

---

# DER PLATTENVERSUCH NACH ÖNORM EN 14488-5 VERSUCH UND NUMERISCHE BERECHNUNG

---

## **THE SLAB TEST ACCORDING TO OENORM EN 14488-5 TEST AND NUMERICAL CALCULATIONS**

Dipl.-Ing. Dr.mont. Gerhard **Pittino**, Montanuniversität Leoben, Österreich  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Robert **Galler**, Montanuniversität Leoben, Österreich

Der faserbewerte Spritzbeton findet in der Geotechnik ein immer breiteres Anwendungsgebiet. Der Plattenversuch nach ÖNORM EN 14488-5 dient gemäß der ÖVBB-Richtlinie Spritzbeton zur Einteilung von Faserspritzbeton in sogenannte Energieabsorptionsklassen. Die Norm gibt für die Versuchsdurchführung, das Versuchsequipment und den Prüfkörper Sollwerte mit Toleranzen an. Speziell der Prüfkörper wird hinsichtlich Abmessungen nicht immer normkonform hergestellt. Die Prüfkörperherstellung und Lieferung an das Prüflabor sind mit erheblichem Aufwand verbunden und so stellt sich die Frage nach der Verwendbarkeit der nicht normkonformen Prüfkörper. Ein umfangreiches Untersuchungsprogramm zur Klärung dieser Fragestellung und zur Abschätzung weiterer Einflüsse auf das Versuchsergebnis wurde gestartet und ist im Laufen. Da Versuche immer mit Imperfektionen verbunden sind, wurden numerische Simulationen durchgeführt, in denen diese Imperfektionen ausgeschaltet bzw. gezielt untersucht werden können. Der Plattenversuch und seine numerische Modellierung mittels Finite-Differenzen Programms Flac<sup>3D</sup> werden im Folgenden vorgestellt.

*Fiber reinforced shotcrete is increasingly used in geotechnics. According to the ÖVBB guideline shotcrete the slab test serves for the categorization of fiber reinforced shotcrete in accordance with ÖNORM EN 14488-5 in so-called energy absorption classes. The standard regulates the set points and tolerances for the test procedure, the test equipment and the specimen. The specimen is not always produced in conformity with the standard, especially with regard to its dimensions. The specimen production and delivery to the testing laboratory is connected with considerable effort, so the question about the usability of the "deformed" test bodies arises. An extensive examination program for the clarification of this question and for the estimation of further influences on the test result was started. Numerical analyses were carried out because tests are always connected to imperfections. Imperfections can be turned off or can be examined specifically in these analyses. The slab test and its numeric modeling by means of the program Flac<sup>3D</sup> are introduced in the following.*

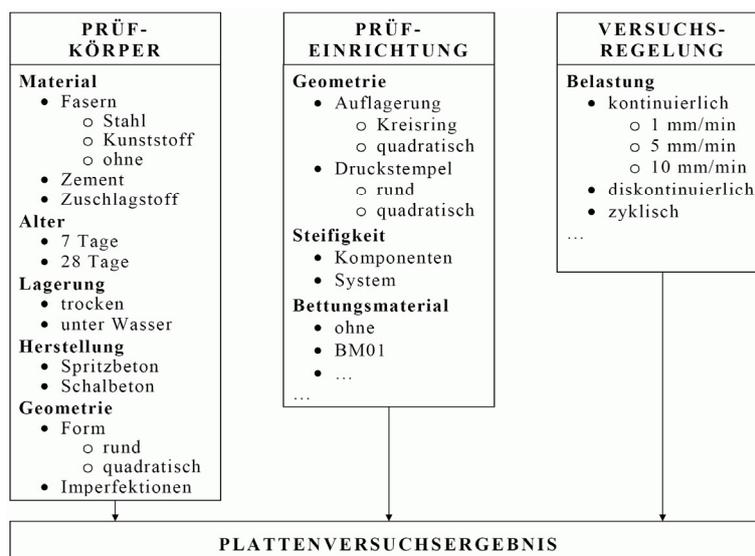
### **1. Einleitung**

Die Einteilung von mit Stahl- oder Kunststofffasern bewehrtem Spritzbeton erfolgt nach ÖVBB-Richtlinie Spritzbeton [1], Ausgabe 12/2009, in sogenannte Energieabsorptionsklassen, wobei die Energieabsorption nach ÖNORM EN 14488-5 [2], Ausgabe 2006, mit Hilfe des Plattenversuchs bestimmt wird. Dabei wird eine umfangsgelagerte, 10 cm dicke und quadratische Spritzbetonplatte mit 60 cm Seitenlänge im Alter von 7 Tagen über einen mittig an der Oberseite angeordneten Prüfstempel verformt. Der Versuch wird weggeregelt mit einer Verschiebungsgeschwindigkeit von 1 mm pro Minute gefahren, bis das Plattenzentrum sich 30 mm durchgebogen hat. Die Auswertung der Absorptionsenergie erfolgt über jene Arbeit, die für eine Durchbiegung von 25 mm aufzubringen ist.

Laut ÖNORM EN 14488-5 [2] sind folgende Erfordernisse und Toleranzen einzuhalten:

- a) Die Steifigkeit des Belastungssystems, einschließlich Prüfrahmen, Kraftmessdose, Prüfstempel und Unterbau, muss mindestens 200 kN/mm betragen. Für die Durchbiegungsmessung ist ein kalibrierter elektronischer Wegaufnehmer mit einer Auflösung von mindestens 0,02 mm zu verwenden, wobei die Datenaufzeichnung elektronisch oder mittels XY-Plotter erfolgen muss.
- b) Der Prüfplatten-Auflagerrahmen muss aus starren, quadratischen Vierkantstäben bestehen, mit 20 mm ± 1 mm Seitenlänge.
- c) An der Plattenoberseite muss ein starrer, quadratischer Prüfstempel aus Stahl, mit 100 mm ± 1 mm Seitenlänge und 20 mm ± 1 mm Höhe, zentrisch angeordnet werden.
- d) Ein geeignetes, steifes Bettungsmaterial, z.B. aus Mörtel oder Gips, ist sowohl zwischen Prüfkörper und Prüfstempel als auch zwischen Prüfkörper und Auflagerahmen anzuordnen.
- e) Der quadratische Prüfkörper ist aus einer in eine Schalung gespritzten Platte mit 600 mm Seitenlänge herauszuschneiden und muss unmittelbar nach dem Spritzen auf eine Dicke von 100 mm + 5 mm gebracht werden.
- f) Die Belastung erfolgt weggeregelt mit einer konstanten Durchbiegungsgeschwindigkeit von 1 mm/min ± 0,1 mm/min.
- g) Im Prüfbericht sind unter anderem vom Prüfkörper die Kantenlängen und die mittlere Dicke im Lasteinleitungsbereich mit einer „Genauigkeit“ von 1 mm sowie das Energieabsorptionsvermögen auf 10 Joule anzugeben.
- h) Jede Abweichung von der Normvorgabe ist zu dokumentieren.

Werden nun nicht normkonforme Prüfkörper an das Prüflabor gesendet, so ist dies also im Prüfbericht zu dokumentieren. Befindet sich der Auftraggeber gerade in der Entwicklungsphase einer neuen Spritzbetonrezeptur [3], wäre die Aussage für ihn hilfreich, ob er mit einem normkonformen Prüfkörper die erforderliche Energieabsorptionsklasse erreicht hätte. Diese Fragestellung initiierte ein umfangreiches Untersuchungsprogramm, mit dem Ziel, die wesentlichen Einflüsse (Bild 1) auf das Versuchsergebnis zu erkennen und quantifizieren zu können.



*Bild 1: Einflüsse auf das Plattenversuchsergebnis, die im laufenden Forschungsprogramm untersucht werden [4]*

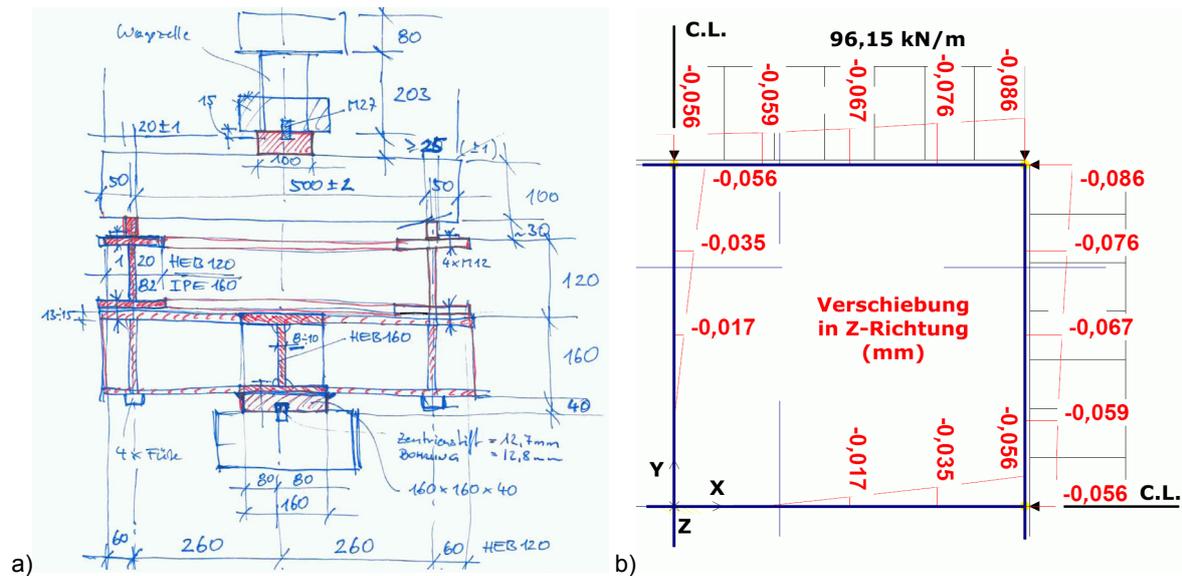


Bild 2: Trägerrost für den Plattenversuch, a) Entwurf und  
b) Berechnung der Durchbiegung zufolge 200 kN (96,15 kN/m)

## 2. Plattenversuche

Der Lehrstuhl für Subsurface Engineering (SE) überstellte das gesamte Laborequipment vom Rabcewicz-Gebäude ins Impulszentrum für Rohstoffe (IZR). In den neuen Laborräumlichkeiten steht nun das rechnergesteuerte, servohydraulische, felsmechanische Prüfsystem mit einer Systemsteifigkeit von 9.000 kN/mm zur Verfügung. Der Hydraulikzylinder ist unterhalb des Testraums angebracht und somit wirkt der Kolbenhub von unten. Diesen Randbedingungen entsprechend wurde vom Lehrstuhl für SE ein sehr steifer Trägerrost entworfen (Bild 2a) und berechnet (Bild 2b) sowie von Östu-Stettin Stahlbau gefertigt (Bild 3). Die ersten Testversuche mit betonierten und gefrästen Faserbetonplatten bestätigten die hohe Systemsteifigkeit von weit mehr als die in der ÖNORM [2] geforderten 200 kN/mm. Der große Vorteil dieser Testkonfiguration (Bild 3a) liegt darin, dass während der Versuchsdurchführung die Rissentstehung bzw. -entwicklung beobachtet (Bild 3b) werden kann.

In Bild 4 sind die Plattenversuchsergebnisse der Versuche P1 bis P3 im Kraft-/Energie-Durchbiegungsdiagramm dargestellt. Die Platten wurden mit der Kunststoffaser Enduro HPP 45 im Ausmaß von  $8 \text{ kg/m}^3$  bewehrt. Zum Vergleich unterschiedlicher Belastungsgeschwindigkeiten wurden die Versuche P1 und P2 mit der normgemäßen Durchbiegungsgeschwindigkeit von 1 mm/min, der Versuch P2 jedoch mit der 10-fachen Geschwindigkeit gefahren. Die Maximalkraft ist dabei um 5 kN bzw. 12 kN höher und die Energieabsorption um 20 J bzw. 24 J geringer.

## 3. Analytische und numerische Berechnungen

Laborversuche sind immer, mehr oder weniger mit Imperfektionen konfrontiert. Den größten Einfluss hat jedoch ein inhomogener und anisotroper Prüfkörper selbst, wobei noch die Struktur in Relation zu den Prüfkörperabmessungen und den Versuchsrandbedingungen zu betrachten ist.

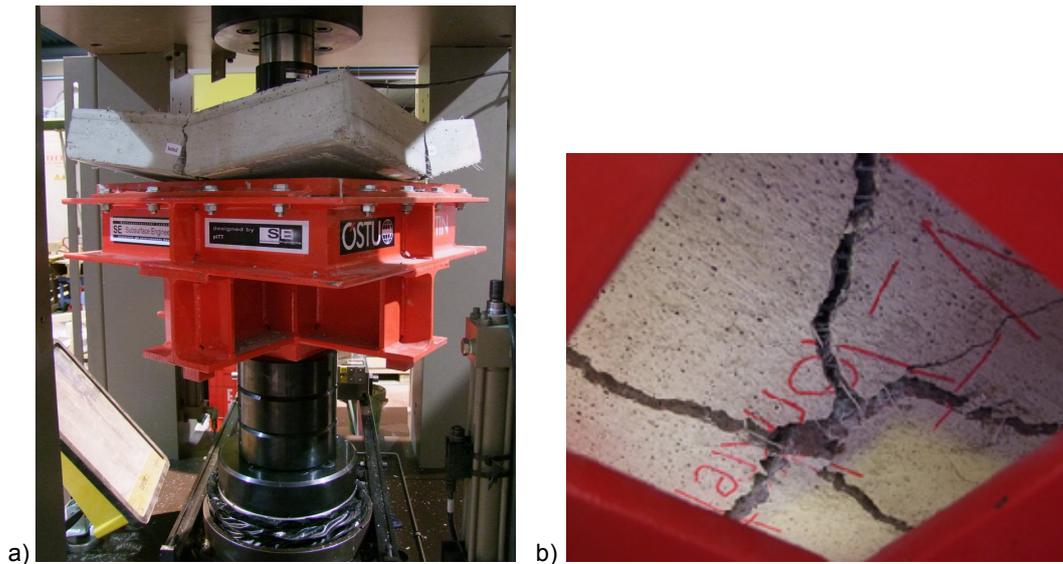


Bild 3: Prüfkörper auf dem Trägerrost während des Plattenversuchs  
a) im MTS-Prüfsystem und b) von unten aufgenommen (Rissbild)

Durch die Wahl eines bestimmten Materialgesetzes können bei den numerischen Berechnungen „Versuche“ immer mit ein und demselben Prüfkörper gefahren werden. Somit lassen sich die Einflüsse getrennt in Versuchsrandbedingungen und Prüfkörper untersuchen.

### 3.1 Analytische Berechnungen

Die Abschätzung der Steifigkeit erfolgte mittels analytischer Lösung von Ugural [5] für eine umfangsgelagerte rechteckige Platte, belastet durch eine rechteckige Flächenlast, wissentlich, dass sich die Auflagerbedingungen unterscheiden. Die Gleichungen basieren auf folgenden Annahmen: linear-elastisches Materialverhalten, dünne Platte (keine Schubkräfte) und die Verformungen sind zur Plattendicke relativ klein.

Mit den Materialkennwerten, Elastizitätsmodul ( $E = 20 \text{ GPa}$ ) und der Querdehnungszahl ( $\nu = 1/5$ ), sowie den Gleichungen (1) bis (3), errechnet sich eine Steifigkeit von  $600 \text{ kN/mm}$ .

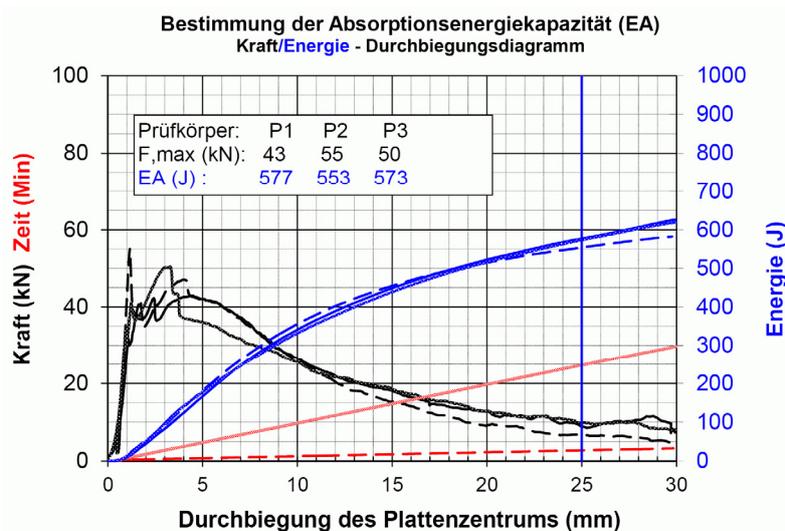


Bild 4: Versuchsergebnisse von 3 mit  $8 \text{ kg/m}^3$  Kunststofffasern (Enduro HPP 45) bewehrten Platten; Kraft-/Energie-Durchbiegungsdiagramm; Platte P2 wurde mit  $10 \text{ mm/min}$  beprobt [4]

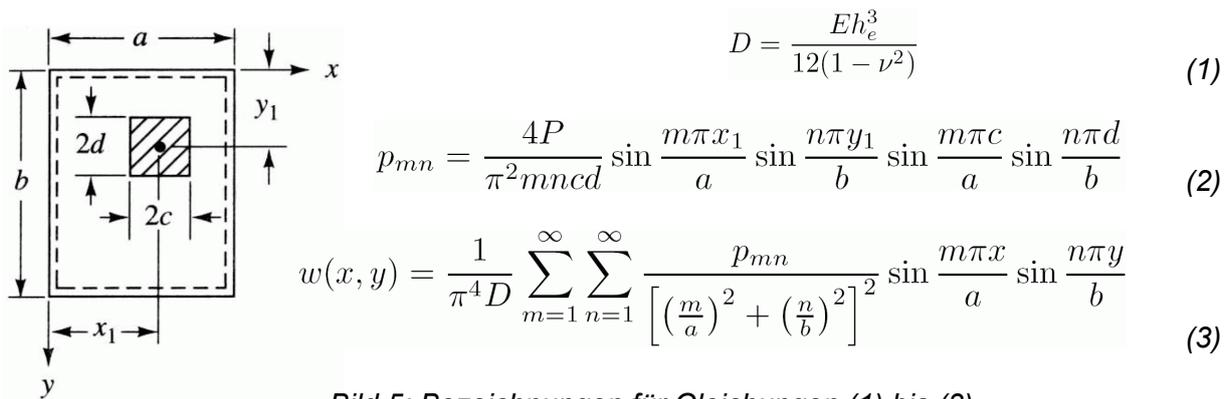


Bild 5: Bezeichnungen für Gleichungen (1) bis (3)

### 3.2 Numerische Berechnungen mit Flac<sup>3D</sup>

Das Finite-Differenzen-Netz besteht aus Zonen in Form von Würfeln mit 10 mm Seitenlänge, der Prüfkörper besteht somit aus 36.000 Zonen.

Flac<sup>3D</sup> [6] ist ein kontinuumsmechanisches Programm, mit dem eine Materialseparation nur modellierbar ist, wenn zuvor Interfaces definiert werden. Dies würde aber zu einer zu starken Netzabhängigkeit führen. Anstatt dessen wurde das Strain-softening-Modell verwendet, in dem die Zugfestigkeit linear von 2 MPa auf 0,1 MPa, bei einer Dehnung von  $2 \cdot 10^{-4}$ , reduziert wurde. Die Festigkeitsparameter wurden mittels triaxialen Mehrstufenversuch bestimmt, mit 5 MPa Kohäsion und  $50^\circ$  Reibungswinkel. Der Elastizitätsmodul ( $E = 20$  GPa) und die Querdehnungszahl ( $\nu = 1/5$ ) entsprechen den in Kap. 3.1 genannten Werten. Das Strain-softening-Modell basiert auf dem Mohr-Coulomb'schen Bruchkriterium. Der Auflagerrahmen und der Prüfstempel wurden linear elastisch modelliert, mit Kennwerten für Stahl.

Alle Knoten an der Unterseite des Auflagerrahmens wurden in allen drei Richtungen gesperrt und alle Knoten an der Oberseite des Prüfstempels wurden angehalten, sich mit zunehmender Geschwindigkeit abwärts auf den Prüfkörper zu bewegen.

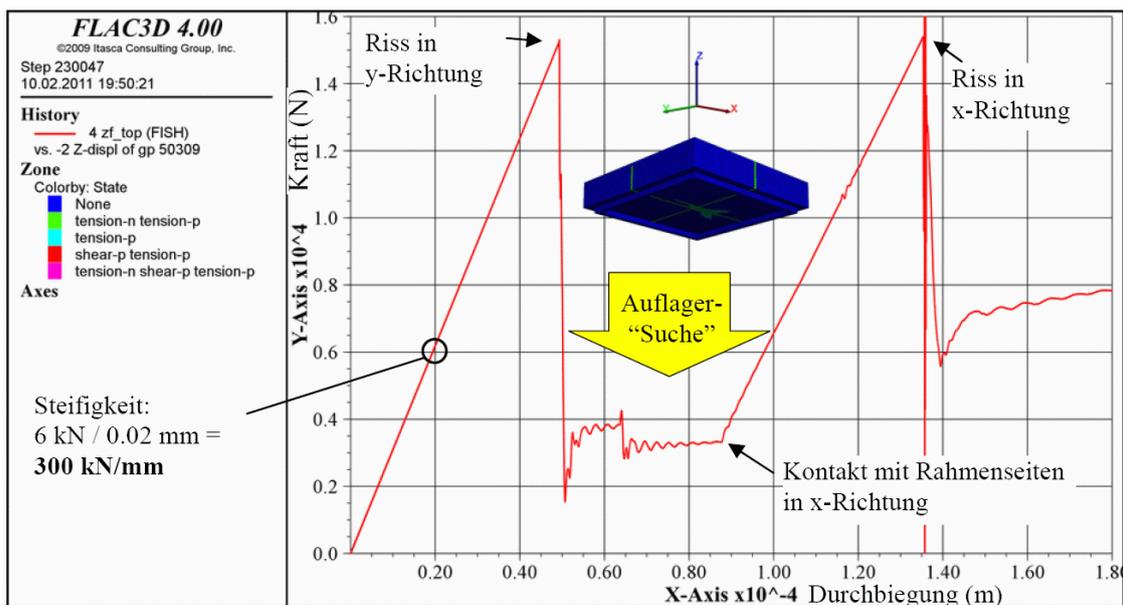


Bild 6: Ergebnis der numerischen Berechnung: Kraft (kN) versus Durchbiegung (mm); die Platte ist anfänglich nur auf den Seiten in y-Richtung gelagert (Bild 7b)

Tab. 1: Ergebnisse der numerischen Berechnungen für Randbedingungen nach Bild 7a

Run	Normabweichungen	Maximalkraft (kN)	Abweichung vom Normversuch (Run 26) in (%)
27	110 mm dick	23,93	118
34	700 mm x 700 mm	20,86	103
28	640 x 640 mm	20,56	101
31	eine schräge Seitenfläche: +50 mm	20,36	100
<b>26</b>	<b>normgemäß</b>	<b>20,30</b>	<b>100</b>
30	eine schräge Seitenfläche: -50 mm	20,22	100
32	540 mm x 600 mm	20,02	99
33	540 mm x 540 mm	19,80	98
29	90 mm dick	17,14	84

Um keine „Schockwelle“ durch das Modell zu jagen, wurde äußerst langsam, in Form einer Rampe die Geschwindigkeit von Null bis zur maximalen Geschwindigkeit von  $10^{-6}$  mm/step innerhalb von 100.000 steps gesteigert.

Zwischen Prüfkörper und Auflagerrahmen sowie Prüfkörper und Prüfstempel wurden Interfaces mit physikalisch relevanten Parametern gelegt. Damit wurde die Möglichkeit geschaffen, dass sich der Prüfkörper z.B. vom Auflagerrahmen abheben kann.

Die Reaktionskraft, bestehend aus der Summe der Reaktionskräfte aller oberen Knoten des Prüfstempels, ist die Reaktion des Prüfkörpers auf die aufgezwungene Verschiebung durch den Prüfstempel. In Bild 6 ist diese Reaktionskraft über der Durchbiegung aufgetragen.

In Bild 6 sind die Berechnungsergebnisse für die Plattenauflagerbedingung entsprechend Bild 7b enthalten. Zu Beginn liegt die Platte auf dem Rahmenteil in y-Richtung auf. Entsprechend bildet sich auch der erste Riss in y-Richtung aus, bei einer Kraft von 15,3 kN. Findet die Platte danach ein Auflager auf den um 0,1 mm abgesenkten Rahmenteil in x-Richtung, steigt die Kraft wieder an, bis sich ein Riss bei 15,4 kN in x-Richtung entwickelt.

#### 4. Begleitende Untersuchungen

Einaxiale und triaxiale Druckversuche, direkte Zugversuche, Brazilian-Tests und 3-Punkt-Biegeversuche wurden ausgeführt, um die Materialparameter für die numerischen Berechnungen zu liefern.

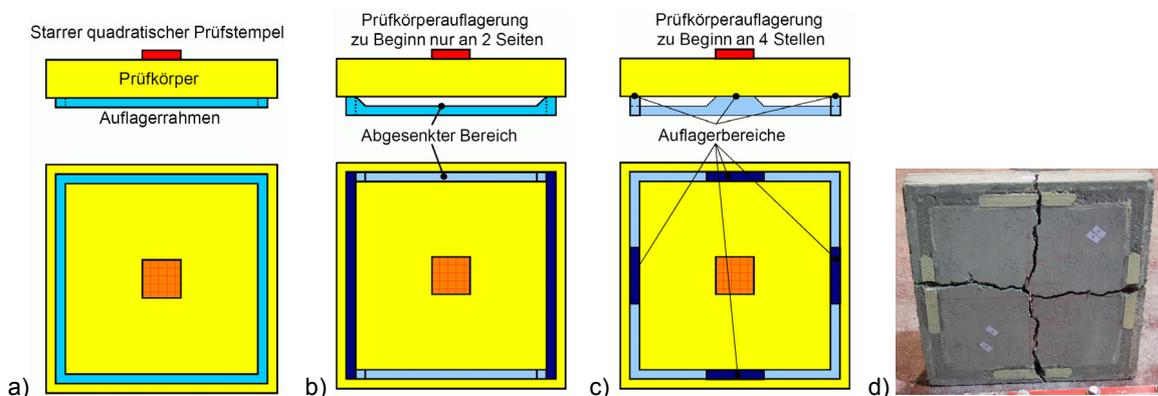
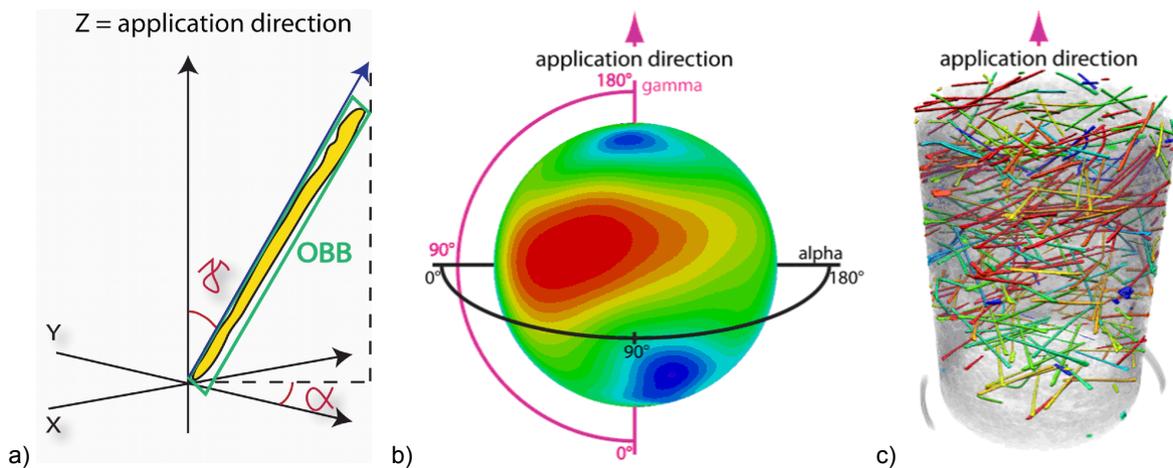
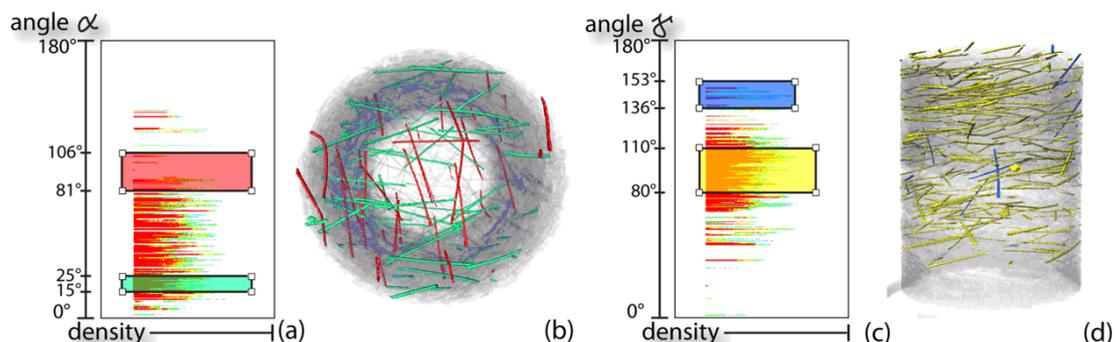


Bild 7: Unterschiedliche Auflagerbedingungen; d) Rissbild für Auflagerbedingung nach c)



**Bild 8: Faserorientierung:** a) Orientierung der Stahlfaser durch die Winkel  $\alpha$  und  $\gamma$ ;  
 b) Richtungskugel mit Häufigkeitsangaben durch Farbgebung;  
 c) 3D-Ansicht mit entsprechend der Richtungshäufigkeit gefärbten Fasern.

Zur Bestimmung des Fasergehalts und der Faserorientierung (Bild 8) wurden den Prüfkörpern Bohrkern entnommen. Beides kann mittels zerstörungsfreier Methode der Computertomografie [7] bestimmt werden, wobei das Auswerteprogramm derzeit nur für Stahlfasern vorhanden ist. Der Fasergehalt kann auch mit Hilfe eines Backenbrechers bestimmt werden. Die in Bild 9 dargestellten Histogramme dienen zur interaktiven Exploration der Stahlfasern über die beiden Winkel  $\alpha$  und  $\gamma$ . Um die gewünschten Featureklassen zu selektieren, können im User Interface (UI) auf diesen Histogrammen sogenannte Widgets platziert werden (Abbildung 9a,c). Wenn man ein Widget über das Histogramm bewegt, werden im 3D-Volume-View die selektierten Stahlfasern mit der entsprechenden Farbe und Transparenz vom Widget angezeigt. Gleichzeitig werden auch die verschiedensten Parameter wie z.B. Winkelbereich und Anzahl der Stahlfasern, die das Widget abdeckt, angezeigt. Der 3D-Volume-View ist das Hauptfenster der Applikation, das zur Visualisierung des gesamten Werkstücks dient. In dieser Ansicht lässt sich die momentane Selektion gut überwachen. Als zusätzliches Feature zur Richtungsvisualisierung der Stahlfasern gibt es ein Kugel-Richtungs-Histogramm (DSH = Direction Sphere Histogram). Im DSH wird die Richtungsverteilung der selektierten Stahlfasern farbkodiert. Rot bedeutet eine hohe Anzahl an Stahlfasern in eine bestimmte Richtung, Blau eine niedrige (Bild 8b). Die Farben des DSH können auch auf die entsprechenden Stahlfasern im 3D-Volume-View gemapped werden (Bild 8c).



**Bild 9: Histogramme mit platzierten Widgets für (a) Winkel  $\alpha$  und (c) Winkel  $\gamma$  sowie 3D-Volume-View für (b) Winkel  $\alpha$  und (d) Winkel  $\gamma$**

## 5. Zusammenfassung

Von den Standardversuchen, wie einaxialer und triaxialer Druckversuch sowie Spaltzugversuch, ist bekannt, dass bei sorgfältiger Probenvorbereitung – z.B. das planparallele Fräsen der Stirnflächen für den einaxialen Druckversuch – i.d.R. ein höherer Festigkeitswert zu erzielen ist. Aus den laufenden Untersuchungen ist ersichtlich, dass die Auflagerbedingungen inklusive Bettungsmaterial großen Einfluss auf das Versuchsergebnis haben. Beim Plattenversuch ist dementsprechend auf eine gleichmäßige Auflagerfläche bzw. Prüfstampeldruckverteilung zu achten. Für quantitative Aussagen sind für die unterschiedlichen Auflagerbedingungen weitere Versuche im Laufen.

Die bisher durchgeführten Versuche, bei denen der Prüfkörper nur in den Mittelbereichen der vier Seiten (Bild 7c) auf Bettungsmaterial gelagert wurde, zeigten ein kreuzförmiges Rissbild (Bild 7d). Weitere Versuche mit inhomogener Faserverteilung sind geplant, da sich hier eine andere Rissverteilung ergeben kann.

Die Steifigkeit, ausgedrückt in Kraft pro vertikale Verschiebung (kN/mm), liegt im Versuch je nach Bettungsmaterial bei 100 kN/mm. Die numerische Berechnung ergibt eine Steifigkeit von ca. 450 kN/mm und als Resultat der unterschiedlichen Auflagerbedingungen (erlaubt kein Abheben der Platte) führt die analytische Berechnung zu 600 kN/mm.

Aus den numerischen Berechnungen geht hervor, dass die Dicke der Platte einen großen Einfluss auf die Maximalkraft hat, z.B. ergibt eine 110 mm dicke Platte eine um 18 % größere Maximalkraft gegenüber einer 100 mm dicken Platte.

Eine 10-fach höhere Belastungsgeschwindigkeit führte bei mit Kunststofffasern bewehrten Betonplatten zu einem um 4 % geringeren Energieabsorptionsvermögen, wobei die Streuung innerhalb der Versuchsserie von nur 3 Platten nicht sehr aussagekräftig ist.

Weitere Laborversuche und numerische Berechnungen sind im Laufen, um die in der Einleitung aufgezählten Einflüsse (Bild 1) auf das Plattenversuchsergebnis zu quantifizieren.

## 6. Literatur

- [1] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB):  
ÖVBB-Richtlinie Spritzbeton. Wien, 2009.
- [2] ÖNORM EN 14488-5:  
Prüfung von Spritzbeton – Bestimmung der Energieabsorption bei faserverstärkten plattenförmigen Prüfkörpern. Wien, 2006.
- [3] Pittino, G.; Mößlacher, A.; Schwab, P., Galler, R.:  
Application and testing of plastic fibre reinforced dry-mix shotcrete. *Geomechanics and Tunneling*, 4 (2011), 1, 63 - 69.
- [4] Pittino, G.:  
Entwicklung einer Plattenversuchseinrichtung für faserbewehrten (Spritz-)Beton, Testversuche mit unterschiedlichen Randbedingungen zur Abschätzung der Einflüsse von Imperfektionen sowie Vergleiche mit numerischen Berechnungen. Projektbericht, MU-Leoben, unveröffentlicht, 2011.
- [5] Ugural, A.C.:  
Stresses in Plates and Shells. McGraw-Hill, Inc., New York, 1999.
- [6] Itasca Consulting Group, Inc.:  
Flac<sup>3D</sup> – Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions. Version 4, User's Manual. Minneapolis, 2009.
- [7] Fritz, L.; Hadwiger, M.; Geier, G.; Pittino, G.; Groller, M.E.:  
A Visual Approach to Efficient Analysis and Quantification of Ductile Iron and Reinforced Sprayed Concrete. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 15(6), (2009) 1343 - 1350.

**Zu den Autoren**

Dipl.-Ing. Dr.mont. Gerhard Pittino

Studium des Bauingenieurwesens an der TU Graz, Dissertation an der Montanuniversität Leoben, Laborleiter des Lehrstuhls für Subsurface Engineering.

*Gerhard.Pittino@unileoben.ac.at*

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Robert Galler

Studium des Bergwesens und Dissertation an der Montanuniversität Leoben, von 1997 bis 2006 bei Planungsbüro GEOCONSULT, seit 2006 Leiter des Lehrstuhls für Subsurface Engineering der Montanuniversität Leoben.

*Robert.Galler@unileoben.ac.at*