

# BERICHT ÜBER NICHTLINEARE FE-BERECHNUNGEN AN EINEM VORGESPANNTEN SILO-WANDAUSSCHNITT

von

## U. Mayer, G. Periskic, J. Ozbolt und S. Lettow



Auftraggeber: Peter und Lochner Beratende Ingenieure für Bauwesen GmbH Haussmannstrasse 78, 70188 Stuttgart



# Inhaltsverzeichnis

1		Allgemeines
2		Netzgeometrie
3		Randbedingungen und Belastung
4		Materialannahmen
5	Simulationsergebnisse	
	5.1 5.2 5.3 5.4	Allgemeines
6	5.5 5.6	35 Reduziertes Modell: Variante 1 – Belastung 20 d mit 320 W/m <sup>2</sup>
7		Anhang
	7.1	Informationen zur Sonnenenergieeinstrahlung
	7.2	Bilder der Hauptzugspannungen – Schnitt "Punkt B" (vgl. Abbildung 9) 44

# 1 Allgemeines

Zur Untersuchung der Ursache eines Schadensfalles an einem vorgespannten Silo wird eine nichtlineare Berechnung mit dem FE-Programm MASA 3 durchgeführt. Die Diskretisierung der Struktur erfolgt auf Basis von Angaben/Unterlagen von Herrn Lippold / Peter und Lochner Beratende Ingenieure für Bauwesen GmbH in Stuttgart (Bewehrungsplan des Silos, Technische Daten Spannglied SUSPA/DSI Typ 6-12, etc.). Für die numerischen Studien wird ein 1,0 m x 1,0 m x 0,40 m Ausschnitt der Silo-Wand mit 4 Spanngliedern modelliert, wobei für Zusatzuntersuchungen ein auf 1 Spannglied mit den Abmessungen 0,25 m x 1,0 m x 0,40°m reduziertes Modell verwendet wird (Details siehe Abschnitt 2).

Für den modellierten Silo-Wand-Ausschnitt sowie für das "Füllmaterial" des Spanngliedhüllrohres wird nicht-lineares Materialverhalten des Betons angesetzt. Der Stahl für die schlaffe und vorgespannte Bewehrung sowie für das Hüllrohr wird mittels linear elastischem Materialverhalten abgebildet.

Als Finite Elemente kommen sowohl 8-knotige Hexaeder- (Hüllrohr und schlaffe Bewehrung) als auch 4-knotige Tetraeder-Elemente (Beton und "Füllmaterial") sowie Stab-Elemente (Spannstahl) zum Einsatz.

Die Beanspruchung der Silo-Wand erfolgt durch Aufbringen einer konstanten Innen- und Außentemperatur sowie durch eine Energiebelastung infolge Sonneneinstrahlung (vgl. Abbildung 4). Die Vorspannung wird mittels Dehnung in den Stabelementen aufgebracht, so dass eine definierte Vorspannkraft von ca. 1375 kN pro Spannglied (ca. 760 N/mm<sup>2</sup>), d.h. 5500 kN/m, erreicht wird.

Das Ziel der nichtlinearen Berechnungen ist die Ermittlung einer möglichen Ursache für ein großflächiges Abplatzen/Lösen des Betons auf der Außenseite der Silo-Wand. In der Berechnung werden charakteristische Werte für die Materialeigenschaften eines Betons der Güte C 35/45 angesetzt. Mögliche Vorschädigungen infolge Kriechen und Schwinden des Betons oder durch unzureichende Nachbehandlung etc. sind in den Berechnungen nicht berücksichtigt.

Detaillierte Informationen zur Implementierung des Temperatureinflusses in MASA 3 können **Ozbolt, Kozar, Eligehausen, Periskic** (Instationäres 3D Thermo-mechanisches Modell für Beton in Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005), Heft 1) entnommen werden.

## 2 Netzgeometrie

Die Netzfeinheit wird entsprechend der zu erwartenden Schädigungen gewählt, d.h. im äußeren Silo-Wandbereich wird eine feinere (3 Elemente über die Dicke der Betondeckung) und im inneren Wandbereich eine etwas gröbere Elementierung (2 Elemente über die Betondeckung) verwendet. Die mittlere Elementgröße der Tetraeder-Elemente wurde zu ca. 30 mm gewählt.

Die schlaffe Bewehrung wird durch Hexaeder-Elemente entsprechend den Angaben im Bewehrungsplan (innen: vertikal Ø12-100 mm & horizontal Ø25-125 mm sowie außen: vertikal Ø20-100 mm & horizontal Ø20-125 mm) modelliert. Die nachfolgenden Bilder (Abbildung 1 und Abbildung 2) zeigen die FE-Netze des Betons (646376 Elemente), der



Spannglieder mit Hüllrohr (9800 Elemente) bzw. der inneren und äußeren Bewehrung (3200 Elemente).



Abbildung 1: Wand-Ausschnitt: a) Betonkörper und b) Spannglieder (mit Hüllrohr)



Abbildung 2: Bewehrungsstahl (schlaff): a) innen (Ø 25 & 12 mm) und b) außen (Ø 20 mm)



In den hier durchgeführten Finite Elemente Studien werden zwei unterschiedliche FE-Modelle eingesetzt. Dies ist notwendig, da die Untersuchungen zum Einfluss der Dauer der Sonnenenergiebelastung unter Verwendung des  $1,0 \text{ m}^2$  Wand-Ausschnittes nicht in angemessener Rechenzeit durchzuführen war. Aus diesem Grund wird ein reduziertes Modell in Form eines Viertels des Wand-Ausschnitts mit nur einem Spannglied für Ersatz-Untersuchungen (Abschnitte 5.5 und 5.6) zum Einfluss der Dauer und Höhe der Sonneneinstrahlungsenergie verwendet.

## 3 Randbedingungen und Belastung

In den Berechnungen wird ein nur ein Wand-Ausschnitt des Silos idealisiert. Dafür wird das FE-Modell an den Seiten (in Wandquerrichtung) so gelagert, dass Verformungen in Tangentialrichtung verhindert, jedoch in Radialrichtung möglich sind. Am unteren Rand wird der Wand-Ausschnitt zusätzlich in vertikaler Richtung (z-Richtung) gelagert (vgl. Abbildung 3).



Abbildung 3: Idealisierung des Wand-Ausschnitts mit sinngemäßer Lagerung

Die Belastung erfolgt lastgesteuert. Dabei wird in den Laststufen 1 bis 12 das Eigengewicht und die Vorspannung bis auf eine Spannstahlspannung von ca. 760 N/mm<sup>2</sup> pro Spannglied aufgebracht, danach wird die Beanspruchung durch Temperaturbelastung und solare Strahlung entsprechend dem in Abbildung 4 dargestellten zeitlichen Verlauf in 0,5-Stunden-Schritten über einen Zeitraum von 20 Tagen aufgebracht. Eine max. Strahlungsenergie von 520 N/mm<sup>2</sup> wurde nur für Berechnungen am reduzierten Modell eingesetzt.





Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf der Sonnenenergieeinstrahlung pro Tag (24 h)

In Abbildung 5 und Abbildung 6 ist eine Draufsicht bzw. Ansicht der Beanspruchung des Wand-Ausschnitts dargestellt.



Abbildung 5: Beanspruchungsart (Draufsicht): a) Temperaturbelastung b) Energiebelastung





Abbildung 6: Beanspruchungsart (Ansicht): a) Temperaturbelastung b) Energiebelastung

# 4 Materialannahmen

Zur Darstellung der in den numerischen Untersuchungen verwendeten Materialeigenschaften des Betons (C 35/45) wird exemplarisch das an einem 1-Element Modell ermittelte Spannungs-Dehnungs-Verhalten gezeigt. Dieses Verhalten entspricht einer idealen, einachsigen Beanspruchung und es sind keine mehrachsigen Spannungszustände oder Einflüsse aus Randbedingungen berücksichtigt. Dadurch kann dieses idealisierte 1-Element Verhalten nicht direkt auf das Spannungs- und Dehnungsverhalten des gesamten FE Modells übertragen werden.

Die an einem 1-Element Modell ermittelte einachsige Zylinderdruckspannungs-Stauchungsbeziehung des Betons ist in Abbildung 7 dargestellt.



Abbildung 7: Druckspannungs-Stauchungskurve des Betons C 35/45 (1-Element Modell)

In Abbildung 8 ist die einachsige Zugspannungs-Dehnungskurve (Entfestigungsdiagramm; normalfest: Bruchenergie  $G_f \approx 0,083 \text{ Nmm/mm}^2$ ) eines 1-Element Modells für eine mittlere Elementgröße von ca. 30 mm gezeigt.



Abbildung 8: Zugspannungs-Dehnungskurve des Betons C 35/45 (1-Element Modell)

Für den im FE-Modell verwendeten Bewehrungsstahl (schlaffe und vorgespannte Bewehrung) wird ein linear elastisches Materialverhalten angesetzt. Das E-Modul des Bewehrungsstahles wird zu 210000 N/mm<sup>2</sup> und das des Spannstahls zu 195000 N/mm<sup>2</sup> gewählt.

## 5 Simulationsergebnisse

## 5.1 Allgemeines

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der FE-Untersuchungen anhand von Dehnungs- und Spannungsbildern dargestellt. Zur besseren Veranschaulichung bzw. für ein leichteres Erkennen von Dehnungskonzentrationen wird in den meisten Bildern ein "fiktiver" Grenzwert der Hauptzugdehnung von  $\varepsilon_{11} = 0,0004$  verwendet (deutlich unter der "kritischen" Dehnung von  $\varepsilon_{cr} = 0,15$  mm (kritische Rissöffnung) / 30 mm (mittlere Elementgröße) = 0,005 liegend, bei der keine Kraft mehr über den Riss übertragen werden kann). Daher zeigen die roten Bereiche zwar eine Lokalisierung von Hauptzugdehnungen an, jedoch keine tatsächlichen Risse. Ebenso wird für eine deutlichere Darstellung der Verteilung der Hauptzugspannungen in einigen Bildern ein Wert von  $\sigma_{11} = 0,8$  N/mm<sup>2</sup> als Grenzwert angesetzt. Die Bilder der Hauptdruckspannungen werden auf einen max. Spannungswert skaliert, der dem Verhältnis aus Vorspannkraft (V<sub>∞</sub>) und Nennquerschnitt des Wand-Ausschnitts (A<sub>OS</sub>) entspricht.

Des Weiteren sei darauf hingewiesen, dass in den Abbildungen nur der Betonkörper dargestellt und dessen Verhalten betrachtet wird. Die schlaffe Bewehrung sowie die Spannungsverteilung im Spannstahl werden nachfolgend in Form von Spannungsbildern ausgewertet. Die ungefähren Stahlspannungen (Hauptdruckspannungen  $\sigma_{33}$  und Vergleichsspannungen  $\sigma_{v}$ ) in der schlaffen Bewehrung betragen:

#### 4 Spannglieder

Tag 0:

a) horizontal außen:  $\sigma_{33} = -130$  bis -80 N/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_V = 70$  bis 120 N/mm<sup>2</sup>, b) horizontal innen:  $\sigma_{33} = -130$  bis -80 N/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_V = 70$  bis 120 N/mm<sup>2</sup>, c) vertikal außen/innen:  $\sigma_V = 20$  bis 30 N/mm<sup>2</sup>

#### Tag 3:

a) horizontal außen:  $\sigma_{33} = -180$  bis -150 N/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_V = 150$  bis 200 N/mm<sup>2</sup>, b) horizontal innen:  $\sigma_{33} = -130$  bis -80 N/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_V = 70$  bis 120 N/mm<sup>2</sup>, c) vertikal außen/innen:  $\sigma_V = 20$  bis 30 N/mm<sup>2</sup>

#### 2 Spannglieder

Tag 0:

a) horizontal außen:  $\sigma_{33} = -70$  bis -40 N/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_V = 30$  bis 70 N/mm<sup>2</sup>, b) horizontal innen:  $\sigma_{33} = -70$  bis -40 N/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_V = 30$  bis 70 N/mm<sup>2</sup>, c) vertikal außen/innen:  $\sigma_V = 20$  bis 30 N/mm<sup>2</sup> Tag 3:

a) horizontal außen:  $\sigma_{33} = -100$  bis -70 N/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_V = 70$  bis 130 N/mm<sup>2</sup>, b) horizontal innen:  $\sigma_{33} = -70$  bis -40 N/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_V = 30$  bis 70 N/mm<sup>2</sup>, c) vertikal außen/innen:  $\sigma_V = 20$  bis 30 N/mm<sup>2</sup>

Abbildung 14 bis Abbildung 17 zeigen die Hauptdruckspannungen  $\sigma_{33}$  in der schlaffen Bewehrung (horizontal) für Berechnungen mit 4 Spanngliedern. Die ermittelten Hauptdruckspannungswerte der Berechnungen mit 2 Spanngliedern sind in Abbildung 38 bis Abbildung 41 dargestellt.

In Abschnitt 5.2 wird das Verhalten des Wandausschnitts mit 4 Spanngliedern (Achsabstand 250 mm) unter einer Energiebelastung von 320  $W/m^2$  betrachtet. Demgegenüber sind in Abschnitt 5.3 die Ergebnisse für das Wandausschnitt-Modell unter reduzierter Vorspannung



(Verwendung von 2 Spanngliedern) gezeigt, um den qualitativen Einfluss der Höhe der Vorspannkraft auf das Verhalten bei Temperatur-/Strahlungsenergiebeanspruchung zu untersuchen.

Des Weiteren wurde der Einfluss eines Betonkriechens auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Silo-Wandausschnitts untersucht. Hierfür wurde das Wandausschnitt-Modell mit 4 Spanngliedern verwendet. Es wird eine Vorspannkraft von  $V_0 = 6300$  kN/m bei einer Endkriechzahl von  $\phi_{\infty}=2,0$  über eine Dauer von 100 Tagen angesetzt. Die Ergebnisse in Form der Hauptdruckspannungen zu den Zeitpunkten "kein" Betonkriechen, also direkt nach dem Vorspannen sowie nach 50 d und 100 d Kriechbeanspruchung sind in Abschnitt 5.4 dargestellt.

Die qualitativen Einflüsse der Strahlungsenergie in Form von Größe/Betrag sowie Dauer der Einwirkung wurden an einem reduzierten Modell analysiert, um eine möglichst optimale Rechenzeit zu erreichen. Die Ergebnisse dieser Ersatz-Studien sind in Kapitel 5.5 und 5.6 in Form der Hauptzugdehnungen wiedergegeben.

In der nachfolgenden Tabelle 1 sind exemplarisch die Hauptdruckspannungswerte  $\sigma_{33}$  an verschiedenen Positionen im Betonkörper für bestimmte Beanspruchungszeitpunkte der "Temperaturberechnungen" zusammengestellt. Abbildung 9 zeigt die ausgewählten Positionen A, B, C, D und E auf Höhe der unteren Spanngliedlage.



Abbildung 9: Ausgewählte Positionen zur Ermittlung der Druckspannungswerte

Varianta	Tag	Position				
variante		Α	В	С	D	Ε
	0	-11,3	-14,2	-11,3	-12,8	-11,1
Mit 4 Spapp	1	-11,4	-14,8	-10,8	-10,9	-9,6
gliedern	2	-11,3	-14,8	-10,6	-10,3	-9,3
giledein	3	-11,3	-14,9	-10,6	-9,9	-9,3
-,	0	-6,6	-8,0	-6,4	-7,1	-6,1
mit 2 Spapp	1	-7,8	-9,6	-6,0	-5,1	-4,2
2 Spann- oliedern	2	-7,8	-9,7	-6,0	-4,6	-3,9
Siledein	3	-7,7	-9,8	-6,0	-4,4	-3,9
	[d]	$[N/mm^2]$	$[N/mm^2]$	$[N/mm^2]$	$[N/mm^2]$	$[N/mm^2]$

Tabelle 1:Exemplarische Hauptdruckspannungen  $\sigma_{33}$  im Betonkörper

Die zugehörigen Bilder der Hauptzugspannungen sind im Anhang (Abschnitt 7.2) gezeigt.



5.2 Wand-Ausschnitt Modell: Variante 1 – Belastung 3 d mit 320 W/m<sup>2</sup>, Vorspannung mit 4 Spanngliedern



Output Set: MS3 silo\_wand\_v010 Contour: Beam Stress

Abbildung 10: Zugspannungen in BAR-Elementen (Spannstahl); Tag 0 (nach Vorspannen)



Abbildung 11: Zugspannungen in BAR-Elementen (Spannstahl); Tag 1





Abbildung 12: Zugspannungen in BAR-Elementen (Spannstahl); Tag 2



Abbildung 13: Zugspannungen in BAR-Elementen (Spannstahl); Tag 3





Output Set: MS3 silo\_wand\_v010012 Contour: Avrg.S33 strs. E

Abbildung 14: Hauptdruckspannungen in schlaffer Bewehrung; Tag 0 (direkt nach dem Vorspannen, ohne Temperatureinfluss); Darstellung von  $\sigma_{33}$  = -100 bis -180 N/mm<sup>2</sup>



Output Set: MS3 silo\_wand\_v010033 Contour: Avrg.S33 strs. E

Abbildung 15: Hauptdruckspannungen in schlaffer Bewehrung; Tag 1 (max. Strahlung nach 10h); Darstellung von  $\sigma_{33}$  = -100 bis -180 N/mm<sup>2</sup>





Output Set: MS3 silo\_wand\_v010081 Contour: Avrg.S33 strs. E

Abbildung 16: Hauptdruckspannungen in schlaffer Bewehrung; Tag 2 (max. Strahlung nach 10h); Darstellung von  $\sigma_{33}$  = -100 bis -180 N/mm<sup>2</sup>



Output Set: MS3 silo\_wand\_v010129 Contour: Avrg.S33 strs. E

Abbildung 17: Hauptdruckspannungen in schlaffer Bewehrung; Tag 3 (max. Strahlung nach 10h); Darstellung von  $\sigma_{33}$  = -100 bis -180 N/mm<sup>2</sup>



Output Set: MS3 silo\_wand\_v010012 Contour: Avrg.S11 strs. E

Abbildung 18: Hauptzugspannungen; Tag 0 (nur Vorspannung, keine Strahlung) Darstellung bis  $\sigma_{11} = 2,2 \text{ N/mm}^2$ 



Abbildung 19: Hauptzugspannungen; Tag 0 (nur Vorspannung) Darstellung bis  $\sigma_{11} = 0.8 \text{ N/mm}^2$ : a) Schnitt (zwischen Vertikal-Bewehrung) und b) Schnitt (Achse Spannglied)





Dutput Set: MS3 silo\_wand\_v010012 Contour: Avrg.S33 strs. E

Abbildung 20: Hauptdruckspannungen; Tag 0 (nur Vorspannung, keine Strahlung) Darstellung bis  $\sigma_{33}$  = -13,75 N/mm<sup>2</sup> (entspricht Flächenpressung aus V<sub>∞</sub>/A<sub>QS</sub>)



Abbildung 21: Hauptzugdehnungen; Tag 0 (nach Vorspannen) Darstellung bis  $\varepsilon_{11} = 0,0004$ 





Output Set: MS3 silo\_wand\_v010033 Contour: Avra S11 stre F

Abbildung 22: Hauptzugspannungen; Tag 1 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung bis $\sigma_{11}$  = 2,2  $N/mm^2$ 



Abbildung 23: Hauptzugspannungen; Tag 1 (max. Strahlung nach 10h), Darstellung bis  $\sigma_{11} = 0.8 \text{ N/mm}^2$ : a) Schnitt (zwischen Vertikal-Bewehrung) und b) Schnitt (Achse Spannglied)



Output Set: MS3 silo\_wand\_v010033 Contour: Avrg.S33 strs. E

Abbildung 24: Hauptdruckspannungen; Tag 1 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung bis  $\sigma_{33} = -13,75 \text{ N/mm}^2$  (entspricht Flächenpressung aus  $V_{\infty}/A_{QS}$ )



Abbildung 25: Hauptzugdehnungen; Tag 1 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung bis  $\varepsilon_{11} = 0,0004$ 





Output Set: MS3 silo\_wand\_v010081 Contour: Avrg.S11 strs. E

Abbildung 26: Hauptzugspannungen; Tag 2 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung bis  $\sigma_{11}$  = 2,2  $N/mm^2$ 



Abbildung 27: Hauptzugspannungen; Tag 2 (max. Strahlung nach 10h), Darstellung bis  $\sigma_{11} = 0.8 \text{ N/mm}^2$ : a) Schnitt (zwischen Vertikal-Bewehrung) und b) Schnitt (Achse Spannglied)



Dutput Set: MS3 silo\_wand\_v010081 Contour: Avrg.S33 strs. E

Abbildung 28: Hauptdruckspannungen; Tag 2 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung bis  $\sigma_{33} = -13,75 \text{ N/mm}^2$  (entspricht Flächenpressung aus  $V_{\infty}/A_{QS}$ )



Output Set: MS3 silo\_wand\_v010081 Contour: Avrg.E11 stra. E

Abbildung 29: Hauptzugdehnungen; Tag 2 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung bis  $\varepsilon_{11} = 0,0004$ 





Output Set: MS3 silo\_wand\_v010129 Contour: Avrg.S11 strs. E

Abbildung 30: Hauptzugspannungen; Tag 3 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung bis  $\sigma_{11} = 2,2 \text{ N/mm}^2$ 



Abbildung 31: Hauptzugspannungen; Tag 3 (max. Strahlung nach 10h), Darstellung bis  $\sigma_{11} = 0.8 \text{ N/mm}^2$ : a) Schnitt (zwischen Vertikal-Bewehrung) und b) Schnitt (Achse Spannglied)



Dutput Set: MS3 silo\_wand\_v010129 Contour: Avrg.S33 strs. E

Abbildung 32: Hauptdruckspannungen; Tag 3 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung bis  $\sigma_{33} = -13,75 \text{ N/mm}^2$  (entspricht Flächenpressung aus  $V_{\infty}/A_{QS}$ )



Abbildung 33:Hauptzugdehnungen; Tag 3 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung bis  $\varepsilon_{11} = 0,0004$ 



5.3 Wand-Ausschnitt Modell: Variante 2 – Belastung 3 d mit 320 W/m<sup>2</sup>, Vorspannung mit 2 Spanngliedern



Output Set: MS3 silo\_wand\_v020012 Contour: Beam Stress









Output Set: MS3 silo\_wand\_v020081 Contour: Beam Stress

Abbildung 36: Zugspannungen in BAR-Elementen (Spannstahl); Tag 2



Output Set: MS3 silo\_wand\_v020129 Contour: Beam Stress



833.





Output Set: MS3 silo\_wand\_v020012 Contour: Avrg.S33 strs. E

Abbildung 38: Hauptdruckspannungen in schlaffer Bewehrung; Tag 0 (direkt nach dem Vorspannen, ohne Temperatureinfluss); Darstellung von  $\sigma_{33}$  = -50 bis -120 N/mm<sup>2</sup>



Output Set: MS3 silo\_wand\_v020033 Contour: Avrg.S33 strs. E

Abbildung 39:Hauptdruckspannungen in schlaffer Bewehrung; Tag 1 (max. Strahlung nach 10h); Darstellung von  $\sigma_{33}$  = -50 bis -120 N/mm<sup>2</sup>





Dutput Set: MS3 silo\_wand\_v020081 Contour: Avrg.S33 strs. E

Abbildung 40: Hauptdruckspannungen in schlaffer Bewehrung; Tag 2 (max. Strahlung nach 10h); Darstellung von  $\sigma_{33}$  = -50 bis -120  $N/mm^2$ 



Output Set: MS3 silo\_wand\_v020129 Contour: Avrg.S33 strs. E

Abbildung 41: Hauptdruckspannungen in schlaffer Bewehrung; Tag 3 (max. Strahlung nach 10h); Darstellung von  $\sigma_{33}$  = -50 bis -120 N/mm<sup>2</sup>





Dutput Set: MS3 silo\_wand\_v020012 Contour: Avrg.S11 strs. E

Abbildung 42: Hauptzugspannungen; Tag 0 (nur Vorspannung, keine Strahlung) Darstellung bis  $\sigma_{11} = 2,2 \text{ N/mm}^2$ 



Abbildung 43: Hauptzugspannungen; Tag 0 (nur Vorspannung) Darstellung bis  $\sigma_{11} = 0.8 \text{ N/mm}^2$ : a) Schnitt (zwischen Vertikal-Bewehrung) und b) Schnitt (Achse Spannglied)





Dutput Set: MS3 silo\_wand\_v020012 Contour: Avrg.S33 strs. E

Abbildung 44: Hauptdruckspannungen; Tag 0 (nur Vorspannung, keine Strahlung) Darstellung bis  $\sigma_{33} = -7,5$ N/mm<sup>2</sup> (entspricht Flächenpressung aus V<sub>∞</sub>/A<sub>QS</sub>)



Abbildung 45: Hauptzugdehnungen; Tag 0 (nach Vorspannen) Darstellung bis  $\varepsilon_{11} = 0,0004$ 





Dutput Set: MS3 silo\_wand\_v020033 Contour: Avrg.S11 strs. E

Abbildung 46: Hauptzugspannungen; Tag 1 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung bis  $\sigma_{11} = 2,2 \text{ N/mm}^2$ 



Abbildung 47: Hauptzugspannungen; Tag 1 (max. Strahlung nach 10h), Darstellung bis  $\sigma_{11} = 0.8 \text{ N/mm}^2$ : a) Schnitt (zwischen Vertikal-Bewehrung) und b) Schnitt (Achse Spannglied)



Output Set: MS3 silo\_wand\_v020033 Contour: Avrg.S33 strs. E

Abbildung 48: Hauptdruckspannungen; Tag 1 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung bis  $\sigma_{33} = -7,5$  N/mm<sup>2</sup> (entspricht Flächenpressung aus V<sub>∞</sub>/A<sub>QS</sub>)



Abbildung 49: Hauptzugdehnungen; Tag 1 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung bis  $\varepsilon_{11} = 0,0004$ 





Output Set: MS3 silo\_wand\_v020081 Contour: Avrg.S11 strs. E

Abbildung 50: Hauptzugspannungen; Tag 2 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung bis  $\sigma_{11} = 2,2 \text{ N/mm}^2$ 



Abbildung 51: Hauptzugspannungen; Tag 2 (max. Strahlung nach 10h), Darstellung bis  $\sigma_{11} = 0.8 \text{ N/mm}^2$ : a) Schnitt (zwischen Vertikal-Bewehrung) und b) Schnitt (Achse Spannglied)



Output Set: MS3 silo\_wand\_v020081 Contour: Avrg.S33 strs. E

Abbildung 52: Hauptdruckspannungen; Tag 2 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung bis  $\sigma_{33} = -7,5$ N/mm<sup>2</sup> (entspricht Flächenpressung aus V<sub> $\infty$ </sub>/A<sub>QS</sub>)



Abbildung 53: Hauptzugdehnungen; Tag 2 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung bis  $\varepsilon_{11} = 0,0004$ 





Output Set: MS3 silo\_wand\_v020129 Contour: Avrg.S11 strs. E

Abbildung 54: Hauptzugspannungen; Tag 3 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung bis  $\sigma_{11} = 2,2 \text{ N/mm}^2$ 



Abbildung 55: Hauptzugspannungen; Tag 3 (max. Strahlung nach 10h), Darstellung bis  $\sigma_{11} = 0.8 \text{ N/mm}^2$ : a) Schnitt (zwischen Vertikal-Bewehrung) und b) Schnitt (Achse Spannglied)



Dutput Set: MS3 silo\_wand\_v020129 Contour: Avrg.S33 strs. E

Abbildung 56: Hauptdruckspannungen; Tag 3 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung bis  $\sigma_{33} = -7,5 \text{ N/mm}^2$  (entspricht Flächenpressung aus  $V_{\infty}/A_{QS}$ )



Abbildung 57: Hauptzugdehnungen; Tag 3 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung bis  $\varepsilon_{11} = 0,0004$ 



5.4 Wand-Ausschnitt Modell: Variante 3 – Einfluss des Betonkriechens, Vorspannung mit 4 Spanngliedern





Abbildung 58: Hauptdruckspannungen; direkt nach dem Vorspannen, ohne Kriecheinfluss; (a) Betonkörper Darstellung bis  $\sigma_{33} = -15,75 \text{ N/mm}^2$  (entspricht Flächenpressung aus V<sub>0</sub>/A<sub>QS</sub>) und (b) schlaffer Bewehrungsstahl Darstellung von  $\sigma_{33} = -100 \text{ bis } -180 \text{ N/mm}^2$ 





(b) Output Set: MS3 silo\_wand\_v030062 Contour: Avrg.S33 strs. E

Abbildung 59: Hauptdruckspannungen; 50 Tage Betonkriechen; (a) Betonkörper Darstellung bis  $\sigma_{33} = -15,75 \text{ N/mm}^2$  (entspricht Flächenpressung aus V<sub>0</sub>/A<sub>QS</sub>) und (b) schlaffer Bewehrungsstahl Darstellung von  $\sigma_{33} = -100 \text{ bis } -180 \text{ N/mm}^2$ 





(b) Output Set: MS3 silo\_wand\_v030112 Contour: Avrg.S33 strs. E

Abbildung 60: Hauptdruckspannungen; 100 Tage Betonkriechen; (a) Betonkörper Darstellung bis  $\sigma_{33} = -15,75 \text{ N/mm}^2$  (entspricht Flächenpressung aus V<sub>0</sub>/A<sub>QS</sub>) und (b) schlaffer Bewehrungsstahl Darstellung von  $\sigma_{33} = -100 \text{ bis } -180 \text{ N/mm}^2$ 



# 5.5 Reduziertes Modell: Variante 1 – Belastung 20 d mit 320 $W/m^2$



Abbildung 61: Hauptzugdehnungen; Tag 1 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung bis  $\varepsilon_{11} = 0,0004$ : a) Draufsicht und b) Schnitt (Achse Spannglied)



Abbildung 62: Hauptzugdehnungen; Tag 10 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung bis  $\varepsilon_{11} = 0,0004$ : a) Draufsicht und b) Schnitt (Achse Spannglied)





Abbildung 63: Hauptzugdehnungen; Tag 20 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung bis  $\varepsilon_{11} = 0,0004$ : a) Draufsicht und b) Schnitt (Achse Spannglied)

## 5.6 Reduziertes Modell: Variante 2 – Belastung 20 d mit 520 $W/m^2$



Abbildung 64: Hauptzugdehnungen; Tag 1 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung bis  $\varepsilon_{11} = 0,0004$ : a) Draufsicht und b) Schnitt (Achse Spannglied)





a) Output Set: MS3 silo\_wand\_v01\_qtr0465 Contour: Avrg.E11 stra. E

Dutput Set: MS3 silo\_wand\_v01\_qtr0465 Contour: Avrg.E11 stra. E

Abbildung 65: Hauptzugdehnungen; Tag 10 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung bis  $\varepsilon_{11} = 0,0004$ : a) Draufsicht und b) Schnitt (Achse Spannglied)



Abbildung 66: Hauptzugdehnungen; Tag 20 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung bis  $\varepsilon_{11} = 0,0004$ : a) Draufsicht und b) Schnitt (Achse Spannglied)

## 6 Zusammenfassung

Zur Klärung der Ursache eines Schadensfalles an einem vorgespannten Silo wurden nichtlineare Berechnungen mit dem FE-Programm MASA 3 durchgeführt. Die Diskretisierung der Gesamtstruktur erfolgte auf Basis von Angaben von Herrn Lippold / Peter und Lochner Beratende Ingenieure für Bauwesen GmbH in Stuttgart (Bewehrungsplan des Silos, Technische Daten Spannglied SUSPA/DSI Typ 6-12, etc.).

Für die numerischen Untersuchungen wurde ein FE-Modell verwendet, das im Hinblick auf die zu erwartenden Schädigungen ("Ablösung" der Betondeckung) brauchbar ist. Dies bedeutet, dass u.a. die Betondeckung durch eine ausreichende Anzahl von Elementen (über die Dicke) diskretisiert wird. Das FE-Modell bildet einen Ausschnitt der Silo-Wand (d = 400 mm) über eine Höhe und Länge von jeweils 1000 mm ab.

Für den modellierten Silo-Wand-Ausschnitt sowie für das "Füllmaterial" des Spanngliedhüllrohres wurde nicht-lineares Materialverhalten des Betons angesetzt. Der Stahl für schlaffe und vorgespannte Bewehrung sowie für das Hüllrohr wurde linear elastisch abgebildet. Als Finite Elemente wurden sowohl 8-knotige Hexaeder- (Hüllrohr und schlaffe Bewehrung) als auch 4-knotige Tetraeder-Elemente (Beton und Füllmaterial) sowie Stab-Elemente (Spannstahl) verwendet.

Die Vorspannung wurde über Dehnungen in den Stabelementen aufgebracht, so dass eine definierte Vorspannkraft von ca. 1375 kN pro Spannglied (ca. 760 N/mm<sup>2</sup>) erreicht wird. Die Beanspruchung der Silo-Wand erfolgte durch Aufbringen einer konstanten Innen- und Außentemperatur sowie durch eine Energiebelastung infolge Sonneneinstrahlung (vgl. Abbildung 4).

Das Ziel der nichtlinearen Berechnungen war die Ermittlung einer möglichen Ursache für ein großflächiges Abplatzen/Lösen des Betons auf der Außenseite der Silo-Wand. In der Berechnung wurden charakteristische Werte für die Materialeigenschaften eines Betons der Güte C 35/45 angesetzt.

Auf der Basis der bisherigen Ergebnisse der Untersuchungen konnte generell ein Einfluss der Sonnenstrahlungsenergie sowie der Größe der Vorspannkraft auf die Dehnungsverteilung (in Form von Hauptzugdehnungen  $\varepsilon_{11}$ ) im Betonkörper festgestellt werden. In den durchgeführten Berechnungen wurde jedoch zu keiner Zeit die "kritische" Dehnung von  $\varepsilon_{cr} = 0,005$  erreicht, welche bei einer mittleren Elementgröße von ca. 30 mm einer kritischen Rissöffnung von  $w_{cr} = 0,15$  mm entspricht ( $w_{cr}$  <sup>...</sup> Rissbreite, bei der über den Riss praktisch keine Zugkräfte mehr übertragen werden).

Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer Verdoppelung der Vorspannkraft (4 Spannglieder pro Meter anstatt 2 Spannglieder pro Meter) für eine über 3 Tage andauernde Sonnenenergiebeanspruchung von 320 W/m<sup>2</sup> die Hauptzugdehnungen deutlich (bis zum 2 bis 3-fachen) zunehmen; dies ist v.a. auf der Wandaußenseite im Bereich bzw. entlang der schlaffen vertikalen und horizontalen Bewehrung zu erkennen (siehe Ergebnisse des Wand-Ausschnitt Modells in Abschnitt 5.2 und 5.3). Dadurch kann eine Riss-Initialisierung – *in Bereichen, in denen die Rissbreite nicht durch eine geeignete Bewehrung begrenzt werden kann* – begünstigt werden. Weiterhin konnte anhand der Untersuchungen am reduzierten FE-Modell festgestellt werden, dass ein merklicher Anstieg der Hauptzugdehnungen insbesondere bei Verlängerung der Dauer (bis zu 20 Tage), und auch in geringerem Maße bei Erhöhung der Energie (von  $320 \text{ W/m}^2$  auf  $520 \text{ W/m}^2$ ) der Sonneneinstrahlung auftritt (siehe Abschnitt 5.5 und 5.6).

Der Einfluss des Betonkriechens wurde in Abschnitt 5.4 am Wandausschnitt-Modell unter Verwendung von 4 Spanngliedern untersucht. Hierbei zeigt sich mit zunehmender Dauer des Kriechvorgangs ein Anstieg der Druckkräfte im Bewehrungsstahl. So beträgt die Stahldruckspannung der äußeren Lage direkt nach dem Vorspannen im Mittel ca. -128 N/mm<sup>2</sup>, nach 50 Tagen ca. -158 N/mm<sup>2</sup> bzw. nach 100 Tagen ca. -161 N/mm<sup>2</sup>. D. h. die Zunahme der Druckspannungen in der schlaffen Bewehrung beträgt ca. 25%. Demgegenüber nehmen die Betondruckspannungen von ungefähr -13 N/mm<sup>2</sup> auf ca. -12 N/mm<sup>2</sup> nach 50 Tagen bzw. auf ca. -11 N/mm<sup>2</sup> nach 100 Tagen Kriechbeanspruchung ab.

Ferner bleibt anzumerken, dass verschiedene Einflüsse, welche im Rahmen dieser FE-Untersuchung nicht betrachtet wurden, eine Vergrößerung der Dehnungen (in den "kritischen" Bereichen) bzw. eine Reduktion der Materialeigenschaften des Betons – insbesondere der Betonzugfestigkeit – zur Folge haben und damit eine mögliche Rissbildung fördern könnten. Hier sei u.a. auf Lastwechsel infolge Befüllen und Leeren des Silos hingewiesen, sowie mögliche ungünstige Effekte aus Schwinden des Betons. Ebenso wurden auch Einflüsse aus geometrischen Diskontinuitäten, wie die Bereiche der Übergreifungsstöße der schlaffen Bewehrung oder Streuung der Materialeigenschaften des Betons (verringerte Festigkeiten o.ä. aufgrund unzureichender Nachbehandlung) in den hier durchgeführten FE Untersuchungen nicht berücksichtigt.



# 7 Anhang

## 7.1 Informationen zur Sonnenenergieeinstrahlung

Vorschlag einer Sonnenenergieeinstrahlung für eine weitere Variante 3 basierend auf Messung Ho Chi Minh Stadt, 28. Juni 2005.



Abbildung 67: Zeitlicher Verlauf der Sonnenenergieeinstrahlung



#### Infos Sonneneinstrahlung - Messung



Dia. 1: Sonneneinstrahlung, Ho Chi Minh City (Saigon), April 28th, 2005



Dia. 2: Sonneneinstrahlung, Ho Chi Minh City (Saigon), June 28th, 2005

Quelle (Internet): SOLAR ENERGY and SOLAR PHOTOVOLTAICS IN VIETNAM, Prof. Le Chi Hiep, Director, Program on Renewable Energy & Energy Conservation (VNU-HCM), Berlin, October 9, 2009

Bilder der Hauptzugspannungen – Schnitt "Punkt B" (vgl. Abbildung 9) 7.2

# ngenieurgemeinschaft ožbolt mayer



Abbildung 68: Hauptzugspannungen; Tag 0 (nur Vorspannung, keine Strahlung) Darstellung bis  $\sigma_{11} = 0.8 \text{ N/mm}^2$ ; Schnitt (zwischen Vertikal-Bewehrung)

























Abbildung 73: Hauptzugspannungen; Tag 1 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung  $\sigma_{11}$ von 0,8bis 1,1 N/mm<sup>2</sup>; Schnitt (zwischen Vertikal-Bewehrung)





Abbildung 74: Hauptzugspannungen; Tag 2 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung  $\sigma_{11}$ von 0,8 bis 1,1 N/mm<sup>2</sup>; Schnitt (zwischen Vertikal-Bewehrung)





Abbildung 75: Hauptzugspannungen; Tag 3 (max. Strahlung nach 10h) Darstellung  $\sigma_{11}$ von 0,8bis 1,1 N/mm<sup>2</sup>; Schnitt (zwischen Vertikal-Bewehrung)