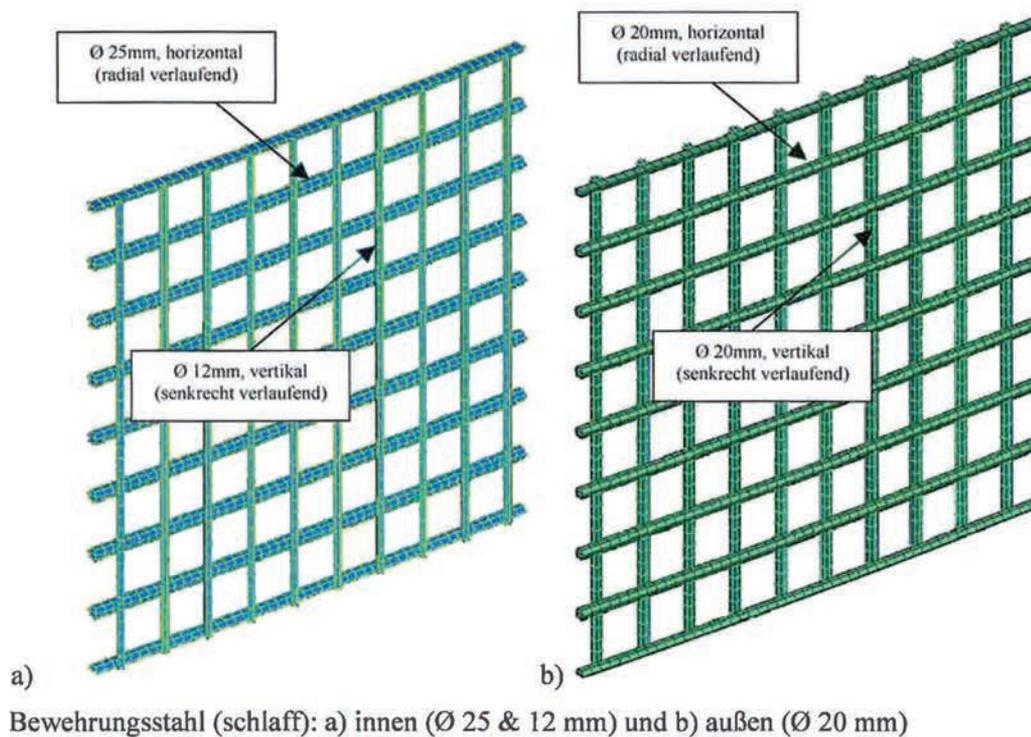
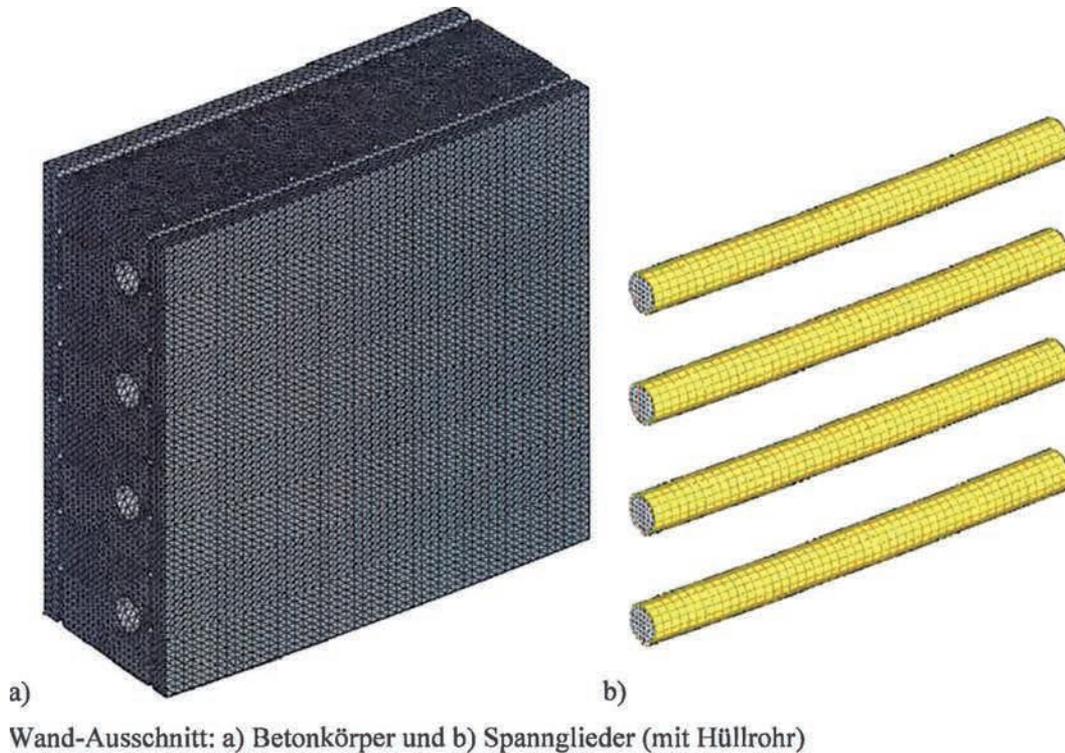


Bild 9 Rechenmodell für Wandabschnitt zur Detailberechnung = Abbildungen 1 und 2 aus [4]
Modeling of a wall part for detailed analysis = pictures 1 and 2 out of [4]

4 Beanspruchung durch Sonneneinstrahlung

Da sich der heiße innere Wandteil aufweiten will, daran aber von dem kälteren äußeren Teil gehindert wird, ist in diesem Fall offensichtlich in der inneren Wandzone mit Querdruckspannungen zu rechnen, die sich günstig auswirken. Also ist dieser Fall für das betrachtete Problem uninteressant.

Was aber passiert im umgekehrten Fall, wenn sich z. B. bei Sonneneinstrahlung die äußere Wandzone stärker erwärmt als der innere Bereich, z. B. wenn kein heißes Material eingelagert wird bzw. sich diese Zone bereits wieder abgekühlt hat?

Die Beobachtung, dass die unter Abschn. 2 beschriebenen Schäden vornehmlich konzentriert in jenen Wand-

zonen auftraten, die besonders der Sonneneinstrahlung ausgesetzt waren, führte zu der Überlegung, dass hier eventuell eine Beanspruchung auftritt, die wesentlichen Einfluss auf den maßgeblichen Spannungszustand in der Wand haben kann. Insbesondere die instationäre Erwärmung der äußeren Wandzone zu Beginn der Sonneneinstrahlung ließ hier hohe Zusatzspannungen vermuten. Damit ergab sich eine Berechnungsaufgabe, die mit linear-elastischen Verfahren nicht mehr sinnvoll angegangen werden kann.

Aus diesem Grund wurden nicht-lineare Berechnungen mit dem FE-Programm MASA 3 durchgeführt. Für die Berechnung instationärer Temperaturzustände wurden erst kürzlich entwickelte Programmteile verwendet. Die gesamten Ergebnisse dieser Berechnungen sind in der Online-Version dieses Fachaufsatzes als „Supporting Information“ veröffentlicht (vgl. [4]). Abgebildet wurde ein Wandabschnitt von 1,0 m × 1,0 m Breite und Höhe mit 40 cm Wanddicke (Bild 9). Die Randbedingungen wurden so gewählt, dass die Verträglichkeit an den Rändern eingehalten war. Der obere Rand des Abschnitts konnte diese Bedingung aus programmtechnischen Gründen allerdings nicht vollständig erfüllen, sodass für die Auswertung im Wesentlichen die untere Hälfte des Wandabschnitts verwendet wurde. Die detaillierte Beschreibung des gewählten Systems und die Entwicklung der Spannungen in der Wand infolge mehrtägiger Sonneneinstrahlung

können ebenso online in der „Supporting Information“ dieses Beitrags eingesehen werden [4].

5 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse

5.1 Anordnung von vier Spanngliedern

Infolge der Vorspannung ergaben sich im Wesentlichen gleichmäßig verteilte Hauptdruckspannungen in Ringrichtung. Erhöhte Werte zwischen Hüllrohren und äußerer Netzbewehrung sind auf die Schwächung des Betonquerschnitts durch die Hüllrohre zurückzuführen. Im Bereich der äußeren vertikalen und horizontalen Bewehrung sind signifikant erhöhte Hauptzugdehnungen und Hauptzugspannungen zu erkennen, die im Wesentlichen quer zur Schalenmittelfläche wirken (Bilder 10, 11 und 12 = Abbildungen 72, 73 und 75 aus [4]). Besonders deutlich wird der Einfluss der Hüllrohre bei der Ringbewehrung, die auf Höhe der Achse Hüllrohre liegt. Hier treten wesentlich höhere Spannungen auf als bei der Ringbewehrung zwischen den Hüllrohren.

Infolge der Sonneneinstrahlung bleiben die Hauptdruckspannungen in Umfangsrichtung im Beton der äußeren Wandhälfte nahezu unverändert, während sie in der inneren Hälfte um ca. 15% abnehmen. Die Druckspannungen in der äußeren Ringbewehrung nehmen dagegen stark zu (ca. 37%). Dies bedeutet also eine weitere Umlagerung

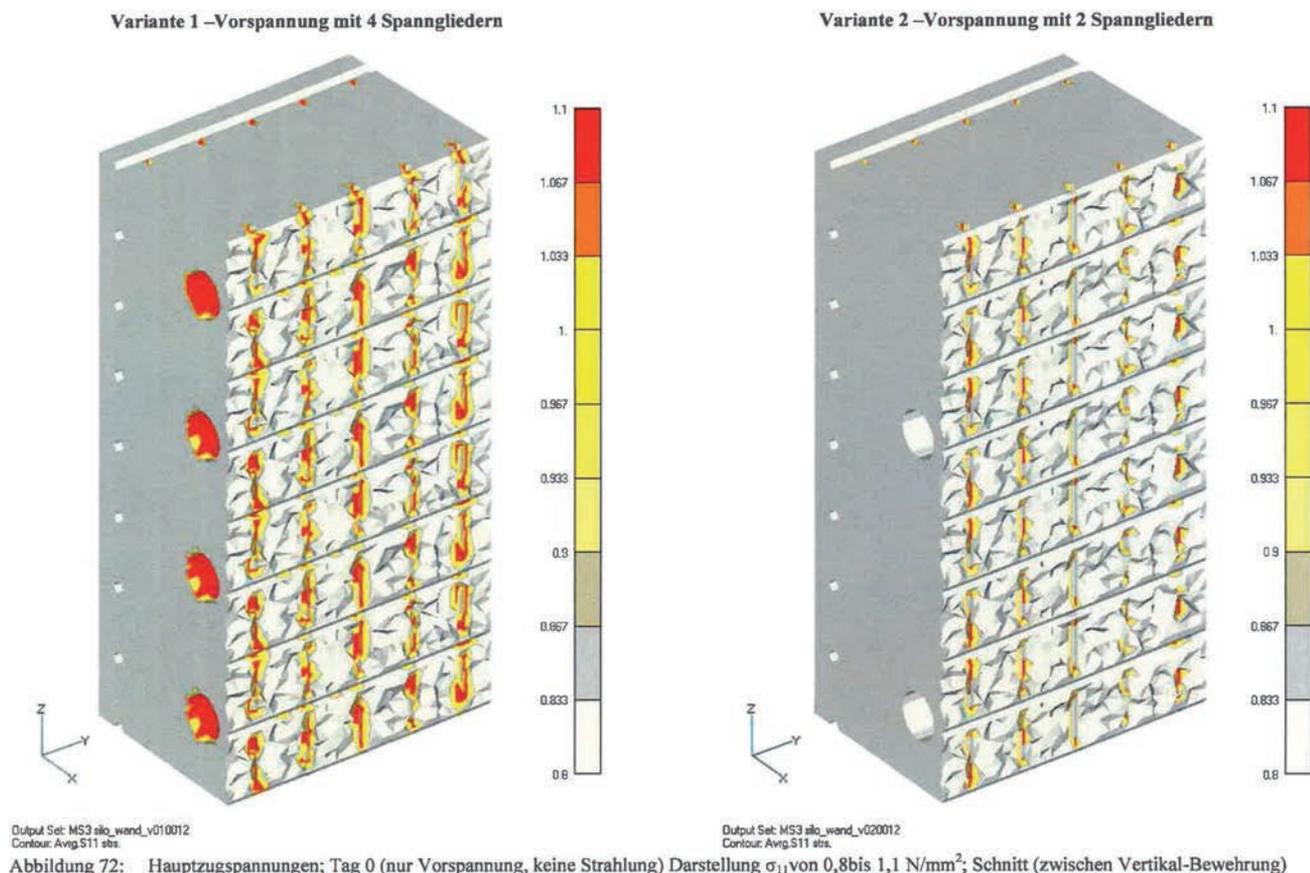


Bild 10 Hauptzugspannungen im Bereich der Bewehrung infolge Vorspannung (Tag 0) = Abbildung 72 aus [4]
Principal tensile stresses in the range of reinforcement due to post-tensioning (day 0) = diagram 72 out of [4]

Variante 1 –Vorspannung mit 4 Spanngliedern

Variante 2 –Vorspannung mit 2 Spanngliedern

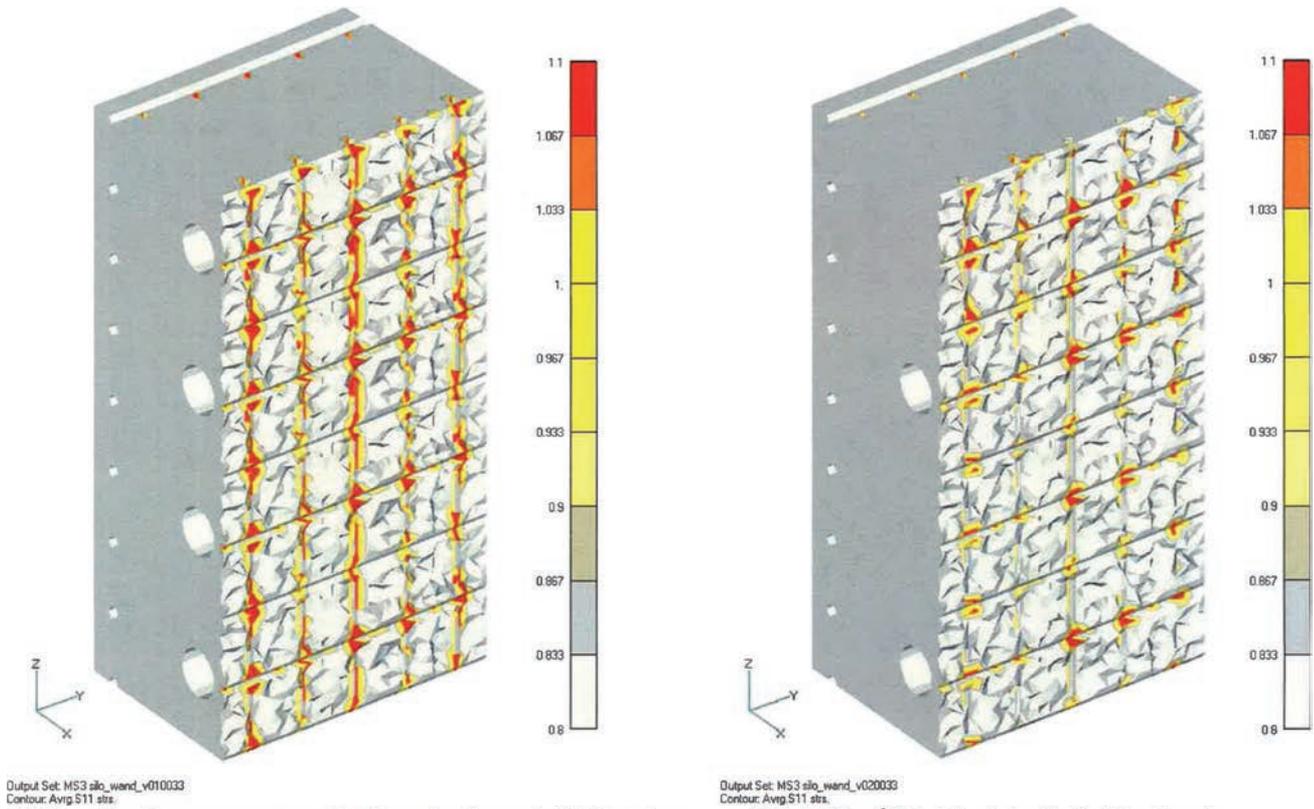


Abbildung 73: Hauptzugspannungen; Tag 1 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung σ_{11} von 0,8 bis 1,1 N/mm²; Schnitt (zwischen Vertikal-Bewehrung)

Bild 11 Hauptzugspannungen im Bereich der Bewehrung infolge Vorspannung und Strahlung (Tag 1) = Abbildung 73 aus [4]
Principal tensile stresses in the range of reinforcement due to post-tensioning (day 1) = diagram 73 out of [4]

Variante 1 –Vorspannung mit 4 Spanngliedern

Variante 2 –Vorspannung mit 2 Spanngliedern

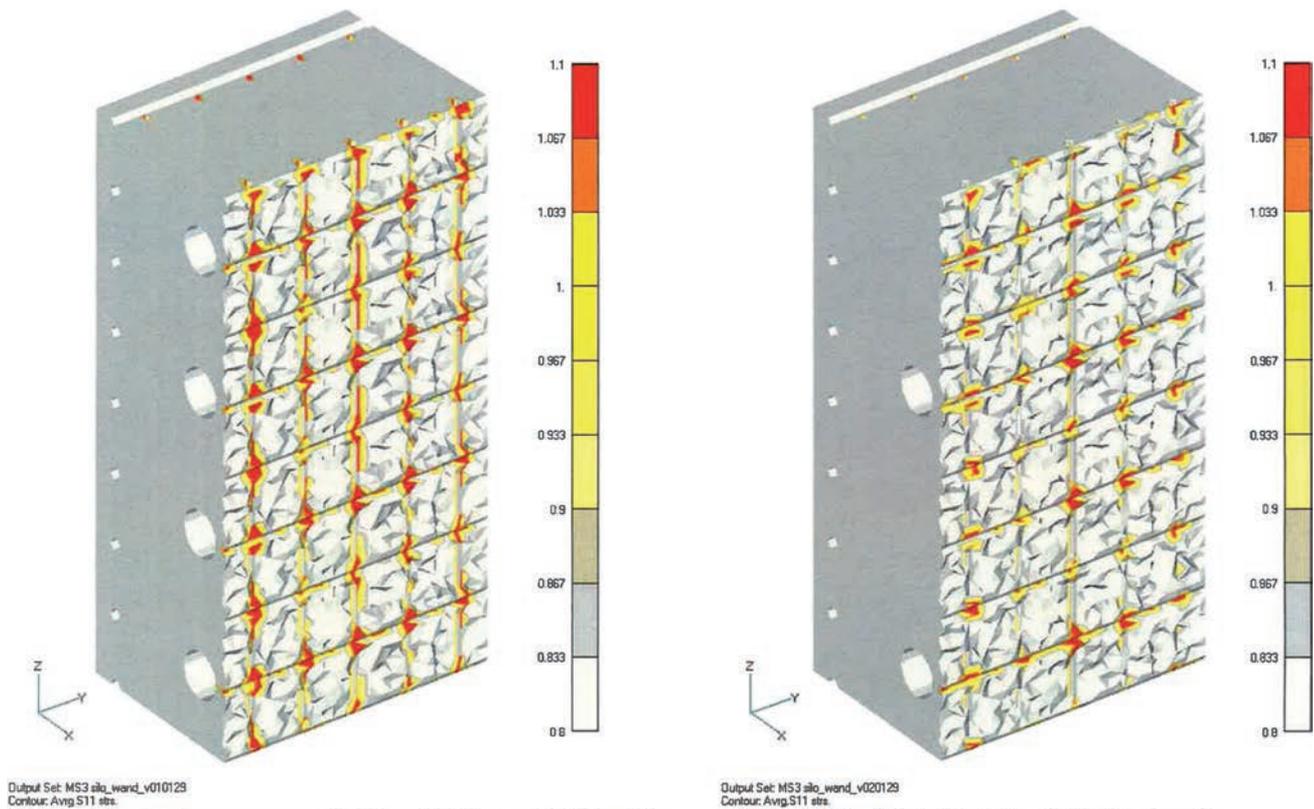


Abbildung 75: Hauptzugspannungen; Tag 3 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung σ_{11} von 0,8 bis 1,1 N/mm²; Schnitt (zwischen Vertikal-Bewehrung)

Bild 12 Hauptzugspannungen im Bereich der Bewehrung infolge Vorspannung und Strahlung (Tag 3) = Abbildung 75 aus [4]
Principal tensile stresses in the range of reinforcement due to post-tensioning (day 3) = diagram 75 out of [4]

σ_s der äußeren Ringbewehrung - 214 MPa = 100%

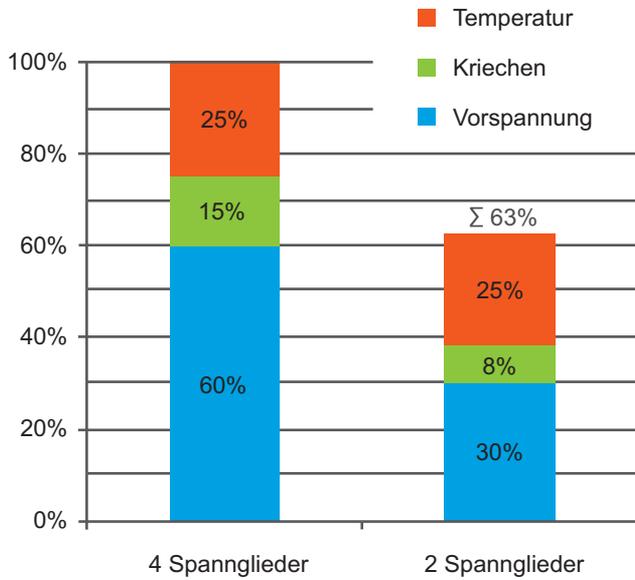


Bild 13 Vergleich der Druckspannungen in der äußeren Ringbewehrung für zwei und vier Spannglieder je Meter Höhe
 Comparison of compressive stresses in the outer ring reinforcement for arrangement of two and four tendons per meter height

der Ringdruckkräfte in die äußere Querschnittshälfte. Aus Gleichgewichtsgründen müssen daher auch die Umlenkkräfte und damit die Querkzugspannungen, die dem äußeren Wandteil zuzuordnen sind, ansteigen.

Die Berechnungsergebnisse zeigen nach einem Tag Sonneneinstrahlung deutlich erhöhte Hauptzugdehnungen und Hauptzugspannungen quer zur Schalenmittelfläche im Bereich zwischen Hüllrohren und äußerer Netzbe-
 wehrung. Die Sonneneinstrahlung am zweiten und dritten Tag führt nur noch zu geringen Veränderungen von ca. 5%. Im Vergleich zum rechnerischen Mittelwert von 0,19 MPa (vgl. Abschn. 3a) werden im Bereich der Bewehrung für die Querkzugspannungen Spannungsspitzen mit > 1,1 MPa erreicht.

Der Einfluss des Kriechens des Betons nach dem Vorspannen wurde getrennt untersucht. Die Umlagerung der Druckkräfte aus dem Beton in die Ringbewehrung führt nach ca. 100 Tagen zu einer Zunahme der Druckspannungen in der äußeren Ringbewehrung um ca. 25%.

Die Auswertung und der Vergleich der Berechnungsergebnisse z.B. für Querkzugspannungen und Querkzugdehnungen sind etwas schwierig. Wählt man dagegen die Druckspannung in der äußeren Ringbewehrung als Maßstab für die Beanspruchungen im Wandquerschnitt, wird die Betrachtung wesentlich einfacher.

Definiert man die resultierende Gesamtdruckspannung von ca. 214 MPa zu 100% (Bild 13), so beträgt der Anteil infolge Vorspannung mit anschließendem Kriechen ca. 75% dieser Spannung. Die Temperatureinwirkung von außen verursacht einen Spannungszuwachs, der einem Anteil von 25% der Gesamtdruckspannung von ca.

214 MPa entspricht. Entsprechend nehmen die Hauptzugspannungen und die Hauptzugdehnungen in Querrichtung zu.

5.2 Anordnung von zwei Spanngliedern

Qualitativ ergeben sich ähnliche Ergebnisse wie bei der Anordnung von vier Spanngliedern, allerdings sind aufgrund der nur halb so großen Vorspannkräfte die Spannungen entsprechend niedriger. Der Spannungszuwachs in der äußeren Wandzone infolge Temperatureinwirkung von außen hat dagegen ungefähr die gleiche Größe wie bei der Anordnung von vier Spanngliedern. Unterschiede ergeben sich aus der Geometrie, da die Bereiche zwischen Bewehrung und Hüllrohren auf die Hälfte reduziert sind, d.h. es liegen weniger Zonen mit hohen Querkzugspannungen vor.

Bild 13 zeigt schematisch die Spannungsanteile für die Druckspannung in der äußeren Ringbewehrung aus verschiedenen Einflüssen im Vergleich zwischen zwei und vier Spanngliedern je Meter Wandhöhe.

6 Bewertung der Berechnungsergebnisse

Auf den ersten Blick erscheinen die rechnerisch ermittelten Hauptzugspannungen und Hauptzugdehnungen unkritisch. Ein Abplatzen der äußeren Wandschale lässt sich hieraus nicht direkt ableiten. Folgende Überlegungen sind allerdings in eine Bewertung einzubeziehen:

- a) Spaltzugspannungen im Bereich von Übergreifungsstößen der äußeren Bewehrung liefern zusätzliche Spannungsanteile, die sich ungünstig überlagern. So sind z. B. gemäß DIN 1045 bzw. EC2 Übergreifungsstöße ab Stabdurchmessern 16 bzw. 20 mm in der äußersten Bewehrungslage nicht zulässig, wenn der Betonstahl voll ausgenutzt wird. Da sich eine Anordnung der inneren und äußeren Ringbewehrung jeweils in der äußersten Lage bei großen Stahlbeton- bzw. Spannbeton-silos in der Baupraxis bei Herstellung im Gleitbetonverfahren nicht vermeiden lässt, sind zusätzliche Verbügelungen im Stoßbereich erforderlich. Leider fehlen diese in der Praxis in den meisten Fällen, wie dies auch bei den angesprochenen Schadensfällen der Fall war.
- b) Infolge des Silobetriebs entstehen bei modernen Großraumsilos in der Zementindustrie die bereits erwähnten Fließkanäle. Dies bedeutet häufig wechselnde Ringzugkräfte und große, häufig wechselnde Biegemomente aus dem Schüttgut in Umfangsrichtung der Wand. Die Biegemomente können hierbei so groß sein, dass auch bei einer nicht vorgespannten Wand trotz der Ringzugkräfte große Druckspannungen auf der Außenseite der Wand auftreten. Entsprechend ungünstig ist dann die Überlagerung mit den zuvor beschriebenen Lastfällen.

- c) Die Streuung der Betonzugfestigkeiten ist wesentlich größer als die Streuung der Betondruckfestigkeiten. So hat LEONHARDT bei der Ermittlung kritischer Umlenkkräfte in gekrümmten Trägern einen erhöhten Sicherheitsbeiwert von 6,0 vorgeschlagen. Mit der Bruchspannung von 2,1 MPa für die Zugspannung eines C35/45 gemäß Abbildung 8 aus [4] ergäbe sich damit ein zulässiger Wert von 0,35 MPa, d. h. die rechnerisch ermittelten Hauptzugspannungen mit örtlich $>1,1$ MPa liegen deutlich über diesem Wert. Ein Großteil der Silowände wird im Gleitbetonverfahren hergestellt. Aus der täglichen Praxis ist klar, dass es selbst bei größter Sorgfalt während der Herstellung zu Betonierfehlern z. B. mit örtlich mangelhafter Verdichtung oder mit örtlichen Anrissen kommen kann. Die Bildung eines örtlichen Trennrisses entlang der Spannglieder bzw. der äußeren Wandbewehrung kann damit bei Wandflächen, die weit größer als 1000 m² sein können, nicht ausgeschlossen werden. Da ein solcher örtlicher Trennriss parallel zur Wandoberfläche verläuft, ist er von außen ohne aufwendige Untersuchungen nicht feststellbar. Infolge der unter b) angesprochenen häufig wechselnden Spannungen aus dem Silobetrieb sowie mit täglich schwankenden Temperaturen ist sehr gut vorstellbar, dass sich ein solcher Anriss über Jahre unbemerkt ausbreiten kann, bis es eines Tages zu den beschriebenen Abplatzungen (Delaminierungen) kommt.

Aus Sicht des Verfassers liegen genügend Hinweise darauf vor, welche kombinierten Beanspruchungen zu den beschriebenen Abplatzungen auf der Außenseite einer Silowand führen können. Wie gezeigt wurde, können hohe Vorspannkräfte in Umfangsrichtung und Sonneneinstrahlung einen großen Teil der kritischen Querspannungen hervorrufen. Die Schwächung des Betonquerschnitts durch eng liegende Hüllrohre und konstruktiv ungenügend ausgebildete Übergreifungsstöße der äußeren Ringbewehrung ohne ausreichende Verbügelung tun ein Übriges.

Es stellt sich also die Frage, was getan werden kann, um das Risiko solcher Schäden zu minimieren. Silobetrieb und Sonneneinstrahlung lassen sich nur schwierig beeinflussen, die Höhe der Vorspannung in Umfangsrichtung ist wohl am besten zu beeinflussen. Außerdem müssen die beschriebenen konstruktiven Mängel bei den Übergreifungsstößen der Ringbewehrung abgestellt werden. Leider wird nicht nur im Ausland, sondern auch in Deutschland bis zum heutigen Tag trotz Qualitätsmanagement und bautechnischer Prüfung immer wieder gegen elementare konstruktive Regeln verstoßen oder Hinweise zur Bemessung, wie sie beispielsweise in [6, 7] gemacht werden, nicht beachtet.

Provokativ gefragt: Wer würde bei einer Stahlbetonstütze mit 40×100 cm² Querschnitt und 5000 kN Druckkraft die Längsbewehrung außerhalb der Bügel anordnen und zudem noch Übergreifungsstöße anordnen? Ziemlich

sicher niemand, aber bei Silowänden scheint es manchem Planer offenbar unproblematisch, Ringbewehrung mit 20 mm und mehr Durchmesser samt Übergreifungsstößen ungesichert in die äußerste Lage zu legen und hohe Vorspannkräfte aufzubringen.

7 Zusammenfassung

Aus heutiger Sicht mit den inzwischen jahrzehntelangen Erfahrungen aus dem Bau großer vorgespannter Silos erscheint es nicht sinnvoll, Zugspannungen in der Silowand möglichst weitgehend überdrücken zu wollen. Hier ist eine Rissbreitenbeschränkung durch geeignete Bewehrungswahl zusammen mit einer maßvollen Vorspannung wesentlich besser. Viel hilft nicht immer viel!

Aus den dem Verfasser bisher bekannten Schadensfällen mit Abplatzungen ganzer Schalenbereiche (Delaminierung) kann man noch keinen gesicherten Zusammenhang zwischen den hier vorgestellten Berechnungsergebnissen und den beobachteten Schäden postulieren. Dazu werden sicherlich noch mehr Daten benötigt. Da aber die Schäden erst nach einigen Jahren Betrieb auftreten können, erscheint es wichtig, eventuelle Fehlentwicklungen möglichst frühzeitig zu erkennen und gegensteuern zu können, gerade weil es derzeit kaum ein Problembewusstsein zu geben scheint.

So entsprechen die vorgestellten Berechnungen einem jüngst in Deutschland verwirklichten Projekt, bei dem die am Bau Beteiligten entsprechende Hinweise nicht ernst nehmen. Gefragt wäre hier ein Erfahrungsaustausch der in der Praxis tätigen Kollegen, weil niemand den Überblick über alle Schäden weltweit und die lange Zeitspanne haben kann – vor allem nicht auf einem Gebiet, das nicht die große Aufmerksamkeit der Öffentlichkeit auf sich zieht und bei dem die Betroffenen ihre schlechten Erfahrungen offensichtlich lieber für sich behalten. Der Verfasser hofft, dass diese Veröffentlichung andere, auch auf diesem Gebiet tätige Kollegen sensibilisiert und sie dazu animiert, eventuelle Erfahrungen mit vergleichbaren Schadensfällen der Fachwelt bekannt zu machen.

Einige der weltweit größten Zementhersteller haben nach wie vor zentrale technische Büros, in denen konzernweit Schadensmeldungen zusammengeführt werden, ähnlich sieht es bei den großen Energiekonzernen aus. Auch hier sieht der Verfasser die Chance für einen Erfahrungsaustausch. Bei Silogrößen, die inzwischen an bautechnische Grenzen stoßen, ist im Schadensfall nicht nur die Gefahr für Leib und Leben entsprechend groß, sondern es entsteht oft auch ein großer materieller Schaden nicht nur am Bauwerk selbst, sondern durch Beeinträchtigung des ganzen Anlagenbetriebs auch weit darüber hinaus. Letzten Endes kann jeder nur – gesamt gesehen – mehr profitieren, als er im Einzelfall zu verlieren hat.

Literatur

- [1] J. PETER; G. LOCHNER: *Zur Statik, Konstruktion und Ausführung eines Klinkerrundlagers – Hinweise für die Berechnung von Silowänden*. Beton- und Stahlbetonbau 72 (1977), Hefte 4 und 5.
- [2] R. KOCH; J. PETER: *Bemessung für kombinierte Beanspruchung aus Lasten, Vorspannung und Temperaturzwang am Beispiel von Silowänden*. Beton- und Stahlbetonbau 73 (1978), Heft 4.
- [3] J. PETER: *Teilweise Vorspannung und ihre Anwendung bei der Hanns-Martin-Schleyer-Halle in Stuttgart*. Beton- und Stahlbetonbau 79 (1984), Hefte 7 und 8.
- [4] Berechnung des Büros nolasoft Ingenieurgesellschaft Ožbolt Mayer, Stuttgart, 2012. Veröffentlicht als Supporting Information in der Online-Version dieses Beitrags unter [http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/\(ISSN\)1437-1006](http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/(ISSN)1437-1006).
- [5] J. PETER: *Bauwerke mit teilweiser Vorspannung*. Beton- und Stahlbetonbau 81 (1986), Heft 6.
- [6] F. FINGERLOOS; G. STENZEL: *Konstruktion und Bemessung von Details nach DIN 1045*; BetonKalender 2007, Kapitel 8, Verlag Ernst und Sohn, Berlin.
- [7] C. RUCKENBROD; K. H. STECH; T. GRIMALDI: *Hinweise zur Bemessung von Stahlbetonsilos bei exzentrischer Entleerung nach DIN EN 1991-4*. Beton- und Stahlbetonbau 106 (2011), Heft 3, S. 148–159.

Autor



Dipl.-Ing. Dieter Lippold
Peter und Lochner GmbH
Haußmannstraße 78
70188 Stuttgart
lippold@pul.ingenieure.de

mit freundlicher Empfehlung | with compliments | avec les compliments de



Peter und Lochner

**Beratende Ingenieure
für Bauwesen GmbH**

Dipl.-Ing. Peter Bock
Dipl.-Ing. Dieter Lippold
Dipl.-Ing. Roland Wetzel
Dipl.-Ing. (FH) Martin Hertenstein
Dipl.-Ing. (FH) Christoph Wentz

Haußmannstraße 78
70188 Stuttgart
Telefon 0711 / 92377-0
Telefax 0711 / 92377-28
E-Mail S@PuL.ingenieure.de

Obere Rheinstraße 7c
78479 Reichenau
Telefon 07534 / 9208-0
Telefax 07534 / 9208-30
E-Mail R@PuL.ingenieure.de

Beratende Ingenieure VBI
Prüfingenieure für Bautechnik VPI

www.PuL.ingenieure.de

