

MODELLIERUNG DES VERHALTENS VON SCHERKRITISCHEN STAHLBETONSTÜTZEN UNTER ZYKLISCHER QUERBELASTUNG

Konstantinos G. Megalooikonomou¹

¹ Griechische Fernuniversität, Fakultät für Naturwissenschaften und Technologie, std153412@ac.eap.gr

KURZFASSUNG

Durch Erdbeben verursachte Einstürze von nicht standardkonformen Gebäuden aus Stahlbeton, die vor der Entwicklung moderner seismischer Designcodes entworfen und gebaut wurden, haben intensive Bemühungen der Wissenschaft ausgelöst, diesen Gebäudebestand genauestens zu untersuchen. Die meisten der entwickelten Verfahren für die Vorhersage von Gebäudestärke- und Verformungsindikatoren wurden bisher validiert durch die Erstellung von Datenbanken von Stahlbetonstützen, die unter axialer Belastung und umgekehrten zyklischen lateraler Driftverläufen getestet wurden. Üblicherweise wird das strukturelle Verhalten von Stützen hinsichtlich aller beteiligten Mechanismen untersucht, nämlich die Biegung der Stützen mit oder ohne axiale Belastung, der Querbeltlastung und die Verformung der Verankerung. Zu beachtenden Besonderheiten dieser nicht standardkonformen Stahlbetonstützen sind zum einen das Ergebnis des Scher-Biegung-Wechselwirkungsmechanismus der hier basierend auf der Modified Compression Field Theory (MCFT) modelliert wurde, und zum anderen der Anteil, den das Herausziehen der Zugbewehrung aus der Stützenverankerung zur seitlichen Verschiebung der gesamten Stütze beiträgt. Diese Eigenschaften sind im eigenständigen Windows-Programm „Phaethon“ berücksichtigt, das mit einer in C++ geschriebenen graphischen Benutzeroberfläche ausgestattet ist. Darüber hinaus kann in Phaethon basierend auf der MCFT sowohl die Momentenkrümmung bestimmt werden als auch die Querkraft – Scherdehnungsanalyse der Querschnitte dieser Stützen durchgeführt werden. In der vorliegenden Arbeit wurden zuvor experimentell getestete scherkritische Stützen (sowohl rechteckige als auch runde) aus der Literatur als nichtlineare Glieder mit Gelenkelementen in der OpenSees-Software simuliert, wobei für die Materialeigenschaften des Stahlbetons die Ergebnisse der zuvor erwähnten querschnittswisen Analyse des Faserquerschnittmodells in der Phaethon-Software genutzt wurden. Ein Vergleich zwischen numerischer und experimenteller zyklischer lateraler Antwort der untersuchten Stahlbetonstützen deutet auf die Wirksamkeit der implementierten Modellierung hin.

Schlagwörter: MCFT, Scherkritischen Stahlbetonstützen, zyklische Querbeltlastung, OpenSees, Phaethon

1. EINFÜHRUNG

Nach gegenwärtigem Stand der Technik erfordern selbst die bisher fortgeschrittensten Methoden zur seismischen Bemessung und Bewertung eine Art nichtlinearer Analyse - entweder statisch oder dynamisch. Solche Untersuchungen werden meist an Rahmenelementen in Form unterschiedlicher Näherungen durchgeführt. Dazu gehören auch Faserbalken-Stützen-Elemente (Abb.1) unter Verwendung von „Smeared-Cracking“ Modellen. Gemäß diesem Ansatz wird gerissener Beton als kontinuierliches Medium mit anisotropen Eigenschaften simuliert. Im Allgemeinen werden diese Modelle als „Smeared-Cracking-Ansätze“ bezeichnet, da Rissbildung als verteilter Effekt mit Richtungsabhängigkeit modelliert wird. Diese Ansätze eignen sich besonders für die Querschnittsanalyse.

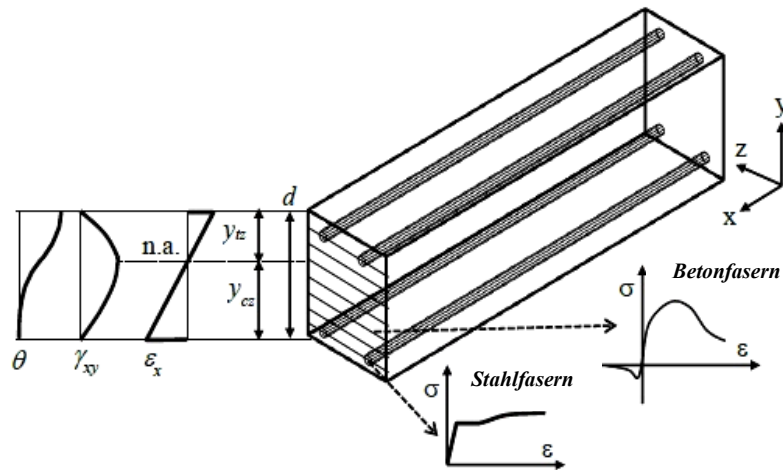


Abbildung 1. Faserelementschema – Definitionen [1], [2].

2. MCFT-BASIERTES SMEARED-CRACKING QUERSCHNITTSMODELL

Ein Stahlbetonelement wird homogenisiert und wie in Abb. 2 gezeigt als anisotropes elastisches Material behandelt. Stellen Sie sich ein Scheibenelement mit konstanter Flächenspannung und gleichmäßiger Dicke vor, die ein rechteckiges Gitter aus gut verteilter Bewehrung enthält. Es wird angenommen, dass Lasten, die auf die Randebenen des Elements wirken, aus gleichmäßigen Membranspannungen bestehen, d.h. aus Normalspannungen n_x , n_y und gleichmäßigen Schubspannungen τ_{xy} . Die Verformung wird durch den Dehnungstensor für ebene Spannungen definiert:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x & \gamma_{xy}/2 & 0 \\ \gamma_{xy}/2 & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

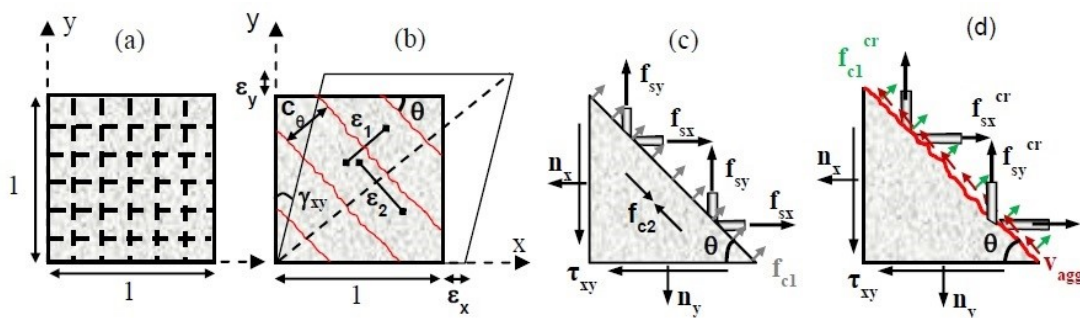


Abbildung 2. a) Smeared-cracking Stahlbetonmembranelement, b) mittlere Dehnungen (C_θ : Abstand der um θ Winkel geneigten Risse), c) mittlere Spannungen und d) lokale Spannungen [1], [2].

Die Model umfasst drei Sätze von Beziehungen [3]: Kompatibilitätsbeziehungen zwischen durchschnittlichen Dehnungen von Beton und Bewehrung, Gleichgewichtsbeziehungen zwischen von außen aufgetragenen Lasten und durchschnittlichen Spannungen in Beton und Bewehrung; und einachsige Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für gerissenen Beton entlang der Hauptrichtungen und für die Bewehrung. Die konstitutiven Beziehungen für gerissenen Beton resultieren aus Tests von Stahlbetonplatten mit einem speziell angefertigten Testgerät für Scheibenelemente an der Toronto Universität. Da die Formulierung des MCFT mit den Ergebnissen der spezifischen Tests in diesem Testgerät kalibriert wurde, basiert diese auf realistischen konstitutive Modellen für Beton, die auf

experimentell beobachteten Phänomenen basieren. Während Risse verschmiert und die Zusammenhänge in Bezug auf mittlere Spannungen und Dehnungen formuliert werden, ist ein kritischer Aspekt der MCFT die Berücksichtigung der lokalen Dehnungs- und Spannungsbedingungen an Rissen (Abb.2d) [3].

2.1. Konstitutiv Modell basierend auf MCFT für einen Faserbetonträger

Um die Normal- und Schubspannungen für die i -te Faser/Schicht (σ_x^i, τ_{xy}^i) eines Faserquerschnitts eines Betonträgers [4] zu bestimmen, wird ein zweiachsiges Faserkonstitutivmodell nach dem MCFT formuliert. Die Schritte und mathematischen Ausdrücke, die zur Berechnung der Terme für Gleichgewicht, Verträglichkeit und Spannungs-Dehnungs-Beziehungen verwendet wurden, sind in Tabelle 1 aufgeführt. Für die Querschnittszustandsbestimmung wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- Die Längsdehnungen ε_x und der Schub γ_{xy} sind für jede Faser bekannt, entsprechend der Annahme ebener Schnitte und einer parabolischen Schubdehnungsverteilung entlang der Querschnittshöhe mit dem Maximalwert $\gamma_{xy,max}$ auf der neutralen Achse y_{na} [Gl. (2)] treffen sich zwei Halbparabeln mit gleichem Maximum im Punkt der neutralen Achse mit unterschiedlichem Ausgangspunkt, extremer Zug- bzw. extremer Druckfaser).

$$\gamma_{xy}(y) = \gamma_{xy,max} \cdot \left[2 \left(\frac{y}{y_{na}} \right) - \left(\frac{y}{y_{na}} \right)^2 \right] \quad (2)$$

- Die Betonquerspannung f_{cy} wurde für jede Faser aus Gleichgewichtsbedingungen ermittelt (wobei Null-Normalspannung n_y angenommen wurde).
- Das logische Flussdiagramm des verwendeten iterativen Verfahrens ist in Abb. 3 dargestellt. Der gesuchte Parameter ist der Winkel der Hauptrichtungen unter der Annahme zusammenfallender Hauptachsen für Betonhauptspannung und -dehnung. Um die Konvergenz des Algorithmus auf den richtigen Wert dieses Winkels θ zu beschleunigen, wird der anfängliche Schätzwert des Verfahrens für den Neigungswinkel der Hauptspannungen/-dehnungen (Winkel der Hauptachse 2 zur x -Achse) bestimmt nach folgender Gleichung:

$$\theta(y) = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{y}{y_{cz}} \right)^3, \quad 0 < y \leq y_{cz}$$

$$\theta(y) = \frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{4} \cdot \left[2 \left(\frac{y-y_{cz}}{y_{tz}} \right) - \left(\frac{y-y_{cz}}{y_{tz}} \right)^2 \right], \quad y_{cz} < y \leq d \quad (3)$$

wobei y die Lage der Betonschichtfaser ist (y : Nullbezug ist die extreme Druckfaser, Abb.1), y_{cz} die Tiefe der Druckzone, y_{tz} die Tiefe der Zugzone und d ist die Gesamttiefe des Querschnitts (d. h. $y_{cz}+y_{tz}=d$, Abb. 1).

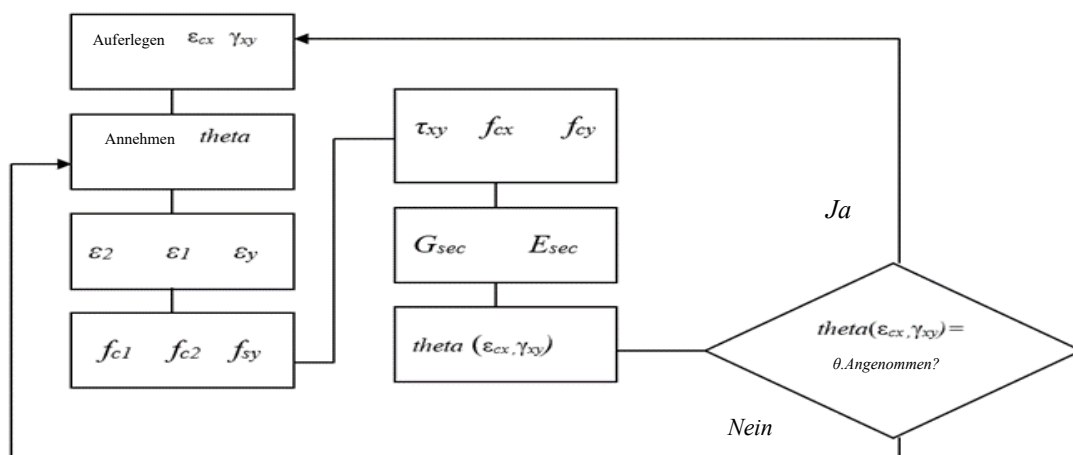


Abbildung 3. Flussdiagramm des iterativen Verfahrens für jede Faser/Schicht des Querschnitts nach MCFT [1], [2].

Tabelle 1. Gleichungen, die im iterativen Verfahren verwendet werden [3].

$\varepsilon_x = \varepsilon_{cx}, \varepsilon_1 = \varepsilon_x + \frac{\gamma_{xy} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)}{2}, \varepsilon_y = \varepsilon_1 - \frac{\gamma_{xy}}{2 \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)}, \varepsilon_2 = \varepsilon_x + \varepsilon_y - \varepsilon_1$ $f_{c1} = E_c \cdot \varepsilon_1 \text{ für } 0 < \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{cr}, f_{c1} = \frac{f_{cr}}{1 + \sqrt{200\varepsilon_1}} \text{ für } \varepsilon_{cr} < \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{yx},$ $f_{c2} = f_{c2max} \cdot \left[2 \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon'_c} \right) - \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon'_c} \right)^2 \right], \frac{f_{c2max}}{f'_c} = \frac{1}{0.8 - 0.34\varepsilon_1/\varepsilon'_c} \leq 1.0, f_{sy} = E_{sy}\varepsilon_y \leq f_{yy}$ $f_{cy} = -\rho_y \cdot f_{sy}, \tau_{xy} = \frac{f_{cy} - f_{c2}}{\tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)}, f_{cx} = f_{c1} - \tau_{xy} \cdot \tan, G_{sec} = \frac{\tau_{xy}}{\gamma_{xy}},$ $E_{sec} = \frac{f_{cx}}{\varepsilon_x},$ $\theta(\varepsilon_{cx}, \gamma_{xy}) = \tan^{-1} \frac{f_{c1} - f_{cy}}{\tau_{xy}}$
<p>f'_c = Druckfestigkeit von Betonzylindern (MPa), ε'_c = Dehnung bei Betonzylinder-Druckfestigkeit, E_c = Betonelastizitätsmodul (MPa), f_{cr} = Zugfestigkeit von Beton (MPa), ε_{cr} = Rissdehnung bei Erreichen der Betonzugfestigkeit, ε_{yx} = Fließgrenze Dehnung der Längsbewehrung, E_{sy} = Elastizitätsmodul von Bewehrungsbügeln (MPa), f_{yy} = Fließgrenze von Bewehrungsbügeln (MPa), ρ_y = Verhältnis der Schubbewehrung.</p>

2.2. Querschnitt Modell

Betrachtet man nun das Prinzip der virtuellen Arbeit für ein Balkenelement, so kann die Gl. (4) hergeleitet werden. Die äußere Arbeit wird von den Endkräften (p) auf die entsprechenden Verschiebungen (u) geleistet, während die innere Arbeit von den Grundkräften (q) auf die entsprechenden Verformungen (v) geleistet wird.

$$\delta u^T p = \delta v^T q \quad (4)$$

Die innere Arbeit von Gl. (4) lässt sich aus dem Integral des Spannungsprodukts mit den zugehörigen virtuellen Dehnungen über dem Elementvolumen V ableiten. In vielen Anwendungen der nichtlinearen Statik beschränkt sich die Eigenarbeit auf die Eigenarbeit aus Normalspannung σ_x und Schubspannung τ , auf die Axialdehnung ε_x bzw. Schubdehnung γ [5]:

$$\delta v^T q = \int \delta \varepsilon^T \sigma dV = \int (\delta \varepsilon_x \sigma_x + \delta \gamma \tau) dV \quad (5)$$

Dehnung und Spannung sind Funktionen der Position entlang der Elementlängsachse x und der Position innerhalb des Querschnitts, angegeben in lokalen Koordinaten y (bezüglich der Höhe) und z (bezüglich der Breite). Gl. (5) kann umgeschrieben werden, indem das Integral über das Elementvolumen durch Integration über die Querschnittsfläche A an einer Stelle x und anschließende Integration über die gesamte Elementlänge ersetzt wird:

$$\delta v^T q = \int (\delta \varepsilon_x \sigma_x + \delta \gamma \tau) dV = \int [\int (\delta \varepsilon_x \sigma_x + \delta \gamma \tau) dA] dx \quad (6)$$

Die Dehnungen an einem Faser-/Schichtpunkt des Balkenquerschnitts (2d-Fall) hängen wie folgt mit den Querschnittsverformungen zusammen [6]:

$$\varepsilon_x(x) = \varepsilon_0 - y_\varepsilon \cdot \varphi(x) \quad (7)$$

$$\gamma_{xy}(x) = \gamma_{xy.max} \quad (8)$$

wobei ε_0 die axiale Verformung im Mittelpunkt des Koordinatensystems des Schnitts (Schwerpunkt) ist und y_ε ebenfalls in Bezug auf diesen Mittelpunkt gemessen wird, $\varphi(x)$ die Krümmung des Querschnitts ist und $\gamma_{xy.max}$ der Maximalwert der Scherdehnung auf der neutralen Achse. Daher können die Dehnungen an einem Materialpunkt m des Querschnitts in Matrixform wie folgt ausgedrückt werden:

$$\varepsilon(x, y_\varepsilon) = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -y_\varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varphi \\ \gamma_{xy.max} \end{Bmatrix} = B_s(y_\varepsilon) \cdot e(x) \quad (9)$$

$$B_s(y_\varepsilon) = \begin{bmatrix} 1 & -y_\varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Die inneren resultierenden Kräfte am Kontrollquerschnitt sind gegeben durch:

$$\text{Axialkraft: } N = \int \sigma_x dA \quad (11)$$

$$\text{Querkraft: } V = \int \tau_{xy} dA \quad (12)$$

$$\text{Biegemoment: } M = - \int y_\varepsilon \sigma_x dA \quad (13)$$

Diese können wie folgt in Matrixform geschrieben werden:

$$f_s(x) = \int B_s^T(y_\varepsilon) \cdot \sigma(x, y_\varepsilon) dA \quad (14)$$

wobei:

$$f_s(x) = \begin{Bmatrix} N \\ M \\ V \end{Bmatrix}, \quad B_s(y_\varepsilon) = \begin{bmatrix} 1 & -y_\varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \sigma(x, y_\varepsilon) = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (15)$$

Unter Berücksichtigung der Querschnittsdiskretisierung in Fasern/Schichten lassen sich die Gesamtkräfte auf den Balkenquerschnitt einfach durch Aufsummieren der einzelnen Faserbeiträge berechnen:

$$N = \sum_{i=1}^{n.Schichten} \sigma_x^i A^i, \quad V = \sum_{i=1}^{n.Schichten} \tau_{xy}^i A^i, \quad M = - \sum_{i=1}^{n.Schichten} \sigma_x^i y_\varepsilon^i A^i \quad (16)$$

wobei A^i die Fläche der i -ten Faser/Schicht ist. Normal- und Schubspannung für die i -te Faser/Schicht (σ_x^i, τ_{xy}^i) werden aus den jeweiligen Dehnungen unter Verwendung eines biaxialen Faserkonstitutivmodells gemäß MCFT erhalten (Abb. 3, $\sigma_x^i = f_{cx}^i$). Bei dem angewandten Verfahren werden die Querschnittkräfte anhand bekannter Querschnittverformungen ermittelt; somit werden für bekannte Kräfte die Iterationen über die Werte der Verformungen innerhalb einer vordefinierten akzeptablen Toleranz für die Kraftgrößen durchgeführt.

Das Verfahren zur Berechnung der Tangentialquerschnitt-Steifigkeitsmatrix k_s ergibt sich aus der Differenzierung des Schnittkraftvektors f_s nach dem Querschnittverformungsvektor e :

$$k_s = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{s1}}{\partial e_1} & \frac{\partial f_{s1}}{\partial e_2} & \frac{\partial f_{s1}}{\partial e_3} \\ \frac{\partial f_{s2}}{\partial e_1} & \frac{\partial f_{s2}}{\partial e_2} & \frac{\partial f_{s2}}{\partial e_3} \\ \frac{\partial f_{s3}}{\partial e_1} & \frac{\partial f_{s3}}{\partial e_2} & \frac{\partial f_{s3}}{\partial e_3} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$k_s = \frac{\partial f_s}{\partial e} = \int B_s^T(y_\varepsilon) \cdot \frac{d\sigma(x,y)}{d\varepsilon(x,y)} \cdot \frac{\partial \varepsilon(x,y)}{\partial e} dA = \int B_s^T(y_\varepsilon) \cdot \frac{d\sigma(x,y)}{d\varepsilon(x,y)} B_s(y_\varepsilon) dA \quad (18)$$

$$\sigma(x, y_\varepsilon) = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad \varepsilon(x, y_\varepsilon) = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (19)$$

$$\frac{d\sigma(x,y)}{d\varepsilon(x,y)} = \begin{bmatrix} E_m & 0 \\ 0 & G_m \end{bmatrix} \quad (20)$$

wobei E_m und G_m die Tangentenmoduli der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen an einem Punkt m des Querschnitts sind, der hier durch E_{sec} und G_{sec} angenähert wird (Tabelle 1, Abb. 3).

3. EINGEBETTETES MOMENT – KRÜMMUNGALGORITHMUS IN PHAETHON-SOFTWARE

Durch die Querschnittsanalyse werden das unbekannte Moment M (und die zugehörige axiale Verformung ε_0) für eine gegebene Anzahl von Krümmungsincrementen φ und die unbekannte Querkraft V für gleichzeitige Schubdehnungsincrementen γ bestimmt, mit oder ohne Vorhandensein einer konstanten Last N in Axialrichtung. Das Gleichungssystem für das Querschnittgleichgewicht wird dann wie folgt aufgestellt:

$$\begin{cases} N - N_r(\varepsilon_0, \varphi, \gamma) = 0 \\ M - M_r(\varepsilon_0, \varphi, \gamma) = 0 \\ V - V_r(\varepsilon_0, \varphi, \gamma) = 0 \end{cases} \quad (21)$$

Zu beachten ist dabei die explizite Kopplung der Widerstandskräfte. Wenn N , φ und γ gegeben sind, wird die erste Gleichung verwendet, um nach ε_0 aufzulösen; dann wird dieser Wert zusammen mit den gegebenen Werten für φ und γ in die zweite und dritte Gleichung eingesetzt, um M und V zu bestimmen. Die widerstehende Axialkraft in der ersten Gl. (21) wird mit einer Reihenentwicklung nach Taylor bis zur ersten (linearen) Ordnung approximiert:

$$N - \left[N_r(\varepsilon_{00}, \varphi_0) + \frac{\partial N}{\partial \varepsilon_0} \Delta \varepsilon_0 + \frac{\partial N}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial N}{\partial \gamma} \Delta \gamma \right] = 0 \quad (22)$$

wobei der zweite Index 0 den anfänglichen Ausgangswert für die Lösung bezeichnet. Mit der Normalkraft N , dem Krümmungsincrement $\Delta \varphi$ und dem Schubdehnungsincrement $\Delta \gamma$ lässt sich obige Gleichung nach $\Delta \varepsilon_0$ auflösen:

$$\Delta \varepsilon_0 = \left(\frac{\partial N}{\partial \varepsilon_0} \right)^{-1} \cdot \left(N_u - \frac{\partial N}{\partial \varphi} \Delta \varphi - \frac{\partial N}{\partial \gamma} \Delta \gamma \right) \quad \text{mit,} \quad N_u = N - N_r(\varepsilon_{01}, \varphi_1) \quad (23)$$

Für jeden Schritt wird die numerische Lösung in zwei Hauptphasen unterschieden: die Inkrementierungsphase, die aus der Anwendung des Krümmungs- und Scherdehnungsincrements besteht, und die Konvergenzphase, in der Iterationen durchgeführt werden, um das Gleichgewicht zwischen fester Axialkraft, Krümmung und Scherdehnung zu schaffen. Die Axialkraft wird in einem ersten Schritt ohne Krümmung und ohne Scherdehnung aufgebracht.

4. KORRELATION MIT EXPERIMENTELLEN ERGEBNISSEN AUS DIE LITERATUR

Die Abbildung unten zeigt eine Simulation des Kragarmstützmodell mit Gelenkelementen (BWH) [7] in der Software OpenSees [8]. Dabei wird eine Drehfeder unterhalb des Elements an der Basis hinzugefügt, dessen elastische Steifigkeit mit Phaeton ermittelt wurde. Für das Querschnittsaggregatorobjekt in OpenSees wird ein Hysterese Material verwendet, das der Moment-Krümmungs-Antwort und Querkraft-Scherdehnung-Antwort des bewehrten Betonquerschnitts der zu

untersuchenden Stütze folgt, welche wiederum auf der Grundlage der Analyse mit der Phaeton-Software bestimmt wurde. Dazu aggregiert letztere zuvor definierte einachsige Material-Objekte zu einem Einzelschnitt-Kraft-Verformungsmodell innerhalb der plastischen Gelenke des BWH-Elements. In dieser Studie wird diese plastische Gelenklänge gemäß der von Megalooikonomou et al. (2018) [9] entwickelten Gleichungen bestimmt. Ein Vergleich (Abb.5) zwischen numerischer und experimenteller zyklischer lateraler Antwort der untersuchten Stahlbetonstützen [10],[11] deutet auf die Wirksamkeit der implementierten Modellierung hin.

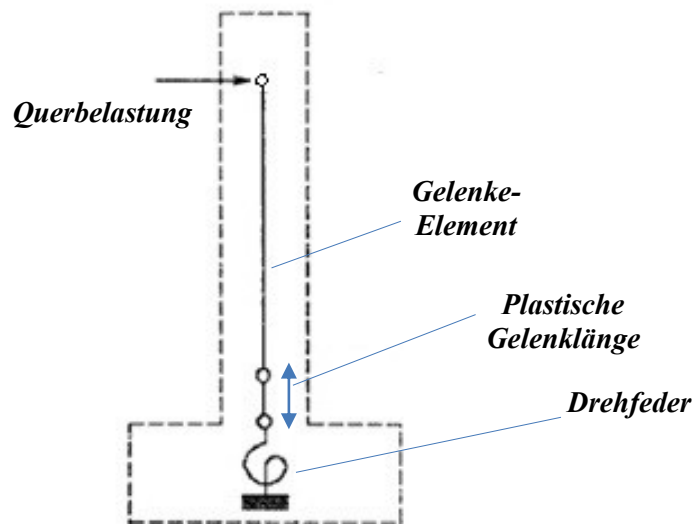


Abbildung 4. Kragarmstützmodell mit Gelenke-Elementen (BWH) [7] in der OpenSees-Software [8].

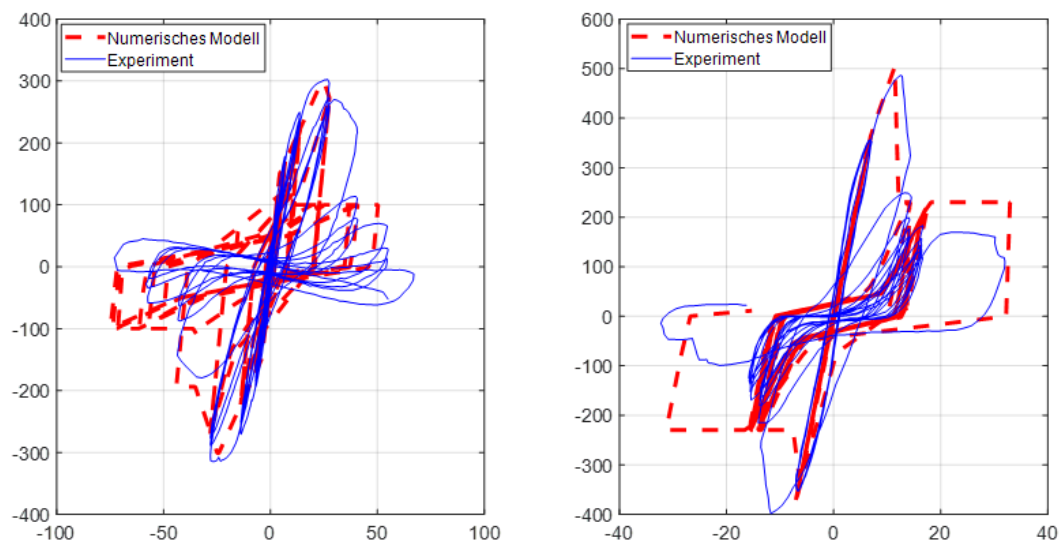


Abbildung 5. Korrelation mit experimentellen Ergebnissen aus der Literatur (x-Achse: Verschiebung in mm und y-Achse: Querlast in kN), (Links: Rechteckige Stütze 1 [10] und Rechts: Runde Stütze 20 [11]).

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Es kann geschlussfolgert werden, dass zu beachtenden Besonderheiten dieser hier untersuchten nicht standardkonformen Stahlbetonstützen zum einen das Ergebnis des Scher-Biegung-Wechselwirkungsmechanismus, der hier basierend auf der Modified Compression Field Theory (MCFT) modelliert wurde, und zum anderen der Anteil, den das Herausreißen der Zugsbewehrung aus der Stützenverankerung zur seitlichen Verschiebung der gesamten Stütze beiträgt. Diese

Eigenschaften sind im eigenständigen Windows-Programm „Phaethon“ berücksichtigt, das mit einer in C++ geschriebenen graphischen Benutzeroberfläche ausgestattet ist. Darüber hinaus kann in Phaethon basierend auf der MCFT sowohl die Momentenkrümmung bestimmt werden als auch die Querkraft – Scherdehnungsanalyse der Querschnitte dieser Stützen durchgeführt werden. In der vorliegenden Arbeit wurden zuvor experimentell getestete scherkritische Stützen (sowohl rechteckige als auch runde) aus der Literatur als nichtlineare Glied mit Gelenkelementen in der OpenSees-Software simuliert, wobei für die Materialeigenschaften des Stahlbetons die Ergebnisse der zuvor erwähnten querschnittsweisen Analyse des Faserquerschnittmodells in der Phaethon-Software genutzt wurden. Der Vergleich mit experimentellen Ergebnissen aus der Literatur bestätigt die Fähigkeit dieses Windows-Softwaretools, Festigkeits- und Verformungsindizes von schubkritischen Stahlbetonstützen zu bewerten.

DANKSAGUNG

Der Autor dankt der Alexander S. Onassis Gemeinnützige Stiftung, deren finanzielle Unterstützung sehr geschätzt wird. Die Phaethon-Software-Installationsdatei ist kostenlos auf Researchgate DOI verfügbar: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31114.57284> und ihr Quellcode steht auf Github zum Download bereit: <https://github.com/bigeconomy/Phaethon-Source-Files>.

LITERATUR

- [1] Megalooikonomou K.G. (2019) *Seismic Assessment and Retrofit of Reinforced Concrete Columns*, Cambridge Scholars Publishing, ISBN (10): 1-5275-2785-9, ISBN (13): 978-1-5275-2785-0, p. 387.
- [2] Megalooikonomou K.G. (2018) PHAETHON: Software for Analysis of Shear-Critical Reinforced Concrete Columns, *Modern Applied Science*, 12 (3), 1-22
- [3] Vecchio, F. J., and Collins, M. P. (1986) The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear. *ACI Journal Proceedings*, 83(2), 219-231.
- [4] Vecchio, F. J., and Collins, M. P. (1988) Predicting the Response of Reinforced Concrete Beams Subjected to Shear Using Modified Compression Field Theory. *ACI Structural Journal*, 85(3), 258-268.
- [5] Filippou, F. C., and Fenves, G. L. (2004): *Methods of analysis for earthquake-resistant structures*. In: Bozorgnia Y, Bertero VV (eds) *Earthquake engineering: From engineering seismology to performance-based engineering*. CRC Press, Boca Raton.
- [6] Ceresa, P., Petrini, L., and Pinho, R. (2008): *A fibre flexure–shear model for cyclic nonlinear behavior of RC structural elements*. Research Report ROSE-2008/07. IUSS Press: Pavia, Italy.
- [7] Scott, M.H. and G.L. Fenves. (2006) Plastic Hinge Integration Methods for Force-Based Beam-Column Elements, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 132(2):244-252.
- [8] OpenSees (2009) *Open System for Earthquake Engineering Simulation*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, <http://opensees.berkeley.edu>.
- [9] Megalooikonomou, K. G., Tastani, S. P., and Pantazopoulou, S. J. (2018) Effect of Yield Penetration on Column Plastic Hinge Length. *Engineering Structures*, Elsevier, 156, 161-174.
- [10] Sezen, H., and Moehle, J. P. (2006) Seismic Tests of Concrete Columns with Light Transverse Reinforcement. *ACI Structural Journal*, 103(6), 842-849.
- [11] Ang, B. G., Priestley, M. J. N., and Paulay, T. (1989) Seismic Shear Strength of Circular Reinforced Concrete Columns. *ACI Structural Journal*, 86(1), 45-59.