



Lehrstuhl für Subsurface Engineering

Masterarbeit

Simulation von Biegezugversuchen mit
Faserbeton



Florian List, BSc

Februar 2022



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 04.02.2022

Unterschrift Verfasser/in
Florian List

Danksagung

Ich möchte mich bei allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Subsurface Engineering für die kompetente Betreuung bedanken. Spezieller Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Robert Galler.

Ein großer Dank geht an meinen Betreuer Dipl. Ing. Manuel Kühbacher für die stetige Unterstützung in technischen und organisatorischen Belangen und die einfache freundliche Kommunikation, mit der er mir viele Schwierigkeiten erleichtert hat.

Weiters möchte ich mich bei meinen Studienkollegen und Freunden für die Unterstützung bedanken. Vor allem bei Michael Weibold für die vielen angeregten Diskussionen während der Durchführung unser beider Versuchen.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner Familie, besonders bei meinen Eltern und Geschwistern, für jede erdenkliche Unterstützung bedanken und dass sie mir dieses Studium ermöglicht haben.

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit werden Fragestellungen betreffend Faserbeton mit experimentellen und numerischen Verfahren behandelt. Allgemein stellt der 3-Punkt Biegezugversuch nach ÖNORM EN 14651 eines der gebräuchlichsten und wichtigsten Verfahren dar, um das Nachrissverhalten von Faserbeton für die konstruktive Bemessung zu beurteilen. Aus experimentellen einaxialen Druckversuchen und 3-Punkt Biegeversuchen sollen Eingabeparameter, für das im FEM-Programmpaket ABAQUS implementierte, nichtlineare Materialgesetz Concrete Damaged Plasticity (CDP) ermittelt werden. Dazu werden Parameter für den Zugbereich aus experimentellen Ergebnissen mittels dem Ansatz mit den Laborversuchsdaten, dem bilinearen und dem modifizierten bilinearem Ansatz rückgerechnet, sowie die numerischen Ergebnisse untereinander und mit dem Laborergebnissen der Biegezugversuche verglichen. Des Weiteren wird mit den repräsentativen Materialinputparametern die Veränderung der numerischen Ergebnisse bei zusätzlichem Aufbringen von horizontaler Druckspannung auf die Betonprobe beobachtet.

Abstract

The aim of this work is to answer questions concerning fiber-reinforced concrete are dealt with using experimental and numerical methods. In general, the 3-point flexural test according to ÖNORM EN 14651 is one of the most common and important methods to evaluate the post-fracture properties of fiber-reinforced concrete for structural design. From experimental unconfined compression tests and 3-point bending tests, input parameters for the nonlinear material law Concrete Damaged Plasticity (CDP) implemented in the FEM program package ABAQUS are to be determined. For this purpose, parameters for the tensile range are back-calculated from experimental results using the approach with laboratory test data, the bilinear and the modified bilinear approach, and the numerical results are compared with each other and with the laboratory results of the bending tensile tests. Furthermore, the change of the numerical results with additional application of horizontal compressive stress to the concrete specimen is observed with the representative material input parameters.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	STAND DES WISSENS	2
2.1	FASERBEWEHRUNG	2
2.1.1	<i>Klassifikation</i>	2
2.1.2	<i>Fasereigenschaften.....</i>	6
2.1.3	<i>Wirkungsweise und Prüfverfahren.....</i>	7
2.2	BIEGEZUGFESTIGKEIT	10
2.2.1	<i>Allgemeines.....</i>	10
2.2.2	<i>Einflüsse auf die Biegezugfestigkeit</i>	11
2.2.3	<i>Biegeversuche gem. ÖNORM EN 12390-5 „Unbewehrter Beton“</i>	13
2.2.4	<i>Biegeversuche gem. ÖNORM EN 14651 – „Stahlfaserbeton“.....</i>	16
2.3	BRUCHMECHANIK	17
2.4	CONCRETE DAMAGE PLASTICITY SCHÄDIGUNGSMODEL.....	22
2.4.1	<i>Fließbedingung & Fließregel</i>	22
2.4.2	<i>CDP Schädigungsmodell</i>	24
3	LABORVERSUCHE.....	27
3.1	PROBENHERSTELLUNG UND GEOMETRIE	27
3.2	VERSUCHSAUFBAU	28
3.3	ERGEBNISSE.....	31
4	NUMERISCHE SIMULATION	35
4.1	ALLGEMEINE EINSTELLUNGEN	35
4.1.1	<i>Berechnungsmethoden: Implizit vs. Explizit.....</i>	35
4.1.2	<i>Modellgeometrie und Randbedingungen</i>	36
4.2	MATERIALMODELLE	37
4.2.1	<i>Ermittlung der Eingabeparameter.....</i>	38
4.2.2	<i>Ansatz mit den Ergebnissen aus den Laborversuchen.....</i>	41
4.2.3	<i>Bilinearer Ansatz</i>	44
4.2.4	<i>Modifizierter Bilinearer Ansatz.....</i>	46
4.2.5	<i>Vergleich der Ansätze</i>	50
4.2.6	<i>Sensitivitätsanalyse</i>	54
4.3	ERGEBNISSE DER SIMULATION.....	56

5	SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK.....	64
6	LITERATURVERZEICHNIS	69
7	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	72
8	TABELLENVERZEICHNIS	75
9	ANHANG	76
9.1	MODELLE FÜR STF30	76
9.2	MODELLE FÜR STF45	93
9.3	MODELLE FÜR STF60	110

1 Einleitung

In vielen Bereichen des konstruktiven Ingenieurbaus ist die numerische Simulation von Problemstellungen heutzutage nicht mehr wegzudenken. Ein entscheidender Faktor für die Verwendung von Simulationen ist, dass sowohl Materialeigenschaften, Belastungen und Interaktionen möglichst realitätsnah modelliert werden können.

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf dem mechanischen Verhalten von Stahlfaserbeton unter Biegezugbelastung und die hierfür erforderliche realitätsnahe numerische Simulation. Normative Grundlage für die experimentellen und numerischen Biegezugversuche ist die ÖNORM EN 14651. Als geeignetes Materialgesetz für die Simulation mit FEM – Programm ABAQUS v6.14 wurde das Concrete Damaged Plasticity (CDP) Modell verwendet. Eine große Herausforderung ist die korrekte Ermittlung der Eingabeparameter, speziell für den Zugbereich. Hierfür wurden Laborergebnisse von einaxialen Druckversuchen und Dreipunktbiegezugversuchen, welche im Zuge eines Forschungsprojekts an der Technischen Universität Graz durchgeführt wurden, herangezogen. Die Eingabeparameter für den Zugbereich der Arbeitslinie von Stahlfaserbeton wurden mittels drei unterschiedlicher Ansätze aus den Laborergebnissen der Dreipunktbiegezugversuchen rückgerechnet. Hierfür wurden die Entfestigungsgesetze aus den Laborwerten, dem bilinearen Entfestigungsgesetz und dem modifizierten bilinearen Entfestigungsgesetz genauer betrachtet. Mittels Vergleiche der einzelnen Entfestigungsgesetze untereinander sowie Vergleiche mit den jeweiligen Laborergebnissen, als auch der Analyse der Abhängigkeit der Ergebnisse von der gewählten Elementgröße des Simulationsmodells wurden die Ergebnisse verifiziert. Mit den berechneten und verifizierten Eingabeparameter für die Materialeigenschaften in ABAQUS wurde die Auswirkung auf die Ergebnisse bei zusätzlichem Aufbringen einer steigenden horizontalen Druckspannung auf die Betonprobe numerisch untersucht.

2 Stand des Wissens

2.1 Faserbewehrung

Faserbeton ist durch die nicht benötigte Bewehrungsarbeit und dem dadurch reduzierten Arbeitsaufwand eine bevorzugte Alternative zum konventionellen Stahlbeton. Weitere Vorteile liegen darin, dass etwaige Bewehrungsfehler reduziert und eine geringere Abplatzungsgefahr an den Bauteilkanten besteht, da davon auszugehen ist, dass die Fasern bis in die Randzone des Bauteils ihre Wirkung entfalten können.

Auf Grund der großen Streuung in der Verteilung der Fasern im Beton und somit im Nachrisszugtragverhalten kommt Faserbeton bei tragenden Bauteilen noch selten zum Einsatz. Deshalb werden auf zug- und druckbeanspruchte Bauteile, wie zum Beispiel eine betonierte Deckenplatte, diese nur im Zusammenhang von Faserbeton mit einer konventionellen Bewehrung ausgeführt. Dabei ist die Tragsicherheit mit der konventionellen Bewehrung nachzuweisen und lediglich für die Gebrauchstauglichkeit darf die Faserbewehrung herangezogen werden. [1], [2]

In der folgenden Arbeit wird das Hauptaugenmerk auf Stahlfasern gelegt.

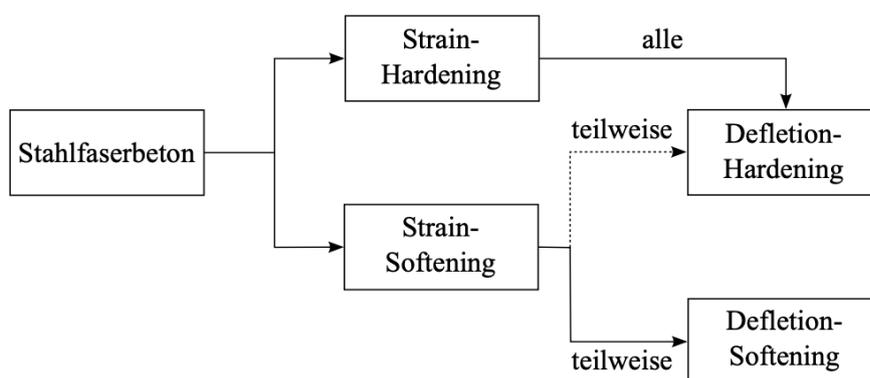


Abb.: 2-1 Einteilung von Stahlfaserbeton nach NAAMAN & REINHARDT [1]

Nach NAAMAN & REINHARDT (2003) kann Stahlfaserbeton anhand des Nachrisszugtragverhalten in zwei Gruppen eingeteilt werden (Abb.: 2-1). Einerseits in Strain-Hardening Verhalten, welches in weiterer Folge auch bei Biegezugbeanspruchung zu Deflection-Hardening führt. Andererseits gibt es das Strain-Softening Verhalten, dass sich bei Biegezugbeanspruchung in Deflection-Hardening und Deflection-Softening gliedert. Die Aufteilung des Strain-Softening Verhaltens wird hauptsächlich vom Nachrisszugverhalten und dem Kraftabfall nach dem Erstriss bestimmt. [3]

2.1.1 Klassifikation

Faserbetone können prinzipiell nach dessen Fasermaterial gegliedert werden, also in Stahlfaserbeton, Kunststofffaserbeton und anderen Faserwerkstoffen.

Faserbeton wird in faserverstärkten Schalungsbeton (FaB) und in faserverstärkten Spritzbeton (FaSpB) unterteilt. [4]

Folgend (Tabelle 2-1) werden Beispiele für die Klassifizierung und Bezeichnung in der Leistungsbeschreibung von faserverstärktem Beton angegeben und beschrieben:

C25/30 B2 FaB T 3/G 3 GK22 F52
C25/30 B2 FaB BZ 4,5/FS GK32 F52
C25/30 B7 FaB-Makro T2/BZ 4,5/G2 GK32 F45
C25/30 B2 FaB FS/BBG GK16 F52

Tabelle 2-1: Beispiele von Faserbeton-Bezeichnungen

2.1.1.1 Druckfestigkeitsklasse gemäß ÖNORM B 4710-1

Die Druckfestigkeitsklassen gemäß ÖNORM B 4710-1 sind eine Klassifizierung von Beton in Leicht-, Normal- und Schwerbeton, gefolgt vom Mindestwert der charakteristischen Zylinderdruckfestigkeit und dem Mindestwert der charakteristischen Würfeldruckfestigkeit. Diese Mindestdruckfestigkeiten sind im Alter von 28 Tagen und mittels Prüfverfahren gemäß ÖNORM EN 12390-3 zu prüfen. Bei den Bezeichnungsbeispielen in Tabelle 2-1 sind Normalbetone mit einer charakteristischen Mindestzylinderdruckfestigkeit von 25N/mm^2 und einer charakteristischen Mindestwürfeldruckfestigkeit von 30N/mm^2 angeführt. [5]

2.1.1.2 Expositionsclassen gemäß ÖNORM B 4710-1

Umgebungsbedingungen und äußere Einwirkungen auf den Beton werden nach Expositionsclassen gemäß ÖNORM B 4710-1 eingeteilt. Die Wahl der Expositionsclassen ist abhängig von den Einwirkungen, die am Ort der Verwendung des Betons gelten. Die Expositionsclassen schließen weitere Schutzmaßnahmen wie zum Beispiel korrosionsbeständige Metalle oder schützende Beschichtungen nicht aus. [5]

2.1.1.3 Faserbetonklasse T und G - Nachrissverhalten

Faserbeton wird anhand des Nachrissverhaltens in Klasse T (Tragsicherheit) und Klasse G (Gebrauchstauglichkeit) unterteilt. Dabei wird zur Unterscheidung die charakteristische äquivalente Biegezugfestigkeiten f_{eqku} und f_{eqks} herangezogen. Die in den Tabelle 2-2 und Tabelle 2-3 angegebenen Kenngrößen sind die erzielbaren Mindestwerte bei Einhaltung der geforderten Dosierung. Die äquivalenten Biegezugfestigkeiten werden für Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit unterschiedlich aus dem Nachrissverhalten des Biegeversuchs berechnet. Um den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit zu führen wird die Kraft, welche zur Durchbiegung von 0,5mm des Biegebalkens erforderlich ist, herangezogen. Im Gegensatz dazu wird für den Nachweis der Tragsicherheit eine gemittelte Kraft aus dem Bereich einer Durchbiegung des Balkens von 0,5 bis 2,5mm verwendet. [4]

Faserbetonklasse	Mindestwert der charakteristischen äquivalenten Biegezugfestigkeit für den Nachweis der Tragsicherheit f_{eqku} [N/mm ²]
T Sonderklasse	> 1,90 unter Angabe von f_{eqku}
T6	1,66
T5	1,40
T4	1,15
T3	0,89
T2	0,64
T1	0,38

Tabelle 2-2: Mindestwerte der charakteristischen äquivalenten Biegezugfestigkeit der T – Klasse [4]

Faserbetonklasse	Mindestwert der charakteristischen äquivalenten Biegezugfestigkeit für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit f_{eqks} [N/mm ²]
G Sonderklasse	> 2,20 unter Angabe von f_{eqks}
G 6	1,91
G 5	1,66
G 4	1,40
G 3	1,15
G 2	0,89
G 1	0,51

Tabelle 2-3: Mindestwerte der charakteristischen äquivalenten Biegezugfestigkeit der G – Klasse [4]

2.1.1.4 Biegezugfestigkeitsklassen BZ - Erstrissverhalten

Faserbeton wird neben dem Nachriss- auch anhand des Erstrissverhaltens klassifiziert. Hierfür wird die maximale charakteristische Biegezugfestigkeit ermittelt, welche zumindest die Grenzwerte in Tabelle 2-4 bei einer Mindestdosierung der Fasern erreichen muss.

Biegezugfestigkeitsklasse ¹⁾	Mindestwert der charakteristischen Biegezugfestigkeit [N/mm ²] $f_{fk,fl}$
BZ 3,0	2.15
BZ 4,5	3.20
BZ 6,0 ²⁾	4.25

1) abgeleitet aus den Mindestwerten der mittleren Biegezugfestigkeit

2) ist in der Regel erst ab einer Druckfestigkeitsklasse C30/37 erreichbar

Tabelle 2-4: Mindestwerte der charakteristischen Biegezugfestigkeit zur Einteilung in BZ – Klassen [4]

2.1.1.5 Faserbetonklasse BBG und FS

Weitere Bezeichnungskürzel sind BBG zur *Erhöhung der Brandbeständigkeit* und FS zur *Reduktion der Frühschwindrisse*.

Der Nachweis der erhöhten Brandbeständigkeit BBG wird mit Hilfe eines standardisierten Großversuchs nach ÖVBB Richtlinie (Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik) nachgewiesen. Dabei werden zwei Versuchskörper mit Abmessungen von 180cm x 140cm x 50cm und einer vom Antragsteller definierten Betonrezeptur und Fasergehalt hergestellt. Die Versuchsdauer beträgt 120 Minuten und es werden Brandraumtemperaturen nach der RWS Brandkurve (Rijkswaterstaat Brandkurve) gefahren. 15 Minuten nach Versuchsende werden die Versuchskörper angehoben und die Abplatzungen optisch beurteilt. Um den Faserbeton in die Faserbetonklasse BBG einzuteilen, darf die mittlere Abplatzungstiefe nicht mehr als 1cm betragen und an keiner Stelle die Bewehrung freiliegen. [6]

Die RWS Brandkurve ist eine international anerkannte Brandversuchskurve im Tunnelbau. Diese berücksichtigt den Umstand, dass im Brandfall die Tunnelwände und das umgebende Felsgestein die Wärme sehr langsam aufnehmen, die Lufttemperatur jedoch bereits nach wenigen Minuten auf 1.300°C ansteigt. [7]

Dieser Brandversuch ist eine Grundsatzprüfung für die Faserherstellung und somit für dessen Zulassung notwendig.

FS Klasse	Risslänge [%]	
	Vergleichsbeton ohne Fasern	Faserbeton
FS	100 %	20 %

Tabelle 2-5: Verringerung der Frühschwindrissbildung – FS Klasse [4]

Das Ziel der FS – Klassifizierung ist die Unterscheidung in der Frühschwindrissbildung zwischen Beton mit und ohne Fasern, sowie jenen mit gemischten Fasermaterialien. Dabei wird die Reduktion der Frühschwindrisslänge von Betonen mit Faserbewehrung prozentuell zur Länge der Risse bei Nullbeton (in Tabelle 2-5 mit „100%“ bezeichnet) ermittelt (Tabelle 2-5). Eine geringe Rissreduktion wird durch eine geringe FS – Klasse, eine große Reduktion durch eine hohe FS – Klasse berücksichtigt. [4]

2.1.2 Fasereigenschaften

Die Faser als Bewehrung im Beton hat diverse Eigenschaften zu erfüllen. Dazu muss der Faserhersteller folgende Eigenschaften anführen: [4]

- Herstellungsart
- Art und Einheit der Verpackung
- Lagerungsbedingungen
- Zugfestigkeit
- E-Modul bei Makrofasern
- Länge
- Querschnittsform
- Durchmesser bzw. Querschnittsabmessung
- Oberflächenbeschaffenheit und Verankerung
- Toleranzen
- Sicherheitshinweise

In Tabelle 2-6 sind übliche Stahlfasern mit deren Eigenschaften aufgelistet.

Werkstoff	Dichte g/cm ³	E-Modul N/mm ²	Zugfestigkeit N/mm ²	Bruchdehnung %	Alkali- beständigkeit	Schmelzpunkt °C
Stahl	7,85	210000	270 - 2500	3,5	sehr gut	1500
nicht rostender Stahl	7,9	185000 - 200000	1000 - 1500	3,0	sehr gut	1400 - 1600
AR-Glas	2,7	70000 - 80000	1500 - 4000	2 - 3,5	gut	1200
E-Glas	2,6	70000 - 80000	2000 - 4000	4,5	gering	1200
Polypropylen	0,9	3000 - 15000	300 - 700	15	sehr gut	150
Polyacrylnitril	1,2	15000 - 20000	600 - 900	6 - 9	sehr gut	400
Nylon	1,14	4000	900	13,5	sehr gut	200
Kohlenstoff	1,6	30000 - 35000	500 - 800	2	sehr gut	400
HF Kohlenstoff	1,9	230000	1500 - 3000	1	sehr gut	500
Zellulose	1,2 - 1,5	5000 - 40000	200 - 500	3	gering	
Sisal	1,8	10000 - 25000	250 - 500	3 - 5	gering	
Zum Vergleich:						
Zementstein	2,0 - 2,2	10000 - 25000	3 - 6	0,01 - 0,05		
Beton	2,2 - 2,4	30000 - 40000	1 - 4	0,02		

Tabelle 2-6: Fasermaterialien im Vergleich zu Beton und Zementstein [4]

In Tabelle 2-7 sind unterschiedliche Querschnittsformen und Herstellungsmethoden von Fasern gegenübergestellt.

Art der Herstellung	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Form in Längsrichtung	Länge l_f [mm]	Querschnittsform	Durchmesser $d_{\bar{a}q}$ Querschnittsform (b x h) [μm][μm]	Oberflächenbeschaffenheit
Ziehvorgang	900 - 2500	gerade gewellt, Endverformung	15 - 100	Kreis	20 - 1300	glatt geriffelt
spanabhebend	700 - 1000	gerade Endverformung	15 - 60	Sichel	(b-b) x (h-h)	rau
gespalten, stanzend	270 - 1000	gerade gewellt profiliert	20 - 60	Rechteck	1000 - 3000 x 200 - 600	glatt geriffelt
schälend	500 - 1000	gerade gewellt	30 - 60	Kreissegment	400 - 900 x 1000 - 3000	glatt geriffelt

Tabelle 2-7: Handelsübliche Stahlfasertypen [4]

2.1.3 Wirkungsweise und Prüfverfahren

Die Faserbewehrung im Beton hat die Aufgabe zur Erhöhung der Zugfestigkeit und Duktilität des Betons, sowie die Verbesserung des Rissverhaltens und Energieaufnahmevermögens bei Druck- und Zugbeanspruchungen. Diese Eigenschaften werden einerseits durch die Reduktion der Mikrorissbildung und -ausbreitung und andererseits durch die Behinderung der Rissaufweitung erzielt. Trifft ein Mikroriss, welcher durch Zwangs- und Eigenspannungen entstanden ist, auf eine Faser, so werden die Zugspannungen auf die Faser transferiert und der Rissfortschritt somit verhindert. Dadurch entsteht lediglich eine hohe Anzahl an unbedenklichen Mikrorissen. Bei voranschreitender Steigerung der Belastung wachsen die unzähligen Mikrorisse zusammen und bilden somit Makrorisse. Durch die Relativbewegung zwischen Fasern und dem Zementstein bei der Rissaufweitung werden Zugkräfte über die Verbundspannungen auf rissüberbrückende Fasern übertragen und die Aufweitung somit verlangsamt bzw. verhindert (Abb.: 2-2). [8], [9]

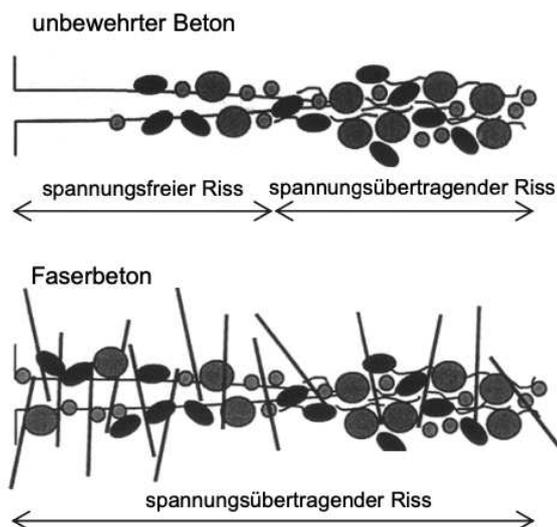


Abb.: 2-2: Skizzierte Darstellung eines Risses in unbewehrten und faserbewehrten Beton [8]

Die vorhin beschriebenen Eigenschaften nehmen mit steigendem Fasergehalt zu. Die untere Grenze stellt dabei der kritische Fasergehalt dar, welcher sich aus dem Zugfestigkeitsverhältnis von Matrix und Faser sowie aus zwei Faktoren für die Orientierung und dem Verbund zwischen Matrix und Faser berechnet. Fasergehalte unter dem kritischen Fasergehalt führen zu Eigenschaften eines nahezu unbewehrten Betons. Bei überkritischen Fasergehalten ist bei Übertragung der Zugspannungen auf die Fasern im gerissenen Beton eine weitere Spannungssteigerung im Nachrissverhalten möglich (Hardening Verhalten). [8]

Die Obergrenze wird von der noch möglichen Verarbeitbarkeit des Faserbetons festgelegt. Ebenso ist auch die Wirtschaftlichkeit ein maßgeblicher Faktor für die Zugabemenge an Faserbewehrung im Beton.

Ein weiteres Augenmerk ist auf die kritische Faserlänge zu legen. Die spannungsübertragende Wirkung der Fasern kann entweder durch Ausziehen der Faser oder durch dessen Reißen verloren gehen. Die kritische Faserlänge l_{crit} ist jene Länge, bei der die Zugfestigkeit der Faser gleich der Schubspannungen an der Fasermantelfläche ist. Diese kritische Faserlänge führt zu relativ hohen Faserschlankheiten, welche durch das Verhältnis von Länge zu Durchmesser (l/d) beschrieben werden. Bei Faserabmessungen unter der kritischen Faserlänge kommt es zum Ausziehen der Faser aus der Matrix und bei größeren Abmessungen zum Versagen durch Überschreiten der Faserzugfestigkeit. [8], [9]

Ebenso hat auch die Faserverteilung und Orientierung einen wesentlichen Einfluss auf die Faserbetoneigenschaften. Die Faserverteilung ist direkt von der Größe der Gesteinskörnung beeinflusst. Zuschläge, die größer als der mittlere theoretische Faserabstand sind, führen zu ungleichmäßiger Faserverteilung und dieser Effekt ist ausgeprägter, je größer die Zuschlagskörner sind. Daher sollte das Größtkorn der Gesteinskörnung ein Drittel der Faserlänge nicht überschreiten.

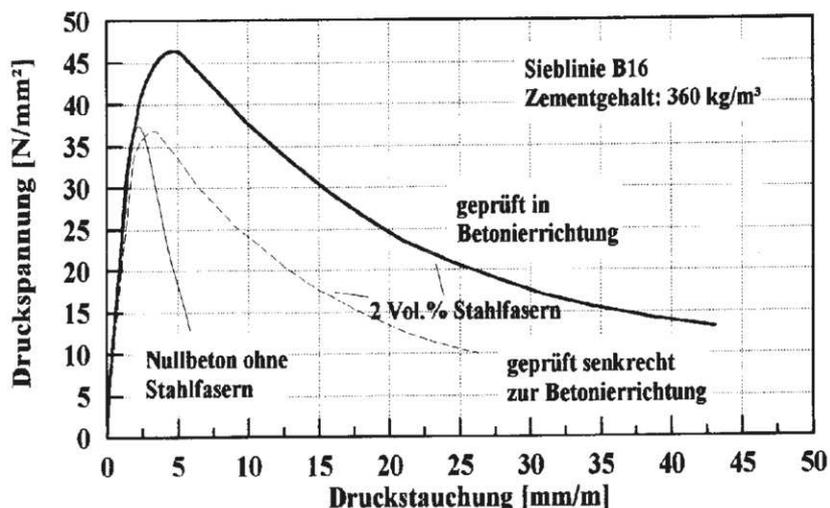


Abb.: 2-3: Spannungs-Stauchungslinie in Abhängigkeit der Faserorientierung [8]

Die Faserorientierung kann sich je nach Belastungsrichtung günstig oder ungünstig auf das Materialverhalten auswirken und resultiert hauptsächlich aus der Art der Betonherstellung und dessen Einbringung. In Bauteilbereichen nahe von geschalteten Oberflächen ist eine zweidimensionale Faserausrichtung parallel zur Oberfläche festzustellen. Die Orientierung der Fasern hat einen erheblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des ausgehärteten Betons. Wie in Abb.: 2-3 ersichtlich, werden beim Prüfen senkrecht zur maßgebenden Faserorientierung (senkrecht zur Betonierrichtung) höhere Druckspannungen erreicht als bei Belastungen parallel zur Faserausrichtung. Im Gegensatz dazu werden bei Zugbelastungen parallel zur Faserorientierung höhere Festigkeiten erreicht. [8], [9]

Im Vergleich zum konventionellen (Stahl-) Beton werden zahlreiche mechanische Eigenschaften durch den Einsatz von Faserbewehrung beeinflusst. Die Bruchdehnung und Bruchenergie bei Zug- und Druckbelastung wird durch Faserbewehrung gesteigert. Zug- und Biegezugfestigkeit werden ebenfalls erhöht. Weiters wird das Schwinden und Kriechen beim Aushärten des Betons und die dadurch entstehende Rissbildung reduziert. Auch die Tragfähigkeit nach der Ausbildung eines Trennrisses wird ebenfalls durch die Beigabe von Fasern im Beton erhöht. [8], [9]

Zusätzlich zu den mechanischen Eigenschaften erhöhen Fasern, im speziellen die Mikro-Kunststofffasern, die Brandbeständigkeit von Beton. Bei Temperaturanstieg kann bei konventionell bewehrtem Beton, vor allem beim Einsatz von höherwertigem Beton, das physikalisch gebundene Wasser auf Grund von einer zu geringen Anzahl an Poren, speziell von Kapillarporen, nicht rasch genug an die Oberfläche abgeführt werden. Der entstehende Wasserdampfdruck führt an den äußersten Betonbereichen zu Abplatzungen und die darunterliegende Stahlbewehrung verliert dadurch die schützende Wärmedämmschicht, was bei weiterem Temperaturanstieg zu einer Reduktion der Stahlfestigkeit führt. Durch die Zugabe von Mikro- Kunststofffasern entsteht im Brandfall durch das Schmelzen dieser Fasern zusätzliches Porenvolumen. Der beim Brandereignis entstehende Wasserdampf im Bauteil kann sich in diesen Poren entspannen und somit werden Abplatzungen deutlich reduziert. Ein Richtwert

zur Dosierung dieser Mikro- Kunststoffaser aus Polypropylen(PP-Fasern) liegt bei mindestens $1,0 \text{ kg/m}^3$ bis $2,0 \text{ kg/m}^3$. [2], [9], [10]

Zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von Stahlfaserbeton gibt es, speziell für die Biegezugfestigkeit, zwei unterschiedliche Regelwerke. Einerseits die ÖNORM EN 14651, basierend auf ModelCode 2010, und des Weiteren die Richtlinie „Faserbeton“ der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB). Während in der Richtlinie „Faserbeton“ der 4-Punkt Biegeversuch zur Ermittlung der Biegezugfestigkeit angeführt wird, ist in der ÖNORM EN 14651 der 3-Punkt Biegeversuch am gekerbten Biegebalken beschrieben. Folgend wird, auf Grund des in der Praxis bevorzugten 3-Punkt Biegeversuchs, auf die die ÖNORM EN 14651 näher eingegangen. [4], [11]–[14]

2.2 Biegezugfestigkeit

Beton wird anhand der Mindestdruckfestigkeit nach 28 Tagen nach dessen Herstellung klassifiziert. Weitere, maßgebende mechanische Eigenschaften des vollkommen ausgehärteten Betons zur Bemessung von Bauteilen werden durch die Zugfestigkeit und Biegezugfestigkeit charakterisiert. Diese entsprechen vom Betrag her in etwa ein Zehntel der erreichbaren Druckfestigkeit.

2.2.1 Allgemeines

Bei einem direkten zentrischen Zugversuch mit einem möglichen Versuchsaufbau, wie in Abb.: 2-4a schematisch dargestellt, ist die Zugfestigkeit der Probe die über den Querschnitt maximale aufnehmbare Zugkraft. Für Betonproben und Proben aus anderen quasi-spröden Materialien ist ein hoher Aufwand nötig die Zugfestigkeit mit dem direkten Zugversuch realitätsnah zu ermitteln. Probleme wie Spannungskonzentrationen im Einspannbereich und Exzentrizitäten beim Einsetzen der Probe können zu stark variierenden Ergebnissen führen. Durch Verkleben der Probe mit dem Anschlussstück, wie in Abb.: 2-4b dargestellt, können Spannungskonzentrationen vermindert werden. Eine exzentrisch wirkende Zugkraft kann mit einer gelenkig gelagerten Krafteinleitungsvorrichtung (siehe Abb.: 2-4a) verhindert werden. Auf Grund dieser Probleme und der dadurch nötigen aufwendigen Versuchsdurchführung wird für die Ermittlung der Zugfestigkeit auf die erheblich einfachere Bestimmung mittels Biegezugversuchen und Spaltzugversuchen zurückgegriffen. [9], [15]

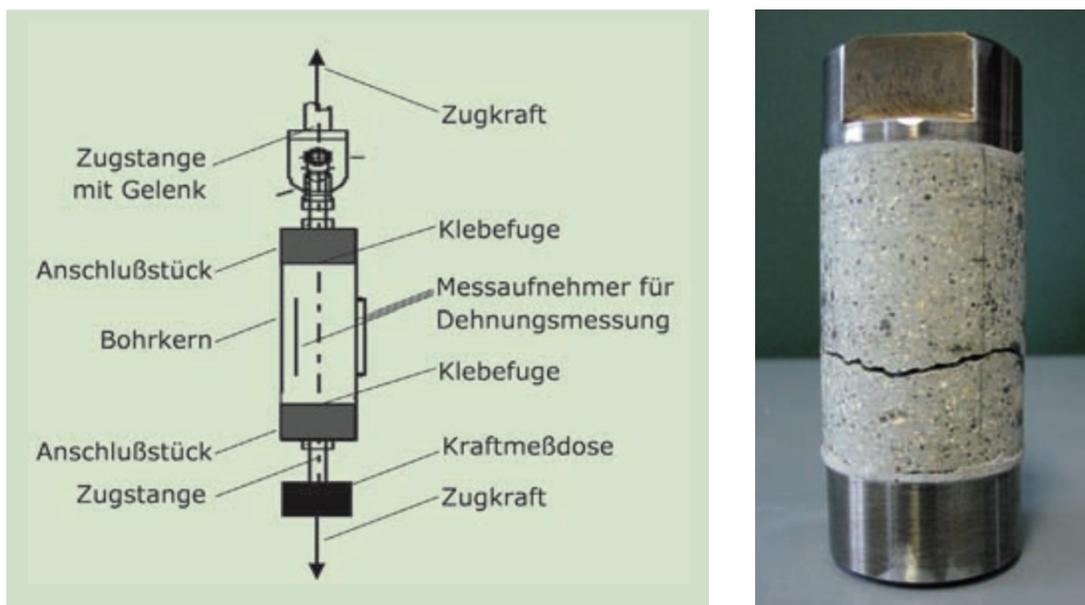


Abb.: 2-4: a) Skizze eines direkten Zugversuchsaufbau, b) gerissene Betonprobe eines direkten Zugversuchs (rechts) [16]

Die Biegezugfestigkeit ist gemäß Biegetheorie des Balkens unter der Annahme eines linear-elastischen Verhaltens die maximale aufnehmbare Zugspannung in der Randfaser auf der Balkenunterseite. Unter der Annahme nach Navier-Bernoulli, dass der Balkenquerschnitt bei Durchbiegung eben bleibt, und linearem Verhalten von Dehnungs- und Spannungsverteilung über den Querschnitt, errechnet sich die Biegezugfestigkeit aus dem Maximalmoment und dem Widerstandsmoment. Tatsächlich ist laut NIELSEN (1954), WRIGHT et al (1952) und TIMOSHENKO (1934) die maximale Randspannung im Bruchzustand nicht gleich der Zugfestigkeit. So ist die nach Navier-Bernoulli errechnete Randspannung beim 3-Punkt-Biegeversuch größer und beim 4-Punkt-Biegeversuch kleiner als die tatsächliche Biegezugspannung. [9], [17]–[19]

2.2.2 Einflüsse auf die Biegezugfestigkeit

Viele Faktoren beeinflussen in unterschiedlicher Art und Weise die Biegezugfestigkeit und müssen deshalb unbedingt berücksichtigt werden. Während Einflussgrößen wie Form, Abmessungen und Prüfverfahren der Regelwerke zu entnehmen sind, so müssen Faktoren wie Zementgehalt, Kornform, Kornzusammensetzung, Alter und Nachbehandlung der Probekörper berücksichtigt werden und zumindest über die Versuchsreihe konstant gehalten werden.

Wichtiger Einflussfaktor auf die Biegezugfestigkeit ist neben der Zementzusammensetzung auch die Güte des Zementsteins, die bei vollständiger Verdichtung vor allem vom Wasser-Bindemittel Wert (W/B Wert) bestimmt wird. So steigt die Biegezugfestigkeit mit steigendem Zementgehalt bzw. mit sinkendem W/B Wert. [20], [21]

Die Biegezugfestigkeit wird sowohl von der Kornzusammensetzung als auch von der Kornform bzw. Oberfläche der Körner aufgrund der Verzahnung zwischen den Zuschlagstoffen beeinflusst. Eine gleichmäßige Sieblinie der Gesteinskörnung sowie

gebrochenes Korn mit rauer Oberflächenbeschaffenheit und splittriger Formgebung erbringen 10-20% höhere Biegezugfestigkeiten als rundlich, gedrungene Gesteinskörner. [21], [22]

Die Biegezugfestigkeit ist auch vom Probenalter abhängig. Diese steigt vom Herstellungszeitpunkt der Probe mit zunehmender Aushärtezeit signifikant bis zum Tag 28 an und erreicht viel früher ihren Maximalwert als im Vergleich dazu dessen Druckfestigkeit. Nach 28 Tagen ist die Festigkeitszunahme jedoch nur noch sehr gering und kann somit vernachlässigt werden. Aus diesem Grund haben die Lagerungsbedingungen und die Nachbehandlung nach der Probenherstellung einen großen Einfluss auf die Entwicklung der Biegezugfestigkeit. [20]–[22]

Beton benötigt zur vollständigen Aushärtung feuchte Umgebungsbedingungen, um an der Oberfläche nicht allzu schnell auszutrocknen und ein Feuchtigkeitsgefälle im Querschnitt zu unterbinden. Stellt sich durch eine mangelnde Nachbehandlung ein Feuchtigkeitsgefälle ein, entstehen durch Schwinden Druckspannungen im Kern und Zugspannungen am Rand, wodurch bei zusätzlich aufgebrachter Biegebeanspruchung die Biegezugfestigkeit aufgrund der überlagerten Schwindzugspannungen um bis zu 50% geringer ausfällt. So hat NIELSEN (1954) in Versuchen bei einer Temperatur von 20°C festgestellt, dass Proben, welche 28 Tage im Wasserbad gelagert wurden, eine 30% höhere Biegezugfestigkeit aufweisen als jene Proben, welche lediglich 21 Tage im Wasser gelagert wurden. Hat sich das Feuchtigkeitsgefälle zwischen Randzone und Kern durch weitere Austrocknung komplett abgebaut, so steigt die Biegezugfestigkeit wieder an und kann sogar jene der Feuchtlagerung überschreiten, falls keine Schädigung bereits zuvor eingetreten ist. [19], [22], [23]

Die Umgebungstemperatur hat durch die dadurch entstehenden Temperaturspannungen, analog zum Feuchtigkeitsgefälle, einen abmindernden Einfluss auf die Biegezugfestigkeit. [19], [22], [23]

Auch die Probengröße beeinflusst das Ergebnis maßgebend. Die Biegezugfestigkeit nimmt mit zunehmender Höhe des Prismas ab. Ein Biegebalken mit 45cm Höhe weist eine um 15% geringere Biegezugfestigkeit auf als im Vergleich ein Balken mit einer Höhe von 15 cm. Im Gegensatz dazu steigt bei Prismen mit einer Schlankheit kleiner dem Verhältnis von $l/h = 5$ die Biegezugfestigkeit an, da die Dehnungen sich nicht mehr linear über den Querschnitt verteilen. [9], [17], [20], [22], [23]

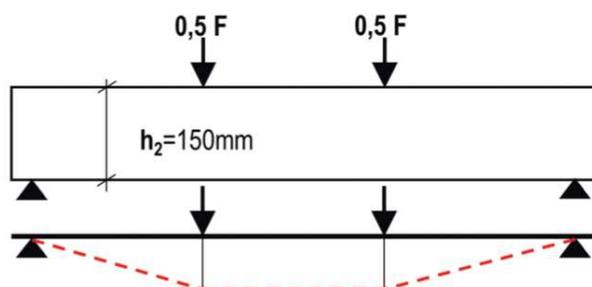


Abb.: 2-5: Vier-Punkt Biegeversuch mit Momentenverlauf [12]

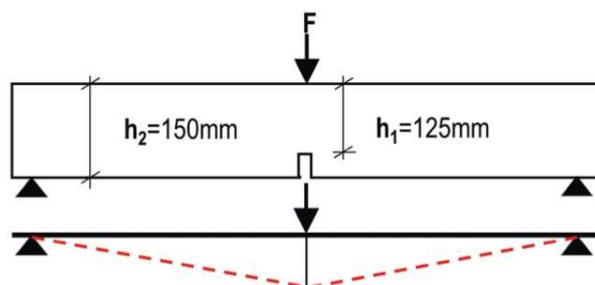


Abb.: 2-6: Drei-Punkt Biegeversuch mit Momentenverlauf [12]

Bei den Prüfverfahren unterscheidet man zwischen dem Drei-Punkt-Biegeversuch mit zentrischem Lastangriff und dem Vier-Punkt-Biegeversuch mit Lastangriff in den Drittelpunkten. Beim Vier-Punkt Versuch ergibt sich eine trapezförmige Momentenverteilung (siehe Abb.: 2-5) mit konstantem Maximalmoment zwischen den beiden Lastangriffspunkten. Das für den Bruch maßgebende Maximalmoment erstreckt sich somit über ein Drittel der Balkenlänge, und aus diesem Grund wird vorwiegend die Zugfestigkeit an einer lokalen Schwachstelle überschritten. Bei mittigem Lastangriffspunkt hingegen, bricht der Balken im Bereich des größten Biegemomentes, welcher sich in der Mitte des Balkens befindet (siehe Abb.: 2-6). Im Vergleich zwischen Drei- und Vier-Punkt-Biegeversuch ergeben sich somit beim Vier-Punkt-Biegeversuch 10-30% geringere Festigkeiten aufgrund des Einflusses durch lokale Schwachstellen oder Inhomogenitäten im sich über die große Länge erstreckenden Bereich des maximalen Biegemomentes. [20]–[23]

2.2.3 Biegeversuche gem. ÖNORM EN 12390-5 „Unbewehrter Beton“

Die Abmessungen der Betonprobe, Art des Prüfverfahrens sowie die Lagerung sind in der europäischen Normenreihe mit nationalem Anhang ÖNORM EN 12390 – „Prüfung von Festbeton“ geregelt. Hier sind vor allem Teil 1 (*Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen*), Teil 2 (*Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen*) und Teil 5 (*Biegezugfestigkeit von Probekörpern*) von Interesse. [24]–[26]

2.2.3.1 Geometrie und Abmessung

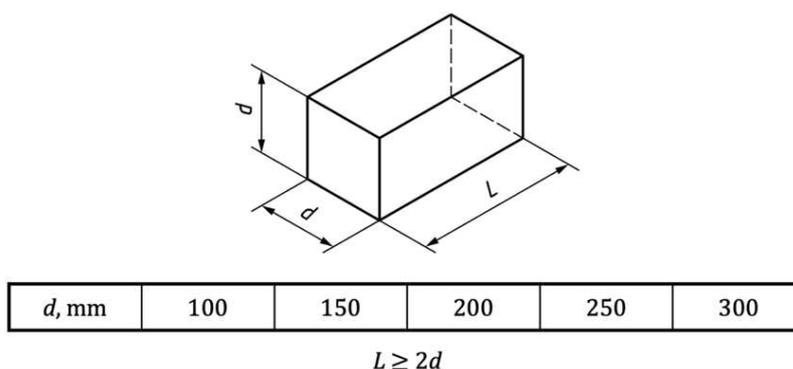


Abb.: 2-7 Abmessungen eines prismatischen Betonprobekörpers [24]

Die Abmessungen für prismatischen Betonproben, die für genormte Biegeversuche verwendet werden, sind in ÖNORM EN 12390-1 geregelt und in Abb.: 2-7 ersichtlich. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass die Länge L größer-gleich des zweifachen Nennmaßes (d) ist, sowie das Nennmaß (d) mindestens dreieinhalbfach so groß wie der Größtkorndurchmesser (D_{\max}) des Betons ist. [24]

2.2.3.2 Prüfverfahren

Als Prüfverfahren für die Biegezugfestigkeit nach ÖNORM EN 12390-5 gibt es zwei Möglichkeiten der Lastaufbringung – den 3-Punkt Biegeversuch und den 4-Punkt Biegeversuch.

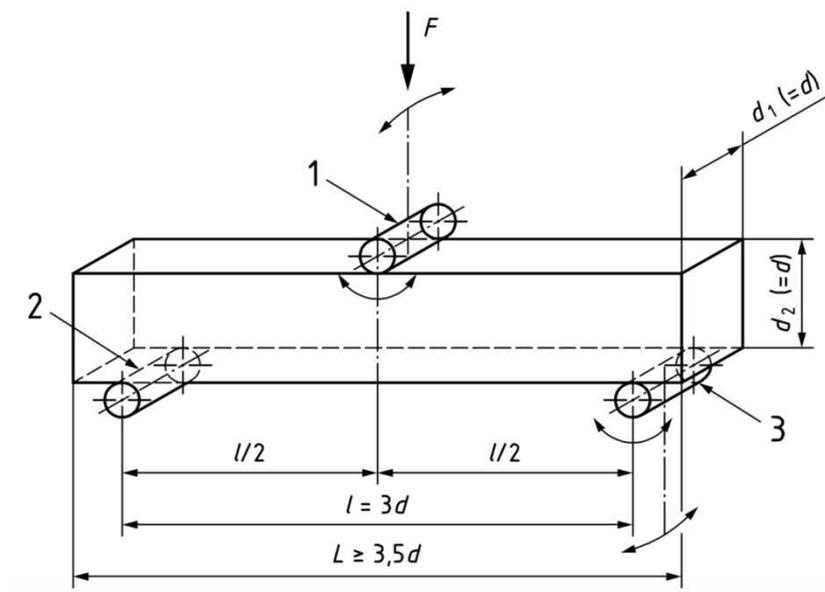


Abb.: 2-8: Aufbau und Abmessungen eines Drei-Punkt Biegeversuches [26]

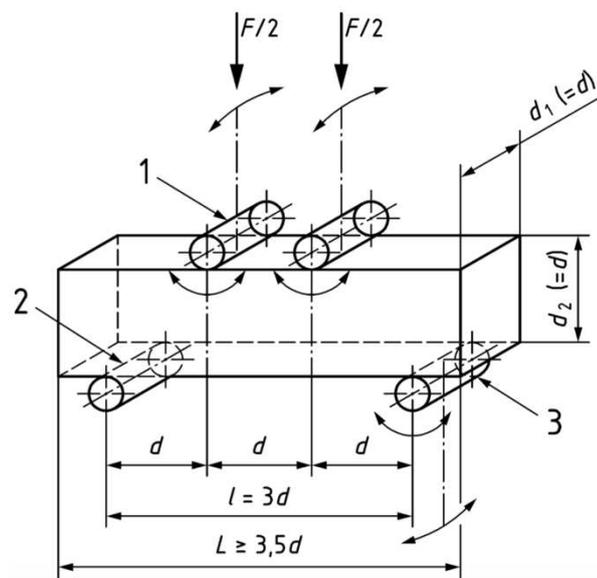


Abb.: 2-9: Aufbau und Abmessungen eines Vier-Punkt Biegeversuches [26]

In Abb.: 2-8 und Abb.: 2-9 sind beide Versuchsanordnungen ersichtlich. Es ist darauf zu achten, dass die Stahlrollen einen Durchmesser von 20-40mm aufweisen und mindestens 5mm je Seite über die Balkenbreite hinausragen.

Die Belastung darf erst dann aufgebracht werden, wenn die Auflagerrollen gleichmäßig am Probekörper aufliegen. Die konstante und stoßfreie Belastungszunahme muss, gemäß Norm, im Bereich von 0,04MPa/s und 0,06MPa/s liegen, wobei die Belastungsrate nach Gl. 2-2 für den 3-Punkt Biegeversuch und nach Gl. 2-4 für den 4-Punkt Biegeversuch zu berechnen ist. [26]

Alle Rollen sind um ihre Längsachse frei drehbar gelagert, wobei die Lastaufbringungsrolle und eine Auflagerrolle zusätzlich senkrecht zur Längsachse kippbar ausgeführt werden muss. Die Berechnung der Biegezugfestigkeit für den 3-Punkt Biegeversuch erfolgt durch Gl. 2-1.

$$\text{Gl. 2-1:} \quad f_{ct,fl} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2}$$

$$\text{Gl. 2-2:} \quad R = \frac{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2 \cdot s}{3 \cdot l}$$

Beim 4-Punkt Biegeversuch müssen im Gegensatz zum 3-Punkt Versuchsaufbau drei Rollen, davon beide Lastaufbringungs- und eine Auflagerrolle, kippbar ausgeführt werden. Die Berechnung der Biegezugfestigkeit erfolgt für den 4-Punkt Biegeversuch durch die Gl. 2-3. [26]

$$\text{Gl. 2-3:} \quad f_{ct,fl} = \frac{F \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2}$$

$$\text{Gl. 2-4:} \quad R = \frac{s \cdot d_1 \cdot d_2^2}{l}$$

2.2.3.3 Probenlagerung und Nachbehandlung

Nach Herstellung der Betonkörper haben diese mindestens 16h bis maximal 3 Tage in der Schalung zu verbleiben, bis diese anschließend in einem Wasserbad oder einer Feuchteammer bei einer Temperatur von 20 +/- 2°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von mehr als 95% gelagert werden. In der Prüfmaschine selbst darf der Probekörper lediglich 4h gelagert werden, bevor dieser vor zu großem Feuchtigkeitsverlust geschützt werden muss. Innerhalb von 10h nach der Entnahme aus der Lagerungsbedingung hat die jeweilige Prüfung zu erfolgen. Die Lagerungsdauer selbst wird je nach Fragestellung des Versuchs definiert. Übliche Zeitspannen zwischen Probenherstellung und Versuchsdurchführung betragen 3, 7 oder 28 Tage. [25], [26]

2.2.4 Biegeversuche gem. ÖNORM EN 14651 – „Stahlfaserbeton“

Die Abmessung sowie Durchführung für Biegebalkenversuche von Stahlfaserbeton ist in der ÖNORM EN 14651 „Prüfverfahren für Beton mit metallischen Faser - Bestimmung der Biegezugfestigkeit“ genau definiert.

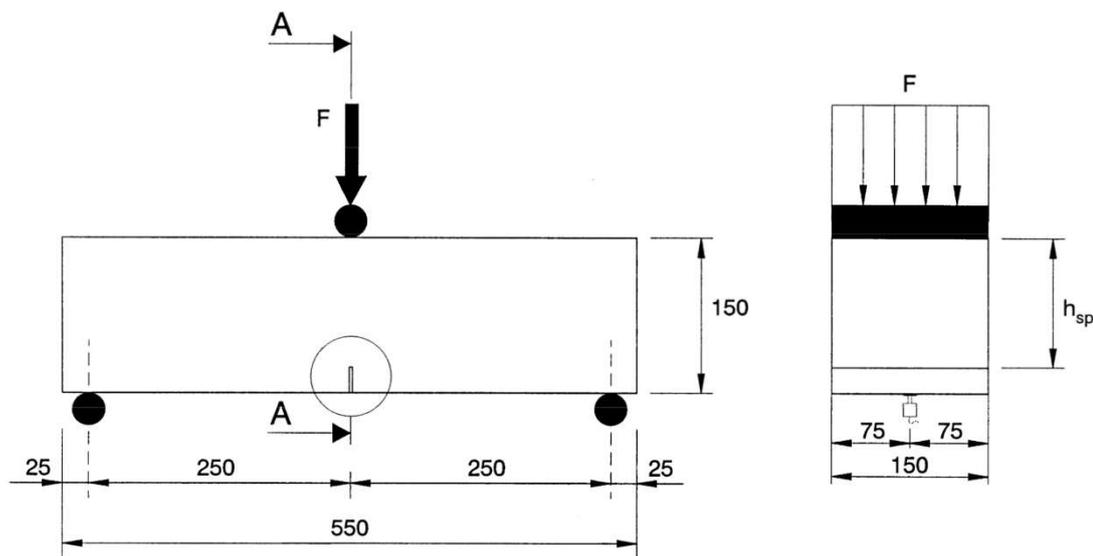


Abb.: 2-10 Typische Versuchsanordnung und -abmessungen für Stahlfaserbeton [13]

Biegezugfestigkeiten werden mit dem 3-Punkt Biegeversuch an gekerbten Prismen durchgeführt. Dabei unterscheiden sich die Abmessungen ein wenig von der ÖNORM EN 12390-1. Das Nennmaß für die Breite B und Höhe H des quadratischen Querschnitts beträgt 150 mm mit einer Länge L zwischen 550 mm – 700 mm. Die Stützweite zwischen den Auflagerrollen hat 500 mm zu betragen, wobei die Rollen einen Mindestdurchmesser von 30 mm aufweisen und 10 mm länger als die Prismenbreite sein müssen (Abb.: 2-10). [13]

Die Kerbe wird nach dem Ausschalen des Balkens mit einer dafür geeigneten Säge eingeschnitten, wobei eine Tiefe von 25 mm und eine Maximalbreite von 5 mm nicht überschritten werden soll. Somit ergibt sich eine Balkenresthöhe im Bereich der Kerbe von $h_{sp} = 125$ mm (Abb.: 2-10)

Das Größtkorn darf maximal 32 mm betragen und die metallischen Fasern eine Maximallänge von 60 mm aufweisen. Diese Einschränkung ist deshalb erforderlich, da sonst die Probengeometrie im Verhältnis zu den Zuschlagstoffen und Fasern nicht mehr ausreichend ist und der Größeneinfluss überwiegen würde. Das Einfüllen der Betonmasse erfolgt in der Reihenfolge wie in Abb.: 2-11 dargestellt, wobei die Betonmenge 1 ungefähr das Doppelte der Menge 2 entsprechen sollte. Zusätzlich ist zu beachten, dass vor der Verdichtung die Schalung zu circa 90 % ausgefüllt ist.

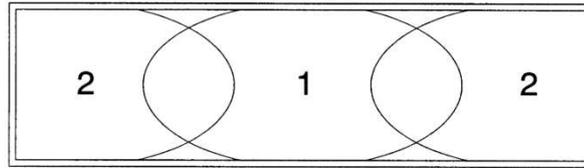


Abb.: 2-11 Einfüllabfolge in die Schalung [13]

Im Zuge der Versuchsdurchführung wird die Kraft F sowie die Rissöffnung – *Crack Mouth Opening Displacement CMOD* oder die Durchbiegung δ ermittelt. Die Umrechnung von CMOD zur Durchbiegung wird in der ÖNORM EN 14651 gemäß Gl. 2-5 definiert. [13]

$$\text{Gl. 2-5:} \quad \delta = 0,85 \cdot \text{CMOD} + 0,04$$

Ergebnis der Versuchsdurchführung ist die Proportionalitätsgrenze *Limit of Proportionality LOP*, also die maximale Biegezugfestigkeit im Intervall CMOD 0,00mm – 0,05mm und die residuelle Biegezugfestigkeit an der Rissöffnung CMOD_j. Beide Werte werden mit Gl. 2-6 berechnet. [13]

$$\text{Gl. 2-6:} \quad f_{ct,j} = \frac{3 \cdot F_j \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2}$$

2.3 Bruchmechanik

Um das Verhalten eines Risses beschreiben zu können muss definiert werden, dass ein Riss in der Bruchmechanik aus makroskopischer und kontinuumsmechanischer Betrachtung ein idealisierter Schnitt oder Schlitz in einem Körper darstellt. [27], [28]

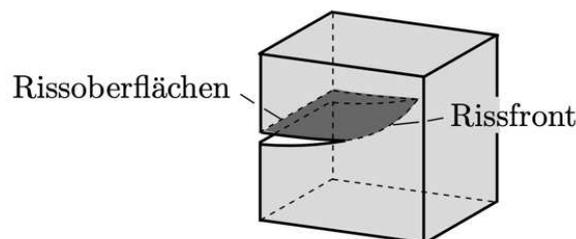


Abb.: 2-12 Bezeichnungen eines Risses in der Bruchmechanik [27]

Dabei wird einerseits eine flächenhafte Auftrennung, sowie ein unendlich kleiner Krümmungsradius in der Risspitze angenommen. Wie in Abb.: 2-12 ersichtlich werden die meist belastungsfreien gegenüberliegenden Seiten *Rissoberflächen* (3D) oder *Rissufer* (2D) genannt und das Rissende als *Rissfront* (3D) oder *Risspitze* (2D) bezeichnet. [27]–[29]

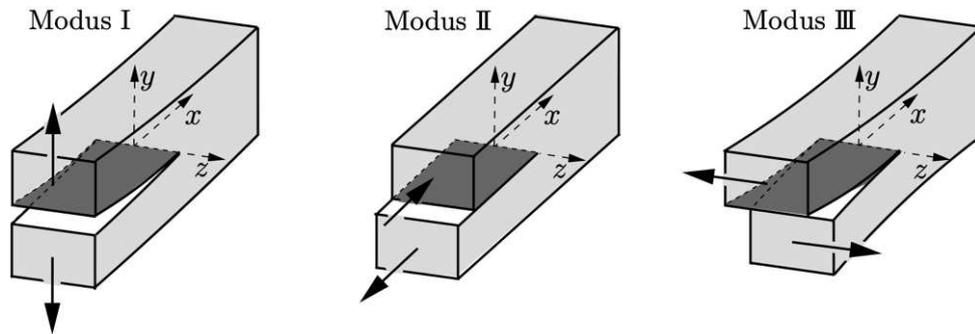


Abb.: 2-13 Rissöffnungsarten [27]

In Hinsicht auf die *Rissöffnungsarten* des Risses wird zwischen drei verschiedenen Modi differenziert (Abb.: 2-13). Diese unterscheiden sich in der zueinander erfolgenden Relativbewegung der gegenüberliegenden Rissufer.

- Modus 1:** Öffnung des Risses senkrecht zur x - z Rissebene. Dieser Modus wird auch als *Öffnungsmodus (opening mode)* bezeichnet.
- Modus 2:** Die Rissufer verschieben sich senkrecht zur Risspitze, welche einer transversalen Schubbeanspruchung entspricht. Dieser Modus wird auch als *Ebener Schermodus (engl. sliding mode)* bezeichnet.
- Modus 3:** Die Rissufer verschieben sich parallel zur Risspitze, welche einer nichtebenen longitudinalen Schubbeanspruchung entspricht. Dieser Modus wird auch als *Nicht Ebener Schermodus (engl. tearing mode)* bezeichnet.

Für den 3-Punkt Biegeversuch ist der Modus I ausschlaggebend, wobei jede Rissentstehung und -verformung als Überlagerung aller drei Modi angesehen werden kann. [27]–[29]

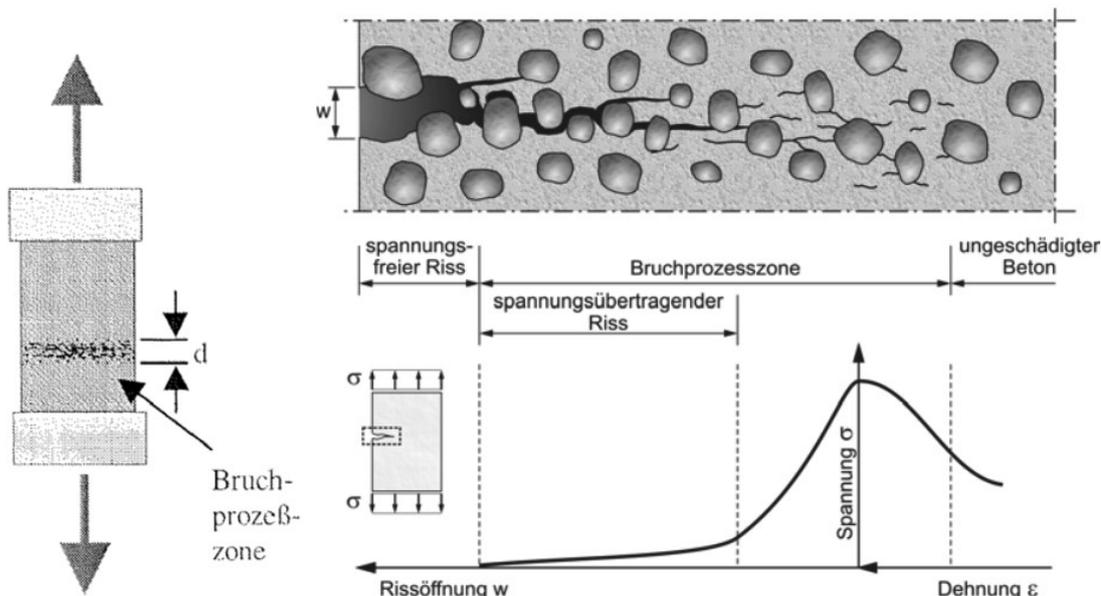


Abb.: 2-14 Bruchprozesszone nach BAŽANT [30] (links); Bildung eines Risses und der dazugehörigen Spannungsverteilung (rechts) [8]

Bei einer einaxialen Zugbeanspruchung kommt es im Beton zu einer Zunahme von Mikrorissen. Bis zu einer Zugspannung im Bereich von 70-90% der maximalen Zugfestigkeit f_{ct} haben diese Mikrorisse keinen nennenswerten Einfluss auf den E-Modul des Betons. Bleibt diese Spannung unterhalb der Zugfestigkeit, so stagniert das Risswachstum bei konstanter Belastung und die eingebrachte Energie wird dabei in elastischer Verformung gespeichert. Wird die Zugspannung weiter bis kurz vor der maximalen Zugfestigkeit der Probe gesteigert, so kommt es im Bereich vor der Risspitze zu Mikrorissen, welche senkrecht zur Beanspruchungsrichtung verlaufen. Dieser Bereich wird von BAŽANT (1983) auch *Bruchprozesszone* oder *Rissbandzone* bezeichnet (Abb.: 2-14, links). Diese Mikrorisse treten hauptsächlich in der Kontaktzone zwischen Zementstein und Gesteinskörnung auf (Abb.: 2-14, rechts). [8], [29]–[32]

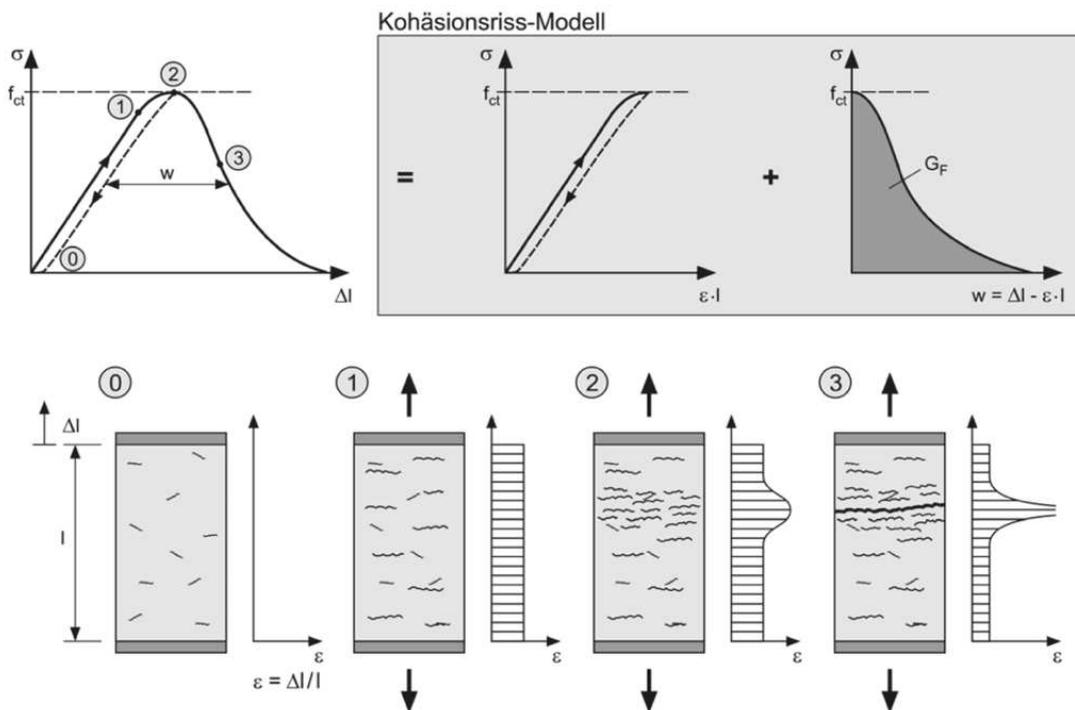


Abb.: 2-15 Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Betons unter Zugbeanspruchung mit schematischer Darstellung der Verteilung der Mikrorisse und Kohäsionsriss-Modell [8]

In Zustand 1 (Abb.: 2-15, Zustand 1) herrscht eine gleichmäßige Verteilung der Mikrorisse entlang der Probenhöhe. Mit steigender Belastung und zunehmender Lokalisierung der Mikrorisse, in der Bruchprozesszone, steigen in diesem Bereich die Dehnungen überproportional an (Abb.: 2-14; Abb.: 2-15 Zustand 2). Während die anderen Bereiche aufgrund der Lokalisierung der Spannungen entlastet werden, nimmt die Anzahl der Mikrorisse in der Bruchprozesszone weiter zu, bis es zu einem Zusammenwachsen vieler Mikrorisse kommt und sich ein Makroriss orthogonal zur Beanspruchungsrichtung ausbildet (Abb.: 2-15, Zustand 3). Trotz der Makrorisse können weiterhin Zugspannungen aufgrund von mechanischer Reibung der Zuschlagskörner an den Rissufern übertragen werden. BAŽANT (1983) unterscheidet zwischen Rissbandzone, in der weiterhin Spannungen übertragen werden können, und dem spannungsfreien Riss, bei dem der Beton versagt. Die Höhe d (Abb.: 2-14) stellt beim Rissbandmodell die Länge der Zone parallel zur Belastung (senkrecht zum Makroriss) dar. Die Bestimmung dieser Abmessung ist sehr aufwendig. [8], [29]–[34]

Auch wenn die Beschreibung physikalisch nicht sehr exakt ist, so ist in Hinblick auf die computerbasierte Modellierung eines Rissvorgangs das *Kohäsionsriss-Modell* bzw. *Fiktives Riss-Modell* nach HILLERBORG et al. (1976) eine einfache Ausgangsbasis. Die Grundidee dieses Modelles basiert in der Aufteilung der Vorgänge in einen elastischen Teil vor der Bruchprozesszone, sowie dem Vorgang in der *Bruchprozesszone*. Letzterer beschreibt das Spannungs- und Rissöffnungsverhalten der Bruchprozesszone, welcher zur Vereinfachung als fiktiver Riss beschrieben wird. Diese beiden additiven Anteile beschreiben das Zugspannungs-Dehnungs-Verhalten

des reienden Betons relativ einfach und somit für übliche Anwendungen am besten. [34]

Die Idee hinter dem fiktiven Riss - Modell, bei welchem die Bruchprozesszone mit einem spannungsubertragenden fiktiven Riss ersetzt wird, ist in Abb.: 2-16 schematisch dargestellt.

Die kritische Rissöffnung bei welcher nach WALRAVEN/LEHWALTER (1990) keine Zugspannungen mehr übertragen werden können, liegt bei $w_0 = 0,15-0,18\text{mm}$ (siehe Abb.: 2-16). [8], [29]–[32], [35]

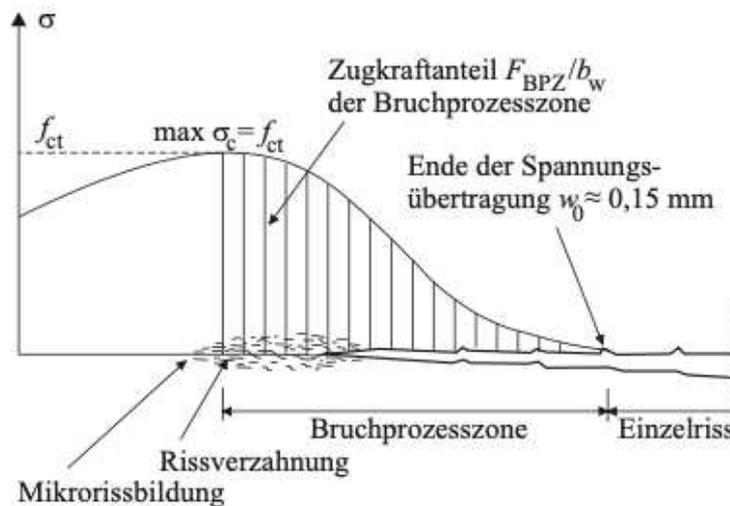


Abb.: 2-16 Rissöffnungs-abhängigen Zugspannungsubertragung in der Bruchprozesszone [29]

Bei HILLERBORG wird die Länge der Bruchprozesszone senkrecht zur Belastung (parallel zum Makroriss) gemessen. Die Länge der Bruchprozesszone liegt nach HILLERBORG (1983) bei $l_{BPZ} = 0,3-0,5 \cdot l_{ch}$. Trotz der Proportionalität zur Länge der Bruchprozesszone ist die charakteristische Länge l_{ch} keine tatsächlich messbare Länge, sondern beschreibt als Materialeigenschaft die Sprödigkeit des Betons und wird folgendermaßen berechnet (Gl. 2-7): [33]

$$\text{Gl. 2-7:} \quad l_{ch} = \frac{E \cdot G_f}{f_{ct}^2}$$

Die Fläche unter der Funktion in Abb.: 2-15 (Kohäsionsriss-Modell, rechtes Bild) ist die Bruchenergie G_f , welche nötig ist, um den fiktiven Riss auszubilden und stellt nach PETERSSON (1981) eine charakteristische Kenngröße für das Bruchverhalten von Beton dar. [8], [32]–[34], [36]

Die Bruchenergie kann einerseits durch Versuche oder andererseits durch folgende Annäherung (Gl. 2-8) nach MODEL CODE 2010 berechnet werden: [14]

$$\text{Gl. 2-8:} \quad G_f = 73 \cdot f_{cm}^{0,18}$$

2.4 Concrete Damage Plasticity Schädigungsmodell

Um das nichtlineare Materialverhalten von Beton in der Berechnungssoftware ABAQUS nachzubilden, wird das dort bereits implementierte *Concrete Damaged Plasticity* (CDP) Materialmodell verwendet. Das CDP Modell basiert auf den Überlegungen von LUBLINER et al. (1989) und LEE & FENVES (1998), und vereint die Konzepte der Schädigungs- und Plastizitätstheorie und kann somit das Verhalten des Betons im Zug- /Druckbereich abbilden. Dazu sind die Formulierungen von einer Fließbedingung, Fließregel sowie von Ent- und Verfestigungsregeln unbedingt notwendig. [37]–[40]

Das CDP Modell wird speziell zur Analyse von Beton und ähnlich quasi-spröden Materialien wie zum Beispiel Fels und Keramik bei zyklischen und dynamischen Belastungen verwendet. Das annähernd duktile Verhalten von Beton unter hohem Umschlingungsdruck, nahezu hydrostatischen Verhältnissen, wird mit diesem Modell nicht abgebildet. Das CDP Modell ist speziell auf die Analyse der irreversiblen Schädigungsvorgänge von Beton und anderen quasi-spröden Materialien unter geringem Umschlingungsdruck ausgerichtet. [41]

2.4.1 Fließbedingung & Fließregel

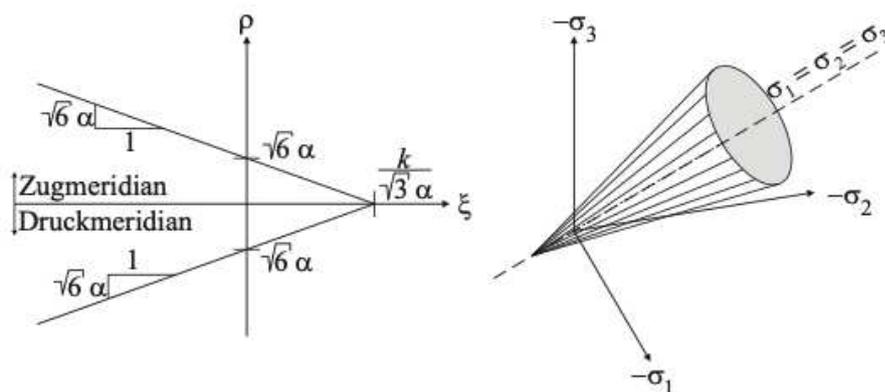


Abb.: 2-17 a) Drucker-Prager Fließbedingung im Meridianschnitt, b) räumliche Darstellung der Fließbedingung [29]

Die Schädigungstheorie, die ebenso wie die Fließregel und die Fließfläche einen Teil des CDP Modells ausmacht, basiert auf der Grenzbedingung von *DRUCKER - PRAGER*. Dabei ist der große Vorteil dieser Grenzbedingung jener, dass diese im Hauptspannungsraum einen Kegel darstellt (Abb.: 2-17b) und somit anhand zweier Parameter die Neigung des Kegels und der Schnitt mit der hydrostatischen Achse beschrieben werden kann (Abb.: 2-17a)

Die Drucker-Prager Bedingung ist für die Betonmodellierung anerkannt und beschränkt sich auf den biaxialen Druckspannungsbereich. Im Zug-Zug Bereich, wie es zum Beispiel bei Schwindspannungen an flächenartigen Bauteilen auftritt und Zug-Druck Bereich wird die Grenzbedingung von *RANKINE* verwendet. Die rankinsche Grenzbedingung besagt, dass der Bruch spröder Materialien beim Erreichen der Zugfestigkeit einsetzt. Dies ist auch in Abb.: 2-18a an der geraden Begrenzung zu erkennen. Dabei ist die Größe der beiden anderen Hauptspannungen irrelevant.

In Abb.: 2-18a lässt sich die zusammengesetzte Fließbedingungen aus den Bruchkriterien nach Drucker-Prager und Rankine sehen. [29], [37], [40], [42]

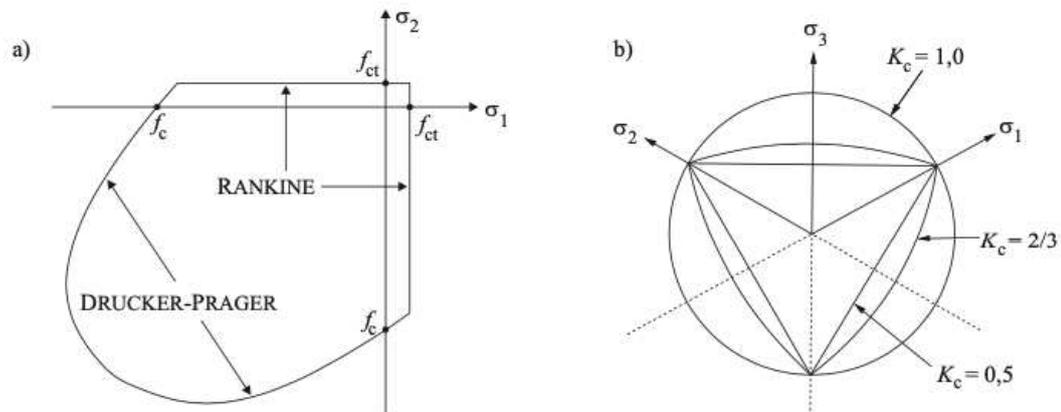


Abb.: 2-18 a) Fließfläche in der biaxialen Spannungsebene, b) Fließfläche in der Deviatorebene in Abhängigkeit des Faktors K_c [43]

Neben den einaxialen Druck- und Zugfestigkeiten benötigt man für das CDP Modell auch noch zwei weitere Parameter. Einer davon beschreibt das Verhältnis von biaxialer zur einaxialer Druckfestigkeit (f_{cc}/f_c) (Abb.: 2-11a). Hierfür wurde in den von KUPFER et al. (1978) durchgeführten Versuchen der häufig verwendete Wert von $f_{cc}/f_c = 1,16$ ermittelt. [44]

Der zweite Parameter K_c ist ein Wert zwischen $0 \leq K_c \leq 1,0$ und beschreibt das Verhältnis von Zug- und Druckmeridian bei negativen Hauptspannungen. In Abb.: 2-18b ist ersichtlich, dass in der Deviatorebene ein Wert $K_c = 0,5$ die dreieckige Rankinsche Grenzbedingung und bei $K_c = 1,0$ die kreisförmige Grenzbedingung von Drucker-Prager ergibt. Die Deviatorebene ist ein senkrechter Schnitt auf die hydrostatische Gerade im Hauptspannungsraum, an der in jedem Punkt die drei Hauptspannungen gleich groß sind. WILLAM/WARNKE (1974) haben mit triaxialen Druckversuchen den häufig verwendeten Wert $K_c = 2/3$ festgelegt. [45]

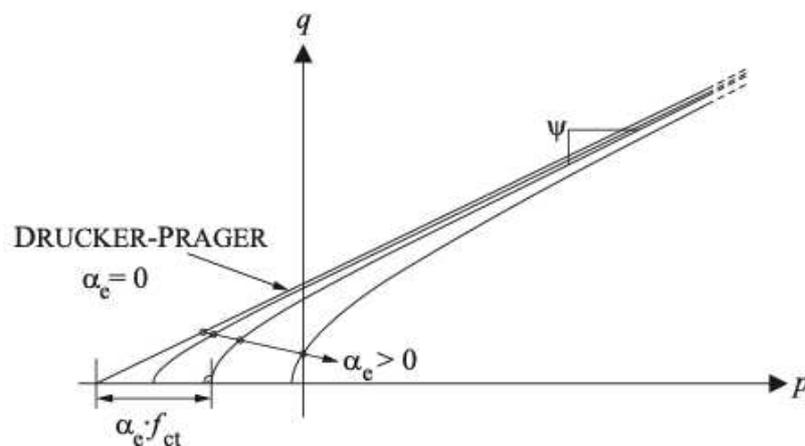


Abb.: 2-19 Annäherung der hyperbolischen Fließregel in der p - q Ebene [46]

Ein zusätzlicher, grundlegender Parameter für das CDP Modell ist der Dilatanzwinkel. Die Dilatanz ist eine wesentliche Eigenschaft von Beton und beschreibt die Volumenzunahme durch Auflockerung unter Scherkräften. In der CDP Theorie wird eine Fließregel in der p - q Ebene, welche ident mit dem p - ξ Koordinatensystem im Hauptspannungsraum ist, verwendet. Dabei wird ein Fließpotential G definiert, welches in ABAQUS einer hyperbolischen Funktion des Typs Drucker-Prager entspricht. Diese Funktion nähert sich einerseits asymptotisch dem linearen Fließpotential und auf der anderen Seite nähert sie sich dem Dilatanzwinkel (ψ) an (Abb.: 2-19). In der Literatur wird der gebräuchliche Wert für $\psi = 35^\circ$ angegeben. Weiters gibt es den Parameter α_e , der in ABAQUS als Exzentrizitätsparameter ε vordefiniert ist. Dieser Parameter beschreibt die Geschwindigkeit, mit der sich die Funktion des Fließpotential G (Gl. 2-9) an die Drucker-Prager Fließbedingung annähert. Häufig wird dabei $\alpha_e = 0$ gesetzt, welche der linearen Fließbedingung entspricht. [39], [40], [46]–[48]

$$\text{Gl. 2-9:} \quad G = -p \cdot \tan\psi + \sqrt{(\alpha_e \cdot f_{ct} \cdot \tan\psi)^2 + q^2}$$

2.4.2 CDP Schädigungsmodell

Das Concrete Damaged Plasticity (CDP) Modell basiert darauf, dass die Gesamtdehnung in einen elastischen und einen plastischen bzw. inelastischen Teil aufgeteilt wird (Abb.: 2-20 und Abb.: 2-21). Im Zusammenhang mit der CDP Theorie wird zwischen plastischer und inelastischer Dehnung unterschieden. Die plastische Dehnung ist die bleibende Verformung bei Entlastung mit reduziertem E-Modul. Im Gegensatz dazu ist die inelastische Dehnung die bleibende Verformung bei Entlastung mit ursprünglichem, nicht reduziertem E-Modul (Abb.: 2-21).

$$\text{Gl. 2-10:} \quad \varepsilon_{ges} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} = \frac{\sigma}{E_c} + \varepsilon_{in}$$

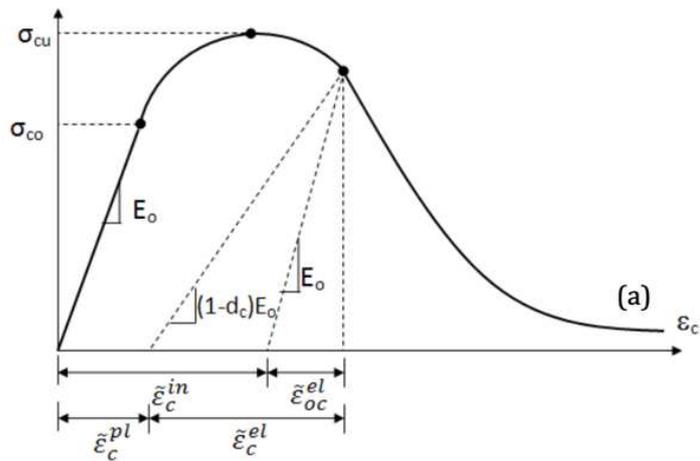


Abb.: 2-20: Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Beton im Druckbereich [49]

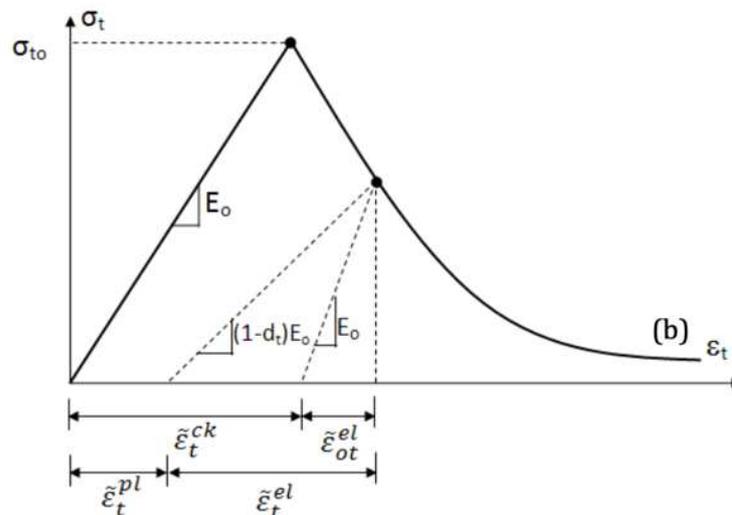


Abb.: 2-21 Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Beton im Zugbereich [49]

Die Steifigkeitsreduktion im Zug- und Druckbereich wird mit Hilfe der Schädigungsvariablen d_c und d_t beschrieben, durch welche die Reduktion des E-Moduls vom Beton bei Entlastung und erneuter Belastung ausgedrückt wird. Die $\sigma_c - \varepsilon_c$ Beziehung im Druck- als auch im Zugbereich ($\sigma_t - \varepsilon_t$) ergeben sich nach den Gl. 2-11 und Gl. 2-12. [29], [47]

$$\text{Gl. 2-11:} \quad \sigma_c = (1 - d_c) \cdot E_c \cdot (\varepsilon_c - \varepsilon_{pl})$$

$$\text{Gl. 2-12:} \quad \sigma_{ct} = (1 - d_t) \cdot E_c \cdot (\varepsilon_{ct} - \varepsilon_{pl})$$

3 Laborversuche

Zur Bestimmung der Materialparameter für die Simulation der Biegezugversuche mit dem Finite Elemente Softwarepaket ABAQUS und dem implementierte Concrete Damaged Plasticity Modell werden Daten aus Laborversuchen benötigt. Zur Ermittlung dieser Daten wurden genormte Prüfverfahren angewendet. Dabei sind der 3-Punkt Biegezugversuch nach ÖNORM EN 14651 und der einaxiale Druckversuch nach ÖNORM EN12390-4 durchgeführt worden.

3.1 Probenherstellung und Geometrie

Die Betonmischung wird in den Räumlichkeiten des Lehrstuhls für Subsurface Engineering der Montanuniversität Leoben hergestellt. Dafür wird eine herkömmliche Mischmaschine mit 120 Litern Volumen und ein Rütteltisch verwendet. Für die Betonrezeptur wird ein Zement der Klassifikation CEM I 52,5 N herangezogen und ein W/Z Wert zwischen 0,47 und 0,49 angestrebt. Als Zuschlagsstoff wird eine praxisnahe Korngrößenverteilung verwendet. Zusätzlich wird Fließmittel für eine bessere Verarbeitung beigemischt. Die Stahlfasern mit glatter Oberfläche und Endhaken sowie die Polypropylenfasern werden zur besseren Verteilung im Mischgut manuell vereinzelt zugegeben. Nach dem Einfüllen in die Schalungen und dem Rütteln verbleiben die Probekörper nach ÖNORM EN 12390-2 bis maximal drei Tage in der Schalung und werden danach bis unmittelbar vor der Versuchsdurchführung im Wasser gelagert. [25]

Die Schalungen für die einaxialen Druckversuche haben nach ÖNORM 12390-1 die Soll-Abmessungen von 150mm x 150mm x 150mm. Nach Kontrolle der Rechtwinkligkeit und Ebenheit der Probe werden die Flächen, wenn nötig nachbearbeitet und anschließend vermessen. Die Mittelwerte der Abmessungen sind in Tabelle 3-1 ersichtlich. Die Abmessungen des Probewürfels W4 sind außerhalb der Toleranzen von 1,0% der Sollabmessungen gemäß ÖNORM EN 12390-1. Trotzdem wird auch der einaxiale Druckversuch mit diesem Probewürfel durchgeführt. Da die Ergebnisse von W4 im Bereich von W5 und W6 liegen und es sich ausschließlich um Versuche zur Ermittlung von mechanischen Kenngrößen für ein Materialmodell der numerischen Simulation handelt, werden diese Ergebnisse zur weiteren Verwendung herangezogen (siehe Abb.: 3-4, Tabelle 3-3). [24]

		Ø Seite oben [mm]	Ø Seite unten [mm]	Ø Höhe [mm]
STF30	W5	150.1	150.1	150.2
	W7	150.1	150.2	149.5
	W14	149.8	150.6	150.2
STF45	W7	150.4	149.7	148.5
	W8	149.5	150.2	151.2
	W9	150.4	150.7	151.1
STF60	W4	147.4	147.0	149.8
	W5	151.4	151.5	149.5
	W6	150.2	150.0	149.6

Tabelle 3-1: Mittelwerte der Abmessungen der Probewürfel

Für die Biegezugversuche werden die jeweilige Betonmischungen in balkenartige Schalungen mit den Abmessungen 150mm x 150mm x 550mm gemäß ÖNORM EN 14651 eingefüllt. Wie bei den Proben für die Würfeldruckfestigkeit werden die Kontaktflächen vor der Versuchsdurchführung auf Ebenheit geprüft und gegebenenfalls nachbearbeitet. Die Mittelwerte der Abmessungen der jeweiligen Balken bei unterschiedlichen Stahlfasergehalten werden in Tabelle 3-2 aufgelistet. Die Höhe h_{sp} bezieht sich auf die Balkenhöhe in der Kerbe. Diese wird nach ÖNORM EN 14651 per Nasssägeverfahren in der Mitte des um 90° gekippten Balkens von der Seite eingeschnitten. [13]

		Balken 01	Balken 02	Balken 03	Balken 04	Balken 05	Balken 06
STF30	Breite b [mm]	149.5	149.3	145.8	146.5	148.0	144.5
	Höhe h_{sp} [mm]	124.8	124.0	125.0	125.0	124.8	125.0
STF45	Breite b [mm]	155.0	150.5	146.5	150.0	149.0	148.3
	Höhe h_{sp} [mm]	125.0	125.5	124.8	125.5	126.5	126.3
STF60	Breite b [mm]	150.3	147.8	140.0	138.8	148.8	142.8
	Höhe h_{sp} [mm]	125.5	124.5	124.8	125.0	124.8	124.8

Tabelle 3-2: Mittelwerte der Abmessungen der Biegebalken

3.2 Versuchsaufbau

Die einaxialen Würfeldruckversuche nach ÖNORM EN 12390-3 werden im Labor des Lehrstuhls für Subsurface Engineering der Montanuniversität Leoben mit einer Hydraulikpresse durchgeführt. [52]

28 Tage nach dem Betoniervorgang werden die Würfel aus der Wasserbadlagerung entnommen. Nachdem die Oberfläche der Probe mit einem Tuch getrocknet wird, werden die Kontaktflächen des Würfels von Verunreinigungen befreit und die Ebenheit kontrolliert. Auch die Krafteinleitungsflächen der Presse (siehe Abb.: 3-1) werden gereinigt. Die Probe wird in die Versuchspresse eingelegt. Der Versuchsaufbau besteht grundlegend aus einer Kraftmessdose, Druckplatten und mehreren Zwischenplatten an der Unterseite, um den Abstand zwischen Probe und Versuchsaufbau etwas anzupassen. Die Krafteinleitungsfläche auf der Druckplatte (siehe Abb.: 3-1) muss die Fläche der Probe vollkommen umschließen, um eine gleichmäßige Krafteinleitung in diese garantieren zu können. Die Druckprüfung wird nach ÖNORM EN 12390-3 kraftgesteuert durchgeführt. Dabei wird die Hydraulikpresse mit einer konstanten Krafrate angesteuert und der Stempelweg des Hydraulikzylinders mittels eines Wegmesssystems aufgezeichnet. Die für die Versuchsdurchführung erforderliche Krafrate wird aus der ÖNORM EN 12390-3 ausgewiesenen Belastungsgeschwindigkeit von $0,6 \pm 0,2 \text{ MPa/s}$ berechnet. Sowohl Kraft als auch Weg werden über die komplette Versuchsdauer aufgezeichnet. Aus diesen beiden Parametern wird die Spannungs-Dehnungskurve (siehe Abb.: 3-4) und die Druckfestigkeit aus der Maximalbelastung ermittelt. Der Versuch wird automatisch durch die Pressensteuerung beendet, sobald diese einen Bruch detektiert. Die Kriterien für die automatische Bruchererkennung werden durch einen

übermäßigen Kraftabfall vom Versuchsmaximum oder nach Überschreiten eines vorab definierten Stempelwegs, festgelegt. In Abb.: 3-2 ist ein Probekörper nach dem Versuchsende ersichtlich. Im Gegensatz zum Bruchverhalten von Normalbeton bei Druckfestigkeitsuntersuchungen, versagt die Faserbetonprobe üblicherweise nicht schlagartig, sondern weist einen erhöhten Widerstand beim Bruchgeschehen auf. Dieses Verhalten kann einerseits auf die hohe Zugfestigkeit der Stahlfasern und dessen Auszieh Widerstand aus der Betonmatrix zurückgeführt werden. Auch nach dem Bruch ist eine bestimmte Restdruckfestigkeit durch die Fasern, welche die einzelnen Bruchstücke noch zusammenhalten, gegeben (siehe Abb.: 3-2). [25], [52], [53]

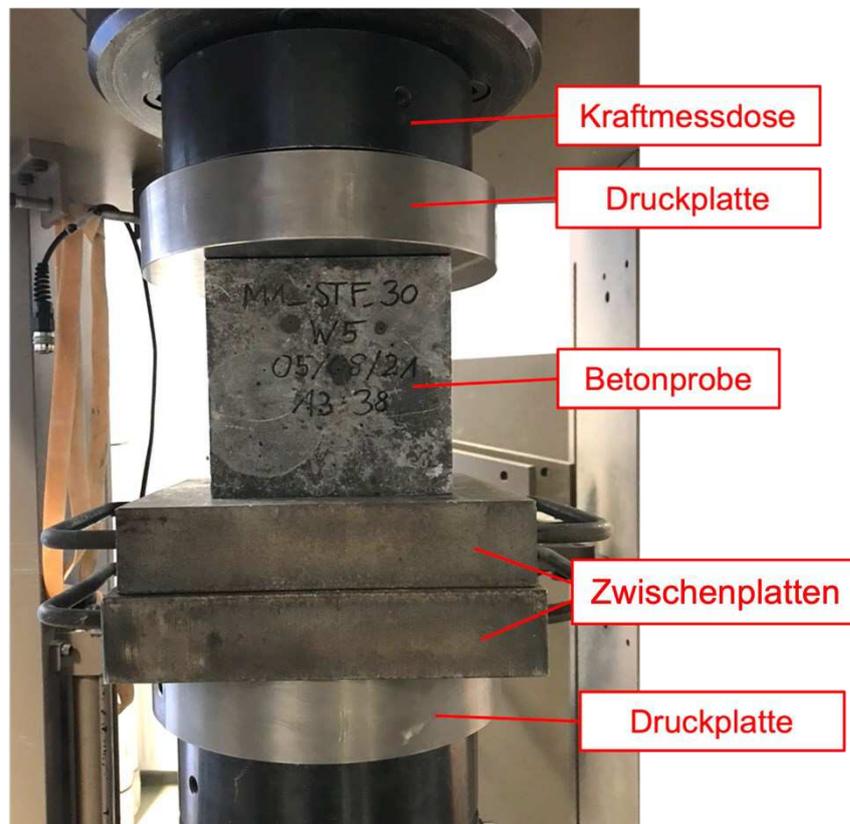


Abb.: 3-1: Würfelprobe im Versuchsaufbau vor der Druckprüfung



Abb.: 3-2: Probekörper im Versuchsaufbau nach der Druckprüfung

Die Biegezugversuche werden vom Institut für Betonbau von der Technischen Universität Graz nach ÖNORM EN 14651 durchgeführt.

Auch diese Probekörper für die Biegezugversuche werden erst nach 28 Tagen aus der Lagerung im Wasserbad entnommen. Nach dem Trocknen der Oberflächen werden die Balkenober- und -unterseite gereinigt und auf Ebenheit kontrolliert, damit die freie Beweglichkeit der Rollenaufleger nicht behindert werden kann. Vor dem Einsetzen der Probe in den Versuchsaufbau wird in der Mitte an der Unterseite per Nasssägeverfahren eine 5mm breite und 25mm hohe Kerbe in den Balken gesägt (siehe Abb.: 2-10). Der Versuchsaufbau, wie er in Abb.: 3-3 zu sehen ist und der ÖNORM EN 14651 entspricht, besteht aus drei frei drehbaren Rollenauflagern. Auf die mittlere obere Rolle wird mittels Hydraulikzylinder eine Druckkraft aufgebracht und diese bei Versuchsdurchführung mit der Kraftmessdose aufgezeichnet. Die Durchbiegung wird mittels Extensiometer, welches an der Balkenunterseite in der Mitte befestigt ist, ermittelt (siehe Abb.: 3-3). Die Kraft wird bei der Versuchsdurchführung in Bezug auf die Durchbiegung des Balkens automatisch geregelt. Gemäß ÖNORM EN 14651 ist Kraft so zu dosieren, dass bis zu einer Rissöffnung von 0,1mm eine Rissöffnungsrate von 0,05mm/min erreicht wird. Darüber hinaus wird der weitere Versuchsverlauf mit einer Rate von 0,2mm/min durchgeführt. Die Rissöffnungsraten können mit Abb.: 4-3 in Durchbiegungsraten umgerechnet werden. Die Rissöffnung, die beim 3-Punkt Biegezugversuch nach ÖNORM EN 14651 mindestens erreicht werden muss, beträgt 4mm bzw. eine Durchbiegung von 3,44mm. [13], [25]

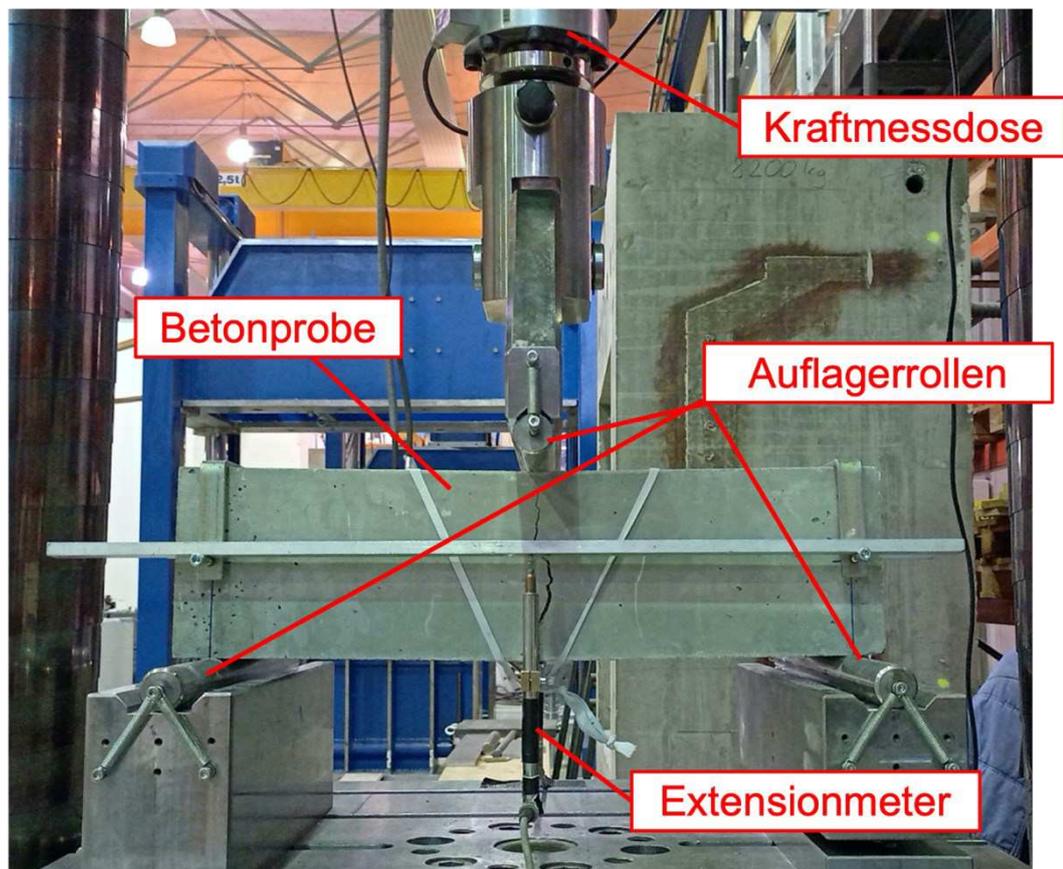


Abb.: 3-3: 3-Punkt Biegezugversuchsaufbau mit gerissener Betonprobe

Ident zum einaxialen Druckversuch versagt der Balken aufgrund der Faserbewehrung nicht schlagartig und es sind größere Rissöffnungen bzw. Durchbiegungen als jene Mindestangaben nach ÖNORM EN 14651 erreichbar.

3.3 Ergebnisse

Bei den einaxialen Würfeldruckversuchen werden zusätzlich zur Versuchslaufzeit auch die aufgewendete Pressenkraft des Hydraulikzylinders mit der Kraftmessdose und der Stempelweg über einen integrierten Wegaufnehmer im Zylinder aufgezeichnet. Als Stempelweg wird das Ausfahren des Hydraulikzylinders in Millimeter bezeichnet.

Mit der Kraft, dem Weg und den Probenabmessungen können Spannungs-Dehnungs Diagramme, wie in Abb.: 3-4 ersichtlich, erstellt werden.

	Druckfestigkeit σ_{cu}		E-Modul
	Mittelwert	Varianz	Mittelwert
	[MPa]		[MPa]
STF 30	65.26	13.05	9680.57
STF 45	60.20	14.16	8779.86
STF 60	59.13	1.46	8050.94

Tabelle 3-3: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche

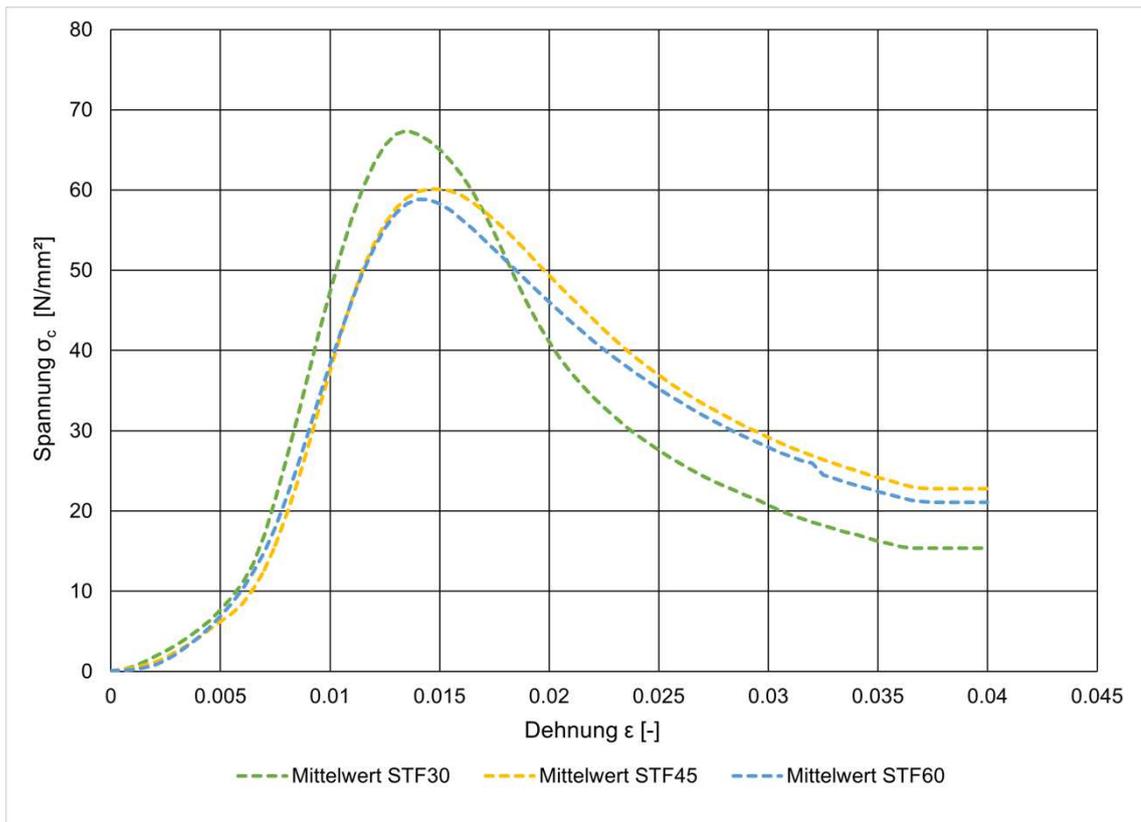


Abb.: 3-4: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche

In Abb.: 3-4 sind die Spannungs–Dehnungsverläufe der jeweiligen Betonmischungen mit unterschiedlichen Stahlfasergehalt dargestellt. Für eine genauere Bestimmung des Verhaltens von Stahlfaserbeton unter Druckbelastung ist die Anzahl von drei Probewürfeln zu gering und sollte für zukünftige Untersuchungen erhöht werden. Für die Mischung mit einem Stahlfasergehalt von 60kg/m^3 wurde die Rezeptur leicht verändert, um die großen Fasermengen einmischen zu können. Die Sieblinie wurde geringfügig in den Bereich kleinerer Korngrößen verschoben und der Gehalt des Betonleims minimal erhöht. Als Gegenmaßnahme wurde der W/Z Wert von 0,47 bei einem Stahlfasergehalt von 30kg/m^3 und 45kg/m^3 auf 0,49 für den Fasergehalt von 60kg/m^3 erhöht. Wie in Tabelle 3-3 ersichtlich, wird dadurch eine annähernd gleichmäßige Druckfestigkeit bei unterschiedlichen Stahlfasergehalten erreicht. Dies entspricht auch der aktuellen Literatur, dass der Fasergehalt die Resttragfähigkeit merklich erhöht, jedoch kaum Auswirkungen auf die Druckfestigkeit hat. [2], [9], [22]

Die Biegezugversuche werden in einem Spannungs–Durchbiegungs Diagramm (siehe Abb.: 3-5, Abb.: 3-6, Abb.: 3-7) dargestellt. Aus der gemessenen Druckkraft und der Probengeometrie kann mit Gl. 2-6 die Biegezugspannung berechnet werden. Das *Limit of Proportionality* LOP aus ÖNORM EN 14651 in Tabelle 3-4 ist die Biegezugfestigkeit im Bereich einer Durchbiegung 0–0,08mm (siehe 2.2.4). Die residuelle Biegezugfestigkeit $f_{ct2.5}$ nach ÖNORM EN 14651 ist die Biegezugspannung bei einer Rissöffnung von 2,5mm. Die Bruchenergie G_f , wie unter 2.3 beschrieben, entspricht der Fläche unter dem Spannungs–Rissöffnungs-Diagramm (CMOD)

(siehe Abb.: 4-4). Die Umrechnung von Durchbiegung zu Rissöffnung CMOD kann mit Abb.: 4-3 aus der ÖNORM EN 14651 erfolgen.

	Limit of Proportionality LOP		res. Biegezugfestigkeit $f_{ct2,5}$		Bruchenergie G_f	
	Mittelwert	Varianz	Mittelwert	Varianz	Mittelwert	Varianz
	[MPa]		[MPa]		[N/mm]	
STF 30	5.47	0.42	4.57	1.00	16.78	11.83
STF 45	6.98	0.02	8.90	2.80	32.75	29.16
STF 60	6.19	0.13	9.67	0.78	36.94	20.65

Tabelle 3-4: Ergebnisse der Biegezugversuche

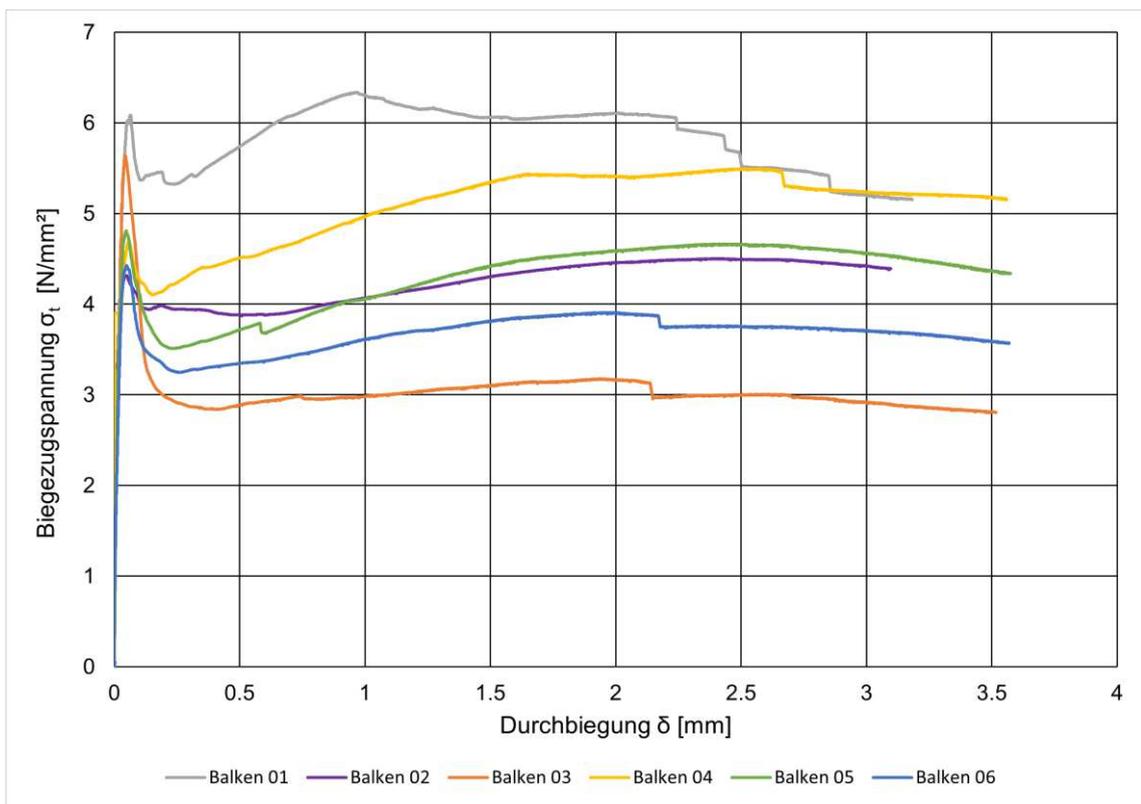


Abb.: 3-5: Ergebnisse der 3-Punkt Biegezugversuche bei STF30

Das Spannungsmaximum bei geringer Durchbiegung stellt das Reißen der Betonmatrix dar. Der Wiederanstieg der Spannung wird durch das Wirken der Faserbewehrung verursacht. Die Ausprägung des Spannungsmaximums mit nachfolgender Spannungsabsenkung hängt vom Fasergehalt ab und ist bei hohem Faseranteil, wie in Abb.: 3-7 an Balken 01 ersichtlich, geringer bzw. nicht vorhanden. Die Streuung der Ergebnisse von Faserbetonproben ist bei Zugbelastung auf Grund von Einflüssen wie zum Beispiel der Faserverteilung und -orientierung, die in Kapitel 2.1 erläutert werden, größer als bei Druckbelastungen (siehe Abb.: 3-4). Diese Streuungen der Ergebnisse in Abhängigkeit der Belastungsart sind in Tabelle 3-3 und Tabelle 3-4 sowie an den Verläufen der Abbildungen der Ergebnisse (Abb.: 3-4, Abb.: 3-5, Abb.: 3-6, Abb.: 3-7) sichtbar.

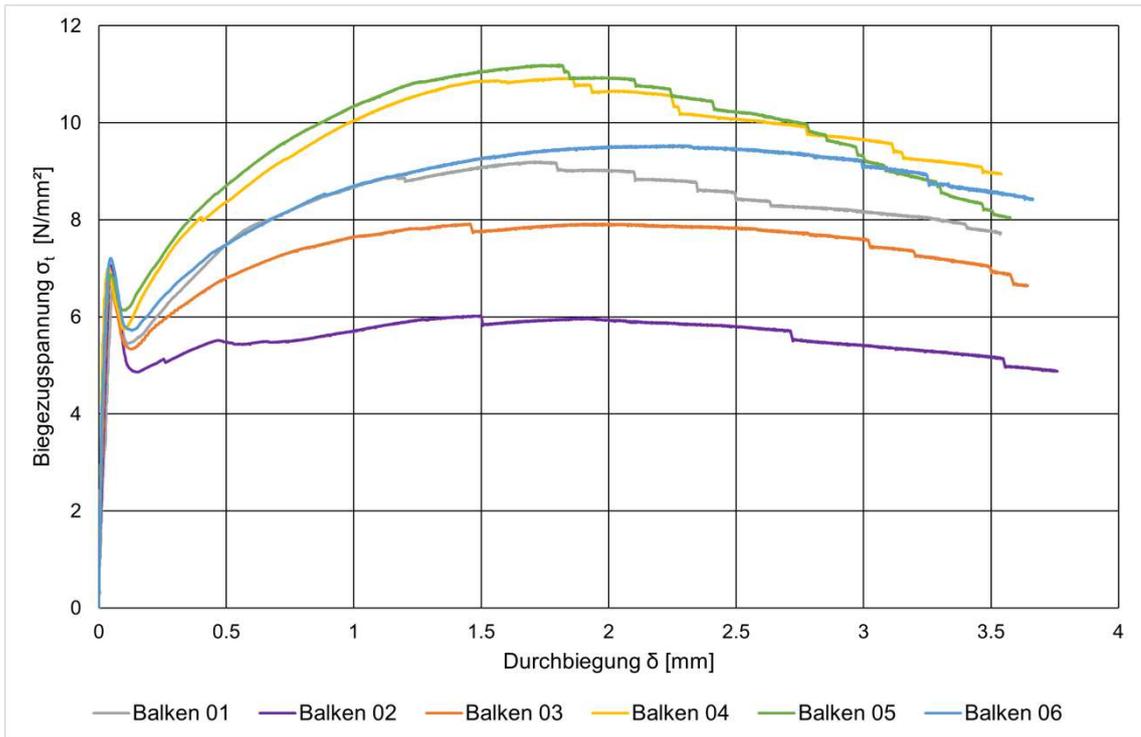


Abb.: 3-6: Ergebnisse der 3-Punkt Biegezugversuche bei STF45

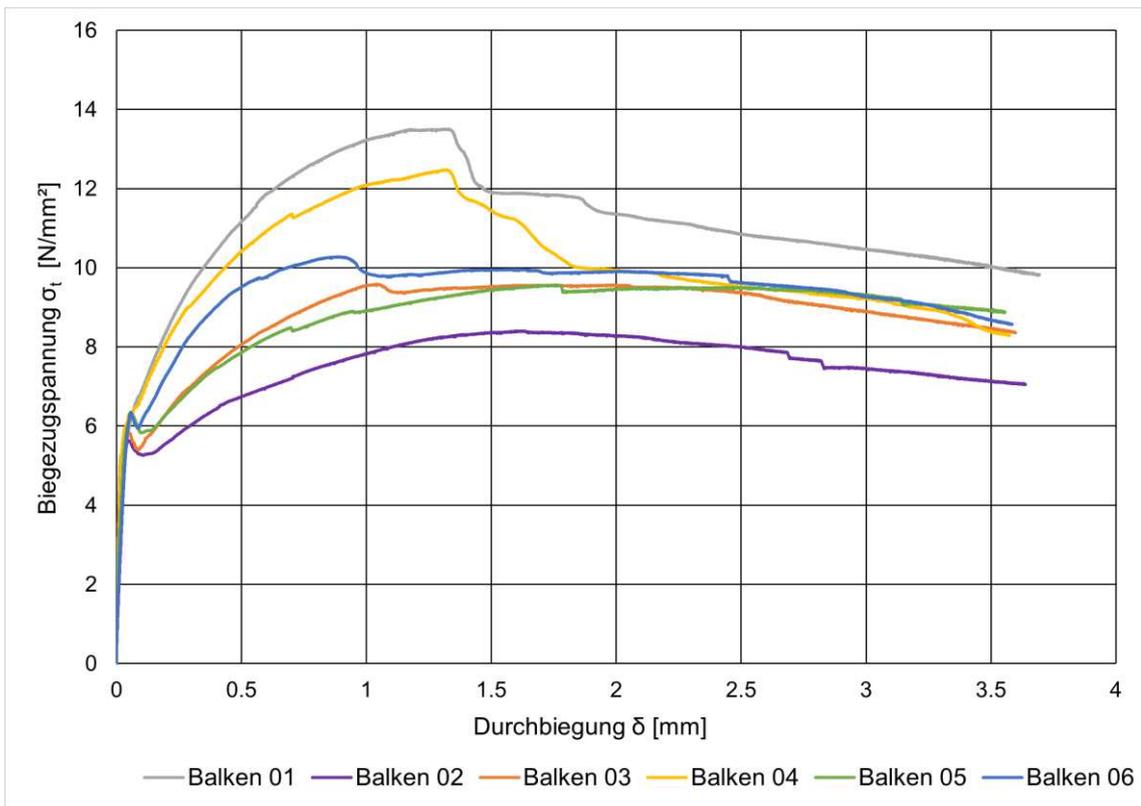


Abb.: 3-7: Ergebnisse der 3-Punkt Biegezugversuche bei STF60

4 Numerische Simulation

Heutzutage wird zum Lösen unterschiedlichster Fragestellungen und Untersuchungen in der Mechanik, Physik und weiteren naturwissenschaftlichen Bereichen die Numerik herangezogen. Die Nachbildung und Simulation von Bauteilen und Materialien mit Finite-Elemente Programmen wird zunehmend wichtiger sowohl in der Forschung als auch in der Bemessung. Einer dieser Themen ist auch die Abbildung des Betonverhaltens mit unterschiedlichen elastischen und plastischen Schädigungsmodellen. In dieser Arbeit wird zur Simulation des Faserbetons das Finite-Elemente Programm ABAQUS v6.14 mit dem implementierten Materialgesetz Concrete Damaged Plasticity, welches in Punkt 2.4 genauer beschrieben wird, verwendet. Abgesehen von der Auswahl des Materialmodells ist zusätzlich noch die Diskretisierung, Modellierung und deren Einfluss auf das Ergebnis genauer zu untersuchen. Folgend wird auf die Simulation im Detail eingegangen.

4.1 Allgemeine Einstellungen

Bevor unterschiedliche Materialmodelle in Simulationen implementiert werden können, müssen grundlegende Einstellungen getroffen werden. Dazu zählen unter anderem das Lösungsverfahren, Modellgeometrie als auch die nötigen Randbedingungen.

4.1.1 Berechnungsmethoden: Implizit vs. Explizit

ABAQUS v6.14 gibt den Anwendern die Möglichkeit zwischen implizitem und explizitem Berechnungsverfahren zu wählen.

Die implizite Methode, „Dynamic, Implicit“ genannt, ist für einfachere nichtlineare Problemstellungen sehr effizient und versucht durch viele Iterationen der verschiedenen Variablen eine konvergierende Lösung zu finden. Die „Static, General“ Methode ist dem impliziten Verfahren sehr ähnlich, jedoch werden die Iterationen so lange wiederholt, bis eine konvergierende Lösung gefunden wurde oder die maximale Zahl an Iterationsschritten erreicht wurde. Hierfür wurden bei dem impliziten Berechnungsverfahren Trägheitseffekte eingeführt, um Instabilitäten bei nicht konvergierenden Berechnungen zu vermeiden. Bei Konvergenz werden mit statischem und implizitem Verfahren nahezu idente Lösungen erreicht. Der Vorteil der statischen Methode ist eine höhere Effizienz. [47]

Die explizite Methode, „Dynamic, Explicit“, ist dem impliziten Verfahren ähnlich, unterscheidet sich jedoch in einem wesentlichen Punkt. Beim expliziten Verfahren werden die Werte der Variablen für den Zeitpunkt $t + \Delta t$ von den verfügbaren Werten zum Zeitpunkt t herangezogen. Beim impliziten Verfahren werden die Werte sowohl vom Zeitpunkt t als auch vom Zeitpunkt $t + \Delta t$ verwendet, wodurch Zeitschritte vergrößert werden können und sich dadurch die Rechenzeit verringert. Bei der expliziten Methode ermöglicht ABAQUS v6.14 mit dem „Keyword“ „*Concrete Failure, Type=STRAIN/DISPLACEMENT“ das Eliminieren von Netzelementen bei Überschreitung der Bruchkriterien, um ein realistischeres Bruchverhalten zu simulieren. Das explizite Lösungsverfahren hat somit seine Vorteile bei sehr komplexen nichtlinearen Problemstellungen. [47]

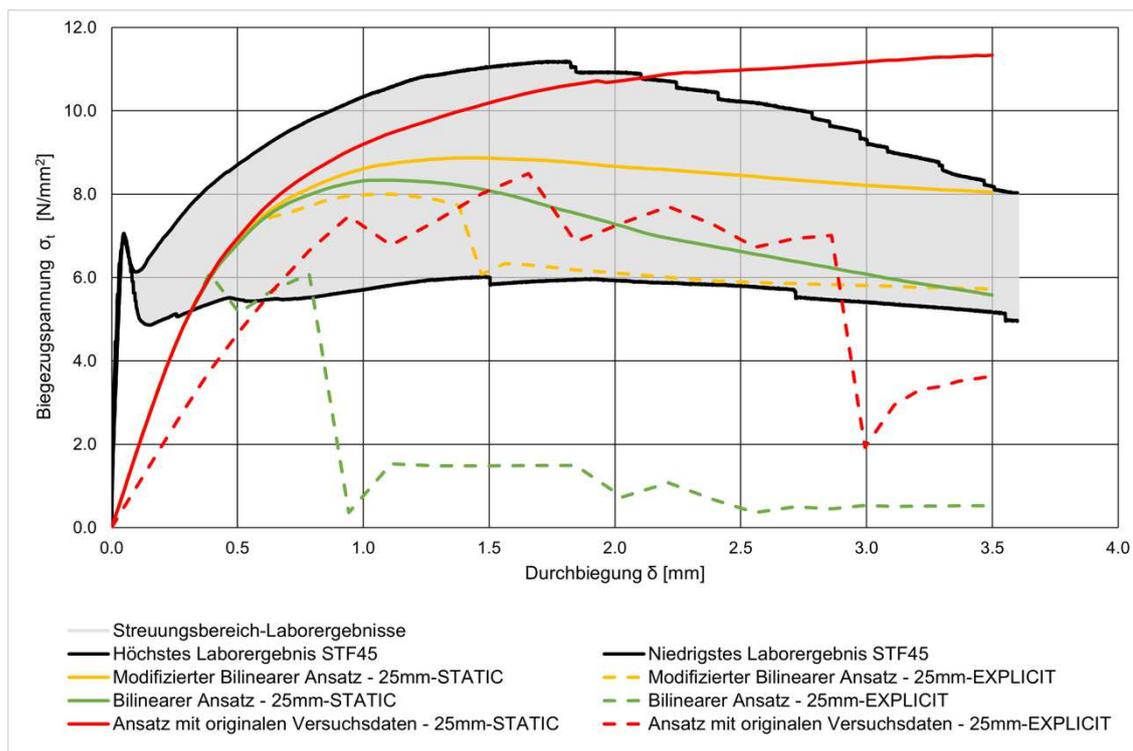


Abb.: 4-1: Vergleich von implizitem zu explizitem Berechnungsverfahren bei einem Stahlfasergehalt von 45kg/m^3

In dieser Arbeit wird, wie in Abb.: 4-1 ersichtlich, auf Grund der deutlich besseren Lösungen die impliziten/statischen Verfahren den expliziten vorgezogen. Davon wurde meistens die „Static, General“ Methode verwendet, da diese effizienter ist. Bei wenigen Simulationen mit Konvergenzproblemen wurde das implizite Verfahren angewendet.

4.1.2 Modellgeometrie und Randbedingungen

Die Modellabmessungen in der Simulation mit $550\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ (L x B x H) entsprechen dem realen Biegeversuch gemäß ÖNORM EN 14651 „Prüfverfahren für Beton mit metallischen Faser - Bestimmung der Biegezugfestigkeit“ und ist detailliert in Punkt 2.2.4 beschrieben. Wie in Abb.: 4-2 ersichtlich, wurde auch die Kerbe in der Mitte der Probenunterseite mit realen Abmessungen modelliert. [13]

Die drei Auflagerrollen des realen Biegeversuchs wurden in ABAQUS durch idealisierte linienförmige Randbedingungen ersetzt, um mögliche Fehlerquelle bei der Bestimmung der Kontakteigenschaften zu verhindern. An den beiden unteren Randbedingungen der Auflager wurde jeweils die vertikale Translation gesperrt, also in Abb.: 4-2 die Bewegung in die y-Richtung (in Abb.: 4-2 durch orange Pfeile gekennzeichnet). Zusätzlich wurden am rechten unteren Auflager noch die Freiheitsgrade der Rotation um die y und z – Achse gesperrt (in Abb.: 4-2 durch blaue Pfeile gekennzeichnet). Diese Randbedingungen wurden im Berechnungsschritt „Initial“ angesetzt und gelten somit als Basis für alle weiteren Berechnungsschritte. Die obere Auflagerrolle wurde ebenfalls mit einer linienförmigen Randbedingung des Auflagers realisiert und mit einem „Reference Point-1“ direkt verknüpft. An diesem

„Reference Point“ wurde im „Step 1“, also im ersten und in diesem Modell auch dem einzigen Berechnungsschritt, eine vertikale Bewegung von -3.5mm (vertikal gegen die positive y – Achse; in Abb.: 4-2 durch den langen vertikalen orangen Pfeil in der Mitte gekennzeichnet) definiert. Diese Bewegung steigt linear von 0mm auf 3.5mm an. Der Vorteil bei der Verwendung des „Reference Point 1“ ist, dass die Reaktionskraft des Bauteils auf die vertikale Bewegung am „Reference Point 1“ für jeden Zeitschritt bzw. für jedes Inkrement abgefragt werden kann.

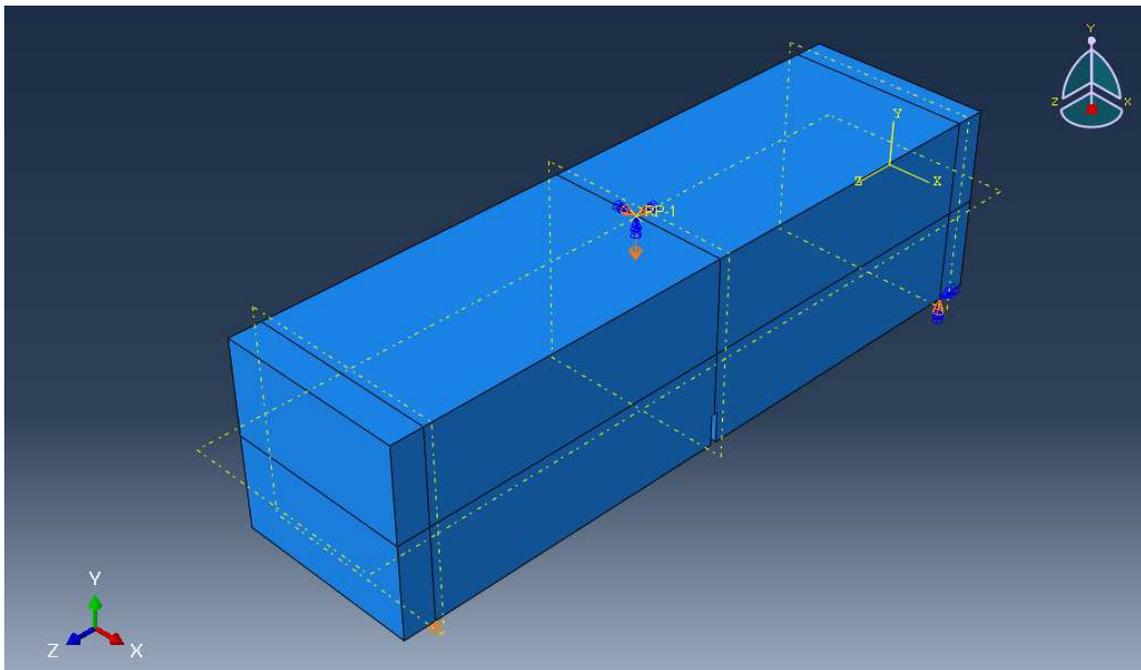


Abb.: 4-2 Abbildung des ABAQUS - Simulationsmodells (orange Pfeile = gesperrte Translationsfreiheitsgrade, blaue Pfeile = gesperrte Rotationsfreiheitsgrade)

Mögliche Modellvereinfachungen, wie zum Beispiel das Ausnützen von vorhandenen Bauteilsymmetrien, wurden trotz der großen Modellabmessungen in diesem Fall nicht getroffen, um unumgängliche Verfälschungen bei numerischen Simulationen zu unterbinden.

4.2 Materialmodelle

Wie in Punkt 2.3 und 2.4 beschrieben wird für eine Betonprobe unter Zugbelastung im Bereich bis zum Bruch ein linear elastisches Materialverhalten zu Grunde gelegt. Der plastische Nachbruchbereich kann nicht mehr mit einem einfachen Materialmodell abgebildet werden. Hier kommt das Concrete Damaged Plasticity (CDP) Materialmodell ins Spiel. Zur Ermittlung der Eingabeparameter für das Nachbruchverhalten von Beton unter Zugbeanspruchung gibt es unterschiedliche Ansätze. In dieser Arbeit wird dabei auf drei Entfestigungsgesetze näher eingegangen.

$$\text{Gl. 4-1: } \varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c^{el} - (\sigma_i/E_0)$$

$$\text{Gl. 4-2: } d_c = 1 - (E_i/E_0)$$

$$\text{Gl. 4-3: } d_c = 1 - (\sigma_i/\sigma_{cu})$$

$$\text{Gl. 4-4: } E' = (1 - d_c) \cdot E_0$$

$$\text{Gl. 4-5: } \varepsilon_c^{pl} = \varepsilon_c^{in} - (d_c/1 - d_c) * (\sigma_i/E_0)$$

Die Ermittlung des geschädigten E-Moduls E' und der plastischen Dehnung ε_c^{pl} erfolgt nach Gl. 4-4 bzw. Gl. 4-5. Wie in Kapitel 2.4.2 beschrieben, wird bei der CDP Theorie zwischen inelastischer und plastischer Dehnung unterschieden. Das Berechnen der plastischen Dehnung ist eine Kontrolle des Eingabedatensatzes. Ist die plastische Dehnung nicht durchgehend positiv, sowie streng monoton steigend, meldet ABAQUS beim Kompilervorgang eine Fehlermeldung.

CMOD mm	δ mm
0,05	0,08
0,1	0,13
0,2	0,21
0,5	0,47
1,5	1,32
2,5	2,17
3,5	3,02
4,0	3,44

Abb.: 4-3: Umrechnung von Durchbiegung auf Rissöffnung CMOD nach EN 14651 [13]

Die Ermittlung der Eingabeparameter für den Zugbereich ist sehr ähnlich. Die Ausgangswerte werden, wie im Kapitel 0 dargestellt aus Biegezugversuchen im Labor ermittelt. Mit der Abb.: 4-3 kann das Biegezugspannungs – Durchbiegungs Diagramm in ein Biegezugspannungs–Rissöffnungs-Diagramm konvertiert werden. Anhand dieser Daten kann die Bruchenergie G_f , welche die Fläche unter der Kurve darstellt (siehe Abb.: 4-4), ermittelt werden.

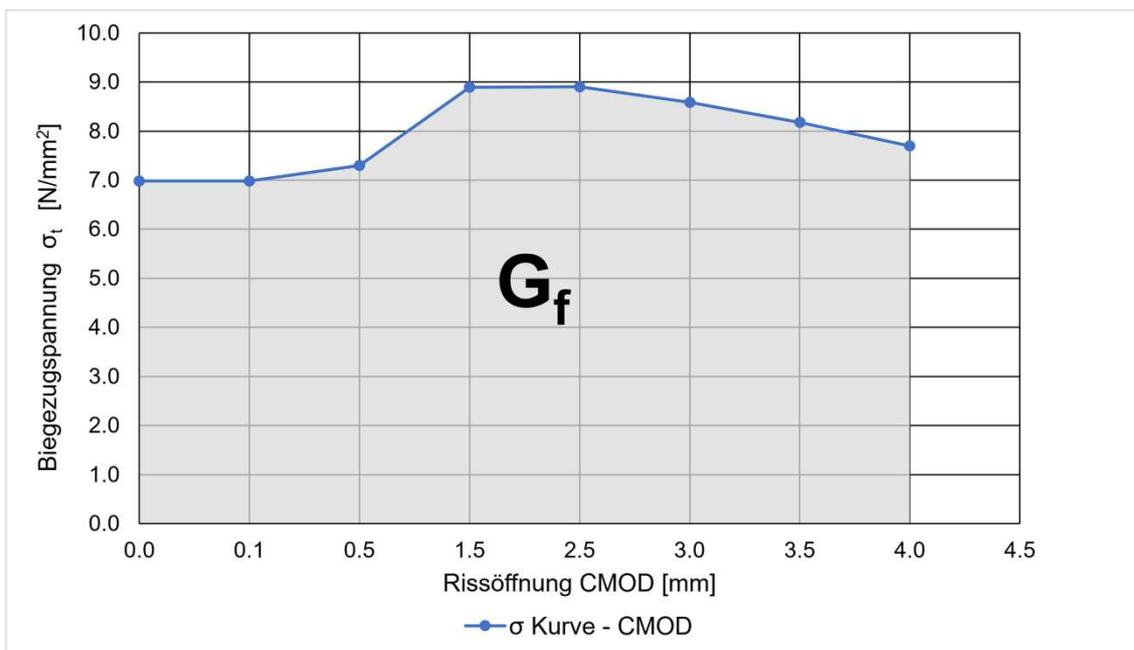


Abb.: 4-4: Biegezugspannung σ_t – CMOD Diagramm mit der Bruchenergie G_f

Die Werte (siehe Tabelle 4-2) für die Rissöffnung CMOD und die Biegezugspannung σ_t werden anhand der Entfestigungsansätze für Stahlfaserbeton im Zugbereich in den Kapiteln 4.2.2, 4.2.3, 4.2.4 aus der Bruchenergie G_f , der Biegezugfestigkeit σ_{ct} und dem E-Modul berechnet. Wie im Kapitel 4.2.5 genauer beschrieben, wird der E-Modul im Zugbereich auf 2/3 reduziert. Die Berechnung der Schädigungsparameter d_t , der geschädigte E-Modul E' und die plastische Dehnung ϵ_c^{pl} werden analog zum Druckbereich nach Gl. 4-3, Gl. 4-4, Gl. 4-5 berechnet. Laut LATTE (2010) ist aus Konvergenzgründen für numerische Simulation empfohlen, die maximale Schädigung im Zugbereich mit 90% zu begrenzen. Aus diesem Grund werden alle Schädigungswerte mit dem Faktor = 0,9 multipliziert. [48]

Biegezugfestigkeit f_{ct}	Bruchenergie G_f	E - Modul
[MPa]	[N/mm]	[MPa]
6.98	32.75	5853.24

Rissöffnung CMOD	Biegezug- spannung σ_{ct}	Damage Parameter d_t		Geschädigter E-Modul E'	Plastische Dehnung ϵ_t^{pl}
		original	nach Latte		
[mm]	[MPa]	[-]	[-]	[MPa]	[-]
0.00	3.49	0.00	0.00	5853.24	0.0000
3.13	2.33	0.33	0.30	4097.27	0.0057
4.30	2.33	0.33	0.30	4097.27	0.0079
5.47	2.33	0.33	0.30	4097.27	0.0101
6.65	2.33	0.33	0.30	4097.27	0.0122
7.82	2.33	0.33	0.30	4097.27	0.0144
11.47	1.55	0.56	0.50	2926.62	0.0211
15.12	0.78	0.78	0.70	1755.97	0.0278
18.77	0.00	1.00	0.90	585.32	0.0345

Tabelle 4-2: Ermittlung der Damage Parameter d_t für den Zugbereich

4.2.2 Ansatz mit den Ergebnissen aus den Laborversuchen

Der erste Ansatz für eine Nachbildung des Nachbruchbereichs von Stahlfaserbeton im Zugbereich ist die Berechnung der nötigen Damage Parameter d_t aus den Laborversuchsdaten. In dieser Arbeit werden die Parameter direkt mit den Werten aus den durchgeführten Laborversuchen, welche unter 0 beschrieben sind, ermittelt. Die Vorteile dieser Möglichkeit liegen darin, dass unmittelbar aus den gemessenen Rissöffnungs- CMOD und Biegezugspannungswerte σ_t die nötigen Damage Parameter d_t , wie in 4.2.1 beschrieben, berechnet werden können.

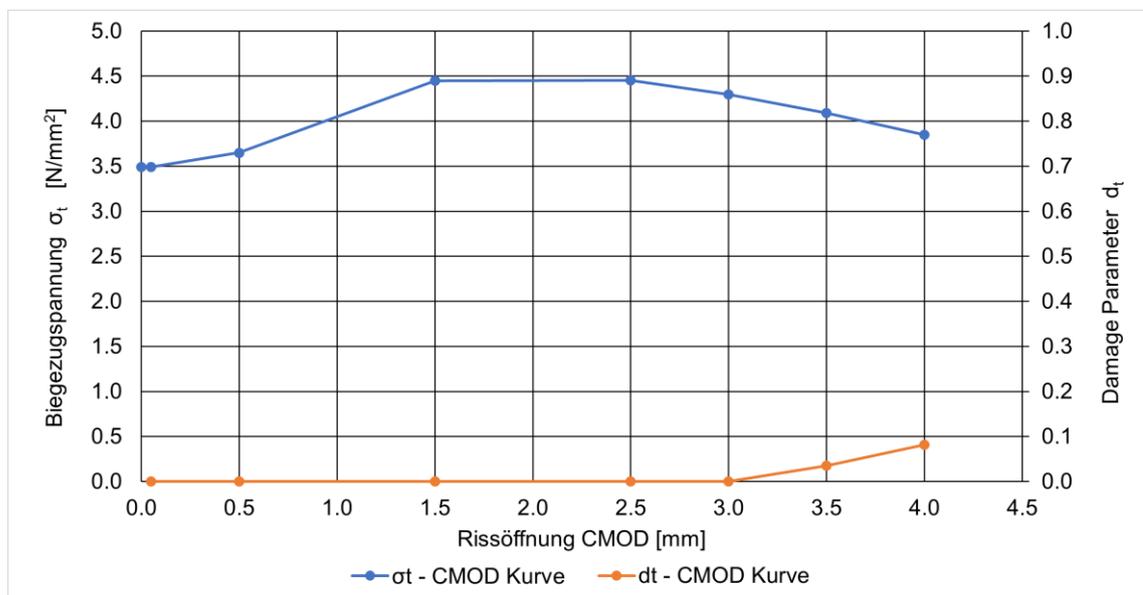


Abb.: 4-5: Berechnete σ_t - CMOD Entfestigungskurve und d_t - CMOD Kurve für den Ansatz mit originalen Versuchswerten bei einem Stahlfasergehalt (STF) von 45 kg/m^3

Abb.: 4-5 zeigt die Entfestigungskurve (σ_t – CMOD Kurve) und die Damage Parameter Kurve (d_t – CMOD Kurve) beispielhaft für einen Stahlfasergehalt von 45kg/m^3 . Diese Kurven sind in der Grundstruktur für 30kg/m^3 und 60kg/m^3 Stahlfasern gleich.

Die σ_t – CMOD Entfestigungskurve (siehe Abb.: 4-5) steigt im plastischen Teil des Nachbruchbereichs nochmals an und verringert sich erst bei einer Rissöffnung zwischen 1.5mm – 2.5mm . Im Gegensatz dazu steigt erst bei einer Reduktion der Biegezugspannung der Damage Parameter d_t an.

In Tabelle 4-3 sind alle relevanten Materialeigenschaften beispielhaft für einen Stahlfasergehalt von 45 kg/m^3 (STF45) aufgelistet. Die Werte für die Exzentrizität, der Dilatationswinkel, die Viskosität, das Verhältnis von biaxialer zu einaxialer Druckfestigkeit f_{b0}/f_{c0} (auch oft als f_{cc}/f_c bezeichnet) sowie das Verhältnis von Zug- und Druckmeridian bei negativen Hauptspannungen K_c sind übliche Werte aus der Literatur wie im Kapitel 2.4.1 beschrieben. Als Poisson-Zahl sowie für die Dichte sind Standardwerte von Normalbeton für die Berechnungen herangezogen worden. Die etwas höhere Dichte infolge von den beigemengten Stahlfasern hat einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf das Ergebnis, weshalb eine Standarddichte von Beton angenommen werden kann.

werden, bei gleichem Stahlfasergehalt ident. Im Zugbereich sind die Werte, welche mittels originalen Versuchsdaten berechnet wurden, zu sehen und sind ident zu jenen, welche in Abb.: 4-5 dargestellt sind.

4.2.3 Bilinearer Ansatz

Das bilineare Entfestigungsgesetz oder einfach nur „Bilinearer Ansatz“ ist eine weitere Möglichkeit, um das plastische Nachbruchverhalten abzubilden. Dieser Ansatz ist ein Kompromiss aus relativ einfacher Datenbestimmung und genauer Nachbildung des plastischen Nachbruchbereichs. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit der bilineare Ansatz stellvertretend für viele Entfestigungsgesetze für unbewehrten Beton, wie zum Beispiel der Lineare Ansatz, Hillerborg, Reinhardt–Hordjik Entfestigungs–Rissöffnungs–Gesetz oder dem Exponentiellen nichtlinearen Entfestigungs–Rissöffnungs–Gesetz, gewählt.

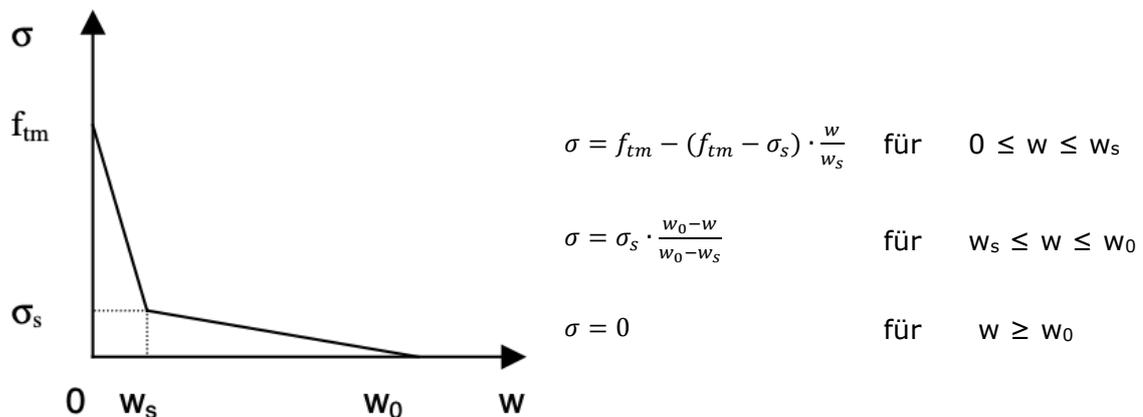


Abb.: 4-6 Bilinearer Ansatz

Wie in der Abb.: 4-6 zu sehen ist, sind bei diesem Entfestigungs-Rissöffnungsgesetz nur drei Punkte des Spannungsverlaufs zu ermitteln. Die Fläche unterhalb der σ - w Kurve ist als Bruchenergie G_f definiert und lässt sich mit Gl. 4-6 berechnen. [54]

$$\text{Gl. 4-6:} \quad G_f = (f_{tm} \cdot w_s + \sigma_s \cdot w_0)/2$$

Die Bruchenergie bzw. die Fläche unterhalb der Kurve beschreibt auch den Zusammenhang zwischen einer Kurve aus einem realen Versuch und den anderen weiteren Ansätzen. Ist die Bruchenergie G_f bekannt, lassen sich die weiteren Punkte bestimmen. Dazu muss die maximale Zugfestigkeit f_{tm} aus den Laborversuchen bekannt sein, sowie die maximale Rissöffnung, bei der die Spannung gleich Null ist. Diese liegt laut WALRAVEN/LEHWALTER (1990) bei 0,15-0,18mm. Für die Berechnung des „breaking point“ oder „kink point“, also dem Knickpunkt im bilinearen Entfestigungsgesetz, gibt es noch weitere empirische Ansätze, auf die nicht näher im Detail eingegangen wird.

Die am meisten verwendeten Formeln sind jene von PETERSSON (1981) (Gl. 4-7; Gl. 4-8; Gl. 4-9): [35], [36]

$$\text{Gl. 4-7:} \quad \sigma_s = f_{tm}/3$$

$$\text{Gl. 4-8:} \quad w_s = 0,8 \cdot G_f / f_{tm}$$

$$\text{Gl. 4-9:} \quad w_0 = 3,6 \cdot G_f / f_{tm}$$

In Abb.: 4-7 sind die mit Hilfe des Bilinearen Ansatz berechneten σ_t – CMOD Entfestigungskurve und d_t – CMOD Schädigungskurve grafisch dargestellt.

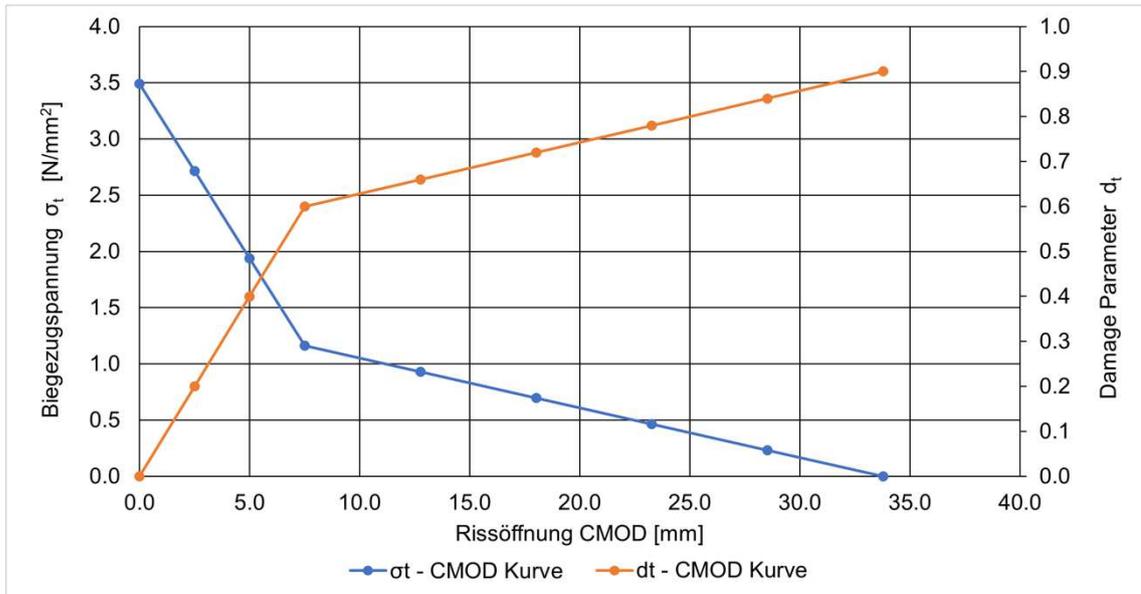


Abb.: 4-7: Berechnete σ_t – CMOD Entfestigungskurve und d_t – CMOD Kurve für den bilinearen Ansatz bei einem Stahlfasergehalt (STF) von 45kg/m³

Die Materialparameter für die ABAQUS Simulation mittels bilinearen Ansatzes für eine Probe mit einem Stahlfasergehalt von 45kg/m³ sind in Tabelle 4-4 dargestellt. Alle Werte der Tabelle 4-4, bis auf den Zugbereich, sind ident mit Tabelle 4-3 und Tabelle 4-5 und sind genauer im Kapitel 4.2.2 beschrieben.

Die Werte des Zugbereichs wurden anhand der Formeln des Bilinearen Ansatzes berechnet und sind für STF45 in Abb.: 4-7 dargestellt.

Bilinearer Ansatz					
Dichte		E-Modul		Poisson-Zahl	
[t/mm ³]		[MPa]		[-]	
2.5E-09		5853.24		0.20	
f_{bo}/f_{co}	Exzentrizität ε	Dilatationswinkel Ψ		K_c	Viskosität
[-]	[-]	[°]		[-]	[s]
1.16	0.1	35		0.67	1.0E-05
Druckbereich Teil 1/2			Zugbereich		
Spannung	Inelastische Dehnung	Damage Parameter dc	Spannung	Rissöffnung CMOD	Damage Parameter dt
[MPa]	[-]	[-]	[MPa]	[mm]	[-]
50.09	0.0000	0.00	3.49	0.00	0.00
53.26	0.0059	0.00	2.71	2.50	0.20
55.79	0.0061	0.00	1.94	5.00	0.40
57.68	0.0064	0.00	1.16	7.51	0.60
59.00	0.0068	0.00	0.93	12.76	0.66
59.79	0.0072	0.00	0.70	18.02	0.72
60.12	0.0077	0.00	0.47	23.27	0.78
60.09	0.0079	0.00	0.23	28.53	0.84
59.88	0.0082	0.00	0.00	33.78	0.90
59.32	0.0087	0.01	Druckbereich Teil 2/2		
58.46	0.0092	0.01			
57.44	0.0098	0.03	Spannung	Inelastische Dehnung	Damage Parameter dc
56.30	0.0105	0.05			
55.01	0.0111	0.06	[MPa]	[-]	[-]
53.66	0.0117	0.09	29.84	0.0255	0.49
52.25	0.0124	0.11	29.17	0.0261	0.50
50.76	0.0130	0.13	28.52	0.0267	0.52
49.32	0.0137	0.16	27.92	0.0273	0.53
41.31	0.0176	0.29	27.39	0.0278	0.54
40.12	0.0183	0.31	26.87	0.0284	0.55
38.99	0.0189	0.33	26.38	0.0289	0.55
37.92	0.0196	0.35	25.91	0.0295	0.56
36.92	0.0202	0.37	25.47	0.0300	0.57
35.97	0.0208	0.39	25.02	0.0306	0.58
35.03	0.0214	0.40	24.60	0.0312	0.58
34.19	0.0220	0.42	24.18	0.0317	0.59
33.38	0.0226	0.43	23.79	0.0322	0.60
32.64	0.0232	0.45	23.38	0.0328	0.60
31.87	0.0238	0.46	23.01	0.0333	0.61
31.14	0.0244	0.47	22.85	0.0339	0.62
30.47	0.0250	0.48	22.75	0.0344	0.62

Tabelle 4-4: ABAQUS - Materialparameter für den bilinearen Ansatz für einen
Stahlfasergehalt von 45kg/m³

4.2.4 Modifizierter Bilinearer Ansatz

Der modifizierte bilineare Ansatz ist ebenfalls ein Entfestigungsgesetz für den plastischen Nachbruchbereich von Beton. Es ist eine Modifizierung des oben beschriebenen bilinearen Ansatzes und wurde speziell für diese Arbeit für die Nachbildung von Stahlfaserbetonversuche weiterentwickelt.

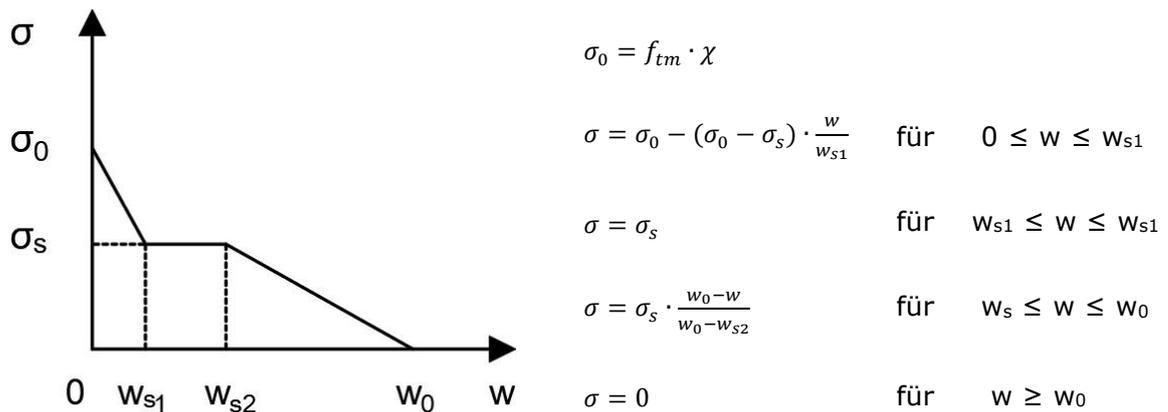


Abb.: 4-8: modifizierter bilinearer Ansatz

Wie bei allen anderen Entfestigungsgesetzen ist die Fläche unter der σ - w Kurve die Bruchenergie G_f und errechnet sich für den modifizierten bilinearen Ansatz nach Gl. 4-10.

$$\text{Gl. 4-10:} \quad G_f = (\sigma_0 \cdot w_{s1} - \sigma_s \cdot (w_{s1} - w_{s2}) + \sigma_s \cdot w_0) / 2$$

Anders als beim bilinearen Ansatz wird nach dem ersten Knickpunkt im Entfestigungsgesetz, der nach Gl. 4-12 und Gl. 4-13 berechnet wird, ein Plateau in der σ - w Kurve bis zum zweiten Knickpunkt (Gl. 4-12, Gl. 4-14) eingefügt (siehe Abb.: 4-8). Dieses Plateau im Entfestigung-Rissöffnungsgesetz ermöglicht die Simulation des erneuten Anstiegs der Biegezugfestigkeit im Nachbruchbereich von Stahlfaserbeton.

$$\text{Gl. 4-11:} \quad \sigma_0 = f_{tm} \cdot \chi$$

$$\text{Gl. 4-12:} \quad \sigma_s = 2/3 \cdot \sigma_0$$

$$\text{Gl. 4-13:} \quad w_{s1} = 1/3 \cdot G_f / \sigma_0$$

$$\text{Gl. 4-14:} \quad w_{s2} = 5/6 \cdot G_f / \sigma_0$$

$$\text{Gl. 4-15:} \quad w_0 = 2 \cdot G_f / \sigma_0$$

Die maximale Rissöffnung im Entfestigungsgesetz wird mit Gl. 4-15 berechnet und fällt aufgrund der zusätzlichen Fläche unter dem Plateau in der σ - w Kurve bei identer Bruchenergie G_f geringer aus als beim bilinearen Entfestigungsgesetz.

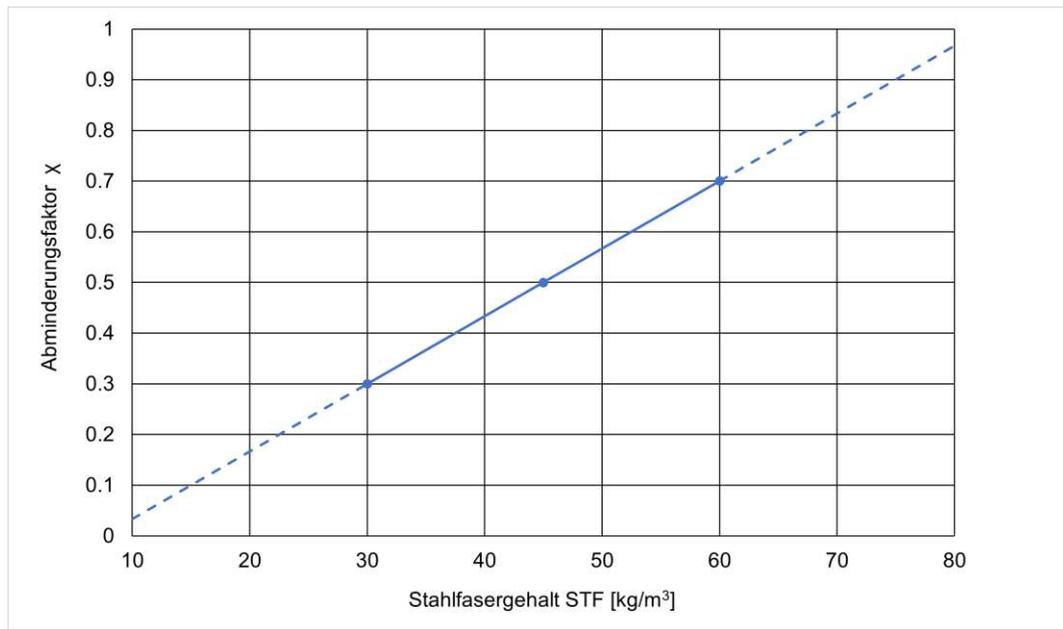


Abb.: 4-9: Abhängigkeit des Abminderungsfaktor χ vom Stahlfasergehalt STF

Die Simulationen mit den unterschiedlichen Entfestigungsmodellen und Stahlfasergehalten haben gezeigt, dass die im Labor festgestellten Zugfestigkeiten zu hohe Simulationsergebnisse ergeben. Es hat sich gezeigt, dass wie in den Abbildungen Abb.: 4-11, Abb.: 4-12 und Abb.: 4-13 im Kapitel 4.2.5 genauer dargestellt, eine vom Stahlfasergehalt abhängige Abminderung der Zugspannungen die besten Ergebnisse brachte. Diese Minderung χ ist linear vom Stahlfasergehalt abhängig (Abb.: 4-9). Die Berechnung der Zugspannung erfolgt nach Gl. 4-11 und wurde analog bei allen weiteren Ansätzen angewandt.

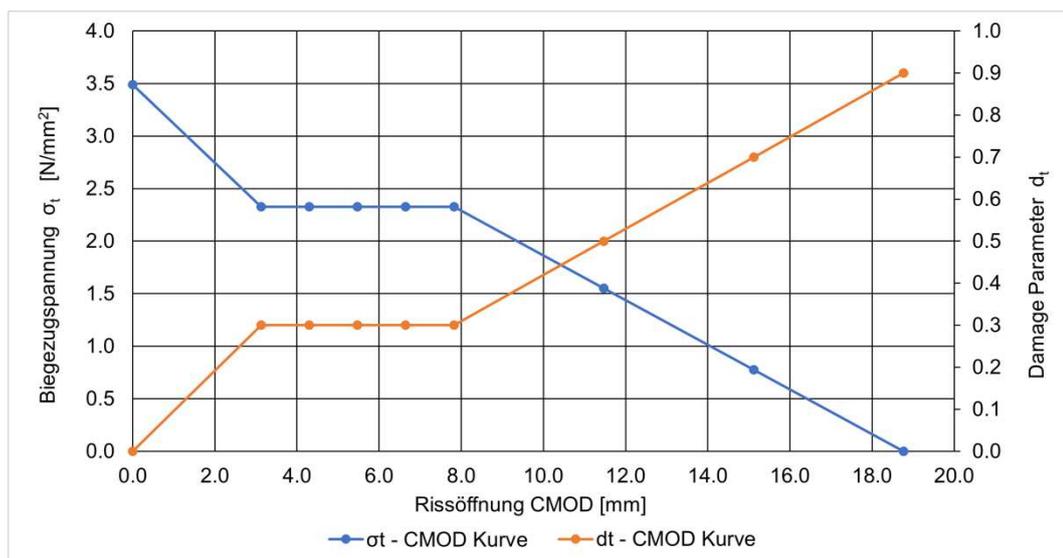


Abb.: 4-10: Berechnete σ_t - CMOD Entfestigungskurve und d_t - CMOD Kurve für den modifizierten bilinearen Ansatz bei einem Stahlfasergehalt (STF) von 45kg/m³

Die Materialparameter für die Simulationen mittels modifizierten bilinearen Ansatzes für eine Probe mit einem Stahlfasergehalt von 45kg/m^3 sind in Tabelle 4-5 dargestellt.

Die Werte des Zugbereichs wurden anhand der Formeln des modifizierten bilinearen Ansatzes berechnet und sind für STF45 in Abb.: 4-10 dargestellt.

Modifizierter Bilinearer Ansatz					
Dichte		E-Modul		Poisson-Zahl	
[t/mm ³]		[MPa]		[-]	
2.5E-09		5853.24		0.20	
f_{bo}/f_{co}	Exzentrizität ε	Dilatationswinkel ψ		K_c	Viskosität
[-]	[-]	[°]		[-]	[s]
1.16	0.1	35		0.67	1.0E-05
Druckbereich Teil 1/2			Zugbereich		
Spannung	Inelastische Dehnung	Damage Parameter dc	Spannung	Rissöffnung CMOD	Damage Parameter dt
[MPa]	[-]	[-]	[MPa]	[mm]	[-]
50.09	0.0000	0.00	3.49	0.00	0.00
53.26	0.0059	0.00	2.33	3.13	0.30
55.79	0.0061	0.00	2.33	4.30	0.30
57.68	0.0064	0.00	2.33	5.47	0.30
59.00	0.0068	0.00	2.33	6.65	0.30
59.79	0.0072	0.00	2.33	7.82	0.30
60.12	0.0077	0.00	1.55	11.47	0.50
60.09	0.0079	0.00	0.78	15.12	0.70
59.88	0.0082	0.00	0.00	18.77	0.90
59.32	0.0087	0.01	Druckbereich Teil 2/2		
58.46	0.0092	0.01			
57.44	0.0098	0.03	Spannung	Inelastische Dehnung	Damage Parameter dc
56.30	0.0105	0.05			
55.01	0.0111	0.06	[MPa]	[-]	[-]
53.66	0.0117	0.09	29.84	0.0255	0.49
52.25	0.0124	0.11	29.17	0.0261	0.50
50.76	0.0130	0.13	28.52	0.0267	0.52
49.32	0.0137	0.16	27.92	0.0273	0.53
41.31	0.0176	0.29	27.39	0.0278	0.54
40.12	0.0183	0.31	26.87	0.0284	0.55
38.99	0.0189	0.33	26.38	0.0289	0.55
37.92	0.0196	0.35	25.91	0.0295	0.56
36.92	0.0202	0.37	25.47	0.0300	0.57
35.97	0.0208	0.39	25.02	0.0306	0.58
35.03	0.0214	0.40	24.60	0.0312	0.58
34.19	0.0220	0.42	24.18	0.0317	0.59
33.38	0.0226	0.43	23.79	0.0322	0.60
32.64	0.0232	0.45	23.38	0.0328	0.60
31.87	0.0238	0.46	23.01	0.0333	0.61
31.14	0.0244	0.47	22.85	0.0339	0.62
30.47	0.0250	0.48	22.75	0.0344	0.62

Tabelle 4-5: ABAQUS - Materialparameter für den modifizierten bilinearen Ansatz für einen Stahlfasergehalt von 45kg/m^3

4.2.5 Vergleich der Ansätze

Um den am besten geeigneten Ansatz von den drei beschriebenen zu finden, werden die Simulationsergebnisse aller drei Methoden bei unterschiedlichen Stahlfasergehalten miteinander verglichen. Als Referenz für die Simulationen werden jeweils die höchsten und niedrigsten Laborergebnisse für den jeweiligen Stahlfasergehalt aus Kapitel 0 herangezogen.

Zur Beurteilung der Aussagekraft der Ansätze wird einerseits die Biegezugfestigkeit im Nachbruchbereich und andererseits die Gebrauchstauglichkeit und Tragsicherheit nach der Faserbeton Richtlinie der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik verwendet. [4]

$$\text{Gl. 4-16:} \quad f_{eqms} = \frac{P_{0.50} \cdot l}{b \cdot h^2}$$

$$\text{Gl. 4-17:} \quad f_{eqmu} = \frac{P_{0.50-3mm} \cdot l}{b \cdot h^2}$$

$$\text{Gl. 4-18:} \quad P_{0.50-3mm} = \frac{A_{0.50-3mm}}{2,5}$$

Die Gebrauchstauglichkeit wird nach Gl. 2-1 und die Tragsicherheit nach Gl. 4-17 berechnet. Dabei ist l die Länge zwischen den Auflagern, b die Balkenbreite und h die Balkenhöhe im Kerbgrund. Mit Gl. 4-18 wird die flächengemittelte Spannung bei einer Durchbiegung im Bereich von 0.5–3mm ermittelt.

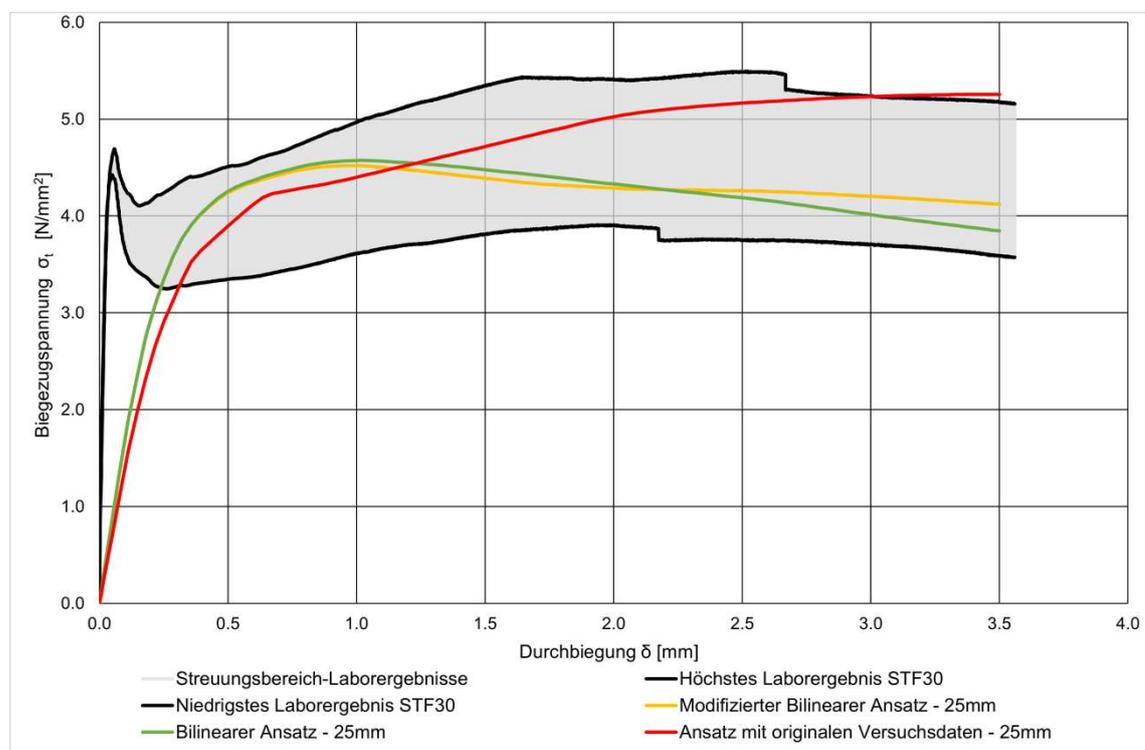


Abb.: 4-11: Variantenanalyse für einen Stahlfasergehalt von 30kg/m^3

Für die Mischung mit einem Stahlfasergehalt von 30kg/m^3 (STF30) zeigt sich in Abb.: 4-11, dass sowohl der bilineare als auch der modifizierte bilineare Ansatz ein gutes Ergebnis liefern und innerhalb des Streubereichs der Laborversuche liegen. Auch die Abweichungen vom Labormittelwert bei Biegezugfestigkeit σ_{ct} , Gebrauchstauglichkeit SLS (Serviceability Limit State) und Tragsicherheit ULS (Ultimate Limit State) sind gering und für beide Ansätze sehr ähnlich. Der Ansatz aus Laborversuchsdaten ist wie in Abb.: 4-11 und Tabelle 4-6 unter „Ansatz mit originalen Versuchsdaten“ ersichtlich nicht ausreichend geeignet.

Wie im Kapitel 4.2.1 beschrieben, wird für das Simulationsmodell eine vermischte Materialeigenschaft aus Beton und Stahlfaser angenommen. Bei dieser Annahme führt jedoch der aus dem Labor gewonnene E-Modul zu nicht zufriedenstellenden Ergebnissen. Wie in Abb.: 4-11 an den Laborergebnissen ersichtlich, hat das Material eine hohe Anfangssteifigkeit bis zur Rissbildung im Beton, welche sich als ausgeprägte Spannungsspitze im Diagramm darstellt (siehe Abb.: 4-11; Spannung $4,7\text{N/mm}^2$ bei einer Durchbiegung von $0,058\text{mm}$). Nach dem Spannungsabfall bei zunehmender Durchbiegung auf Grund der Rissbildung im Beton wird ein Spannungsminimum erreicht. Ab diesem Zeitpunkt kommen die positiven Eigenschaften der Stahlfaser zur Geltung. Durch die höhere Zugfestigkeit der Stahlfaser und dem Auszugswiderstand der Faser aus der Betonmatrix steigt die Spannung erneut bis zu einem Spannungshöhepunkt an. Die Ausprägung der Spannungsspitze sowie dem Minimum, wie in Abb.: 4-11, hängt vom eingemischten Stahlfasergehalt ab. Dieses Bruchverhalten mit zwei ausgeprägten Spannungsspitzen ist bei einem Materialverhalten mit vermischten Eigenschaften aus numerischer Sicht nicht möglich. Daher haben die durchgeführten Simulationen gezeigt, dass die Reduktion des E-Moduls um ein Drittel die am besten übereinstimmenden Ergebnisse für den plastischen Nachbruchbereich, bei einer Durchbiegung von $0,5\text{mm} - 3\text{mm}$, ergeben. Genau dieser Bereich ist eben auch für die konstruktive Bemessung von Stahlfaserbetonbauteilen maßgebend.

	Biegezugfestigkeit σ_{ct}	Abweichung vom Laborwert	Gebrauchstauglichkeit (SLS)	Abweichung vom Laborwert	Tragsicherheit (ULS)	Abweichung vom Laborwert
	[N/mm ²]	[%]	[N/mm ²]	[%]	[N/mm ²]	[%]
Labormittelwert	4.96		2.62		2.98	
Ansatz mit orig. Versuchsdaten	5.26	6%	2.65	1%	3.20	7%
Bilinearer Ansatz	4.57	-8%	2.89	10%	2.90	-3%
Modifizierter Bilinearer Ansatz	4.52	-9%	2.86	9%	2.90	-3%

Tabelle 4-6: Ergebnisse Variantenanalyse STF30

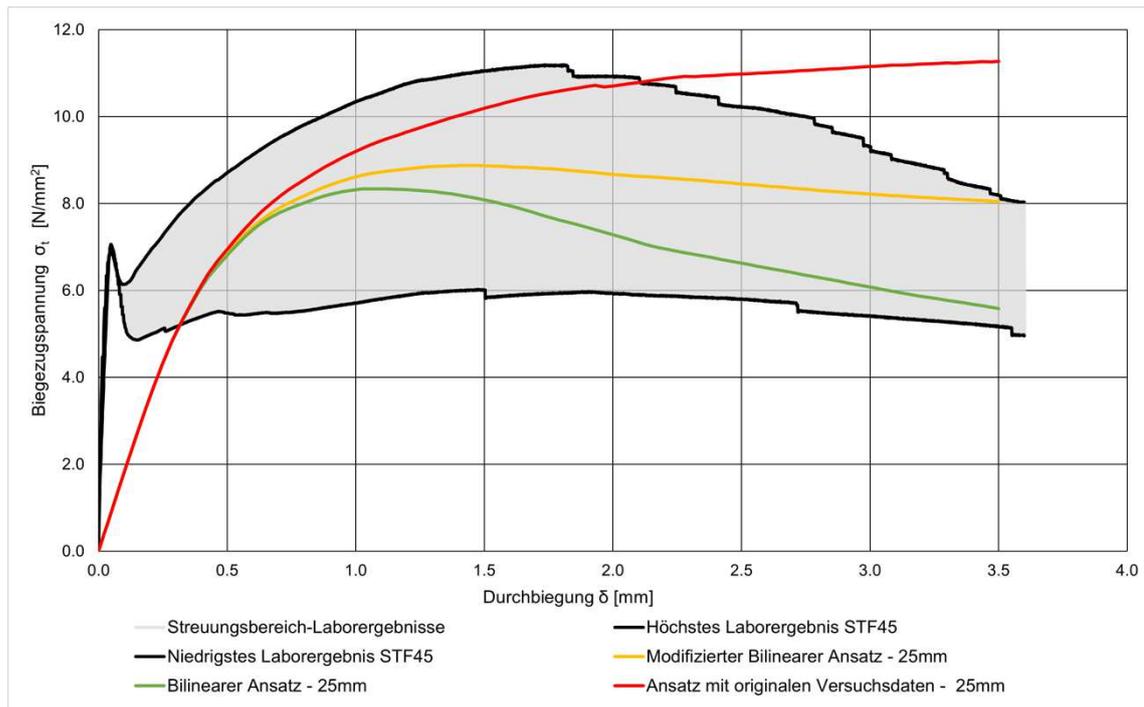


Abb.: 4-12: Variantenanalyse für einen Stahlfasergehalt von 45kg/m^3

Für einen Fasergehalt von 45kg/m^3 sind die Ergebnisse der unterschiedlichen Ansätze recht ähnlich (siehe Abb.: 4-12). Jedoch ist der Unterschied zwischen bilinearem und modifiziertem bilinearem Ansatz größer. Der Ansatz mit originalen Versuchsdaten ist auch bei diesem Stahlfasergehalt zu hoch. Anhand der Abweichungen vom Labormittelwert in Tabelle 4-7 ist zu erkennen, dass für einen Stahlfasergehalt von 45kg/m^3 der modifizierte bilineare Ansatz am Besten geeignet ist.

	Biegezugfestigkeit σ_{ct}	Abweichung vom Laborwert	Gebrauchstauglichkeit (SLS)	Abweichung vom Laborwert	Tragsicherheit (ULS)	Abweichung vom Laborwert
	[N/mm^2]	[%]	[N/mm^2]	[%]	[N/mm^2]	[%]
Labormittelwert	9.13		4.73		5.38	
Ansatz mit orig. Versuchsdaten	11.27	23%	4.63	-2%	6.73	25%
Bilinearere Ansatz	8.34	-9%	4.54	-4%	4.94	-8%
Modifizierter Bilinearere Ansatz	8.87	-3%	4.56	-3%	5.66	5%

Tabelle 4-7: Ergebnisse Variantenanalyse STF45

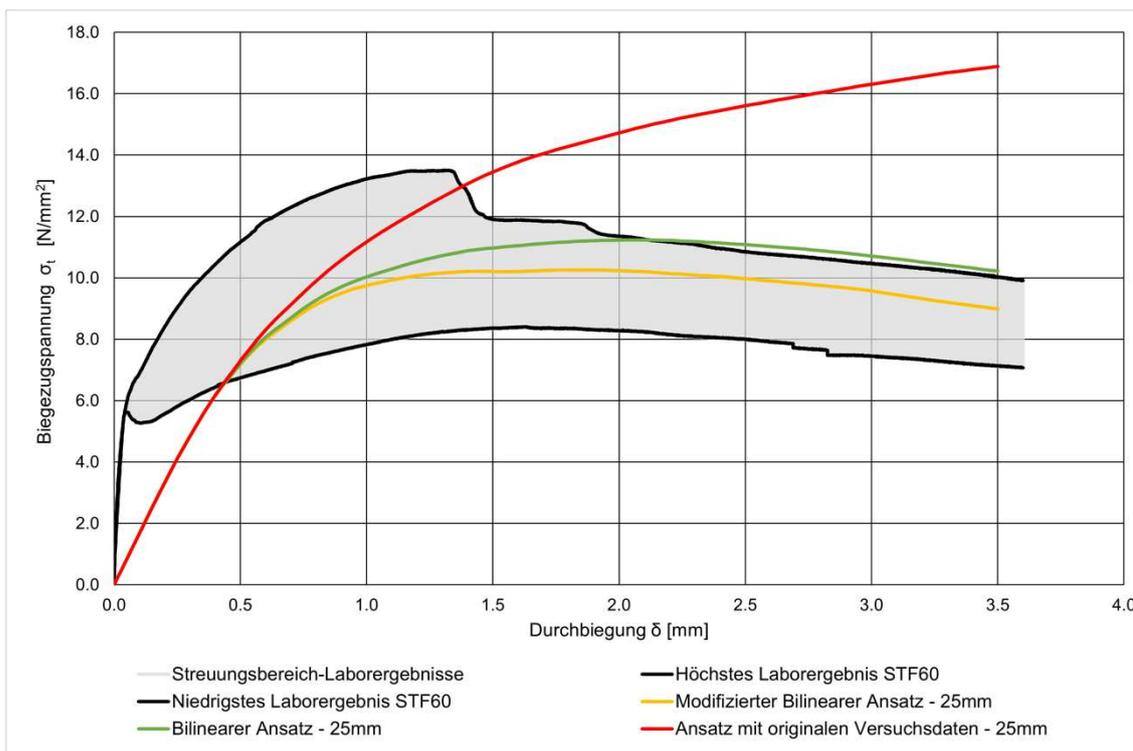


Abb.: 4-13: Variantenanalyse für einen Stahlfasergehalt von 60kg/m³

Die Ergebnisse für den höchsten Stahlfasergehalt von 60kg/m³ zeigen dasselbe Verhalten wie bei der STF45 Mischung. Der modifizierte bilineare Ansatz liefert laut Tabelle 4-8 die besten Ergebnisse und ist wie Abb.: 4-13 ersichtlich der Einzige der drei Ansätze, dessen Verlauf durchgehend im Streuungsbereich der Laborergebnisse liegt. Die Simulationen mit dem bilinearen und dem Ansatz aus Laborversuchsdaten ergeben zu hohe Ergebnisse.

	Biegezugfestigkeit σ_{ct}	Abweichung vom Laborwert	Gebrauchstauglichkeit (SLS)	Abweichung vom Laborwert	Tragsicherheit (ULS)	Abweichung vom Laborwert
	[N/mm ²]	[%]	[N/mm ²]	[%]	[N/mm ²]	[%]
Labormittelwert	10.96		5.97		6.58	
Ansatz mit orig. Versuchsdaten	16.88	54%	5.09	-15%	8.95	36%
Bilinearere Ansatz	11.23	3%	5.00	-16%	7.03	7%
Modifizierter Bilinearere Ansatz	10.26	-6%	4.98	-17%	6.53	-1%

Tabelle 4-8: Ergebnisse Variantenanalyse STF60

Bei Betrachtung der Ergebnisse für die unterschiedlichen Stahlfasergehalte ist zu erkennen, dass der modifizierte bilineare Ansatz in Summe die besten Ergebnisse liefert. Der bilineare Ansatz liefert zwar bei 30kg/m³ Stahlfasern gute Ergebnisse, jedoch sind die Abweichungen bei den Mischungen STF45 und STF60 zu groß. Der Ansatz mit originalen Versuchswerten liefert bei allen drei Fasergehalten große Abweichungen von den Laborwerten.

Für die weiteren Simulationen in dieser Arbeit wird auf Grund der gewonnenen Erkenntnis ausschließlich mit dem modifizierten bilinearen Ansatz gerechnet.

4.2.6 Sensitivitätsanalyse

Mit dieser durchgeführten Sensitivitätsanalyse wird die Auswirkung der Elementgröße bei der Simulation auf das Ergebnis untersucht. Dafür wurde für den Stahlfasergehalt von 45kg/m^3 das Modell mit unterschiedlichen Elementgrößen simuliert. Hierzu wurden Elementgrößen von 5mm – 35mm untersucht.

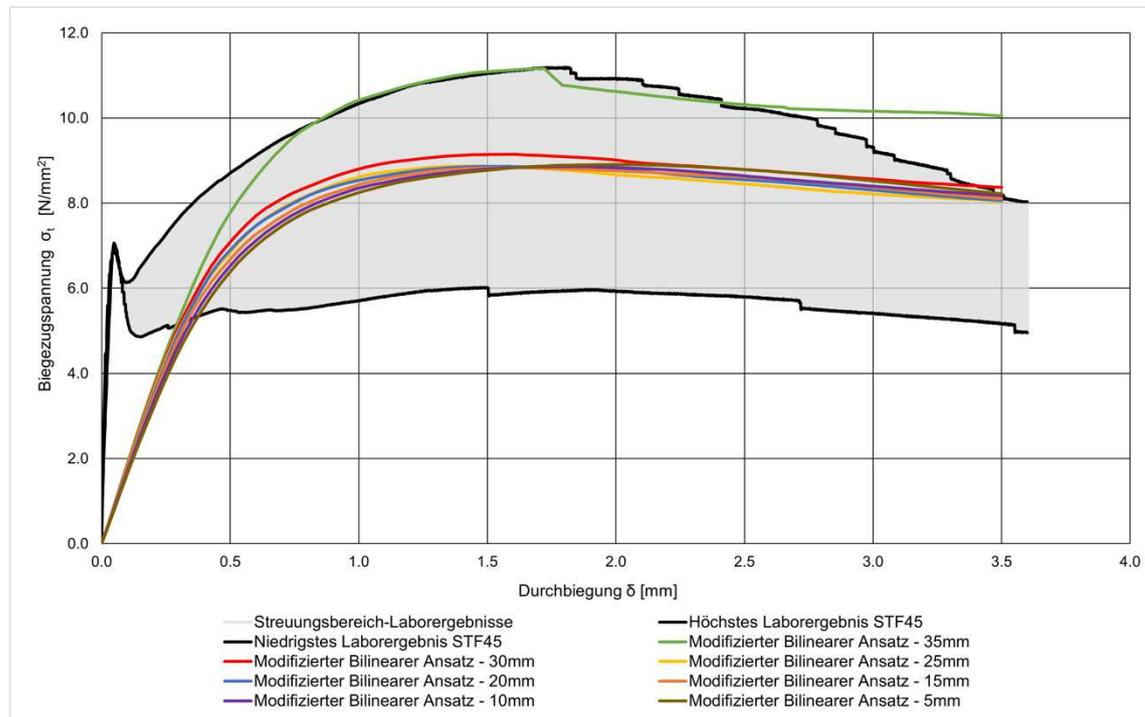


Abb.: 4-14: Ergebnisse der Simulation bei unterschiedlicher Elementgröße

In ABAQUS gibt es für die unterschiedlichsten Anwendungen viele verschiedene Elementtypen. In dieser Arbeit wurden C3D8 Elemente (siehe Abb.: 4-15), oft auch als lineares Element bezeichnet, verwendet. Diese sind dreidimensionale Elemente mit acht Knoten an den acht Eckpunkten des Elements. Die angegebene Elementgröße gibt die maximale Elementseitenlänge an, die ABAQUS beim Erstellen des Netzes verwendet. Dadurch ergeben sich bei einer maximalen Elementgröße von z.B. 20mm bei den Abmessungen des Balkens für den Dreipunktbiegeversuchs mit einer Breite von 150mm und einer Höhe von ebenfalls 150mm, quadratische Elemente mit 18,75mm Seitenlänge.

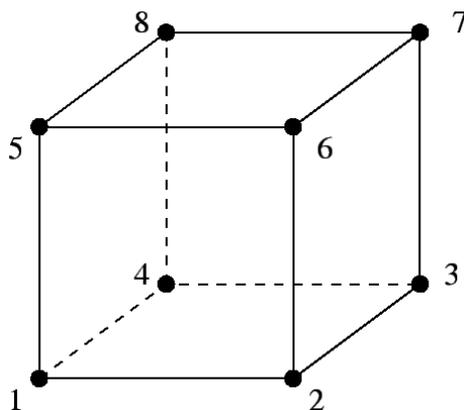


Abb.: 4-15: dreidimensionales 8-Knoten Quaderelement (C3D8 Element) [41]

In Abb.: 4-14 ist ersichtlich, dass die Elementgröße annähernd keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Simulationen hat. Bei einer maximalen Elementgröße von 35mm ergibt sich beim Balkenquerschnitt von 150mm x 150mm eine Anzahl von 16 Elementen. Dies ist wie in Abb.: 4-14 ersichtlich für eine realitätsnahe Simulation zu wenig. Aus diesem Grund wurden in Tabelle 4-9 diese Ergebnisse rot gekennzeichnet und in die Berechnung des Mittelwertes, der Standardabweichung und der Varianz nicht berücksichtigt.

Elementgröße	Anzahl Elemente	Anzahl Knoten	Rechenzeit	Biegezugfestigkeit σ_{ct}	Gebrauchstauglichkeit (SLS)	Tragsicherheit (ULS)
	[-]	[-]	[hh:mm:ss]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
35	264	445	00:00:25	11.16	5.19	6.91
30	580	858	00:00:38	9.15	4.73	5.85
25	852	1211	00:00:57	8.87	4.56	5.66
20	1808	2376	00:01:47	8.86	4.60	5.68
15	4270	5269	00:04:51	8.84	4.60	5.66
10	14340	16528	00:27:43	8.85	4.35	5.65
5	106470	114576	13:12:53	8.91	4.26	5.66
Mittelwert				8.91	4.52	5.69
Standardabweichung				0.11	0.16	0.07
Varianz				0.01	0.03	0.00

Tabelle 4-9: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

In Tabelle 4-9 zeigt sich, dass die Werte für die Biegezugfestigkeit, die Gebrauchstauglichkeit und Tragsicherheit nach der Richtlinie Faserbeton der Österreichischen Vereinigung für Beton und Bautechnik für alle Elementgröße kaum voneinander abweichen. Anzumerken ist auch, dass die Anzahl der Elemente und die Anzahl der Knoten bei kleiner werdender Elementgröße stark zunimmt. Durch die hohe Anzahl der Elemente nimmt die Rechenzeit ebenfalls stark zu. Die Berechnungszeiten in Tabelle 4-9 sind nur Anhaltswerte und können je nach Hardware des Rechners stark variieren. Diese Angaben sollen ausschließlich aufzeigen, dass die Rechenzeit bei geringen Elementgrößen überproportional zunimmt, das Ergebnis jedoch annähernd ident ist.

Für die weiteren Berechnungen wurde aus diesem Grund eine maximale Elementgröße von 20mm gewählt, da diese Größe einen Kompromiss aus guten Ergebnissen sowie geringem Rechenaufwand darstellt.

4.3 Ergebnisse der Simulation

Mit den Erkenntnissen und dem Simulationsmodell in ABAQUS aus Kapitel 4.2, also mit Materialparameter im Zugbereich nach dem modifizierten bilinearen Ansatz und einer Elementgröße von 20mm wurden weitere Modelle simuliert.

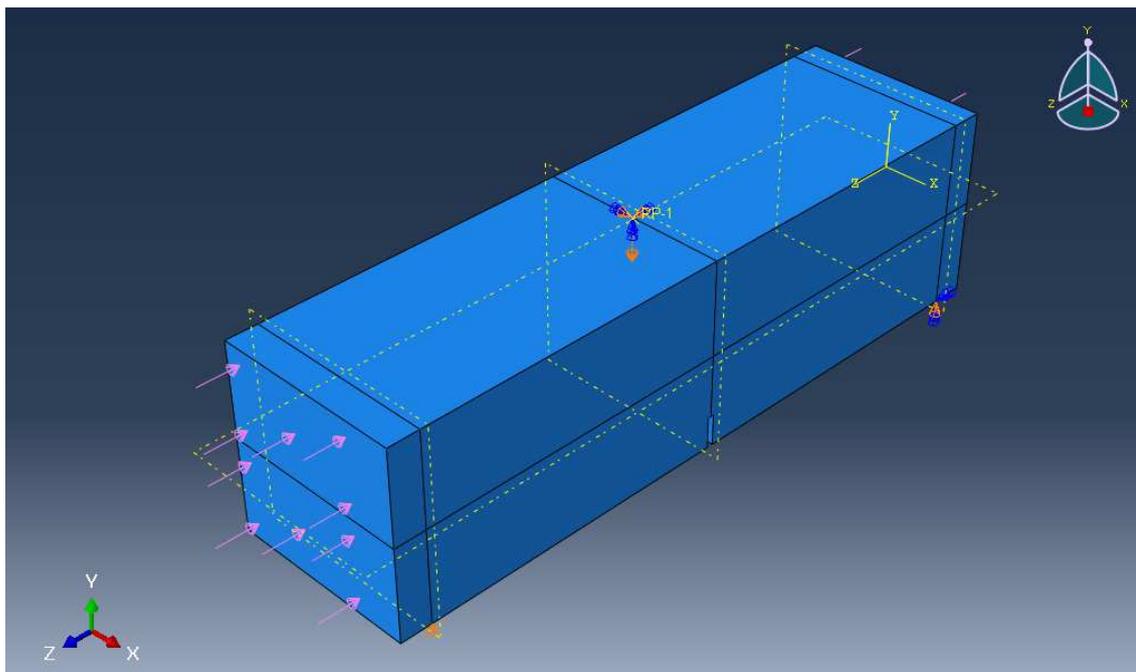


Abb.: 4-16: ABAQUS Modell mit axialer Druckspannung (rosa Pfeile)

Zusätzlich zu dem bereits vorhandenen Modell wurde eine beidseitig auf die Stirnfläche des Balkens projizierte axiale Druckspannung, zusätzlich zur Vertikalkraft in der Balkenmitte, implementiert (siehe Abb.: 4-16). In ABAQUS wird diese auf die Fläche gleichmäßig verteilte Spannung als Druck bzw. „Pressure“ bezeichnet. Diese Druckspannung muss unmittelbar „instantaneous“ aufgebracht werden. Um das Modell im Gleichgewicht zu halten und Veränderungen an den Randbedingungen zu vermeiden, wurde jeweils die Hälfte der geforderten Druckspannung auf beiden Seiten aufgetragen. Es wurde Modelle mit folgenden axialen Druckspannungen simuliert (Tabelle 4-10):

STF30		STF45	
Druckspannung pro Fläche [MPa]	Druckspannung - Balkenmitte [MPa]	Druckspannung pro Fläche [MPa]	Druckspannung - Balkenmitte [MPa]
0	0	0	0
2,5	5	2,5	5
5	10	5	10
10	20	10	20
15	30	15	30
20	40	20	40
25	50	25	50
		30	60
		35	70
		40	80

Tabelle 4-10: Axiale Druckspannungen mit denen das Modell simuliert wurde

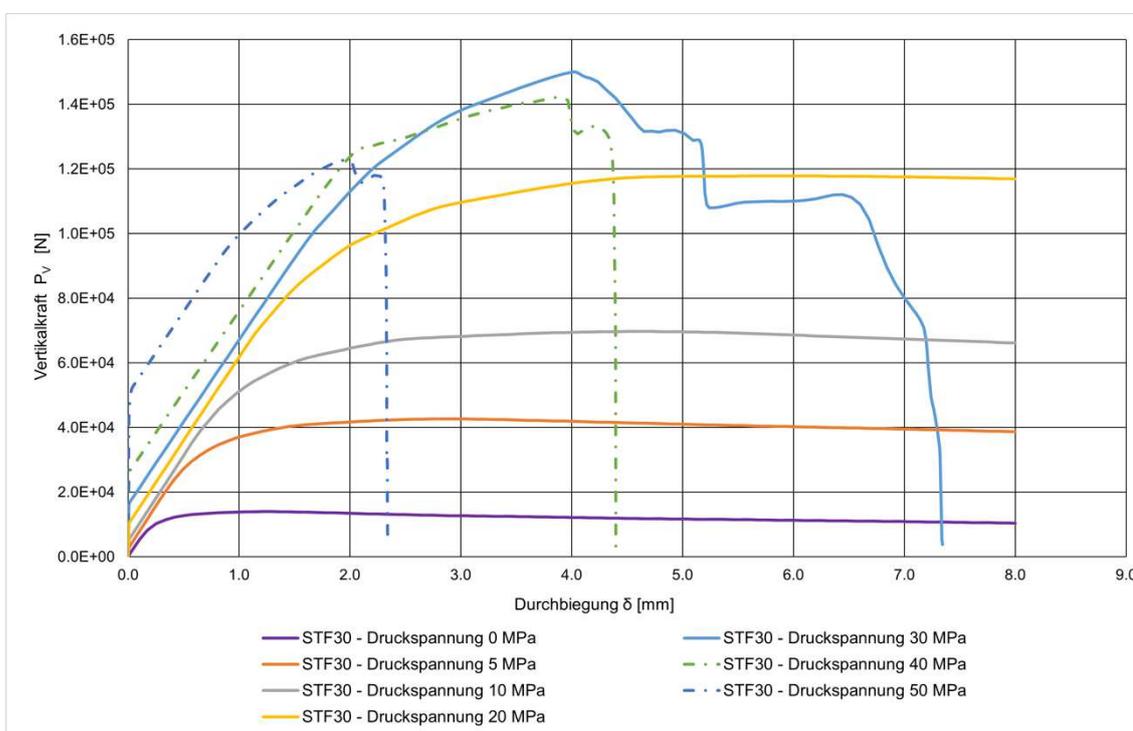


Abb.: 4-17: Simulierte Vertikalkraft - Durchbiegungsverläufe bei axialer Druckspannung auf die STF30-Probe

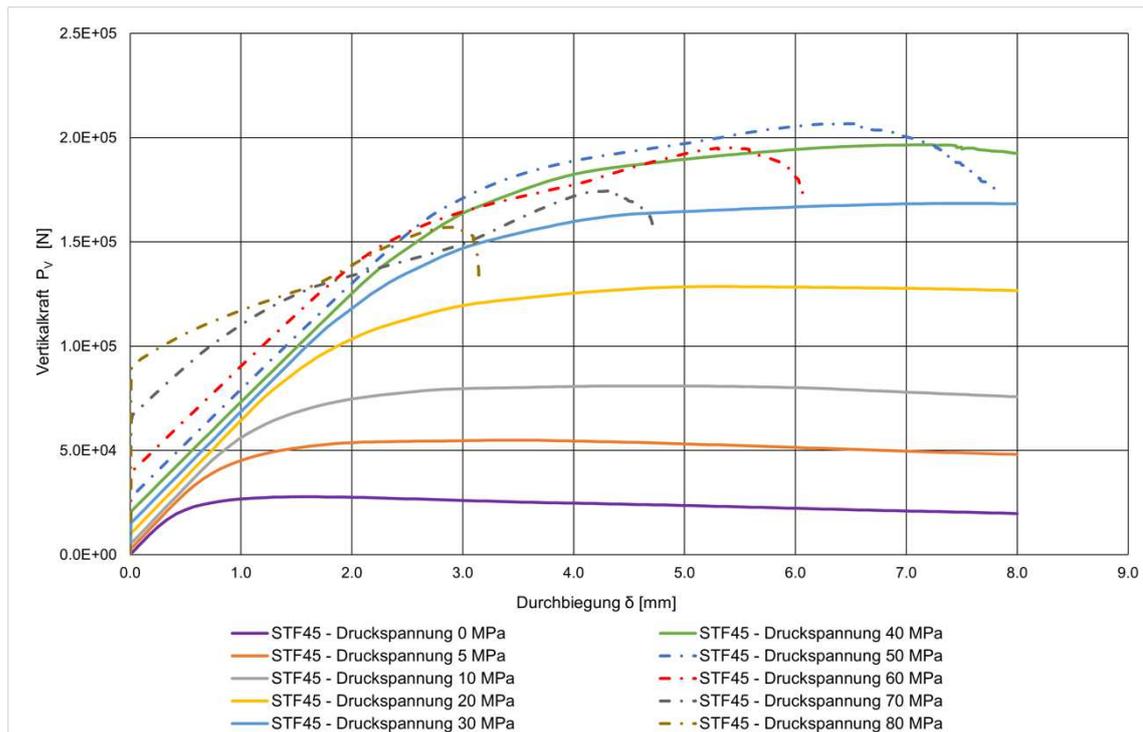


Abb.: 4-18: Simulierte Vertikalkraft - Durchbiegungsverläufe bei axialer Druckspannung auf die STF45-Probe

Um die maximale Vertikalkraft zu erreichen, ist es bei den Simulationen mit axialer Druckspannung erforderlich, die maximale Durchbiegung von 3,5mm auf 8mm zu erhöhen. In Abb.: 4-17 und Abb.: 4-18 ist ersichtlich, dass bis zu einer aufgebrachten Druckspannung von 20MPa bei STF30 bzw. 40MPa bei STF45 in Balkenmitte die Kraft-Durchbiegungskurven sehr ähnlich sind. In Abb.: 4-19 ist ebenfalls zu erkennen, dass der Anstieg der Vertikalkraft mit zunehmender axialer Druckspannung bis 20MPa bzw. 40MPa annähernd linear verläuft. Die größte Vertikalkraft wird bei 30MPa bzw. 50MPa axialer Druckspannung bei einer Durchbiegung von 4mm bzw. 6,5mm erreicht. Bei dieser Durchbiegung bricht die Probe infolge des biaxialen Spannungszustands. Der Bruch ist in der Simulation an der stark abfallenden Vertikalkraft, in ABAQUS als Reaktionskraft bzw. „reaction force RF“ auf die Durchbiegung definiert, zu erkennen. Daraufhin wird durch Erreichen der maximalen „Increment number“ die Simulation abgebrochen, da kein stationärer Zustand berechnet werden konnte.

Bei weiterer Zunahme der axialen Druckspannung verringert sich die maximale Vertikalkraft wieder, da der Bruch bereits bei geringerer Durchbiegung eintritt. Bei einem Balken tritt per Definition die größte Belastung normal auf die Längsachse der Probe auf. Übersteigt die Belastung in der Längsachse aufgrund den hohen axialen Druckspannungen die vertikale Belastung, spricht man von einem Druckstab mit zusätzlicher Querbelastung. Bei einem Druckstab tritt das bekannte Phänomen des Knickens auf. Beim Versagensmechanismus des Knickens sind bei hohen axialen Spannungen bereits geringe Querkräfte (im Biegezugversuch die Vertikalkraft) bzw. geringe Exzentrizität (im Biegezugversuch die Durchbiegung) ausreichend, damit die Probe ausknickt und somit schlagartiges Versagen eintritt.

Simulationsberechnungen, bei welchen dieser Versagensmechanismus eintritt, sind in Abb.: 4-17 und Abb.: 4-18 an den strichlierten Vertikalkraft-Durchbiegungsverläufen zu erkennen. Weiters ist zu erkennen, dass bei weiter zunehmender axialer Belastung immer geringere Vertikalkräfte bzw. Durchbiegungen nötig sind, um den Bruch der Probe einzuleiten. (siehe Abb.: 4-17, Abb.: 4-18, Abb.: 4-19, Abb.: 4-20)

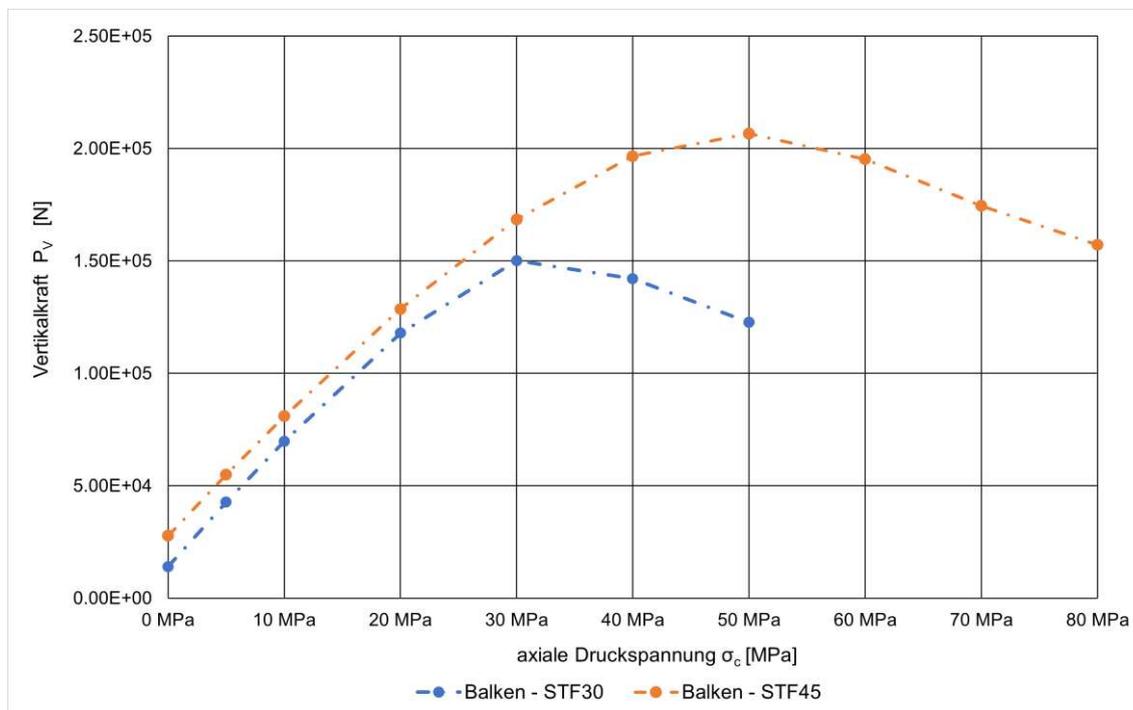


Abb.: 4-19: Anstieg der maximalen Vertikalkraft bei unterschiedlichen axialen Druckspannungen

In Abb.: 4-20 ist der prozentuelle Anstieg der Vertikalkraft bei zunehmender axialer Druckspannung aufgetragen. Um die unterschiedlichen Stahlfasergehalte zu vergleichen, wird in Abb.: 4-20 anstatt der absoluten Druckspannung das Verhältnis von Druckspannung zu Druckfestigkeit aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass mit axialer Druckspannung und dem so entstandene, biaxialen Spannungszustand, bis zu annähernd 10-fach höhere Vertikalkräfte bei STF30 und in etwa 6,5-fach höhere Vertikalkräfte bei ST45 nötig sind, bis die Probe versagt. Weiters ist in Abb.: 4-20 zu erkennen, dass bei geringeren Fasergehalten der prozentuelle Anstieg der Vertikalkraft größer ist und das Maximum bei geringem Verhältnis von Druckspannung zu Druckfestigkeit erreicht wird. Anhand der Tatsache, dass die Faserbewehrung kaum einen Einfluss auf die Druckfestigkeit hat, jedoch ein um 15kg/m^3 höherer Stahlfasergehalt in einer um rund 20% höheren Zugfestigkeit resultiert, erkennt man, dass die axial aufgebrachte Druckspannung bei geringeren Fasergehalten einen größeren Einfluss auf die maximale vertikale Beanspruchung hat.

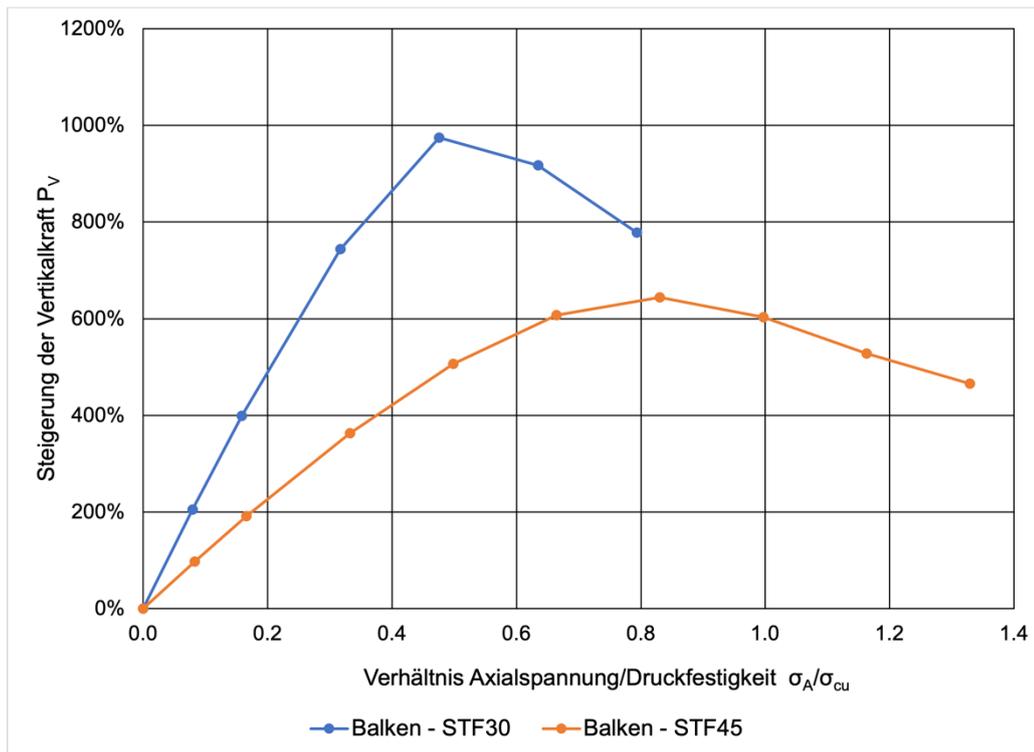


Abb.: 4-20: Prozentueller Anstieg der Vertikalkraft bei axialer Druckspannung

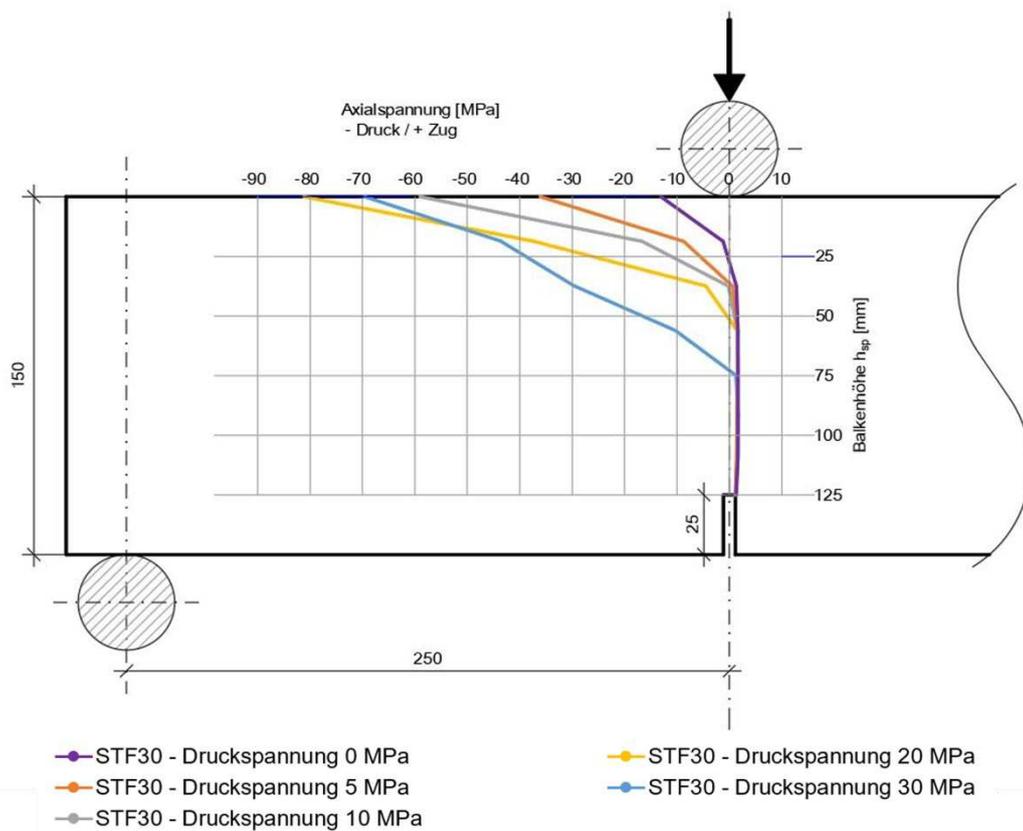


Abb.: 4-21: Schematische Darstellung der Spannungsverläufe in Balkenmitte bei einem Stahlfasergehalt von 30kg/m^3

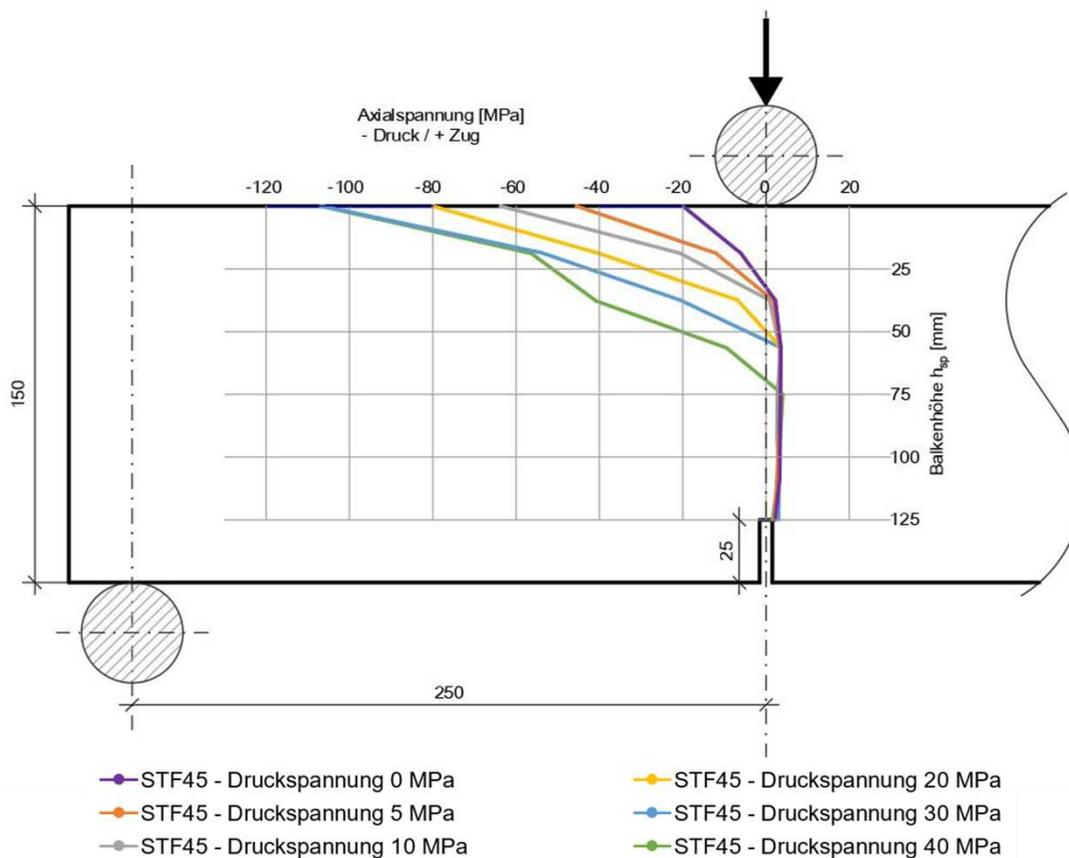


Abb.: 4-22: Schematische Darstellung der Spannungsverläufe in Balkenmitte bei einem Stahlfasergehalt von 45kg/m^3

Betrachtet man nicht nur die äußeren Kräfte, sondern auch den Spannungsverlauf über die Probenhöhe im Balkenmittelpunkt, wie in Abb.: 4-21 und Abb.: 4-22 schematisch dargestellt, ist ebenfalls eine Veränderung mit zunehmender Druckspannung zu sehen. Die Theorie des linearen Spannungsverlaufs über den Querschnitt kann anhand der Ergebnisse der Simulationen mit Stahlfaserbeton nicht bestätigt werden. Die zusätzlichen axialen Druckspannungen verstärken das nicht lineare Verhalten. Die maximalen Druckspannungen auf der Balkenoberseite steigen mit zunehmender axialer Belastung stark an. Die Lage des Spannungsnullpunktes, also der Wechsel von Zug auf Druckspannung, verschiebt sich, wie in Abb.: 4-21, Abb.: 4-22, Abb.: 4-24 und Abb.: 4-25 ersichtlich, hin zur Balkenunterseite. Der Verlauf der Spannungen im Zugbereich, also unterhalb der neutralen Faser, bleibt trotz unterschiedlicher axialer Belastung nahezu unverändert. Abb.: 4-23 zeigt, dass mit der linearen Zunahme der axialen Belastung die Höhe des Belastungsnullpunktes annähernd exponentiell abnimmt, wobei die Größe der Abnahme vom Material und somit vom Stahlfasergehalt abhängig ist.

Bei weiterer Steigerung der axialen Druckspannungen verringert sich die maximale Druckspannung an der Balkenoberseite (siehe Abb.: 4-24 und Abb.: 4-25 strichlierte Verläufe). Der Belastungsnullpunkt erreicht bei ausreichend axialer Belastung die Balkenunterseite, sodass nur noch Druckspannungen im Querschnitt vorhanden sind.

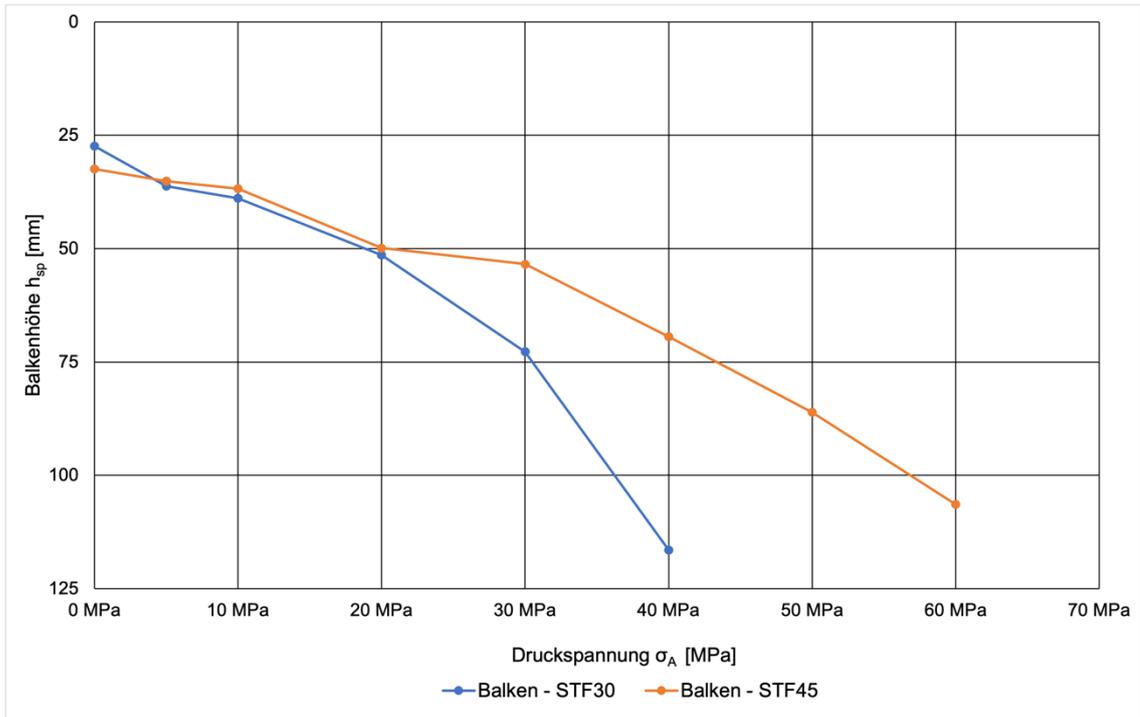


Abb.: 4-23: Veränderung der Höhe des Spannungsnulldpunktes im Balkenquerschnitt

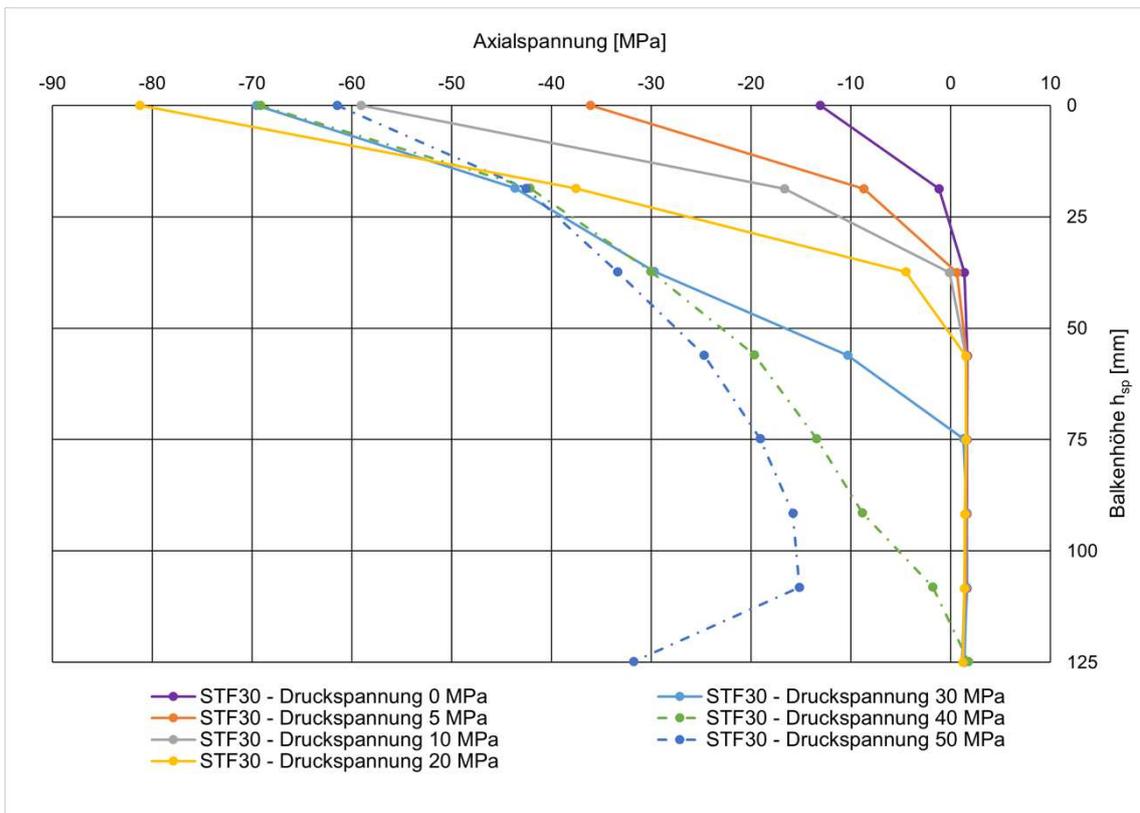


Abb.: 4-24: Druck – (negativ) und Zugspannungen (positiv) über die Balkenhöhe im Balkenmittelpunkt bei maximaler Vertikalkraft bei STF30

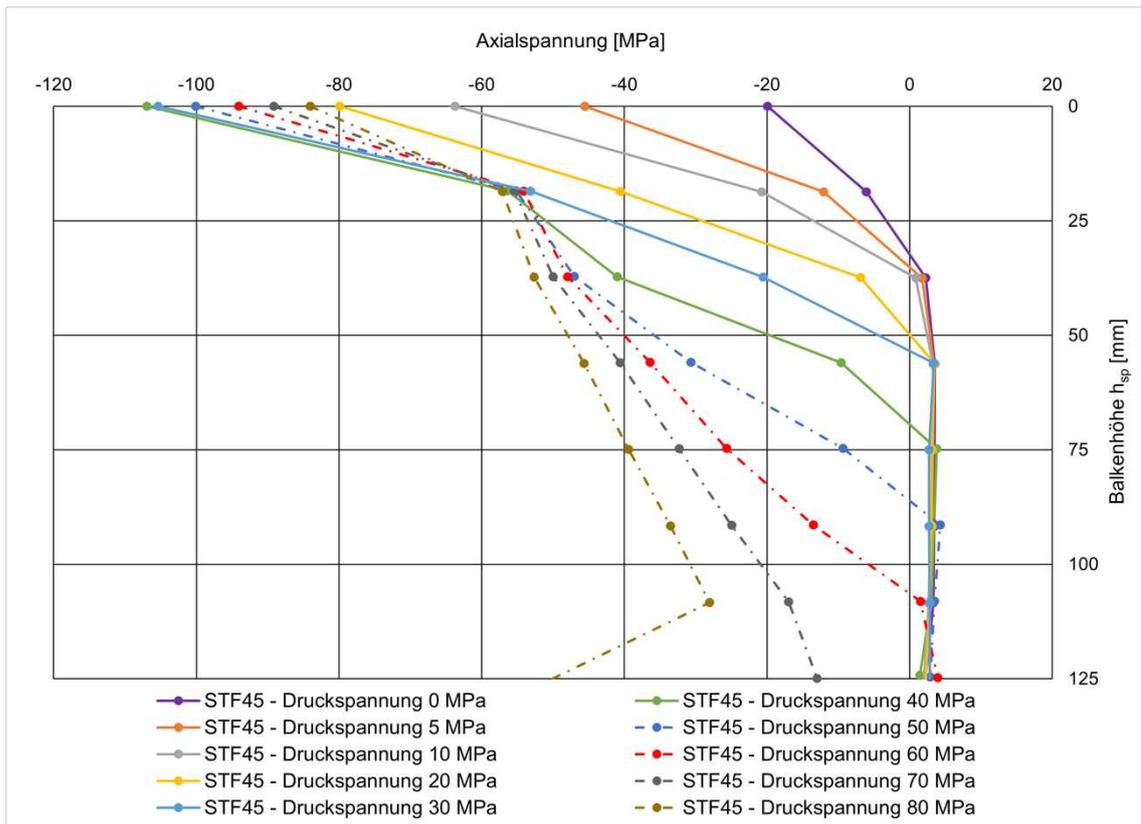


Abb.: 4-25: Druck – (negativ) und Zugspannungen (positiv) über die Balkenhöhe im Balkenmittelpunkt bei maximaler Vertikalkraft bei STF45

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Der Biegezugversuch stellt eine der wichtigsten Möglichkeiten dar, die Nachbrucheigenschaften von Faserbeton beurteilen zu können. Obwohl Vierpunktbiegezugversuche bei unbewehrtem Beton laut Norm bevorzugt werden, ist der Dreipunktbiegezugversuch nach ÖNORM EN 14651 in der Praxis sowohl international als auch national der am öftesten verwendete Versuch, um die Nachbrucheigenschaften von faserbewehrtem Beton zu bestimmen.

Im Rahmen dieser Arbeit hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse aus den experimentellen Biegezugversuchen gut numerisch nachgebildet werden können. Das in ABAQUS implementierte Concrete Damaged Plasticity Modell ist auch für faserbewehrten Beton gut geeignet. Im Gegensatz zum unbewehrten Beton sind die üblichen Entfestigungsgesetze nicht passend. Die Verifizierung der numerischen Ergebnisse an den experimentellen Ergebnissen hat gezeigt, dass die beste Übereinstimmung mit dem modifizierten bilinearen Entfestigungsgesetz und modifizierten Materialparametern erzielt wurden. Das implizite bzw. statische Berechnungsverfahren mit vermischten Materialparametern eignet sich für faserbewehrten Beton am besten. Das zusätzliche Aufbringen von axialer Druckspannung hat wichtige Erkenntnisse zu Stahlfaserproben unter biaxialer Belastung gebracht. Die maximal erreichbare Vertikalkraft steigt mit zunehmender axialer Druckspannung stetig an. Erreichen die axialen Druckspannungen ungefähr $2/3$ der Druckfestigkeit der Probe, so treten im Balkenquerschnitt ausschließlich Druckspannungen auf. Der Versagensmechanismus „Knicken“ verursacht bei noch höheren axialen Belastungen eine Reduktion der maximal erreichbaren Vertikalkraft. Ebenso wurde im Zuge dieser Arbeit aufgezeigt, dass geringe axiale Druckspannungen die Belastbarkeit des Balkens bis um das 10-fache erhöhen.

Aufbauend auf diese Arbeit wären die nächsten Schritte die Konstruktion eines kombinierten Laborbiegezugversuchs mit gleichzeitig aufgebrachter axialer Druckspannung, um die numerischen Ergebnisse zu verifizieren. Außerdem würde dieser modifizierte Laborversuch im kleinen Maßstab möglicherweise eine geeignete Alternative zur numerischen Simulation mit dem umfangreichen Bestimmen der Materialparameter darstellen.

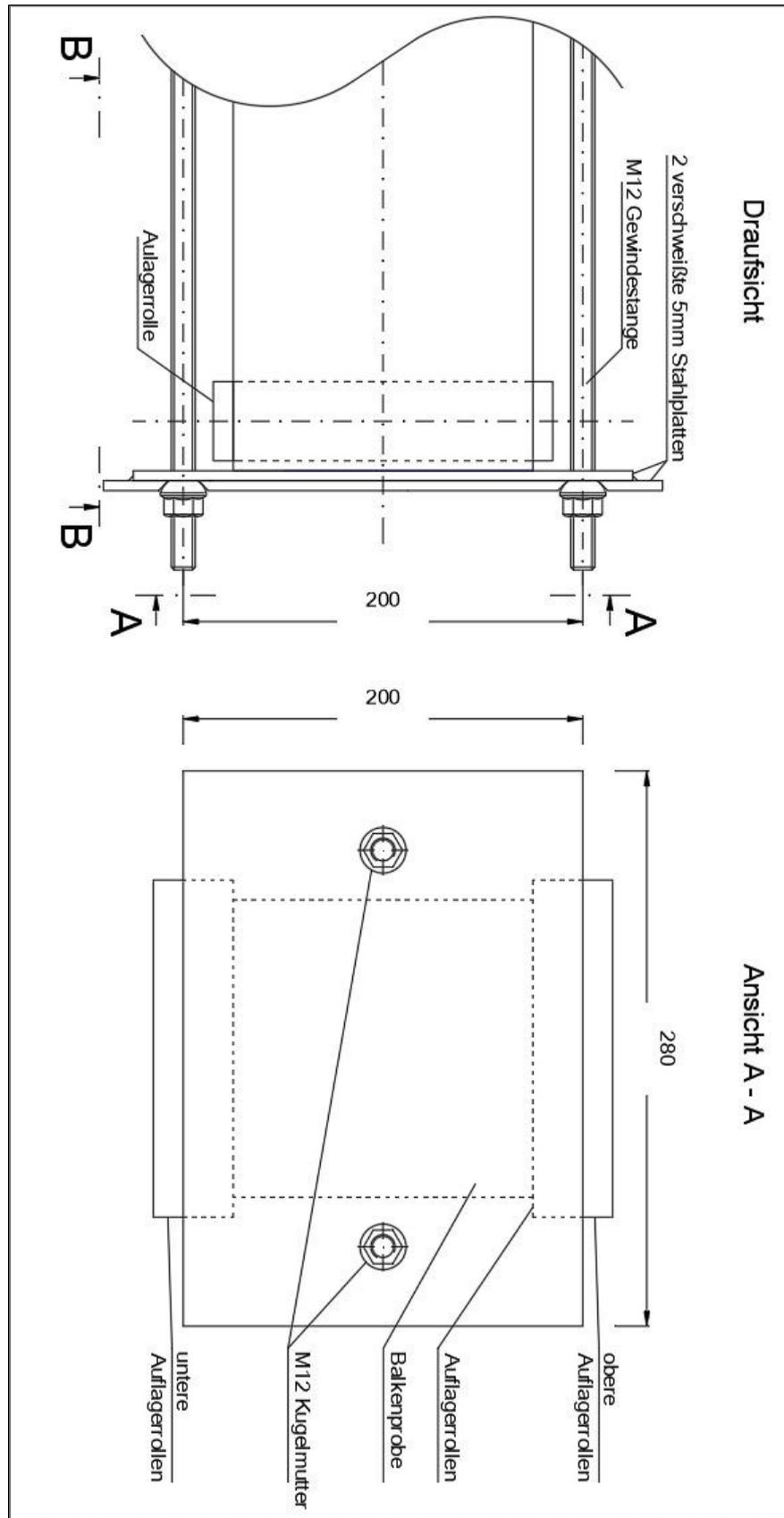


Abb.: 5-1: Technische Skizze (Draufsicht und Ansicht A-A) eines Versuchsaufbaues für einen 3-Punkt Biegezugversuch mit axialer Druckkraft (ohne Maßstab)

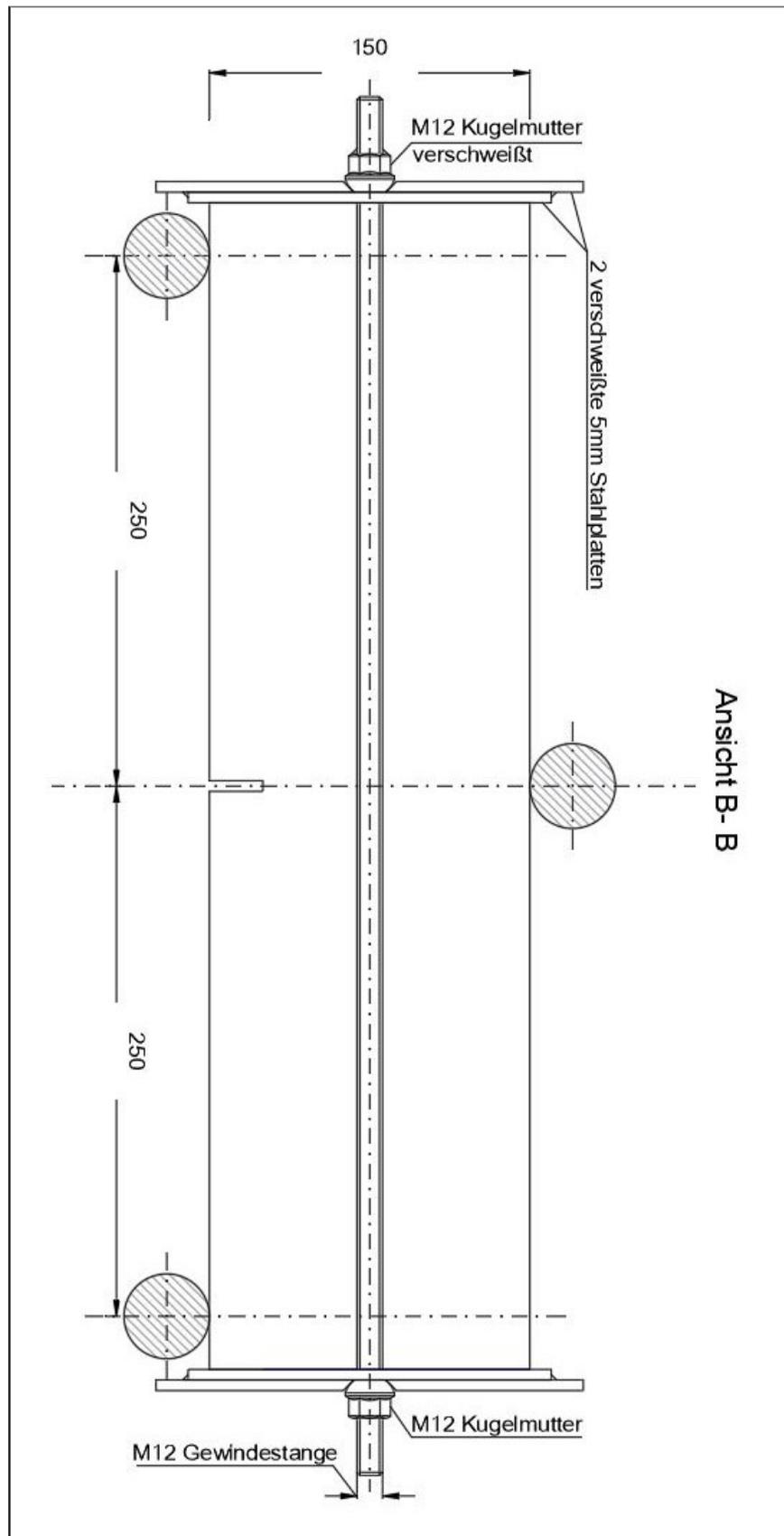


Abb.: 5-2: Technische Skizze (Ansicht B-B) eines Versuchsaufbaues für eine 3-Punkt Biegeversuch mit axialer Druckkraft (ohne Maßstab)

In Abb.: 5-1 und Abb.: 5-2 ist ein möglicher Versuchsaufbau für einen 3-Punkt Biegezugversuch nach ÖNORM EN 14651 mit zusätzlich aufzubringender axialer Druckspannung skizziert. Zusätzlich zum gleichbleibenden Biegezugversuchsaufbau wird eine Konstruktion aus Stahlplatten und Gewindestangen an den Balken angelegt. Als seitliche Auflage dienen zwei verschweißte Stahlplatten. Bei dieser Konstruktion wäre auf eine ebene Balkenfläche zu achten. Die Bohrungen für die Gewindestangen werden links und rechts von der Balkenachse hergestellt, wobei diese in der äußeren Platte mit einer kegelförmigen Senkung versehen sind. Auf die Gewindestangen wird auf einer Seite eine Kugelmutter angeschweißt und durch die seitlich am Balken anliegenden Platten durchgeführt und auf der gegenüberliegenden Seite ebenfalls mittels Kugelmutter verschraubt. Die Kugelmutter im kegeligen Bohrloch erlaubt den Platten eine kleine Winkelabweichung bei Versuchsdurchführung zuzulassen. Die Stahlplatten und Gewindestangen wurden in einer ersten Dimensionierung mit 5mm bzw. M12 festgelegt. Diese müssen im Falle einer Umsetzung der Konstruktion noch genauer bemessen werden.

Die gewünschte axiale Druckkraft wird durch Anziehen beider nicht verschweißten Kugelmuttern auf den Balken aufgebracht. Anhand der gewünschten axialen Druckspannung σ_A und der Fläche des Balkenquerschnittes A_B kann mit der Gl. 5-1 die axiale Schraubenkraft F_A ermittelt werden.

$$\text{Gl. 5-1:} \quad F_A = (A_B \cdot \sigma_A)/2$$

$$\text{Gl. 5-2:} \quad M_S = (\eta \cdot F_A \cdot P \cdot 10^{-3})/2 \cdot \pi$$

Das nötige Drehmoment M_S kann mit Gl. 5-2 berechnet werden. Hierfür ist die Schraubenkraft F_A (in N) und die Steigung des Gewindes P (in mm) nötig. Den Wirkungsgrad η , welcher die Gesamtreibung der Konstruktion widerspiegelt muss eigenständig für diese Anwendung ermittelt werden. Dies kann unter Zuhilfenahme einer Kraftmessdose, die an Stelle des Balkens in die Konstruktion eingespannt wird, und durch Messen der axialen Kraft bei Anwendung der Gl. 5-1 und Gl. 5-2 der Wirkungsgrad des Versuchsaufbaus ermittelt werden.

Ein Laborbiegezugversuch mit axialer Belastung, wie oben in einer Ausführungsvariante skizziert, könnte auch eine Möglichkeit zum Abschätzen der Belastbarkeit von faserbewehrten Tübbingem im Tunnelbau darstellen. Für die eine näherungsweise Abschätzung des erforderlichen Ausbaus wird die Kesselformel (Gl. 5-3) verwendet und kann mit den Balkenparametern abgeändert werden (Gl. 5-4). In Gl. 5-4 stellt h_B die Balkenhöhe, P_V für die Vertikalkraft und A_B die Balkenoberfläche dar. Näherungsweise wird der Außendruck p_a der Kesselformel mit dem Term P_V/A_B für den Balken ersetzt.

$$\text{Gl. 5-3:} \quad \sigma_t = (p_a \cdot r)/d$$

$$\text{Gl. 5-4:} \quad \sigma_A = (P_V/A_B \cdot r)/h_B$$

$$\text{Gl. 5-5:} \quad \kappa = 1/r = P_V/(\sigma_A \cdot h_B \cdot A_B)$$

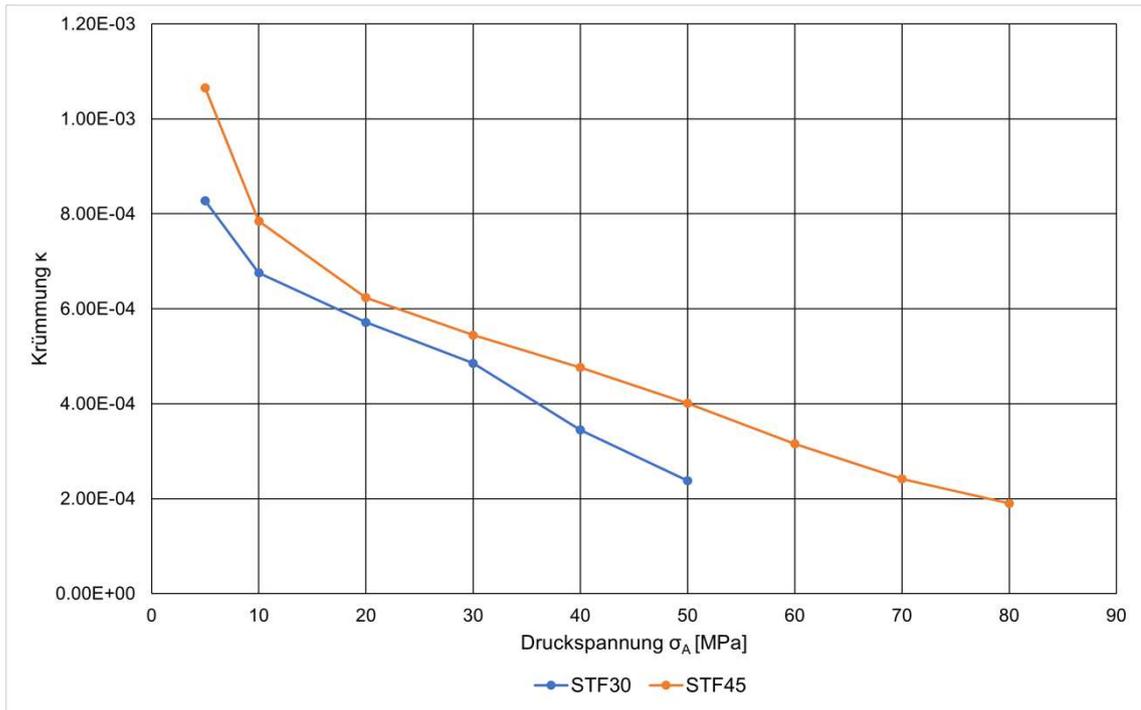


Abb.: 5-3: Äquivalente Krümmung bei gegebener axialer Druckspannung

Durch Umformen der Gl. 5-4 kann die Krümmung (Gl. 5-5) berechnet werden. Anhand dieser Berechnungen könnte anhand eines geplanten Tübbingradius bzw. Krümmung die nötige Axialkraft für den Laborversuch ermittelt werden. Umgekehrt wären Simulationen, wie in Abb.: 5-3 dargestellt, mit unterschiedlichen Axialspannungen und Radien bzw. Krümmungen möglich und es könnte somit die mögliche Belastbarkeit abgeschätzt werden.

Diese angestellten Überlegungen und Hypothesen bedürfen zahlreicher weiterführender Versuche und sind dadurch erst zu verifizieren. Belastungen des Tübbings hinsichtlich der durch die Vortriebspresen der Tunnelbohrmaschine eingeleiteten Spannungen können mit diesem Versuchsaufbau nicht abgebildet werden. Ebenso bleibt die Frage der Aussagekraft dieses Konzeptes infolge des Größeneinflusses vorerst unbeantwortet

6 Literaturverzeichnis

- [1] P. Hadl, "Streuung im Zugtragverhalten von Stahlfaserbeton," Technische Universität Graz, Graz, 2017.
- [2] K. Maier, "Faserbewehrung aus der sicht des tragwerkplaners," Innsbruck.
- [3] A. E. Naaman and H. W. Reinhardt, "High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC-4): International RILEM Workshop," in *Materials and Structures*, 2003, vol. 36, no. 264, pp. 710–712.
- [4] "Richtlinie Faserbeton 2007," Wien, 2007.
- [5] "ÖNORM B 4710-1: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität; Ausgabe 2019-01-01," 2019.
- [6] "Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke“,“ 2013.
- [7] D. Werner, K. Danzinger, and C. Pöhn, "Erhöhter Brandschutz für unterirdische Bauwerke - aktuelle Entwicklungen," pp. 42–46, 1999.
- [8] H. S. Müller and M. Haist, "Rissursachen und betontechnische Möglichkeiten der Rissbeherrschung," in *7. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung - Beherrschung von Rissen im Beton*, 2010, p. 112.
- [9] K. Bergmeister, F. Fingerloos, and J.-D. Wörner, *2020 Beton-Kalender*, 109th ed. Berlin: Ernst&Sohn Verlag, 2020.
- [10] F. Dehn, N. Werther, and J. Knitl, "Großbrandversuche für den City-Tunnel Leipzig," *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. 101, no. 8, pp. 631–636, 2006.
- [11] G. Vitt, M. Schulz, and W. NeW, "Herstellung und Prüfung von Biegebalken nach DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton," *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. 104, no. 8, pp. 543–549, 2009.
- [12] F. Weber and S. Anders, "Vergleich von 3-Punkt- und 4-Punkt-Biegezugversuchen zur Bestimmung der Nachrissbiegezugfestigkeit," *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. 116, no. S1, pp. 48–58, 2021.
- [13] "ÖNORM EN 14651: Prüfverfahren für Beton mit meatllischen Fasern - Bestimmung der Biegezugfestigkeit, Ausgabe: 2007-12-01," 2007.
- [14] "CEB/FIB ModelCode 2010," *Bull. d´informtion*, vol. 55, p. 318, 2010.
- [15] B. L. Wahalathantri, D. P. Thambiratnam, T. H. T. Chan, and S. Fawzia, "A Material Model for flexural Crack Simulation in reinforced Concrete Elements using ABAQUS," *eddBE2011 Proc.*, vol. 46, no. 1, pp. 260–264, 2011.
- [16] J. DI Juhart, B. Dr. techn. Freytag, and J. DI Linder, "Prüfung der Zugfestigkeit und Zugdehnung von UHPC (ultrahochfestem faserverstärkten Beton)," *Zement + Bet.*, vol. 8, pp. 8–11.
- [17] S. Timoshenko, *Theory of Elasticity*, 1st ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1934.
- [18] K. E. C. Nielsen, "Effect of various factors on the flexural strength of concrete test beams," *Mag. Concr. Res.*, vol. 5, no. 15, pp. 105–114, 1954.
- [19] P. J. F. Wright and F. Garwood, "The effect of the method of test on the flexural strength of concrete," *Mag. Concr. Res.*, vol. 4, no. 11, pp. 67–76, 1952.
- [20] O. Graf, *Die Eigenschaften des Betons*, 1st ed. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1950.

-
- [21] J. Bonze, "Über die Biegezugfestigkeit des Betons," Düsseldorf, 1962.
- [22] P. Grübl, H. Weigler, and S. Karl, *Beton - Arten, Herstellung und Eigenschaften*, Auflage 2. Darmstadt: Ernst&Sohn Verlag, 2001.
- [23] K.-C. Thienel, "Werkstoffe des Bauwesens Festbeton," München, 2020.
- [24] "ÖNORM EN 12930-1: Prüfung von Festbeton - Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen, Ausgabe: 2019-10-15," 2019-10-15, 2019.
- [25] "ÖNORM EN 12930-2: Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen, Ausgabe: 2019-10-15," 2019-10-15, 2019.
- [26] "ÖNORM EN 12930-5: Prüfung von Festbeton - Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern, Ausgabe: 2019-10-15," 2019-10-15, 2019.
- [27] D. Gross and T. Seelig, *Bruchmechanik - Mit einer Einführung in die Mikromechanik*, vol. 4, no. 3. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [28] M. Kuna, *Numerische Beanspruchungsanalyse von rissen*, 1st ed. Freiberg: Vieweg+ Teubner, 2008.
- [29] M. Kohl, "Tragverhalten von Stahlbetontragwerken ohne Querkraftbewehrung unter Ermüdungsbeanspruchungen," Technische Universität Hamburg-Harburg, 2014.
- [30] B. Trunk, "Einfluss der Bauteilgröße auf die Bruchenergie von Beton," ETH Zürich, 1999.
- [31] Z. P. Bažant, "Crack band theory for fracture of concrete," *Mater. Struct.*, vol. 16, no. 3, pp. 155-177, 1983.
- [32] J. Berger, "Zum nichtlinearen Riss- und Verformungsverhalten von Stahlbetonplatten mit beliebiger Bewehrungsrichtung unter Gebrauchslast," Universität der Bundeswehr München, 2019.
- [33] A. Hillerborg, "Analysis of one single crack," *Fracture Mechanics of Concrete*. Elsevier, Amsterdam, pp. 223-249, 1983.
- [34] A. Hillerborg, M. Modéer, and P. E. Petersson, "Analysis of crack formation and crack growth in concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 6, no. 6, pp. 773-781, 1976.
- [35] J. Walraven and N. Lehwalter, "Einfluß des Maßstabs in schubbeanspruchten Bauteilen ohne Schubbewehrung.," *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. 85, no. 9, pp. 228-232, 1990.
- [36] P.-E. Petersson, "Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials," Lund University, 1981.
- [37] H. Kiziltan, "Zum Einfluss des Druckbogens auf den Schubwiderstand von Spannbetonbalken," Technische Universität Dortmund, 2012.
- [38] J. Lubliner, J. Oliver, S. Oller, and E. Onate, "A Plastic-Damage Model," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 25, no. 3, pp. 299-326, 1989.
- [39] J. Lee and G. L. Fenves, "Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures," *J. Eng. Mech.*, vol. 124, no. 8, pp. 892-900, 1998.
- [40] M. Ricker, "Zur Zuverlässigkeit der Bemessung gegen Durchstanzen bei Einzelfundamenten," Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2009.
-

-
- [41] D. Systemes, "Abaqus 6.14 Online Documentation," *Build ID: 2014_04_18-11.27.55 44621*, 2014. .
- [42] J. Bockhold, "Modellbildung und numerische Analyse nichtlinearer Kriechprozesse in Stahlbetonkonstruktionen unter Schädigungsaspekten," Ruhr-Universität Bochum, 2005.
- [43] D. Kueres, A. Stark, M. Herbrand, and M. Claßen, "Numerische Abbildung von Beton mit einem plastischen Schädigungsmodell - Grundlegende Untersuchungen zu Normalbeton und UHPC," *Bauingenieur*, vol. 90, no. June, pp. 252–264, 2015.
- [44] H. Kupfer and H. K. Hilsdorf, "Behavior of Concrete under Biaxial Stresses.," *ACI J. Proc.*, no. 66, pp. 656–666, 1978.
- [45] K. J. Willam and E. P. Warnke, "Constitutive Model for the triaxial Behaviour of Concrete," in *Concrete Structures subjected to triaxial Stresses*, 1974.
- [46] P. Mark, *Zweiachsig durch Biegung und Querkräfte beanspruchte Stahlbetonträger*, vol. 3. Aachen: Shaker Verlag, 2006.
- [47] "Abaqus Theory Manual, Version 6.11," Providence, RI, 2011.
- [48] S. Latte, "Zur Tragfähigkeit von Stahlbeton- Fahrbahnplatten ohne Querkraftbewehrung," Technische Universität Hamburg-Harburg, 2010.
- [49] Y. Sümer and M. Aktaş, "Defining parameters for concrete damage plasticity model," *Chall. J. Struct. Mech.*, vol. 1, no. 3, pp. 149–155, 2015.
- [50] B. P. Sinha, K. H. Gerstle, and L. G. Tulin, "Stress-Strain Relations for Concrete Under Cyclic Loading," *ACI J. Proc.*, vol. 61, no. 2, pp. 195–212, 1964.
- [51] H. W. Reinhardt and H. A. W. Cornelissen, "Post-peak cyclic behaviour of concrete in uniaxial tensile and alternating tensile and compressive loading," *Cem. Concr. Res.*, vol. 14, no. 2, pp. 263–270, 1984.
- [52] "ÖNORM EN 12390-3: Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern, Ausgabe: 2019-11-15."
- [53] "ÖNORM EN 12390-4: Prüfung von Festbeton - Teil 4: Bestimmung der Druckfestigkeit - Anforderungen an Prüfmaschinen, Ausgabe: 2020-04-01," 2020.
- [54] X. Xu, "Determination of parameters in the bilinear, Reinhardts non-linear and exponentially non-linear softening curves and their physical meanings," *Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwes.*, pp. 410–424, 1999.

7 Abbildungsverzeichnis

Abb.: 2-1 Einteilung von Stahlfaserbeton nach NAAMAN & REINHARDT [1]	2
Abb.: 2-2: Skizzierte Darstellung eines Risses in unbewehrten und faserbewehrten Beton [8].....	8
Abb.: 2-3: Spannungs-Stauchungslinie in Abhängigkeit der Faserorientierung [8]..	9
Abb.: 2-4: a) Skizze eines direkten Zugversuchsaufbau, b) gerissene Betonprobe eines direkten Zugversuchs (rechts) [16]	11
Abb.: 2-5: Vier-Punkt Biegeversuch mit Momentenverlauf [12]	12
Abb.: 2-6: Drei-Punkt Biegeversuch mit Momentenverlauf [12]	13
Abb.: 2-7 Abmessungen eines prismatischen Betonprobekörpers [24].....	13
Abb.: 2-8: Aufbau und Abmessungen eines Drei-Punkt Biegeversuches [26]	14
Abb.: 2-9: Aufbau und Abmessungen eines Vier-Punkt Biegeversuches [26]	14
Abb.: 2-10 Typische Versuchsanordnung und -abmessungen für Stahlfaserbeton [13].....	16
Abb.: 2-11 Einfüllabfolge in die Schalung [13].....	17
Abb.: 2-12 Bezeichnungen eines Risses in der Bruchmechanik [27]	17
Abb.: 2-13 Rissöffnungsarten [27].....	18
Abb.: 2-14 Bruchprozesszone nach BAŽANT [30] (links); Bildung eines Risses und der dazugehörigen Spannungsverteilung (rechts) [8]	19
Abb.: 2-15 Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Betons unter Zugbeanspruchung mit schematischer Darstellung der Verteilung der Mikrorisse und Kohäsionsriss-Modell [8]	20
Abb.: 2-16 Rissöffnungs-abhängigen Zugspannungsübertragung in der Bruchprozesszone [29].....	21
Abb.: 2-17 a) Drucker-Prager Fließbedingung im Meridianschnitt, b) räumliche Darstellung der Fließbedingung [29]	22
Abb.: 2-18 a) Fließfläche in der biaxialen Spannungsebene, b) Fließfläche in der Deviatorebene in Abhängigkeit des Faktors K_c [43]	23
Abb.: 2-19 Annäherung der hyperbolischen Fließregel in der p-q Ebene [46].....	23
Abb.: 2-20: Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Beton im Druckbereich [49]	25
Abb.: 2-21 Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Beton im Zugbereich [49]	25
Abb.: 2-22 Arbeitslinie des Betons im Zug und Druckbereich [46].....	26
Abb.: 3-1: Würfelprobe im Versuchsaufbau vor der Druckprüfung.....	29
Abb.: 3-2: Probekörper im Versuchsaufbau nach der Druckprüfung.....	30
Abb.: 3-3: 3-Punkt Biegezugversuchsaufbau mit gerissener Betonprobe	31
Abb.: 3-4: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche	32
Abb.: 3-5: Ergebnisse der 3-Punkt Biegezugversuche bei STF30.....	33

Abb.: 3-6: Ergebnisse der 3-Punkt Biegezugversuche bei STF45.....	34
Abb.: 3-7: Ergebnisse der 3-Punkt Biegezugversuche bei STF60.....	34
Abb.: 4-1: Vergleich von implizitem zu explizitem Berechnungsverfahren bei einem Stahlfasergehalt von 45kg/m^3	36
Abb.: 4-2 Abbildung des ABAQUS - Simulationsmodells (orange Pfeile = gesperrte Translationsfreiheitsgrade, blaue Pfeile = gesperrte Rotationsfreiheitsgrade).....	37
Abb.: 4-3: Umrechnung von Durchbiegung auf Rissöffnung CMOD nach EN 14651 [13]	39
Abb.: 4-4: Biegezugspannung σ_t – CMOD Diagramm mit der Bruchenergie G_f	40
Abb.: 4-5: Berechnete σ_t – CMOD Entfestigungskurve und d_t – CMOD Kurve für den Ansatz mit originalen Versuchswerten bei einem Stahlfasergehalt (STF) von 45 kg/m^3	41
Abb.: 4-6 Bilinearer Ansatz	44
Abb.: 4-7: Berechnete σ_t – CMOD Entfestigungskurve und d_t – CMOD Kurve für den bilinearen Ansatz bei einem Stahlfasergehalt (STF) von 45kg/m^3	45
Abb.: 4-8: modifizierter bilinearer Ansatz	47
Abb.: 4-9: Abhängigkeit des Abminderungsfaktor χ vom Stahlfasergehalt STF	48
Abb.: 4-10: Berechnete σ_t – CMOD Entfestigungskurve und d_t – CMOD Kurve für den modifizierten bilinearen Ansatz bei einem Stahlfasergehalt (STF) von 45kg/m^3	48
Abb.: 4-11: Variantenanalyse für einen Stahlfasergehalt von 30kg/m^3	50
Abb.: 4-12: Variantenanalyse für einen Stahlfasergehalt von 45kg/m^3	52
Abb.: 4-13: Variantenanalyse für einen Stahlfasergehalt von 60kg/m^3	53
Abb.: 4-14: Ergebnisse der Simulation bei unterschiedlicher Elementgröße	54
Abb.: 4-15: dreidimensionales 8-Knoten Quaderelement (C3D8 Element) [41].....	55
Abb.: 4-16: ABAQUS Modell mit axialer Druckspannung (rosa Pfeile)	56
Abb.: 4-17: Simulierte Vertikalkraft - Durchbiegungsverläufe bei axialer Druckspannung auf die STF30-Probe.....	57
Abb.: 4-18: Simulierte Vertikalkraft - Durchbiegungsverläufe bei axialer Druckspannung auf die STF45-Probe.....	58
Abb.: 4-19: Anstieg der maximalen Vertikalkraft bei unterschiedlichen axialen Druckspannungen.....	59
Abb.: 4-20: Prozentueller Anstieg der Vertikalkraft bei axialer Druckspannung	60
Abb.: 4-21: Schematische Darstellung der Spannungsverläufe in Balkenmitte bei einem Stahlfasergehalt von 30kg/m^3	60
Abb.: 4-22: Schematische Darstellung der Spannungsverläufe in Balkenmitte bei einem Stahlfasergehalt von 45kg/m^3	61

<i>Abb.: 4-23: Veränderung der Höhe des Spannungsnullpunktes im Balkenquerschnitt</i>	<i>62</i>
<i>Abb.: 4-24: Druck – (negativ) und Zugspannungen (positiv) über die Balkenhöhe im Balkenmittelpunkt bei maximaler Vertikalkraft bei STF30</i>	<i>62</i>
<i>Abb.: 4-25: Druck – (negativ) und Zugspannungen (positiv) über die Balkenhöhe im Balkenmittelpunkt bei maximaler Vertikalkraft bei STF45</i>	<i>63</i>
<i>Abb.: 5-1: Technische Skizze (Draufsicht und Ansicht A-A) eines Versuchsaufbaues für einen 3-Punkt Biegezugversuch mit axialer Druckkraft (ohne Maßstab)</i>	<i>65</i>
<i>Abb.: 5-2: Technische Skizze (Ansicht B-B) eines Versuchsaufbaues für eine 3-Punkt Biegeversuch mit axialer Druckkraft (ohne Maßstab)</i>	<i>66</i>
<i>Abb.: 5-3: Äquivalente Krümmung bei gegebener axialer Druckspannung</i>	<i>68</i>

8 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 2-1: Beispiele von Faserbeton-Bezeichnungen</i>	3
<i>Tabelle 2-2: Mindestwerte der charakteristischen äquivalenten Biegezugfestigkeit der T – Klasse [4]</i>	4
<i>Tabelle 2-3: Mindestwerte der charakteristischen äquivalenten Biegezugfestigkeit der G – Klasse [4]</i>	4
<i>Tabelle 2-4: Mindestwerte der charakteristischen Biegezugfestigkeit zur Einteilung in BZ – Klassen [4]</i>	4
<i>Tabelle 2-5: Verringerung der Frühschwindrissbildung – FS Klasse [4]</i>	5
<i>Tabelle 2-6: Fasermaterialien im Vergleich zu Beton und Zementstein [4]</i>	6
<i>Tabelle 2-7: Handelsübliche Stahlfasertypen [4]</i>	7
<i>Tabelle 3-1: Mittelwerte der Abmessungen der Probewürfel</i>	27
<i>Tabelle 3-2: Mittelwerte der Abmessungen der Biegebalken</i>	28
<i>Tabelle 3-3: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche</i>	31
<i>Tabelle 3-4: Ergebnisse der Biegezugversuche</i>	33
<i>Tabelle 4-1: Ermittlung der Damage Parameter d_c für den Druckbereich</i>	38
<i>Tabelle 4-2: Ermittlung der Damage Parameter d_t für den Zugbereich</i>	41
<i>Tabelle 4-3: ABAQUS - Materialparameter für den Ansatz mit originalen Versuchsergebnisse für einen Stahlfasergehalt von 45kg/m^3</i>	43
<i>Tabelle 4-4: ABAQUS - Materialparameter für den bilinearen Ansatz für einen Stahlfasergehalt von 45kg/m^3</i>	46
<i>Tabelle 4-5: ABAQUS - Materialparameter für den modifizierten bilinearen Ansatz für einen Stahlfasergehalt von 45kg/m^3</i>	49
<i>Tabelle 4-6: Ergebnisse Variantenanalyse STF30</i>	51
<i>Tabelle 4-7: Ergebnisse Variantenanalyse STF45</i>	52
<i>Tabelle 4-8: Ergebnisse Variantenanalyse STF60</i>	53
<i>Tabelle 4-9: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse</i>	55
<i>Tabelle 4-10: Axiale Druckspannungen mit denen das Modell simuliert wurde</i>	57

9 Anhang

In den folgenden Input-Dateien werden aus Gründen der Übersichtlichkeit und Platzgründen die geometrischen Definitionen der einzelnen Modellelementen innerhalb der ****PART** und ****ASSEMBLY** Definition ausgeblendet. Diese können anhand der in der Arbeit angegebenen Geometrieinformationen einfach mit ABAQUS modelliert werden. Ebenso werden die Modelle mit axialen Druckspannungen aus Gründen der Übersichtlichkeit nur bei der Belastung mit 10MPa dargestellt.

9.1 Modelle für STF30

STF30-Original-25mm

```
*Heading
** Job name: Job-1-STF30-Original-25mm Model name: Model-1
** Generated by: Abaqus/CAE 2019
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
(**PART und **ASSEMBLY hier ausgelassen)
**
** ELEMENT CONTROLS
**
*Section Controls, name=EC-1, ELEMENT DELETION=YES
1., 1., 1.
**
** MATERIALS
**
*Material, name=fibre-concrete
*Density
2.5e-09,
*Elastic
5587.7, 0.2
*Concrete Damaged Plasticity
35., 0.1, 1.16, 0.67, 1e-05
*Concrete Compression Hardening
50.5171, 0.
53.9229, 0.00556648
56.8264, 0.00572006
59.1285, 0.0059454
60.7663, 0.00625
61.6288, 0.00664708
62.1263, 0.00708774
62.1922, 0.00726997
61.9048, 0.00761416
61.2196, 0.00819591
60.0943, 0.00883016
58.513, 0.00951884
56.6898, 0.0102364
```

54.4886, 0.010999
52.2758, 0.011763
50.1487, 0.0125168
48.089, 0.0132625
46.1392, 0.0139951
44.37, 0.0147062
42.7922, 0.0153945
41.2807, 0.0160748
39.807, 0.0167506
38.4257, 0.0174154
37.0474, 0.0180799
35.6879, 0.0187421
34.4509, 0.0193897
33.2092, 0.0200378
32.102, 0.0206699
31.0376, 0.0212969
30.0235, 0.0219179
29.0679, 0.0225319
28.1585, 0.0231404
27.2736, 0.023746
26.47, 0.0243419
25.7001, 0.0249337
24.9051, 0.0255286
24.1858, 0.0261144
23.4454, 0.0267027
22.7059, 0.027291
21.8114, 0.0278977
21.1492, 0.0284767
20.5706, 0.0290457
20.0497, 0.0296079
19.571, 0.030165
19.0865, 0.0307228
18.6411, 0.0312759
18.1403, 0.0318357
17.6646, 0.0323924
17.2637, 0.0329403
16.8834, 0.0334856
16.5815, 0.0340217
16.2353, 0.034563
16.084, 0.035081
16.0153, 0.0355892
16.0153, 0.0360892
16.0153, 0.0365892
16.0153, 0.0370892
16.0153, 0.0375892

*Concrete Tension Stiffening, type=DISPLACEMENT

1.64086, 0.
1.64086, 0.05
1.56082, 0.5
1.80825, 1.5
1.75056, 2.5

1.64259, 3.

1.30057, 3.5

1.27791, 4.

*Concrete Compression Damage

0., 0.

0., 0.00556648

0., 0.00572006

0., 0.0059454

0., 0.00625

0., 0.00664708

0., 0.00708774

0.0470572, 0.00726997

0.0514609, 0.00761416

0.0619599, 0.00819591

0.0792017, 0.00883016

0.103432, 0.00951884

0.131368, 0.0102364

0.165096, 0.010999

0.199001, 0.011763

0.231595, 0.0125168

0.263154, 0.0132625

0.29303, 0.0139951

0.320139, 0.0147062

0.344314, 0.0153945

0.367475, 0.0160748

0.390055, 0.0167506

0.41122, 0.0174154

0.432339, 0.0180799

0.453171, 0.0187421

0.472124, 0.0193897

0.49115, 0.0200378

0.508116, 0.0206699

0.524426, 0.0212969

0.539963, 0.0219179

0.554605, 0.0225319

0.568541, 0.0231404

0.582099, 0.023746

0.594411, 0.0243419

0.606209, 0.0249337

0.618391, 0.0255286

0.629412, 0.0261144

0.640757, 0.0267027

0.652087, 0.027291

0.665794, 0.0278977

0.67594, 0.0284767

0.684807, 0.0290457

0.692788, 0.0296079

0.700122, 0.030165

0.707546, 0.0307228

0.714371, 0.0312759

0.722044, 0.0318357

```
0.729334, 0.0323924
0.735476, 0.0329403
0.741303, 0.0334856
0.74593, 0.0340217
0.751234, 0.034563
0.753552, 0.035081
0.754604, 0.0355892
0.754604, 0.0360892
0.754604, 0.0365892
0.754604, 0.0370892
0.754604, 0.0375892
*Concrete Tension Damage, type=DISPLACEMENT
  0., 0.
  0., 0.05
  0., 0.5
  0., 1.5
  0., 2.5
0.0555133, 3.
0.231352, 3.5
0.242998, 4.
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-3, 2, 2
** Name: BC-2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-4, 2, 2
Set-4, 5, 5
Set-4, 6, 6
** -----
**
** STEP: Step-1
**
*Step, name=Step-1, nlgeom=YES, amplitude=STEP, inc=10000
*Static
0.001, 1., 1e-12, 0.01
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-3 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-6, 1, 1
Set-6, 2, 2, -3.5
Set-6, 3, 3
Set-6, 4, 4
Set-6, 5, 5
Set-6, 6, 6
**
** OUTPUT REQUESTS
```

```
**  
*Restart, write, frequency=0  
**  
** FIELD OUTPUT: F-Output-1  
**  
*Output, field  
*Node Output  
CF, RF, U  
*Element Output, directions=YES  
LE, PE, PEEQ, PEMAG, S  
**  
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1  
**  
*Output, history, variable=PRESELECT  
*End Step
```

STF30-Bilinear-25mm

```
*Heading  
** Job name: Job-1-STF30-Bilinear-25mm Model name: Model-1  
** Generated by: Abaqus/CAE 2019  
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO  
**  
(**PART und **ASSEMBLY hier ausgelassen)  
**  
** ELEMENT CONTROLS  
**  
*Section Controls, name=EC-1, ELEMENT DELETION=YES  
1., 1., 1.  
**  
** MATERIALS  
**  
*Material, name=fibre-concrete  
*Density  
2.5e-09,  
*Elastic  
5587.7, 0.2  
*Concrete Damaged Plasticity  
35., 0.1, 1.16, 0.67, 1e-05  
*Concrete Compression Hardening  
50.5171, 0.  
53.9229, 0.00556648  
56.8264, 0.00572006  
59.1285, 0.0059454  
60.7663, 0.00625  
61.6288, 0.00664708  
62.1263, 0.00708774  
62.1922, 0.00726997  
61.9048, 0.00761416  
61.2196, 0.00819591  
60.0943, 0.00883016
```

58.513, 0.00951884
56.6898, 0.0102364
54.4886, 0.010999
52.2758, 0.011763
50.1487, 0.0125168
48.089, 0.0132625
46.1392, 0.0139951
44.37, 0.0147062
42.7922, 0.0153945
41.2807, 0.0160748
39.807, 0.0167506
38.4257, 0.0174154
37.0474, 0.0180799
35.6879, 0.0187421
34.4509, 0.0193897
33.2092, 0.0200378
32.102, 0.0206699
31.0376, 0.0212969
30.0235, 0.0219179
29.0679, 0.0225319
28.1585, 0.0231404
27.2736, 0.023746
26.47, 0.0243419
25.7001, 0.0249337
24.9051, 0.0255286
24.1858, 0.0261144
23.4454, 0.0267027
22.7059, 0.027291
21.8114, 0.0278977
21.1492, 0.0284767
20.5706, 0.0290457
20.0497, 0.0296079
19.571, 0.030165
19.0865, 0.0307228
18.6411, 0.0312759
18.1403, 0.0318357
17.6646, 0.0323924
17.2637, 0.0329403
16.8834, 0.0334856
16.5815, 0.0340217
16.2353, 0.034563
16.084, 0.035081
16.0153, 0.0355892
16.0153, 0.0360892
16.0153, 0.0365892
16.0153, 0.0370892
16.0153, 0.0375892
*Concrete Tension Stiffening, type=DISPLACEMENT
1.64, 0.
1.28, 2.73
0.91, 5.45

0.55, 8.18

0.44, 13.9

0.33, 19.63

0.22, 25.35

0.11, 31.08

0., 36.8

*Concrete Compression Damage

0., 0.

0., 0.00556648

0., 0.00572006

0., 0.0059454

0., 0.00625

0., 0.00664708

0., 0.00708774

0.0470572, 0.00726997

0.0514609, 0.00761416

0.0619599, 0.00819591

0.0792017, 0.00883016

0.103432, 0.00951884

0.131368, 0.0102364

0.165096, 0.010999

0.199001, 0.011763

0.231595, 0.0125168

0.263154, 0.0132625

0.29303, 0.0139951

0.320139, 0.0147062

0.344314, 0.0153945

0.367475, 0.0160748

0.390055, 0.0167506

0.41122, 0.0174154

0.432339, 0.0180799

0.453171, 0.0187421

0.472124, 0.0193897

0.49115, 0.0200378

0.508116, 0.0206699

0.524426, 0.0212969

0.539963, 0.0219179

0.554605, 0.0225319

0.568541, 0.0231404

0.582099, 0.023746

0.594411, 0.0243419

0.606209, 0.0249337

0.618391, 0.0255286

0.629412, 0.0261144

0.640757, 0.0267027

0.652087, 0.027291

0.665794, 0.0278977

0.67594, 0.0284767

0.684807, 0.0290457

0.692788, 0.0296079

0.700122, 0.030165

```
0.707546, 0.0307228
0.714371, 0.0312759
0.722044, 0.0318357
0.729334, 0.0323924
0.735476, 0.0329403
0.741303, 0.0334856
0.74593, 0.0340217
0.751234, 0.034563
0.753552, 0.035081
0.754604, 0.0355892
0.754604, 0.0360892
0.754604, 0.0365892
0.754604, 0.0370892
0.754604, 0.0375892
*Concrete Tension Damage, type=DISPLACEMENT
0., 0.
0.2, 2.73
0.4, 5.45
0.6, 8.18
0.66, 13.9
0.72, 19.63
0.78, 25.35
0.84, 31.08
0.9, 36.8
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-3, 2, 2
** Name: BC-2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-4, 2, 2
Set-4, 5, 5
Set-4, 6, 6
** -----
**
** STEP: Step-1
**
*Step, name=Step-1, nlgeom=YES, amplitude=STEP, inc=10000
*Static
0.001, 1., 1e-12, 0.01
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-3 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-6, 1, 1
Set-6, 2, 2, -3.5
Set-6, 3, 3
Set-6, 4, 4
```

Set-6, 5, 5
Set-6, 6, 6
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field
*Node Output
CF, RF, U
*Element Output, directions=YES
LE, PE, PEEQ, PEMAG, S
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*End Step

STF30-Modifizier-Bilinear-25mm

*Heading
** Job name: Job-1-STF30-Mod-Bilinear-20mm-10MPa Model name: Model-1
** Generated by: Abaqus/CAE 2019
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
(**PART und **ASSEMBLY hier ausgelassen)
**
** ELEMENT CONTROLS
**
*Section Controls, name=EC-1, ELEMENT DELETION=YES
1., 1., 1.
**
** MATERIALS
**
*Material, name=fibre-concrete
*Density
2.5e-09,
*Elastic
5587.7, 0.2
*Concrete Damaged Plasticity
35., 0.1, 1.16, 0.67, 1e-05
*Concrete Compression Hardening
50.5171, 0.
53.9229, 0.00556648
56.8264, 0.00572006
59.1285, 0.0059454
60.7663, 0.00625
61.6288, 0.00664708
62.1263, 0.00708774

62.1922, 0.00726997
61.9048, 0.00761416
61.2196, 0.00819591
60.0943, 0.00883016
58.513, 0.00951884
56.6898, 0.0102364
54.4886, 0.010999
52.2758, 0.011763
50.1487, 0.0125168
48.089, 0.0132625
46.1392, 0.0139951
44.37, 0.0147062
42.7922, 0.0153945
41.2807, 0.0160748
39.807, 0.0167506
38.4257, 0.0174154
37.0474, 0.0180799
35.6879, 0.0187421
34.4509, 0.0193897
33.2092, 0.0200378
32.102, 0.0206699
31.0376, 0.0212969
30.0235, 0.0219179
29.0679, 0.0225319
28.1585, 0.0231404
27.2736, 0.023746
26.47, 0.0243419
25.7001, 0.0249337
24.9051, 0.0255286
24.1858, 0.0261144
23.4454, 0.0267027
22.7059, 0.027291
21.8114, 0.0278977
21.1492, 0.0284767
20.5706, 0.0290457
20.0497, 0.0296079
19.571, 0.030165
19.0865, 0.0307228
18.6411, 0.0312759
18.1403, 0.0318357
17.6646, 0.0323924
17.2637, 0.0329403
16.8834, 0.0334856
16.5815, 0.0340217
16.2353, 0.034563
16.084, 0.035081
16.0153, 0.0355892
16.0153, 0.0360892
16.0153, 0.0365892
16.0153, 0.0370892
16.0153, 0.0375892

*Concrete Tension Stiffening, type=DISPLACEMENT

1.64086, 0.
1.09391, 3.41
1.09391, 4.69
1.09391, 5.96
1.09391, 7.24
1.09391, 8.52
0.729272, 12.5
0.364636, 16.47
0., 20.45

*Concrete Compression Damage

0., 0.
0., 0.00556648
0., 0.00572006
0., 0.0059454
0., 0.00625
0., 0.00664708
0., 0.00708774
0.0470572, 0.00726997
0.0514609, 0.00761416
0.0619599, 0.00819591
0.0792017, 0.00883016
0.103432, 0.00951884
0.131368, 0.0102364
0.165096, 0.010999
0.199001, 0.011763
0.231595, 0.0125168
0.263154, 0.0132625
0.29303, 0.0139951
0.320139, 0.0147062
0.344314, 0.0153945
0.367475, 0.0160748
0.390055, 0.0167506
0.41122, 0.0174154
0.432339, 0.0180799
0.453171, 0.0187421
0.472124, 0.0193897
0.49115, 0.0200378
0.508116, 0.0206699
0.524426, 0.0212969
0.539963, 0.0219179
0.554605, 0.0225319
0.568541, 0.0231404
0.582099, 0.023746
0.594411, 0.0243419
0.606209, 0.0249337
0.618391, 0.0255286
0.629412, 0.0261144
0.640757, 0.0267027
0.652087, 0.027291
0.665794, 0.0278977

0.67594, 0.0284767
0.684807, 0.0290457
0.692788, 0.0296079
0.700122, 0.030165
0.707546, 0.0307228
0.714371, 0.0312759
0.722044, 0.0318357
0.729334, 0.0323924
0.735476, 0.0329403
0.741303, 0.0334856
0.74593, 0.0340217
0.751234, 0.034563
0.753552, 0.035081
0.754604, 0.0355892
0.754604, 0.0360892
0.754604, 0.0365892
0.754604, 0.0370892
0.754604, 0.0375892

*Concrete Tension Damage, type=DISPLACEMENT
0., 0.
0.3, 3.41
0.3, 4.69
0.3, 5.96
0.3, 7.24
0.3, 8.52
0.5, 12.5
0.7, 16.47
0.9, 20.45

**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-3, 2, 2
** Name: BC-2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-4, 2, 2
Set-4, 5, 5
Set-4, 6, 6
** -----
**
** STEP: Step-1
**
*Step, name=Step-1, nlgeom=YES, amplitude=STEP, inc=10000
*Static
0.001, 1., 1e-12, 0.01
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-3 Type: Displacement/Rotation
*Boundary

```
Set-6, 1, 1
Set-6, 2, 2, -8.
Set-6, 3, 3
Set-6, 4, 4
Set-6, 5, 5
Set-6, 6, 6
**
** LOADS
**
** Name: Load-1  Type: Pressure
*Dload
Surf-1, P, 10.
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field
*Node Output
CF, RF, U
*Element Output, directions=YES
LE, PE, PEEQ, PEMAG, S
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*End Step
```

STF30-Modifizierte-Bilinear-20mm-10MPa-Druckspannung

*Heading

** Job name: Job-1-STF30-Mod-Bilinear-20mm-10MPa Model name: Model-1

** Generated by: Abaqus/CAE 2019

*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO

**

(**PART und **ASSEMBLY hier ausgelassen)

**

** ELEMENT CONTROLS

**

*Section Controls, name=EC-1, ELEMENT DELETION=YES

1., 1., 1.

**

** MATERIALS

**

*Material, name=fibre-concrete

*Density

2.5e-09,

*Elastic

5587.7, 0.2

*Concrete Damaged Plasticity

35., 0.1, 1.16, 0.67, 1e-05

*Concrete Compression Hardening

50.5171, 0.

53.9229, 0.00556648

56.8264, 0.00572006

59.1285, 0.0059454

60.7663, 0.00625

61.6288, 0.00664708

62.1263, 0.00708774

62.1922, 0.00726997

61.9048, 0.00761416

61.2196, 0.00819591

60.0943, 0.00883016

58.513, 0.00951884

56.6898, 0.0102364

54.4886, 0.010999

52.2758, 0.011763

50.1487, 0.0125168

48.089, 0.0132625

46.1392, 0.0139951

44.37, 0.0147062

42.7922, 0.0153945

41.2807, 0.0160748

39.807, 0.0167506

38.4257, 0.0174154

37.0474, 0.0180799

35.6879, 0.0187421

34.4509, 0.0193897

33.2092, 0.0200378

32.102, 0.0206699
31.0376, 0.0212969
30.0235, 0.0219179
29.0679, 0.0225319
28.1585, 0.0231404
27.2736, 0.023746
26.47, 0.0243419
25.7001, 0.0249337
24.9051, 0.0255286
24.1858, 0.0261144
23.4454, 0.0267027
22.7059, 0.027291
21.8114, 0.0278977
21.1492, 0.0284767
20.5706, 0.0290457
20.0497, 0.0296079
19.571, 0.030165
19.0865, 0.0307228
18.6411, 0.0312759
18.1403, 0.0318357
17.6646, 0.0323924
17.2637, 0.0329403
16.8834, 0.0334856
16.5815, 0.0340217
16.2353, 0.034563
16.084, 0.035081
16.0153, 0.0355892
16.0153, 0.0360892
16.0153, 0.0365892
16.0153, 0.0370892
16.0153, 0.0375892

*Concrete Tension Stiffening, type=DISPLACEMENT

1.64086, 0.
1.09391, 3.41
1.09391, 4.69
1.09391, 5.96
1.09391, 7.24
1.09391, 8.52
0.729272, 12.5
0.364636, 16.47
0., 20.45

*Concrete Compression Damage

0., 0.
0., 0.00556648
0., 0.00572006
0., 0.0059454
0., 0.00625
0., 0.00664708
0., 0.00708774
0.0470572, 0.00726997
0.0514609, 0.00761416

0.0619599, 0.00819591
0.0792017, 0.00883016
0.103432, 0.00951884
0.131368, 0.0102364
0.165096, 0.010999
0.199001, 0.011763
0.231595, 0.0125168
0.263154, 0.0132625
0.29303, 0.0139951
0.320139, 0.0147062
0.344314, 0.0153945
0.367475, 0.0160748
0.390055, 0.0167506
0.41122, 0.0174154
0.432339, 0.0180799
0.453171, 0.0187421
0.472124, 0.0193897
0.49115, 0.0200378
0.508116, 0.0206699
0.524426, 0.0212969
0.539963, 0.0219179
0.554605, 0.0225319
0.568541, 0.0231404
0.582099, 0.023746
0.594411, 0.0243419
0.606209, 0.0249337
0.618391, 0.0255286
0.629412, 0.0261144
0.640757, 0.0267027
0.652087, 0.027291
0.665794, 0.0278977
0.67594, 0.0284767
0.684807, 0.0290457
0.692788, 0.0296079
0.700122, 0.030165
0.707546, 0.0307228
0.714371, 0.0312759
0.722044, 0.0318357
0.729334, 0.0323924
0.735476, 0.0329403
0.741303, 0.0334856
0.74593, 0.0340217
0.751234, 0.034563
0.753552, 0.035081
0.754604, 0.0355892
0.754604, 0.0360892
0.754604, 0.0365892
0.754604, 0.0370892
0.754604, 0.0375892

*Concrete Tension Damage, type=DISPLACEMENT

0., 0.

0.3, 3.41
0.3, 4.69
0.3, 5.96
0.3, 7.24
0.3, 8.52
0.5, 12.5
0.7, 16.47
0.9, 20.45
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-3, 2, 2
** Name: BC-2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-4, 2, 2
Set-4, 5, 5
Set-4, 6, 6
** -----
**
** STEP: Step-1
**
*Step, name=Step-1, nlgeom=YES, amplitude=STEP, inc=10000
*Static
0.001, 1., 1e-12, 0.01
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-3 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-6, 1, 1
Set-6, 2, 2, -8.
Set-6, 3, 3
Set-6, 4, 4
Set-6, 5, 5
Set-6, 6, 6
**
** LOADS
**
** Name: Load-1 Type: Pressure
*Dload
Surf-1, P, 10.
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field

```
*Node Output
CF, RF, U
*Element Output, directions=YES
LE, PE, PEEQ, PEMAG, S
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*End Step
```

9.2 Modelle für STF45

STF45-Original-25mm

```
*Heading
** Job name: Job-1-STF45-Original-25mm Model name: Model-1
** Generated by: Abaqus/CAE 2019
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
(**PART und **ASSEMBLY hier ausgelassen)
**
** ELEMENT CONTROLS
**
*Section Controls, name=EC-1, ELEMENT DELETION=NO
1., 1., 1.
**
** MATERIALS
**
*Material, name=fibre-concrete
*Density
2.5e-09,
*Elastic
5853.24, 0.2
*Concrete Damaged Plasticity
35., 0.1, 1.16, 0.67, 1e-05
*Concrete Compression Hardening
50.0915, 0.
53.258, 0.00593408
55.7932, 0.00614532
57.6764, 0.00643083
59.0003, 0.00678004
59.7927, 0.0071898
60.1192, 0.0076526
60.094, 0.00786892
59.8839, 0.00815547
59.3213, 0.00867941
58.4568, 0.00924348
57.4407, 0.00984195
56.2987, 0.0104577
```

55.0096, 0.0110877
53.6559, 0.0117346
52.2526, 0.0123888
50.7604, 0.0130486
49.3189, 0.0137185
47.9644, 0.0143827
46.6302, 0.015037
45.2852, 0.015689
43.9282, 0.0163422
42.5851, 0.0169967
41.3099, 0.0176497
40.1157, 0.0182949
38.9859, 0.0189309
37.9166, 0.0195596
36.9205, 0.0201814
35.9682, 0.0207949
35.0336, 0.0214033
34.1906, 0.0220098
33.381, 0.0226058
32.6356, 0.023198
31.8731, 0.0237829
31.1417, 0.0243698
30.4652, 0.0249531
29.8399, 0.0255301
29.1698, 0.0261013
28.5177, 0.0266776
27.9171, 0.0272519
27.3856, 0.0278203
26.8702, 0.0283809
26.3794, 0.0289396
25.9112, 0.0294955
25.4728, 0.0300488
25.0179, 0.0305987
24.6022, 0.0311505
24.183, 0.0316979
23.7881, 0.0322456
23.3806, 0.0327906
23.0122, 0.033337
22.8506, 0.033879
22.7525, 0.0343974
22.7525, 0.0349086
22.7525, 0.0354086
22.7525, 0.0359086
22.7525, 0.0364086
22.7525, 0.0369086

*Concrete Tension Stiffening, type=DISPLACEMENT

3.48952, 0.
3.48952, 0.05
3.64972, 0.5
4.44828, 1.5
4.4522, 2.5

4.29443, 3.

4.08922, 3.5

3.85019, 4.

*Concrete Compression Damage

0., 0.

0., 0.00593408

0., 0.00614532

0., 0.00643083

0., 0.00678004

0., 0.0071898

0., 0.0076526

0., 0.00786892

0.00169412, 0.00815547

0.00518542, 0.00867941

0.0145301, 0.00924348

0.0288923, 0.00984195

0.0457716, 0.0104577

0.0647427, 0.0110877

0.0861587, 0.0117346

0.108647, 0.0123888

0.13196, 0.0130486

0.156747, 0.0137185

0.180695, 0.0143827

0.203197, 0.015037

0.22536, 0.015689

0.247704, 0.0163422

0.270248, 0.0169967

0.292559, 0.0176497

0.313744, 0.0182949

0.333582, 0.0189309

0.352351, 0.0195596

0.370114, 0.0201814

0.386662, 0.0207949

0.402482, 0.0214033

0.418008, 0.0220098

0.432012, 0.0226058

0.445462, 0.023198

0.457844, 0.0237829

0.470512, 0.0243698

0.482662, 0.0249531

0.493899, 0.0255301

0.504287, 0.0261013

0.51542, 0.0266776

0.526253, 0.0272519

0.536229, 0.0278203

0.545059, 0.0283809

0.553622, 0.0289396

0.561775, 0.0294955

0.569553, 0.0300488

0.576835, 0.0305987

0.584393, 0.0311505

```
0.591299, 0.0316979
0.598263, 0.0322456
0.604823, 0.0327906
0.611592, 0.033337
0.617713, 0.033879
0.620396, 0.0343974
0.622026, 0.0349086
0.622026, 0.0354086
0.622026, 0.0359086
0.622026, 0.0364086
0.622026, 0.0369086
*Concrete Tension Damage, type=DISPLACEMENT
0., 0.
0., 0.000612526
0., 0.00612526
0., 0.0183758
0., 0.0306263
0.0319, 0.0367516
0.0734, 0.0428768
0.1217, 0.0490021
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-3, 2, 2
** Name: BC-2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-4, 2, 2
Set-4, 5, 5
Set-4, 6, 6
** -----
** STEP: Step-1
**
*Step, name=Step-1, nlgeom=YES, inc=10000
*Static
0.001, 1., 1e-05, 0.01
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-3 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-6, 1, 1
Set-6, 2, 2, -3.5
Set-6, 3, 3
Set-6, 4, 4
Set-6, 5, 5
Set-6, 6, 6
**
** OUTPUT REQUESTS
**
```

```
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field
*Node Output
CF, RF, U
*Element Output, directions=YES
LE, PE, PEEQ, PEMAG, S
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*End Step
```

STF45-Bilinear-25mm

```
*Heading
** Job name: Job-1-STF45-Bilinear-25mm Model name: Model-1
** Generated by: Abaqus/CAE 2019
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
(**PART und **ASSEMBLY hier ausgelassen)
**
** ELEMENT CONTROLS
**
*Section Controls, name=EC-1, ELEMENT DELETION=NO
1., 1., 1.
**
** MATERIALS
**
*Material, name=fibre-concrete
*Density
2.5e-09,
*Elastic
5853.24, 0.2
*Concrete Damaged Plasticity
35., 0.1, 1.16, 0.67, 1e-05
*Concrete Compression Hardening
50.0915, 0.
53.258, 0.00593408
55.7932, 0.00614532
57.6764, 0.00643083
59.0003, 0.00678004
59.7927, 0.0071898
60.1192, 0.0076526
60.094, 0.00786892
59.8839, 0.00815547
59.3213, 0.00867941
58.4568, 0.00924348
57.4407, 0.00984195
```

56.2987, 0.0104577
55.0096, 0.0110877
53.6559, 0.0117346
52.2526, 0.0123888
50.7604, 0.0130486
49.3189, 0.0137185
47.9644, 0.0143827
46.6302, 0.015037
45.2852, 0.015689
43.9282, 0.0163422
42.5851, 0.0169967
41.3099, 0.0176497
40.1157, 0.0182949
38.9859, 0.0189309
37.9166, 0.0195596
36.9205, 0.0201814
35.9682, 0.0207949
35.0336, 0.0214033
34.1906, 0.0220098
33.381, 0.0226058
32.6356, 0.023198
31.8731, 0.0237829
31.1417, 0.0243698
30.4652, 0.0249531
29.8399, 0.0255301
29.1698, 0.0261013
28.5177, 0.0266776
27.9171, 0.0272519
27.3856, 0.0278203
26.8702, 0.0283809
26.3794, 0.0289396
25.9112, 0.0294955
25.4728, 0.0300488
25.0179, 0.0305987
24.6022, 0.0311505
24.183, 0.0316979
23.7881, 0.0322456
23.3806, 0.0327906
23.0122, 0.033337
22.8506, 0.033879
22.7525, 0.0343974
22.7525, 0.0349086
22.7525, 0.0354086
22.7525, 0.0359086
22.7525, 0.0364086
22.7525, 0.0369086

*Concrete Tension Stiffening, type=DISPLACEMENT

3.48952, 0.
2.71407, 2.5
1.93862, 5.
1.16317, 7.51

0.930539, 12.76

0.697904, 18.02

0.465269, 23.27

0.232635, 28.53

0., 33.78

*Concrete Compression Damage

0., 0.

0., 0.00593408

0., 0.00614532

0., 0.00643083

0., 0.00678004

0., 0.0071898

0., 0.0076526

0., 0.00786892

0.00169412, 0.00815547

0.00518542, 0.00867941

0.0145301, 0.00924348

0.0288923, 0.00984195

0.0457716, 0.0104577

0.0647427, 0.0110877

0.0861587, 0.0117346

0.108647, 0.0123888

0.13196, 0.0130486

0.156747, 0.0137185

0.180695, 0.0143827

0.203197, 0.015037

0.22536, 0.015689

0.247704, 0.0163422

0.270248, 0.0169967

0.292559, 0.0176497

0.313744, 0.0182949

0.333582, 0.0189309

0.352351, 0.0195596

0.370114, 0.0201814

0.386662, 0.0207949

0.402482, 0.0214033

0.418008, 0.0220098

0.432012, 0.0226058

0.445462, 0.023198

0.457844, 0.0237829

0.470512, 0.0243698

0.482662, 0.0249531

0.493899, 0.0255301

0.504287, 0.0261013

0.51542, 0.0266776

0.526253, 0.0272519

0.536229, 0.0278203

0.545059, 0.0283809

0.553622, 0.0289396

0.561775, 0.0294955

0.569553, 0.0300488

0.576835, 0.0305987
0.584393, 0.0311505
0.591299, 0.0316979
0.598263, 0.0322456
0.604823, 0.0327906
0.611592, 0.033337
0.617713, 0.033879
0.620396, 0.0343974
0.622026, 0.0349086
0.622026, 0.0354086
0.622026, 0.0359086
0.622026, 0.0364086
0.622026, 0.0369086

*Concrete Tension Damage, type=DISPLACEMENT
0., 0.
0.2, 2.5
0.4, 5.
0.6, 7.51
0.66, 12.76
0.72, 18.02
0.78, 23.27
0.84, 28.53
0.9, 33.78

**

** BOUNDARY CONDITIONS

**

** Name: BC-1 Type: Displacement/Rotation

*Boundary
Set-3, 2, 2

** Name: BC-2 Type: Displacement/Rotation

*Boundary
Set-4, 2, 2
Set-4, 5, 5
Set-4, 6, 6

** -----

**

** STEP: Step-1

**

*Step, name=Step-1, nlgeom=YES, inc=10000

*Static
0.001, 1., 1e-05, 0.01

**

** BOUNDARY CONDITIONS

**

** Name: BC-3 Type: Displacement/Rotation

*Boundary
Set-6, 1, 1
Set-6, 2, 2, -3.5
Set-6, 3, 3
Set-6, 4, 4
Set-6, 5, 5

Set-6, 6, 6
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field
*Node Output
CF, RF, U
*Element Output, directions=YES
LE, PE, PEEQ, PEMAG, S
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*End Step

STF45-Modifiziert-Bilinear-25mm

*Heading
** Job name: Job-1-STF45-Mod-Bilinear-25mm Model name: Model-1
** Generated by: Abaqus/CAE 2019
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
(**PART und **ASSEMBLY hier ausgelassen)
**
** ELEMENT CONTROLS
**
*Section Controls, name=EC-1, ELEMENT DELETION=NO
1., 1., 1.
**
** MATERIALS
**
*Material, name=fibre-concrete
*Density
2.5e-09,
*Elastic
5853.24, 0.2
*Concrete Damaged Plasticity
35., 0.1, 1.16, 0.67, 1e-05
*Concrete Compression Hardening
50.0915, 0.
53.258, 0.00593408
55.7932, 0.00614532
57.6764, 0.00643083
59.0003, 0.00678004
59.7927, 0.0071898
60.1192, 0.0076526
60.094, 0.00788054

59.8839, 0.00817941
59.3213, 0.00874348
58.4568, 0.00934195
57.4407, 0.00995767
56.2987, 0.0105877
55.0096, 0.0112346
53.6559, 0.0118888
52.2526, 0.0125486
50.7604, 0.0132185
49.3189, 0.0138827
47.9644, 0.014537
41.3099, 0.0177949
40.1157, 0.0184309
38.9859, 0.0190596
37.9166, 0.0196814
36.9205, 0.0202949
35.9682, 0.0209033
35.0336, 0.0215098
34.1906, 0.0221058
33.381, 0.022698
32.6356, 0.0232829
31.8731, 0.0238698
31.1417, 0.0244531
30.4652, 0.0250301
29.8399, 0.0256013
29.1698, 0.0261776
28.5177, 0.0267519
27.9171, 0.0273203
27.3856, 0.0278809
26.8702, 0.0284396
26.3794, 0.0289955
25.9112, 0.0295488
25.4728, 0.0300987
25.0179, 0.0306505
24.6022, 0.0311979
24.183, 0.0317456
23.7881, 0.0322906
23.3806, 0.032837
23.0122, 0.033379
22.8506, 0.0338974
22.7525, 0.0344086
22.7525, 0.0349086
22.7525, 0.0354086
22.7525, 0.0359086
22.7525, 0.0364086
22.7525, 0.0369086

*Concrete Tension Stiffening, type=DISPLACEMENT

3.48952, 0.
2.32635, 3.13
2.32635, 4.3
2.32635, 5.47

2.32635, 6.65

2.32635, 7.82

1.5509, 11.47

0.775449, 15.12

0., 18.77

*Concrete Compression Damage

0., 0.

0., 0.00593408

0., 0.00614532

0., 0.00643083

0., 0.00678004

0., 0.0071898

0., 0.0076526

0., 0.00786892

0.00169412, 0.00815547

0.00518542, 0.00867941

0.0145301, 0.00924348

0.0288923, 0.00984195

0.0457716, 0.0104577

0.0647427, 0.0110877

0.0861587, 0.0117346

0.108647, 0.0123888

0.13196, 0.0130486

0.156747, 0.0137185

0.180695, 0.0143827

0.203197, 0.015037

0.22536, 0.015689

0.247704, 0.0163422

0.270248, 0.0169967

0.292559, 0.0176497

0.313744, 0.0182949

0.333582, 0.0189309

0.352351, 0.0195596

0.370114, 0.0201814

0.386662, 0.0207949

0.402482, 0.0214033

0.418008, 0.0220098

0.432012, 0.0226058

0.445462, 0.023198

0.457844, 0.0237829

0.470512, 0.0243698

0.482662, 0.0249531

0.493899, 0.0255301

0.504287, 0.0261013

0.51542, 0.0266776

0.526253, 0.0272519

0.536229, 0.0278203

0.545059, 0.0283809

0.553622, 0.0289396

0.561775, 0.0294955

0.569553, 0.0300488

```
0.576835, 0.0305987
0.584393, 0.0311505
0.591299, 0.0316979
0.598263, 0.0322456
0.604823, 0.0327906
0.611592, 0.033337
0.617713, 0.033879
0.620396, 0.0343974
0.622026, 0.0349086
0.622026, 0.0354086
0.622026, 0.0359086
0.622026, 0.0364086
0.622026, 0.0369086
*Concrete Tension Damage, type=DISPLACEMENT
0., 0.
0.3, 3.13
0.3, 4.3
0.3, 5.47
0.3, 6.65
0.3, 7.82
0.5, 11.47
0.7, 15.12
0.9, 18.77
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-3, 2, 2
** Name: BC-2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-4, 2, 2
Set-4, 5, 5
Set-4, 6, 6
** -----
**
** STEP: Step-1
**
*Step, name=Step-1, nlgeom=YES, inc=10000
*Static
0.001, 1., 1e-05, 0.01
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-3 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-6, 1, 1
Set-6, 2, 2, -3.5
Set-6, 3, 3
Set-6, 4, 4
Set-6, 5, 5
```

Set-6, 6, 6
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field
*Node Output
CF, RF, U
*Element Output, directions=YES
LE, PE, PEEQ, PEMAG, S
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*End Step

STF45-Modifiziert-Bilinear-20mm-10MPa-Druckspannung

*Heading
** Job name: Job-1-STF45-Mod-Bilinear-20mm-10MPa Model name: Model-1
** Generated by: Abaqus/CAE 2019
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
(**PART und **ASSEMBLY hier ausgelassen)
**
** ELEMENT CONTROLS
**
*Section Controls, name=EC-1, ELEMENT DELETION=NO
1., 1., 1.
**
** MATERIALS
**
*Material, name=fibre-concrete
*Density
2.5e-09,
*Elastic
5853.24, 0.2
*Concrete Damaged Plasticity
35., 0.1, 1.16, 0.67, 1e-05
*Concrete Compression Hardening
50.0915, 0.
53.258, 0.00593408
55.7932, 0.00614532
57.6764, 0.00643083
59.0003, 0.00678004
59.7927, 0.0071898
60.1192, 0.0076526
60.094, 0.00786892

59.8839, 0.00815547
59.3213, 0.00867941
58.4568, 0.00924348
57.4407, 0.00984195
56.2987, 0.0104577
55.0096, 0.0110877
53.6559, 0.0117346
52.2526, 0.0123888
50.7604, 0.0130486
49.3189, 0.0137185
47.9644, 0.0143827
46.6302, 0.015037
45.2852, 0.015689
43.9282, 0.0163422
42.5851, 0.0169967
41.3099, 0.0176497
40.1157, 0.0182949
38.9859, 0.0189309
37.9166, 0.0195596
36.9205, 0.0201814
35.9682, 0.0207949
35.0336, 0.0214033
34.1906, 0.0220098
33.381, 0.0226058
32.6356, 0.023198
31.8731, 0.0237829
31.1417, 0.0243698
30.4652, 0.0249531
29.8399, 0.0255301
29.1698, 0.0261013
28.5177, 0.0266776
27.9171, 0.0272519
27.3856, 0.0278203
26.8702, 0.0283809
26.3794, 0.0289396
25.9112, 0.0294955
25.4728, 0.0300488
25.0179, 0.0305987
24.6022, 0.0311505
24.183, 0.0316979
23.7881, 0.0322456
23.3806, 0.0327906
23.0122, 0.033337
22.8506, 0.033879
22.7525, 0.0343974
22.7525, 0.0349086
22.7525, 0.0354086
22.7525, 0.0359086
22.7525, 0.0364086
22.7525, 0.0369086

*Concrete Tension Stiffening, type=DISPLACEMENT

3.48952, 0.
2.32635, 3.13
2.32635, 4.3
2.32635, 5.47
2.32635, 6.65
2.32635, 7.82
1.5509, 11.47
0.775449, 15.12
0., 18.77
*Concrete Compression Damage
0., 0.
0., 0.00593408
0., 0.00614532
0., 0.00643083
0., 0.00678004
0., 0.0071898
0., 0.0076526
0., 0.00786892
0.00169412, 0.00815547
0.00518542, 0.00867941
0.0145301, 0.00924348
0.0288923, 0.00984195
0.0457716, 0.0104577
0.0647427, 0.0110877
0.0861587, 0.0117346
0.108647, 0.0123888
0.13196, 0.0130486
0.156747, 0.0137185
0.180695, 0.0143827
0.203197, 0.015037
0.22536, 0.015689
0.247704, 0.0163422
0.270248, 0.0169967
0.292559, 0.0176497
0.313744, 0.0182949
0.333582, 0.0189309
0.352351, 0.0195596
0.370114, 0.0201814
0.386662, 0.0207949
0.402482, 0.0214033
0.418008, 0.0220098
0.432012, 0.0226058
0.445462, 0.023198
0.457844, 0.0237829
0.470512, 0.0243698
0.482662, 0.0249531
0.493899, 0.0255301
0.504287, 0.0261013
0.51542, 0.0266776
0.526253, 0.0272519
0.536229, 0.0278203

0.545059, 0.0283809
0.553622, 0.0289396
0.561775, 0.0294955
0.569553, 0.0300488
0.576835, 0.0305987
0.584393, 0.0311505
0.591299, 0.0316979
0.598263, 0.0322456
0.604823, 0.0327906
0.611592, 0.033337
0.617713, 0.033879
0.620396, 0.0343974
0.622026, 0.0349086
0.622026, 0.0354086
0.622026, 0.0359086
0.622026, 0.0364086
0.622026, 0.0369086

*Concrete Tension Damage, type=DISPLACEMENT
0., 0.
0.3, 3.13
0.3, 4.3
0.3, 5.47
0.3, 6.65
0.3, 7.82
0.5, 11.47
0.7, 15.12
0.9, 18.77

**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-3, 2, 2
** Name: BC-2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-4, 2, 2
Set-4, 5, 5
Set-4, 6, 6
** -----
**
** STEP: Step-1
**
*Step, name=Step-1, nlgeom=YES, amplitude=STEP, inc=10000
*Static
0.001, 1., 1e-09, 0.01
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-3 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-6, 1, 1

Set-6, 2, 2, -8.
Set-6, 3, 3
Set-6, 4, 4
Set-6, 5, 5
Set-6, 6, 6
**
** LOADS
**
** Name: Load-1 Type: Pressure
*Dload
Surf-1, P, 10.
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field
*Node Output
CF, RF, U
*Element Output, directions=YES
LE, PE, PEEQ, PEMAG, S
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*End Step

9.3 Modelle für STF60

STF60-Original-25mm

```
*Heading
** Job name: Job-1-STF60-Original-25mm Model name: Model-1
** Generated by: Abaqus/CAE 2019
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
(**PART und **ASSEMBLY hier ausgelassen)
**
** ELEMENT CONTROLS
**
*Section Controls, name=EC-1, ELEMENT DELETION=NO
1., 1., 1.
**
** MATERIALS
**
*Material, name=fibre-concrete
*Density
2.5e-09,
*Elastic
5367.3, 0.2
*Concrete Damaged Plasticity
35., 0.1, 1.16, 0.67, 1e-05
*Concrete Compression Hardening
49.7238, 0.
52.7468, 0.00544837
55.2154, 0.00564175
57.0773, 0.00591048
58.2822, 0.00626083
58.8206, 0.00669395
58.7812, 0.00719884
57.4562, 0.00786341
56.341, 0.00850194
55.1299, 0.00915237
53.8777, 0.0098079
52.5748, 0.0104697
51.2585, 0.0111332
49.9343, 0.0117977
48.6379, 0.0124587
47.3482, 0.0131189
46.0606, 0.0137789
44.8109, 0.0144341
43.5788, 0.0150871
42.3887, 0.0157349
41.2167, 0.0163805
40.1031, 0.0170188
39.0604, 0.0176483
38.0605, 0.0182725
```

37.0807, 0.0188942
36.1342, 0.0195118
35.2368, 0.0201233
34.3738, 0.0207305
33.5182, 0.0213367
32.7057, 0.0219377
31.9449, 0.0225321
31.2049, 0.0231241
30.4793, 0.0237142
29.7808, 0.024301
29.1428, 0.0248802
28.5351, 0.0254557
27.9025, 0.0260343
27.3251, 0.026606
26.7952, 0.0271718
26.2906, 0.0277345
25.9481, 0.028277
24.4872, 0.0289585
24.0373, 0.0295144
23.6087, 0.0300676
23.2025, 0.030618
22.807, 0.0311672
22.4256, 0.0317145
22.0498, 0.0322612
21.7001, 0.0328046
21.341, 0.0333493
21.1665, 0.0338709
21.0589, 0.0343843
21.0589, 0.0348843
21.0589, 0.0353843
21.0589, 0.0358843
21.0589, 0.0363843
21.0589, 0.0368843
*Concrete Tension Stiffening, type=DISPLACEMENT
6.1935, 0.
6.1935, 0.05
8.82499, 0.5
10.4713, 1.5
9.67186, 2.5
9.41199, 3.
9.09046, 3.5
8.67852, 4.
*Concrete Compression Damage
0., 0.
0., 0.00544837
0., 0.00564175
0., 0.00591048
0., 0.00626083
0.0052956, 0.00669395
0.00596166, 0.00719884
0.0283678, 0.00786341

0.0472284, 0.00850194
0.0677083, 0.00915237
0.0888835, 0.0098079
0.110917, 0.0104697
0.133177, 0.0111332
0.155569, 0.0117977
0.177493, 0.0124587
0.199302, 0.0131189
0.221077, 0.0137789
0.242212, 0.0144341
0.263046, 0.0150871
0.283172, 0.0157349
0.302992, 0.0163805
0.321824, 0.0170188
0.339457, 0.0176483
0.356366, 0.0182725
0.372935, 0.0188942
0.388941, 0.0195118
0.404116, 0.0201233
0.418712, 0.0207305
0.43318, 0.0213367
0.446921, 0.0219377
0.459785, 0.0225321
0.472299, 0.0231241
0.484571, 0.0237142
0.496382, 0.024301
0.507171, 0.0248802
0.517449, 0.0254557
0.528146, 0.0260343
0.53791, 0.026606
0.546872, 0.0271718
0.555404, 0.0277345
0.561196, 0.028277
0.585902, 0.0289585
0.59351, 0.0295144
0.600757, 0.0300676
0.607627, 0.030618
0.614315, 0.0311672
0.620764, 0.0317145
0.62712, 0.0322612
0.633033, 0.0328046
0.639107, 0.0333493
0.642056, 0.0338709
0.643876, 0.0343843
0.643876, 0.0348843
0.643876, 0.0353843
0.643876, 0.0358843
0.643876, 0.0363843
0.643876, 0.0368843

*Concrete Tension Damage, type=DISPLACEMENT

0., 0.

```
0., 0.05
0., 0.5
0., 1.5
0., 2.5
0.0241821, 3.
0.0541017, 3.5
0.0924339, 4.
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-3, 2, 2
** Name: BC-2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-4, 2, 2
Set-4, 5, 5
Set-4, 6, 6
** -----
**
** STEP: Step-1
**
*Step, name=Step-1, nlgeom=YES, inc=10000
*Static
0.001, 1., 1e-05, 0.01
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-3 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-6, 1, 1
Set-6, 2, 2, -3.5
Set-6, 3, 3
Set-6, 4, 4
Set-6, 5, 5
Set-6, 6, 6
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field
*Node Output
CF, RF, U
*Element Output, directions=YES
LE, PE, PEEQ, PEMAG, S
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
```

*Output, history, variable=PRESELECT

*End Step

STF60-Bilinear-25mm

*Heading

** Job name: Job-1-STF60-Bilinear-25mm Model name: Model-1

** Generated by: Abaqus/CAE 2019

*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO

**

(**PART und **ASSEMBLY hier ausgelassen)

**

** ELEMENT CONTROLS

**

*Section Controls, name=EC-1, ELEMENT DELETION=NO

1., 1., 1.

**

** MATERIALS

**

*Material, name=fibre-concrete

*Density

2.5e-09,

*Elastic

5367.3, 0.2

*Concrete Damaged Plasticity

35., 0.1, 1.16, 0.67, 1e-05

*Concrete Compression Hardening

49.7238, 0.

52.7468, 0.00544837

55.2154, 0.00564175

57.0773, 0.00591048

58.2822, 0.00626083

58.8206, 0.00669395

58.7812, 0.00719884

57.4562, 0.00786341

56.341, 0.00850194

55.1299, 0.00915237

53.8777, 0.0098079

52.5748, 0.0104697

51.2585, 0.0111332

49.9343, 0.0117977

48.6379, 0.0124587

47.3482, 0.0131189

46.0606, 0.0137789

44.8109, 0.0144341

43.5788, 0.0150871

42.3887, 0.0157349

41.2167, 0.0163805

40.1031, 0.0170188

39.0604, 0.0176483

38.0605, 0.0182725

37.0807, 0.0188942
36.1342, 0.0195118
35.2368, 0.0201233
34.3738, 0.0207305
33.5182, 0.0213367
32.7057, 0.0219377
31.9449, 0.0225321
31.2049, 0.0231241
30.4793, 0.0237142
29.7808, 0.024301
29.1428, 0.0248802
28.5351, 0.0254557
27.9025, 0.0260343
27.3251, 0.026606
26.7952, 0.0271718
26.2906, 0.0277345
25.9481, 0.028277
24.4872, 0.0289585
24.0373, 0.0295144
23.6087, 0.0300676
23.2025, 0.030618
22.807, 0.0311672
22.4256, 0.0317145
22.0498, 0.0322612
21.7001, 0.0328046
21.341, 0.0333493
21.1665, 0.0338709
21.0589, 0.0343843
21.0589, 0.0348843
21.0589, 0.0353843
21.0589, 0.0358843
21.0589, 0.0363843
21.0589, 0.0368843

*Concrete Tension Stiffening, type=DISPLACEMENT

4.33545, 0.
3.37202, 2.27
2.40858, 4.54
1.44515, 6.82
1.15612, 11.59
0.86709, 16.36
0.57806, 21.13
0.28903, 25.9
0., 30.67

*Concrete Compression Damage

0., 0.
0., 0.00544837
0., 0.00564175
0., 0.00591048
0., 0.00626083
0.0052956, 0.00669395
0.00596166, 0.00719884

0.0283678, 0.00786341
0.0472284, 0.00850194
0.0677083, 0.00915237
0.0888835, 0.0098079
0.110917, 0.0104697
0.133177, 0.0111332
0.155569, 0.0117977
0.177493, 0.0124587
0.199302, 0.0131189
0.221077, 0.0137789
0.242212, 0.0144341
0.263046, 0.0150871
0.283172, 0.0157349
0.302992, 0.0163805
0.321824, 0.0170188
0.339457, 0.0176483
0.356366, 0.0182725
0.372935, 0.0188942
0.388941, 0.0195118
0.404116, 0.0201233
0.418712, 0.0207305
0.43318, 0.0213367
0.446921, 0.0219377
0.459785, 0.0225321
0.472299, 0.0231241
0.484571, 0.0237142
0.496382, 0.024301
0.507171, 0.0248802
0.517449, 0.0254557
0.528146, 0.0260343
0.53791, 0.026606
0.546872, 0.0271718
0.555404, 0.0277345
0.561196, 0.028277
0.585902, 0.0289585
0.59351, 0.0295144
0.600757, 0.0300676
0.607627, 0.030618
0.614315, 0.0311672
0.620764, 0.0317145
0.62712, 0.0322612
0.633033, 0.0328046
0.639107, 0.0333493
0.642056, 0.0338709
0.643876, 0.0343843
0.643876, 0.0348843
0.643876, 0.0353843
0.643876, 0.0358843
0.643876, 0.0363843
0.643876, 0.0368843

*Concrete Tension Damage, type=DISPLACEMENT

```
0., 0.
0.2, 2.27
0.4, 4.54
0.6, 6.82
0.66, 11.59
0.72, 16.36
0.78, 21.13
0.84, 25.9
0.9, 30.67
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-3, 2, 2
** Name: BC-2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-4, 2, 2
Set-4, 5, 5
Set-4, 6, 6
** -----
** STEP: Step-1
**
*Step, name=Step-1, nlgeom=YES, inc=10000
*Static
0.001, 1., 1e-05, 0.01
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-3 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-6, 1, 1
Set-6, 2, 2, -3.5
Set-6, 3, 3
Set-6, 4, 4
Set-6, 5, 5
Set-6, 6, 6
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field
*Node Output
CF, RF, U
*Element Output, directions=YES
LE, PE, PEEQ, PEMAG, S
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
```

```
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*End Step
STF60-Modifiziert-Bilinear-25mm

*Heading
** Job name: Job-1-STF60-Mod-Bilinear-25mm Model name: Model-1
** Generated by: Abaqus/CAE 2019
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
(**PART und **ASSEMBLY hier ausgelassen)
**
** ELEMENT CONTROLS
**
*Section Controls, name=EC-1, ELEMENT DELETION=NO
1., 1., 1.
**
** MATERIALS
**
*Material, name=fibre-concrete
*Density
2.5e-09,
*Elastic
5367.3, 0.2
*Concrete Damaged Plasticity
35., 0.1, 1.16, 0.67, 1e-05
*Concrete Compression Hardening
49.7238, 0.
52.7468, 0.00544837
55.2154, 0.00564175
57.0773, 0.00591048
58.2822, 0.00626083
58.8206, 0.00669395
58.7812, 0.00719884
57.4562, 0.00786341
56.341, 0.00850194
55.1299, 0.00915237
53.8777, 0.0098079
52.5748, 0.0104697
51.2585, 0.0111332
49.9343, 0.0117977
48.6379, 0.0124587
47.3482, 0.0131189
46.0606, 0.0137789
44.8109, 0.0144341
43.5788, 0.0150871
42.3887, 0.0157349
41.2167, 0.0163805
40.1031, 0.0170188
39.0604, 0.0176483
38.0605, 0.0182725
```

37.0807, 0.0188942
36.1342, 0.0195118
35.2368, 0.0201233
34.3738, 0.0207305
33.5182, 0.0213367
32.7057, 0.0219377
31.9449, 0.0225321
31.2049, 0.0231241
30.4793, 0.0237142
29.7808, 0.024301
29.1428, 0.0248802
28.5351, 0.0254557
27.9025, 0.0260343
27.3251, 0.026606
26.7952, 0.0271718
26.2906, 0.0277345
25.9481, 0.028277
24.4872, 0.0289585
24.0373, 0.0295144
23.6087, 0.0300676
23.2025, 0.030618
22.807, 0.0311672
22.4256, 0.0317145
22.0498, 0.0322612
21.7001, 0.0328046
21.341, 0.0333493
21.1665, 0.0338709
21.0589, 0.0343843
21.0589, 0.0348843
21.0589, 0.0353843
21.0589, 0.0358843
21.0589, 0.0363843
21.0589, 0.0368843

*Concrete Tension Stiffening, type=DISPLACEMENT

4.33545, 0.
2.8903, 2.84
2.8903, 3.9
2.8903, 4.97
2.8903, 6.03
2.8903, 7.1
1.92687, 10.41
0.963433, 13.73
0., 17.04

*Concrete Compression Damage

0., 0.
0., 0.00544837
0., 0.00564175
0., 0.00591048
0., 0.00626083
0.0052956, 0.00669395
0.00596166, 0.00719884

0.0283678, 0.00786341
0.0472284, 0.00850194
0.0677083, 0.00915237
0.0888835, 0.0098079
0.110917, 0.0104697
0.133177, 0.0111332
0.155569, 0.0117977
0.177493, 0.0124587
0.199302, 0.0131189
0.221077, 0.0137789
0.242212, 0.0144341
0.263046, 0.0150871
0.283172, 0.0157349
0.302992, 0.0163805
0.321824, 0.0170188
0.339457, 0.0176483
0.356366, 0.0182725
0.372935, 0.0188942
0.388941, 0.0195118
0.404116, 0.0201233
0.418712, 0.0207305
0.43318, 0.0213367
0.446921, 0.0219377
0.459785, 0.0225321
0.472299, 0.0231241
0.484571, 0.0237142
0.496382, 0.024301
0.507171, 0.0248802
0.517449, 0.0254557
0.528146, 0.0260343
0.53791, 0.026606
0.546872, 0.0271718
0.555404, 0.0277345
0.561196, 0.028277
0.585902, 0.0289585
0.59351, 0.0295144
0.600757, 0.0300676
0.607627, 0.030618
0.614315, 0.0311672
0.620764, 0.0317145
0.62712, 0.0322612
0.633033, 0.0328046
0.639107, 0.0333493
0.642056, 0.0338709
0.643876, 0.0343843
0.643876, 0.0348843
0.643876, 0.0353843
0.643876, 0.0358843
0.643876, 0.0363843
0.643876, 0.0368843

*Concrete Tension Damage, type=DISPLACEMENT

```
0., 0.
0.3, 2.84
0.3, 3.9
0.3, 4.97
0.3, 6.03
0.3, 7.1
0.5, 10.41
0.7, 13.73
0.9, 17.04
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-3, 2, 2
** Name: BC-2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-4, 2, 2
Set-4, 5, 5
Set-4, 6, 6
** -----
**
** STEP: Step-1
**
*Step, name=Step-1, nlgeom=YES, inc=10000
*Static
0.001, 1., 1e-05, 0.01
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-3 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-6, 1, 1
Set-6, 2, 2, -3.5
Set-6, 3, 3
Set-6, 4, 4
Set-6, 5, 5
Set-6, 6, 6
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field
*Node Output
CF, RF, U
*Element Output, directions=YES
LE, PE, PEEQ, PEMAG, S
**
```

** HISTORY OUTPUT: H-Output-1

**

*Output, history, variable=PRESELECT

*End Step