

Masterarbeit

zum Erwerb des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing.)
der Studienrichtung Bergwesen
Masterstudium Rohstoffgewinnung und Tunnelbau
Schwerpunktfach Geotechnik und Tunnelbau

eingereicht am
Lehrstuhl für Subsurface Engineering
an der Montanuniversität Leoben

Krzysztof Wilczek BSc

Leoben, im July 2011

Thema

**Beurteilung der Einflüsse von
Imperfektionen auf die
Energieabsorption von faserbewehrtem
Spritzbeton im Plattenversuch mittels
numerischer Berechnungen**

Eidesstattliche Erklärung / AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

In declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Ort, Datum

Krzysztof Wilczek

Danksagung

Ich bedanke mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Robert Galler für die Ausbildung am Lehrstuhl für Subsurface Engineering.

Weiters möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. Gerhard Pittino bedanken, der als Betreuer dieser Arbeit mich engagiert unterstützt hat.

Besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Thomas Antretter, dessen fachliche Unterstützung äußerst hilfreich war.

Abschließend möchte ich mich noch bei Dr.-Ing. Richard Tichy und Dipl.-Ing. Markus Mikl für den regen Informationsaustausch bedanken.

Zusammenfassung / Abstract

Der Plattenversuch wird nach ÖVBB-Richtlinie Spritzbeton bzw. nach ÖNORM EN 14488-5 für die Beurteilung von faserbewehrtem Spritzbeton herangezogen. Mit der am Lehrstuhl entwickelten Versuchseinrichtung wurden Plattenversuche durchgeführt, die Einflüsse hinsichtlich Prüfkörperimperfectionen, Auflager- und Versuchsbedingungen auf das Energieabsorptionsvermögen aufzeigten. In dieser Arbeit wird mit dem FE Programm ABAQUS, ein numerisches Modell entwickelt, das eine adäquate Simulation, ermöglicht. Das Materialverhalten wird mit dem in ABAQUS implementierten Materialgesetz "Concrete Damage Plasticity"(CDP) modelliert. Die Auswirkungen der Modellierungsweise und der numerischen Imperfectionen auf die Rissentstehung werden untersucht.

The evaluation of fiber reinforced sprayed concrete is conducted by plate test procedure according to OENORM EN 14488-5. With the test facility developed by the chair of subsurface engineering, a number of tests were performed. The target of the tests was to asses the influence of imperfections of the samples, support and test conditions on the energy absorption capacity. In this thesis a suitable numerical modell is developed to simulate the plate test with ABAQUS. The Concrete Damage Plasticity (CDP) material model is being utilized for this purpose. An analysis is performed to describe the impact of the modeling technique and the numerical imperfections on the crack development.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 6 |
| 2 | Zielsetzung | 7 |
| 3 | Grundlagen | 8 |
| 3.1 | Analytische Überlegung | 8 |
| 3.2 | Theorie zur numerischen Simulation | 10 |
| 3.2.1 | Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb | 10 |
| 3.2.2 | Concrete Damage Plasticity | 11 |
| 3.2.3 | ”Stabilize” Funktion | 14 |
| 4 | Voruntersuchungen | 16 |
| 4.1 | Prüfung von Spritzbeton nach EN-14488 (2006) | 16 |
| 4.2 | Untersuchungen am Lehrstuhl für Subsurface Engineering | 16 |
| 5 | Numerische Untersuchung ABAQUS FEA | 19 |
| 5.1 | Modellaufbau | 19 |
| 5.2 | Simulationen ohne explizit definierter Zugfestigkeit | 20 |
| 5.2.1 | Elastisches Materialverhalten | 20 |
| 5.2.2 | Materialverhalten mit Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb | 24 |
| 5.3 | Simulationen mit explizit definierter Zugfestigkeit und Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb | 26 |
| 5.3.1 | Einfluss der Zugfestigkeit auf das Bruchverhalten | 26 |
| 5.3.2 | Nachbruchverhalten mit Tension Cut-Off (TCO) | 27 |
| 5.4 | Nachbruchverhalten mit Concrete Damage Plasticity (CDP) | 30 |
| 5.4.1 | Vollmodell | 31 |
| 5.4.2 | Viertelmodell | 35 |
| 6 | Schlussfolgerung | 40 |
| A | Abbildungen | 41 |
| B | Tabellen | 42 |
| C | Quellcode der Input Datei | 43 |
| C.1 | Vollmodell | 43 |
| C.2 | Viertelmodell | 47 |
| | Abbildungsverzeichnis | 54 |
| | Tabellenverzeichnis | 55 |
| | Literaturverzeichnis | 56 |

1 Einleitung

Der Spritzbeton ist im Tunnelbau nicht mehr wegzudenken und ist ein wesentlicher Bestandteil der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode (NATM). Die fortschrittliche Beton- und Maschinentechologie sowie und die schnelle Einbauzeit bringen im Tunnelbau Vorteile. Die Entwicklung des stahlfaserbewehrten Spritzbetons in den 70er Jahren und die Anwendung von Kunststofffasern ermöglichte eine Verbreitung. Der Einbau von Bewehrungsgitter im ungesicherten Gebirge wird vom faserbewehrten Spritzbeton zunehmend abgelöst, wodurch sich die Sicherheit der dort tätigen Mineure verbessert. Da die Bewehrung bereits mit dem Spritzbeton eingebracht wird, kann die Vortriebsgeschwindigkeit durch die Vereinfachung von Arbeitsschritten optimiert werden.

Die weit verbreitete Anwendung des Spritzbetons erfordert die Überprüfung dieses Baustoffes bezüglich seiner Nachbruchzugfestigkeit, die durch die Beimengung der Fasern erzeugt wird. Diese wird von der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB) in der Richtlinie Spritzbeton durch die Einteilung in Energieabsorptionsklassen entsprechend der Prüfung EN-14488 (2006) geregelt. Dafür wird ein speziell vorgesehener Versuchsaufbau verwendet, in dem eine Spritzbetonplatte gebrochen und die dafür benötigte Energie ermittelt wird. In der vorliegenden Arbeit wird dieser Versuchsaufbau anhand numerischer Simulationen auf Einflüsse von Imperfektionen untersucht.

2 Zielsetzung

Als Grundlage zur Berechnung der Energieabsorption von faserverstärktem Spritzbeton dient der Versuchsaufbau nach der EN-14488 (2006). Ziel dieser Arbeit ist es, ein numerisches Modell zu entwickeln, das eine adäquate Simulation des Versuchsablaufs mittels der Finiten Elemente Methode ermöglicht. Mit dieser Methode sollen Rückschlüsse auf die Einflüsse von Imperfektionen auf die Energieabsorption gezogen werden. Für diesen Zweck wird das Softwarepaket ABAQUS mit dem Materialmodell Concrete Damage Plasticity (CDP) verwendet.

3 Grundlagen

In diesem Abschnitt sollen die wesentlichen Grundlagen erörtert werden, die zum allgemeinen Verständnis der Materie hilfreich sind. Es ist nicht Ziel dem Leser eine lehrbuchartige Aufbereitung des Stoffes vorzulegen. Dieses Kapitel soll vielmehr einzelne Gebiete, wie den analytischen Zugang und spezielle Aspekte der numerischen Methode, die zum Verständnis der Versuche notwendig sind, auf das Wesentliche reduziert darstellen. Bei gewektem Interesse sollte der Leser sich an die entsprechende Fachliteratur wenden, deren Aufgabe es ist, die Sachverhalte möglichst vollständig zu erläutern.

3.1 Analytische Überlegung

Ein Ansatz zur Untersuchung des Versuchsaufbaus ist die Vereinfachung des Systems, damit eine analytische Lösung gefunden werden kann. Folgende Annahmen werden zur Ableitung einer analytischen Lösung getroffen:

- Statisch unbestimmtes System
- Materialverhalten unterliegt dem Hooke'schen Gesetz (linear-elastisch)
- dünne Platte (keine Schubkräfte)
- Verformungen relativ klein zur Plattendicke

Ugural (1999) leitet mit Hilfe dieser Vereinfachungen eine analytische Lösung für zahlreiche Belastungssituationen von Platten ab. Abbildung 3.1 zeigt eine rechteckige, eingespannte Platte, die durch Punktlast oder rechteckige Flächenlast beansprucht wird. Mit den Formeln 3.1 und 3.2 lassen sich die Durchbiegungen der Platte für eine punktförmige Last und eine Flächenlast berechnen.

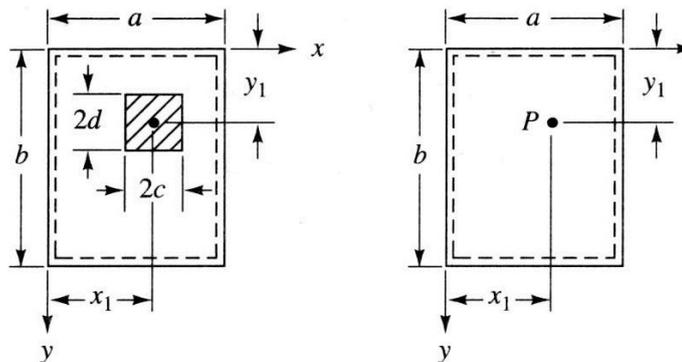


Abbildung 3.1: Einfach gelagerte, rechteckige Platte unter rechteckig verteilter Last (Ugural, 1999)

D ist die Biegesteifigkeit der Platte, die aus dem Elastizitätsmodul E , der Querdehnzahl ν und der Plattendicke h_c berechnet wird. Die Durchbiegung $w(x, y)$ kann mittels der Plattenabmessungen, a und b , und der Last P ermittelt werden. Für die Berechnung der Flächenlast, p_{mn} , werden die Abmessungen, c und d , und die Positionen, x_1 und y_1 , benötigt.

$$D = \frac{Eh_e^3}{12(1-\nu^2)}$$

$$w(x, y) = \frac{4P}{\pi^4 D a b} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{m\pi x_1}{a} \sin \frac{n\pi y_1}{b}}{\left[\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2\right]^2} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}$$

Formel 3.1: Analytische Berechnung der Durchbiegung $w(x, y)$ für eine Punktlast nach Ugural (1999)

$$p_{mn} = \frac{4P}{\pi^2 m n c d} \sin \frac{m\pi x_1}{a} \sin \frac{n\pi y_1}{b} \sin \frac{m\pi c}{a} \sin \frac{n\pi d}{b}$$

$$w(x, y) = \frac{1}{\pi^4 D} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{p_{mn}}{\left[\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2\right]^2} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}$$

Formel 3.2: Analytische Berechnung der Durchbiegung $w(x, y)$ für eine Flächenlast nach Ugural (1999)

Bei Formel 3.2 handelt es sich um eine schlaife Last, die auf die Membrane einwirkt. Da der Belastungsstempel im Versuchsaufbau aber aus Stahl besteht, kann nicht von diesem Fall ausgegangen werden.

Es wird angenommen, dass eine starre Flächenlast analytisch betrachtet werden kann, in dem vier Einzellasten an den Ecken des Stempels durch Superposition berechnet werden. Im Vergleich von Punktlast, 4 Punktlasten und Flächenlast ergeben sich verschiedene Steifigkeiten und Verformungen der Membrane, wie in Abbildung 3.2 dargestellt. Die berechneten Steifigkeitswerte sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

| Punktlast | 4 Punktlasten | Flächenlast |
|------------|---------------|-------------|
| 598 [N/mm] | 712 [N/mm] | 739 [N/mm] |

Tabelle 3.1: Steifigkeit der quadratischen Platte je nach Lasteintragung

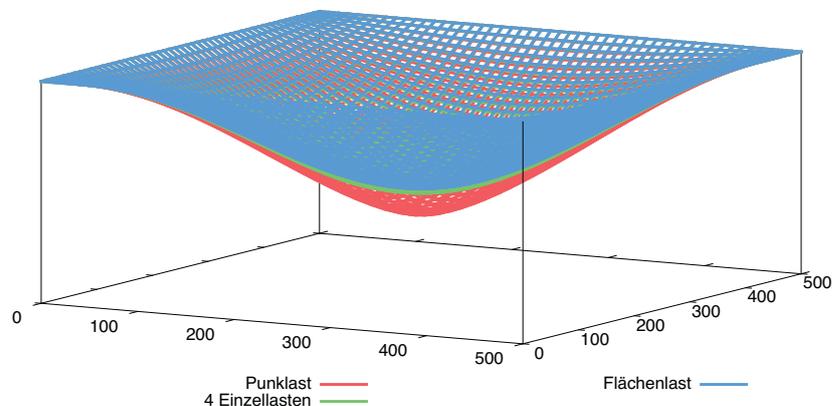


Abbildung 3.2: Durchbiegungsfläche der rechteckigen Platte je nach Lasteintragung

3.2 Theorie zur numerischen Simulation

In diesem Abschnitt¹ werden ausgewählte Themen der numerischen Simulation beschreiben, die für diese Arbeit von Relevanz sind. Es ist nicht Absicht eine fundamentale Einführung in die numerischen Methoden zu reproduzieren, sondern dem Leser vielmehr eine Ergänzung zu den im Abschnitt 5 beschriebenen Vorgangsweisen zu geben.

3.2.1 Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb

Das Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb definiert das Versagen in Bezug zur maximal aufnehmbaren Schubspannung τ_{max} , die linear von der hydrostatischen Spannung p abhängig ist. Die in ABAQUS implementierte Formulierung der Bruchbedingung (Formel 3.3) geht im allgemeinen Spannungszustand von zwei Parametern aus: dem Reibungswinkel ϕ und der Kohäsion c .

$$\begin{aligned} F &= R_{mc}q - p \tan \phi - c = 0 \\ R_{mc}(\Theta, \phi) &= \frac{1}{\sqrt{3} \cos \phi} \sin \left(\Theta + \frac{\pi}{3} \right) + \frac{1}{3} \cos \left(\Theta + \frac{\pi}{3} \right) \tan \phi \\ \cos(3\Theta) &= \left(\frac{3}{q} \right)^3 \end{aligned}$$

Formel 3.3: Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb

Durch diese Formulierung ergibt sich eine Zugfestigkeit, die nach Formel 3.4 berechnet werden kann.

$$\sigma_{t0} = \frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi}$$

Formel 3.4: Zugfestigkeit nach Mohr-Coulomb

In den meisten Fällen ist diese Zugfestigkeit ungeeignet, um ein Versagen auf Zug nachzustellen. Für diesen Fall kann eine Tension Cutoff Kurve definiert werden, die explizit von einer Zugfestigkeit $\tilde{\epsilon}_t^{pl}$ ausgeht. Die Modellierung dieser Bruchbedingung erfolgt mit Hilfe der Rankinschen Hüllkurve (Formel 3.5). Abbildung 3.3 zeigt die Bedingung in der p-q-Spannungsebene², während in Abbildung 3.4 diese in der deviatorischen Spannungsebene, dem Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb und Tresca, gegenübergestellt wird.

$$\begin{aligned} F_t &= R_r(\Theta)q - p - \sigma_t(\tilde{\epsilon}_t^{pl}) = 0 \\ R_r(\Theta) &= \left(\frac{2}{3} \right) \cos \Theta \end{aligned}$$

Formel 3.5: Bruchkriterium nach Rankine

¹Dem Leser wird empfohlen diesen Teil eventuell zu überspringen und bei Bedarf darauf zurückzukommen.

² p ist die hydrostatische Spannung, q ist der Spannungsdeviator

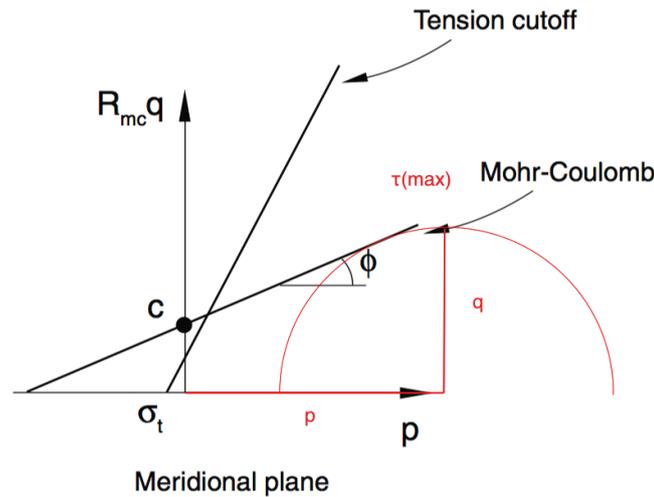


Abbildung 3.3: Tension-Cutoff-Bedingung in der p-q Spannungsebene DSS Simulia (2010a)

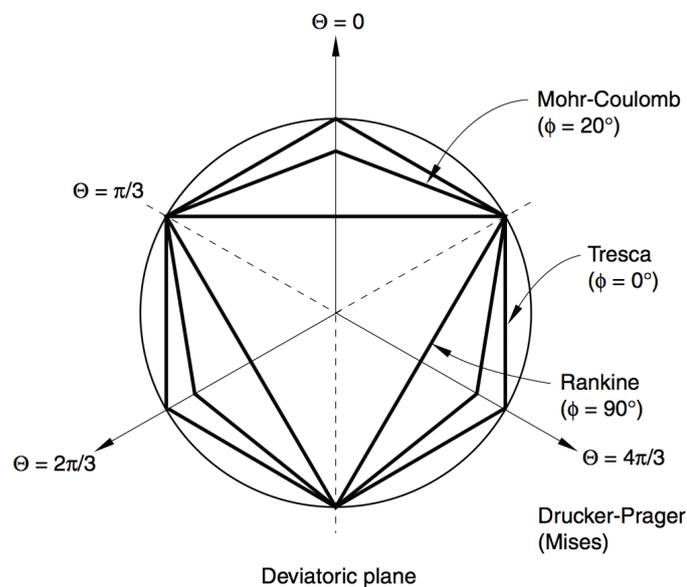


Abbildung 3.4: Tension-Cutoff-Bedingung in der Deviatoriebene DSS Simulia (2010a)

3.2.2 Concrete Damage Plasticity

Concrete Damage Plasticity (CDP) ist ein von Lubliner u. a. (1989) formuliertes Plastizitätsmodell, welches das Verhalten von Beton und ähnlichen Geomaterialien bei geringer hydrostatischer Spannung wiedergeben soll. Es basiert im Gegensatz zu Modellen, die auf physikalischen Gesetzen aufbauen, auf einer empirischen Formulierung des Materialverhaltens, das sich unter bestimmten Rahmenbedingungen dem experimentell bestimmten Verhalten annähert.

Die grundsätzlich verschiedenen Versagensformen auf Druck (Plastizitätstheorie) und Zug (Bruchmechanik) sind im CDP in einem allgemeinen Bruchkriterium zusammengefasst. Dies ermöglicht die Untersuchung von Vorgängen, bei denen zyklische oder monotone Belastungen eine Wechselwirkung der beiden Versagensformen aufzeigen.

CDP besteht, wie alle Materialmodelle, die auf einer nicht assoziierten Fließregel beruhen, aus der Fließfläche (Formel 3.6), dem Fließpotential (Formel 3.7) und dem Ver- und Entfestigungsgesetz. Letzteres wird in

Form von Schädigungsparametern umgesetzt, die eine Erhöhung dieses Wertes, jedoch keine Verringerung erlauben. Auf diese Weise wird die Entstehung von Mikrorissen im Material simuliert.

$$F = \frac{1}{1 - \alpha} (\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\bar{\varepsilon}^{pl})\langle\hat{\sigma}_{max}\rangle - \gamma\langle-\hat{\sigma}_{max}\rangle) - \bar{\sigma}_c(\bar{\varepsilon}_c^{pl}) = 0$$

$$\alpha = \frac{(\sigma_{b0}/\sigma_{c0}) - 1}{2(\sigma_{b0}/\sigma_{c0}) - 1} \dots 0 \leq \alpha \leq 0.5$$

$$\beta = \frac{\bar{\sigma}_c(\bar{\varepsilon}_c^{pl})}{\bar{\sigma}_t(\bar{\varepsilon}_t^{pl})} (1 - \alpha) - (1 + \alpha)$$

$$\gamma = \frac{3(1 - K_c)}{2K_c - 1}$$

Formel 3.6: Fließfunktion CDP

Zur Beschreibung dieser Bruchbedingung (Abbildung 3.5 und 3.6) ist u.a. das Verhältnis von zweiaxialer zu einaxialer Festigkeit (σ_{b0}/σ_{c0}) notwendig. Aus experimentellen Untersuchungen kann das Verhältnis für Beton zwischen 1,10 und 1,16 angenommen werden (Lubliner u. a., 1989). $\bar{\sigma}_c(\bar{\varepsilon}_c^{pl})$ und $\bar{\sigma}_t(\bar{\varepsilon}_t^{pl})$ sind effektive Druck- und Zugfestigkeiten, die im Ver- und Entfestigungsverlauf vorgegeben werden. Die Konstante K_c bestimmt die Form der Bruchfläche als Verhältnis der zweiten Spannungsinvariante auf dem Zugmeridian (q_{TM}) zu der Spannungsinvariante auf dem Druckmeridian (q_{CM}). Aus der Literatur lassen sich Werte für K_c von 0,64 (Schickert u. Winkler, 1977) 0,66 (Richart u. a., 1928) und 0,8 (Mills u. Zimmerman, 1970) für Beton finden. Abbildung 3.6 zeigt den Verlauf beim Standardwert von $K_c = \frac{2}{3}$ und $K_c = 1$.

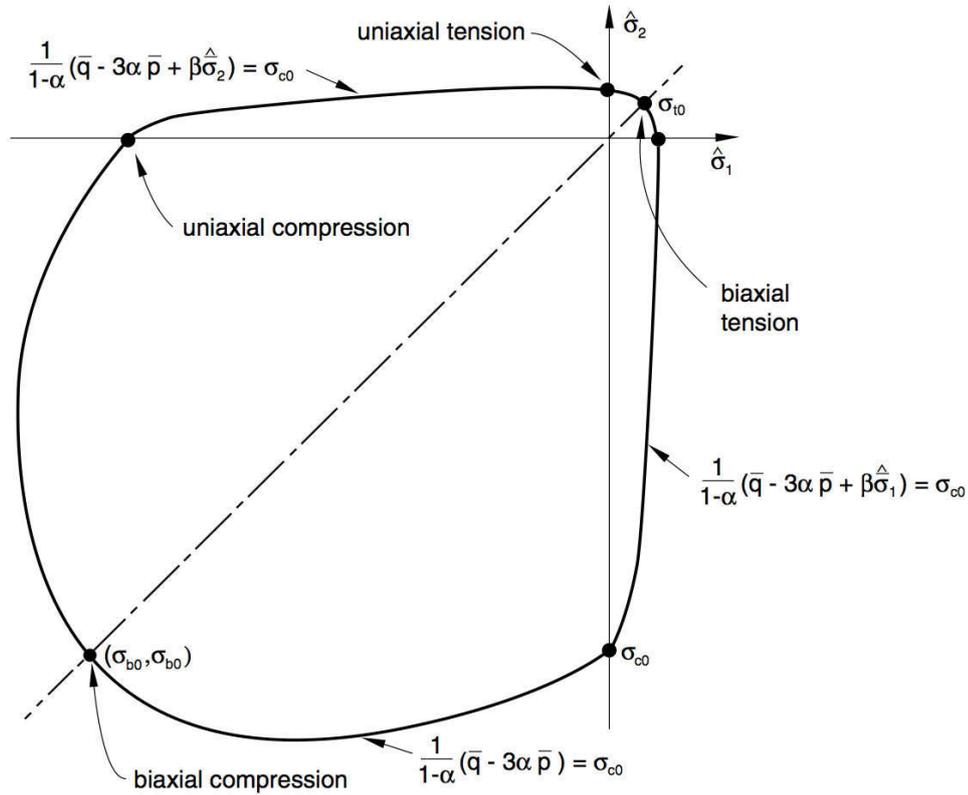
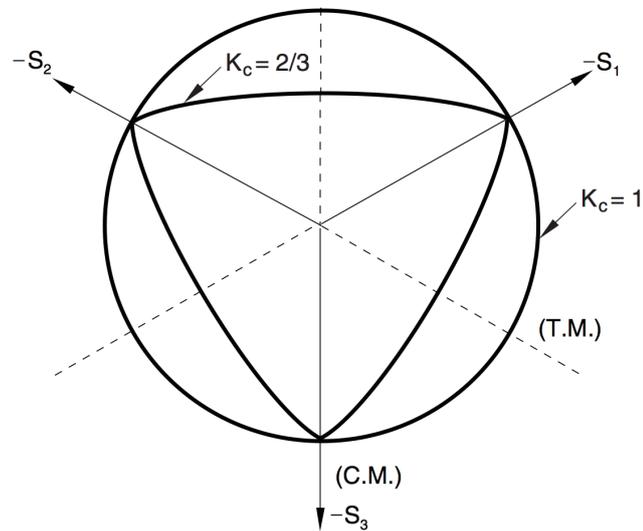


Abbildung 3.5: Bruchkriterium im ebenen Spannungsraum (DSS Simulia, 2010a)

Abbildung 3.6: Einfluss von K_c auf das Bruchkriterium in der Deviatorebene (DSS Simulia, 2010a)

Bei der Fließregel bedient man sich der hyperbolischen Funktion nach Drucker-Prager. Den Parameter $\epsilon\sigma_{t0}$ bezeichnet man als Exzentrizität, mit der sich die Funktion der Asymptote nähert. Die einaxiale Zugfestigkeit σ_{t0} wird aus dem vorgegebenen Entfestungsverlauf übernommen und ψ ist der Dilatationswinkel.

$$G = \sqrt{(\epsilon\sigma_{t0} \tan \psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \tan \psi$$

Formel 3.7: Fließpotential von CDP

Die fortschreitende Schädigung mit dem CDP-Modell-Parameter zur Steifigkeitsdegradation angegeben. Diese Damageparameter mindern die Steifigkeit in Form von $E_d = E_0(1 - d_{c,t})$ ab, wobei 0 keine und 1 die maximale Entfestigung zur Folge haben. Die Damageparameter werden analog zum Ver- und Entfestigungsverlauf mit den zugehörigen äquivalenten plastischen Dehnungen ($\tilde{\epsilon}_t^{pl}$, $\tilde{\epsilon}_c^{pl}$) angegeben.

Für den Fall des Wechsels der Spannungsvorzeichen fließen die Steifigkeitserholungsvariable w_c und w_t in die Rechnung ein. Wechselt die Belastung von Zug auf Druck, und ist bereits eine Abminderung der Steifigkeit entstanden ($d_c > 0$), erfolgt die Anpassung der Druckfestigkeit anhand von w_c (für den umgekehrten Fall w_t). Ist w_c auf 0 gesetzt, wird die Schädigung aus dem Zugbereich übernommen und beeinflusst die Druckfestigkeit. Beim Wert 1 erfolgt die Wiederherstellung der Steifigkeit auf E_0 , was keiner Einflussnahme der Zugschädigung auf den Druckbereich entspricht. Abbildung 3.7 zeigt das Verhalten bei $w_c = 1$ und $w_t = 0$, die als Standardwerte im ABAQUS CDP Modell vorgegeben sind.

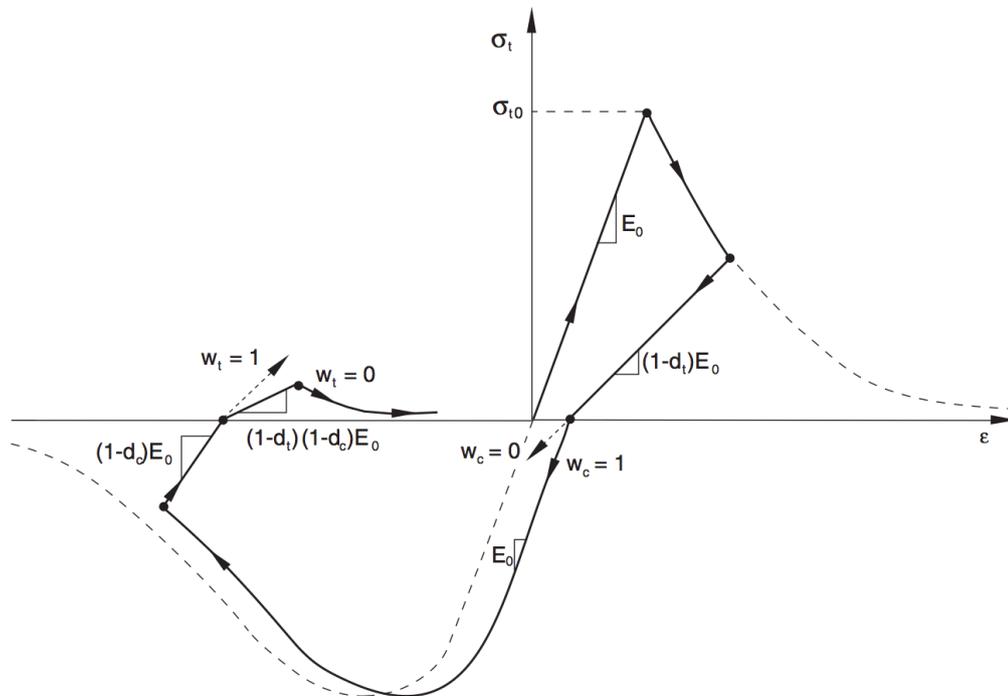


Abbildung 3.7: Damageparameter und Steifigkeitserholung (DSS Simulia, 2010a)

3.2.3 "Stabilize" Funktion

Bei unstabilen Problemstellungen kann es vorkommen, dass die in ABAQUS/Standard zur Verfügung stehenden Lösungsmethoden nicht konvergieren. Dies kommt hauptsächlich aufgrund der geometrischen Natur eines Problems vor, wie z.B. beim Knicken oder bei starker Entfestigung. In solchen Fällen wird Energie von einem Teil des Modells freigesetzt und in die anliegenden Regionen übertragen. Solche Probleme müssen daher entweder dynamisch oder mit Hilfe der `Stabilize` Funktion gelöst werden.

Diese Funktion implementiert eine proportional zum Volumen abhängige Dämpfung in das Modell. Dies wird durch die Erweiterung der allgemeinen Gleichgewichtsgleichung, in der externe Kräfte P und interne

Kräfte I ausgeglichen sein müssen, mit der Dämpfungskraft F_v erreicht. Die "viskose" Kraft F_v besteht aus dem Dämpfungsfaktor c , der vektoriellen Geschwindigkeit der Knoten und einer künstlichen Massenmatrix M^* .

$$F_v = cM^*v$$

$$P - I - F_v = 0$$

Formel 3.8: Formulierung der `Stabilize` Funktion

ABAQUS bietet verschiedene Möglichkeiten den Dämpfungsfaktor zu beeinflussen. Dieser kann entweder direkt vom Nutzer als ein fixer Wert, oder als Bruchteil der extrapolierten Verformungsenergie definiert werden, wobei bei letzterem der Dämpfungsfaktor, aus dem vorherigen Inkrement bei jedem Berechnungsschritt angepasst wird.

4 Voruntersuchungen

4.1 Prüfung von Spritzbeton nach EN-14488 (2006)

Die Einteilung des mit Stahl- oder Kunststofffasern bewehrten Spritzbetons erfolgt nach ÖVBB-Richtlinie Spritzbeton, welche die Bestimmung der Energieabsorption nach ÖNORM EN 14488 erfordert. Die Ermittlung der Energieabsorptionsklasse erfolgt anhand eines quadratischen Prüfkörpers mit der Länge von 600 mm. Der Spritzbeton wird in eine Schalung in einer Dicke von mindestens 100 mm und maximal 105 mm gespritzt. Die vorgeschriebenen Maße können auch durch Nachbehandlung erzeugt werden.

Der Krafteintrag erfolgt über einen quadratischen Stempel, mit einer Länge von 100 ± 1 mm und Höhe von 20 ± 1 mm, zentrisch auf die Betonplatte. Diese liegt auf einem quadratischen Rahmen, mit 500 ± 2 mm Innenmaß und 20 ± 1 mm Breite auf.

Die Versuchsdurchführung erfolgt indem der Stempel weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 1 mm pro Minuten auf den Prüfkörper geführt wird. Bis zu einer Durchbiegung von 30 mm wird die Last und Durchbiegung kontinuierlich aufgezeichnet. Die Auswertung erfolgt anhand der Kraft-Weg-Diagramme. Die Energieabsorptionskapazität ergibt sich aus der Fläche unter der Last-Durchbiegungskurve von Versuchsbeginn bis zu 25 mm Durchbiegung. Zum Erreichen einer bestimmten Energieabsorptionsklasse müssen aus einer Serie, bestehend aus drei Platten, mindestens zwei die erforderliche Energie absorbieren können.

4.2 Untersuchungen am Lehrstuhl für Subsurface Engineering

Am Lehrstuhl für Subsurface Engineering wurden an zahlreichen Probekörpern die Energieabsorptionskapazität bestimmt (Pittino u. a., 2011). Dafür wurde eine rechnergesteuerte, servo-hydraulische Prüfmaschine mit einer Systemsteifigkeit von 9000 kN/mm verwendet. Bei diesem Versuchsaufbau befindet sich der Hubkolben unterhalb des Testraums, sodass ein Prüfrahm für die korrekte Versuchsdurchführung angefertigt werden musste. Der am Lehrstuhl entworfene und berechnete Trägerrost (Abbildung 4.1) wurde von der Firma Östu-Stettin Stahlbau angefertigt und übertrifft im Versuchsaufbau die geforderte Systemsteifigkeit der ÖNORM von 200 kN/mm bei weitem.



Abbildung 4.1: Trägerrost

Abbildung 4.2 zeigt den Versuchsaufbau während einer Versuchsdurchführung. Der Prüfkörper und Trägerrost werden auf den Hubkolben gestellt und gegen einen fixen rechteckigen Stempel nach oben gedrückt. Dieser ist über eine Druckmessdose, die zur Ermittlung der Reaktionskräfte benötigt wird, mit dem Rahmen verbunden. Der Trägerrost ist auf dem Hubkolben drehbar gelagert, damit dieser parallel zu den Seiten des Prüfstempels ausgerichtet werden kann. Die Durchbeugung wird durch den Hubkolben weggeregelt vorgegeben.



Abbildung 4.2: Prüfkörper und Trägerrost auf dem Hubkolben der Prüfmaschine aufgesetzt

Beispielsweise ist in Abbildung 4.3 die Verschiebungskurve inklusive der absorbierten Energie für eine Serie aus drei Betonplatten angeführt. Diese Serie verfehlte die Anforderung für Energieklasse EV500, da nur eine Platte mehr als 500 Joule aufnehmen konnte. Die Verschiebungskurve kann in drei Abschnitte eingeteilt werden:

- Elastischer Bereich
- Bruchentstehung
- Nachbruchverhalten

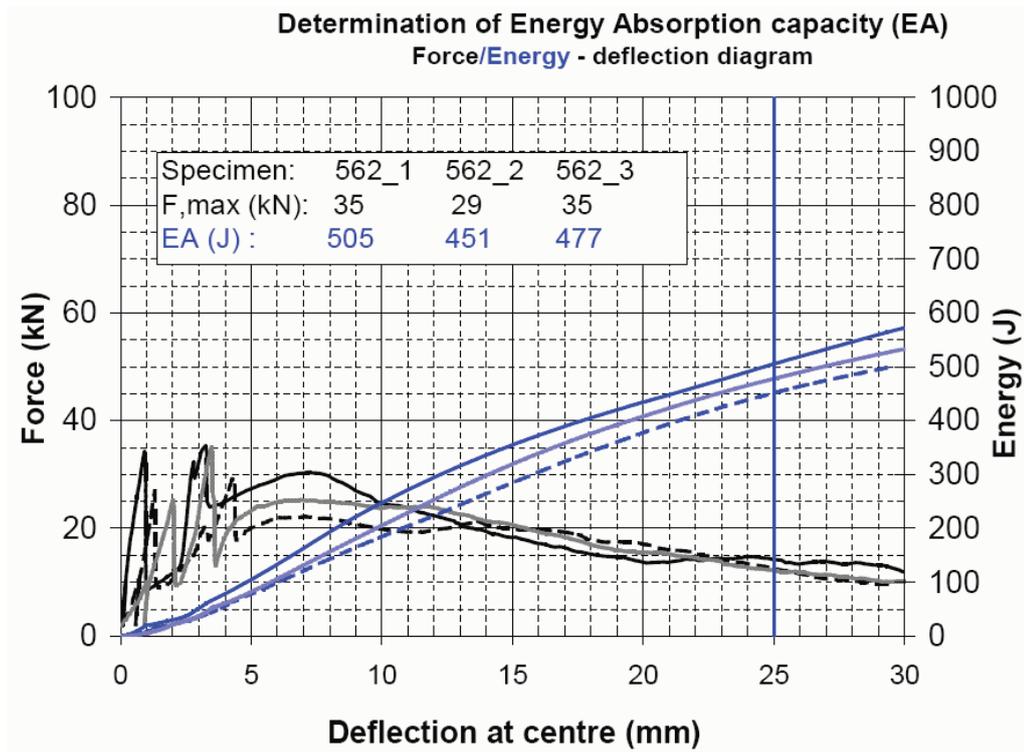


Abbildung 4.3: Auswertung einer Plattenserie

Beim elastischen Teil steigt die Reaktionskraft monoton an. Der Bruchvorgang beginnt mit einem sprunghaften Kraftabfall und ist im weiteren Verlauf durch unetige Sprünge geprägt, wobei das Rissbild sich zunächst auf der Unterseite des Prüfkörpers ausbildet. Typische, nach Versuchsdurchführung aufgenommene Bruchbilder sind in Abbildung 4.4 zusammengestellt. Nach der Primärrissausbildung geht die Verschiebungskurve wieder in ein stetiges Verhalten über, in welchem der Verbund zwischen Fasern und Beton für das Verhalten ausschlaggebend ist. Je nach Beschaffenheit des Prüfkörpers und der Lagerungsbedingungen sind die Abschnitte unterschiedlich stark ausgeprägt.



4.4.1: Bruchbild 1

4.4.2: Bruchbild 2

4.4.3: Bruchbild 3

4.4.4: Bruchbild 4

Abbildung 4.4: Typische Rissbilder

Im Vorfeld der numerischen Untersuchung mit ABAQUS wurde der Versuchsaufbau mit FLAC 3D³ untersucht (Pittino u. Wilczek, 2011). Dabei wurden die Auswirkungen der Lagerungsbedingung auf den Bruchvorgang erörtert.

³Fast Lagrangian Analysis of Continua, Software der Firma ITASCA™, eine Finite Differenzen Methode

5 Numerische Untersuchung ABAQUS FEA

In diesem Abschnitt werden die numerischen Simulationen beschrieben, die im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführt wurden. Zuerst wird der numerische Versuchsaufbau erläutert und anschließend eine systematische Erweiterung des Modells mit jeweils komplexeren Materialmodellen gezeigt. Beginnend mit linear elastischem Materialverhalten wird die Simulation den analytischen Überlegungen gegenübergestellt. In weiterer Folge werden die Versuche mit dem Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb und schließlich mit dem Concrete Damage Plasticity Modell analysiert. Abschließend wird das System in einem Viertelmodell-aufbau untersucht.

5.1 Modellaufbau

Der Versuchsaufbau nach EN-14488 (2006) lässt sich relativ einfach mit den drei folgenden Elementen in ein numerisches Modell übertragen:

- Prüfkörper
- Rahmen
- Stempel

Der rechteckige Versuchsaufbau ermöglicht eine Vereinfachung des Systems durch die Verwendung der zwei Symmetrieebenen. Auf diese Möglichkeit wird in den ersten Simulationen vorerst bewusst verzichtet, um asymmetrische Rissbilder, die in den Laborversuchen zu beobachten sind (Abschnitt 4), zu ermöglichen. In Abschnitt 5.4.2 wird diese Simplifizierungsmöglichkeit wieder aufgegriffen.

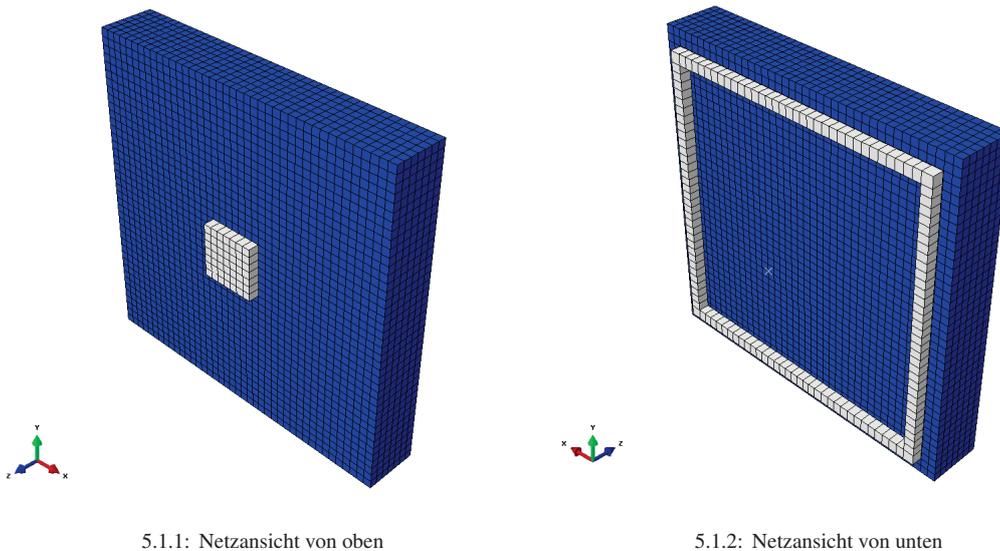
Da ABAQUS dimensionslos arbeitet, muss bei der Erstellung des Modells ein kohärentes Einheitensystem festgelegt werden. Dies muss besonders bei der Eingabe der Materialparameter berücksichtigt werden. In dieser Untersuchung werden Meganewton (10^6 Newton) und Millimeter (10^{-3} Meter) als Einheiten gewählt.

Zur Vereinfachung werden Rahmen und Stempel als starre Körper angenommen. Dies erfolgt durch die Einschränkungsfunktion `* Rigid Body`, bei der ein Referenzpunkt dem Körper zugewiesen wird. Jeder Punkt des Körpers ist somit starr mit diesem Referenzpunkt verbunden und kann so über diesen in allen sechs Freiheitsgraden bewegt werden. Eine Deformation des Körpers wird somit verhindert.

Ein weiterer Vorteil dieser Verknüpfung ist das einfache Auslesen von Reaktionskräften und Verschiebungen des gesamten Körpers über dessen Referenzpunkt. Die Kräfte werden in jedem Berechnungssinkrement für die spätere Analyse aufgezeichnet. Zusätzlich werden auch noch diverse Feldvariablen, wie z.B. Spannungszustände, Damage Parameter etc. während der Simulation zur weiteren Analyse abgefragt.

Das Netz wird aus würfelförmigen Elementen des Typus `C3D8R` mit einer Kantenlänge von 15 mm erstellt. `C3D8R` ist ein hexaedrisches Element (der ersten Ordnung) mit reduzierten Integrationspunkten. Vollständig integrierte Elemente, wie z.B. `C3D8`, sollten aufgrund des "shear locking" Verhaltens, das bei Biegebelastung dieser Elemente auftritt, nicht verwendet werden. Die reduzierte Integrationspunktzahl wirkt sich positiv auf die Rechenzeit aus; jedoch muss mit Einschränkungen in Bezug auf die Genauigkeit gerechnet werden, da die Dehnung nur in der Mitte des Elements bestimmt wird.

Der Aufbau ist aus Abbildung 5.1 ersichtlich. Weiße Elemente sind als undeformierbare `Rigid Body` Materialien definiert.



5.1.1: Netzansicht von oben

5.1.2: Netzansicht von unten

Abbildung 5.1: Versuchsaufbau mit 15mm Netz

Der Versuchsablauf wird anhand der Randbedingungen bestimmt. Der Rahmen wird durch seinen Referenzpunkt mit der Funktion * ENCASTRE in allen Freiheitsgraden ⁴. Dem Referenzpunkt des Stempels wird ein Verschiebungsvektor in Richtung des Rahmens ⁵ zugewiesen, wobei die Rotationskomponenten gesperrt, d.h. auf 0 gesetzt werden. Da der Lasteintrag über den weggesteuerten Stempel in das System erfolgt, ist das * Static Verfahren eine geeignete Prozedur für die Berechnung.

Für die Interaktion zwischen den drei Körpern wird ein Reibungskoeffizient von 0.3 definiert. Die Normalkräfte werden durch den Penalty Algorithmus bestimmt, wodurch die Normalspannungen anhand der Überschneidungen der beiden Körper ermittelt werden.

5.2 Simulationen ohne explizit definierter Zugfestigkeit

Ausgehend von den analytischen Überlegungen werden zuerst Simulationen mit linear-elastischem Materialverhalten durchgeführt. In einem zweiten Schritt wird das Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb in Verbindung mit perfekt-plastischem Versagensverhalten eingeführt. Tabelle 5.1 zeigt die Eingabeparameter, die dem Prüfkörper in dieser Untersuchung zugewiesen werden.

| E-Modul | Querdehnungszahl ν | Reibungswinkel φ | Kohäsion |
|----------|------------------------|--------------------------|----------|
| 20 [GPa] | 0,2 [1] | 50 [°] | 5 [MPa] |

Tabelle 5.1: Materialparameter für linear elastisches und MC Materialverhalten

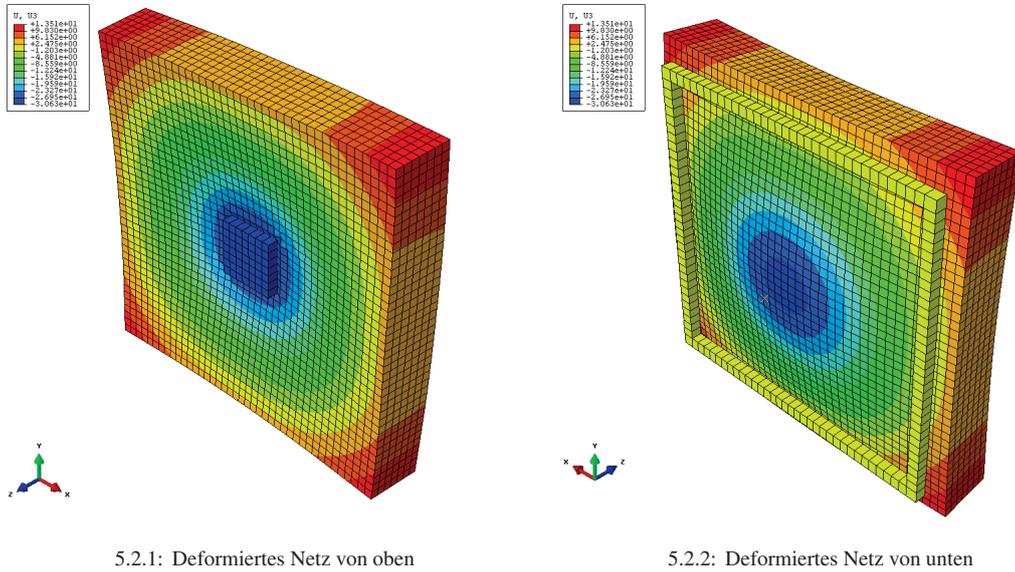
5.2.1 Elastisches Materialverhalten

Abbildung 5.2 zeigt den Versuchsaufbau mit elastischem Materialverhalten im deformierten Zustand. Bei dieser Simulation wurde der Stempel bis zu einer Verschiebung von 30 mm gegen den Prüfkörper geführt.

⁴Translation und Rotation

⁵negative Z-Richtung

An den Abbildungen sind die Unterschiede zur analytischen Berechnung gut zu erkennen. Im mittleren Bereich biegt sich der Prüfkörper wie in der analytischen Berechnung durch. Im Gegensatz zur analytischen Lösung, bei der die Membrane frei drehbar gehalten wird, kann sich der Prüfkörper hier durch die einfache Auflagerung an den Ecken des Rahmens nach oben abheben.

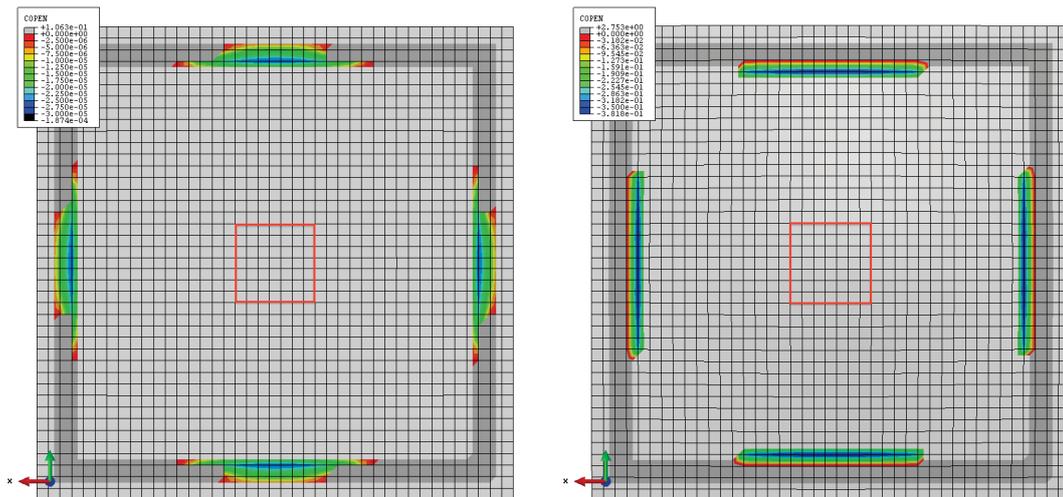


5.2.1: Deformiertes Netz von oben

5.2.2: Deformiertes Netz von unten

Abbildung 5.2: Elastische Verschiebungen in Z-Richtung

In Abbildung 5.3⁶ sind die Überschneidungen zwischen Prüfkörper und Rahmen dargestellt. Diese zeigen die Kraftübertragung und somit auch die Lagerung des Prüflings. Die Kontaktflächen, wie sie in Abbildung 5.3.1 zu sehen sind, bleiben bis zu einer Verschiebung von 10 mm gleich. Danach ist die Durchbiegung der Platte so groß, dass diese nur noch auf der Innenseite des Rahmens aufliegt. (5.3.2).



5.3.1: Kontaktöffnung bei Versuchsbeginn

5.3.2: Kontaktöffnung im späteren Versuchsverlauf

Abbildung 5.3: Auflager des Prüfkörpers am Rahmen

⁶Der Stempel ist rot eingezeichnet

Die EN-14488 (2006) empfiehlt die Verwendung eines geeigneten steifen Bettungsmaterials als Zwischenschicht, das sowohl zwischen der Probe und dem Prüfstempel als auch zwischen der Probe und dem Auflagerahmen anzuordnen ist. Die Analyse zeigt deutlich, dass lediglich eine Auflagerung des Prüfkörpers nur in der Mitte der Vierkantstäbe notwendig ist. Diese ist durch das Bettungsmaterial auf einer Länge von etwa der Breite des Prüfstempels zu gewährleisten. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Resultaten der numerischen Berechnung mit FLAC 3DTM aus Pittino u. Wilczek (2011). Die Bettung der übrigen Bereiche ist nicht notwendig, da sich diese bei der ersten Belastung vom Rahmen abheben. Zusätzlich ist die Sicherstellung einer vollständigen Lagerung auf den Rahmen, auch mit Bettungsmaterial, schwierig umzusetzen, da sich bereits kleine Unebenheiten unvorhersehbar auf den Versuchsaufbau auswirken können. Eine Lagerung, wie sie in Abbildung 5.4 zu sehen ist, würde dieses Problem zum großen Teil minimieren.

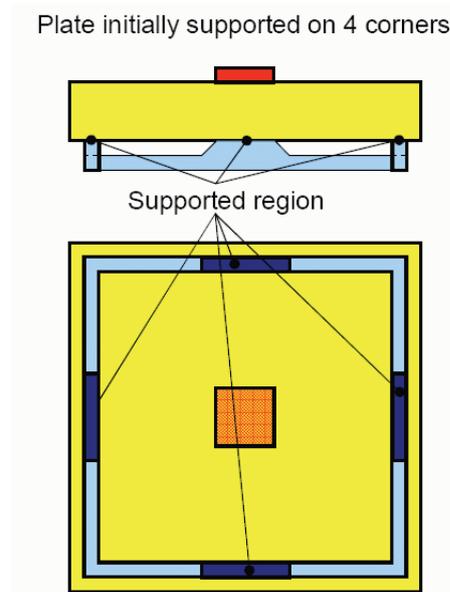


Abbildung 5.4: Adaptierte Lagerung des Prüfkörpers (Pittino u. Wilczek, 2011)

Wie bereits erwähnt, ist nach EN-14488 (2006) auch Bettungsmaterial für die Kraftübertragung zwischen Stempel und Prüfkörper vorgesehen. Da es sich aber um einen starren, oder im Verhältnis zur Betonplatte, viel steiferen Stempel handelt, kann sich dieser nicht der Verformung der Platte anpassen.

Aus der numerischen Berechnung resultiert, dass die Kraftübertragung vom Stempel auf den Prüfkörper nur an vier Punkten stattfindet. Abbildung 5.6.1 zeigt die Spannungen, die sich in der Platte unter dem Laststempel ausbilden. Deutlich sind die Spannungsspitzen an den Ecken des Stempels zu erkennen.

Zur Verifizierung dieses Bildes wurden Laborversuche, am Lehrstuhl für Subsurface Engineering (SE), durchgeführt. Dabei wurde Blaupapier zwischen dem Probekörper und dem Stempel positioniert. Während des Versuchsverlaufs färbt das Papier die Kontaktbereiche blau ein. Abbildung 5.5 zeigt den eingefärbten Prüfkörper nach einer vollständigen Prüfung. Der Abdruck bestätigt die Annahme (s. Abschnitt 3.1), dass bei einer analytischen Berechnung von vier Einzellasten ausgegangen werden kann. Deutlich sind die einzelnen Punkte zu erkennen, an denen der Stempel mit dem Prüfkörper in Kontakt gekommen ist. Abgesehen von einzelnen Abweichungen, die sich aus der Unebenheit des Prüfkörpers ergeben, sind die Druckpunkte an den vier Ecken des Stempels gut zu erkennen.

Bettungsmaterial ist daher nicht zwingend notwendig, da durch die Durchbiegung des Prüfkörpers nur die Ecken des Stempels mit diesem in Kontakt kommen. Es muss jedoch sichergestellt werden, dass etwaige Unebenheiten in der Mitte des Stempels nicht mit diesem in Kontakt kommen, um eine definierte Kraftübertragung zu gewährleisten.



Abbildung 5.5: Druckpunkte des Belastungsstempels

Ein besseres Verständnis des Versuchsaufbaus kann durch die Betrachtung der Hauptnormalspannungen⁷ im Prüfkörper gewonnen werden. In Abbildung 5.6 sind die Hauptnormaldruckspannungen im Prüfkörper zu sehen, die sich nur direkt unter dem Prüfstempel ausbilden. Der Druckbereich geht von der quadratischen Grundfläche des Stempels aus und bildet mit dieser einen halbellipsoiden Körper. Die größten Spannungen gehen von den Eckbereichen des Stempels weg nach unten in den Prüfkörper. Ein halbkugelförmiger Bereich in der Mitte der Lastplatte bleibt fast spannungsfrei.

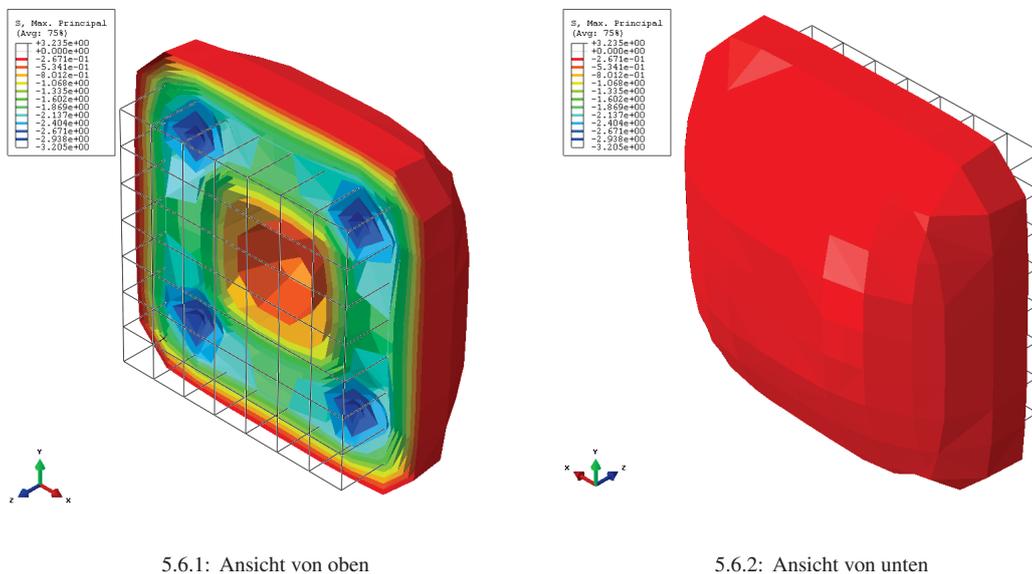
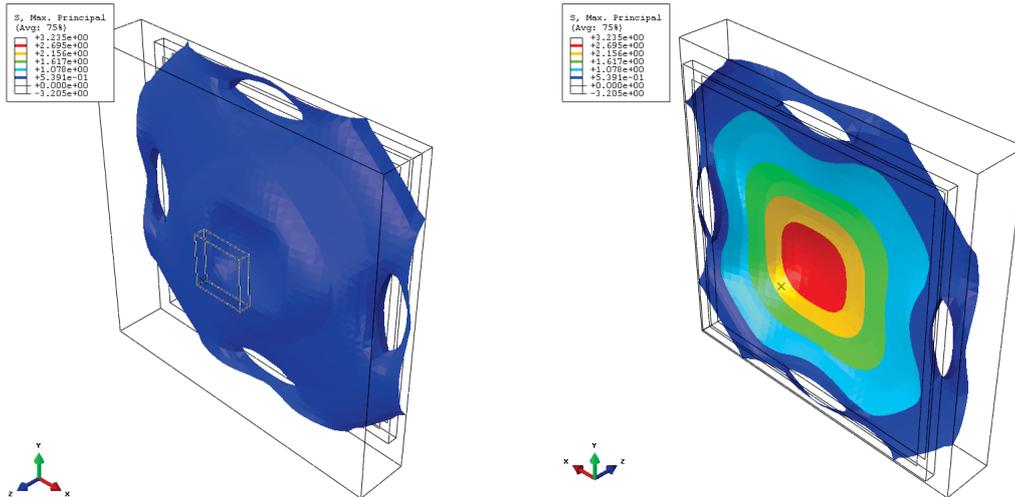


Abbildung 5.6: Hauptnormalspannungen (Zug) am Prüfkörper im elastischen Bereich

Die Verteilung der Zugspannungen im Prüfkörper ist relativ komplex. In Abbildung 5.7 ist diese mit Hilfe von Isoflächen dargestellt. Deutlich sind die Auflager zu erkennen, die sich in der Mitte der Rahmen ausbilden. Die maximale Zugspannung bildet sich in der Mitte auf der Unterseite der Betonplatte.

⁷In ABAQUS sind Druckspannungen mit negativem und Zugspannungen mit positivem Vorzeichen versehen



5.7.1: Ansicht von oben

5.7.2: Ansicht von unten

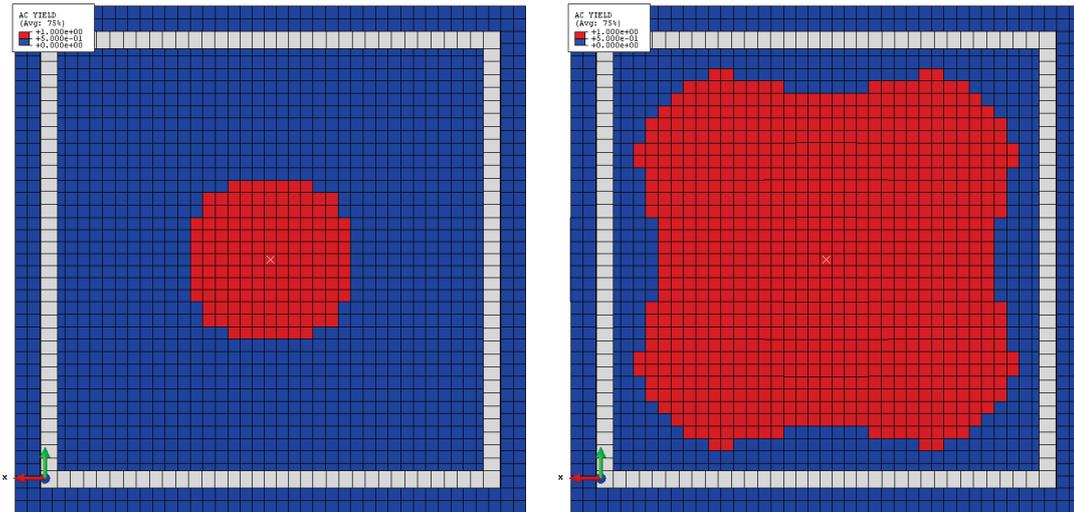
Abbildung 5.7: Hauptnormalzugspannungen am Prüfkörper im elastischen Bereich

5.2.2 Materialverhalten mit Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb

Durch die Einführung des Bruchkriteriums nach Mohr-Coulomb kann ein "Versagen" simuliert werden. Dabei plastifiziert das Material beim Erreichen des Bruchkriteriums. Danach verhält sich das Material perfekt-plastisch. Wird das Kriterium im weiteren Verlauf unterschritten, verhält sich der Körper wieder linear-elastisch.

Mit diesem relativ simplen Materialmodell lässt sich eine langsame Plastifizierung der gesamten Betonplatte während des Versuchsablaufs beobachten. Bereits bei 0.116 Millimeter Durchbiegung entsteht eine runde plastifizierte Zone auf der Unterseite der Prüfkörper (Abbildung 5.8). Diese breitet sich symmetrisch aus und bevorzugt dabei die Richtung der Rahmenecken, an denen die Platte nicht aufliegt. Nach der vollständigen Plastifizierung der Platte bricht ABAQUS die Simulation bei einer Durchbiegung von 1,452 Millimeter ab, da für den nächsten Rechenschritt keine Gleichgewicht mehr gefunden wird.

Die Form und Ausbreitung der plastifizierten Zonen korrelieren mit Hauptnormalzugspannungen (Abbildung 5.7.1 aus der elastischen Simulation). Daraus resultiert, dass die Plastifizierung im Zugbereich des Mohr-Coulomb'schen Bruchkriteriums erfolgt. In Abschnitt 5.3 wird auf diesen Aspekt näher eingegangen.



5.8.1: Plastifizierung bei 0,116 mm Durchbiegung

5.8.2: Plastifizierung bei 0,262 mm Durchbiegung

Abbildung 5.8: Ausbreitung der plastifizierten Zone

Abbildung 5.9 fasst die verschiedenen Verschiebungskurven der Modelle ohne explizit definierter Zugfestigkeit zusammen. Wie erwartet führt die analytische Berechnung zu einer höheren Steifigkeit als die des numerischen Modells mit linear elastischem Materialverhalten. Das kann auf die Auflagerbedingungen zurückgeführt werden. Während die analytische Lösung von einem an den Seiten frei drehbar und vertikal unverschieblichen Prüfkörper ausgeht, ist dieser in der numerischen Berechnung auf dem Rahmen nur einfach aufgelagert und kann nach oben abheben.

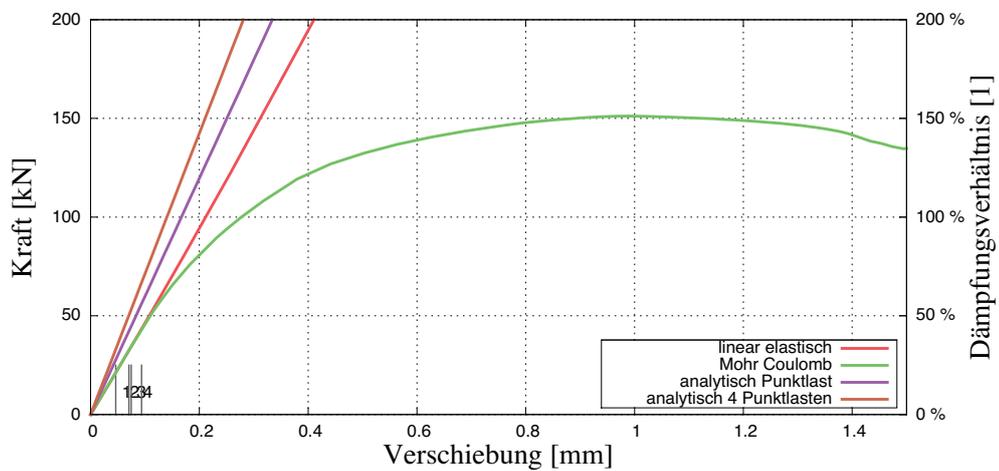


Abbildung 5.9: Verschiebungskurve mit elastischem Materialverhalten

Aus Tabelle 5.2 sind die Steifigkeitswerte zu entnehmen:

| analytische Punktlast | analytisch 4 Punktlasten | numerische Steifigkeit |
|-----------------------|--------------------------|------------------------|
| 598 [N/mm] | 712 [N/mm] | 433 [N/mm] |

Tabelle 5.2: Steifigkeitsvergleich im elastischen Bereich

Ein unerwartetes Resultat der Simulation mit dem Mohr-Coulomb-Materialverhalten ist das relativ frühe Versagen des Prüfkörpers. Bei einer Verschiebung von 0,116 Millimeter entsteht die erste plastifizierte Zone. Bei den Laborversuchen wird eine Deformation von bis zu 4 Millimeter benötigt, bevor der Bruch entsteht. Diese Differenz kann auf die imperfekten Lagerungsbedingungen im Laborversuch zurückgeführt werden. Damit die Laborversuche an die perfekten Lagerungsbedingungen der numerischen Simulation herankommen, müsste die Rauheit des Prüfkörpers ein Vielfaches kleiner sein als die Verschiebung, die für die Plastifizierung des ersten Elementes notwendig ist. So eine genaue Fertigung ist mit dem Spritzbeton nicht möglich, was sich in einer schwierig zu bestimmenden Lagerung auswirkt. Im Laborversuch werden die Lagerungsbedingungen maßgeblich von der Rauheit des Prüflings und der Bettungsmasse definiert.

5.3 Simulationen mit explizit definierter Zugfestigkeit und Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb

Das Versagen im Plattenversuch kann vorwiegend auf die Überschreitung der Zugfestigkeit auf der Unterseite der Betonplatte zurückgeführt werden. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Zugfestigkeit im Materialmodell explizit zu definieren.

Für diesen Zweck wird das Mohr-Coulomb-Materialverhalten mit einer definierten *Tension-Cut-Off* (Rankin) Kurve erweitert. Dadurch wird die Zugfestigkeit, die sich aus der Mohr-Coulomb-Formel ergibt, aus dem Materialverhalten ausgeklammert und nach dem definierten Zugverhalten vorgegangen, wobei auch der Spannungspfad berücksichtigt wird. Nach einer Überschreitung der Zugfestigkeit wird diese dann reduziert.

5.3.1 Einfluss der Zugfestigkeit auf das Bruchverhalten

Bevor das Nachbruchverhalten des Plattenversuchs untersucht wird, kann eine Parameterstudie bezüglich der Zugfestigkeit des Beton und dessen maximal ermittelter Reaktionskraft erstellt werden. Es wird davon ausgegangen, dass die maximale Reaktionskraft kurz vor dem Auftreten der Rissbildung zu beobachten ist. Aus den Ergebnissen in Abbildung 5.10 lässt sich ein linearer Zusammenhang (mit einem Faktor von ca. $98 \frac{1}{\text{mm}^2}$) von Zugfestigkeit und Reaktionskraft ermitteln. Folglich könnte die Bestimmung der Zugfestigkeit aus dem Plattenversuch möglich sein.

Eine Verifizierung dieser Annahme kann aber nur in einer umfassenden Versuchsserie erfolgen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgen konnte.

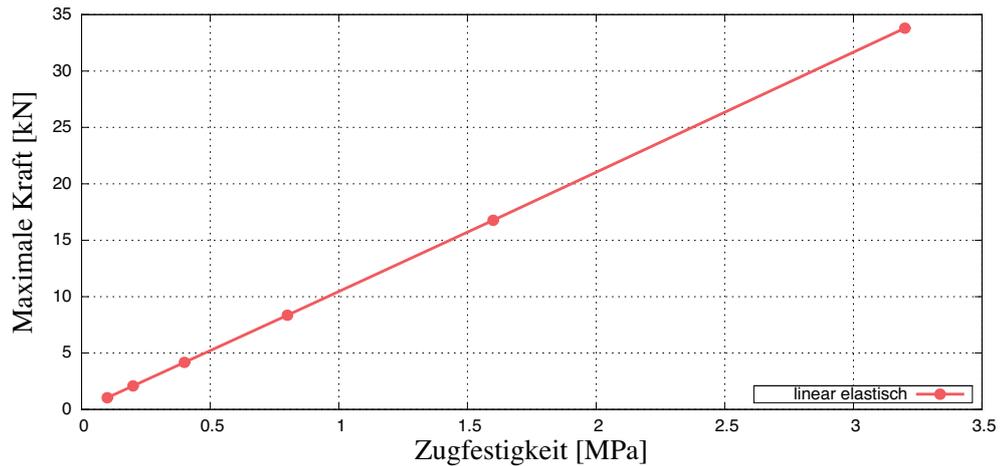


Abbildung 5.10: Abhängigkeit der maximalen Reaktionskraft von der Zugfestigkeit des Prüfkörpers

5.3.2 Nachbruchverhalten mit Tension Cut-Off (TCO)

Die ermittelte Energieabsorption aus dem Plattenversuch ist zum großen Teil abhängig von dem Verhalten des Betonkörpers, nachdem die Risse entstanden sind. Für eine erste Annäherung zu einer gültigen Simulation werden Materialparameter aus der Tabelle 5.3 verwendet. Der Zugfestigkeitsverlauf nimmt nach dem Erreichen des maximalen Wertes von 2 MPa rapide ab und bleibt dann konstant bei 0,1 MPa Restzugfestigkeit. Um Konvergenzprobleme zu vermeiden, wird ein bilinearer Verlauf gewählt, der als Ausgangspunkt für das allgemeine Verständnis der Simulation hilfreich sein kann.

| Dehnung ε [1] | Zugfestigkeit f_t [MPa] |
|---------------------------|---------------------------|
| 0 | 2 |
| 0,0002 | 0,1 |
| 1 | 0,1 |

Tabelle 5.3: Tension Cut Off Parameter

Mit der Definition einer progressiven Zugentfestung kann im Prüfkörper, im Gegensatz zu den bereits in Abschnitt 5.2.2 beschriebenen Modellen, ein Versagen mit Rissbildung entstehen.

Das Risswachstum wurde im Labor meist abrupt beobachtet, begleitet von ebenfalls abrupten Wechseln in der Reaktionskraft. Dieses Verhalten stellt für ein numerisches Modell eine große Herausforderung dar. Durch die abrupte Änderung des mechanischen Systems, wie sie z.B. durch die starke Reduzierung der Festigkeit in einem Teil des Körpers auftritt, kann eine implizite Lösung, wie in der Finite Elemente Methode verwendet, nicht ohne weitere Eingriffe in das Modell gelöst werden. Hierbei handelt es sich um ein Stabilitätsproblem, das nur unter bestimmten Umständen konvergiert.

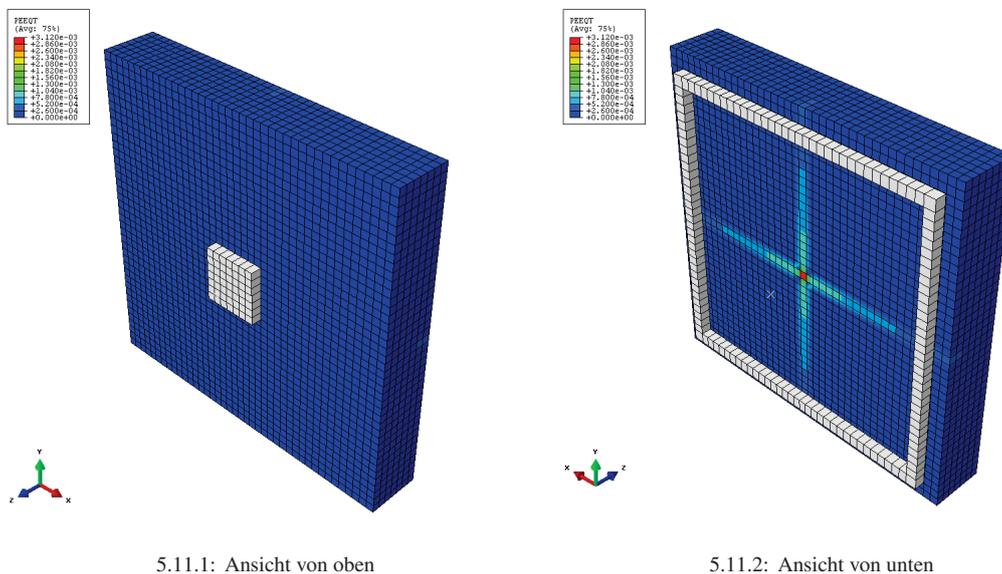
Beim Durchführen der Simulation mit den in Tabelle 5.3 angeführten Werten bricht das Programm die Berechnung ab. Sobald ein Element im Prüfkörper versagt, wird das notwendige Inkrement zum Ermitteln des neuen Zustandes kleiner als der Minimalwert, und eine weitere Simulation nicht mehr möglich.

Um das Problem zu entschärfen und das System zu stabilisieren, wird die Funktion `Stabilize`, deren Wirkungsweise in Abschnitt 3.2.3 beschrieben wurde, verwendet. Da die Funktion sich gravierend auf das Verhalten des simulierten Systems auswirkt, wurde die Simulation in zwei Schritte unterteilt. Im ersten

Schritt wird das elastische Verhalten simuliert bis zum Einsetzen des ersten Versagens. Erst beim zweiten Schritt wird die *Stabilize* Funktion mit einem Dämpfungsfaktor von $2 \cdot 10^{-4}$ verwendet. Dieser Wert wurde in einer ausgiebigen Versuchsreihe als Minimum, bei dem die Simulation zuverlässig konvergiert, ermittelt.

Es ist zu vermerken, dass die Simulation, beim Entstehen des Risses, auf die Berechnung von sehr kleinen Inkrementen übergeht und deswegen die Rechenzeit zu einem wichtigen Faktor in dieser Untersuchung wird. Zur Simulation der in Abbildung 5.12 dargestellten Ergebnisse wurden bis zum Erreichen der als Abbruchbedingung formulierten maximalen Anzahl von 10000 Inkrementen, ca. 71 Stunden Rechenzeit mit der zur Verfügung gestellten Workstation⁸, benötigt.

Abbildung 5.11 zeigt die Bruchform der Betonplatte anhand der plastischen Dehnungen, die mit den oben genannten Parametern entsteht. Wie erwartet, bilden sich Risse im Prüfkörper aus, die diesen in vier symmetrische Teile bricht. Der Riss entwickelt sich, wie aus den "elastischen" Überlegungen (Abschnitt 5.2.1) schon zu vermuten war, aus der Mitte der Unterseite des Prüfkörpers heraus und pflanzt sich in die Mitte der Lagerung fort.



5.11.1: Ansicht von oben

5.11.2: Ansicht von unten

Abbildung 5.11: Plastische Dehnungen auf Zug

Der Einfluss der *Stabilize* Funktion auf das Gesamtverhalten lässt sich anhand der in Abbildung 5.12 dargestellten Verschiebungskurven erkennen. Dargestellt sind die Reaktionskräfte, die entweder am Stempel- oder am Rahmenreferenzpunkt aufgezeichnet werden. Durch die Einführung der stabilisierend wirkenden viskosen Kräfte ist das System nicht im Gleichgewicht und es entsteht eine Differenz zwischen den eingeleiteten und abgeleiteten Kräften. Dieses ist deutlich beim Aktivieren der Funktion zu sehen. Während die Reaktionskraft am Stempel stark ansteigt, bleibt die dazugehörige Kraft aus dem Rahmen auf gleichem Niveau.

Dieses Verhalten ist relativ problematisch für die genaue Untersuchung der Rissentstehung und der damit verbundenen Energieabsorptionskapazität, da Energie aus dem System rechnerisch herausgenommen wird. Um diesen Eingriff in das System quantifizieren zu können, wird die durch die *Stabilize* Funktion erbrachte Energie der Gesamtverformungsenergie des Systems gegenübergestellt. Dieses Dämpfungsverhältnis, dargestellt in Abbildung 5.12, kann zur besseren Interpretation der Simulation herangezogen werden.

⁸Intel®Core™i7-2600 CPU @ 3.40GHz, 16 GB RAM, 1TB HDD, Windows 7 Professional 64 Bit

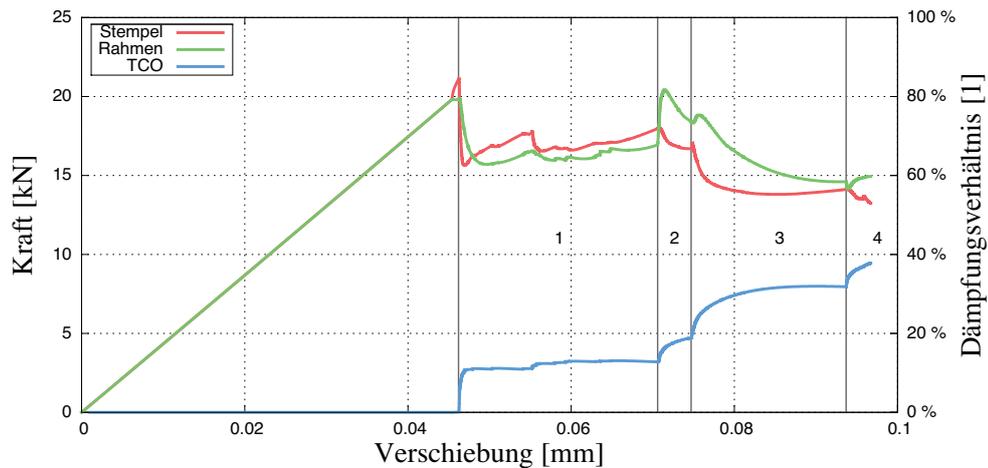


Abbildung 5.12: Einfluss der *Stabilize* Funktion auf die Verschiebungskurve

Zusätzlich liefert der Dämpfungsverhältnisverlauf Hinweise auf den Verlauf des Bruchvorgangs. Durch den stufenförmigen Verlauf des Dämpfungsverhältnisses, aufgezeichnet auf der Verschiebungsachse, kann der Bruchvorgang in einzelne Schritte unterteilt werden, wobei jeder Schritt aus zwei Phasen, die unterschiedlich stark ausgeprägt sein können, besteht. In der ersten Phase steigt das Dämpfungsverhältnis, um dann in der zweiten Phase auf etwa gleichem Niveau zu stagnieren. Daraus ergeben sich folgende Schritte, die gut mit der Rissentstehung korrelieren:

1. Primärriss
2. Lagerungsris
3. Teilung
4. Tiefenriss

Der Primärriss hat sehr stark ausgeprägte Phasen, die eine gute Interpretation zulassen. Ein steiler Anstieg der Dämpfungsenergie auf ca. 10% wird durch die Rissinitiierung in der Betonplatte verursacht. Dabei versagt das Element auf der Unterseite, in der Mitte des Prüfkörpers, und ein kreuzförmiger Riss breitet sich schlagartig, wie in Abbildung 5.13.1 zu sehen ist, aus. Der größte Anstieg des Dämpfungsverhältnisses ist mit dem Entstehen des Risses direkt unter dem Stempel in Verbindung zu bringen. Die Risstiefe beträgt dabei eins von sieben Elementen. Nach der Initiierung breitet sich der Riss in einer zweiten Phase aus, ohne das Dämpfungsverhältnis signifikant zu beeinflussen. Am Ende des Primärrisses hat dieser die in Abbildung 5.13.2 dargestellten Größe und Tiefe von vier Elementen, wobei nur zwei Elemente an der Rissentstehungsfront das Bruchkriterium überschreiten, erreicht.

Der zweite Schritt lässt sich als Lagerungsris bezeichnen, der relativ kurz ist und dessen Phasen ineinander übergehen. Während der Riss sich zu den Auflagern ausbildet, steigt das Dämpfungsverhältnis auf etwa 19% an. Die Risstiefe bleibt in diesem Schritt unverändert (Abbildung 5.13.3).

Nach Erreichen der Auflager, bzw. des Rahmens, beginnt die Teilung des Prüfkörpers. Dabei reißt die Platte auf der Unterseite vollständig durch. Das Dämpfungs- zu Gesamtenergie-Verhältnis steigt dabei auf bis zu 30% an.

Das erneute Ansteigen der Kurve lässt einen weiteren Schritt vermuten, mit dem die Vertiefung des Risses

einhergeht. Da die Simulation aber vorher abbricht, ist nur der Anfang dieses Schrittes zu sehen. Vorausgreifend auf Abschnitt 5.4.1 lässt sich in diesem letzten Schritt eine Vertiefung des Risses über die vollständige Länge auf fünf von sieben Elementen beobachten.

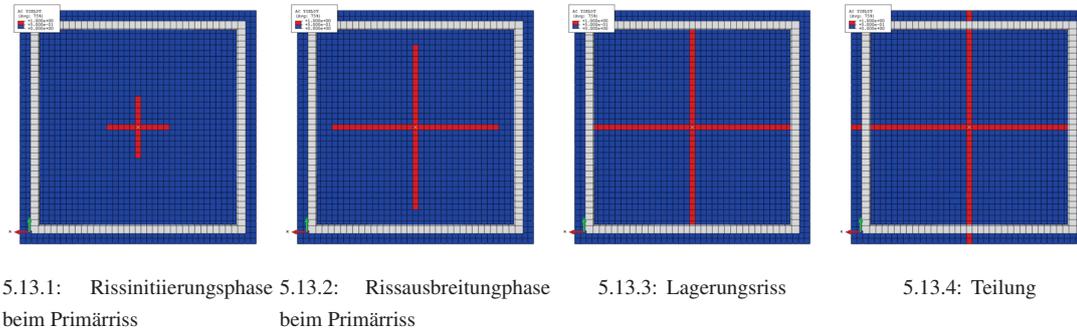


Abbildung 5.13: Rissentstehungsabfolge

Bei der Interpretation der Simulationsergebnisse darf ein wichtiger Punkt nicht vernachlässigt werden. Die von der `Stabilize` Funktion erbrachte Dämpfungsenergie befindet sich auf einem sehr hohen Niveau. Ein tolerierbarer Wert von ca. 5% beim Dämpfungsverhältnis wird um ein Vielfaches überschritten. Deswegen sollten die Ergebnisse aus diesem numerischen Modell nur mit größter Vorsicht und unter Berücksichtigung der damit verbundenen Unsicherheit verwendet werden.

5.4 Nachbruchverhalten mit *Concrete Damage Plasticity (CDP)*

In diesem Abschnitt wird die numerische Simulation mit dem CDP Materialmodell, das in Abschnitt 5.4 beschrieben ist, erweitert. Zum Zweck der Vergleichbarkeit mit den vorangegangenen Versuchen werden die Materialparameter möglichst ähnlich jenen der Mohr-Coulomb/Tension-Cut-Off (Abschnitt 5.3.2) gewählt. Für die restlichen Eingabewerte werden die üblichen Parameter für Spritzbeton verwendet.

Die Materialparameter für das CDP Modell bestehen aus den Allgemeinen Parametern (5.4), die das Bruchkriterium und die Fließfläche definieren, und aus dem Zug- und Druckentfestungsverlauf (5.5 und Anhang B.1), der mit Damageparameter erweitert ist.

Die Damageparameter im Zugbereich sind bis zu einem Maximalwert von 0,5 definiert. Dieser Wert wurde gewählt, um die Konvergenz der numerischen Simulation zu vereinfachen. Da es sich hier bei diesem Versuchsaufbau um eine hauptsächlich monotone Zugbelastung handelt, kann diese Vereinfachung getroffen werden. Diese Annahme wird durch den Vergleich bestätigt, der im Anhang A.2 mittels Verschiebungskurven dargestellt ist. Dem gegenübergestellt ist das Modellverhalten mit maximalen Damageparameter 0,5 und den erweiterten Damageparametern auf Zug, bei denen der Maximalwert 0,99 definiert wurde (Tabelle im Anhang B.2).

| Dilatationswinkel ψ [°] | Exzentrizität $\epsilon\sigma_{t0}$ [1] | σ_{b0}/σ_{c0} [1] | K_c [1] |
|------------------------------|---|-------------------------------|-----------|
| 11,5 | 0.1 | 1.16 | 0.6666667 |

Tabelle 5.4: Allgemeine Concrete-Damage-Plasticity-Parameter

| Dehnung ε [1] | Zugfestigkeit f_t [MPa] | Damage Parameter d_t [1] |
|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 0 | 2 | 0 |
| 0,0002 | 0,1 | 0,5 |
| 1 | 0,1 | 0,6 |

Tabelle 5.5: Entfestungsverlauf auf Zug Concrete Damage Plasticity

5.4.1 Vollmodell

Ausgehend von dem in Abschnitt 5.3.2 beschriebenen Modell wird die Simulation auf das CDP Materialmodell abgeändert. Die beiden Simulationen sind identisch und ändern sich nur in der Definition des Materialverhaltens.

Während die Tension Cut Off (TCO) Simulation bereits bei 0,096 mm Verschiebung nach 10.000 Inkrementen die Berechnung abbricht, kann bei gleicher Step Anzahl mit dem CDP Materialmodell eine Verschiebung von 1,93 mm berechnet werden. Das ist ein Hinweis auf eine gestiegene Stabilität des Modells, wodurch größere Inkremente möglich sind. Dieser Aspekt wird später in diesem Abschnitt erörtert.

Im Anhang A.1 ist der Verlauf der vollständigen Deformationskurve abgebildet. Resultierend aus der gravierenden Einflussnahme der `Stabilize` Funktion auf das Gesamtsystem während der Rissentstehung, ist eine Analyse des vollständigen Datensatzes nicht zweckmäßig. Dadurch wird die Untersuchung auf den ersten Bereich bis zu einer Verschiebung von 0,14 mm beschränkt.

Abbildung 5.14 zeigt die Verschiebungskurven und das Dämpfungsverhältnis der Simulationen mit CDP- und TCO- Materialmodell im Rissentstehungsbereich. Diese Kurve wird in diesem Abschnitt als Referenzkurve herangezogen, mit der die nachfolgenden Ergebnisse verglichen werden.

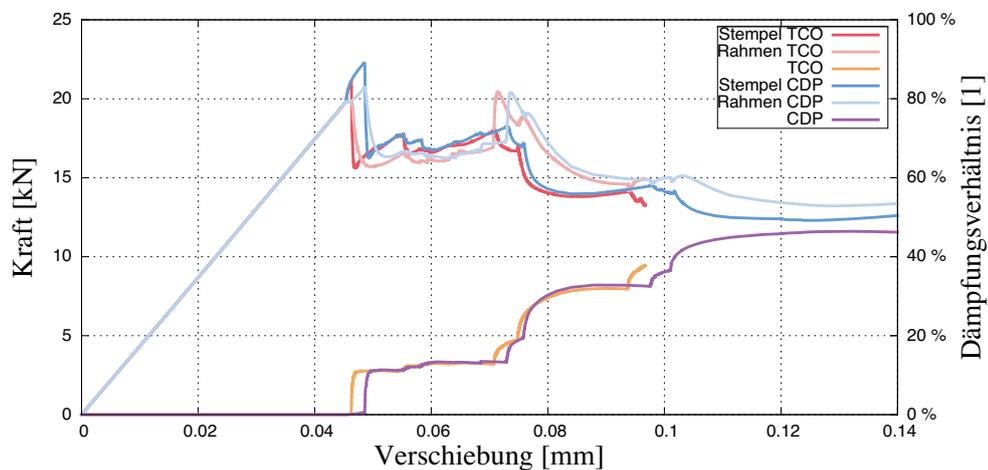


Abbildung 5.14: Verschiebungsdiagramm CDP und TCO

Im Allgemeinen sind die Ergebnisse, angesichts der sehr verschiedenen Materialmodellformulierungen, sehr ähnlich. Die Rissentstehung kann, wie bereits in Abschnitt 5.3.2 beschrieben, in vier Stufen eingeteilt werden. Die letzte Stufe, der Tiefenriss, ist in dieser Simulation auch vollständig zu beobachten. Dieser letzte Schritt kann in zwei weitere Schritte unterteilt werden. Der Riss vertieft sich im zweiten Schritt aus der Mitte heraus. Da aber dieser zusätzliche Schritt sehr klein ist und wahrscheinlich stark von der gewählten Netzgröße abhängt, wird er nicht explizit herausgenommen und in den Schritt Tiefenriss integriert.

Vergleicht man die Bruchbilder der CDP (Abbildung 5.20) mit der TCO Simulation, kann ein kleiner Unterschied festgestellt werden. Bei der CDP Simulation wird das mittlere untere Element nicht beschädigt, dafür aber die anliegenden Elemente. Hier wirkt sich der Unterschied in der Definition der Bruchbedingung aus, der bei den Betrachtungen der umhüllenden Kurven im deviatorischen Spannungsraum, in Abbildung 3.4 und 3.6, ersichtlich wird. Das Verhältnis von zweiachsialer zur einachsialen Zugbeanspruchung ist ausschlaggebend für diesen Effekt.

Eine deutliche Abweichung zeigt sich auch beim Übergang vom elastischen zum plastischen Verhalten. Der charakteristische Anstieg der Reaktionskraft am Stempel beim Aktivieren der `Stabilize` Funktion ist deutlich stärker ausgeprägt als beim TCO Versuchsaufbau. Ein Versuch mit einer späteren Aktivierung der stabilisierenden Funktion verdeutlicht den Einfluss dieser auf das Gesamtsystem.

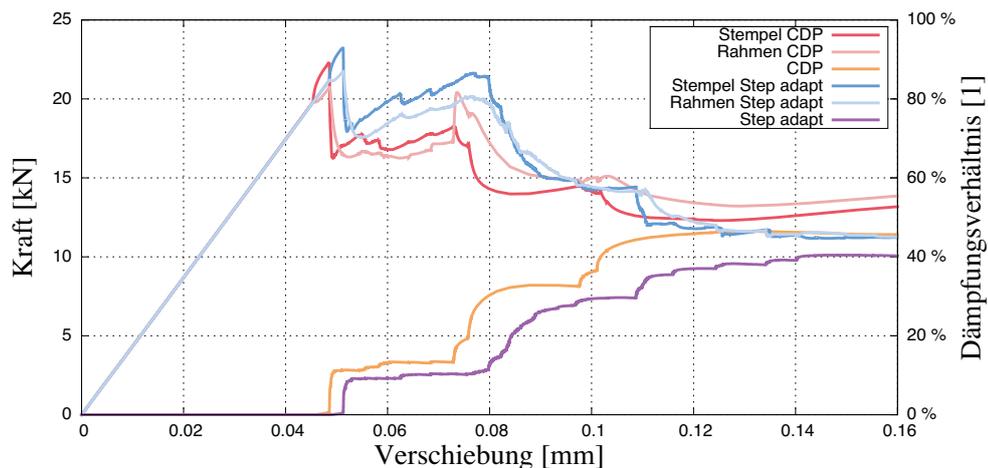


Abbildung 5.15: Adaptierte Stepweite

Der erste Step, ohne `Stabilize` Funktion, wird verlängert, um dort zu enden, wo bei der vorherigen Simulation die Reaktionskraft des Stempels abfällt. Dabei zeigt sich, dass das CDP Modell eine höhere maximale Reaktionskraft aufnehmen kann als das TCO Modell.

Der weitere Verlauf der Verschiebungskurve weicht stark von der Referenzkurve ab, da ein anderes Bruchbild als in Abbildung 5.20.2 entsteht. Durch die andere Rissverteilung wird das System geändert, das folglich anders auf die Verformung reagiert. Aus dem Dämpfungsverhältnis lassen sich keine gut definierten Stufen herauslesen, die eine einfache interpretierbare Rissentwicklung zulassen würden.

An diesem Beispiel wird deutlich, dass es sich hier um ein Stabilitätsproblem handelt. Geometrische oder Materialimperfectionen können im numerischen Modell ausgeschlossen werden. Die Imperfectionen im Laborversuch können eine einseitige lokale Überbeanspruchung auslösen und so zu einer asymmetrischen Rissbildung führen. Der numerische Versuchsaufbau hat zwei Symmetrieebenen, die theoretisch, abgeleitet von der Vollkommenheit der Geometrie und des Materials, im gesamten Versuchsverlauf erhalten bleiben sollten. Imperfectionen, oder Rundungsfehler, können in der rechnerischen Ausführung der Ursprung für die Auslenkung des instabilen Systems aus der Symmetrie (Gleichgewicht) sein. Inwieweit sich die `Stabilize` Funktion auf die Stabilität auswirkt, zeigt das nächste Beispiel.

Der Dämpfungsfaktor wird von $2 \cdot 10^{-4}$ auf $1 \cdot 10^{-4}$ vermindert, wobei der Versuchsaufbau ansonsten gleich dem Referenzbeispiel ist, welches am Anfang dieses Abschnittes beschrieben wurde. Durch die Reduzierung der stabilisierenden Kraft kann das Dämpfungsverhältnis deutlich reduziert werden. Aus dem Verschiebungsdiagramm 5.16 lässt sich aber ein anderer Bruchvorgang vermuten. Diese Vermutung wird beim Vergleichen des Bruchbildes 5.20.3 bestätigt. Durch den geringeren Einfluss der stabilisierenden Kräfte

te wird das System leichter aus dem Gleichgewicht gebracht und ist anfälliger für numerische Imperfektionen. So ist der relative frühe Abbruch der Simulation, der bereits bei einer Verschiebung von 0,1227 mm eintritt, auf mangelnde Konvergenz zurückzuführen.

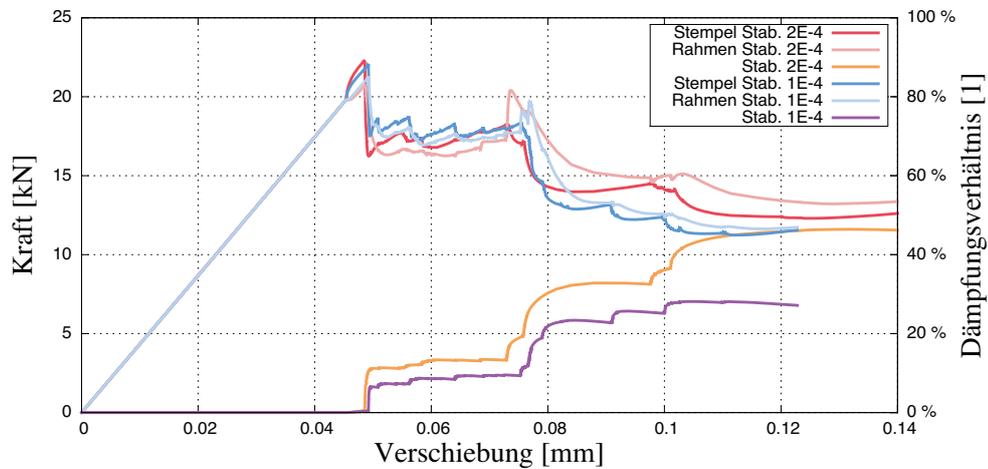


Abbildung 5.16: Adaptierte Stabilize Funktion

Beim letzten Beispiel wird auf die Netzgeometrie und die Kontaktformulierung eingegangen. Eine Optimierung der Kontakte zwischen Rahmen und Prüfkörper kann mit der zusätzlichen Partitionierung des Prüfkörpers an den erweiterten Flächen der Rahmeninnenflächen erreicht werden (Abbildung 5.17.1 und 5.17.2). Dadurch wird das Netz des Prüfkörpers an das des Rahmens angepasst, sodass die Knoten am inneren Rand des Rahmens mit den Netzknoten des Prüfkörpers übereinstimmen (Abbildung 5.17.3 und 5.17.4). Durch diese Maßnahme soll eine Verbesserung der Kraftübertragung erreicht werden.

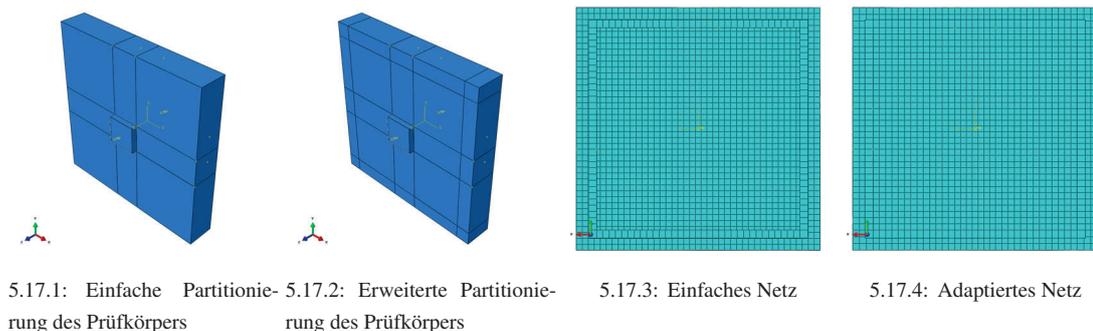


Abbildung 5.17: Netzadaptierung

Die gewählte SURFACE TO SURFACE⁹ Kontaktformulierung mittelt die zu übertragenden Kräfte über einen Bereich um die Slave Knoten und vermeidet so Spannungsspitzen, welche lokal auftreten können, und zu einer Destabilisierung des Systems beitragen können. Eine Netzoptimierung ist aus diesem Grund nicht unbedingt notwendig, kann aber numerische Vorteile bieten, da die Mittelung der Kontaktkräfte über den Einflussbereich auf ein Minimum reduziert wird.

Die Auswertung der Verschiebungskurve 5.18 zeigt zwei deutliche Unterschiede, die sich aus der Änderung

⁹Weitere Informationen zu den Kontaktformulierungen können in DSS Simulia (2010b) nachgeschlagen werden

des Netzes ergeben.

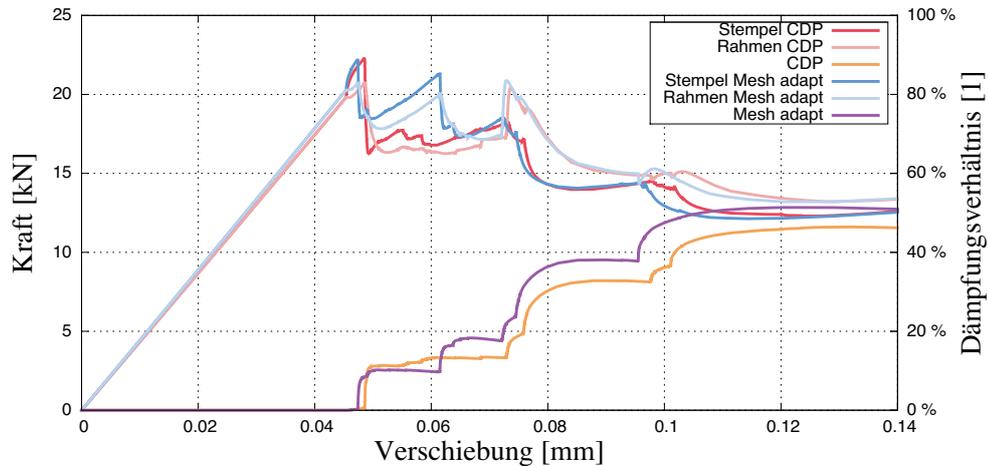


Abbildung 5.18: Verschiebungskurve mit adaptiertem Netz

Ein unerwartetes Ergebnis ist das Ansteigen der Steifigkeit der Platte im elastischen Bereich. Während die Steifigkeit der vorherigen Versuche bei 433 [N/mm] lag, ist sie in diesem Versuch auf 443 [N/mm] angestiegen. Durch die optimierte Netzauslegung entstehen weniger Überschneidungen in den Kontaktflächen, die in einem weicheren Verhalten resultieren.

Der zweite Unterschied ist ein zusätzlicher Peak im ersten Schritt, der von einem zusätzlichen Anwachsen des Dämpfungsverhältnisses begleitet wird. Dieses Verhalten kann anhand der Rissentstehung gedeutet werden. Die Rissinitiation erfolgt hier, im Gegensatz zu allen bisher beschriebenen Versuchen, nur in eine Richtung. Der Riss entsteht, wie in Abbildung 5.19 zu sehen, von der Mitte aus nach links und nach rechts. Erst ab einer Verschiebung von mehr als 0,06 mm entsteht der zweite Ast der kreuzförmigen Rissform, mit einem gleichzeitigen Anstieg der Reaktionskraft und des Dämpfungsverhältnisses.

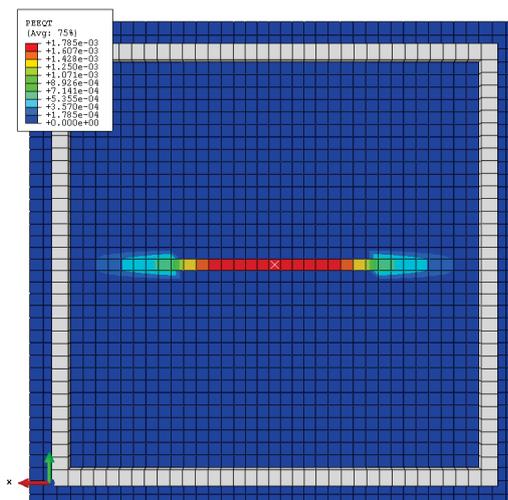
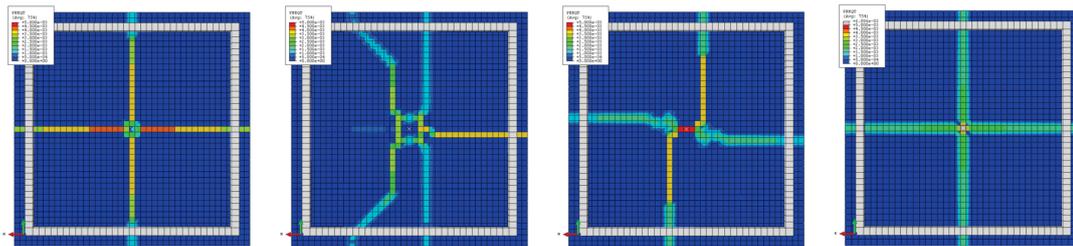


Abbildung 5.19: Rissausbreitung mit adaptiertem Netz bei 0,06 mm

Ein Vergleich der Bruchbilder der letzten vier beschriebenen Versuche zeigt, wie unterschiedlich die Simulationen verlaufen können. In Abbildung 5.20 sind die plastischen Dehnungen an der Prüfkörperunterseite

bei einer Stempelverschiebung von 0,12 mm eingezeichnet. Es wird angenommen, dass der Bruch bis zu dieser Verschiebung vollständig ausgebildet ist. Das Bruchbild 5.20.1 ist kreuzförmig ausgeprägt, wobei das mittlere untere Element nicht plastifiziert. Im Gegensatz dazu weichen die Bruchbilder 5.20.2 und 5.20.3 stark von der Kreuzbruchform ab. Das letzte Bruchbild (5.20.4) ist zwar kreuzförmig ausgebildet, unterscheidet sich aber in seiner Entstehung.

Deutlich zeigt sich hier der Unterschied zwischen den einzelnen Simulationen und zeigt ein instabiles Verhalten, das sehr stark von den Randbedingungen als auch der numerischen Gestaltung des Modells abhängt. Kleine numerische Unterschiede wirken sich stark auf das Resultat aus, das als Verzweigungs- oder Stabilitätsproblem bezeichnet werden kann.



5.20.1: CDP Modell

5.20.2: CDP Modell mit adaptiver Schrittweite

5.20.3: CDP Modell mit reduzierter Stabilize Funktion

5.20.4: CDP Modell mit adaptivem Netz

Abbildung 5.20: Verschiedene Rissausbildungsformen bei 0,12 mm Verschiebung

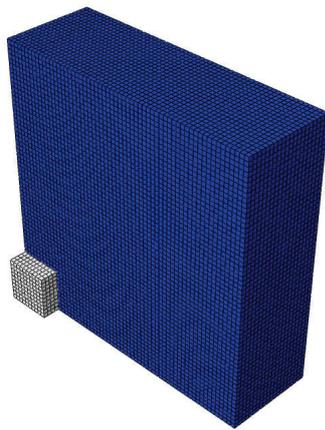
5.4.2 Viertelmodell

Die Simulationen in Abschnitt 5.4.1 sind sehr rechenintensiv und weisen eine relativ grobe Diskretisierung des Versuchsaufbaus auf. Um die Netzweite für eine bessere Auflösung des Systems zu verkleinern, ist es notwendig, die Symmetrieebenen des Modells zu nutzen und ein Viertelmodell zu betrachten. Die daraus resultierende geringere Systemgröße reduziert den Rechenaufwand und ermöglicht dadurch eine einfachere Handhabung und ein feineres Netz.

Die Ausnutzung der Symmetrieebenen impliziert aber auch eine Einschränkung der Freiheitsgrade bezüglich der Bruchform des Prüfkörpers. So können die Bruchformen, wie sie in den Abbildungen 5.20.2, 5.20.3 oder auch 5.19 zu sehen sind, nicht auftreten. Hier wird festgelegt, dass der Bruch der Platte immer symmetrischer Natur ist, was bei den Laborversuchen als auch bei den numerischen Berechnungen nicht immer der Fall ist.

Der Modellaufbau besteht aus einem Viertelmodell, wobei die Symmetrie gleichermaßen auf den Prüfkörper, den Stempel und den Rahmen angewandt wird. Die Symmetrieebenen werden in ABAQUS mit Hilfe der entsprechenden Randbedingungen $YSYMM$ ($U_2=UR_1=UR_3=0$) und $XSYMM$ ($U_1=UR_2=UR_3=0$) definiert. Wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben, werden Elemente des Typus $C3D8R$ verwendet, und der Rahmen und Stempel durch Referenzpunkte als starre Körper definiert. Die Netzweite wird mit 5 mm festgelegt.

In Abbildung 5.21 ist das vernetzte Modell dargestellt. Da das Netz relativ fein ist, ergeben sich Kontaktflächen mit einer Netzpunkt-auf-Netzpunkt-Konfiguration.



5.21.1: Netzansicht von oben



5.21.2: Netzansicht von unten

Abbildung 5.21: Versuchsaufbau im Viertelmodell mit 5mm Netz

Im Vergleich zum Vollmodell wurde das Volumen des Prüfkörpers um ein Viertel reduziert. Gleichzeitig wurde aber die Netzfeinheit von 15 mm auf 5 mm angehoben. Daraus ergibt sich eine um den Faktor 2,25 gestiegene Elementenzahl und ein entsprechend gesteigener Rechenaufwand. Die folgende Simulation benötigt bei der Berechnung von 12900 Inkrementen ca. 14 Tage auf der in Abschnitt 5.3.2 erwähnten Workstation.

Um die Ergebnisse des Viertelmodells mit dem Vollmodell vergleichen zu können, wurden die Reaktionskräfte mit dem Faktor 4 multipliziert.

Bei der Analyse der Verschiebungskurve zeigen sich deutliche Unterschiede im Vergleich zur Simulation im Vollmodell mit adaptiertem Netz (Abbildung 5.22). Bereits im elastischen Bereich ist eine Änderung der Steifigkeit von 443 [N/mm] auf 470 [N/mm] ersichtlich. Dies könnte die Folge aus dem dichteren Netz und der daraus resultierenden dichteren Kontaktberechnung zwischen Prüfkörper und Rahmen sein.

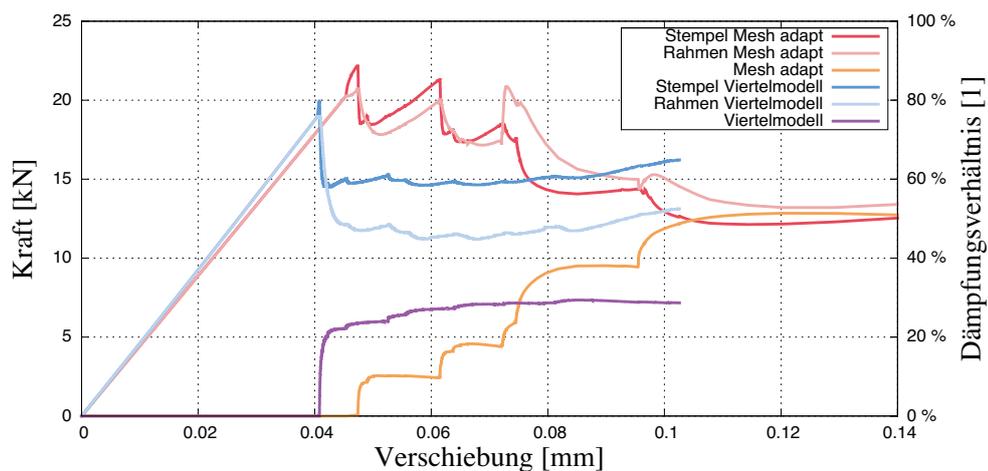
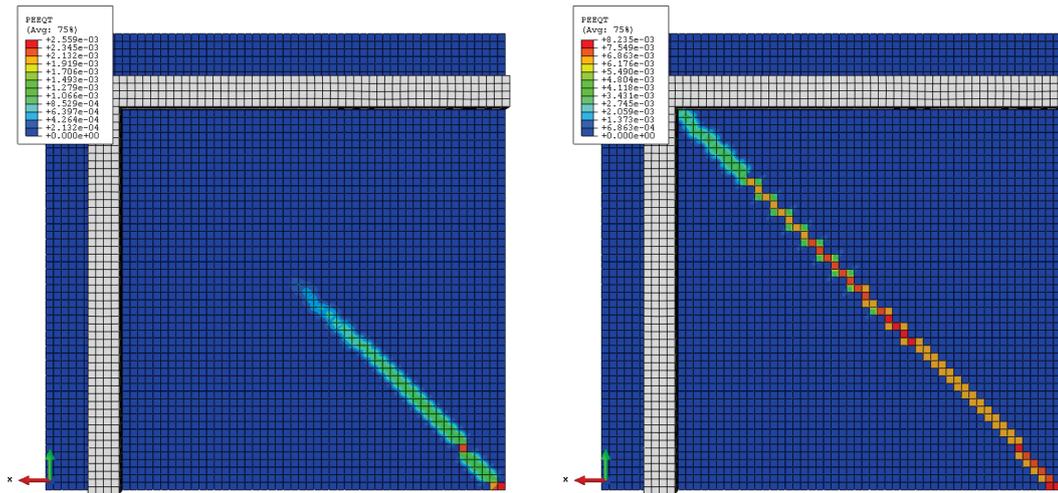


Abbildung 5.22: Verschiebungskurve aus dem Viertelmodellaufbau

Durch die feinere Diskretisierung des Modells zeigt sich ein deutlich früheres Versagen des Prüfkörpers.

Auffällig ist der Anstieg des Dämpfungsverhältnisses in einem einzelnen Schritt auf über 20 % und der konstante Unterschied zwischen den Reaktionskräften aus Stempel und Rahmen. Das Rissbild in Abbildung 5.23 zeigt den Grund für diese Unterschiede. In dieser Simulation bildet sich der Riss diagonal von der Mitte des Prüfkörpers in Richtung der Ecken aus.

Der starke Anstieg des Dämpfungsverhältnisses deutet auf ein schlagartiges Aufbrechen des Prüfkörpers hin. Bereits bei einer Verschiebung von 0,0457 mm ist der Riss über die Hälfte des Prüfkörpers ausgebildet (Abbildung 5.23.1). Erst im späteren Verlauf erfolgt eine langsame Erweiterung und Vertiefung des Bruchs (Abbildung 5.23.2).



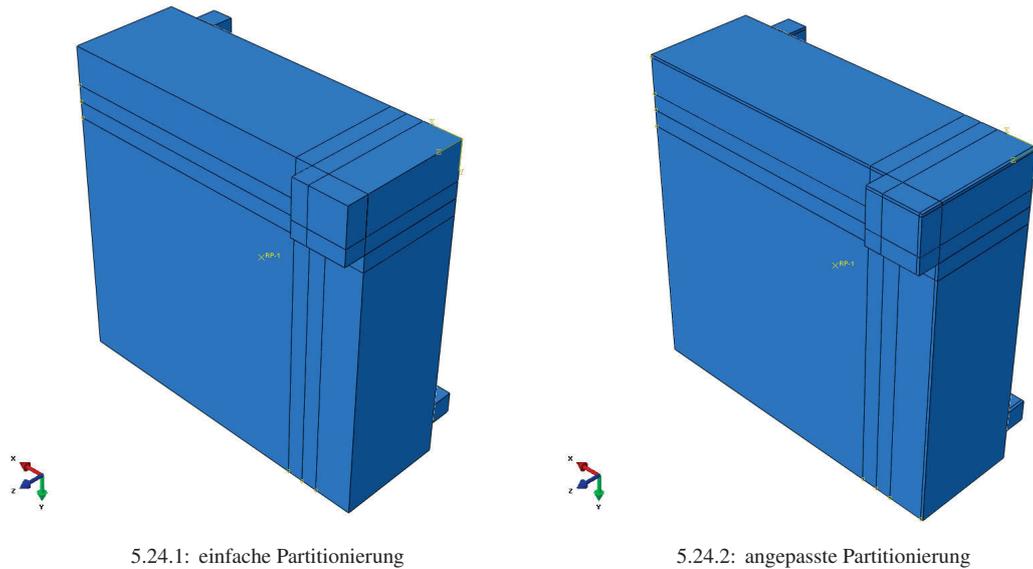
5.23.1: Rissbild bei 0,0457 mm Verschiebung

5.23.2: Rissbild bei 0,102 mm Verschiebung

Abbildung 5.23: Rissbildentstehung im Viertelmodell

Die Ursache für das deutlich abweichende Bruchbild ist in der Vernetzung des Modells zu finden. Wie schon erwähnt, impliziert das Viertelmodell einen symmetrischen Bruch. Ein kreuzförmiger Bruch entlang der Symmetrieebenen, wie er in den Vollmodell-Versuchen zu beobachten ist, ist im Viertelmodell schwieriger zu erreichen, da die Elemente links und rechts von der Symmetrieebene angeordnet sind. Im Vollmodell wird das Netz so generiert, dass die Elemente genau in der Mitte des Prüfkörpers positioniert sind und so den kreuzförmigen Bruch ermöglichen. Durch die Kombination des erzwungenen Symmetriebruchs und der Netzanordnung wird der kreuzförmige Bruch energetisch im Vergleich zum Diagonalen ungünstiger. Dieser Fall, übertragen auf die Gesamtbetrachtung, würde erfordern, dass die Elemente links und rechts von der Symmetrieebene versagen, was energieintensiver ist als der Diagonalbruch.

In der nächsten Simulation wird als Gegenmaßnahme für diesen numerischen Effekt das Modell parallel zu den Symmetrieebenen im Abstand der halben Netzweite partitioniert. Dadurch entstehen Elemente, die an der Symmetrieebene, also normal dazu, nur die halbe Abmessung aufweisen. Mit dieser Maßnahme wird die benötigte Energie für das kreuzförmigen Versagen ungefähr auf das im Vollmodell beobachtete Niveau gesenkt. Abbildung 5.24.1 zeigt die einfache Partitionierung, während in Abbildung 5.24.2 eine adaptierte Partitionierung vorgenommen wurde.



5.24.1: einfache Partitionierung

5.24.2: angepasste Partitionierung

Abbildung 5.24: Partitionierung des Viertelmodells

Wie aus dem Vergleich der Verschiebungskurven in Abbildung 5.25 zu erkennen ist, unterscheidet sich die Simulation bei der Rissentstehung deutlich von der ohne adaptiertem Netz. Die Reaktionskräfte fallen bei der Rissinitiation leicht ab und steigen wieder an. Die Stempelreaktionskraft erreicht danach einen zweiten Höhepunkt, der ein wenig über dem bisherigen Maximum liegt und fällt wieder ab.

Das Dämpfungsverhältnis steigt in zwei gut definierten Schritten zuerst auf 19% und weiter auf fast 40% an. Diese Anstiege korrelieren gut mit den Abfällen in der Stempelreaktionskraft.

Die Berechnung wird bei einer Verschiebung von 0,0588 mm, beim Erreichen der 10000 Inkrementschranke, abgebrochen. Daraus ergeben sich im Vergleich zur vorherigen Simulation insgesamt kleinere Inkremente. Eine Erklärung dieser Differenzen lässt sich anhand der Entstehung des Bruchbildes ableiten.

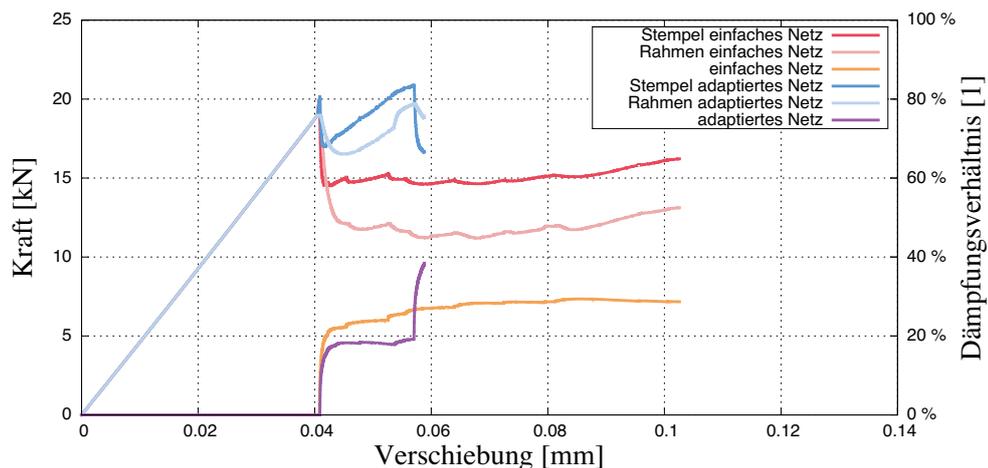
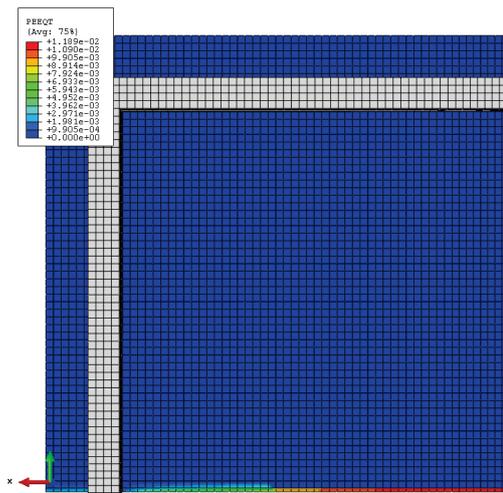


Abbildung 5.25: Verschiebungskurven aus dem Viertelmodell mit unterschiedlicher Netzgestaltung

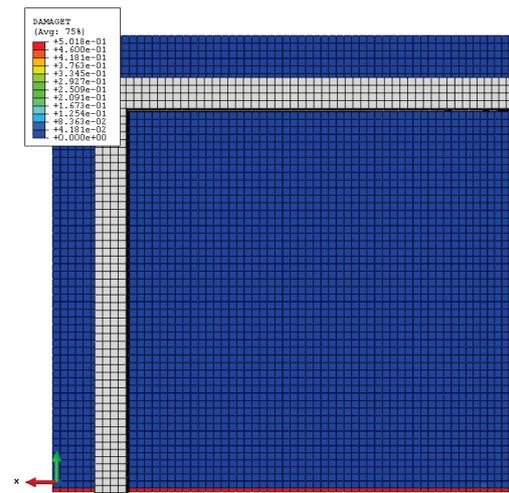
Abbildung 5.26 dokumentiert die Rissentstehung der letzten Simulation. Bild 5.26.1 zeigt die Rissausbreitung anhand der plastischen Dehnung kurz vor dem Anstieg des Dämpfungsverhältnisses auf 20 % bei einer Verschiebung von 0,057 mm. Der Riss entsteht nur an einer der beiden Symmetrieebenen und breitet sich

entlang dieser dann aus. Die Abbildungen 5.26.3 und 5.26.4 stellen den Riss anhand der beschädigten Zonen entlang der Symmetrieebenen dar. Erst danach bildet sich der zweite Riss, entlang der xz-Ebene, aus. Die Abbildungen 5.26.2, 5.26.5 und 5.26.5 zeigen das Rissbild am Ende der Simulation.

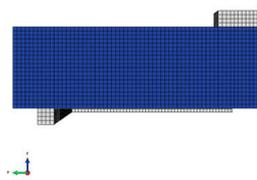
Im Gegensatz zur vorherigen Simulation bildet sich der Riss hier nicht diagonal sondern kreuzförmig, wie in der Vollmodellsimulation mit adaptierem Netz (siehe Bild 5.19), in zwei Schritten aus. Durch die Einführung der Elemente entlang der Symmetrieebenen, mit halb so großer Ausdehnung normal zu diesen, wird das System gezielt geschwächt. Der Riss wird dadurch bereits bei der Erstellung des Modells definiert. Dieser Eingriff kann als gezielte Schwächung oder als adäquate Maßnahme zur Minimierung der Effekte aus der Symmetrieeinspannung gewertet werden.



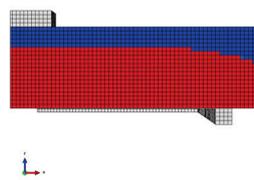
5.26.1: Rissbild bei 0,057 mm Verschiebung



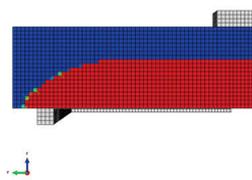
5.26.2: Rissbild bei 0,0588 mm Verschiebung



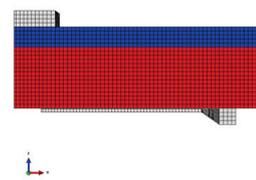
5.26.3: Rissbeginn yz-Ebene



5.26.4: Rissbeginn xz-Ebene



5.26.5: Rissende yz-Ebene



5.26.6: Rissende xz-Ebene

Abbildung 5.26: Rissbildentstehung im Viertelmodell mit adaptiertem Netz

Der kreuzförmige Riss ist in dieser Simulation energetisch günstiger als der Diagonalmriss. Dieses Resultat entsteht erst durch die Adaptierung des Netzes. Der diagonale Riss dürfte energetisch ungünstiger sein, wobei eine quantitative Aussage unter dem starken Einfluss der *Stabilize* Funktion schwer möglich ist. Die Viertelmodellsimulation ermöglicht eine kleinere Modellgröße. Dadurch kann das Netz verfeinert und der Bruchvorgang besser simuliert werden. Die daraus resultierenden Nachteile, wie die erzwungene Symmetrie des Bruches und die Einspannung entlang der Symmetrieebenen, beschränken jedoch die Ergebnisse in ihrer Aussagekraft.

6 Schlussfolgerung

Durch die Analyse des Plattenversuches mit dem FEM Programm ABAQUS konnten einige Einblicke in den Versuchsaufbau gewonnen und mit den Laborversuchen verifiziert werden.

- Sowohl die numerischen Untersuchungen als auch die Laborversuche zeigen, dass die Kraftübertragung des Stempels in den Prüfkörper nur an den vier Ecken erfolgt.
- Die Lagerungsbedingungen konnten unter idealen Umständen klar definiert werden. Der jeweils mittig auf den vier Innenseiten des quadratischen Rahmens aufliegende Prüfkörper kann durch relativ kleine Unebenheiten aus der vollständigen Lagerung gebracht werden. Folglich ist eine Lagerung, wie sie von Pittino u. Wilczek (2011) (Abbildung 5.4) vorgeschlagen wurde, für reproduzierbarere Versuchsergebnisse zielführend.
- Numerisch konnte ein linearer Zusammenhang zwischen der maximalen Reaktionskraft und der Zugfestigkeit des Prüflings gezeigt werden.

Folgende Schlussfolgerungen können in Bezug auf die numerischen Simulationen gezogen werden:

- Durch die hohe Rechenintensivität der Simulation konnte nur der elastische Bereich und teilweise die Bruchentstehung berechnet werden. Für die Analyse des vollständigen Versuchsablaufs ist eine leistungsstarke Workstation notwendig.
- Eine Simulation mit der Finite Elemente Methode konnte nur unter Einsatz der `Stabilize` Funktion erfolgen. Das zur Evaluation der Ergebnisse eingeführte Dämpfungsverhältnis zeigt unterschiedliche Schritte im Bruchentstehen. Bei einem kreuzförmigen Bruch konnten vier Schritte bestimmt werden: Primärriss, Lagerungsriss, Teilung und Tiefenriss.
- Der Einfluss der `Stabilize` Funktion auf das Gesamtsystem kann anhand des Dämpfungsverhältnisses abgelesen werden. Die berechneten Werte von über 20 % sind signifikant und dürfen nicht vernachlässigt werden.
- Beim Versuchsaufbau handelt es sich um ein Stabilitätsproblem. In den verschiedenen Simulationen wurden, je nach Art der Modellierung, unterschiedliche Bruchbilder berechnet. Bereits kleinste Unterschiede in der Modellierung können ein anderes Resultat bewirken.
- Die Simulationen sind wegen ihres labilen Verhaltens, das kleinere Inkremente notwendig werden lässt, sehr rechenintensiv. Die Verfeinerung des Netzes durch die Nutzung der Symmetrieebenen, liefert nur mit Einschränkungen brauchbare Ergebnisse.

Insgesamt konnte die numerische Simulation, im Hinblick der komplexen mechanischen Problematik, recht gute Ergebnisse liefern. Die gezeigten Simulationen spiegeln sehr gut die im Laborversuch erzeugten Bruchbilder wieder. Weitere Untersuchungen sind jedoch notwendig um die Simulation, im Bezug auf die Imperfektionen im Versuchsaufbau, mit den Laborversuchen abzugleichen.

A Abbildungen

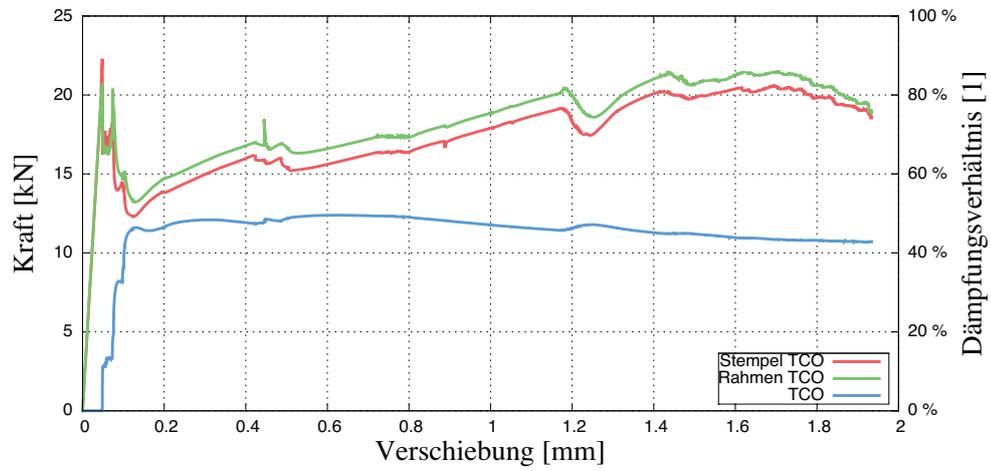


Abbildung A.1: Verschiebungsdiagramm TCO

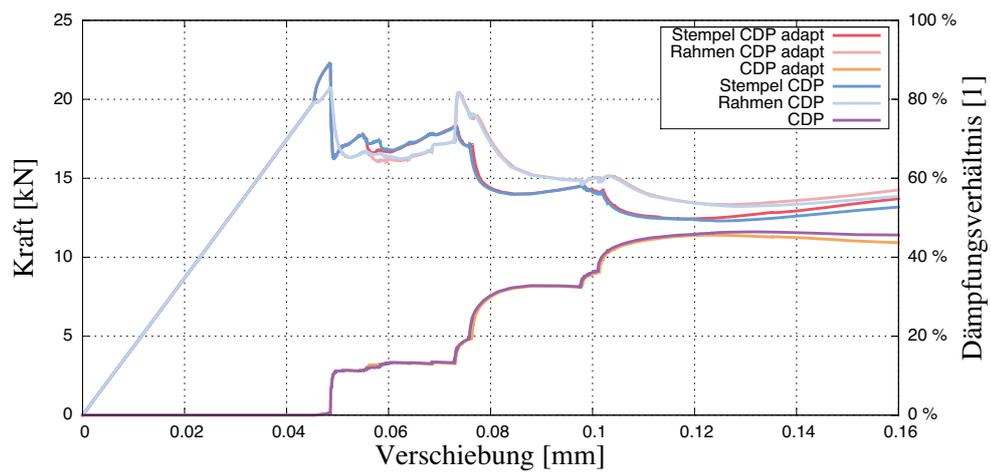


Abbildung A.2: Einfluss der Damagparameterdefinition auf die Verschiebungskurve

B Tabellen

| Dehnung ε [1] | Zugfestigkeit f_c [MPa] | Damage Parameter d_c [1] |
|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 0 | 50 | 0 |
| 0,0005 | | 0,1 |
| 0,009 | | 0,15 |
| 0,0015 | | 0,21 |
| 0,0023 | | 0,26 |
| 0,0034 | | 0,35 |
| 0,0043 | | 0,39 |
| 0,0056 | | 0,46 |
| 0,0075 | | 0,53 |
| 0,005 | 42 | |
| 0,011 | 27 | 0,65 |
| 0,017 | 12 | 0,8 |
| 0,022 | 5 | 0,9 |
| 0,029 | 1 | 0,97 |
| 0,035 | 0,2 | 0,9917 |

Tabelle B.1: Entfestigungsverlauf auf Druck Concrete Damage Plasticity

| Dehnung ε [1] | Zugfestigkeit f_t [MPa] | Damage Parameter d_t [1] |
|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 0 | 2 | 0 |
| 0,0002 | 0,1 | 0,5 |
| 0,00025 | | 0,6 |
| 0,0003 | | 0,7 |
| 0,0004 | | 0,8 |
| 0,006 | | 0,99 |
| 1 | 0,1 | |

Tabelle B.2: Erweiterte Parameter für das CDP Modell

C Quellcode der Input Datei

Aus Platzgründen wird bei den Quellcodes der Teil mit der geometrischen Definition der einzelnen Elemente, innerhalb der `** ASSEMBLY` Definition, ausgespart. Dieser Teil kann unter Berücksichtigung der in der Arbeit erwähnten Angaben leicht mit `ABAQUS CAE` reproduziert werden.

C.1 Vollmodell

```

1 *Heading
2 ** Job name: Beton_8_8_mesh Model name: Model-1
3 ** Generated by: Abaqus/CAE 6.10-1
4 *Preprint , echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
5 **
6 ** PARTS
7 **
8 *Part , name=Platen
9 *End Part
10 **
11 *Part , name=Specimen
12 *End Part
13 **
14 *Part , name=Support
15 *End Part
16 **
17 **
18 ** ASSEMBLY
19 **

```

Aus Platzgründen wurde dieser Teil des Quellcodes übersprungen.

```

24893 ** Constraint: Rahmen
24894 *Rigid Body, ref node=_PickedSet256 , elset=_PickedSet270
24895 ** Constraint: Stempel
24896 *Rigid Body, ref node=_PickedSet257 , elset=_PickedSet271
24897 *End Assembly
24898 **
24899 ** MATERIALS
24900 **
24901 *Material , name=Concrete_mc
24902 *Elastic
24903 20000. , 0.2
24904 *Concrete Damaged Plasticity
24905 11.5 , 0.1 , 1.16 , 0.666667 , 0.
24906 *Concrete Compression Hardening
24907 50. , 0.
24908 42. , 0.005
24909 27. , 0.011

```

```
24910 12., 0.017
24911 5., 0.022
24912 1., 0.029
24913 0.2, 0.035
24914 *Concrete Tension Stiffening
24915 2., 0.
24916 0.1, 0.0002
24917 0.1, 1.
24918 *Concrete Compression Damage
24919 0., 0.
24920 0.1, 0.0005
24921 0.15, 0.0009
24922 0.21, 0.0015
24923 0.26, 0.0023
24924 0.35, 0.0034
24925 0.39, 0.0043
24926 0.46, 0.0056
24927 0.53, 0.0075
24928 0.65, 0.011
24929 0.8, 0.017
24930 0.9, 0.022
24931 0.97, 0.029
24932 0.9917, 0.035
24933 *Concrete Tension Damage
24934 0., 0.
24935 0.5, 0.0002
24936 0.6, 1.
24937 *Material, name=Steel
24938 *Density
24939 7.8e-05,
24940 *Elastic
24941 210000., 0.3
24942 **
24943 ** INTERACTION PROPERTIES
24944 **
24945 *Surface Interaction, name="IntProp-1 Steel-Specimen"
24946 1.,
24947 *Friction, slip tolerance=0.005
24948 0.3,
24949 *Surface Behavior, penalty
24950 **
24951 ** INTERACTIONS
24952 **
24953 ** Interaction: CP-1-Specimen-1-Platen-1
24954 *Contact Pair, interaction="IntProp-1 Steel-Specimen", type=SURFACE TO SURFACE
24955 CP-3-Platen-1, CP-5-Specimen-1
```

```
24956 ** Interaction : CP-2-Support-1-Specimen-1
24957 *Contact Pair , interaction="IntProp-1 Steel-Specimen" , type=SURFACE TO SURFACE
24958 CP-6-Specimen-1 , CP-4-Support-1
24959 ** -----
24960 **
24961 ** STEP: Step-1
24962 **
24963 *Step , name=Step-1 , nlgeom=YES , inc=50000
24964 *Static
24965 0.001 , 0.0454 , 1e-12 , 0.0454
24966 **
24967 ** BOUNDARY CONDITIONS
24968 **
24969 ** Name: Rahmen_fix Type: Symmetry / Antisymmetry / Encastre
24970 *Boundary
24971 _PickedSet258 , ENCASTRE
24972 ** Name: Stempel_Load Type: Displacement / Rotation
24973 *Boundary
24974 _PickedSet259 , 1 , 1
24975 _PickedSet259 , 2 , 2
24976 _PickedSet259 , 3 , 3 , -0.0454
24977 _PickedSet259 , 4 , 4
24978 _PickedSet259 , 5 , 5
24979 _PickedSet259 , 6 , 6
24980 **
24981 ** OUTPUT REQUESTS
24982 **
24983 *Restart , write , frequency=0
24984 **
24985 ** FIELD OUTPUT: F-Output-1
24986 **
24987 *Output , field
24988 *Node Output
24989 RF , U , UR , UT
24990 *Element Output , directions=YES
24991 DAMAGEC , DAMAGET , E , MISESMAX , PE , PEEQ , PEEQT , S
24992 *Contact Output
24993 CDISP , CSTRESS
24994 **
24995 ** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
24996 **
24997 *Output , history
24998 *Node Output , nset=Set-RP
24999 RF1 , RF2 , RF3 , RM1 , RM2 , RM3 , UT
25000 **
25001 ** HISTORY OUTPUT: H-Output-2
```

```
25002 **
25003 *Node Output , nset=Set-RP-Rahmen
25004 RF1 , RF2 , RF3 , RM1 , RM2 , RM3
25005 **
25006 ** HISTORY OUTPUT: H-Output-3
25007 **
25008 *Output , history , variable=PRESELECT
25009 *End Step
25010 ** -----
25011 **
25012 ** STEP: Step-2
25013 **
25014 *Step , name=Step-2 , nlgeom=YES , inc=10000
25015 *Static , stabilize , factor=0.0002 , allsdtol=0 , continue=NO
25016 1e-06 , 25. , 1e-10 , 25.
25017 **
25018 ** BOUNDARY CONDITIONS
25019 **
25020 ** Name: Stempel_Load Type: Displacement/Rotation
25021 *Boundary
25022 _PickedSet259 , 3 , 3 , -25.
25023 **
25024 ** OUTPUT REQUESTS
25025 **
25026 *Restart , write , frequency=0
25027 **
25028 ** FIELD OUTPUT: F-Output-1
25029 **
25030 *Output , field
25031 *Node Output
25032 RF , U , UR , UT
25033 *Element Output , directions=YES
25034 DAMAGEC , DAMAGET , E , MISESMAX , PE , PEEQ , PEEQT , S
25035 *Contact Output
25036 CDISP , CSTRESS
25037 **
25038 ** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
25039 **
25040 *Output , history
25041 *Node Output , nset=Set-RP
25042 RF1 , RF2 , RF3 , RM1 , RM2 , RM3 , UT
25043 **
25044 ** HISTORY OUTPUT: H-Output-2
25045 **
25046 *Node Output , nset=Set-RP-Rahmen
25047 RF1 , RF2 , RF3 , RM1 , RM2 , RM3
```

```

25048 **
25049 ** HISTORY OUTPUT: H-Output-3
25050 **
25051 *Output , history , variable=PRESELECT
25052 *End Step

```

C.2 Viertelmodell

```

1 *Heading
2 ** Job name: Beton_4_mesh Model name: Model-1
3 ** Generated by: Abaqus/CAE 6.10-1
4 *Preprint , echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
5 **
6 ** PARTS
7 **
8 *Part , name=Platen
9 *End Part
10 **
11 *Part , name=Specimen
12 *End Part
13 **
14 *Part , name=Support
15 *End Part
16 **
17 **
18 ** ASSEMBLY
19 **

```

Aus Platzgründen wurde dieser Teil des Quellcodes übersprungen.

```

162199 ** Constraint: Rahmen
162200 *Rigid Body, ref node=_PickedSet218 , elset=_PickedSet258
162201 ** Constraint: Stempel
162202 *Rigid Body, ref node=_PickedSet216 , elset=_PickedSet271
162203 *End Assembly
162204 **
162205 ** MATERIALS
162206 **
162207 *Material , name=Concrete_CDP_01
162208 *Elastic
162209 20000. , 0.2
162210 *Concrete Damaged Plasticity
162211 11.5 , 0.1 , 1.16 , 0.666667 , 0.
162212 *Concrete Compression Hardening
162213 50. , 0.
162214 42. , 0.005
162215 27. , 0.011
162216 12. , 0.017

```

```

162217 5. , 0.022
162218 1. , 0.029
162219 0.2 , 0.035
162220 *Concrete Tension Stiffening
162221 2. , 0.
162222 0.1 , 0.0002
162223 0.1 , 1.
162224 *Concrete Compression Damage
162225 0. , 0.
162226 0.1 , 0.0005
162227 0.15 , 0.0009
162228 0.21 , 0.0015
162229 0.26 , 0.0023
162230 0.35 , 0.0034
162231 0.39 , 0.0043
162232 0.46 , 0.0056
162233 0.53 , 0.0075
162234 0.65 , 0.011
162235 0.8 , 0.017
162236 0.9 , 0.022
162237 0.97 , 0.029
162238 0.9917 , 0.035
162239 *Concrete Tension Damage
162240 0. , 0.
162241 0.5 , 0.0002
162242 0.6 , 1.
162243 *Material , name=Steel
162244 *Density
162245 7.8e-05,
162246 *Elastic
162247 210000. , 0.3
162248 **
162249 ** INTERACTION PROPERTIES
162250 **
162251 *Surface Interaction , name="IntProp-1 Steel-Specimen"
162252 1. ,
162253 *Friction , slip tolerance=0.005
162254 0.3 ,
162255 *Surface Behavior , penalty
162256 **
162257 ** BOUNDARY CONDITIONS
162258 **
162259 ** Name: Sym1 Type: Symmetry / Antisymmetry / Encastre
162260 *Boundary
162261 _PickedSet278 , YSYMM
162262 ** Name: Sym2 Type: Symmetry / Antisymmetry / Encastre

```

```

162263 *Boundary
162264 _PickedSet277 , XSYMM
162265 **
162266 ** INTERACTIONS
162267 **
162268 ** Interaction : CP-1-Support-1-Specimen-1
162269 *Contact Pair , interaction="IntProp-1 Steel-Specimen" , type=SURFACE TO SURFACE
162270 CP-7-Specimen-1 , CP-1-Support-1
162271 ** Interaction : CP-2-Specimen-1-Platen-1
162272 *Contact Pair , interaction="IntProp-1 Steel-Specimen" , type=SURFACE TO SURFACE
162273 CP-4-Platen-1 , CP-8-Specimen-1
162274 ** -----
162275 **
162276 ** STEP: Step-1
162277 **
162278 *Step , name=Step-1 , nlgeom=YES , inc=50000
162279 *Static
162280 0.0001 , 0.0405 , 1e-12 , 0.0405
162281 **
162282 ** BOUNDARY CONDITIONS
162283 **
162284 ** Name: Rahmen_fix Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
162285 *Boundary
162286 _PickedSet220 , ENCASTRE
162287 ** Name: Stempel_Load Type: Displacement/Rotation
162288 *Boundary
162289 _PickedSet221 , 1 , 1
162290 _PickedSet221 , 2 , 2
162291 _PickedSet221 , 3 , 3 , -0.0405
162292 _PickedSet221 , 4 , 4
162293 _PickedSet221 , 5 , 5
162294 _PickedSet221 , 6 , 6
162295 **
162296 ** OUTPUT REQUESTS
162297 **
162298 *Restart , write , frequency=0
162299 **
162300 ** FIELD OUTPUT: F-Output-1
162301 **
162302 *Output , field
162303 *Node Output
162304 RF , U , UR , UT
162305 *Element Output , directions=YES
162306 DAMAGEC , DAMAGET , E , MISESMAX , PE , PEEQ , PEEQT , S
162307 *Contact Output
162308 CDISP , CSTRESS

```

```
162309 **
162310 ** HISTORY OUTPUT: H-Output-3
162311 **
162312 *Output , history
162313 *Energy Output
162314 ALLIE , ALLSD
162315 **
162316 ** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
162317 **
162318 *Node Output , nset=Set-RP
162319 RF1 , RF2 , RF3 , RM1 , RM2 , RM3 , U3
162320 **
162321 ** HISTORY OUTPUT: H-Output-2
162322 **
162323 *Node Output , nset=Set-RP-Rahmen
162324 RF1 , RF2 , RF3 , RM1 , RM2 , RM3 , U3
162325 *End Step
162326 **
162327 **
162328 ** STEP: Step-2
162329 **
162330 *Step , name=Step-2 , nlgeom=YES , inc=10000
162331 *Static , stabilize , factor=0.0005 , allsdtol=0 , continue=NO
162332 1e-05 , 0.14 , 1e-12 , 0.14
162333 **
162334 ** BOUNDARY CONDITIONS
162335 **
162336 ** Name: Stempel_Load Type: Displacement/Rotation
162337 *Boundary
162338 _PickedSet221 , 3 , 3 , -0.14
162339 **
162340 ** OUTPUT REQUESTS
162341 **
162342 *Restart , write , frequency=0
162343 **
162344 ** FIELD OUTPUT: F-Output-1
162345 **
162346 *Output , field , frequency=100
162347 *Node Output
162348 RF , U , UR , UT
162349 *Element Output , directions=YES
162350 DAMAGEC , DAMAGET , E , MISESMAX , PE , PEEQ , PEEQT , S
162351 *Contact Output
162352 CDISP , CSTRESS
162353 **
162354 ** HISTORY OUTPUT: H-Output-3
```

```
162355 **
162356 *Output , history
162357 *Energy Output
162358 ALLIE , ALLSD
162359 **
162360 ** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
162361 **
162362 *Node Output , nset=Set-RP
162363 RF1 , RF2 , RF3 , RM1 , RM2 , RM3 , U3
162364 **
162365 ** HISTORY OUTPUT: H-Output-2
162366 **
162367 *Node Output , nset=Set-RP-Rahmen
162368 RF1 , RF2 , RF3 , RM1 , RM2 , RM3 , U3
162369 *End Step
```

Formelverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Analytische Berechnung der Durchbiegung $w(x, y)$ für eine Punktlast nach Ugural (1999) | 9 |
| 3.2 | Analytische Berechnung der Durchbiegung $w(x, y)$ für eine Flächenlast nach Ugural (1999) | 9 |
| 3.3 | Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb | 10 |
| 3.4 | Zugfestigkeit nach Mohr-Coulomb | 10 |
| 3.5 | Bruchkriterium nach Rankine | 10 |
| 3.6 | Fließfunktion CDP | 12 |
| 3.7 | Fließpotential von CDP | 14 |
| 3.8 | Formulierung der Stabilize Funktion | 15 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|--------|---|----|
| 3.1 | Einfach gelagerte, rechteckige Platte unter rechteckig verteilter Last (Ugural, 1999) . . . | 8 |
| 3.2 | Durchbiegungsfläche der rechteckigen Platte je nach Lasteintragung | 9 |
| 3.3 | Tension-Cutoff-Bedingung in der p-q Spannungsebene DSS Simulia (2010a) | 11 |
| 3.4 | Tension-Cutoff-Bedingung in der Deviatorebene DSS Simulia (2010a) | 11 |
| 3.5 | Bruchkriterium im ebenen Spannungsraum (DSS Simulia, 2010a) | 13 |
| 3.6 | Einfluss von K_c auf das Bruchkriterium im der Deviatorebene (DSS Simulia, 2010a) . | 13 |
| 3.7 | Damageparameter und Steifigkeitserholung (DSS Simulia, 2010a) | 14 |
| 4.1 | Trägerrost | 16 |
| 4.2 | Prüfkörper und Trägerrost auf dem Hubkolben der Prüfmaschine aufgesetzt | 17 |
| 4.3 | Auswertung einer Plattenserie | 18 |
| 4.4 | Typische Rissbilder | 18 |
| 4.4.1 | Bruchbild 1 | 18 |
| 4.4.2 | Bruchbild 2 | 18 |
| 4.4.3 | Bruchbild 3 | 18 |
| 4.4.4 | Bruchbild 4 | 18 |
| 5.1 | Versuchsaufbau mit 15mm Netz | 20 |
| 5.1.1 | Netzansicht von oben | 20 |
| 5.1.2 | Netzansicht von unten | 20 |
| 5.2 | Elastische Verschiebungen in Z-Richtung | 21 |
| 5.2.1 | Deformiertes Netz von oben | 21 |
| 5.2.2 | Deformiertes Netz von unten | 21 |
| 5.3 | Auflager des Prüfkörpers am Rahmen | 21 |
| 5.3.1 | Kontaktöffnung bei Versuchsbeginn | 21 |
| 5.3.2 | Kontaktöffnung im späteren Versuchsverlauf | 21 |
| 5.4 | Adaptierte Lagerung des Prüfkörpers (Pittino u. Wilczek, 2011) | 22 |
| 5.5 | Druckpunkte des Belastungsstempels | 23 |
| 5.6 | Hauptnormalspannungen (Zug) am Prüfkörper im elastischen Bereich | 23 |
| 5.6.1 | Ansicht von oben | 23 |
| 5.6.2 | Ansicht von unten | 23 |
| 5.7 | Hauptnormalzugspannungen am Prüfkörper im elastischen Bereich | 24 |
| 5.7.1 | Ansicht von oben | 24 |
| 5.7.2 | Ansicht von unten | 24 |
| 5.8 | Ausbreitung der plastifizierten Zone | 25 |
| 5.8.1 | Plastifizierung bei 0,116 mm Durchbiegung | 25 |
| 5.8.2 | Plastifizierung bei 0,262 mm Durchbiegung | 25 |
| 5.9 | Verschiebungskurve mit elastischem Materialverhalten | 25 |
| 5.10 | Abhängigkeit der maximalen Reaktionskraft von der Zugfestigkeit des Prüfkörpers . . . | 27 |
| 5.11 | Plastische Dehnungen auf Zug | 28 |
| 5.11.1 | Ansicht von oben | 28 |
| 5.11.2 | Ansicht von unten | 28 |

| | | |
|--------|--|----|
| 5.12 | Einfluss der <code>Stabilize</code> Funktion auf die Verschiebungskurve | 29 |
| 5.13 | Rissentstehungsabfolge | 30 |
| 5.13.1 | Rissinitiierungsphase beim Primärriss | 30 |
| 5.13.2 | Rissausbreitungphase beim Primärriss | 30 |
| 5.13.3 | Lagerungsriss | 30 |
| 5.13.4 | Teilung | 30 |
| 5.14 | Verschiebungsdiagramm CDP und TCO | 31 |
| 5.15 | Adaptierte Stepweite | 32 |
| 5.16 | Adaptierte <code>Stabilize</code> Funktion | 33 |
| 5.17 | Netzadaptierung | 33 |
| 5.17.1 | Einfache Partitionierung des Prüfkörpers | 33 |
| 5.17.2 | Erweiterte Partitionierung des Prüfkörpers | 33 |
| 5.17.3 | Einfaches Netz | 33 |
| 5.17.4 | Adaptiertes Netz | 33 |
| 5.18 | Verschiebungskurve mit adaptiertem Netz | 34 |
| 5.19 | Rissausbreitung mit adaptiertem Netz bei 0,06 mm | 34 |
| 5.20 | Verschiedene Rissausbildungsformen bei 0,12 mm Verschiebung | 35 |
| 5.20.1 | CDP Modell | 35 |
| 5.20.2 | CDP Modell mit adaptierter Schrittweite | 35 |
| 5.20.3 | CDP Modell mit reduzierter <code>Stabilize</code> Funktion | 35 |
| 5.20.4 | CDP Modell mit adaptierem Netz | 35 |
| 5.21 | Versuchsaufbau im Viertelmodell mit 5mm Netz | 36 |
| 5.21.1 | Netzansicht von oben | 36 |
| 5.21.2 | Netzansicht von unten | 36 |
| 5.22 | Verschiebungskurve aus dem Viertelmodellaufbau | 36 |
| 5.23 | Rissbildentstehung im Viertelmodell | 37 |
| 5.23.1 | Rissbild bei 0,0457 mm Verschiebung | 37 |
| 5.23.2 | Rissbild bei 0,102 mm Verschiebung | 37 |
| 5.24 | Partitionierung des Viertelmodells | 38 |
| 5.24.1 | einfache Partitionierung | 38 |
| 5.24.2 | angepasste Partitionierung | 38 |
| 5.25 | Verschiebungskurven aus dem Viertelmodell mit unterschiedlicher Netzgestaltung | 38 |
| 5.26 | Rissbildentstehung im Viertelmodell mit adaptiertem Netz | 39 |
| 5.26.1 | Rissbild bei 0,057 mm Verschiebung | 39 |
| 5.26.2 | Rissbild bei 0,0588 mm Verschiebung | 39 |
| 5.26.3 | Rissbeginn yz-Ebene | 39 |
| 5.26.4 | Rissbeginn xz-Ebene | 39 |
| 5.26.5 | Rissende yz-Ebene | 39 |
| 5.26.6 | Rissende xz-Ebene | 39 |
| A.1 | Verschiebungsdiagramm TCO | 41 |
| A.2 | Einfluss der Damagparameterdefinition auf die Verschiebungskurve | 41 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Steifigkeit der quadratischen Platte je nach Lasteintragung | 9 |
| 5.1 | Materialparameter für linear elastisches und MC Materialverhalten | 20 |
| 5.2 | Steifigkeitsvergleich im elastischen Bereich | 25 |
| 5.3 | Tension Cut Off Parameter | 27 |
| 5.4 | Allgemeine Concrete-Damage-Plasticity-Parameter | 30 |
| 5.5 | Entfestungsverlauf auf Zug Concrete Damage Plasticity | 31 |
| B.1 | Entfestungsverlauf auf Druck Concrete Damage Plasticity | 42 |
| B.2 | Erweiterte Parameter für das CDP Modell | 42 |

Literatur

- [DSS Simulia 2010a] DSS SIMULIA: *Abaqus 6.10, Analysis User's Manual, Volume III: Materials*. Rising Sun Mills, 166 Valley Street, Providence, RI 02909–2499: Dassault Systemes, 2010
- [DSS Simulia 2010b] DSS SIMULIA: *Abaqus 6.10, Analysis User's Manual, Volume IV: Contact Formulation*. Rising Sun Mills, 166 Valley Street, Providence, RI 02909–2499: Dassault Systemes, 2010
- [EN-14488 2006] EN-14488: *Prüfung von Spritzbeton, Teil 5 Bestimmung der Energieabsorption bei faserverstärkten plattenförmigen Prüfkörpern ÖNORM EN 14488-5*. Europäische Norm, 2006
- [Lubliner u. a. 1989] LUBLINER, J. ; OLIVER, J. ; OLLER, S. ; ONATE, E.: A plastic-damage model for concrete. In: *International Journal Solids Structures* 25 (1989), Nr. 3, S. 299–236
- [Mills u. Zimmerman 1970] MILLS, L. L. ; ZIMMERMAN, R. M.: Compressive strength of plain concrete under multiaxial loading conditions. In: *American Concrete Institute Materials Journal* 67 (1970), Nr. 10
- [Pittino u. a. 2011] PITTINO, G. ; MÖSSLACHER, A. ; SCHWAB, P. ; GALLER, R.: Einsatz und Prüfung von kunststofffaserverwehrttem dry-mix shotcrete. In: *Geomechanics and Tunneling* 4 (2011), Februar, Nr. 1, S. 63 –69
- [Pittino u. Wilczek 2011] PITTINO, G. ; WILCZEK, K.: Influences on the energy absorption capacity of fibre reinforced (sprayed) concrete – Testing and numerical analyses. In: *1st International Congress on Tunnels and Underground Structures in South-East Europe ÜSING UNDERGROUND SPACE“*, Dubrovnik, 2011
- [Richart u. a. 1928] RICHART, Frank E. ; BRANDTZAEG, Anton ; BROWN, Rex L.: *A study of the failure of concret under combined compressive stresses*. University of Illinois Bulletin, 1928
- [Schickert u. Winkler 1977] SCHICKERT, G. ; WINKLER, H.: Results of test concerning to multiaxial compressive stresses. In: *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton* 277 (1977)
- [Ugural 1999] UGURAL, Ansel C.: *Stresses in plates and shells*. 2. McGraw-Hill Book Co, 1999