
Untersuchungen zu geometrischen Imperfektionen von Spritzbetonschalen - Ergebnisse aus Modellversuchen und numerischen Berechnungen

INVESTIGATIONS REGARDING GEOMETRICAL IMPERFECTIONS OF SHOTCRETE LININGS - RESULTS FROM LABORATORY AND FROM NUMERICAL CALCULATIONS

GERNOT STELZER, JOHANN GOLSER

Im Zuge der Abbildung der Natur in einem Rechenmodell werden im allgemeinen vereinfachende Annahmen getroffen, ohne die eine statische Berechnung nur erschwert oder gar nicht möglich wäre. Diese sind z.B. die Reduktion der Geometrie auf glatte, mathematisch definierbare Elemente oder die Idealisierung des Materialverhaltens.

Bei der Herstellung von Spritzbetonschalen im Tunnelbau treten zwangsläufig Abweichungen von diesen Annahmen auf, die auch als Imperfektionen bezeichnet werden. Die in den letzten Jahren am Institut für Geomechanik, Tunnelbau und Konstruktiven Tiefbau durchgeführten Untersuchungen behandeln das Gebiet der geometrischen Imperfektionen.

Für den statischen Test von Tunnelmodellen wurde eine Versuchsanlage errichtet. Damit ist eine "geometrisch perfekte" Schale, d.h. eine glatte mit vorgegebenem Radius und konstanter Stärke, und eine "geometrisch imperfekte" Schale mit gleichem Radius und Stärke, jedoch mit Imperfektionen in Form von Pyramidenstümpfen untersucht worden. Durch Vergleich der Ergebnisse aus Versuchen und numerischen Berechnungen werden Unterschiede im Verformungsverhalten und in der Tragfähigkeit aufgezeigt.

Whenever nature is idealized as a computational model, general assumptions have to be made in order to allow a static analysis. Those are e.g. reducing the geometry to smooth and mathematically definable elements or the idealization of material behaviour.

The construction of shotcrete linings induces deviations of the above mentioned assumptions which are called imperfections. The investigations carried out at the department for Geomechanics, Tunnelling and Heavy Construction Engineering deal with geometrical imperfections.

For testing models of tunnel shells a load frame was set up. This frame was used to obtain results for a "geometrically perfect" shell with a given radius and constant thickness and a "geometrically imperfect" shell with the same radius and thickness, but with imperfections in form of pyramid frustums. Differences in the bearing capacity and deformation behaviour are shown by comparing the results of experiments and numerical analysis.

1. Allgemeines

Im Zuge der Herstellung der Spritzbetonschale während eines Tunnelvortriebes treten zwangsläufig Abweichungen von den planmäßig der statischen Berechnung zugrunde gelegten Systemvorgaben auf, die unter dem Begriff Imperfektionen zusammengefasst werden. Diese Systemvorgaben - z.B. die Vorstellung dieser Schale als glatt, homogen und mit definierter Geometrie und Materialeigenschaften - vereinfachen die statische Berechnung bzw. machen diese überhaupt erst möglich.

Im Allgemeinen können im Bauwesen folgende Arten von Imperfektionen unterschieden werden:

- Strukturelle Imperfektionen (z.B. Eigenspannungen, Werkstoffinhomogenitäten, ...)
- Geometrische Imperfektionen (Abweichungen von der planmäßigen Geometrie, ...)
- Imperfektionen der Lasteintragung

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden Modellversuche und numerische Berechnungen durchgeführt, um das Verformungs- und Tragverhalten von "geometrisch perfekten" und "geometrisch imperfekten" Betonschalen konstanter Stärke zu untersuchen.

2. Modellversuche

Hierbei bestand die Aufgabe darin, ein Modell einer "geometrisch perfekten" Schale - d.h. einer glatten Schale mit vorgegebenem Radius und konstanter Stärke - und einer "geometrisch imperfekten" Schale - d.h. einer Imperfektionen in Form von Pyramidenstümpfen beinhaltenden Schale mit vorgegebenem Radius und konstanter Stärke - gegenüber zu stellen. Sodann sollte deren jeweiliges Trag- und Bruchverhalten untersucht und verglichen werden.

2.1 Aufbau der Versuchsanlage

Die Versuchsanlage (*Bild 1*) besteht aus einem Stahlrahmen mit den lichten Maßen 1300 x 1300 x 500mm. Plexiglasscheiben an der Vorder- und Rückseite erlauben eine optische Betrachtung des Bruchvorganges der zu untersuchenden Betonschale. Anker- und Gewindestangen ermöglichen eine Verspannung des Rahmens in sich [1], [2].

Als Proben werden viertelkreisförmige Betonschalen (*Bild 2*) mit einem Radius von 800 mm, einer Tiefe von 500mm und einer Stärke von 26 mm verwendet. Die Exzentrizität der Imperfektionen beträgt 26 mm. Die Schalen werden aus Fließbeton in einer Stahlschalung hergestellt und im Alter von 28 Ta-

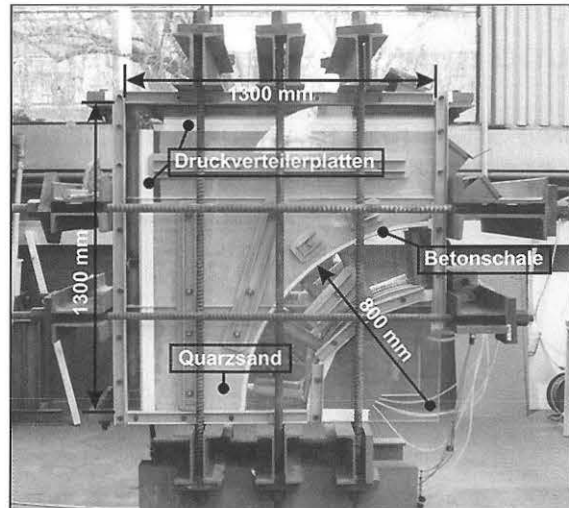


Bild 1: Versuchsanlage

gen in der Versuchsanlage untersucht. Der Fließbeton besteht aus einem Fertigmörtel der Korngruppe 0/4mm, Wasser, Flugasche und Kunststofffasern. Durch Zugabe eines Fließmittels erreicht der Beton ein Ausbreitmaß zwischen 65 cm und 70 cm, was für die Herstellung der Schale im Schalungskörper unbedingt erforderlich ist.

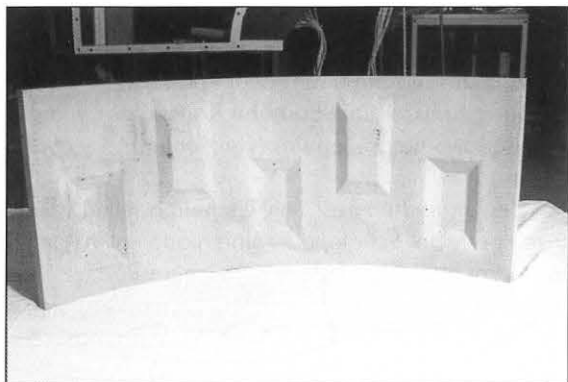


Bild 2: Imperfekte Viertelkreisbetonschale

Am unteren Ende der eingebauten Betonschale ergibt sich durch einen Stahlwinkel, der am Versuchsrahmen befestigt ist, ein festes Auflager. Am oberen Ende, an der Firste, ist ein Symmetrielager angebracht, das zwar eine vertikale Verschiebung zulässt, jedoch Verdrehung und Horizontalverschiebung verhindert. Die Lastaufbringung erfolgt mittels vier Hydraulikkissen, von denen je zwei horizontal und vertikal zwischen Stahlrahmen und Druckverteilerplatten aus Holz angeordnet sind. Der durch die Hydraulikkissen erzeugte Druck wird über zwei Druckverteilerplatten auf den Quarzsand der Korngruppe 0,5 - 2,0 mm und in Folge auf die Betonschale übertragen. Auf die Modellierung von Ankern, Tunnelbögen und Bewehrungsmatten wird verzichtet.

Während des Versuchs werden an den im Bild 3 dargestellten Messpunkten folgende Messwerte aufgenommen:

- Der Gebirgsdruck im Modellgebirge wird mit fünf rechteckigen Druckmesskissen (DMK) an den Messpunkten (MP) 1 bis 5 aufgezeichnet.
- Zur Bestimmung der Kontaktspannung zwischen Betonschale und Modellgebirge finden bis zu sechs kreisscheibenförmige Druckmessdosen (DMD) mit einem Durchmesser von 5 cm und 7 cm an MP 6 bis MP 8 in zwei Reihen Verwendung.
- Die Radialverschiebungen an der Innenseite der Betonschale werden mit zehn potentiometrischen Wegaufnehmern gemessen.

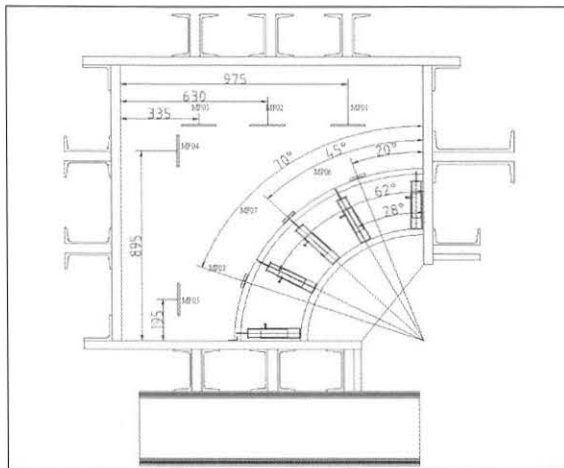


Bild 3: Anordnung der Messpunkte im Versuchsrahmen

2.2 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Bei den Versuchen wurde die Belastung in einem Verhältnis von Horizontal- zu Vertikaldruck mit 0,66

aufgebracht. Um einen bestimmten Gebirgsdruck zu erhalten, wurde der Öldruck im Hydraulikkissen solange erhöht, bis das vor dem entsprechenden Hydraulikkissen liegende Druckmesskissen den gewünschten Wert anzeigte.

Der Gebirgsdruck wurde bis zum Bruch der Betonschale erhöht, der durch folgende Beobachtungen angezeigt wurde:

- plötzlicher Abfall des Gebirgsdrucks
- plötzlicher Abfall des Öldrucks in den Hydraulikkissen
- Ansteigen der Radialverschiebungen ohne weiteren Druckanstieg
- Unmöglichkeit eines zusätzlichen Druckaufbringens

Bild 4 zeigt einen typischen Verlauf eines Versuches - im dargestellten Fall für eine glatte Schale. Der Überschaubarkeit wegen sind nur die Daten eines Druckmesskissens (DMK 01), einer Druckmessdose (DMD 01) und zweier Wegaufnehmer (WA 02 und WA 07) aufgetragen. Man kann beim plötzlichen Abfall des Druckes im Druckmesskissen und in der Druckmessdose und bei gleichzeitiger Zunahme der Verschiebungen an den Wegaufnehmern einen ersten großen Riss erkennen. Sodann konnte der Druck nochmals bis zum Höchstwert gesteigert werden, wo dann der endgültige Bruch eintrat. Nach diesem Bruch konnte keine zusätzliche Belastung aufgebracht werden. Daraufhin sind die Hydraulikkissen entleert bzw. das Modellgebirge entlastet worden, um eine Zerstörung der Hydraulikkissen zu verhindern.

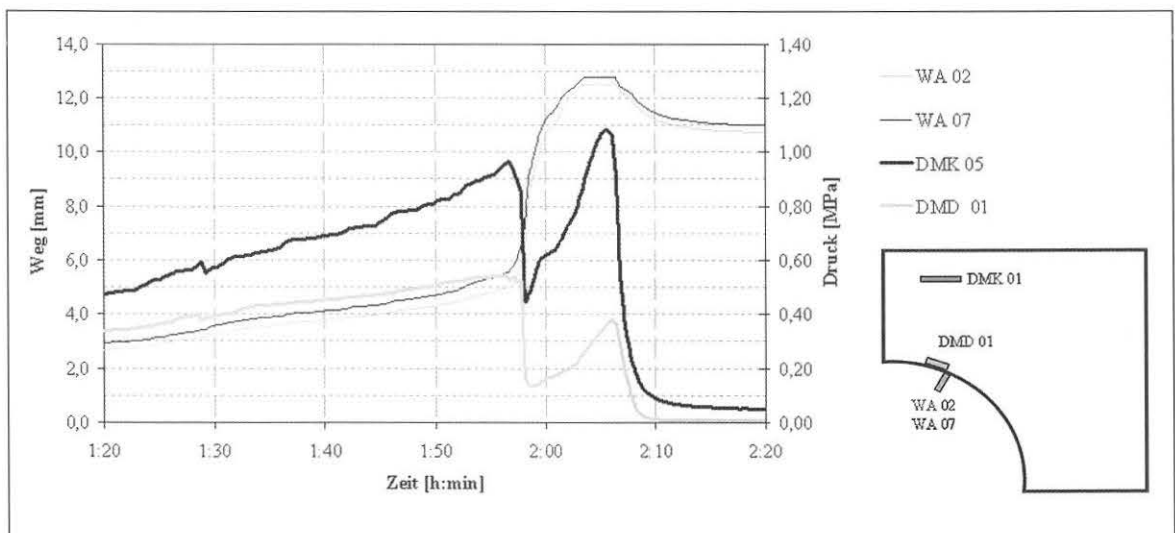


Bild 4: Typischer Versuchsverlauf für ein Druckmesskissen, eine Druckmessdose und zwei Wegaufnehmer

	σ_h mittel [MPa]	σ_v mittel [MPa]
GS1	0,49	0,71
GS2	0,61	0,97
Mittelwert	0,55	0,84
IS1	0,23	0,36
IS2	0,23	0,29
IS3	0,21	0,34
IS4	0,26	0,33
IS5	0,28	0,38
IS6	0,22	0,34
Mittelwert	0,24	0,34

Tab. 1: Mittlere Spannungen in den Druckmesskissen beim Bruch nach Normierung auf eine einaxiale Druckfestigkeit von 13,7 MPa

Labor des Institutes für Geomechanik, Tunnelbau und Konstruktiven Tiefbau durchgeführt [1], [2]. Um eine Vergleichbarkeit der möglichen Belastungen zu erhalten, wurden die in *Tabelle 1* angeführten Werte zuvor auf eine einaxiale Druckfestigkeit von 13,7MPa normiert. Dabei ergab sich eine mittlere vertikale Bruchbelastung von 0,34MPa für die imperfekten Schalen und 0,84MPa für die glatten Schalen. Die Auswertung der Firstverschiebung infolge der vertikalen Vergleichsbelastung von 0,24MPa ergab nach Normierung auf einen E-Modul des Betons von 10,26 GPa stark streuende Werte von 0,6 mm bis 2,6 mm.

Bild 5 und *Bild 6* zeigen die zum Versagen der Schalen typischen Bruchbereiche. Bei der glatten

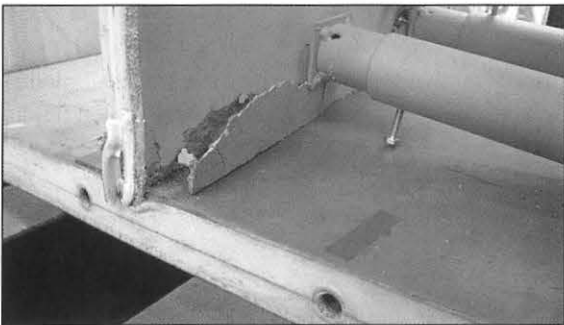


Bild 5: Bruchbereich der glatten Schale



Bild 6: Bruchbereich der imperfekten Schale

Schale kann es im Bereich des unteren Auflagers zu einem Scherbruch. Für die imperfekte Schale erfolgte in allen Fällen das Versagen infolge Abscheren der Imperfektionen.

3. Numerische Berechnungen

Die numerischen Berechnungen [3] erfolgten mittels des Finite-Differenzen-Programmsystems FLAC3D [4]. Dabei wurde das statische System der Versuchsanordnung mit der Geometrie, den Querschnittswerten, den Werkstoffkennwerten von Schale und Gebirge, den Auflagerbedingungen und der Belastung modelliert. Die Belastung wurde analog zum Modellversuch aufgebracht.

3.1 Modellbildung

Im numerischen Modell für die glatte Schale erfolgte die Diskretisierung der Schale und des Modellgebirges mit dem Netz und den Randbedingungen, wie sie in *Bild 7* dargestellt sind. Für die Netzgenerierung der imperfekten Schale (*Bild 8*) wurde das Modell mit der glatten Schale übernommen und die Gitterpunkte entsprechend den Imperfektionen aus dem Modellversuch radial verzogen. Die Randbedingungen wurden ebenfalls übernommen.

Sowohl für den Beton als auch für den Sand als Modellgebirge wurde ein linear-elastisches, idealplastisches Stoffgesetz mit einer Anstrengungshypothese nach Mohr-Coulomb verwendet. Für den Beton ergaben sich der E-Modul E_{Beton} von 10260 MPa, die Querdehnzahl n_{Beton} von 0,3, der innere Reibungswinkel φ_{Beton} von $54,0^\circ$ und die Kohäsion c_{Beton} von 2,2 MPa aus einaxialen Druckversuchen und Spaltzugversuchen. Der Reibungswinkel des Sandes φ_{Sand} von $33,9^\circ$ wurde im Versuch ermittelt. Der E-Modul E_{Sand} wird mit 100 MPa und die Querdehnzahl n_{Sand} mit 0,3 angenommen.

In der numerischen Berechnung wurde das Modell bis zum Auftreten der ersten plastischen Zonen in der Betonschale belastet.

3.2 Rechenergebnisse

Die Ausbildung erster plastischer Zonen zeigte sich für die glatte und für die imperfekte Schale bei unterschiedlichen Laststufen und an unterschiedlichen Orten (vgl. *Bild 9*). Bei der glatten Schale traten die ersten plastischen Zonen im Bereich des unteren Auflagers zufolge Scherens bei einer vertikalen Belastung von 0,33 MPa auf. Hingegen zeigten sich bei der imperfekten Schale die ersten plastischen

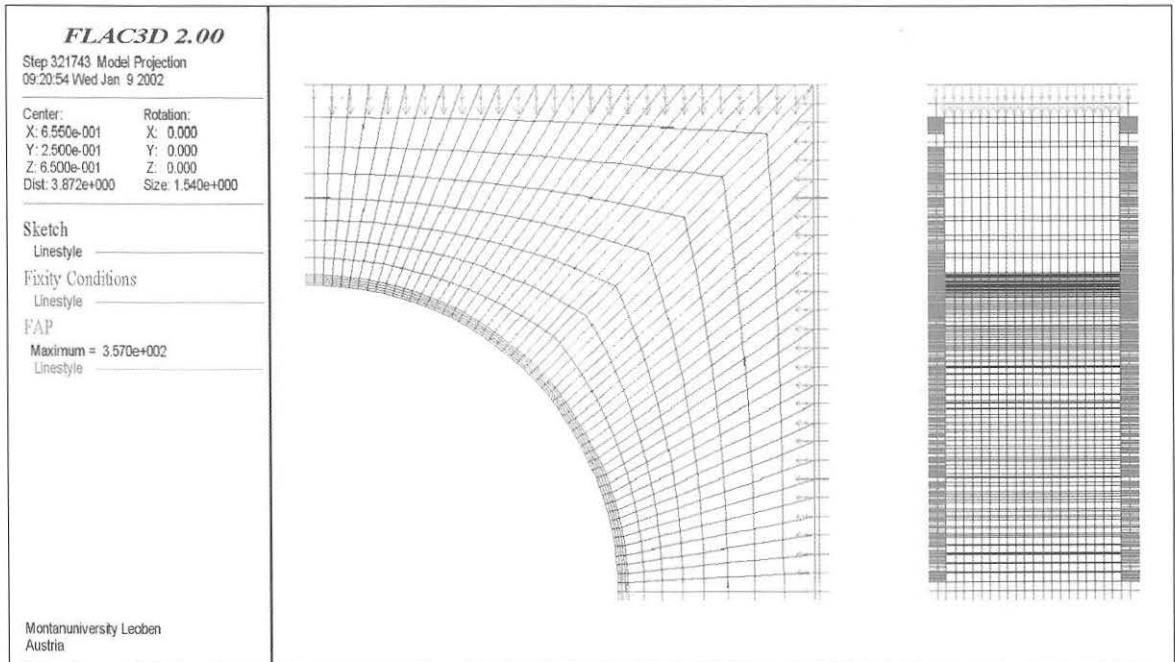


Bild 7: Netz des numerischen Modells mit Randbedingungen

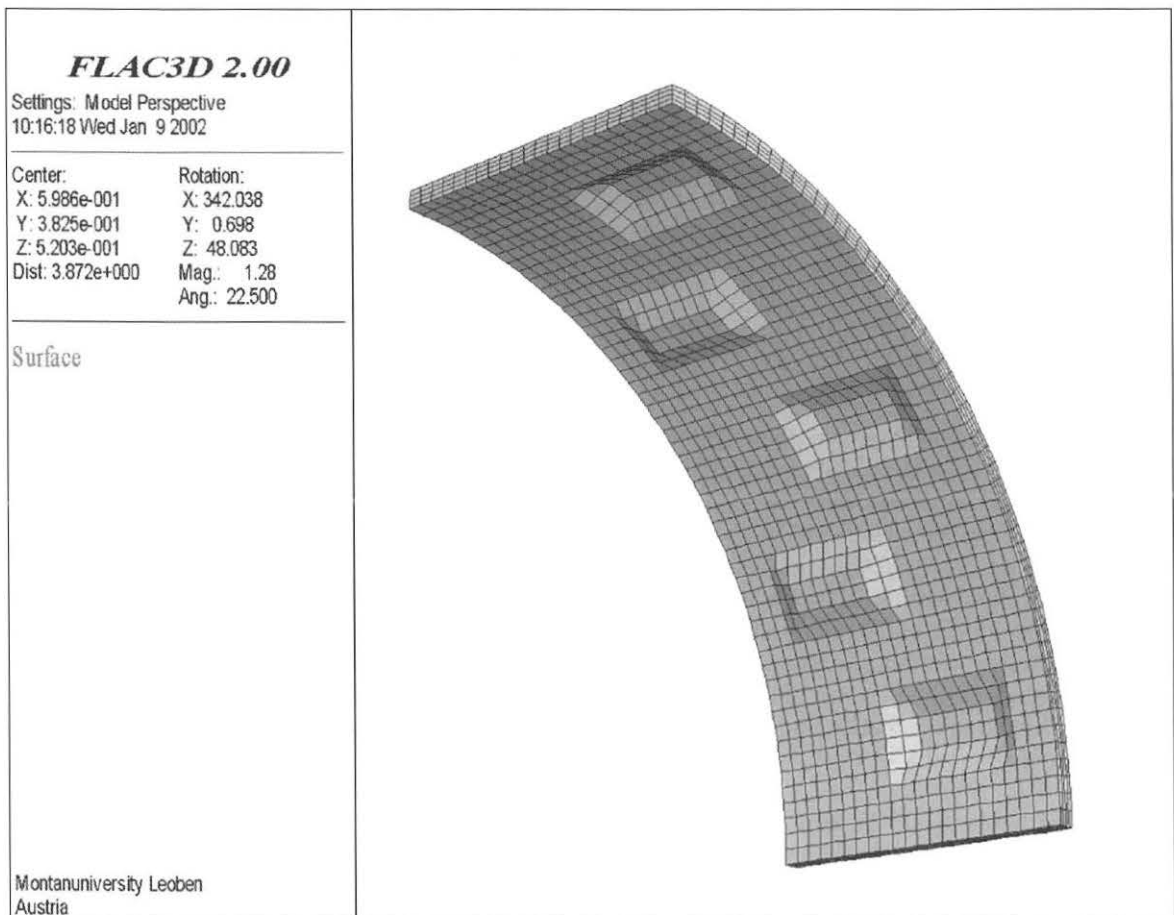


Bild 8: Netzgenerierung der imperfekten Schale

Zonen zufolge Scherens im Bereich der nach außen zeigenden Imperfektionen bereits bei einer ver-

tikalen Belastung von 0,25 MPa, was 76 % des Wertes der glatten Schale entspricht.

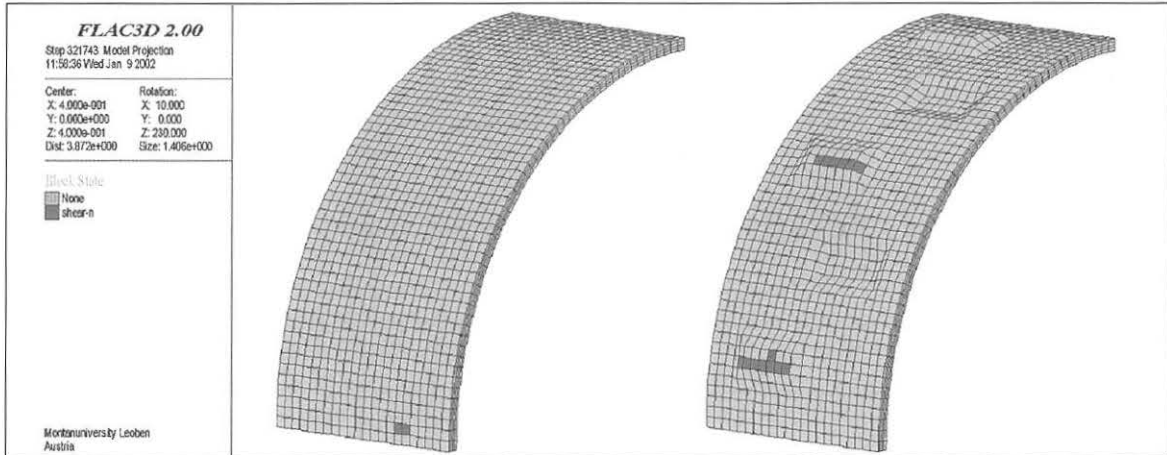


Bild 9: Lokalisierung der ersten plastischen Zonen

Die Auswertung der Firstverschiebung infolge der vertikalen Vergleichsbelastung von 0,24 MPa ergab für die glatte Schale 1,6 mm und für die imperfekte Schale 1,8 mm.

4. Zusammenfassung

Der Vergleich der Ergebnisse zeigt Parallelen zwischen Art und Ort des Versagens und Art und Ort der Bildung der ersten plastischen Zonen, nämlich durch Scherung bei der glatten Schale im unteren Auflagerbereich und bei der imperfekten Schale durch Abscheren der Pyramidenstümpfe. In den Modellversuchen ergab sich durch die Imperfektion im Mittel eine doch beträchtliche Abminderung der vertikalen Bruchbelastung von:

$$n_{\text{Bruch}} = \frac{P_{v,\text{Bruch,imp}}}{P_{v,\text{Bruch,glatt}}} = \frac{0,34}{0,84} = 0,4$$

Jedoch ist zu berücksichtigen, dass im Modellversuch der Kontakt zwischen Gebirge und Schale mit dem Quarzsand auf glatter Betonoberfläche nicht wirklichkeitsnah modelliert war. Die Vermutung liegt nahe, dass eine gewisse Abhängigkeit zwischen Abminderung der Tragfähigkeit und Verbund zwischen Gebirge und Schale gegeben ist. Es muss davon ausgegangen werden, dass für die Tragfähigkeit von Spritzbetonschalen mit ähnlichen Imperfektionen nicht zu vernachlässigende Abminderungen vorzunehmen sind.

Als Ergebnis numerischer Berechnungen kann für die hier untersuchten Imperfektionen eine Abminderung der vertikalen Belastung, die zur Ausbildung erster plastischer Zonen führt, von

$$n_{1,\text{pl.z.}} = \frac{P_{v,1,\text{pl.z.,imp}}}{P_{v,1,\text{pl.z.,glatt}}} = \frac{0,25}{0,33} = 0,8$$

angegeben werden.

Die Firstsetzung vergrößerte sich grundsätzlich durch die Imperfektionen. Durch die große Streuung der Verschiebungswerte aus den Modellversuchen konnte für diesen Fall kein Abminderungsfaktor für die Steifigkeit angegeben werden.

5. Ausblick

Ziele weiterführender Untersuchungen sollte die genauere Untersuchung der Tragfähigkeit imperfekter Schalen in Abhängigkeit des Verhältnisses der Exzentrizität der Imperfektion zur Stärke der Spritzbetonschale sein. Des Weiteren ist der Einfluss des Verbundes Spritzbetonschale - Gebirge auf die Tragfähigkeit der imperfekten Schale zu klären. Weiterer Forschungsbedarf besteht für imperfekte Schalen bedingt durch örtlich veränderliche Spritzbetonstärken. Ergebnisse dieser weiterführenden Untersuchungen sollten dann in weiterer Zukunft Eingang in statische Berechnungen und in Bauausführung finden.

6. Literatur

- [1] Weinmar, W.F.: Entwicklung und Aufbau einer Versuchsanlage zur Untersuchung des Tragverhaltens von Spritzbetonschalen mit geometrischen Imperfektionen. Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben, 2001.
- [2] Schuller E.: Modellversuche zur Untersuchung des Tragverhaltens von Spritzbetonschalen mit geometrischen Imperfektionen. Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben, in Fertigstellung.
- [3] Kainrath-Reumayer S.: Numerische Untersuchung des Tragverhaltens

von Spritzbetonschalen mit geometrischen Imperfektionen. Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben, in Fertigstellung.

- [4] **Itasca Consulting Group, Inc.:**
FLAC3D - Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions Version 2.0, Manual. Minnesota, Minneapolis, 1997.