

**Fachhochschule Technikum Kärnten, Baulabor  
in Kooperation mit  
Technische Universität Graz, Labor für Konstruktiven Ingenieurbau**

**Forschungsbericht 2006\_01**

**Experimentelle Bestimmung der Zug- Spannungs-Dehnungslinie  
an zylindrischen Proben aus UHPFRC  
(ultra high performance fibre reinforced concrete)**



**DI Joachim Juhart, FH Technikum Kärnten, Baulabor**

**Dr. techn. Bernhard Freytag, TU Graz, Labor für Konstruktiven Ingenieurbau**

Die deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-9502176-9-8

© Fachhochschule Technikum Kärnten, 2007

Villacher Straße 1

A-9800 Spittal an der Drau

Alle Fotos und Darstellungen: Joachim Juhart

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anders Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Herausgebers reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet oder vervielfältigt werden.

Der vorliegende Forschungsbericht wurde mit größter Sorgfalt erstellt. Herausgeber und Autor können dennoch keine Haftung für die inhaltliche und technische Fehlerfreiheit und Vollständigkeit übernehmen.

Wir freuen uns, Ihre Meinung über den vorliegenden Bericht zu erfahren:

Ansprechperson: DI Joachim Juhart, wissenschaftlicher Mitarbeiter, Baulabor

Email: [baulab@fh-kaernten.at](mailto:baulab@fh-kaernten.at)

Tel.: +43 4762 90500 1114

Fax.: +43 4762 90500 81114

## Kurzfassung

In diesem Forschungsbericht wird eine Methode vorgestellt, mit der zentrische Zugversuche an Bohrkernen aus ultrahochfestem faserverstärkten Beton (kurz UHPC) durchgeführt werden können. Die Methode wird angewendet, um die Zugtragfähigkeit und das Nachrissverhalten eines bestimmten UHPC mit Stahlfasern zu prüfen. Die Ergebnisse von Versuchen an gekerbten und ungekerbten Bohrkernen werden dargestellt.

Für die Prüfungen wird ein Versuchsaufbau mit einem einfachen, modifizierten Haftzugprüfgerät verwendet. Dabei werden Dehnungen an drei Stellen des Umfangs der Prüfkörper gemessen. Die Exzentrizität des Versuchsaufbaus kann somit erfasst und anschließend rechnerisch kompensiert werden. Da die Proben durch Ziehen von Bohrkernen aus einem Prisma gewonnen werden, ist es möglich, das Zugtragverhalten für unterschiedliche Richtungen im Prisma zu untersuchen und damit eine Richtungsabhängigkeit der Zugfestigkeit festzustellen. Außerdem kann der Einfluss des Fasergehalts überprüft werden.

Die maximale Zugspannung, die unter Belastung erreicht werden kann bevor ein sichtbarer Riss auftritt, lässt sich an ungekerbten Proben prüfen. Das Nachrissverhalten des UHPC lässt sich an gekerbten Proben zeigen. Eine Spannungs- Dehnungslinie bzw. Spannungs-Rissöffnungsbeziehung für UHPC mit Stahlfasern wird erhalten, wenn die Ergebnisse von ungekerbten Proben für den Bereich vor einem Riss mit den Ergebnissen an gekerbten Proben für den Bereich nach einem sichtbaren Riss zusammengesetzt werden.

### Stichworte:

UHPC ultra high performance concrete, *hier synonym verwendet mit*

UHPFRC ultra high performance fibre reinforced concrete

UHFB Ultra Hochleistungs- Faserbeton

Zugprüfung, Faserbeton, zentrische Zugfestigkeit, Nachrissverhalten, Spannungs-Dehnungslinie, Spannungs-Rissöffnungsbeziehung, Fasergehalt, Exzentrizität, Versuchsaufbau

Schlagwörter zum Inhalt: Baustoff; Betonart; Ultra Hochfester Beton; Faserverstärkung; Zugfestigkeit; Zugdehnung; Ultrahochfester Beton; Faserbeton; Prüfverfahren; Einsatzbereich; Materialverhalten; Baustoffeigenschaft; Versuchsergebnis;

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	5
2	Gegenstand der Untersuchung .....	5
3	Ziel der Untersuchung .....	5
4	Bereitstellung und Vorbereitung der Probekörper .....	6
5	Versuchsaufbau.....	7
6	Versuchsablauf und Messungen .....	9
7	Auswertung.....	12
8	Ergebnisse.....	17
8.1	Zusammenfassung .....	17
8.2	Diagramme .....	21
9	Schlussfolgerungen .....	28
10	Anhang 1: Protokoll der Vorversuche.....	30
11	Anhang 2: Zugversuche an Bohrkernen nach den Durchstanzversuchen.....	38

## 1 Einleitung

Im vorliegenden Bericht wird eine direkte Bestimmung der Zugfestigkeit und der Spannungs-Dehnungslinie von zylindrischen Proben aus UHPFRC<sup>1</sup> unter Zugbeanspruchung vorgestellt. Zentrische Zugversuche werden mit Hilfe eines modifizierten Haftzugprüfgerätes durchgeführt. Aus der Spannungs-Dehnungslinie wird auf eine Spannungs- Rissöffnungsbeziehung geschlossen. Abhängig vom Fasergehalt zeigt sich entfestigendes oder verfestigendes Verhalten beim Faserauszug.

Durch die Messung der Längsdehnungen an drei Stellen des Probenzylinderumfangs können sowohl die axiale Dehnung als auch Randdehnungen genau bestimmt werden. Der Einfluss einer Exzentrizität des Versuchsaufbaues lässt sich mit den gewonnenen Messwerten für den ersten Abschnitt der Arbeitslinie, also den Bereich vor dem Auftreten eines sichtbaren Risses, rechnerisch eliminieren.

Da die Proben durch Ziehen von Bohrkernen gewonnen werden, ist es möglich, das Zugtragverhalten für unterschiedliche Richtungen im Probepisma zu untersuchen und damit eine Richtungsabhängigkeit der Zugfestigkeit festzustellen. Es kann auf eine inhomogene Faserverteilung und eventuell auf eine bevorzugte Faserorientierung im Bauteil geschlossen werden. Laut Literaturberichten orientieren sich Fasern bevorzugt „liegend“ im Frischbeton<sup>2</sup>. Außerdem kann der Einfluss des Fasergehalts überprüft werden.

Team: Joachim Juhart, Peter Druml (FH Technikum Kärnten)

Dr. techn. Bernhard Freytag, DI Josef Linder, Mario Wiesberger (TU Graz)

## 2 Gegenstand der Untersuchung

Gegenstand der Untersuchung sind Bohrkern aus UHPC, Marke „ceracem“ der Firma SIKA. Die Untersuchungen begleiten ein Forschungsvorhaben<sup>3</sup> und wurden von DI Zehentner, Fröhlich & Locher ZT GmbH, initiiert. Hauptsächlich sollten Probekörper mit einem Fasergehalt von 2 Vol.% untersucht werden. Im Anhang sind auch Ergebnisse von Vorversuchen an Proben mit 2,5 Vol.% Fasern und Ergebnisse an Bohrkernen aus Versuchskörpern nach Großversuchen dokumentiert.

## 3 Ziel der Untersuchung

- Charakterisierung des Zugtragverhaltens des UHPFRC „ceracem“: Bestimmung der Zug-Spannungs-Dehnungslinie, der maximalen Zugfestigkeit und des Nachrissverhaltens
- Test bzw. Evaluierung eines Versuchsaufbaus mit einem einfachen Haftzuggerät

---

<sup>1</sup> UHPFRC: ultra high performance fibre reinforced concrete, zu Deutsch: faserverstärkter Ultrahochleistungsbeton bzw. gebräuchlicher: ultrahochfester faserverstärkter Beton, kurz UHPC

<sup>2</sup> Fehling, E; Schmidt M. et al.: Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC). In: Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 1, kassel university press. 2005

<sup>3</sup> Forschungsvorhaben „Die Entwicklung von punktgestützten Flachdecken aus Fertigteilen“ der Firma Katzenberger Baustoffindustrie GmbH

- Die Feststellung eines Einflusses der Lage der Probekörper im Bauteil auf die Zugfestigkeit. Das soll Aufschluss darüber geben, ob der Betoniervorgang eine bevorzugte Orientierung der Stahlfasern und damit richtungsabhängige Festigkeitseigenschaften verursacht.

#### 4 Bereitstellung und Vorbereitung der Probekörper

- Betonage von 2 Prismen 10/10/40 cm mit 2,05 Vol % (161 kg/m<sup>3</sup>) Stahlfasern am 28.11.2005<sup>4</sup>. Es werden glatte gerade Stahlfasern mit einem Längen- zu Durchmesser Verhältnis von 66,7 (20/0,3 mm) aus hochfestem Stahldraht ( $f_s > 1250$  MPa) verwendet.
- Bohrkernentnahme aus den Prismen bei Fa. Alpine Mayreder am 5. und 6.12.2005. Die Bohrkern (DM 45,7mm) werden in 2 verschiedenen Raumrichtungen entnommen (siehe Abbildung 1). Die hergestellten Kerne sind am Bohransatz krumm und unplan.
- Nachbearbeitung der BK durch FH Technikum Kärnten: neuerlich planes Abschneiden und Einschneiden einer Kerbe (Kerbtiefe und -breite 4,4 mm) bei 6 von 12 Proben.



**Abbildung 1:** links: Entnahmerichtung und Bezeichnungen der Bohrkern:  
IB....in Betonierichtung, QZB.... Quer zur Betonierichtung  
rechts: Probekörperansichten und Probekörpervorbereitung  
(Zentrieren und Kleben der Adapter)

Auf die Probekörper werden Ansatzstücke aus Stahl mit Epoxydharzkleber<sup>5</sup> mithilfe einer Zentriereinrichtung aufgeklebt. Siehe auch Abbildung 1.

<sup>4</sup> Vgl. Prüfbericht A 431.3/2005 des Laboratoriums f. Betontechnologie und Bodenprüfung der Firma Alpine Mayreder Bau GmbH, Graz. Der UHPC wurde im Werk der Firma Katzenberger hergestellt. Konsistenz des Frischbetons mit Fasern: Fließmaß >70 cm (ÖNORM B 3303, SCC Richtlinie)

Rezept: Premix ceracem – BFM Millau: 2355 kg/m<sup>3</sup>,  
Fließmittel Sika Viskocrete 5-400F: 44,6 kg/m<sup>3</sup>  
Stahlfasern IFT Fasertechnik „baseloc“: geplant 150 kg/m<sup>3</sup>, nachgeprüft: 161 kg/m<sup>3</sup> (Mische 2)  
Wasser : 195 kg/m<sup>3</sup>

<sup>5</sup> Epoxydharzkleber „Sikadur 30“, Der Kleber verbindet Stahl und Beton mit ausreichender Festigkeit (Zugfestigkeit > 20 N/mm<sup>2</sup> nach 24 h Aushärtung, trockene Untergründe, E-Modul von 12800 N/mm<sup>2</sup>)

**Tabelle 1: Probekörperbearbeitung**

Probekörper	Betonage	Bearbeitung 1	Anmerkung	Bearbeitung 2	Geprüfte Probekörper	Prüfung
Prisma 1 10/10/40 cm 12 BK	28.11.05	Wasserlagerung bis 05.12. (7 Tage), BK-Entnahme im Nassverfahren, Transport nach Spittal, Schneiden und Kerben bei 2*3 Proben, Transport nach Graz (in Folie) am 9.12.05, Wasserlagerung bis 19.12., Trocknen und Aufkleben Adapter	1.Prüfung am 01.02.06 schlägt fehl, da sich Adapter in Klebefuge lösen (zu feuchter Beton bei Klebung)	Transport der Körper nach Spittal am 01.02.06, 2. mal plan Abschneiden, Ausscheiden von 6 BK, Trocknen, neuerliches Bekleben, Transport nach Graz 01.03.06	IB 01 IB 02 IB 06 gekerbt QZB 04 gek. QZB 05 gek. QZB 06 gek.	Prüfung von 6 Körpern aus der Serie am 01.03.2006 (Probenalter 93 Tage)
Prisma 2 10/10/40 cm 10 BK	28.11.05	BK- Entnahme am 6.12. 05, Transport ans LKI, Versand nach Spittal am 24.02.06	Schneiden und Kerben der Proben in Spittal, Trocknen, Bekleben	Transport nach Graz 01.03.06	IB 03 IB 04 gekerbt IB 05 gekerbt QZB 01 QZB 02 QZB 03	Prüfung von 6 Körpern aus der Serie am 01.03.2006 (Probenalter 93 Tage)

## 5 Versuchsaufbau

Für die Prüfungen wird ein erweitertes Haftzugprüfgerät mit einer maximalen Zugkraft von 25 kN verwendet (siehe Abbildung 2). Bei diesem Gerät wird die Kraft über einen hydraulischen Druckzylinder mit Spindelantrieb aufgebracht. Es wird mit Hilfe einer Handkurbel angetrieben, mit der auch die Geschwindigkeit der Wegzunahme (Spindelhub/Zeit) vorgegeben wird. Die aufgebrachte Kraft wird mit einer Kraftmessdose, die in der Versuchachse angeordnet ist, gemessen, während die Längenänderungen mit drei Dehnungsaufnehmern aufgezeichnet werden, die am Bohrkernumfang angebracht sind.

- 3 symmetrisch sternförmig angeordnete Dehnungsaufnehmer HBM DD1:  
Messbar sind Längenänderungen ab  $0,01 \mu\text{m}$   
Messbereich +/- 2,5 mm Längenänderung  
Messwegunsicherheit 0,5%  
Messbasis 50 mm.  
Dehnungen errechnen sich aus den Längenänderungen bezogen auf die Messbasis.

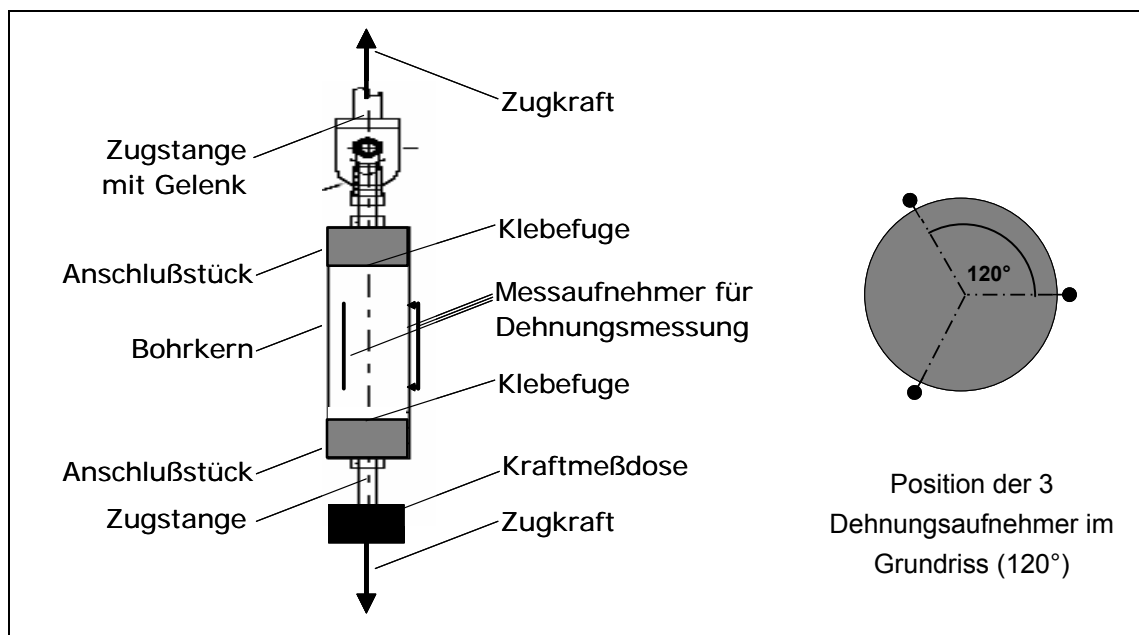


Abbildung 2: Schema und Fotos zum Versuchsaufbau

## 6 Versuchsablauf und Messungen

01.03.2006, 9.00-12.30 am LKI Graz (Probenalter 93 Tage)

**Tabelle 2: Probekörperübersicht**

Probekörper	Orientierung	DM	Höhe h	Kerbtiefe	Querschnittsflächen $A_{\text{ungekerbt}}, A_{\text{Kerbe}}$	Kerbbreite
		mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	mm
IB 01	in Betonier- richtung	45,7	62		1640,3	
IB 02			56		1640,3	
IB 03			70		1640,3	
IB 04 gekerbt			65	4,0	1640,3/1116,3	4,4
IB 05 gekerbt			67	4,2	1640,3/1096,6	4,4
IB 06 gekerbt			57	4,5	1640,3/1057,8	4,4
QZB 01	Quer zur Betonier- richtung	45,7	67		1640,3	
QZB 02			68		1640,3	
QZB 03			67		1640,3	
QZB 04 gekerbt			66	4,4	1640,3/1069,4	4,4
QZB 05 gekerbt			61	4,6	1640,3/1046,3	4,4
QZB 06 gekerbt			61	4,4	1640,3/1069,4	4,4

Es wird eine axiale Zugkraft **F** mithilfe einer Kurbel mit einem Spindelhub von 0,07 mm pro Umdrehung aufgebracht, die Geschwindigkeit wird von Hand gesteuert und beträgt etwa 0,007mm/s (1/10 Umdrehung/s).

Messwerte für die Kraft **F** und für Längenänderungen  $\Delta l_i$  an drei Stellen **i** des Umfangs werden im Intervall von 0,2 sec laufend aufgezeichnet. Die Dehnungen  $\varepsilon_i$  ( $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  bzw. eps1, eps2, eps3) können für die ungekerbten Proben so unmittelbar aus den Längenänderungen  $\Delta l_i$  bezogen auf die Messbasis **l** angegeben werden. Für ungekerbte Proben gilt:

$$\varepsilon_{u,i} = \frac{\Delta l_i}{l} \quad (\text{Gl. 1})$$

Bei den gekerbten Proben sind die Dehnungen  $\varepsilon_{k,i}$  an 3 Stellen im verringerten Querschnitt der Kerbe unter der Kraft größer als die Dehnungen im ungekerbten Probenbereich  $\varepsilon_{u,i}$ . Dies muss bei der Berechnung der Dehnungen aus der gemessenen Längenänderungen  $\Delta l_i$  berücksichtigt werden.

$$\varepsilon_{k,i} = \frac{\Delta l_i}{\left[ \frac{A_k}{A_u} \cdot l_u + l_k \right]} \quad (\text{Gl. 2})$$

$$\Delta l_i = \varepsilon_{\text{ungekerbterBereich}} \cdot l_{\text{ungekerbterBereich}} + \varepsilon_{\text{gekerbterBereich}} \cdot l_{\text{gekerbterBereich}} \quad (\text{Gl. 3})$$

$$\varepsilon_{\text{gekerbterBereich}} = \frac{F}{E \cdot A_{\text{Kerbe}}} \quad (\text{Gl. 4})$$

$$\varepsilon_{\text{ungekerbterBereich}} = \frac{F}{E \cdot A_{\text{ungekerbterBereich}}} \quad (\text{Gl. 5})$$

Nach einem Bereich mit linear elastischem Materialverhalten zeigt meist einer der 3 Dehnungsaufnehmer eine überproportionale Wegzunahme. Visuell sind noch keine Risse am Umfang erkennbar. Es kommt in der Folge auf einer Seite des Bohrkernes zu einer sichtbaren Rissbildung (Abbildung 3).

Rissbildung vor dem Bruch



Abbildung 3: Ungekerbter Probekörper, Detail Rissausbildung

Der Riss breitet sich meist schlagartig über den gesamten Querschnitt aus. Bei den ungekerbten Proben ist dies in 5 von 6 Fällen mit einer sprunghaften Dehnungszunahme und einem deutlichen Abfall der Kraft verbunden. In einem Fall fällt die Kraft nur gering ab. Es hat sich gezeigt, dass sich der Riss an einer nicht vorhersehbaren zufälligen Schwachstelle im Gefüge ausbildet. Der Rissverlauf ist „beliebig“ (siehe Abbildung 4).



Abbildung 4: Beispiele für ungekerbte Probekörper nach dem Versuch

An den gekerbten Probekörpern lokalisiert sich ein Riss im verringerten Querschnitt (Abbildung 6) und breitet sich wiederum schlagartig aus. Bei 2 von 6 Probekörpern (IB06 und QZB04) wächst der Riss infolge eines Biegeeffekts aus dem Kerbquerschnitt hinaus. Die Rissausbildung ist mit einer sprunghaften Dehnungszunahme und einem kurzzeitigen Abfall der Spannungen verbunden. Dies ist wohl auf ein gewisses Zurückfedern („snap back“) des relativ weichen Versuchsaufbaues zurückzuführen. Im weiteren Versuchsverlauf steigt die aufnehmbare Spannung wieder etwas an bzw. bleibt auf einem Spannungsniveau bei kontinuierlicher Rissaufweitung bis zu Dehnungen von mehr als 2 % erhalten (Faserauszug). Siehe dazu die Abbildung 5 und die Diagramme im Abschnitt 8.2.

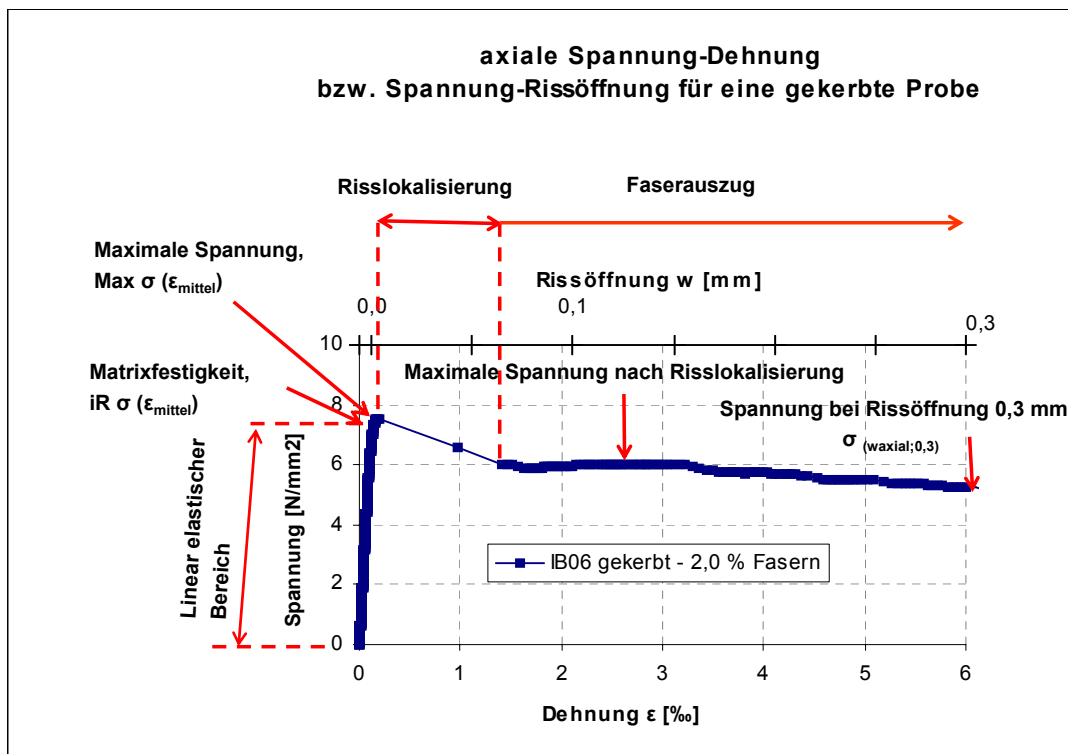


Abbildung 5: Spannung- Dehnung bzw. -Rissöffnung am Beispiel einer gekerbten Probe



Abbildung 6: gekerbte Probekörper nach dem Versuch

## 7 Auswertung

Die Achse, in der die Last aufgebracht wird („Versuchsachse“), fällt nicht genau mit der Achse des zylindrischen Bohrkerns zusammen. Die Ausmittigkeit ist auf geometrische Imperfektionen der Probekörper (verkrümmt, schief gestellt) und auf Imperfektionen im Versuchsaufbau (ungleichmäßige Klebefugen, nicht ganz zentrisch angebrachte Metalladapter, keine zwängungsfreie Lagerung der Probe im Zugprüfgerät) zurückzuführen. Diese Exzentrizität verursacht Biegeeffekte während der Zugprüfung. Der Zylinder verlängert sich nicht ganz gleichmäßig. Dehnungsmessungen am Umfang ermöglichen die rechnerische Ermittlung der tatsächlichen Exzentrizitäten im linearen Bereich des Versuchs.

Die maximalen Dehnungen  $\varepsilon_{\max}$ ,  $\varepsilon_{\min}$  - auch bezeichnet mit  $\varepsilon_{\text{Rand I,II}}$  - sowie die axiale Dehnung  $\varepsilon_{\text{mittel}}$  des Zylinders können aus den Dehnungen  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ , die an 3 Stellen des Umfangs gemessen wurden, errechnet werden. Durch die drei im Grundriss symmetrisch im Winkel von  $120^\circ$  angeordneten Messstellen ist die Dehnungsebene am gelängten Zylinder unter Vernachlässigung der kleinen Verkrümmung der Zylinderoberfläche zu bestimmen (Vektorrechnung, Ebene bestimmt durch  $\mathbf{v}\varepsilon_1, \mathbf{v}\varepsilon_2, \mathbf{v}\varepsilon_3$ ). Der Schnitt dieser Dehnungsebene mit dem Ausgangszylinder ergibt eine Ellipse bzw. eine Ellipsengleichung. Durch sie kann der Dehnungszustand zu jedem Zeitpunkt in Bezug auf ein Zylinder- Polarkoordinatensystem beschrieben werden. Minimum und Maximum der Dehnungen an der Zylinderoberfläche bzw. deren Mittelwert auf der Zylinderachse können errechnet werden. (Siehe Abbildung 7)

Für jeden Belastungszustand bzw. Zeitpunkt des Versuchs können damit die axiale Kraft bzw. Spannung, die axiale Dehnung sowie die maximale und die minimale Dehnung am Umfang, also die Randdehnungen, angegeben werden.

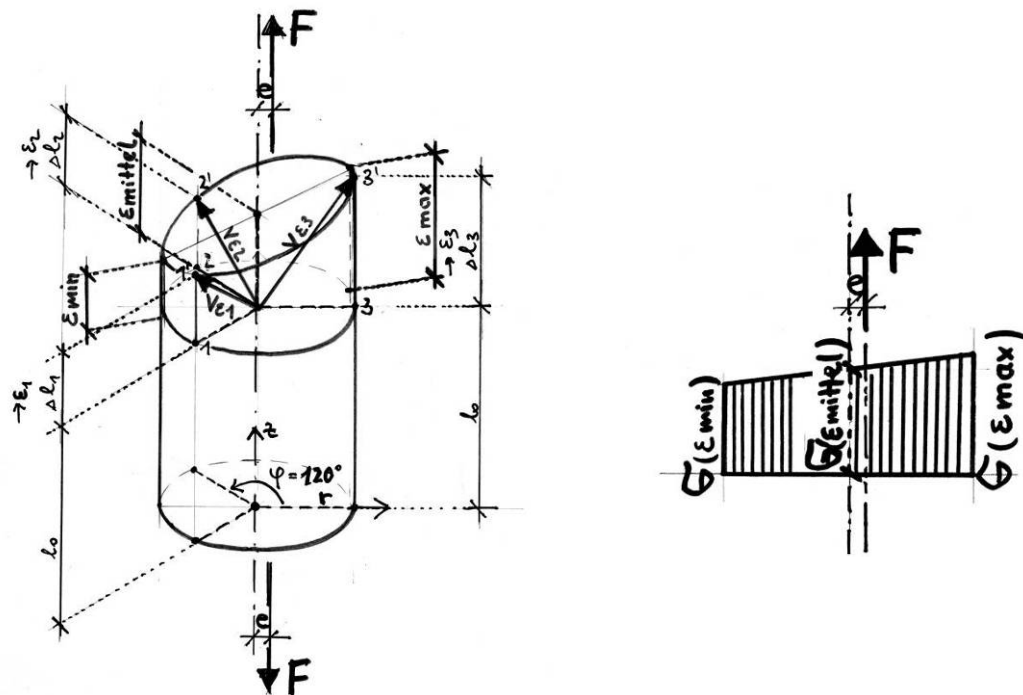


Abbildung 7: schematische Skizzen zu den ermittelten Dehnungs- und Spannungsgrößen

Aus der gemessenen Kraft  $F$  lässt sich zu jedem Messzeitpunkt  $i$  die axiale Spannung  $\sigma(\varepsilon_{\text{mittel}})$  angeben. Das Verhältnis von axialer Spannung zu axialer Dehnung  $\varepsilon_{\text{mittel}}$  gibt den E-Modul an. Im ersten Abschnitt verläuft die Arbeitslinie praktisch linear. Für diesen Bereich kann auch ein linearer E-Modul angegeben werden<sup>6</sup>.

$$E_i = \frac{\sigma(\varepsilon_{\text{mittel}}, i)}{\varepsilon_{\text{mittel}}, i} \quad (\text{Gl. 6})$$

$$\sigma(\varepsilon_{\text{mittel}}, i) = \frac{F_i}{A} \quad (\text{Gl. 7})$$

Im Bereich des linearen Spannungs- Dehnungsverlaufs lässt sich neben der axialen Zugspannung auch eine maximale Randzugspannung  $\sigma(\varepsilon_{\text{max}})$  angeben. In ihr ist ein Biegespannungsanteil enthalten.

$$\sigma(\varepsilon_{\text{max}}, i) = E_i \times \varepsilon_{\text{max}}, i \quad (\text{Gl. 8})$$

Aus dem Verhältnis der Randdehnung zur axialen Dehnungen kann unter Berücksichtigung des Radius  $R$  die rechnerische Exzentrizität  $e$  des Versuchsaufbaus für den linearen Bereich angegeben werden:

$$e = \frac{\varepsilon_{\text{max}}}{\varepsilon_{\text{mittel}}} \times \frac{R}{4} - \frac{R}{4} \quad (\text{Gl. 9})$$

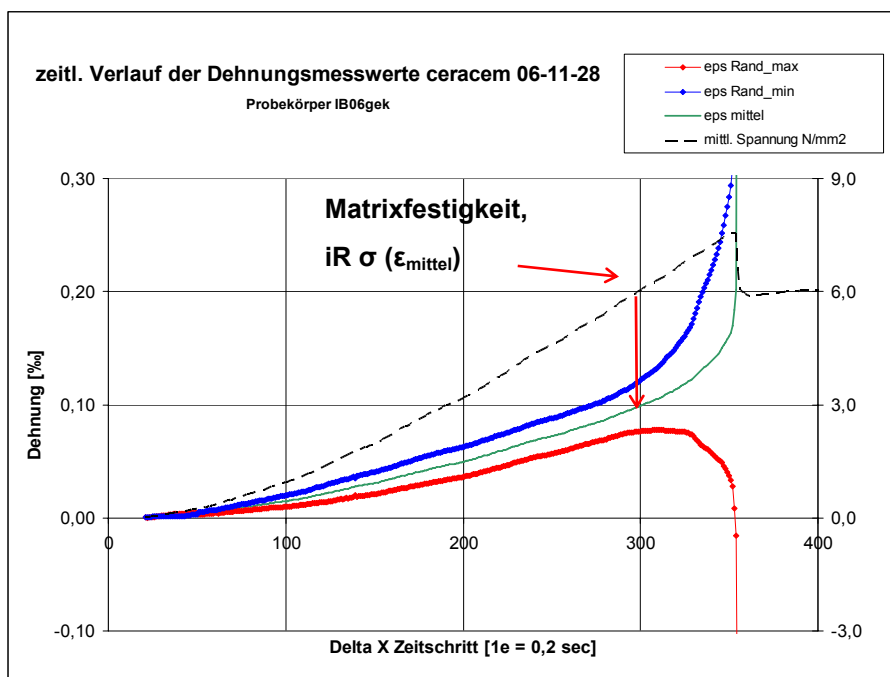


Abbildung 8: Beispiel für den Verlauf der rechnerischen Exzentrizität des Versuchsaufbaues

<sup>6</sup> In Analogie zu ÖNORM B 3303 wird der lineare E-Modul des Betons bei 1/3 der Maximalzugspannung  $f_{ct}$  angegeben (Sekante der Arbeitslinie vom Nullpunkt zum Wert für  $f_{ct}/3$ )

Es zeigt sich, dass die Exzentrizität im ersten Zeitabschnitt des Versuchs abnimmt („Effekte zweiter Ordnung“ – Verformung des Versuchsaufbaus hin zu geringerer Ausmitte der Zylinderachse zur Versuchsachse). Danach bleibt sie einige Zeit annähernd konstant, um in weiterer Folge mit der Ausbildung von Mikro- und dann Makrorissen im Beton rechnerisch stark und zum Teil sprunghaft zuzunehmen. (Abbildung 8)

Im folgenden Abschnitt, noch vor dem Auftreten eines sichtbaren Makrorisses verläuft die Spannungs- Dehnungslinie nicht mehr linear. Es zeigt sich ein deutlicher Knick bzw. ein sprunghafter Anstieg im Verlauf der Dehnungszunahme der einzelnen Dehnungswerte (Abbildung 9).



**Abbildung 9: Beispiel für den Verlauf der Dehnungen und axialen Spannung bis zum Riss**

Dieser Knick wird hier als Punkt des initialen Mikrorisses  $iR$ , der mit freiem Auge nicht sichtbar ist, definiert. Die Zugfestigkeit zu diesem Zeitpunkt entspricht der Matrixfestigkeit „ $iR \sigma (\epsilon_{mittel})$ “. Ab diesem Zeitpunkt flacht der lineare Anstieg der Spannungs- Dehnungslinie stark ab (siehe dazu die Diagramme im Abschnitt 8.2). Es kommt zu einer Faseraktivierung. Es ist anzunehmen, dass sich im Querschnitt auch „plastizierende“ Zonen ausbilden. In diesem Abschnitt der Arbeitslinie kann die maximale Randzugspannung näherungsweise berechnet werden. Dazu wird der E-Modul als die Steigung der Arbeitslinie, die sich in jedem Punkt  $i$  ändert, gesucht.

Diese Steigung lässt sich durch die Sekante, definiert als Gerade durch zwei dem Punkt  $i$  benachbarte Messwerte, angeben. Dazu werden zwei Messwerte im Abstand von  $\pm 10$  Messwerten gewählt. Der Sekanten- Modul  $\Delta E$  beschreibt das Verhältnis von axialem Spannungszuwachs zum Dehnungszuwachs für 20 Messintervalle, also ein sehr kurzer Abschnitt der Arbeitslinie. Die maximale Randzugspannung  $\sigma(\epsilon_{max})_i$  zu einem bestimmten Zeitpunkt  $i$  ergibt sich näherungsweise aus dem bekannten Wert der maximalen

Randzugspannung  $\sigma(\varepsilon_{\max}),_{i-1}$  zum vorhergehenden Zeitpunkt plus dem Spannungszuwachs im Zeitintervall errechnet mit Hilfe des Sekanten- Moduls. Dieser Modul wird an der axialen Spannungs-Dehnungslinie zum selben Messzeitpunkt  $i$  ermittelt.

$$\sigma(\varepsilon_{\max}),_i = \sigma(\varepsilon_{\max}),_{i-1} + \Delta E, i \times (\varepsilon_{\max}_i - \varepsilon_{\max}_{i-1}) \quad (\text{Gl. 10})$$

$$\Delta E, i = \frac{\sigma(\varepsilon_{\text{mittel}}),_{i+10} - \sigma(\varepsilon_{\text{mittel}}),_{i-10}}{\varepsilon_{\text{mittel},i+10} - \varepsilon_{\text{mittel},i-10}} \quad (\text{Gl. 11})$$

Der weitere Verlauf der Spannungs- Dehnungslinie ist gekennzeichnet durch eine sprunghafte Dehnungszunahme, dies ist zum Teil auf die Weichheit des Versuchsaufbaues zurückzuführen. Ein sichtbarer Riss bildet sich aus (Abbildung 5).

Bei den ungekerbten Proben mit undefiniertem Rissort und -verlauf fällt die Spannung in weiterer Folge stark ab (Abbildung 10). Sie bleibt dann aber auf niedrigem Niveau bei etwa halber Zugfestigkeit bis zu großen Dehnungen (rund 6 ‰). Hier treten aufgrund des beliebigen Rissverlaufs verstärkt Biegeeffekte auf.

Die Zugfestigkeit, also die maximale Spannung beim Auftreten eines sichtbaren Risses, kann an den ungekerbten Proben ermittelt werden. Näherungsweise lässt sich die axiale maximale Spannung „Max  $\sigma(\varepsilon_{\text{mittel}})$ “ und die maximale Randspannung am Zylinderumfang „Max  $\sigma(\varepsilon_{\max})$ “ wie oben beschrieben angeben. Damit wird die Exzentrizität des Aufbaues mit Hilfe der Dehnungsmesswerte rechnerisch kompensiert.

### Zugfestigkeiten an ungekerbten Proben (2 Vol.% Fasern)

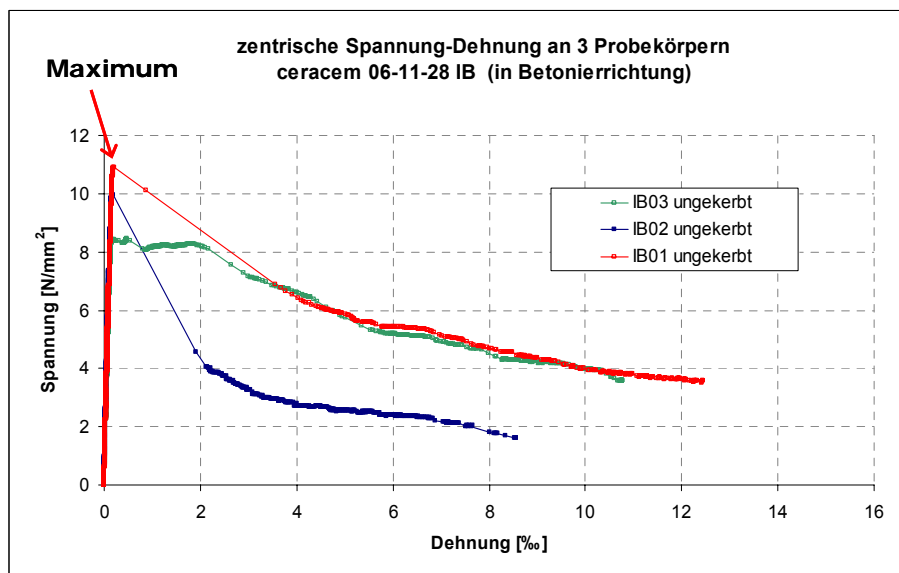


Abbildung 10 : Beispiele für ungekerbte Probekörper

Bei den gekerbten Versuchskörpern sind die Ausmittigkeiten des Zentrums des maßgebenden Querschnitts zur Versuchsachse aufgrund der Imperfektionen am größten. Außerdem führt hier der Einfluss der Kerbspannungen zu einer über den Querschnitt ungleichmäßigen Spannungsverteilung. Der Wert der ermittelten maximalen Zugspannung fällt deshalb zu gering aus. An den Proben kann aber die Rissöffnung bzw. kontinuierliche Rissaufweitung an einem in der Kerbe lokalisierten Riss beobachtet werden. Die Rissöffnung ist beim Erreichen der Matrixfestigkeit gleich Null und kann ab diesem Zeitpunkt angegeben werden. Sie ergibt sich theoretisch aus den ermittelten Dehnungen ohne den elastischen Dehnungsanteil, der aber so gering ist, dass er hier vernachlässigt wird. Siehe auch Abbildung 5. Nach dem Riss der Betonmatrix werden Zugspannungen durch die Fasern bei kontinuierlichem Faserauszug übertragen. Sie sind durch Biegeeffekte, die wegen der nicht völlig homogenen Faserverteilung im Querschnitt und die oben erwähnten Imperfektionen auftreten können, beeinflusst. Verlässlich kann nur die Zugspannung als Kraft bezogen auf die Fläche des ursprünglichen Betonquerschnitts und die zugehörige axiale Dehnung angegeben werden. Trotzdem wurden fiktive Randspannungen über den Sekanten E-Modul wie oben beschrieben auch für den Nachrissbereich errechnet und angegeben. Diese Werte für den Nachrissbereich sind nur grobe Näherungen.

## 8 Ergebnisse

### 8.1 Zusammenfassung

#### Zugfestigkeiten vor Rissöffnung ermittelt an ungekerbten Proben (Alter 93 Tage)

Probekörper	Exzentrizität im linearen Bereich mm	iR $\sigma$ ( $\epsilon_{\text{mittel}}$ )	iR $\sigma$ ( $\epsilon_{\text{max}}$ )	Max $\sigma$ ( $\epsilon_{\text{mittel}}$ )	Max $\sigma$ ( $\epsilon_{\text{max}}$ )	E-Modul Sekantenmodul bei 1/3 von Max $\sigma$ ( $\epsilon_{\text{mittel}}$ ) axial N/mm <sup>2</sup>
		Matrixfestigkeit F/A	Matrixfestigkeit $\Sigma \Delta E^* \Delta \epsilon$	Maximum F/A	Maximum $\Sigma \Delta E^* \Delta \epsilon$	
		axial N/mm <sup>2</sup>	am Rand N/mm <sup>2</sup>	axial N/mm <sup>2</sup>	am Rand N/mm <sup>2</sup>	
IB01	0,8	10,2	11,6	10,9	12,0	65345
IB02	0,5	9,1	9,9	10,0	10,5	73555
IB03	1,3	7,5	9,1	8,4	10,4	63911
QZB01	1,2	5,9	7,2	6,8	8,3	59874
QZB02	0,4	8,7	9,1	9,8	9,9	62113
QZB03	1,5	6,7	8,4	7,1	8,6	59643
<b>Mittelwerte</b>	<b>0,9</b>	<b>8,0</b>	<b>9,2</b>	<b>8,8</b>	<b>10,0</b>	<b>64073,3</b>

#### Spannungswerte nach Rissöffnung ermittelt an gekerbten Proben (Alter 93 Tage)

Probekörper	Exzentrizität im linearen Bereich mm	$\sigma$ ( $\epsilon_{\text{mittel}}=6\text{‰}$ )	$\sigma$ ( $\epsilon_{\text{max}}=6\text{‰}$ )	$\sigma$ ( $\epsilon_{\text{mittel}}=20\text{‰}$ )	$\sigma$ ( $\epsilon_{\text{max}}=20\text{‰}$ )	E-Modul Sekantenmodul bei 1/3 von Max $\sigma$ ( $\epsilon_{\text{mittel}}$ ) axial N/mm <sup>2</sup>
		Rissöffnung 0,3 mm F/A axial N/mm <sup>2</sup>	Rissöffnung 0,3 mm am Rand N/mm <sup>2</sup>	Rissöffnung 1 mm F/A axial N/mm <sup>2</sup>	Rissöffnung 1 mm am Rand N/mm <sup>2</sup>	
		IB04	1,3	4,6	5,1	
IB05	1,7					59450
IB06	1,1	5,2	7,2	3,2	3,8	64238
QZB04	1,2	5,3	7,8	1,7	4,3	55896
QZB05	-					-
QZB06	1,2	3,7	4,0	1,9	2,7	66794
<b>Mittelwerte</b>	<b>1,3</b>	<b>4,7</b>	<b>6,0</b>	<b>2,1</b>	<b>3,6</b>	<b>60990</b>

### Detaillierte Ergebnisse für ungekerbte Proben

Zugfestigkeiten (Maximalwerte) und zugehörige Werte									
Probekörper		Querschnitts- fläche mm <sup>2</sup>	Max $\sigma$ ( $\epsilon_{\text{mittel}}$ ) N/mm <sup>2</sup> F/A	Mittelwert- Abweichung	zug $\epsilon_{\text{mittel}}$ ‰	zug Max $\sigma$ ( $\epsilon_{\text{max}}$ ) N/mm <sup>2</sup> $\Sigma \Delta E^* \Delta \epsilon_{\text{max}}$	Mittelwert- Abweichung	zug $\epsilon_{\text{max}}$ ‰	E-Modul N/mm <sup>2</sup> Sekantenmodul bei 1/3 Max $\sigma$ ( $\epsilon_{\text{mittel}}$ )
DM 45,7 mm (Alter 93 Tage)									
<b>ungekerbt</b>	IB01	1640,3	10,9	11,6%	0,21	12,0	9,3%	0,18	65345
	IB02	1640,3	10,0	2,0%	0,18	10,5	-4,6%	0,28	73555
	IB03	1640,3	8,4	-13,5%	0,47	10,4	-4,8%	0,94	63911
	<i>Mittelwerte</i>		<b>9,8</b>		<b>0,29</b>	<b>11,0</b>		<b>0,47</b>	<b>67603</b>
	QZB01	1640,3	6,8	-14,3%	0,14	8,3	-6,8%	0,23	59874
	QZB02	1640,3	9,8	24,4%	0,23	9,9	10,9%	0,31	62113
	QZB03	1640,3	7,1	-10,1%	0,14	8,6	-4,1%	0,20	59643
	<i>Mittelwerte</i>		<b>7,9</b>		<b>0,17</b>	<b>9,0</b>		<b>0,25</b>	<b>65698</b>
	<b>Gesamt- Mittelwerte</b>		<b>8,8</b>		<b>0,23</b>	<b>10,0</b>		<b>0,36</b>	<b>64073</b>

Zugfestigkeiten der Matrix ("initialer Riss, iR" = Diskontinuität der Dehnung) und zugehörige Werte									
Probekörper		Querschnitts- fläche mm <sup>2</sup>	iR $\sigma$ ( $\epsilon_{\text{mittel}}$ ) N/mm <sup>2</sup>	Mittelwert- Abweichung	zug $\epsilon_{\text{mittel}}$ ‰	iR zug $\sigma$ ( $\epsilon_{\text{max}}$ ) N/mm <sup>2</sup>	Mittelwert- Abweichung	zug $\epsilon_{\text{max}}$ ‰	Exzentrizität mm
DM 45,7 mm (Alter 93 Tage)									
<b>ungekerbt</b>	IB01	1640,3	10,2	14,2%	0,17	11,6	14,1%	0,19	0,8
	IB02	1640,3	9,1	2,1%	0,14	9,9	-3,2%	0,15	0,5
	IB03	1640,3	7,5	-16,2%	0,13	9,1	-10,8%	0,15	1,3
	<i>Mittelwerte</i>		<b>8,9</b>		<b>0,14</b>	<b>10,2</b>		<b>0,16</b>	<b>0,9</b>
	QZB01	1640,3	5,9	-16,6%	0,11	7,2	-12,4%	0,13	1,2
	QZB02	1640,3	8,7	22,4%	0,16	9,1	10,5%	0,17	0,4
	QZB03	1640,3	6,7	-5,7%	0,12	8,4	1,9%	0,15	1,5
	<i>Mittelwerte</i>		<b>7,1</b>		<b>0,13</b>	<b>8,2</b>		<b>0,15</b>	<b>1,0</b>
	<b>Gesamt- Mittelwerte</b>		<b>8,0</b>		<b>0,14</b>	<b>9,2</b>		<b>0,16</b>	<b>0,9</b>

### Detaillierte Ergebnisse für gekerbte Proben

#### Zugfestigkeiten (Maximalwerte) und zugehörige Werte

Probekörper	Querschnitts- fläche mm <sup>2</sup>	Max $\sigma$ ( $\epsilon_{\text{mittel}}$ )		zug $\epsilon_{\text{mittel}}$ ‰	zug Max $\sigma$ ( $\epsilon_{\text{max}}$ )		zug $\epsilon_{\text{max}}$ ‰	E-Modul N/mm <sup>2</sup> Sekantenmodul bei 1/3 Max $\sigma$ ( $\epsilon_{\text{mittel}}$ )	
		N/mm <sup>2</sup>	Mittelwert- Abweichung		N/mm <sup>2</sup>	Mittelwert- Abweichung			
<b>gekerbt</b>	IB04	1116,3	7,6	4,9%	0,21	9,2	-5,3%	0,37	58573
	IB05	1096,6	6,7	-8,5%	0,18	Wegaufnehmer	gesprungen	59450	
	IB06	1057,8	7,5	3,6%	0,18	10,3	5,3%	0,36	64238
	<i>Mittelwerte</i>		<b>7,3</b>		<b>0,19</b>	<b>9,8</b>		<b>0,36</b>	<b>59012</b>
	QZB04	1069,4	7,2	-7,0%	0,24	9,7	0,0%	0,50	55896
	QZB05	1046,3	8,5	9,8%	0,11	Wegaufnehmer	gesprungen	-	
	QZB06	1046,3	7,5	-2,9%	0,17	9,7	0,0%	0,34	66794
	<i>Mittelwerte</i>		<b>7,7</b>		<b>0,17</b>	<b>9,7</b>		<b>0,42</b>	<b>58233</b>
	<b>Gesamt- Mittelwerte</b>		<b>7,5</b>		<b>0,18</b>	<b>9,7</b>		<b>0,39</b>	<b>60990</b>

#### Zugfestigkeiten der Matrix ("initialer Riss, iR" = Diskontinuität der Dehnung) und zugehörige Werte

Probekörper	Querschnitts- fläche mm <sup>2</sup>	iR $\sigma$ ( $\epsilon_{\text{mittel}}$ )		zug $\epsilon_{\text{mittel}}$ ‰	iR zug $\sigma$ ( $\epsilon_{\text{max}}$ )		zug $\epsilon_{\text{max}}$ ‰	Exzentrizität mm	
		N/mm <sup>2</sup>	Mittelwert- Abweichung		N/mm <sup>2</sup>	Mittelwert- Abweichung			
<b>gekerbt</b>	IB04	1116,3	7,2	10,1%	0,16	8,9	8,4%	0,20	1,3
	IB05	1096,6	6,3	-3,6%	0,14	Wegaufnehmer	gesprungen	1,7	
	IB06	1057,8	6,1	-6,5%	0,10	7,5	-8,4%	0,13	1,1
	<i>Mittelwerte</i>		<b>6,6</b>		<b>0,13</b>	<b>8,2</b>		<b>0,16</b>	<b>1,3</b>
	QZB04	1069,4	5,5	-14,6%	0,11	6,7	-10,0%	0,14	1,2
	QZB05	1046,3	7,2	11,6%	0,07	Wegaufnehmer	gesprungen	5,8	
	QZB06	1046,3	6,6	3,1%	0,11	8,2	10,0%	0,13	1,2
	<i>Mittelwerte</i>		<b>6,4</b>		<b>0,10</b>	<b>7,5</b>		<b>0,14</b>	<b>2,7</b>
	<b>Gesamt- Mittelwerte</b>		<b>6,5</b>		<b>0,11</b>	<b>7,8</b>		<b>0,15</b>	<b>2,0</b>

**axiale Spannung-Dehnung nach Rissöffnung**

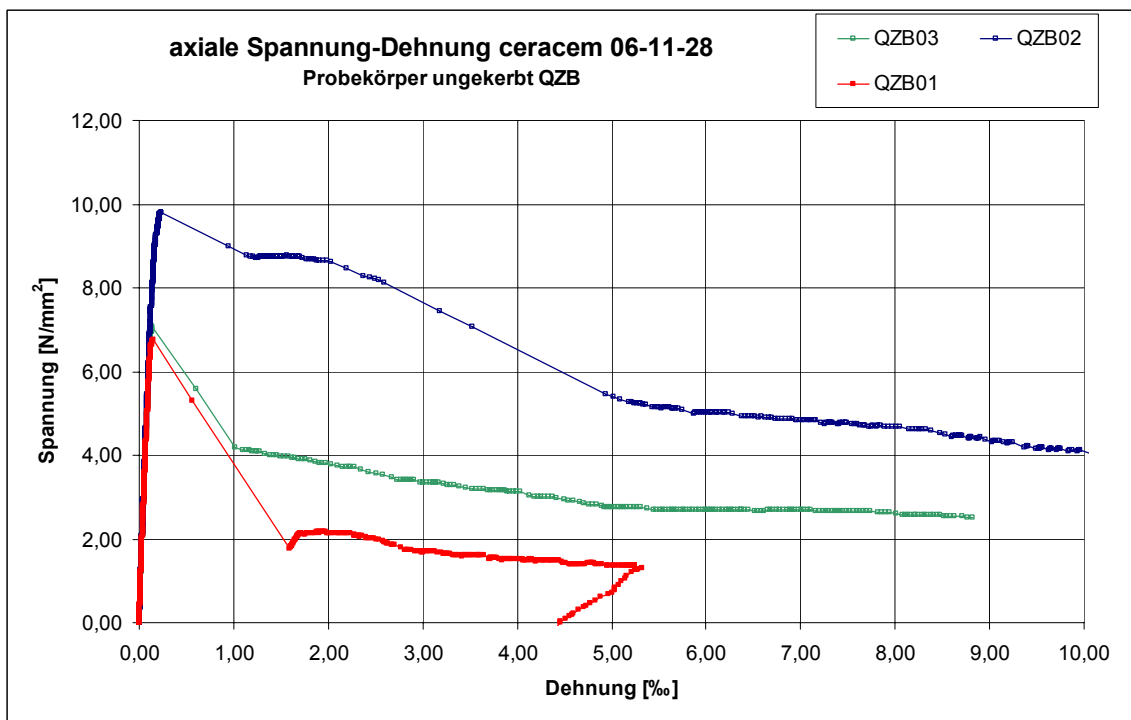
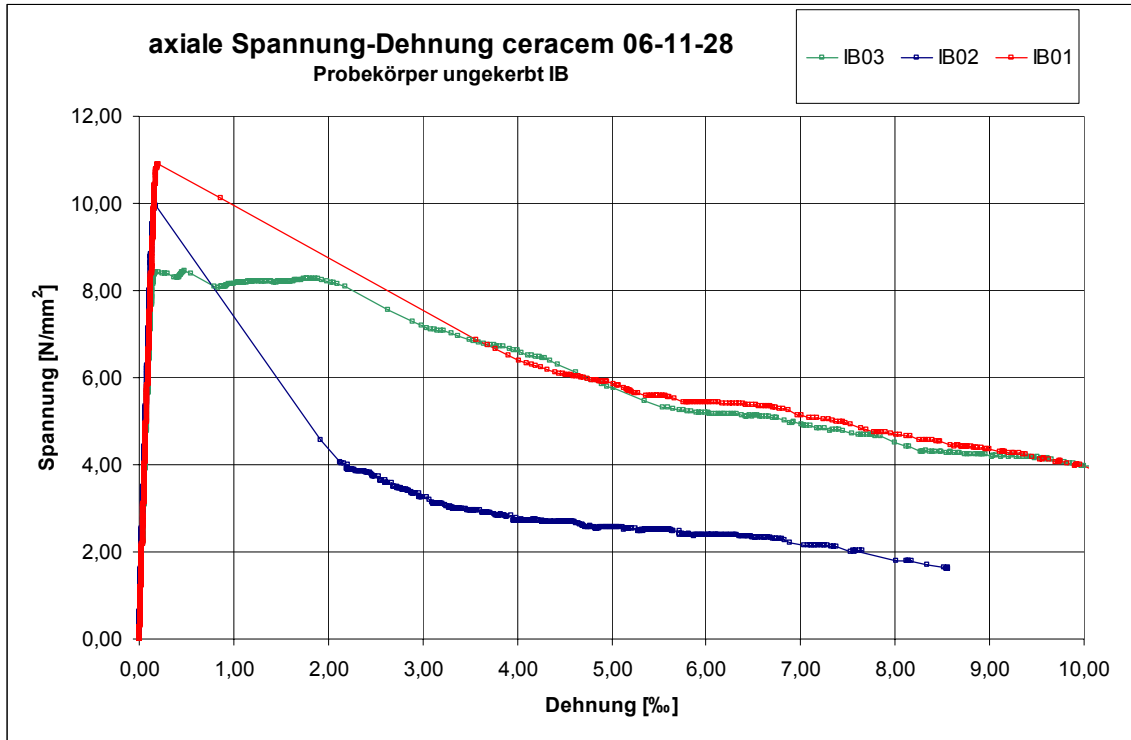
Probekörper	$\epsilon_{\text{mittel}}$ % gerundet			$w$ mm elast. Anteil			$\sigma (\epsilon_{\text{mittel}}) = \sigma (w_{\text{axial}})$ N/mm <sup>2</sup>			
	gerundet	elast. Anteil	gerundet	IB04	IB05	IB06	QZB04	QZB05	QZB06	Mittelwerte
1,5				6,0	Wegaufnehmer	6,0	5,9	Wegaufnehmer	5,8	5,9
2	0,095	0,1		5,9	gesprungen	5,9	6,1	gesprungen	5,2	5,8
3				5,7		6,0	6,2	krumm	4,5	5,6
4				5,4		5,7	6,1		4,5	5,4
5				4,7		5,5	5,4		4,2	5,0
6	0,295	0,3		4,6		5,2	5,3		3,7	4,7
7				4,5		5,1	5,2		3,4	4,5
8				4,1		4,9	5,1		3,3	4,3
9				3,5		4,8	4,7		3,2	4,1
10	0,495	0,5		3,3		4,3	4,3		3,0	3,7
20	0,995	1,0		1,5		3,2	1,7		1,9	2,1

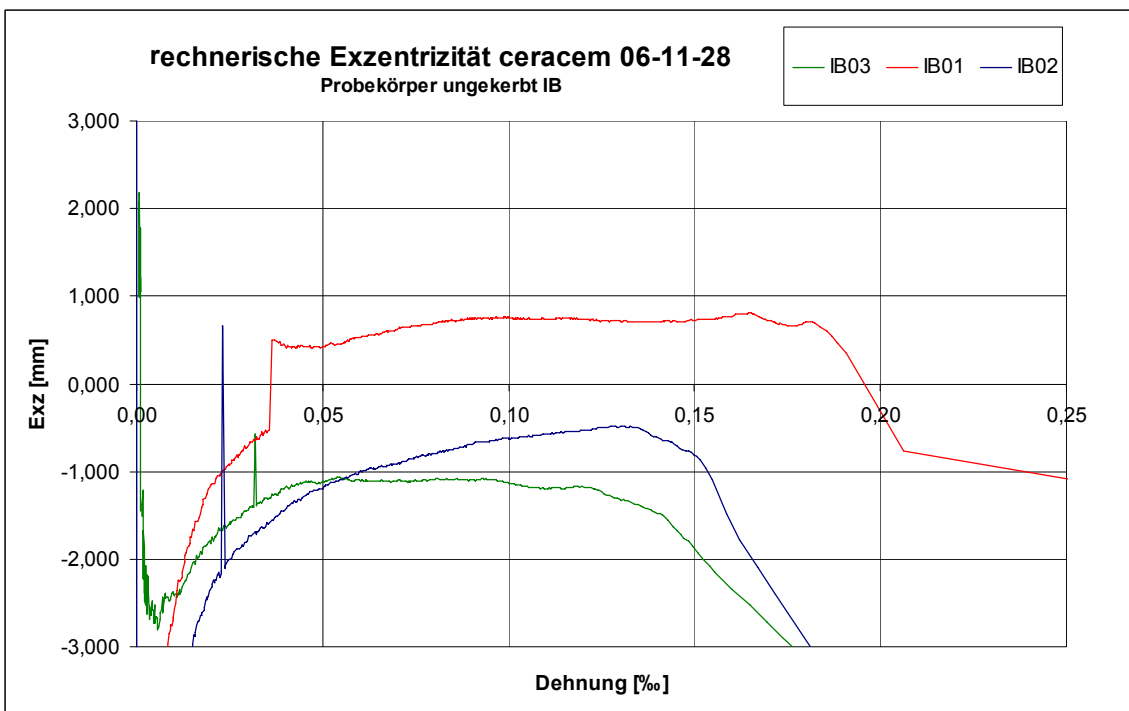
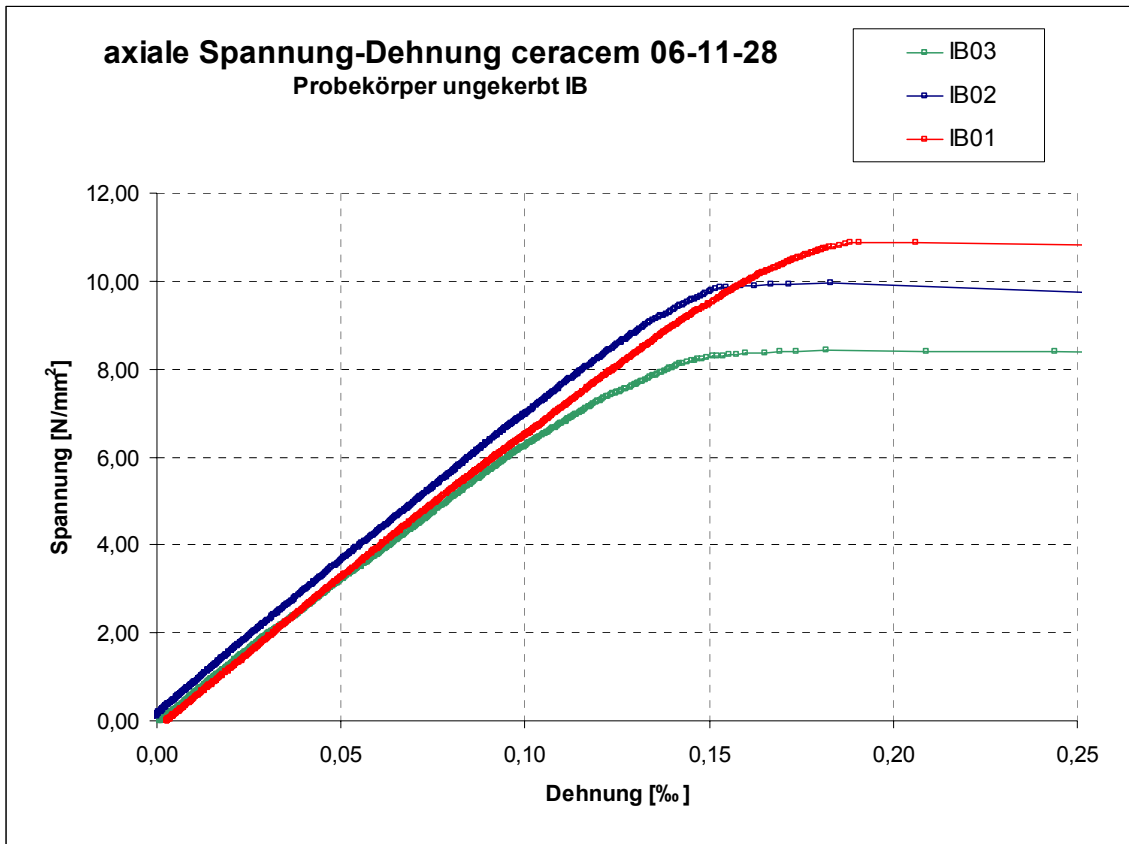
**Rand- Spannung Dehnung nach Rissöffnung (vereinfachte Annahmen für eine Näherung)**

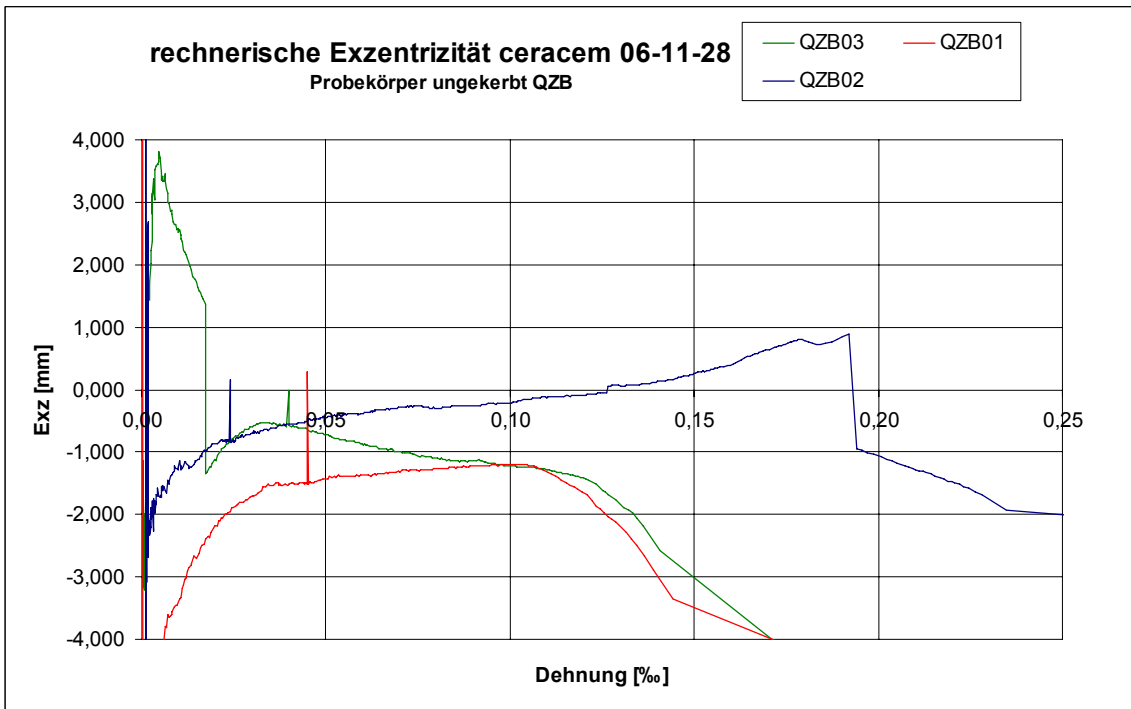
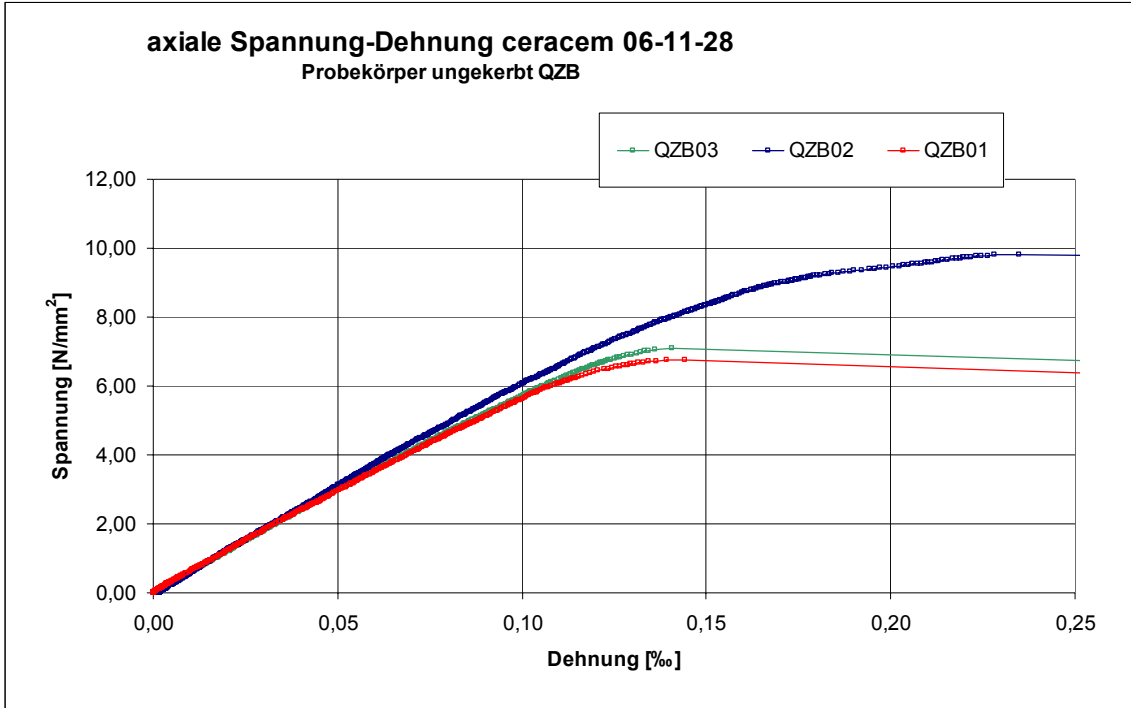
Probekörper	$\epsilon_{\text{max}}$ % gerundet			$w$ mm elast. Anteil			$\sigma (\epsilon_{\text{max}}) = \sigma (w_{\text{Rand}})$ N/mm <sup>2</sup>			
	gerundet	elast. Anteil	gerundet	IB04	IB05	IB06	QZB04	QZB05	QZB06	Mittelwerte
2	0,095	0,1		7,7	Wegaufnehmer	8,5	8,5	Wegaufnehmer	4,7	7,4
3				6,4	gesprungen	7,5	7,6	gesprungen	4,5	6,5
4				5,5		6,9	7,2	krumm	4,3	6,0
5				5,4		7,1	7,6		4,2	6,0
6	0,295	0,3		5,1		7,2	7,8		4,0	6,0
7				4,8		6,9	7,8		3,9	5,9
8				4,7		6,6	7,9		3,6	5,7
9				4,1		6,4	7,6		3,5	5,4
10	0,495	0,5		3,5		6,1	6,8		3,2	4,9
10	0,995	1,0		-		3,8	4,3		2,7	3,6

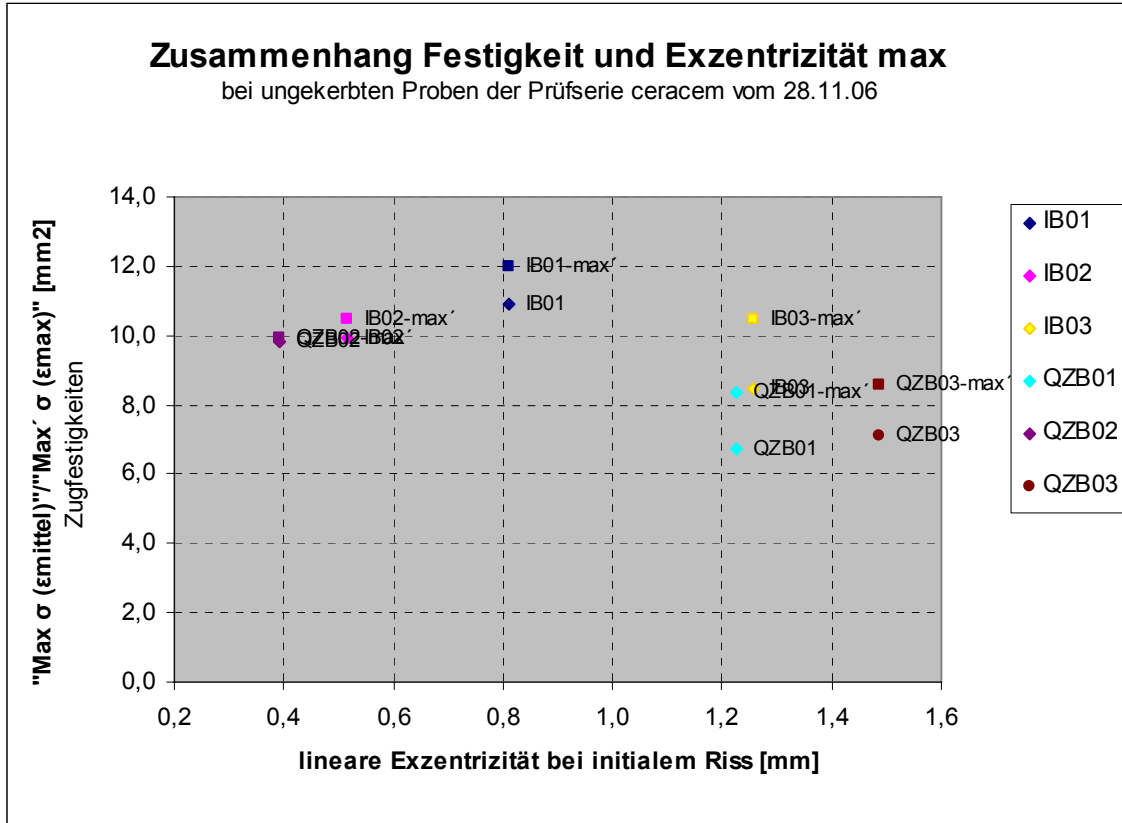
## 8.2 Diagramme

### ungekerbte Proben

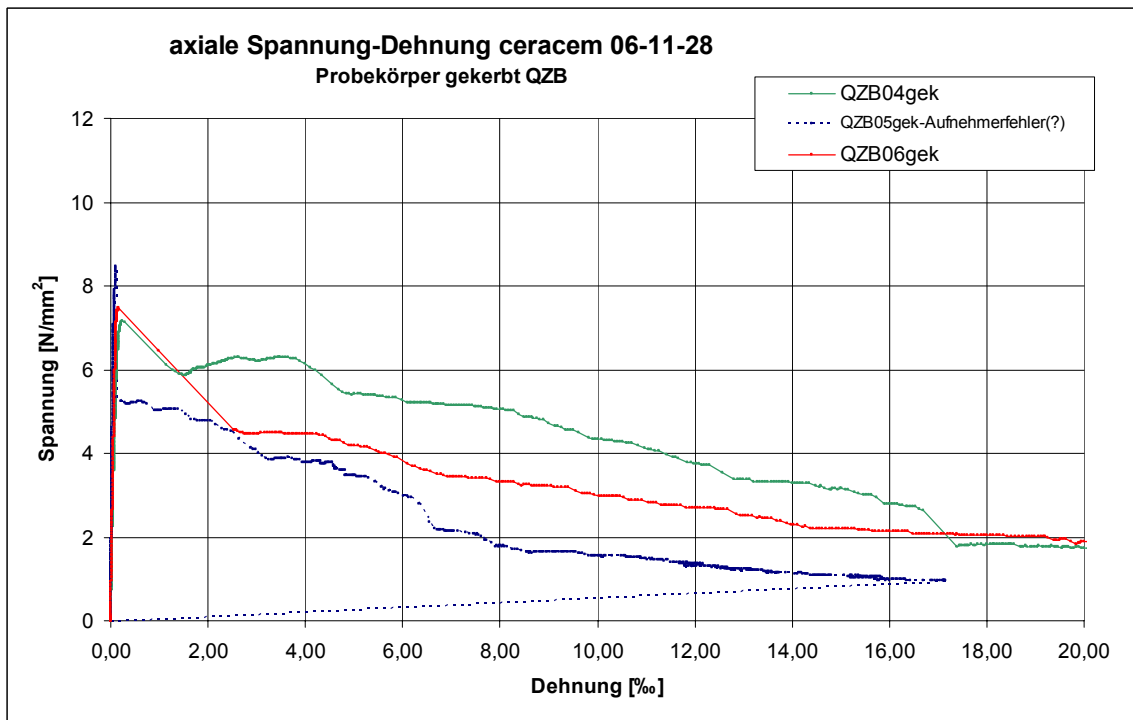
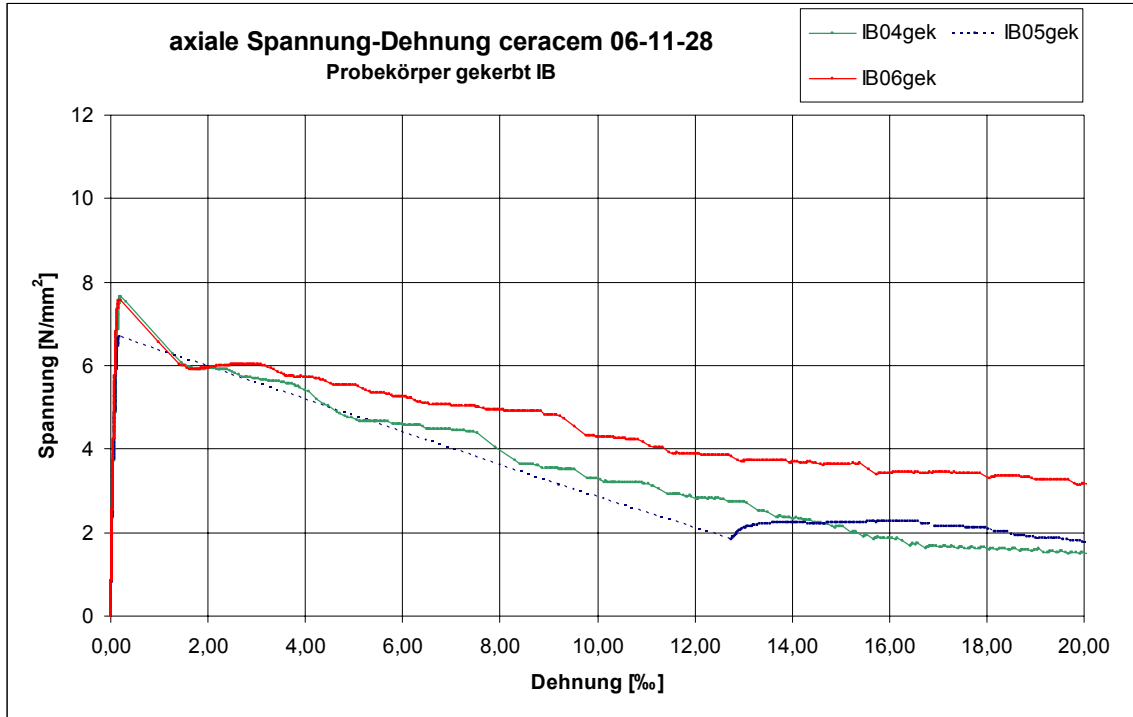


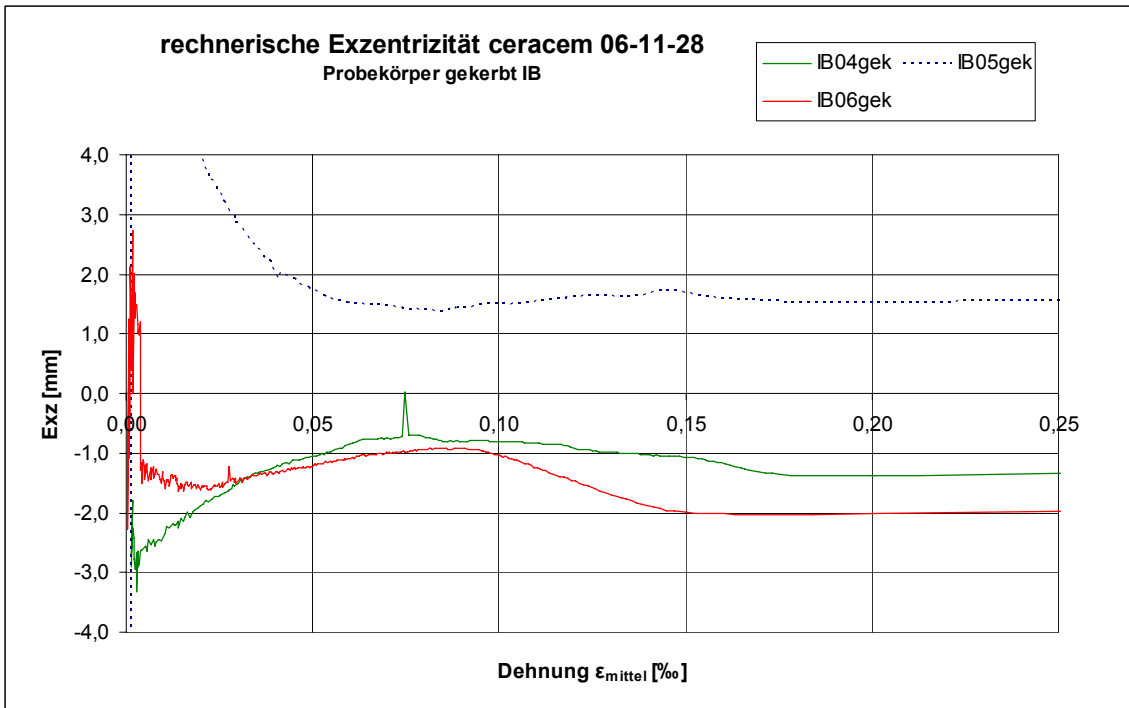
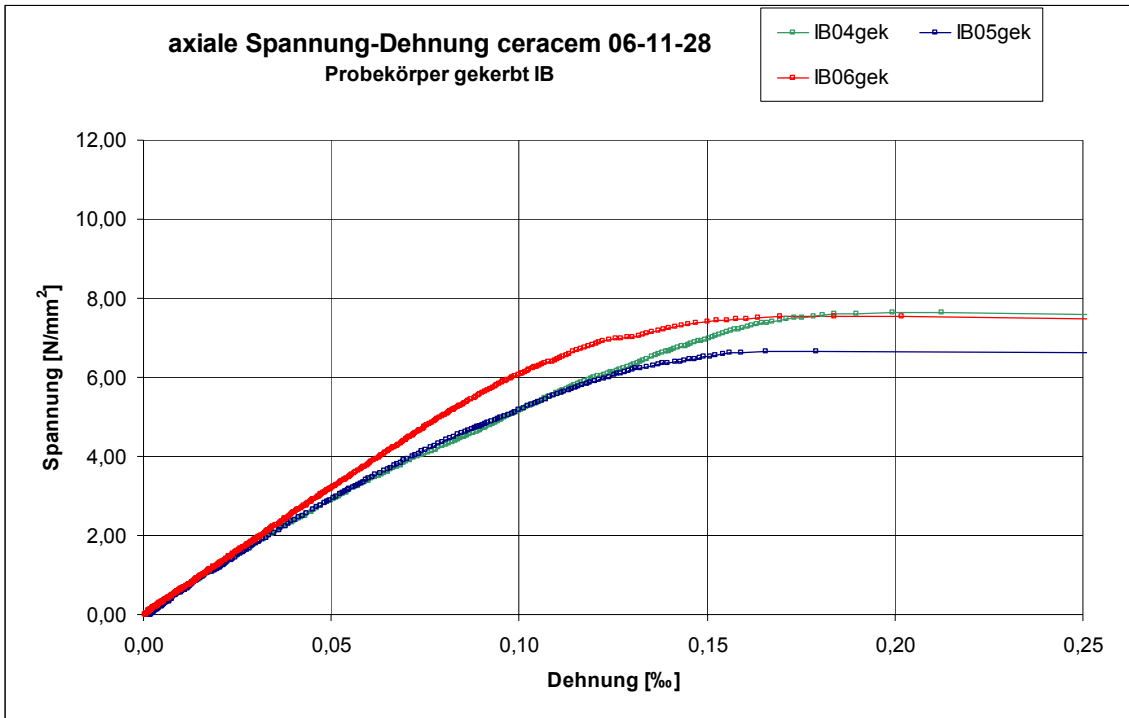


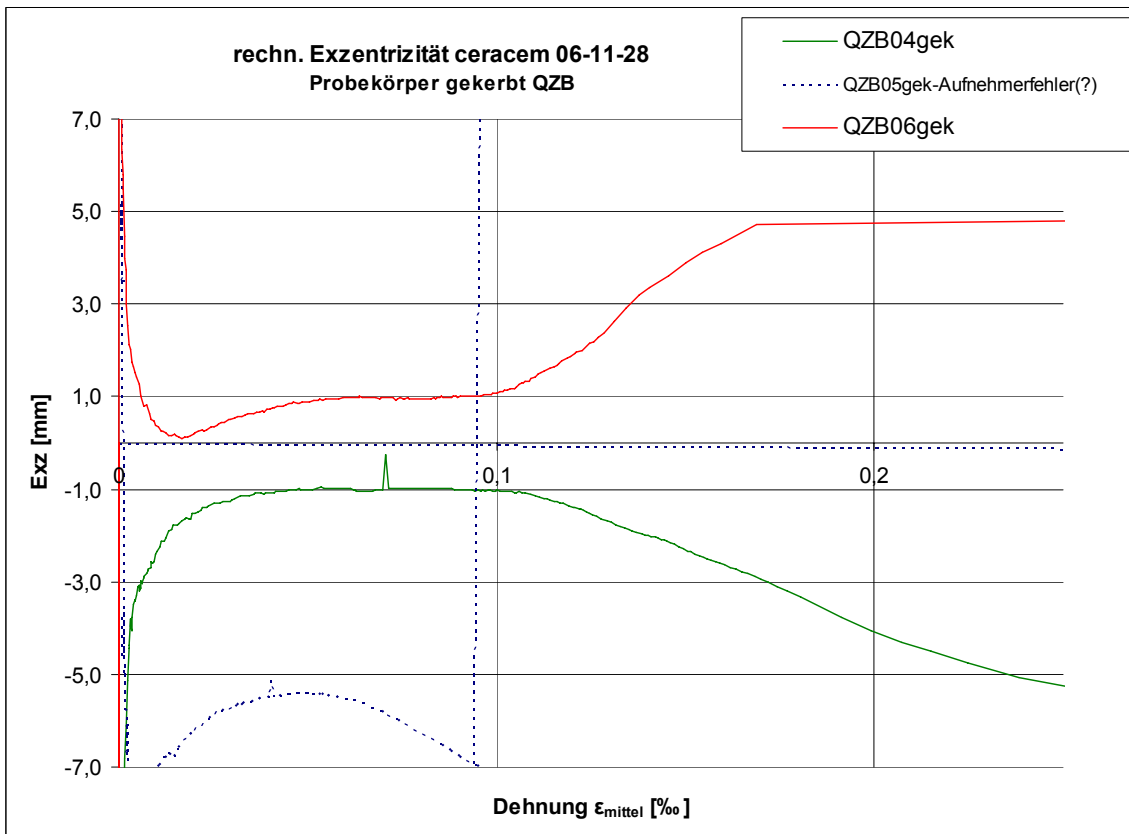
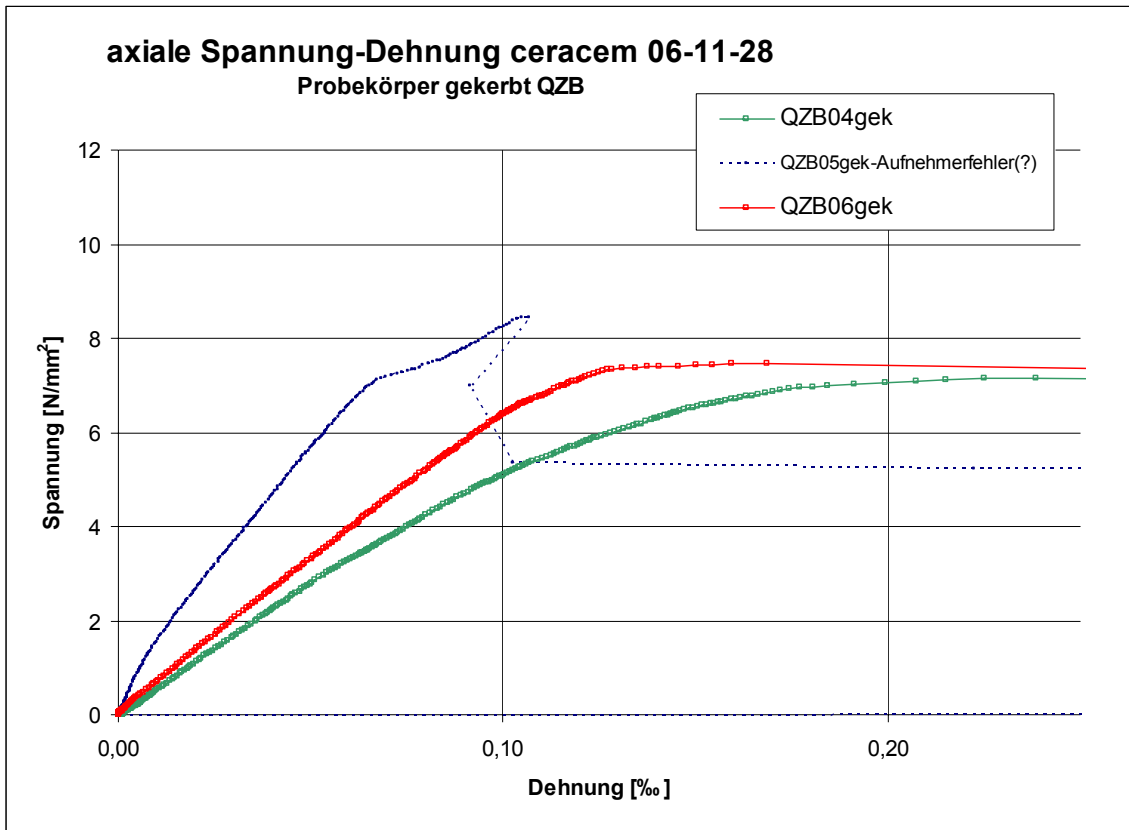




**gekerbte Proben**







## 9 Schlussfolgerungen

Der verwendete Versuchsaufbau ist geeignet, um die Zugfestigkeit und das Nachrissverhalten von UHPC mit Stahlfasern zu ermitteln. Die maximale Zugspannung, die unter Belastung erreicht werden kann bevor ein sichtbarer Riss auftritt, lässt sich an ungekerbten Proben prüfen. Das Zugtragverhalten des UHPFRC nach einem Riss lässt sich an gekerbten Proben zeigen. Eine Spannungs- Dehnungslinie bzw. Spannungs-Rissöffnungsbeziehung für UHPC mit Stahlfasern kann erhalten werden, wenn die Ergebnisse von ungekerbten Proben für den Bereich vor einem Riss mit den Ergebnissen an gekerbten Proben für den Bereich nach einem sichtbaren Riss zusammengesetzt werden.

Durch die Messung der Dehnungen an drei Stellen des Probenzylinderumfangs können sowohl die axiale Dehnung als auch Randdehnungen genau bestimmt werden. Damit lässt sich der Einfluss der praktisch unvermeidlichen Ausmittigkeiten des Versuchsaufbaues quantifizieren und zum Teil eliminieren. Neben der axialen Spannung ist auch eine Randzugspannung errechenbar. Im ersten Abschnitt, das ist der Bereich bis zum Auftreten eines sichtbaren Risses, lässt sich die Spannungs-Dehnungslinie für die maximale Randspannung und maximale Randdehnung ermitteln. Nach dem Riss der Betonmatrix können nur die axiale Zugspannung und zugehörige Dehnung zuverlässig angegeben werden.

Der Mittelwert der Zugfestigkeit (vor einem sichtbaren Riss) von 6 ungekerbten Bohrkernen mit einem Prüfalter von 93 Tagen beträgt  $8,8 \text{ N/mm}^2$  in der Versuchsachse und  $10,0 \text{ N/mm}^2$  an der Stelle mit maximaler Dehnung<sup>7</sup>. Die Arbeitslinien zeigen für die Proben mit einem Fasergehalt von 2 Vol % einen Abfall der Zugtragfähigkeit nach der Ausbildung eines Makrorisses („langsam entfestigendes Verhalten“). Der Mittelwert der axialen Zugspannung von 6 gekerbten Proben beträgt  $4,7 \text{ N/mm}^2$  bei einer Rissöffnung von 0,3 mm.

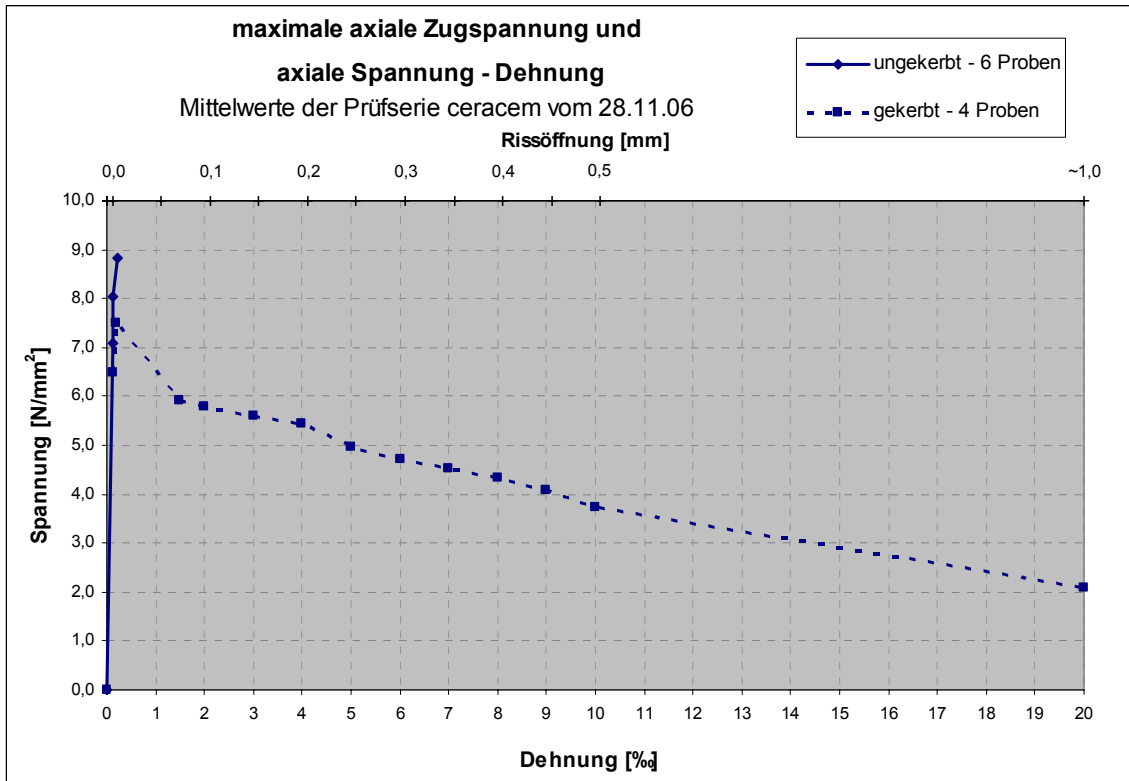
Eine Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften wurde im hier beschriebenen Fall nicht festgestellt. Die Fasern orientierten sich beim verwendeten Beton mit seiner zähflüssigen Konsistenz offenbar nicht bevorzugt in einer bestimmten Richtung in den Prismen.

Eine Qualitätsüberwachung des Zugtragverhaltens innovativer Betonbauteile aus UHPC ist auf einfache Weise möglich, der Einfluss des Fasergehalts kann geprüft werden.

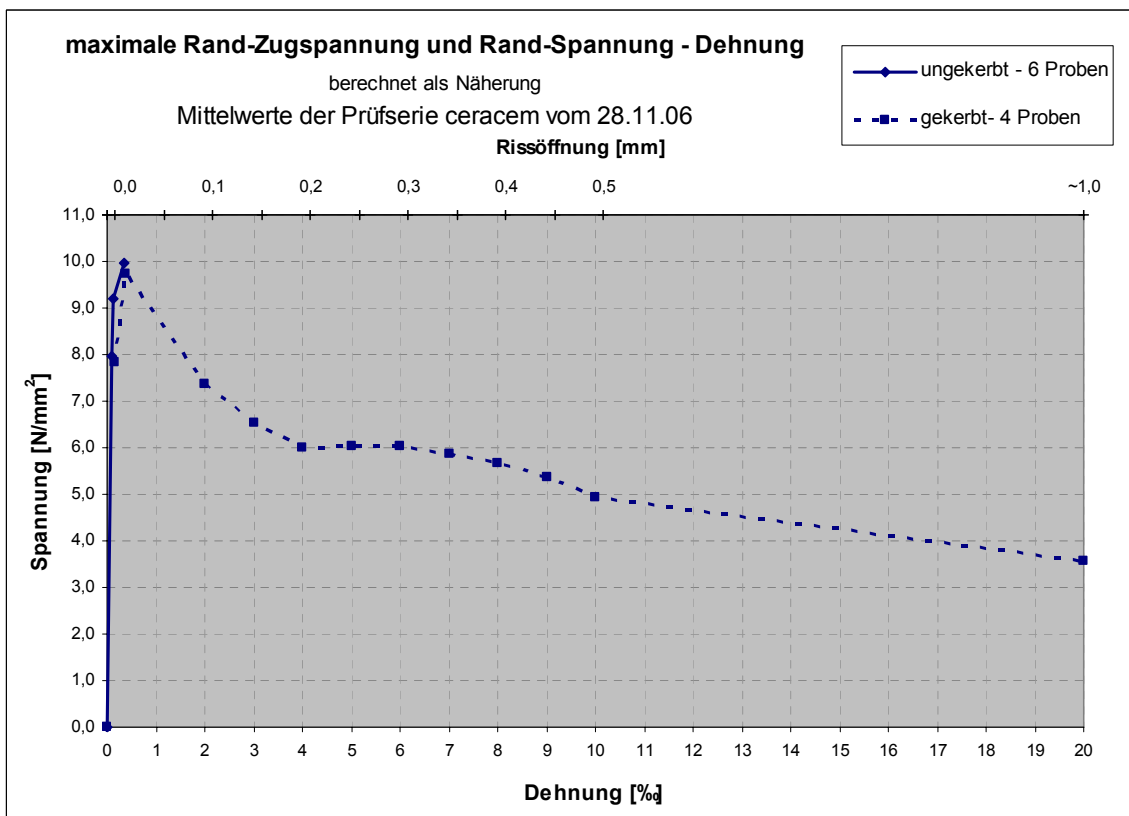
---

<sup>7</sup> Am Datenblatt für „Sika ceracem BFM Millau“ wird ein Mittelwert von  $8 \text{ N/mm}^2$  für die direkte, zentrische Zugfestigkeit nach 28 Tagen am Bohrkern (L=100, D=74 mm) angegeben.

Zusammengesetzte Arbeitslinie, axial



Zusammengesetzte Arbeitslinie, Randspannungen (grobe Näherung nach der Rissöffnung)



## 10 Anhang 1: Protokoll der Vorversuche

an den Proben vom 03.11.2005

### Inhalt

1	Allgemeines .....	31
2	Probekörper .....	31
3	Prüfungen .....	31
4	Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse .....	32
5	Diagramme .....	33
6	Fotos.....	36
7	Schlussfolgerung .....	37

## Allgemeines

Projekt: Zugprüfungen begleitend zum Forschungsvorhaben „Die Entwicklung von punktgestützten Flachdecken aus Fertigteilen“

Zeit: Dezember 2005 u Feb. 2006

Ort: **LKI Graz**

## Probekörper

- Material: UHPC Sika „ceracem“
- Betongage von 1 Prisma 10/10/40 cm mit 2,5 Vol % ( $195 \text{ kg/m}^3$ ) Stahlfasern bei Fa. Katzenberger am 3.11.2005 laut Rezept<sup>8</sup>.
- 3 Wochen Wasserlagerung im Labor, dann Bohren von 12 Bohrkernen BK am 23.11.2005  
6 Stk. „IB“...gebohrt in Betonierichtung = senkrecht zur Aufstandsfläche der Prismenform  
6 Stk „QZB“ gebohrt quer zur Betonierichtung = parallel zur Aufstandsfläche  
Bohrkerne DM 45,7 mm , h= 100 mm, Bohransatz krumm
- 6 von 12 BK: rundum in der Zylindermitte durch Sägeeinschnitt gekerbt, Kerbtiefe ca. 4 mm
- Luftlagerung im LKI (Raumtemperatur) bis zum Tag der Prüfung

Es wird angenommen, dass sich die Fasern im Prisma bevorzugt liegend orientieren.

## Prüfungen

### 05.12.2005, 32. Tag nach Herstellung, erweitertes Haftzugprüfgerät („proceq Dyna“/25 kN)

4 Zylinder: IB01 gekerbt; IB02, IB03, IB04 ungekerbt

IB 2 bis IB 4 ,  $A = 1640,3 \text{ mm}^2$

1 Zylinder mit Kerbe: IB 1, Kerbtiefe im Mittel:  $(4,9+4+4)/3 = 4,3 \text{ mm}$ ,  $D_{\text{Rest}} = 37,1 \text{ mm}$   
 $A_{\text{Rest}} = 1081,0 \text{ mm}^2$

### 21.12.2005, großes Prüfmaschinenengerüst am LKI (Zylinder mit 250 kN)

2 Zylinder: QZB01 ungekerbt; QZB05 gekerbt – *Tests des Steifigkeitseinflusses!*

### 23.01.2006, 81. Tag nach Herstellung, erweitertes Haftzugprüfgerät („proceq Dyna“)

6 Zylinder: IB06, QZB06 ungekerbt

QZB02, QZB03, QZB04 und IB05 gekerbt

*Es wurden verschiedene Arten der Weg- bzw. Lastaufbringung getestet: Variation der Geschwindigkeiten, Pausen (Stillstand) und wechselnd Be- und Entlastung (siehe Grafiken)!*

---

<sup>8</sup> Vgl. Prüfbericht A 431.2/2005 des Laboratorium f. Betontechnologie und Bodenprüfung der Firma Alpine Mayreder Bau GmbH, Graz. Der UHPFRC „ceracem“ wurde vom Laboratorium im Werk der Firma Katzenberger geprüft.

Rezeptur: Premix ceracem – BFM Millau:  $2355 \text{ kg/m}^3$ ,

Fließmittel Sika Viskocrete 5-400F:  $44,6 \text{ kg/m}^3$

Stahlfasern IFT baseloc :  $195 \text{ kg/m}^3$ , laut Rezept, keine Nachprüfung am Frischbeton:

Wasser :  $195 \text{ kg/m}^3$

Konsistenz des Frischbetons mit Fasern: Fließmaß =50 cm (ÖNORM B 3303, Richtlinie SCC)

## Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse

### Ungekerbte Proben

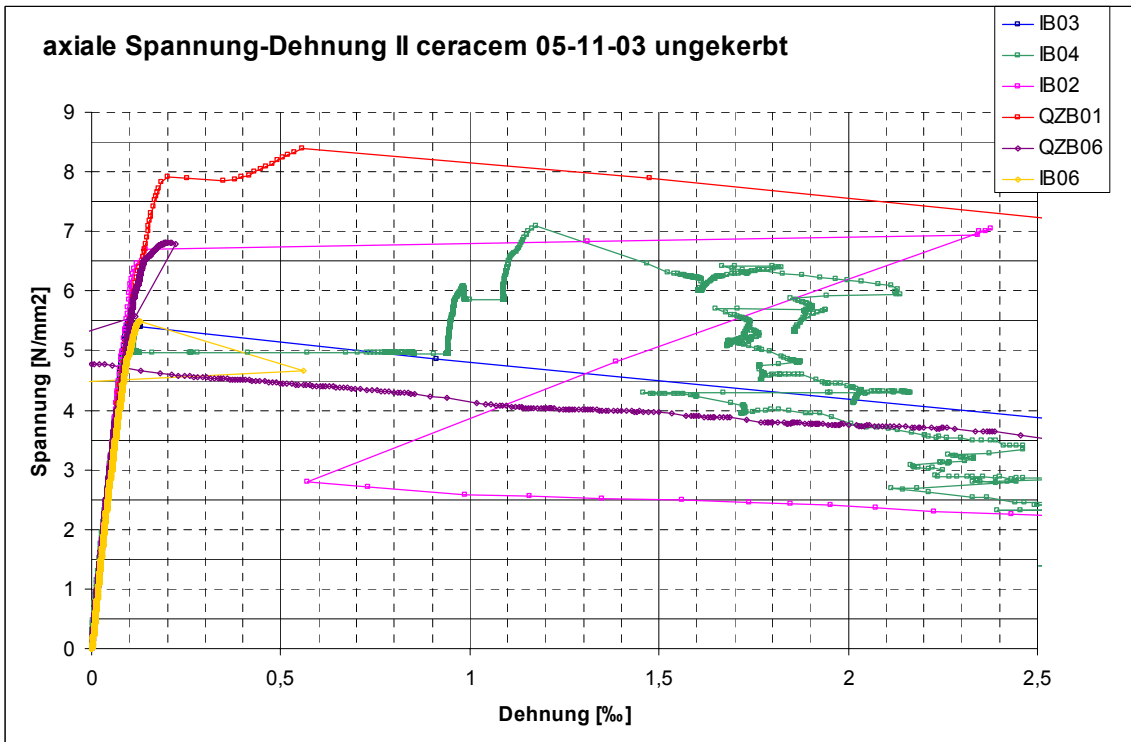
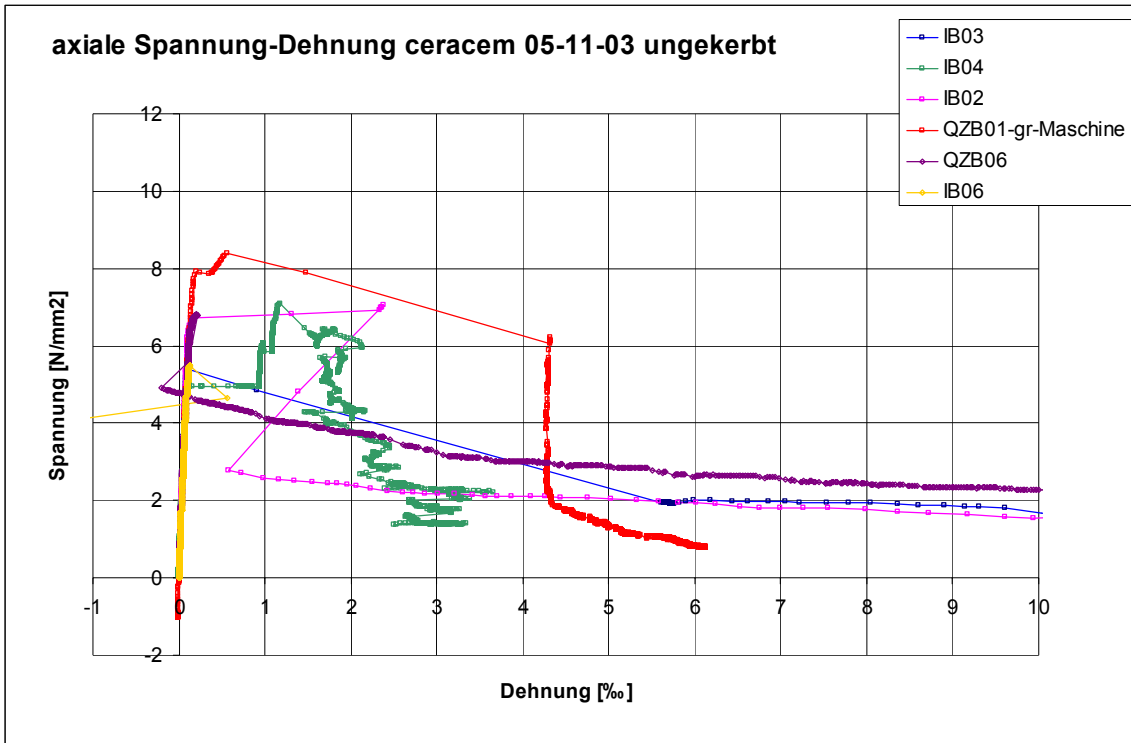
<b>Zugfestigkeiten</b>					
		<b>Sigma axial</b>	<b>Exzentrizität</b> vor	<b>Sigma max'</b>	Sigma max'
		N/mm <sup>2</sup>	Ende Linearität	N/mm <sup>2</sup>	initialer Riss
		F/A	aus Diagramm	Max. Randspannung	Matrixfestigkeit Randspannung
QZB01	große Maschine	8,40	1,8	10,19	9,20
QZB06		6,80	1,0	13,73	12,89
<b>Mittelwert</b>					
<b>2 QZB</b>	<b>ungekerbt</b>	<b>7,60</b>	<b>1,4</b>	<b>11,96</b>	<b>11,05</b>
IB06		5,49	2,5	9,54	7,78
IB04		7,09	2,0	5,47	4,96
IB03		5,47	1,6	7,34	6,87
IB02		7,05	0,8	10,08	6,11
<b>Mittelwert</b>					
<b>3 IB</b>	<b>ungekerbt</b>	<b>6,01</b>	<b>1,6</b>	<b>8,99</b>	<b>6,92</b>

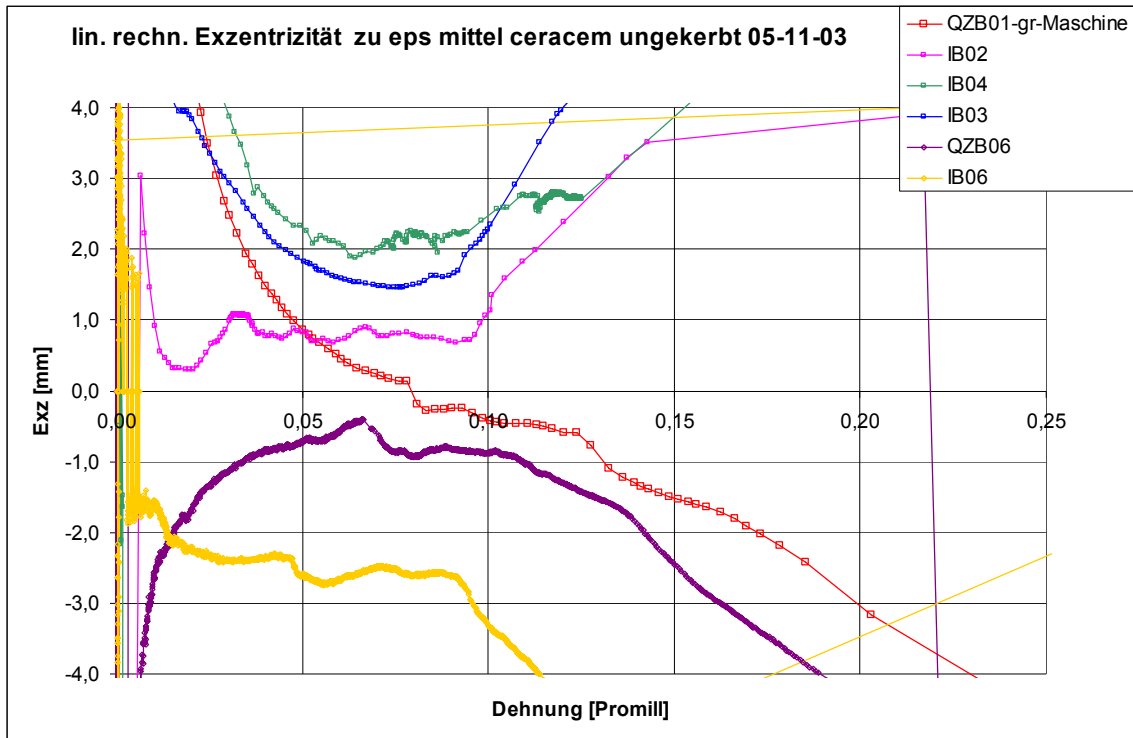
### Gekerbte Proben

		<b>Sigma axial</b>	<b>zugehörige</b>	<b>Exzentrizität</b>	<b>Sigma axial</b>	<b>zugehörige</b>
Alle Werte aus Diagrammen		Maximum vor	<b>Dehnung</b>	vor	Maximum	<b>Dehnung</b>
		Makroriss		Ende	nach	
		N/mm <sup>2</sup>	%	Linearität	Makroriss	
		F/A	axial		F/A	axial
I01		7,4	0,18	1,0	7,5	1,7
IB05		6,8	0,18	1,1	4,8	2,0
<b>Mittelwert</b>						
<b>2 IB</b>	<b>gekerbt</b>	<b>7,10</b>	<b>0,18</b>	<b>1,05</b>	<b>6,15</b>	<b>1,85</b>
QZB02		7,0	0,21	1,5	7,3	4,8
QZB03		8,0	0,35	1,5	7,5	3,0
QZB04		8,5	0,3	2,1	9,3	gesprungen
QZB05	große Maschine	5,6 (?)	0,35 (?)	6,5 (?)	7,3	2,8
<b>Mittelwert</b>						
<b>3 QZB</b>	<b>gekerbt</b>	<b>7,83</b>	<b>0,29</b>	<b>1,7</b>	<b>8,03</b>	<b>(3,9)</b>

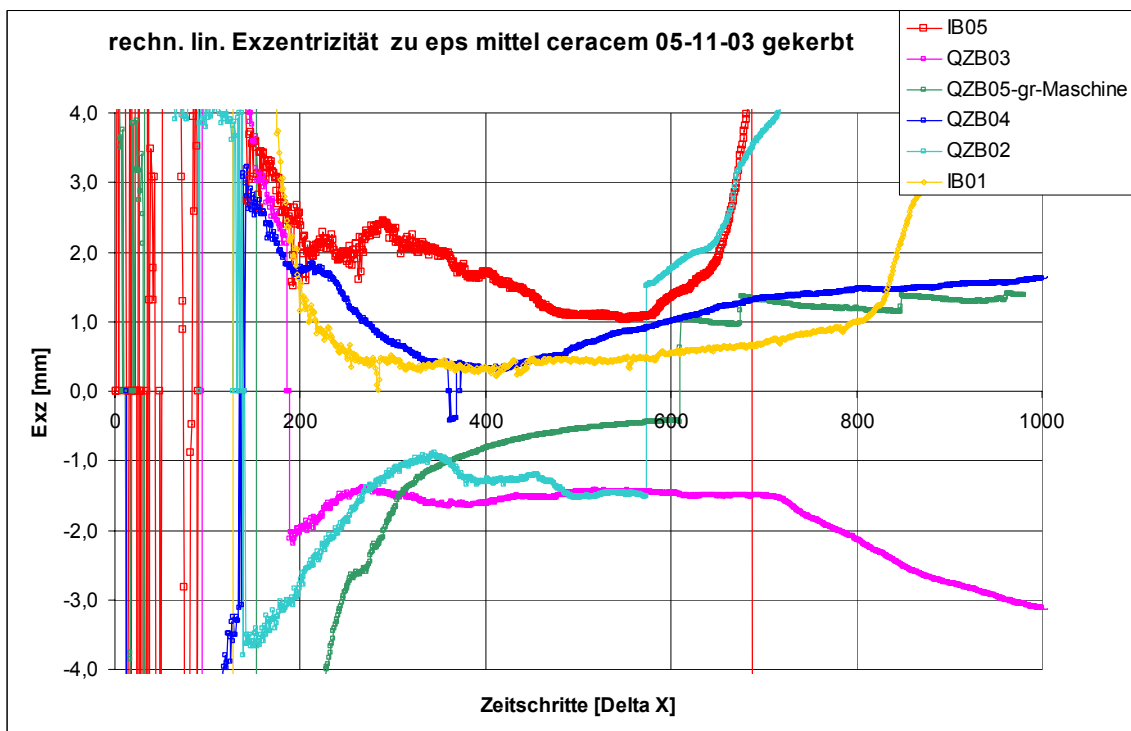
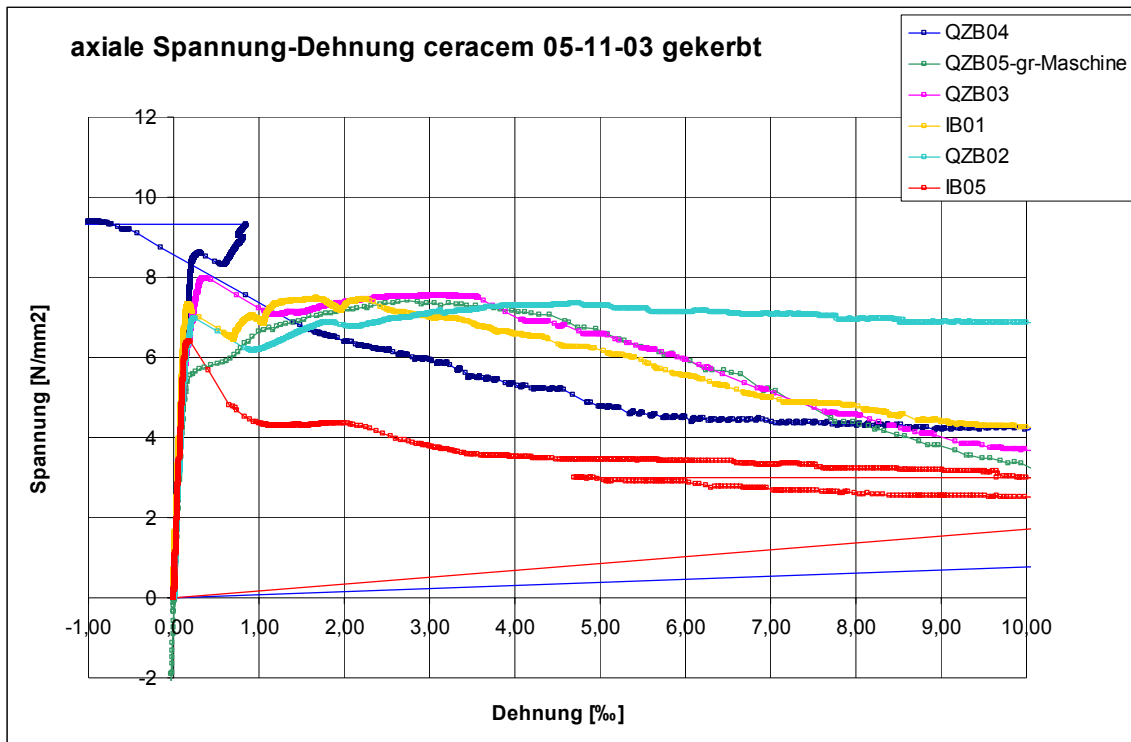
**Diagramme**

**Ungekerbte Proben**





### Gekerbte Proben



## Fotos

### Handbetriebenes Gerät:



Versuchsaufbau



Detail



Bohrkern vor Bearbeitung



Gekerbte Bohrkern

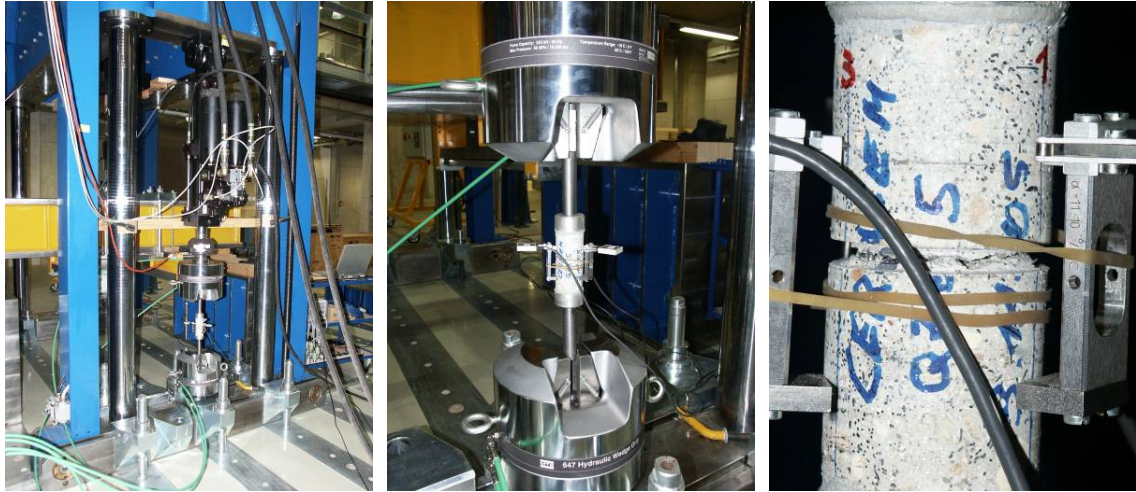


Rissdetail, ungekerbter Probekörper



Nach dem Riss

### Große Maschine:



Prüfgerüst

Eingespannter Probekörper

Probekörper nach Riss

### Schlussfolgerung

Mit einem Fasergehalt von 2,5 Vol% zeigt sich bei 4 von 6 gekerbten Proben ein verfestigendes Verhalten nach dem Riss der Betonsteinmatrix bei Faserauszug bis etwa 3 % (Rissöffnung 0,15 mm)

### Unterschiede große Maschine (Prüfgerüst LKI) – kleine Maschine (handbetriebenes Gerät):

Gr. Maschine: Querkrafteinfluss (Einspannung) gegeben, keine sprunghafte Dehnungszunahme mit „snap back“ (Krafrückgang) wie bei kleiner Maschine (handbetriebenes Gerät); Faserauszug kontinuierlich

Kleine Maschine: bei Rissbildung sprunghafte Dehnung und „Nachfedern“= kurzer Spannungsabfall –snap back; aufnehmbare Kraft steigt bei entsprechendem Fasergehalt (2,5 %) wieder an.

## 11 Anhang 2: Zugversuche an Bohrkernen nach den Durchstanzversuchen

### Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	38
2	Allgemeines .....	38
3	Probekörper .....	38
4	Prüfungen .....	39
5	Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse .....	39
6	Diagramme .....	40
7	Fotos Versuchsaufbau und Probekörper .....	42
8	Schlussfolgerung .....	44

#### Einleitung

Mit dem im Hauptteil des Forschungsberichts 2006-01 „Zug- Spannungs- Dehnungslinie von UHPFRC“ beschriebenen Verfahren werden im Baulabor der FH Kärnten weitere Bohrkerngeprüft. Die Kerne stammen aus den in Großversuchen zerstörend getesteten Durchstanzpilzen aus ultrahochfestem und hochfestem Beton. Die Probekörper werden gekerbt, um das Nachrissverhalten und damit die Duktilität der Betone testen zu können.

#### Allgemeines

Projekt: Zugprüfungen begleitend zum Forschungsvorhaben „Die Entwicklung von punktgestützten Flachdecken aus Fertigteilen“ (kurz „Durchstanzpilze“)

Prüfdatum: 25.06.2007

Ort: **Baulabor, FH Kärnten**

#### Probekörper

Es werden Bohrkernge mit DM 50 mm und einer Höhe von etwa 100 mm aus den Versuchskörpern der Durchstanzpilze nach deren Prüfung im Labor für konstruktiven Ingenieurbau entnommen und an die FH Kärnten geliefert.

- Materialien: UHPC (ultrahochfester Beton Sika „ceracem“), HPC (hochfester Beton)

Über Details der Materialzusammensetzung und Materialeigenschaften liegen keine Angaben vor.

- Lagerung: die Bohrkernge wurden trocken an Raumluft gelagert
- Alter der Betone: keine genauen Angaben (mehrere Monate)
- Probekörperbearbeitung: Die Bohrkernge wurden mittig mit einer rundum laufenden Kerbe versehen. Adapterstücke aus Aluminium wurden mit Epoxidharzkleber aufgeklebt.

Probekörper		DM	Höhe	Kerbtiefe	Querschnittsflächen $A_{\text{ungekerbt}}/A_{\text{Kerbe}}$	Kerbbreite
Material	Bezeichnung	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	mm
UHPC	P24/3	50,1	ca.	-	1971/ Bruch nicht in Kerbe	
UHPC	P27/4	50,4	100	3,3	1995/1511	4,4
UHPC	P27/5	50,3		3,6	1987/1456	
HPC	P13/1	50,1	ca.	3,4	1971/1477	4,4
HPC	P13/2	50,3	100	-	1987/Bruch nicht in Kerbe	

### Prüfungen

Die Prüfungen werden mit einem erweiterten Haftzugprüfgerät („proceq Dyna“/25 kN) und Dehnungsaufnehmern (HBM DD1/  $\pm 1 - 2500 \mu\text{m}$  Weg) durchgeführt (siehe Hauptteil des Forschungsberichts 2006-01).

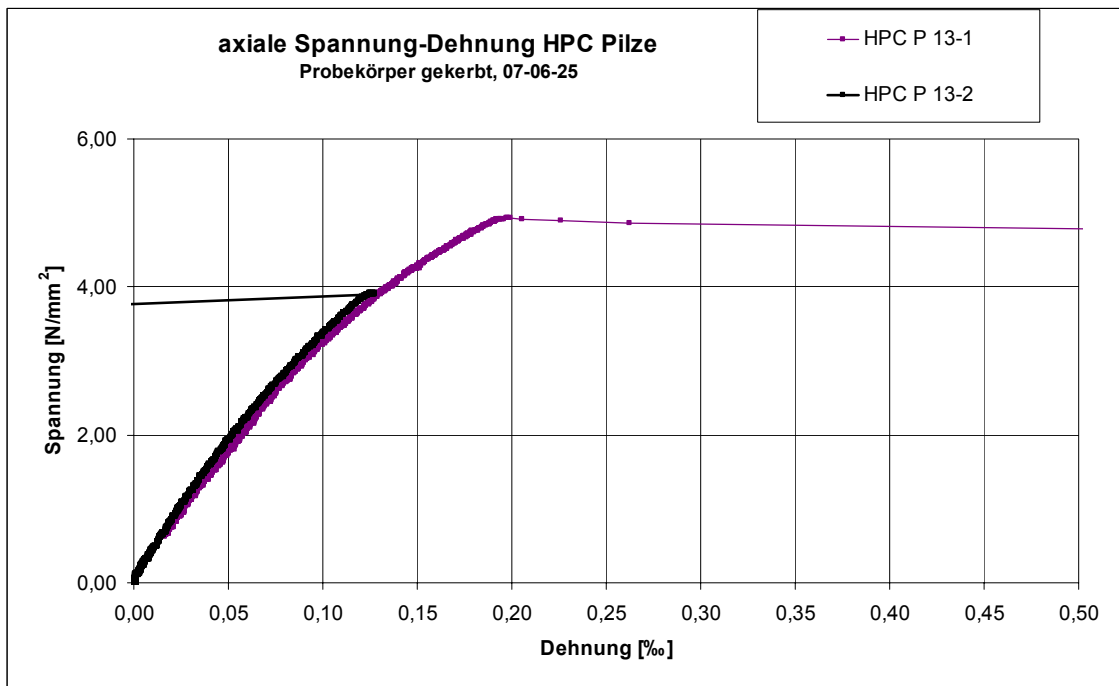
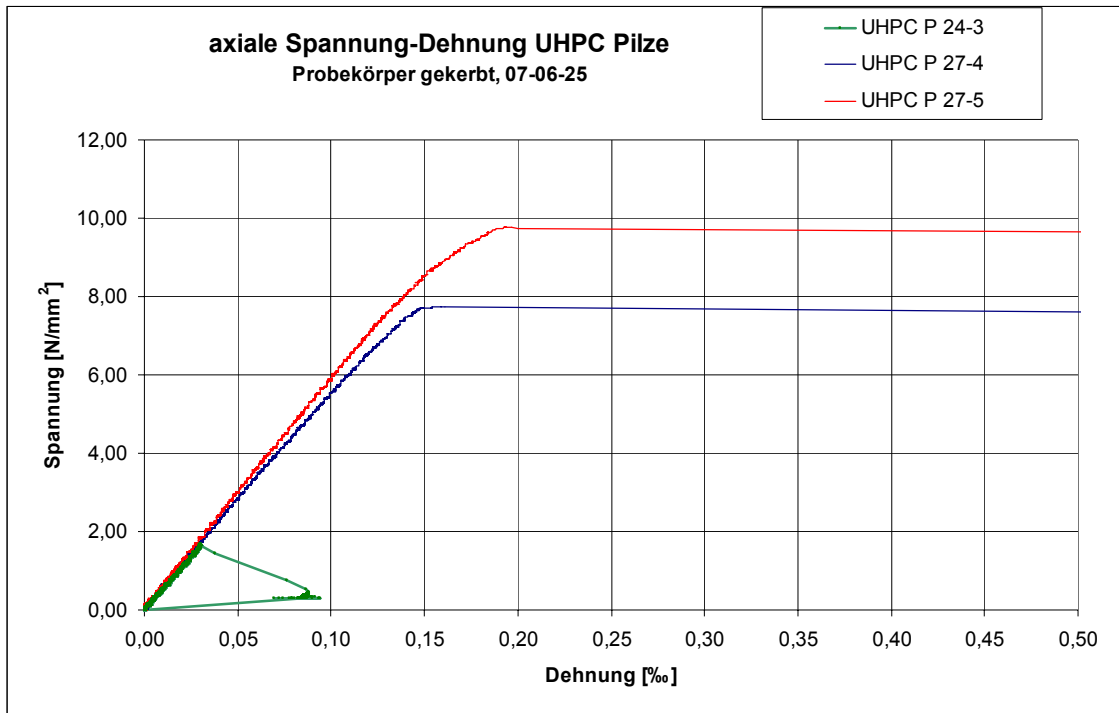
### Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse

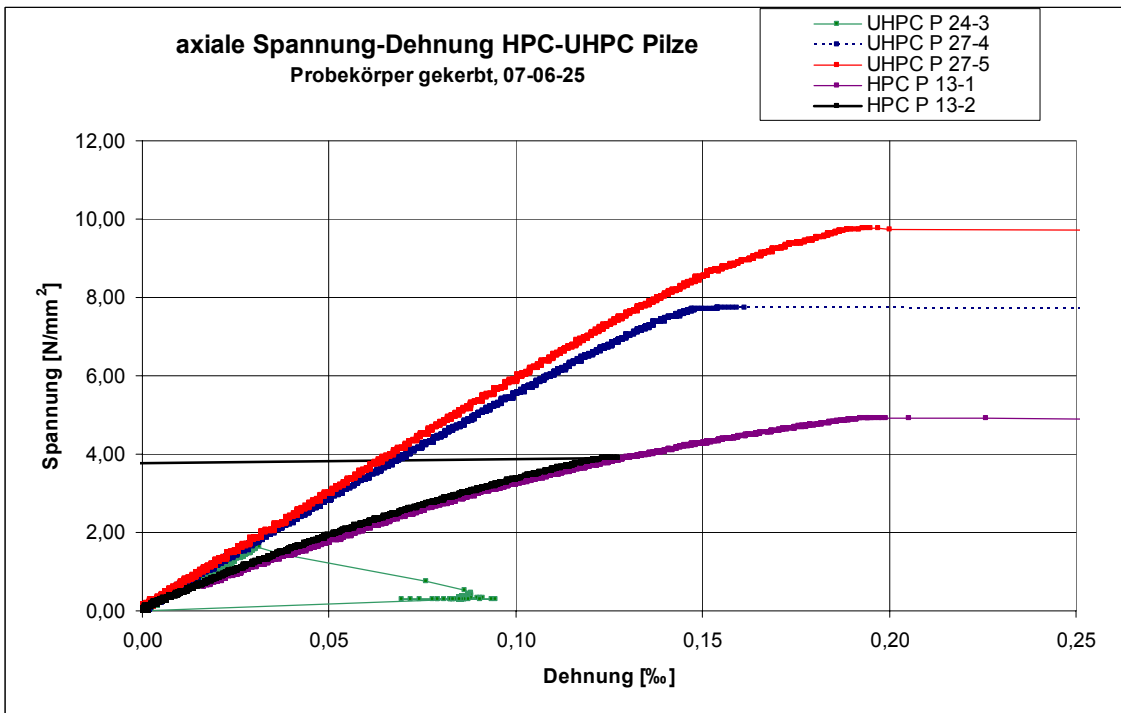
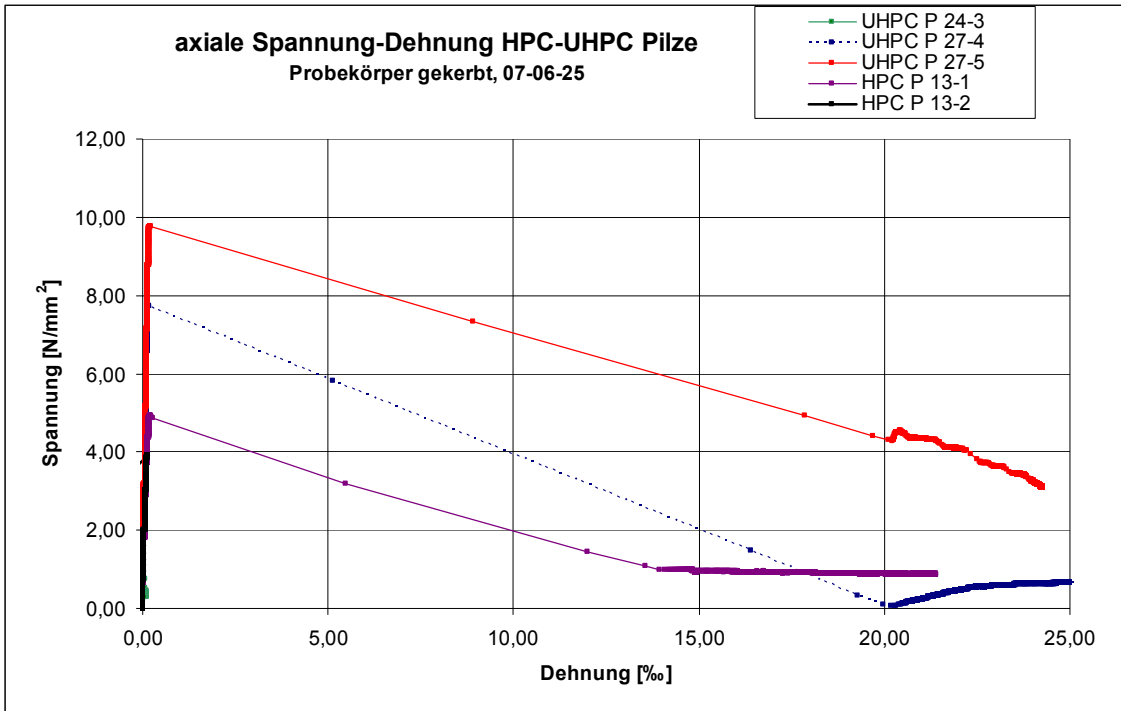
#### Gekerbte Proben

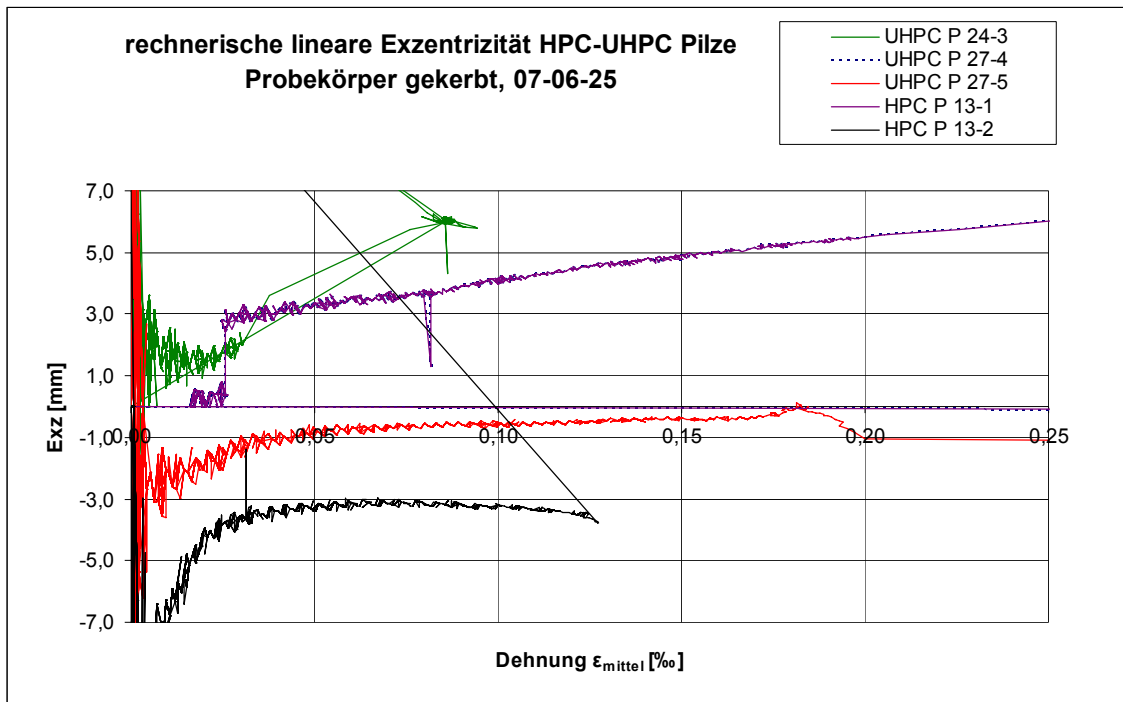
		Sigma axial Maximum bei Makroriss	zugehörige Dehnung	Exzentrizität bei Ende Linearität vor Riss	Sekanten - E-Modul bei fct/3	Nachriss- tragfähigkeit
Probekörper		N/mm <sup>2</sup>	‰	mm	N/mm <sup>2</sup>	
		F/A	axial	axial		
UHPC	P24/3	4,66	0,03	-	54564 (bei Bruch)	verfrühter Bruch, nicht in Kerbe
UHPC	P27/4	7,73	0,16	0,4	57685	nicht festgestellt
UHPC	P27/5	9,76	0,20	0,4		gering
<b>Mittelwert</b>		<b>8,75</b>				
HPC	P13/1	4,93	0,20	3,0 - 5,5 (bei Makro-Riss)	34386	sehr gering
HPC	P13/2	3,91	0,13	3,1	41904	nicht festgestellt, Bruch nicht in Kerbe
<b>Mittelwert</b>		<b>4,42</b>				

**Diagramme**

**Gekerbte Proben**







**Fotos Versuchsaufbau und Probekörper**



**Veruschsaufbau**



**Prüfkörper mit Dehnungsaufnehmern**



4 Probekörper vor dem Versuch



Detail gerissener Probekörper



HPC Prüfkörper



UHPC Prüfkörper P 24/3



UHPC P 27/4 und P 27/5



UHPC P 27/4 und P 27/5

### Schlussfolgerung

Die Proben brechen schlagartig und spröde. Bei keiner Probe ist eine nennenswerte Nachrisstragfähigkeit feststellbar. Zwei Proben (UHPC P24/3, HPC P13/1) brechen nicht in der Kerbe, sondern im vollen Querschnitt nahe den Adapterstücken. Aufgrund des sehr niedrigen Prüfwertes bei Probe UHPC P24/3 muss von einer Vorschädigung ausgegangen werden. Für allgemeingültige Schlussfolgerungen ist allerdings die Anzahl der Proben zu gering und die Streuung der Ergebnisse zu hoch.

Anmerkung: Die Nachrisstragfähigkeit hängt von Faserart, -gehalt und -orientierung ab. Auch die Homogenität der Betonmatrix (Entmischung, Sedimentation) und der Verbund zwischen Matrix und Faser hat Einfluss.

Um den Einfluss des Fasergehalts zu überprüfen, werden die Fasern, die aus den beiden Bruchflächen der halben Bohrkerne heraus stehen, abgezählt. Es ergeben sich keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Bohrkerne vom 28.11., die eine ausgeprägtere Nachrisstragfähigkeit aufweisen, zu den Bohrkerne der Pilze. Die Bohrkerne vom 3.11. allerdings zeigen eine höhere Faserzahl als die andern Serien und eine noch größere Nachrisstragfähigkeit. Somit scheint der Fasergehalt hier nicht der entscheidende Faktor für die Unterschiede zwischen der „Pilze – Serie“ und der Serie vom 3.11.

### **Faserzählung an den Bruchflächen**

Probekörper		Fasern, je Bruchfläche		
Material	Bezeichnung	Bruchfläche 1/2 [Stk.]	im Mittel [Stk.]	Anmerkung
BK aus den „Pilzen“, gekerbt				
UHPC	P24/3	53/19	(36)	nicht in Kerbe gebrochen, A >
UHPC	P27/4	47/20	34	--
UHPC	P27/5	44/55	30	--
HPC	P13/1	7/9	8	--
HPC	P13/2	5	5	nicht in Kerbe gebrochen, Fasern abgerissen
BK Serie 06-11-28 vom 28.11.2005				
UHPC gekerbt	QZB4	28/32	30	inhomogen
UHPC gekerbt	IB04	24/20	22	inhomogen. schräger Bruch
BK Serie 05-11-03 vom 03.11.2005				
UHPC gekerbt	IB05	62/65	64	schräger Bruch tlw. außer Kerbe
UHPC gekerbt	QZB02	70/72	71	--
UHPC gekerbt	QZB05	33/44	39	--
Legende:	A > ... voller Querschnitt ohne Kerbe, um ca. 47 % größer als A mit Kerbe		Die Angaben [Stk.] Fasern beziehen sich demnach auf unterschiedlich große Flächen	