

Festigkeits- und Verformungsverhalten von kurzfaserverstärktem Porenbeton

von Diplom-Ingenieur (FH)

Ronny Stadie

aus Berlin

von der Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt

der Technischen Universität Berlin

zur Erlangung des akademischen Grads

Doktor der Ingenieurwissenschaften

– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Frank U. Vogdt

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Hillemeier

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Udo Kraft

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 09.05.2008

Berlin 2008

D 83

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Zeitraum von November 2004 bis Januar 2008 an der Technischen Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen am Fachgebiet Baustoffe und Baustoffprüfung. Die Arbeit beschäftigt sich mit dem Festigkeits- und Verformungsverhalten von kurzfaserverstärktem Porenbeton.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Hillemeier möchte ich an dieser Stelle für die Anregung zu dieser Arbeit und die weit reichende Unterstützung danken. Auch in schwierigen Zeiten stand er mir jederzeit unterstützend zur Seite und trug so entscheidend zur Fertigstellung dieser Arbeit bei. Herrn Prof. Dr.-Ing. Udo Kraft möchte ich für die Übernahme des Korreferats sowie stellvertretend für die finanzielle Unterstützung, die mir die Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin während der Bearbeitungszeit zur Verfügung stellte, bedanken.

Ein weiteres Dankeschön geht an die XELLA Technologie- und Forschungsgesellschaft mbH, die mir bei Materialbeschaffung und Herstellung der Probekörper behilflich war. Frau Dr. Berit Straube und Herrn Christoph Straube gilt hier stellvertretend meine besondere Wertschätzung. Ihre unkomplizierte Art, meine Arbeiten in die Aktivitäten ihres Hauses einzubinden sowie ihre offene Diskussionsbereitschaft, lernte ich im Bearbeitungszeitraum dieser Arbeit schätzen. Die Zusammenarbeit mit der XELLA Technologie- und Forschungsgesellschaft mbH stellte den industrienahen Bezug meiner Arbeit sicher.

Frau Dr. Astrid Haibel (Hahn Meitner Institut) sowie Herrn Dr. Gerd Weidemann und Herrn Dr. Jürgen Goebbels (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Berlin) gilt mein Dank für die Hilfestellung bei der Durchführung der Gefügestrukturanalyse. Aufwendige Erfassungen durch radiographische bzw. computertomographische Verfahren wären ohne die Mithilfe o. g. Personen nicht möglich gewesen.

Herrn Univ.-Prof. Dr. Andreas Gerdes und Herrn Matthias Schwotzer (Forschungszentrum Karlsruhe) möchte ich für die Durchführung der elektronen-mikroskopischen Untersuchungen danken. Dem Unternehmen Flow Europe GmbH sowie dem Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik gilt mein Dank für die Betreuung der Schneiduntersuchungen über die Druckflüssigkeitsverfahren, ein wesentlicher Teil dieser Arbeit.

Zu erwähnen sind weiterhin eine Vielzahl von Materialhersteller und -lieferanten. Sie stellten mir einen Großteil der Versuchsmaterialien kostenlos zur Verfügung und waren oft Ansprechpartner bei fachspezifischen Fragestellungen (s. u. a. Anhang: Tab.-A.: 2). Explizit möchte ich hier den Faserhersteller Saint Gobain Vetrotex International nennen.

Ein besonderer Dank geht an Herrn Dipl.-Ing. Rainer Oertel. Im Rahmen seiner Vertieferr- bzw. seiner Diplomarbeit führte er umfangreiche Untersuchungen zu einzelnen Fragestellungen dieser Arbeit durch. Die von ihm durchgeführten Untersuchungen gingen wesentlich über den Rahmen einer Studienarbeit eines Universitätsstudiums hinaus.

Der im Hause ansässigen Materialprüfanstalt Berlin-Brandenburg sowie der Gesellschaft für Materialprüfung und Baustoffforschung mbH möchte ich für die versuchstechnische und die fachliche Unterstützung bei einer Reihe von Untersuchungen danken. Nicht zuletzt möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Instituts für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Berlin bzw. ganz besonders bei den Mitarbeitern des Fachgebiets Baustoffe und Baustoffprüfung für die kollegiale Zusammenarbeit und die stete Hilfsbereitschaft bedanken. Hier sind vor allem Stefanie Schuler und Andreas Küntzel zu nennen, die mir beim Korrekturlesen und in unzähligen Diskussionen unterstützend zur Verfügung standen.

Kurzfassung

Porenbeton ist ein makroporöser silikatischer Baustoff mit einem breiten Anwendungsspektrum. Bei kritischer Zugbeanspruchung versagt Porenbeton spröde. Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Festigkeits- und Verformungsverhalten des Porenbetons bei Einbau von Fasern. Es wird ausschließlich der Rohdichtebereich zwischen 450 und 550 kg/m³ betrachtet.

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass Kurzfasern die Eigenschaften der Anfangssuspension und der Grünphase sowie das Treibverhalten des Porenbetons beeinflussen. Die Anfangssuspension ist stark anfällig für Faserverteilungs- und Faserorientierungsinhomogenitäten. Diese Inhomogenitäten können die Gefügestruktur im getriebenen System stark verändern. Die Kurzfasern bleiben statistisch verteilt, orientieren sich jedoch im Treibprozess vorzugsweise in Richtung parallel zur Treibrichtung aus. Fasertranslation und -rotation sind durch Treibprozessgrößen und Faserparameter steuerbar. Treibkinetik und Porosierungsgrad verändern sich durch den Einbau von Kurzfasern. Bei geeigneten Fasereinbauten stabilisieren sich Anfangssuspension und Treibprozess. Die Grünstabilitäten sowie die Zeiten bis zum Erreichen der Grünstandsfestigkeiten können reduziert werden. Die Neigung zur Rissbildung aus Eigenspannungen bei der hydrothermalen Härtung wird gesenkt.

Es wurde festgestellt, dass sich das Festigkeits- und Verformungsverhalten u. a. durch Einbau von alkaliresistenten (AR) Glas-, Kohlenstoff- und Aramidkurzfasern unter Druck-, kombinierter Druck-Schub- und Biegebeanspruchung steigern lässt. Die Entfestigungsenergien können deutlich erhöht werden. Das spröde Versagen wird unter kombinierter Druck-Schub- und Biegebeanspruchung reduziert. Ein anisotropes Verhalten ist deutlich erkennbar. Neben der Faserorientierung wird dieses durch die faserabhängige Beeinflussung des Feststoffgefüges im Treibprozess hervorgerufen. AR-Kurzglasfasern erweisen sich als Vorzugsfasern zur Erhöhung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens. AR-Bündelkurzglasfasern sind hochwirksam unter Biegebeanspruchung. Druck- und kombinierte Druck-Schubbeanspruchung werden stärker durch wasserdispersible monofile fein verteilte AR-Kurzglasfasern beeinflusst. Der Verbund ist gegeben, die Faserbeständigkeiten zeigen keine Auffälligkeiten.

Erstmalig durchgeführte systematische Untersuchungen unter Druck-, kombinierter Druck-Schub- und Biegebeanspruchung bei Einbau von AR-Bündelkurzglasfasern und wasserdispersiblen monofilen AR-Kurzglasfasern zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Faserparameter Faserlänge und -konzentration vom Festigkeits- und Verformungsverhalten. Die Faseranteile in Beanspruchungsrichtung haben direkten Einfluss auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten. Die Porengrößenverteilung verschiebt sich bei Fasereinbau hin zu kleineren Porenradien. „In situ“ Untersuchungen der Versagensmechanismen zeigen die begrenzte Faserwirkung auf die Erstentfestigung bei Druckbeanspruchung. Im Wesentlichen versagen die Stegsysteme, Kurzfasern wirken somit auf die Erstentfestigung unter Druckbeanspruchung nur eingeschränkt.

Die erforderliche Schneidbarkeit des kurzfaserverstärkten Porenbetons im industriellen Produktionsprozess führt ergänzend zu Schneidbetrachtungen. Die derzeitige Schneidtechnologie über den „stehenden Drahtdurchzug“ bei Grünstandsfestigkeit ist nur eingeschränkt nutzbar. Das Schneiden über Druckflüssigkeits- sowie Sägeverfahren wird alternativ untersucht. Machbarkeitsstudien ergaben unter optimalen Bedingungen hohe Schnittqualitäten. Die jeweiligen Schneidprozessparameter konnten auf den grünfesten faserverstärkten Porenbeton bei Nutzung industrienaher Schneidgeometrien abgestimmt werden. Das Druckflüssigkeitsschneiden am hydrothermal gehärteten Material ist ebenfalls möglich.

Abstract

Autoclaved aerated concrete is a macro-porous siliceous building material with a wide application range. Under critical tension stress a brittle failure occurs. This work deals with the strength and deformation behavior of autoclaved aerated concrete with regard to the introduction of fibers. Exclusively the bulk density area between 450 and 550 kg/m³ is examined.

The work at hand has shown that short fibers influence the qualities of the initial suspension and the green phase as well as the foaming behavior of the autoclaved aerated concrete. The initial suspension is strongly susceptible to fiber distribution and fiber orientation inhomogeneities. These inhomogeneities can strongly change the joint structure in the risen system. The short fibers remain statistically distributed, however, in the process of drifting orient themselves parallel to the drifting direction. Fiber translatory movement and rotation are controllable through the foaming process and fiber parameters. Drifting kinetics and the degree of porosity change through the use of short fibers. Initial porosity and fiber drifting kinetics can be stabilized through the use of suitable fibers. Green stabilities as well as the time to reach fresh state stability can be reduced. The inclination towards crack formation through inner tension and hydrothermal hardening is lowered.

It has been deduced that the pressure, flexural, and bending strength and deformation characteristics can be increased through the use of alkali resistant (AR) glass, carbon, and aramid short fibers. The amount of strength reducing energy is increased considerably. The brittle failure is reduced under composite pressure and flexural strain. An anisotropic behaviour is recognizable. Besides the fiber orientation the short fibers are highly effective in altering the strength and deformation behavior. AR short fibers have proven themselves to be the fiber of choice to better strength and deformation behavior. Pressure and composite pressure are more greatly influenced by finely distributed water dispersible glass monofilaments. The bonding connection is assured and the stability of the fibers proven.

Systematic examinations under pressure and flexural bending using AR bundled short glass fibers and water dispersible short glass monofilaments were carried out and show a clear dependence of the strength and deformation behavior to the fiber parameters Length and Concentration. The amount of fibers oriented in the direction of loading have a direct influence on the strength and deformation behavior. The pore size distribution at fiber installation moves to smaller pore radii. In situ analysis show limited fiber effect on the initial strengthening under compression. Generally the lattice system fails here, short fibers have a negligible effect.

The required "cutability" of the short fiber reinforced autoclaved aerated concrete in the industrial production process leads to supplementary cutting considerations. The present cutting technology of "stationary wire draughts" at fresh strength levels has only limited use. Hydraulic liquid cutting as well as sawing methods are examined alternatively. Feasibility studies yield high cut qualities under optimal conditions. The respective cutting process parameters could be coordinated with the green firm fiber reinforced autoclaved aerated concrete for industrial cutting. Hydraulic liquid cutting of hydro thermally hardened material is also possible.

Inhaltsverzeichnis

Bezeichnungen.....	VIII
Abkürzungen	IX
1. Einleitung	1-1
1.1 Allgemeines	1-1
1.2 Problemstellung	1-1
1.3 Zielstellung / Inhalt der Arbeit.....	1-3
2. Grundlagen des Porenbetons	2-5
2.1 Allgemeines	2-5
2.2 Gefügestruktur	2-5
2.2.1 Grundlagen	2-6
2.2.2 Gefügestrukturanalyse - Allgemeines	2-7
2.2.3 Gefügestrukturanalyse - Porenbeton	2-8
2.3 Herstellung des Porenbetons	2-9
2.3.1 Treibprozess	2-9
2.3.2 Grünstabilität und Grünstandsfestigkeit	2-13
2.3.3 Hydrothermaler Härtingsprozess	2-14
2.4 Eigenschaften des Porenbetons	2-15
2.4.1 Wärme-, Schall-, Feuchtetransport	2-15
2.4.2 Spannungs-, Dehnungs- und Versagensanalyse.....	2-16
2.4.3 Innere Beanspruchungen im „Gebrauchszustand“	2-24
3. Phänomologische Vorüberlegungen.....	3-25
3.1 Allgemeines	3-25
3.2 Faserverstärkte, getriebene, makroporöse Gefügestrukturen.....	3-25
3.3 Faserstruktur	3-27
3.4 Faserwirkmechanismen	3-30
3.5 Vorbetrachtungen - Faserverstärkter Porenbeton	3-32
3.5.1 Derzeitiger Kenntnisstand	3-33
3.5.2 Vorüberlegungen zu Fasereinbau	3-33
3.5.3 Fasereinfluss auf die Bildung der Gefügestruktur	3-34
3.5.4 Fasereinfluss auf die Eigenschaftsanisotropien und deren Nutzung	3-36
3.6 Gefügestrukturanalyse - Faserverstärkter Porenbeton	3-37
3.7 Faserwirkmechanismen unter Berücksichtigung der makroporösen Gefügestruktur des Porenbetons	3-38
4. Wahl der Faser für faserverstärkten Porenbeton	4-41
4.1 Faserübersicht	4-41

4.2 Faseranforderungen	4-41
4.3 Auswertung nach Faseranforderungen	4-44
4.3.1 Formbezogene Anforderungen an Fasern	4-44
4.3.2 Materialbezogene Anforderungen an Fasern.....	4-46
4.3.3 Netzwerkbezogene Anforderungen an Fasern	4-49
4.3.4 Eigene Untersuchungen.....	4-50
4.4 Vorauswahl der Fasern.....	4-55
5. Untersuchungen zur Wirksamkeit von Kurzfasern im Porenbeton... 5-56	
5.1 Mischungszusammensetzung, Herstellung, Randbedingungen	5-56
5.2 Gefügestruktur	5-61
5.2.1 Kurzfaserstruktur.....	5-61
5.2.2 Feststoffstruktur.....	5-67
5.3 Festigkeits- und Verformungsverhalten	5-69
5.3.1 Einachsige Druckbeanspruchung	5-69
5.3.2 Kombinierte Druck-Schubbeanspruchung	5-73
5.3.3 Biegebeanspruchung	5-76
5.4 Hygrisches Verformungsverhalten	5-81
5.5 Charakterisierung der Gefügestrukturanisotropien.....	5-82
5.5.1 Allgemeines.....	5-82
5.5.2 Akustische Eigenschaften	5-82
5.6 Faserbeschaffenheit und Faserverbund	5-83
5.6.1 Faserbeschaffenheit.....	5-83
5.6.2 Faserverbund	5-84
5.7 Schlussfolgerungen.....	5-86
6. Einfluss der Kurzfasern auf Eigenschaften der Anfangssuspension, Treibverhalten, Grünstabilität sowie Grünstandsfestigkeit des Porenbetons	6-87
6.1 Mischungszusammensetzung, Herstellung, Randbedingungen	6-87
6.2 Eigenschaften der Anfangssuspension.....	6-88
6.2.1 Verarbeitbarkeit, Fließfähigkeit, Homogenität	6-88
6.2.2 Anfangsverteilung und -orientierung der Kurzfasern.....	6-90
6.2.3 Strukturstabilität der Anfangssuspension durch Kurzfasern	6-92
6.3 Treibverhalten	6-93
6.3.1 Allgemeines.....	6-93
6.3.2 Einfluss der Kurzfasern auf den Treibprozess	6-94
6.3.3 „In -“ und „Ex situ“ Vergleichsstudie des Treibprozesses bei Variation von Faserparametern und Treibprozessgrößen	6-99
6.4 Grünstabilität und Grünstandsfestigkeit	6-107
6.4.1 Einfluss von Kurzfasern	6-107
6.4.2 Vergleichsstudie bei Variation der Faserlänge und -konzentration.....	6-107

6.5 Schlussfolgerungen.....	6-108
7. Systematische Untersuchungen zum Einfluss von alkaliresistenten Kurzglasfasern auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Porenbetons	7-109
7.1 Mischungszusammensetzung, Herstellung, Randbedingungen	7-109
7.2 Gefügestruktur	7-109
7.2.1 Kurzfaserstruktur.....	7-109
7.2.2 Feststoffstruktur	7-113
7.3 Festigkeits- und Verformungsverhalten	7-119
7.3.1 Einachsige Druckbeanspruchung	7-119
7.3.2 Kombinierte Druck-Schubbeanspruchung	7-125
7.3.3 Biegebeanspruchung	7-126
7.4 Schlussfolgerungen.....	7-131
8. Produktionsprozess des Porenbetons bei Einbau von Kurzfasern	8-132
8.1 Kontrolle der Faserausrichtung in der Anfangssuspension.....	8-132
8.2 Gegenwärtige Schneidpraxis.....	8-133
8.2.1 Problemstellung	8-134
8.2.2 Vorüberlegungen.....	8-137
8.3 Schneiden des kurzfaserverstärkten Porenbetons in der „Grünphase“	8-138
8.3.1 Druckflüssigkeitsschneiden über Wasser- und Abrasivwasserstrahlschneiden	8-138
8.3.2 Schneiden mit der Sägetechnologie	8-144
8.3.3 Vergleich beider Schneidverfahren	8-148
8.4 Schneiden des kurzfaserverstärkten Porenbetons nach der hydrothermalen Härtung	8-149
8.4.1 Druckflüssigkeitsschneiden.....	8-149
8.4.2 Schneiden mit der Sägetechnologie	8-151
8.4.3 Zusammenfassung.....	8-152
8.5 Schlussfolgerungen.....	8-152
9. Zusammenfassung und Ausblick	9-153
Literaturverzeichnis	A-1
Patente und Normen	A-6
Anhang	A-7

Bezeichnungen

(Im Text häufig verwendete Formelzeichen)

Lateinische Symbole

Symbol	Bezeichnung
A_β	Anisotropieindex für die Festigkeit des Porenbetons; $[A_\beta] = 1$
A_G	Anisotropieindex für die Entfestigungsenergie des Porenbetons; $[A_G] = 1$
A_f	Querschnittsfläche der Faser bzw. Oberfläche der Faser; $[A_f] = \text{mm}^2$
d_d	Drahtdurchmesser des Schneidedrahts; $[d_d] = \text{mm}$
d_f	Durchmesser der Faser; $[d_f] = \mu\text{m}$
$d_{f,eq}$	Äquivalentdurchmesser der Faser (bei Rechteckquerschnitt); $[d_{f,eq}] = \text{mm}$
d_p	Durchmesser der Makropore; $[d_p] = \text{mm}$
d_{par}	Mittlerer Durchmesser der Partikel (Abrasivmittel - Druckflüssigkeitsschneiden); $[d_{par}] = \text{mm}$
d_s	Stegdicke des Feststoffmaterials des Porenbetons; $[d_s] = \text{mm}$
$f_{(x,y,z)}$	Normierter Orientierungsanteil in Achsenrichtung x, y, z (kartesisches Koordinatensystem); $[f_i] = 1$
F_f	Auszugslast der Faser; $[F_B] = \text{N}$
F_B	Kraft unter Biegebeanspruchung; $[F_B] = \text{N}$
F_{DS}	Kraft unter kombinierter Druck-Schubbeanspruchung; $[F_{DS}] = \text{N}$
F_w	Kraft zur Lageänderung einer Kurzfasern im Fasernetzwerk; $[F_w] = \text{N}$
G	Gesamtenergie, Energieverzehr (allgemein); $[G] = \text{N/m}$
G_B	Entfestigungsenergie unter Druckbeanspruchung bis zur Durchbiegung von $\beta_B = 20\%$; $[G_B] = \text{N/m}$
G_D	Entfestigungsenergie unter Druckbeanspruchungen bis zur Stauchung von $\varepsilon_D = 45\%$; $[G_D] = \text{N/m}$
G_{DS}	Entfestigungsenergie unter kombinierter Druck-Schubbeanspruchungen; $[G_{DS}] = \text{N}\cdot\text{m/g}$
G_E	Entfestigungsenergie (allgemein); $[G_E] = \text{N/m}$
G_{el}	Elastische Energie unter Beanspruchungen; $[G_{el}] = \text{N/m}$
G_{pl}	Plastische Energie unter Beanspruchungen; $[G_{pl}] = \text{N/m}$
h	Höhe (Treibkörper, Probekörper); $[h] = \text{cm}, \text{mm}$
h_T	Zuwachs an Treibhöhe im Treibmedium; $[h_T] = \text{mm}$
l_{ch}	Charakteristische Länge; $[l_{ch}] = \text{mm}$
l_b	Einbindelänge der Faser; $[l_b] = \text{mm}$
l_f	Länge der Faser; $[l_f] = \text{mm}$
$l_{f,krit}$	Kritische Länge der Faser; $[l_{f,krit}] = \text{mm}$
$l_{f,(x,y,z)}$	Mittlere wirksame Faserlänge in Achsenrichtung x, y, z (kartesisches Koordinatensystem); $[l_{f,(i)}] = \text{mm}$
l_s	Steglänge des Feststoffmaterials des Porenbetons; $[l_s] = \text{mm}$
n_f	Anzahl der Fasern; $[n_f] = 1$
P_t	Planparallelität des Schnitts; $[P_t] = \text{mm}$
p_w	Wasserdruck beim Druckflüssigkeitsschneiden; $[p_w] = \text{bar}$
R_t	Rauigkeit der Schnittoberfläche; $[R_t] = \text{mm}$
r_p	Radius der Makropore; $[r_p] = \text{mm}$
s	Sedimentationsstrecke in der Anfangssuspension; $[s] = \text{mm}$
s_{eff}	Effektiver mittlerer Faserabstand; $[s_{eff}] = \text{mm}$
s_f	Mittlerer Faserabstand; $[s_f] = \text{mm}$
u	Durchbiegung, Verschiebung; $[u] = \text{mm}$ bzw. relative Baustofffeuchte; $[u] = \%$
t	Zeit (allgemein); $[t] = \text{s}$
t_T	Treibzeit; $[t_T] = \text{s}$
V_{MP}	Anteil der Mikroporen; $[V_{MP}] = \text{Vol.}\%$
V_P	Anteil der Makroporen; $[V_P] = \text{Vol.}\%$

V_{Sus}	Volumen der Anfangssuspension, $[V_{\text{Sus}}] = \text{m}^3$
v_{rot}	Rotationsgeschwindigkeit des Schneidedrahts; $[v_{\text{rot}}] = \text{m/s}$
v_{S}	Vorschubgeschwindigkeit des Schneidedrahts; $[v_{\text{S}}] = \text{mm/s}$
v_{T}	Treibgeschwindigkeit des Treibmediums; $[v_{\text{T}}] = \text{mm/s}$

Griechische Symbole

Symbol	Bezeichnung
β_{B}	Biegefestigkeit des Porenbetons; $[\beta_{\text{B}}] = \text{N/mm}^2$
β_{D}	Einachsige Druckfestigkeit des Porenbetons; $[\beta_{\text{D}}] = \text{N/mm}^2$
$\beta_{\text{D},0}$	Druckfestigkeit des Porenbetons, unporosiert; $[\beta_{\text{D},0}] = \text{N/mm}^2$
β_{pb}	Festigkeit des Porenbetons (allgemein); $[\beta_{\text{pb}}] = \text{N/mm}^2$
β_{Z}	Zugfestigkeit des Porenbetons; $[\beta_{\text{Z}}] = \text{N/mm}^2$
β_{f}	Zugfestigkeit der Faser; $[\beta_{\text{f}}] = \text{N/mm}^2$
δ_0	Elastische Verschiebung des Faseraustrittspunkts bei Faserauszug; $[\delta_0] = \text{mm}$
δ	Plastische Verschiebung des Faseraustrittspunkts bei Faserauszug; $[\delta] = \text{mm}$
ε_{D}	Stauchung unter einachsiger Druckbeanspruchung; $[\varepsilon_{\text{D}}] = \text{‰}$
$\varepsilon_{\text{D,Br}}$	Bruchstauchung unter einachsiger Druckbeanspruchung; $[\varepsilon_{\text{D,Br}}] = \text{‰}$
$\eta_{\text{f},2\text{D}}$	Zweidimensionale Faserorientierung (allgemein - Beschreibung durch θ_{f}); $[\eta_{\text{f},2\text{D}}] = \text{Grad}, (^\circ)$
$\eta_{\text{f},3\text{D}}$	Dreidimensionale Faserorientierung (allgemein - Beschreibung durch φ_{f} und θ_{f}); $[\eta_{\text{f},3\text{D}}] = \text{Grad}, (^\circ)$
θ_{f}	Pol- bzw. Polarwinkel; $[\theta_{\text{f}}] = \text{Grad}, (^\circ)$
λ_{pb}	Wärmeleitfähigkeit des Porenbetons; $[\lambda_{\text{pb}}] = \text{W}/(\text{K}\cdot\text{m})$
μ_{T}	Porosierungsgrad (Zuwachs an Treibhöhe); $[\mu_{\text{T}}] = 1$
ρ_{f}	Feststoffdichte der Faser; $[\rho_{\text{f}}] = \text{g/cm}^3$
ρ_{Sus}	Dichte der Anfangssuspension; $[\rho_{\text{Sus}}] = \text{g/cm}^3$
σ_{D}	Einachsige Druckspannung; $[\sigma_{\text{D}}] = \text{N/mm}^2$
σ_{f}	Zugspannung der Faser; $[\sigma_{\text{f}}] = \text{N/mm}^2$
τ_0	Fließgrenze der Anfangssuspension bzw. des Treibmediums (Porenbeton); $[\tau_0] = \text{N/mm}^2$
τ_{f}	Schubspannung zwischen Faser und Grundmaterial; $[\tau_{\text{f}}] = \text{N/mm}^2$
φ	Relative Luftfeuchtigkeit; $[\varphi] = \text{‰}$
φ_{f}	Azimuthwinkel der Faserorientierung ($\eta_{\text{f},3\text{D}}$); $[\varphi_{\text{f}}] = \text{Grad}, (^\circ)$
$\chi_{\text{f},2\text{D}}$	Zweidimensionale Faserverteilung; $[\chi_{\text{f},2\text{D}}] = 1/\text{m}^2$
$\chi_{\text{f},3\text{D}}$	Dreidimensionale Faserverteilung; $[\chi_{\text{f},3\text{D}}] = 1/\text{m}^3$
ψ_{f}	Faserkonzentration; $[\psi_{\text{f}}] = \text{Vol.-%} / \text{Anfangssuspension}$
$\psi_{\text{f,krit}}$	Kritische Faserkonzentration; $[\psi_{\text{f,krit}}] = \text{Vol.-%} / \text{Anfangssuspension}$

Abkürzungen

AR	Alkaliresistent
AWSS	Abrasive Wasserstrahlschneiden
BGF	Alkaliresistente Bündelkurzglasfaser
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
MGF	Alkaliresistente wasserdispersible, monofile Kurzglasfaser
PAN	Polyacrylnitril
PP	Polypropylen
PPW	Porenbeton-Planstein nach DIN 4165
PVC	Polyvinylchlorid
WSS	Wasserstrahlschneiden
SG	Saint Gobain Vetrotex International (Cem-FIL)
SST	Schneiden mit der Sägetechnologien

1. Einleitung

1.1 Allgemeines

Steigende Bauwerksanforderungen erfordern die innovative Weiterentwicklung derzeitiger Baustoffe. Zielstellung muss die Verbesserung der funktionalen, ökonomischen und ökologischen Leistungsfähigkeiten sein. Porenbeton besitzt wesentliche Optimierungspotenziale.

Porenbeton (früher: „Gasbeton“) gehört zur Gruppe der Leichtbetone. Er wird als ein feinporiger Beton, der aus Zement und/oder Kalk und fein gemahlenen oder feinkörnigen kiesel-säurehaltigen Stoffen unter Verwendung porenbildender Zusätze, Wasser und gegebenenfalls Zusatzmitteln hergestellt und in gespanntem Wasserdampf gehärtet [N 24]. Charakteristisch ist eine ausgeprägte Makroporosität. Porenbeton erfüllt folgende Leistungsfähigkeiten:

- Herstellung im hoch automatisierten, industriellen Produktionsprozess,
- Geringer Primärenergieverbrauch in der Herstellung,
- Hohe Maßgenauigkeit der Plansteine bzw. -elemente,
- Hohe Druckfestigkeit im Verhältnis zur Rohdichte,
- Materialersparnis durch hohe Porosität,
- Nicht brennbar und nicht verrottbar,
- Gute Wärmedämmeigenschaften,
- Leichte Ver- und Bearbeitbarkeit,
- Gutes Preis-Leistungs-Verhältnis.

Porenbeton wird in der Bauindustrie in vielfältiger Form verwendet. Eingesetzt wird er u. a. als Mauerwerksstein, als Wand-, Decken- und Dachplattenelement in unbewehrter bzw. stabstahlbewehrter Form sowie als mineralische Dämmplatte im Wohn-, Gesellschafts- und Wirtschaftsbau, i. d. R. bei Gebäuden mit kleineren und mittleren Höhen. Weiterhin findet Porenbeton Anwendung als Ausfachungsmaterial im Fachwerkbau und bei Rahmenkonstruktionen. Beschaffenheit bzw. Eigenschaften der Plansteine bzw. Planelemente des Porenbetons sind durch Normungen oder bauaufsichtliche Zulassungen weitestgehend festgelegt. Im Gegensatz zu vielen anderen Baustoffbranchen sind die Absatzzahlen der Porenbeton-Industrie in den letzten Jahren in Deutschland stabil [13].

Im Jahre 2006 belief sich im Bereich der Mauerwerkssteine der Marktanteil des Porenbetons auf ca. 18,7%. Das ist ein Plus von 10,3% im Vergleich zum Jahr 2005. Weitere Absatzzuwächse im In- und Ausland sind zu erwarten [14].

1.2 Problemstellung

Kritische Zugbeanspruchungen führen bei Porenbeton zu einem spröden Versagen. Ein ausgeprägtes Nachbruchverhalten ist nicht vorhanden [92]. Porenbeton mit gesteigertem Festigkeits- und Verformungsvermögen könnte hier neue Anwendungspotenziale eröffnen. Die Leistungsfähigkeiten in den derzeitigen Anwendungsfeldern und damit auch die Qualität des Porenbetons könnten gesteigert werden.

Das erdbebensichere Bauen ist ein Anwendungsfeld mit großen Herausforderungen. Porenbeton wird hier, trotz seiner Leichtigkeit, aufgrund seines eingeschränkten Festigkeits- und Verformungsverhaltens nur reduziert eingesetzt. Eine Steigerung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens von Porenbeton könnte zu verstärktem Einsatz dieses Baustoffs auf dem Anwendungsgebiet des erdbebensicheren Bauens führen.

Anmerkung

Die Motivation für diese Arbeit ergibt sich aus einem bestimmten Belastungsfall unter Erdbebenbeanspruchung. Durch diesen Beanspruchungsfall, den zweiachsigen Plattenschub unter Vertikallastabtrag und zusätzlichem Horizontallastangriff von Mauerwerkswänden, können maßgebende Schädigungen am Bauwerk bzw. Sicherheitsrisiken entstehen. In Abhängigkeit von Belastungs-, Material- und Verbundparametern sowie konstruktiver Einbindung können sich folgende Versagensfälle ergeben: Druck-, Reibungs-, Zug- und Schubversagen (s. **Abb. 1-1**). Bei Porenbeton-Plansteinen tritt i. d. R. das Schubversagen ein.

Im Gegensatz zu anderen Mauerwerkskonstruktionen ist bei Porenbeton der Stein die Schwachstelle im Wandaufbau. Es kommt zu einem Steinversagen bei Überschreiten der Steinbiegezug- bzw. Steinzugfestigkeit [77].

Die Druckfestigkeit des üblicherweise verwendeten Dünnbettfugenmörtels (Druckfestigkeit $\beta_D = 10\text{--}20 \text{ N/mm}^2$) und die Verbundfestigkeit zwischen Dünnbettlagerfuge und Planstein sind höher als die Druckfestigkeit des Porenbeton-Plansteins ($\beta_D = 2\text{--}8 \text{ N/mm}^2$). Es bilden sich unter o. g. Belastungsfall schlagartig diagonal verlaufende Risse im Wandaufbau aus, größtenteils wahllos durch Stein und Fuge [90]. Daher ist eine Steigerung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens der Porenbeton-Plansteine überaus erstrebenswert.

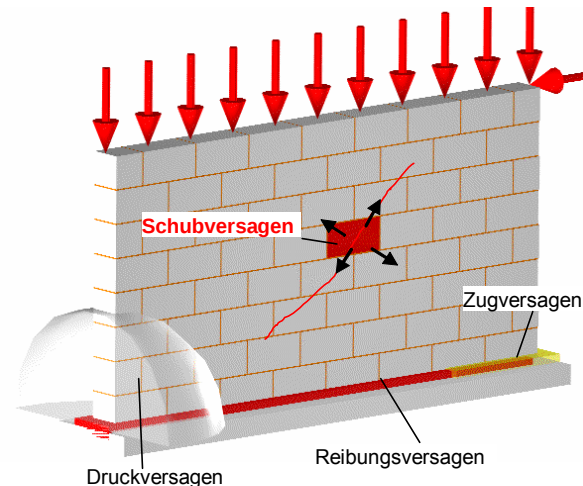


Abb. 1-1 Versagensfälle eines Mauerwerks unter zweiachsigem Plattenschub bei Vertikallastabtrag und zusätzlichem Horizontallastangriff in Anlehnung an [83]

In Regionen mit einem hohen Erdbebenrisiko kann ein leichtes Porenbeton-Planstein-Mauerwerk mit gesteigertem Festigkeits- und Verformungsverhalten eingesetzt werden, um, neben dem Wärmeschutz, eine gesteigerte Erdbebensicherheit zu gewährleisten. Ein Mauerwerk dieser Art kann mit hoher Ausführungsqualität auch von „Nicht-Fachkundigen“ gebaut werden. In vielen Ländern ist diese Bauweise traditionell verhaftet.

Auf der Suche nach einer Möglichkeit zur Steigerung des Festigkeits- und Verformungsvermögens von Porenbeton wird in dieser Arbeit die Wirksamkeit des Einbaus von Fasern untersucht. Seit Jahrtausenden nutzen Menschen beim Bauen die Vorzüge von Faserverbundmaterialien; Beton, Keramik und Kunststoffe können in der heutigen Zeit gezielt mit Fasermaterialien verstärkt werden [41], [50]. Je nach Anforderungen werden Fasern unterschiedlichen Materials, Form, und Konzentration eingesetzt. Der Grundgedanke einer Kombination von Faserverbundmaterialien ist die Stabilisierung des Grundbaustoffs durch Verbindung mit einem Fasermaterial und die damit gekoppelte Nutzung der positiven Eigenschaften des Fasermaterials. Geeignete Fasern können im Grundbaustoff durch höhere Energieaufnahme das Festigkeits- und Verformungsvermögen deutlich steigern; die spröde Entfestigung wird reduziert.

Die Vermutung liegt nahe, dass das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Porenbetons durch einen Einbau von geeigneten Fasern ebenfalls gesteigert wird. Erste Vorarbeiten, u. a. Patente und nicht veröffentlichte Forschungsarbeiten der Porenbeton-Industrie, bestätigen o. g. Verhaltensweisen. Systematische Überlegungen bzw. eingehende Untersuchungen sind nicht vorhanden. Im Rahmen dieser Arbeit sollen nunmehr Faserwahl, Herstellung und Tragverhalten unter Beanspruchungen untersucht werden. Ein praxisrelevanter Einsatz hat sich bis zum heutigen Tag nicht durchgesetzt.

Literaturrecherchen bzw. Vorüberlegungen weisen darauf hin, dass eine Reihe weiterer positiver Auswirkungen auf die Materialeigenschaften zu erwarten sind. Neben beanspruchungsspezifischen Steigerungen des Festigkeits- und Verformungsverhaltens des Porenbetons bei Fasereinbau lassen sich folgende weitere Wirksamkeiten vermuten:

- Stabilisierung der Anfangssuspension,
- Stabilisierung des Treibprozesses,
- Steigerung der Grünstabilität,
- Reduzierung der Standzeit bis zur Grünstandsfestigkeit,
- Reduzierung der Rissneigung bei Rohblocktransport in der Grünphase,
- Reduzierung der Rissneigung während der hydrothermalen Härtung,
- Verbesserung von Schlagfestigkeit und Verschleißwiderstand (Transport und Handling),
- Optimierung treibrichtungsabhängiger Eigenschaften durch Gefügestrukturbeeinflussung.

In der vorliegenden Arbeit sollen diese genannten Wirksamkeiten quantifiziert sowie ein Beitrag zum allgemeinen Verständnis des faserverstärkten Porenbetons geliefert werden. Langfristiges Ziel könnte sein, kurzfaserverstärkten Porenbeton als duktilen Baustoff ökonomisch nutzbar und für die Bemessung erfassbar zu machen. Aufgrund der großen Komplexität des zu betrachtenden Systems und der Vielzahl steuerbarer Gefüge-, Faser- und Treibprozessparameter werden im Rahmen dieser Arbeit die Wirkmechanismen vorzugsweise bei Variation einzelner Parameter betrachtet. Es wird ausschließlich Porenbeton im Rohdichtebereich 450-550 kg/m³ untersucht.

Zur Analyse bzw. Auswertung der Verhaltensweisen des faserverstärkten Porenbetons werden für die Baustoffforschung neuwertige Untersuchungsmethoden eingesetzt. Diese werden vorgestellt und ausführlich diskutiert.

1.3 Zielstellung / Inhalt der Arbeit

Folgende Problemstellungen werden u. a. analysiert:

- Einfluss der Fasern auf Treibkinetik, Porosierungsgrad und Gefügestruktur,
- Einfluss des Treibprozesses auf Verteilung und Orientierung der Fasern,
- Einfluss der hydrothermalen Härtung auf die Fasern,
- Einfluss der Fasern auf die Versagensmechanismen,
- Schneiden des faserverstärkten Porenbetons im industriellen Produktionsprozess.

Die Arbeit ist in 9 Kapitel gegliedert.

Kapitel 2 führt in die Grundlagen des Porenbetons ein. Mischungszusammensetzung, Herstellung, Gefügestruktur und -analysemöglichkeiten des Porenbetons werden erläutert. Die Zusammenhänge in der Herstellung werden herausgearbeitet. Eine Spannungs-, Dehnungs- und Versagensanalyse sowie eine Beschreibung des Bruch- und Entfestigungsverhaltens unter äußeren Beanspruchungen folgen. Die Gefügestrukturen werden in Beziehung zum Festigkeits- und Verformungsverhalten sowie zu den bauphysikalisch relevanten Transportphänomenen Wärme-, Schall- und Feuchtetransport gesetzt. Das Verformungsverhalten aus den inneren Beanspruchungsgrößen im Gebrauchszustand wird charakterisiert.

Kapitel 3 definiert Fasern. Es werden allgemein getriebene bzw. geschäumte faserverstärkte Werkstoffsysteme erörtert und mögliche Zusammenhänge zum faserverstärkten Porenbeton diskutiert. Eine Übersicht über die Möglichkeiten der Beschreibung sowie der Erfassungs- und Analyseverfahren von Faserstrukturen folgt. Mögliche Faserwirkmechanismen sowie ein Konzept zur Einarbeitung der Faserwirksamkeit werden vorgestellt. Die Erläuterungen der

Charakteristika von faserverstärktem Porenbeton sowie der aktuelle Wissensstand zu faserverstärktem Porenbeton unterstützen die Betrachtungen. Potenzielle Gefügestrukturveränderungen bei Fasereinbau werden dargestellt. Besonderheiten im Tragverhalten makroporöser faserverstärkter Werkstoffe werden beschrieben.

Kapitel 4 klassifiziert derzeit auf dem Markt befindliche Fasern. Es werden systematisch die Anforderungen, bezogen auf potenzielle Wirksamkeiten von Fasern im Porenbeton, herausgearbeitet. Es folgt eine theoretische Betrachtung zum Sinkverhalten von Fasern in der Anfangssuspension sowie Untersuchungen zu den Faserbeständigkeiten unter den hydrothermalen Härtungsbedingungen der Porenbeton-Herstellung. Anschließend können geeignete Fasern (Kurzfasern) unter Betrachtung potenzieller Wirksamkeiten benannt werden.

Kapitel 5 untersucht die Wirksamkeit von Kurzfasern im Porenbeton. Eine Auswahl von Kurzfasern wird unter Variation von Material- und Formbezogenheit in Mischungen unter produktionstechnisch relevanten Herstellungsbedingungen eingebaut. Spezifische Kurzfasern und Feststoffstrukturen werden untersucht, treibabhängige Phänomene in den Gefügestrukturen diskutiert. Das Festigkeits- und Verformungsverhalten wird treibrichtungs- und treibhöhenabhängig unter Druck-, kombinierter Druck-Schub- und Biegebeanspruchungen quantifiziert. Betrachtungen hydrothormaler Beständigkeiten und des Verbundverhaltens der Kurzfasern folgen. Bauphysikalisch relevante Transportphänomene sowie hygrisches Verformungsverhalten werden stichpunktartig unter Einfluss von Kurzfasern untersucht. Ziel ist, potenzielle Vorzugsfasern zur Steigerung der Leistungsfähigkeit des Porenbetons, u. a. zur Steigerung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens, zu benennen.

Kapitel 6 diskutiert das Verhalten von Kurzfasern in der Anfangssuspension, im Treibprozess und in der Grünphase des Porenbetons. Es werden die Einflussmechanismen von Kurzfasern auf die einzelnen Stadien der Herstellung diskutiert. So werden u. a. die Zusammenhänge zwischen Grundmaterial und Kurzfasern unter Einfluss der Treibprozessgrößen und der Variation von Fasermaterial, -form und -konzentration erläutert.

Kapitel 7 erarbeitet systematisch das Festigkeits- und Verformungsverhalten sowie die Veränderung der Gefügestruktur bei Einbau der alkaliresistenten (AR) Bündelkurzglasfasern und der wasserdispersiblen, monofilen AR-Kurzglasfasern. Diese stellen die Vorzugsfasern aus den Untersuchungen in Kapitel 5 für den kurzfaserverstärkten Porenbeton dar. Der Einbau beider Kurzfasern wird in Faserlänge und Faserkonzentration variiert. Das treibrichtungsabhängige Verhalten unter Druck-, kombinierter Druck-Schub- und Biegebeanspruchung wird untersucht und der Zusammenhang zwischen Gefügestruktur und beanspruchungsspezifischem Festigkeits- und Verformungsverhalten hergestellt. Das Verbundverhalten der Kurzfasern zum Grundmaterial wird im Anschluss herausgearbeitet.

Kapitel 8 beschreibt die derzeitige Schneidtechnologie über den „stehenden Drahtdurchzug“ bei Grünstandsfestigkeit im industriellen Herstellungsprozess des Porenbetons. Problemstellungen bei Fasereinbau werden erläutert und die Verfahrensgrenzen aufgezeigt. Es werden Lösungsansätze bei Nutzung der alternativen Schneidverfahren Druckflüssigkeitsschneiden und Schneiden mit der Sägetechnologie vorgestellt. Dazu werden Machbarkeitsstudien sowie systematische Untersuchungen durchgeführt. Ergänzend werden diese Verfahren an hydrothermal gehärtetem Porenbeton untersucht. Die Einflussmöglichkeiten zur Steuerung der Eigenschaften im industriellen Herstellungsprozess werden diskutiert.

Kapitel 9 liefert einen Überblick über die Ergebnisse dieser Arbeit. Es wird ein Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf und mögliche Einsatzgebiete des kurzfaserverstärkten Porenbetons gegeben.

2. Grundlagen des Porenbetons

Überblick

Aus mesoskopischer Sicht ist der Porenbeton ein Zweiphasensystem, bestehend aus kontinuierlicher Feststoff- (offen- und geschlossenporiges Grundmaterial) und diskreter Makroporenphase. Die Feststoffphase wird charakterisiert durch die Ausbildung der Calciumsilikathydratphasen bzw. der damit verbundenen Mikroporosität. Die Makroporenphase, bei Porenradien bis ca. zwei Millimeter, ist homogen im Baustoff verteilt. Die Makroporosität kann gezielt technologisch bzw. stofflich über die Porosierungsparameter gesteuert werden. Hohe Makroporositäten besitzen einen übergeordneten Einfluss auf eine Vielzahl von Eigenschaften, so u. a. auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten. Die Zusammenhänge und Beanspruchungsgrößen aus Herstellung und „Gebrauch“ sowie die bauphysikalischen Transportphänomene Wärme-, Schall- und Feuchtetransport werden ebenfalls direkt durch die Beschaffenheit der Gefügestruktur bestimmt. Unter kritischer Zugbeanspruchung zeigt sich ein sprödes Baustoffversagen; ein ausgeprägtes Entfestigungsverhalten ist nicht vorhanden.

2.1 Allgemeines

Die Herstellung des Porenbetons erfolgt stationär industriell in einem geschlossenen Produktionskreislauf. Als Ausgangsrohstoffe dienen quarzhaltige Fein- bzw. Grobsande, Branntkalk, Portlandzement, Zusatzstoffe (z. B. Flugaschen, Sulfatträger), Wasser und ein Porosierungsmittel (üblicherweise Aluminiumpulver bzw. -paste). Die fein gemahlenden Ausgangsrohstoffe werden mit Wasser zu einer Suspension (Wasser-Mehlkornmasse-Verhältnis: 0,5-0,7) vermischt und in Treib- bzw. Härtecontainer (ca. 8,0 x 2,0 x 0,85 m³) gegeben. Aus der für die Formgebung erforderlichen hohen Fließfähigkeit der Anfangs- bzw. der Treibsuspension resultiert ein bedeutend höherer Wasseranteil als für die chemischen Reaktionen notwendig ist [25]. Die Zugabe des Porosierungsmittels löst einen chemisch-physikalischen Treibprozess im alkalischen Anfangsmilieu durch Bildung von Wasserstoff aus. Die Suspension treibt unter Steifigkeitszunahme bei Bildung einer makroporösen Gefügestruktur („Treibkuchen“) auf. Aufgetriebene „Treibkuchen“ erreichen nach $t \approx 4$ h eine halbplastische Konsistenz und werden aus den Treib- bzw. Härtecontainern entnommen. Anschließend werden sie in gewünschte Stein-, Wand- und Plattenelementformate über Durchlauf von horizontal bzw. vertikal „stehenden Schneidedrähten“ geschnitten.

Die entscheidende Festigkeitsbildung erfolgt im gespannten Wasserdampf (definierte Hydrothermalsynthese - Autoklavierung, *griech.: hydro - Wasser, thermos - warm*). Dabei werden die geschnittenen Formate im zusammenhängenden Treibkörperblock gehärtet. Es bilden sich vorzugsweise kristalline (Tobermorit, Gyrolit, etc.) bzw. semikristalline (CSH I, CSH II) Calciumsilikathydratphasen. Calciumcarbonate und Calciumaluminathydrate sind weitere Reaktionsprodukte. Die quarzhaltigen Sande (Bindersand) dienen dabei als SiO₂-Lieferant. Der Branntkalk steht als CaO-Quelle zur Verfügung. Zusätzlich liefert der Zement CaO und SiO₂. Im technischen System des Porenbetons führt die Hydrothermalsynthese nicht zu einer vollständigen Umsetzung aller Reaktionspartner. Restbestandteile des Bindersands verbleiben im System. Der Sulfatträger dient u. a. der Verbesserung der Schwind- und Festigkeitseigenschaften des Endprodukts Porenbeton [91]. Die Prozessbedingungen in der industriellen Produktion werden üblicherweise konstant gehalten.

2.2 Gefügestruktur

Die chemische und physikalische Ausbildung der mikroporösen Feststoffphase (Porenradien $r < 0,02$ mm) sowie die Beschaffenheit der Makroporosität ($r = 0,02$ -2,0 mm) bestimmen die Porenbetoneigenschaften. Einflussgrößen der chemischen und physikalischen Mischungszusammensetzung sowie der Herstellung wurden u. a. in [12], [21], [46], [100] untersucht.

Die Eigenschaften des Porenbetons, z. B. das Verhalten unter inneren und äußeren Beanspruchungen, werden i. d. R. über die Rohdichte bzw. über die Veränderung der Eigenschaften der Makroporosität gesteuert. Je nach Bauteilanforderung werden üblicherweise Rohdichten zwischen 300-1 000 kg/m³ bei Porositäten zwischen 60-90 Vol.-% eingestellt. Die Makroporenphase hat u. a. auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten einen übergeordneten Einfluss [25], [29]. Bezogen auf die Gesamtporosität beträgt die Makroporosität zwischen 60-80 Vol.-%. Die Makroporosität schließt, neben der künstlichen Luftporosität aus dem Treibprozess, Lufteinschlüsse aus der Herstellung sowie Treibrisse ein [37].

Die Erklärung der Eigenschaften des Porenbetons erfordert stets die Einbeziehung der makroporösen Gefügestruktur. Vereinfachte Annahmen über die alleinige Berücksichtigung der Rohdichte sind nur eingeschränkt sinnvoll [29].

2.2.1 Grundlagen

Die Gefügestruktur makroporöser Materialien wird durch die formbezogene Beschaffenheit von Feststoff- bzw. Makroporenphase und deren räumlicher Anordnung charakterisiert.

Die mikroporöse Feststoffphase des Porenbetons lässt sich nach **Abb. 2-1** in die mesoskopischen Bestandteile Steg, Stegwand und -knoten unterteilen. Steg, Stegwand und -knoten trennen die Makroporen voneinander. Die Feststoffphase des Porenbetons kann u. a. über folgende Kennwerte beschrieben werden [55]:

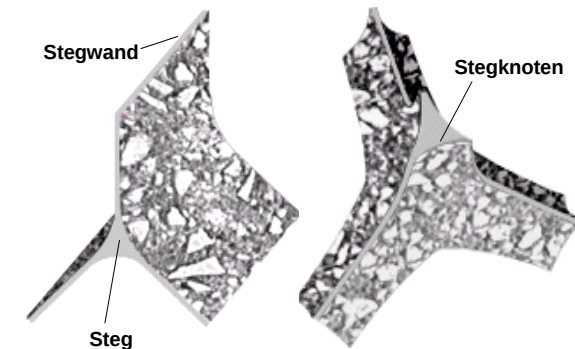


Abb. 2-1 Darstellung von Steg, Stegwand und Stegknoten in Anlehnung an Schick [68]

- Orientierung der Feststoffphase (η_F),
- Lokale Masseverteilung der Feststoffphase,
- Anteil und Größenverteilung der Mikroporosität (V_{MP}),
- Stegausbildung: mittlere Steglänge (l_S) und -dicke (d_S),
- Volumenverhältnis zwischen Stegen, Stegwänden und Stegknoten,
- Stegwandausbildung: mittlere Stegwandlänge (l_{SW}) und -dicke (d_{SW}),
- Volumenanteile der Feststoffphase (V_F) (offen- bzw. geschlossenporige Anordnung),
- Knotenausbildung: mittlerer Knotendurchmesser (d_K), Anzahl der Steganschlüsse (n_{KS}).

Die Makroporenphase kann u. a. über folgende Kennwerte beschrieben werden [29], [33]:

- Makroporenintensität (I_P),
- Volumenanteil der Makroporenphase (V_P),
- Oberflächenanteil der Makroporenphase (A_P),
- Mittleres Krümmungsmaß der Makroporen,
- Mittlere Orientierung (η_P) / -sphärizität (-rundheit) (c_P) der Makroporen,
- Größenverteilung der Makroporenphase, z. B. Radienverteilung ($g(r_P)$).

Neben der Analyse von Anzahl, Größe und Form der Feststoff- und Makroporen-Phasenobjekte erfordert die Beschreibung der Gefügestruktur eine Charakterisierung der räumlichen Anordnung dieser Objekte. Die Nachbarschaftsbeziehungen können in der Feststoffphase, u. a. über die Abstände der Steg-, Stegwand- bzw. Knotenschwerpunkte und in der Makroporenphase u. a. über die Abstände der Makroporenschwerpunkte ermittelt werden. Die jeweiligen Schwerpunkte werden dabei als geometrische Punktmuster erfasst und über Verteilungs- bzw. Korrelationsfunktionen beschrieben. Diese enthalten i. d. R. statistische Informa-

tionen über die Wahrscheinlichkeit bestimmter geometrischer Anordnungen der Bestandteile. Verfahren zur statistischen Analyse dieser Punktanordnungen, die aus der stochastischen Geometrie bekannt sind, werden als Hilfsmittel eingesetzt [86].

Eine leistungsfähige Aussage über die Anordnung von Feststoff- bzw. Makroporenphasenschwerpunkte ergibt sich u. a. aus der Paarkorrelationsfunktion ($G(r)$) nach Gl. [2-1].

$$G(r) = \left(\frac{V}{N} \right) \cdot \left(\frac{n(r)}{4\pi r^2 dr} \right) \quad [2-1]$$

G	Paarkorrelation; $[G] = 1$	N	Anzahl der Objektschwerpunkte; $[N] = 1$
r	Radius der betrachteten Kugelschale; $[r] = \text{mm}$	$n(r)$	Mittlere Anzahl der Objektschwerpunkte in der Kugelschale zwischen r und $r+dr$; $[n] = 1$
V	Volumen der betrachteten Kugelschale; $[V] = \text{mm}^3$		

Die Paarkorrelationsfunktion beschreibt die räumliche Korrelation der Objektschwerpunkte [29] und ermöglicht somit Aussagen über die relative Häufigkeit der Abstände der Objektschwerpunkte. Sie dient als Maß für den gegenseitigen Einfluss der Objekte.

2.2.2 Gefügestrukturanalyse - Allgemeines

Peters [57] und Scharfenberg [67] geben einen umfassenden Überblick zur digitalen Gefügestrukturerfassung sowie zur Gefügestrukturanalyse von schaum- bzw. porös-strukturierten Werkstoffsystemen. Die Verfahren sind von den Material- und Formeigenschaften des Werkstoffs abhängig. Verfahrensspezifisch ergeben sich qualitativ unterschiedliche Bewertungen.

Gefügestrukturerfassung

Die Gefügestrukturerfassung erfolgt üblicherweise über bildgebende Rück- sowie Durchstrahlungsverfahren an Probekörpern. Die Bilddarstellung besteht verfahrensabhängig aus zwei- (2D) bzw. dreidimensionalen (3D) Informationen. Die Informationen sind computergestützt digitalisiert und können einer 2D- bzw. 3D-Bildanalyse unterzogen werden.

Rückstrahlungsverfahren erfassen, über Licht- bzw. Elektronenstrahlprojektionen, 2D ortsbezogene Oberflächeninformationen der Struktur. Lichtbasierte Projektionen können bei schaum- bzw. porös-strukturierten Werkstoffsystemen durch farbliche Differenzierung der Einzelphasen Makroporosität und Feststoff bzw. durch Schattenbildung entstehen. Durch das Einfärben der Makroporen werden exaktere Differenzierungen der Phasen möglich [29]. Elektronenstrahlverfahren nutzen zur Strukturerfassung die Wechselwirkungen von Elektronen und Material. Fehlende Tiefeninformationen können bei beiden Methoden über Schnittstreifenverfahren sowie stereoskopische und stereologische Verfahren erhalten werden. Schnittstreifenverfahren rekonstruieren 2D-Informationen aus verschiedenen Tiefen zu einer räumlichen Information (3D) [57]. Bei stereoskopischen Verfahren wird über Aufnahme eines Objekts aus verschiedenen Richtungen ein oberflächenorientiertes Bild aufgebaut. Es lässt sich aus den einander zugeordneten Abbildungen eines Objektpunkts dessen Lage im Raum berechnen [67]. Stereologische Verfahren transformieren, bei Nutzung struktureller Regelmäßigkeiten, ebene Flächenprojektionen über mathematische Modelle in den Raum [86].

Durchstrahlungsverfahren (Radiographien) erfassen 2D ortsbezogene Tiefeninformationen bei Objektdurchstrahlung durch Detektierung der geschwächten Strahlung. Bilder ergeben sich aus den strukturabhängig divergierenden dichtebasierenden Adsorptionskoeffizienten der Phasen (Feststoff und Makroporosität). Es entsteht eine Projektion des Volumens auf eine Fläche. Dabei werden Teilchenenergien (u. a. Neutronen) bzw. elektromagnetische und mechanische Strahlungen bzw. Wellen (u. a. Röntgenstrahlung, Schall) genutzt. Es wird 2D die Gefügestruktur bei zusätzlichem Erhalt einer integralen Tiefeninformation abgebildet.

Zum Erhalt einer direkten tiefenaufgelösten ortsbezogenen 3D-Gefügestrukturinformation lässt sich die Computertomographie (CT, „*tomos*“ - *schneiden*, „*graphos*“ - *zeichnen*) nutzen.

Diese ermöglicht eine räumliche Bildinformation.

Bei der Computertomographie wird eine Probe um kleine Winkel rotierend umlaufend radiographiert (s. Abb. 2-2). Aus den digitalisierten winkelabhängigen Einzelprojektionen werden dann computergestützt horizontale Schnittebenen über numerische Rekonstruktionen generiert. Die Ebenen werden zu vollständigen räumlichen Bilddarstellungen zusammengeführt [7], [54].

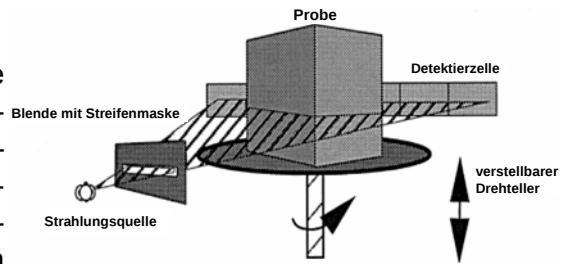


Abb. 2-2 Darstellung der Durchstrahlungs-Computertomographie (CT) [23]

Gefügestrukturanalyse

Grundlage der digitalen Gefügestrukturanalyse ist ein diskreter und quantisierter Bild-Datensatz (pixel- (2D) bzw. voxelbasiert (3D)). Die digitalen 2D- bzw. 3D-Bildinformationen der zu analysierenden Einzelobjekte müssen eineindeutig segmentierbar und labelbar sein. Die zu analysierenden Phasen werden i. d. R. über Schwellwertoperationen aus der gesamtheitlichen Datensatz-Information extrahiert und binarisiert. Der Datensatz durchläuft anschließend ein "Labelling", bei dem jedem Einzelobjekt eineindeutig ein Grauwert zugeordnet wird. Die Einzelobjekte können, wenn die geometrischen Parameter der Bildaufnahme bekannt sind, pixel- bzw. voxelbasiert computergestützt automatisiert vermessen und über o. g. Kennwerte beschrieben werden. Über eine Aufsummierung der Einzelobjektinformationen ergeben sich Gesamtbetrachtungen für die Ebene oder im Raum. Derzeit sind eine Reihe von 2D- und 3D-Bildanalysesoftwaretools auf dem Markt, so u. a. [S1], [S2]. Diese Tools analysieren routinemäßig einen Großteil der in Kap. 2.2.1 genannten Kennwerte.

Die 2D-Bilderfassung und -analyse weist i. d. R. gegenüber der 3D-Betrachtung wesentliche Einschränkungen in der Genauigkeit auf. Für den Erhalt aussagekräftiger Informationen sollte die 3D-Analyse genutzt werden. Der Rechenaufwand einer direkten 3D-Analyse bei Nutzung von 3D-Tomogramm-Datensätzen ist wesentlich höher.

2.2.3 Gefügestrukturanalyse - Porenbeton

Porenbeton weist eine Porengrößenverteilung über sechs Größenordnungen auf.

Abb. 2-3 zeigt beispielhaft eine charakteristische Porenradienverteilung ($g(r)$) des Porenbetons mit einer Rohdichte $\rho_{pb} = 450 \text{ kg/m}^3$. Die beiden Peaks der Radienverteilung zeigen die jeweiligen Maxima der Mikro- und Makroporosität.

In der Vergangenheit erfolgte die Gefügestrukturanalyse des Porenbetons vor allem über die Beschreibung der Kennwerte der Makroporenphase. Die zu analysierende makroporöse Gefügestruktur wurde i. d. R. 2D durch lichtbasierte Projektionen erfasst. Durch einen farblichen Kontrast konnte die Makroporosität der Flächenschnitte im Vorfeld deutlich hervorgehoben werden (s. Kap. 2.2.2).

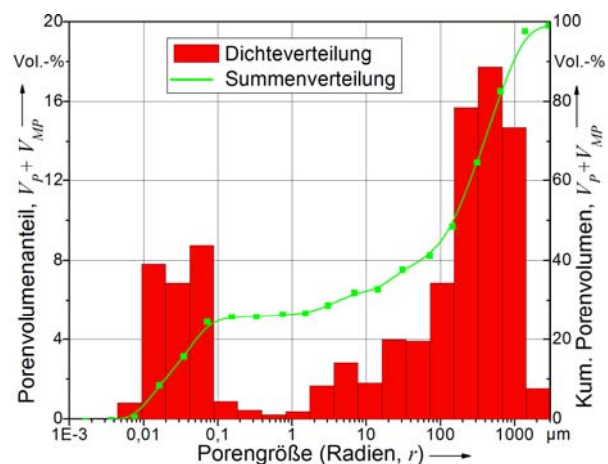


Abb. 2-3 Porenradienverteilung des Porenbetons (Mikro- und Makroporosität) mit einer Rohdichte $\rho_{pb} = 450 \text{ kg/m}^3$

Im Anschluss wurde die digitale 2D-Bildanalyse in Verbindung mit Verfahren aus der Stereologie und der stochastischen Geometrie angewendet [58], [37], [29]. Dabei erfolgte die Umwandlung der ebenen Schnittinformationen in 3D-Kennwerte unter der vereinfachten Annahme sphärischer Makroporen und isotroper Anordnung der Makroporen nach Gl. [2-2].

$$V_P \sim A_P \sim L_P \sim P_P \quad [2-2]$$

V_P *Volumenanteil der Makroporosität*

A_P *Flächenanteil der Makroporosität*

L_P *Linienanteil der Makroporosität*

P_P *Punktanteil der Makroporosität*

Die Annahme sphärischer Makroporen stellt eine grobe Vereinfachung der Gegebenheiten des Porenbetons dar. Charakteristisch für den Porenbeton ist die Ausbildung einer anisotropen und von der Mischungszusammensetzung und den Treibprozessbedingungen abhängigen Ausbildung der Makroporosität. Es bilden sich vorzugsweise flachliegende rotationselliptische Makroporen orthogonal zur Treibrichtung aus [99]. Ursache dafür sind:

- Partikelsedimentation in der Anfangssuspension (Instabilität der Anfangssuspension),
- Hydrostatischer Druck der auftreibenden Masse,
- Temperaturgradient innerhalb des Treibkörpers,
- Reibungskräfte an der Schalungswand,
- Auftrieb der entstehenden Gasblasen [53].

Bei der Bildanalyse wird der Porenbeton i. d. R. als stochastisches Keim-Korn-Modell mit kugelförmigen Makroporen aufgefasst. Die räumlichen Beziehungen der Makroporen entsprechen einem „Soft-Core“ Punktprozess [86]. Dabei unterschreiten die Punktabstände der Porenschwerpunkte den Abstand $2r$ nicht; es finden keine Überschneidungen zwischen den Makroporen statt. He [29] zeigt über die Analyse der Paarkorrelationsfunktion (s. Kap. 2.2.1), dass näherungsweise bei einem Radius $r = 1$ mm die Makroporosität von jedem Punkt der Kugelschale statistisch homogen verteilt ist. Es existiert eine Nahordnung zwischen den Makroporen; eine Fernordnung fehlt.

Bei Erhöhung der mittleren Porengrößen steigt der Einfluss der Vorzugsorientierung; die Rohdichte im Treibkörper nimmt nach oben hin ab [29], [53]. He [29] stellt fest, dass ρ_{Pb} über die Treibhöhe, im Vergleich zum mittleren Rohdichtewert, um ca. 3,5% variiert. Dieser Wert gilt für Porenbeton mit $\rho_{Pb} = 400\text{--}600 \text{ kg/m}^3$. Es wird eine Linearität zwischen Rohdichte (ρ_{Pb}) und Makroporenvolumen (V_P) festgestellt. Die Porengrößenverteilung der Makroporosität folgt näherungsweise einer Normalverteilung.

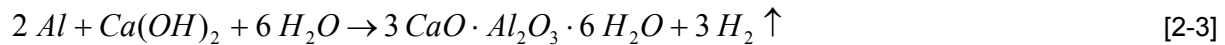
2.3 Herstellung des Porenbetons

Porenbeton erhält in einem Treibprozess, in Abhängigkeit von der Gasbildung und den Fließeigenschaften des Treibmediums, seine makroporöse Gefügestruktur (s. Kap. 2.2). Der „Treibkuchen“ erfordert frühest mögliche Grünstabilität und -standsfestigkeit. Während der hydrothermalen Härtung ergeben sich hygrische und thermische Beanspruchungen im Härtungsgut. Diese Beanspruchungen können zu Eigenspannungen bzw. bei Überschreitung lokaler Grenzzugspannungen zu Mikrorissen führen. Kritische Beanspruchungen führen zu Trennrissen im Porenbeton.

2.3.1 Treibprozess

Die Anfangssuspension des Porenbetons ist ein mehrphasiges, heterogenes und dispersibles Stoffsystem (Suspensionsfluid = kolloide Dispersion). Mesoskopisch betrachtet besteht es aus kontinuierlicher Wasser- und fein verteilter Partikelphase.

Der Treibprozess findet über die Wasserstofffreisetzung bei Umsetzung des Porosierungsmittels, i. d. R. Aluminiumpulver bzw. -paste, in der wässrigen alkalischen Anfangssuspension des Porenbetons nach Gl. [2-3] statt.



Im Treibprozess kommt es zu einer vollständigen Umsetzung des Porosierungsmittels; in der Anfangssuspension entsteht eine feindisperse Gasphase. Diese Gasphase wächst, am Ende des Treibprozesses ergibt sich unter günstigen Bedingungen ein stabiler, makroporöser „Treibkuchen“. Chemische, oberflächenphysikalische und mechanische Wechselwirkungen interagieren im Treibmedium. Treibprozessfördernde und treibprozesszerstörende Mechanismen beeinflussen sich in einem metastabilen System gegenseitig.

2.3.1.1 Treibmechanismen, Strukturbildung und Einflussparameter

Der Treibprozess kann über folgende Größen (Porosierungsparameter) gesteuert werden:

- Treibmilieu: Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Luftdruck der Exposition,
- Chemische und physikalische Zusammensetzung der Ausgangssuspension,
- Anteil des Porosierungsmittels sowie dessen zeitliche Gasfreisetzungsrate,
- Geometrische Verhältnisse des Treibmediums,
- Beschaffenheit der Schalungsoberfläche,
- Anteil an Detergentien [91],
- Vibrationseinwirkung [25].

Der Treibprozess ist, in Abhängigkeit von o. g. Parametern, nach 25-45 min abgeschlossen.

Nach Peters [57] lassen sich Treibprozesse kolloider Dispersionen vereinfacht in die vier Phasen Nukleierung, Wachstum, Deformation und Durchbruch (Koaleszenz) einteilen:

In der Nukleierungsphase (s. **Abb. 2-4, 1. Stadium**) bilden sich, vorzugsweise an den Grenzflächen zu Partikeloberflächen, kleinste Nukleoidkeime durch die Gasfreisetzung (s. Gl. [2-3]). Sukzessive Gasfreisetzung lässt neben weiterer Nukleierung das Wachstum der Nukleoidkeime durch Gasanlagerung voranschreiten. In den Nukleoiden baut sich ein Druck (p_i) Laplace-Druck, s. Gl. [2-4] auf. Dieser Druck ist abhängig vom Radius der Nukleoiden. Er ist bedeutend höher als der Sättigungsdruck des Suspensionsfluids. Die Nukleoiden werden größer; es kommt zum Porenwachstum.

$$p_i(r) = \frac{2 \gamma}{r} \quad [2-4]$$

p_i Porennendruck (Laplace-Druck); $[p_i] = \text{N/mm}^2$

γ Oberflächenspannung; $[\gamma] = \text{N/mm}$

r Radius des Nukleoid bzw. der „treibenden“ Makropore; $[r] = \text{mm}$

Mit fortschreitendem Porenwachstum vollzieht das Treibmedium eine nach oben gerichtete Strömungs- bzw. Dehnungsbewegung (s. **Abb. 2-4, 2. Stadium**). Diese ist abhängig von den o. g. Porosierungsparametern sowie dem sich daraus ergebenden Fließverhalten des Treibmediums und dessen zeitlicher Änderung. Lokal diffuse Porenbildung und heterogene Beschaffenheit des Treibmediums lassen ungleichmäßige, zeitlich und räumlich veränderliche „Strömungs- bzw. Treibfelder“ entstehen. Es kommt zu Partikel-Partikel-Wechselwirkungen über Kontakt- und Reibungskräfte (s. **Abb. 2-5**); Widerstandskräfte, u. a. aus Scher-, Druck- sowie Trägheitskräften, wirken dem Treibprozess entgegen.

Bei Interaktion zweier unterschiedlich großer „gasgefüllter“ Poren kann es durch Diffusion, aufgrund von Druckunterschieden, zu Gasumlagerungen von den kleinen in die großen Poren kommen (Laplace Druckdifferenz-Ausgleich = Ostwald-Reifung, s. Gl. [2-5]). Die kleineren Poren verschwinden. Die Ostwald-Reifung zählt zu den wichtigsten destabilisierenden Mechanismen während eines Treibprozesses [8].

$$\Delta p_i = 2 \cdot \gamma \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad [2-5]$$

Δp_i Laplace Druckdifferenz; $[\Delta p_i] = \text{N/mm}^2$

r_1, r_2 Porenradien zweier interagierender Poren; $[r_i] = \text{mm}$

Bei theoretischer Annahme äquivalenter sphärischer Makroporen sowie dichtester Makroporenpackung ist das maximale Makroporenvolumen $V_p \approx 75 \text{ Vol.-%}$. Weiteres Wachstum führt bei Poreninteraktionen zu (Poren-)Deformationen (s. Abb. 2-4, **3. Stadium**). Es entstehen polyedrisch begrenzte Porenformen. Bei fortschreitendem Wachstum werden die Stegwände dünner bzw. weiter gedehnt. Geringe Druckunterschiede, u. a. aus der o. g. Ostwald-Reifung, können zu einem Reißen der Stegwände führen (Koaleszenz). Dieses Stadium wird i. d. R. im Treibprozess der Porenbeton-Herstellung nicht erreicht. Ausnahme ist die Calciumsilikatdämmplatte (Rohdichte: $\rho \approx 100 \text{ kg/m}^3$). Partikel, die sich in den Stegwänden befinden, können die Neigung zur Koaleszenz steigern [57]. Kritische Bedingungen führen zu Instabilitäten im Treibmedium.

Die Fließeigenschaften im Treibmedium ändern sich im Verlauf der Zeit; Einflussfaktoren sind Flüssigkeitstransport bzw. -verbrauch, Partikelorientierung, stabilisierende Porengasdrücke und die Bildung von ersten Hydratationsprodukten [12]. Das porosierende disperse Treibmedium steift an; die Anziehungskräfte bei Verzahnen und Anhaften der Partikel steigen. Es kommt zu erhöhten direkten Partikel-Partikel-Wechselwirkungen im Treibmedium. Die Treibbewegung wird unter kritischen Fließeigenschaften trotz fortgesetzter Gasfreisetzung eingeschränkt.

Flüssigkeitstransport findet durch Kapillardrücke und Drainageeffekte statt. Flüssigkeitstransport durch Kapillardruck entsteht, da innerhalb der Stege der Druck (p_1) (s. Abb. 2-5, (4)) geringer ist als der Druck in den benachbarten, flacheren Stegwänden (p_2), (p_2), (p_2) (s. Abb. 2-5, (1), (2), (3)). Diese Druckdifferenz ergibt sich aus der direkten Abhängigkeit zum örtlichen Krümmungsradius (s. Gl. [2-6]). Das Flüssigkeitsmaterial der Stegwände wird in Richtung der Stege (4) transportiert.

$$p_{(2,3,4)} - p_1 = \gamma \cdot \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_{(2,3,4)}} \right] \quad [2-6]$$

p_1 Kapillardruck innerhalb des Stegs; $[p_i] = \text{N/mm}^2$

$p_{(2,3,4)}$ Kapillardruck innerhalb der Stegwände; $[p_i] = \text{N/mm}^2$

r_1 Krümmungsradius an den Stegen; $[r_i] = \text{mm}$

$r_{(2,3,4)}$ Krümmungsradius an den Stegwänden; $[r_i] = \text{mm}$

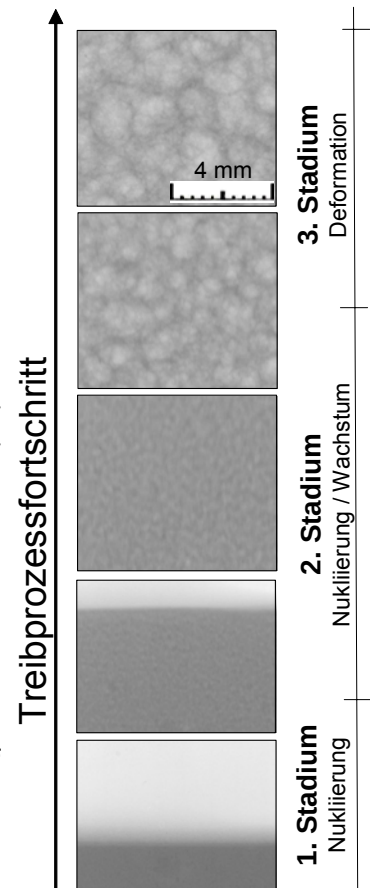


Abb. 2-4 Röntgen-radiographische Darstellung des Treibprozessfortschritts des Porenbetons

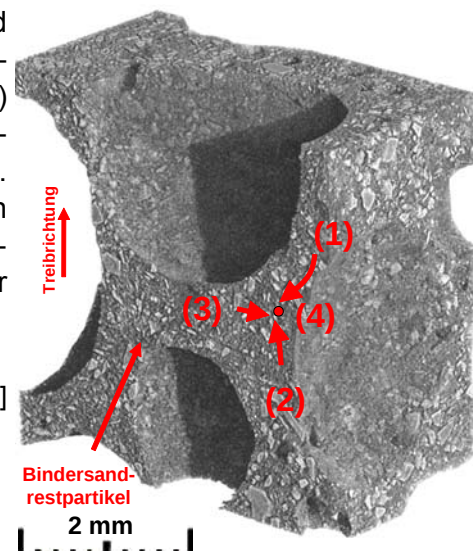


Abb. 2-5 Darstellung eines Ausschnitts einer Synchrotron-Computertomographie des Grünmaterials

Der durch Kapillarkräfte entstehende Unterdruck führt zu einem Flüssigkeitssog aus den ebenen Wandbereichen in die stark gekrümmten Stegbereiche. Die Stege verdicken bzw. die Stärke der Stegwände reduzieren sich.

Der Flüssigkeitstransport über den Drainageeffekt ergibt sich aus dem lokalen Wasserabfluss. Ursache dafür sind die Gravitationskräfte. Die Flüssigkeit läuft, aufgrund der Querschnittsverhältnisse, größtenteils durch die Stege abwärts. Das Treibmedium „trocknet“ von oben nach unten allmählich aus. Beide Transportphänomene werden u. a. durch die Partikelpackungsdichte und die Wechselwirkungen der Partikel im Treibmedium beeinflusst.

2.3.1.2 Stabilitätsverhalten im Treibprozess

Die Anfangsbedingungen und die fortschreitende Veränderung der physikalisch-chemischen und physikalisch-mechanischen Fließeigenschaften sind maßgebend für die Strukturformierung im Treibprozess. Sie haben entscheidenden Einfluss auf die Kinetik der Gasausscheidung und des Treibens, die Größe und Verteilung der entstehenden Makroporen sowie die Gas haltende Fähigkeit und Stabilisierung der Struktur [51].

Das Stabilitätsverhalten des Treibmediums lässt sich über die Gleichgewichtsbedingung der angreifenden Kräfte an der Einzelpore beschreiben (s. Gl. [2-7]), [51]. Es können die obere und die untere Stabilitätsgrenze einer Pore bestimmt werden (s. Gl. [2-8] und Gl. [2-9]). Oberhalb dieser Stabilitätsgrenze findet ein Wachstum der Pore statt, unterhalb dieser Stabilitätsgrenze ist eine Instabilität der Pore zu erwarten.

$$p_i = p_a + p_\gamma + p_{hy} \pm p_{\tau_0} \quad [2-7]$$

p_i	Poreninnendruck; $[p_i] = \text{N/mm}^2$	p_{hy}	Hydrostatischer Druck auf die Pore; $[p_{hy}] = \text{N/mm}^2$
p_a	Druck des Außenmediums; $[p_a] = \text{N/mm}^2$	p_{τ_0}	Druck zum Überwinden der Fließgrenze; $[p_{\tau_0}] = \text{N/mm}^2$
p_γ	Oberflächenspannung; $[p_\gamma] = \text{N/mm}^2$		

$$p_{i,max} = p_a + h \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{V_P}{100}\right) + \frac{2 \cdot \gamma}{r} + \frac{2 \cdot A_P \cdot \tau_0}{1 - A_P} \quad [2-8]$$

$$p_{i,min} = p_a + h \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{V_P}{100}\right) + \frac{2 \cdot \gamma}{r} - \frac{2 \cdot A_P \cdot \tau_0}{1 - A_P} \quad [2-9]$$

$p_{i,max}$	Poreninnendruck bei Porenwachstum; $[p_{i,max}] = \text{N/mm}^2$	V_P	Porosität (Makro); $[V_P] = \%$
$p_{i,min}$	Poreninnendruck bei Porendestabilität; $[p_{i,min}] = \text{N/mm}^2$	γ	Oberflächenspannung; $[\gamma] = \text{N/mm}$
p_a	Außendruck oberhalb des Treibmediums; $[p_a] = \text{N/mm}^2$	r	Radius der Pore (Makro); $[r] = \text{mm}$
h	Höhe der Treibmediumssäule; $[h] = \text{m}$	A_P	Oberfläche der Pore; $[A_P] = \text{mm}^2$
ρ	Rohdichte des Treibmediums; $[\rho] = \text{kg/m}^3$	τ_0	Fließgrenze des Treibmediums; $[\tau_0] = \text{N/mm}^2$

Die Porenstabilität (y) errechnet sich aus Differenz der kritischen Druckgrenzen zu Gl. [2-10].

$$y = p_{i,max} - p_{i,min} = \frac{4 \cdot A_P \cdot \tau_0}{1 - A_P} \quad [2-10]$$

y	Strukturstabilität der treibenden Makropore; $[y] = \text{N/mm}^2$
-----	--

Es zeigt sich, dass ausschließlich Fließgrenze (τ_0) und Porosierungsgrad (μ_T) des Treibmediums auf die Strukturstabilität einer Makropore einen Einfluss haben.

Neben den Instabilitäten der Makroporen können die o. g. Flüssigkeitstransportmechanismen, Kapillardruck und Drainage, in Abhängigkeit von der Gasfreisetzungsrates, Ausgangsviskosität und Viskositätsänderung, zu Instabilitäten im „Treibkuchen“ führen [25]. Sog- bzw. Druckkräfte führen dabei bei Unterschreitung einer Mindestdicke bzw. eines kritischen Fließverhaltens zu Instabilitäten in den Stegwänden. Es kommt zu Rissbildung und damit zu Koaleszenz. Bindersandrestpartikel aus dem Treibmedium können diesen Effekt verstärken [8], [57]. Starke lokale Instabilität führt zu Instabilität im gesamten Treibmedium.

Weiterhin können Schwankungen in der Temperatur der Mischungsbestandteile und saisonbedingte Veränderungen der Umgebungstemperaturen zu einer Steigerung bzw. Reduzierung der Gasfreisetzungsrates führen. Bei fehlender Abstimmung der Gasfreisetzungsrates und der Fließeigenschaften zeigen sich auch hier Instabilitäten im Treibmedium. Es kann im auftreibenden Medium zu trichterförmigen Oberflächendefekten, horizontal geschichteten Kavernenissen in den Seitenflächen oder ungleichmäßigen Gefügestrukturen kommen [25].

2.3.2 Grünstabilität und Grünstandsfestigkeit

Der „Treibkuchen“ erfordert Grünstabilität. In der Frühphase der Standzeit nach Abschluss des Treibprozesses ist der „Treibkuchen“ stark anfällig gegenüber äußeren Einwirkungen. Weiterhin können Grünverformungen, aufgrund instationärer Wasserverhältnisse im Treibkuchen, zu Beanspruchungen führen. Die Dispersibilität der partikulären Bestandteile und deren mittlerer Abstand sowie der Wasserhaushalt des „Treibkuchens“ sind, neben der Wirksamkeit des Bindemittels (s. Kap. 2.1), wichtige Einflussgrößen für die Grünstabilität [25].

Die Grünphase ist geprägt von instationären Wasserverhältnissen im „Treibkuchen“. Die o. g. Transportphänomene Drainage und Kapillardruck sowie die Hydratations- und Verdunstungsprozesse reduzieren den Wasserhaushalt im Zeitverlauf. Der „Treibkuchen“ steift an. Durch das „Kalklösen“ und die Zementhydratation bei Temperaturen bis zu $T \approx 100^\circ\text{C}$ ist die Verdunstungsrate hoch. Die Verdunstung unterliegt dabei einem Gradienten von innen nach außen und ist an der Oberfläche im Bereich der Treibkappe am größten.

In der Frühphase sind die Anziehungskräfte gering, die partikulären Bestandteile im Treibmedium werden durch Schweb- bzw. Stützkraften in einem formstabilen Zustand (Partikelnetzwerk) gehalten. Durch die o. g. Reduzierung des Wasserhaushalts im „Treibkuchen“ entstehen fortschreitend zwickelartige Wasserbrücken zwischen den Partikeln.

An den Berührungsflächen Partikel-Wasser-Luft wirken Zugkräfte aus der Oberflächenspannung in Richtung der Wasseroberfläche (s. Abb. 2-6). In den Zwickelinnen herrschen kapillare Unterdrücke. Das Material schwindet. In der Spätphase der Standzeit verdunsten die Wasserbrücken zwischen den Partikeln sukzessiv. Hervorgerufen durch die fehlenden Zwickelzugkräfte, kann das Material erneut quellen. Es werden daraus folgend u. a. Van-der-Waals-Kräfte zwischen den Partikeln im „Treibkuchen“ wirksam.

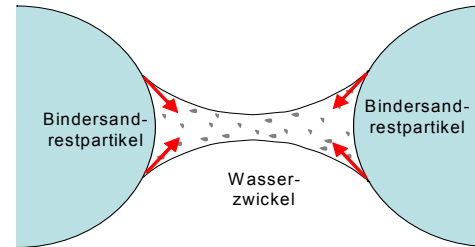


Abb. 2-6 Schematische Darstellung der Kräfteverhältnisse in einem Wasserzwickel zwischen Bindersand-restpartikeln [25]

Darüber hinaus ergeben sich erste chemische Reaktionen der Bindemittel Kalkhydrat und Portlandzement (s. Kap. 2.1). Es zeigen sich, neben einer Stabilisierung des Treibkuchens, Hydratationsverformungen. Der Portlandzement wird der Mischung u. a. zugegeben um frühest möglich ausschaltbare und händelbare Rohblöcke und Schneidfähigkeit im industriellen Produktionsprozess der Herstellung zu erhalten; geringere Durchlaufzeiten sind so möglich.

Die o. g. Prozesse führen zu einer steigenden Festigkeit im „Treibkuchen“. Die Reduzierung des Wasserhaushalts kann Verformungen im „Treibkuchen“ bewirken; die Grünverformungen steigen mit abnehmender Makroporosität. Die sinkende elastisch-plastische Verformbarkeit bzw. die innere Relaxation kann in der Spätphase der Standzeit zu Mikrorissen im „Treibkuchen“ führen. Makroskopische Trennrissen sind unter kritischen Bedingungen möglich; das Rissrisiko nimmt mit Annäherung an die Grünstandsfestigkeit (s. Kap. 2.1) bzw. bei einer mit Prozessverzögerung verbundenen fortschreitenden ungewollten Abkühlung und starken Wasserreduktion im „Treibkuchens“ zu. Begünstigt werden diese Prozesse durch die großen Partikeloberflächen der partikulären Bestandteile.

2.3.3 Hydrothermaler Härtingsprozess

Hydrothermale Prozesse sind chemische und physikalische Vorgänge, die an festen Stoffen und in fluiden Medien unter feuchtwarmen Bedingungen ablaufen [69]. Bei der hydrothermalen Härtung des Porenbetons finden in gesättigter Wasserdampfatosphäre bei einer Temperatur $T \approx 200^\circ\text{C}$ und einem Druck $p \approx 12$ bar Löse- bzw. Kristallisationsprozesse sowie chemische Stoffumwandlungsprozesse statt (s. Kap. 2.1). Die Roh- und Feststoffdichte des Härtungsguts sowie der Diffusionswiderstand und die Art der Wasserbindung ändern sich im Härtungsgut [72]. Die hydrothermale Härtung des Porenbetons läuft im Autoklaven ab.

Das Hochfahren des Autoklavs auf o. g. Bedingungen erfolgt durch die Einleitung von Wasserdampf. Ein gekoppelter Stoff- und Wärmetransport heizt den Porenbeton-Grünkörper auf. Der Wärmeübergang und die Wärmeleitung des Grünmaterials haben, neben der Beschaffenheit der Gefügestruktur, entscheidenden Einfluss auf die Aufheizgeschwindigkeit [73]. Vor Beginn der Auffahrphase wird zum schnelleren Durchheizen des Materials ein Unterdruck im Autoklaven aufgebracht. Mit Erreichen der gewünschten Materialeigenschaften werden Temperatur und Druck wieder auf atmosphärische Bedingungen reduziert.

Während der Auf- und Abfahrphase entstehen starke Temperaturgradienten zwischen Innen und Außen im Härtungsgut. **Abb. 2-7** zeigt beispielhaft die Temperaturverläufe an den Außenflächen und im Inneren sowie die relative Feuchteänderung von zwei Probekörpern ($200 \times 200 \times 200 \text{ mm}^3$) bei Variation der Gesamtporosität. Es entstehen thermische Eigenspannungen und bei behinderten Temperaturverformungen auch Zwangsspannungen [72]. Diese Spannungen können bei Überschreiten der Zugfestigkeit im jeweiligen Stadium der Auf- und Abfahrphase zu lokalen Schädigungen bis hin zu Trennrissen führen.

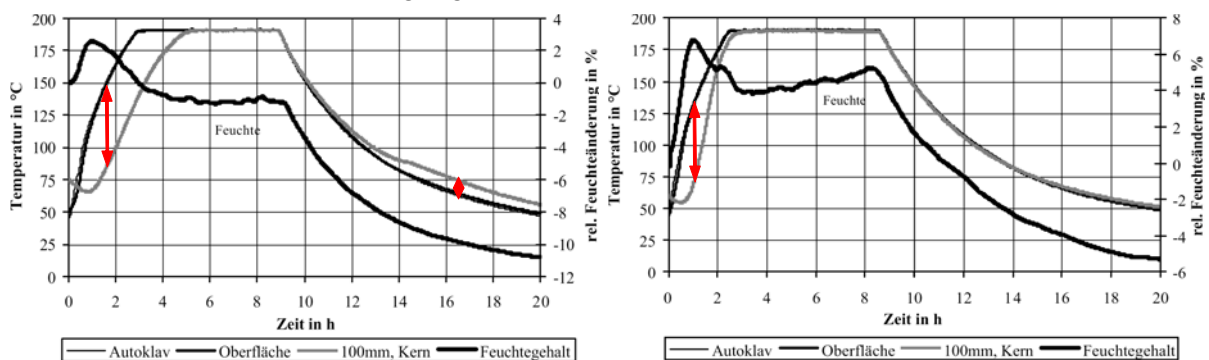


Abb. 2-7 Feuchte- und Temperaturverhalten des Porenbetons während der hydrothermalen Beanspruchung (Probekörper ($200 \times 200 \times 200 \text{ mm}^3$)), **links**: Porenbeton mit einer Gesamtporosität von 60 Vol.-%, **rechts**: Porenbeton mit einer Gesamtporosität von 80 Vol.-% [72] (rote Pfeile = Temperaturgradient)

In der Auffahrphase, insbesondere oberhalb von 150°C , erhöht sich die Festigkeit des Härtungsguts; eventuelle kritische Zwangsspannungen können nicht mehr durch die innere Relaxation im Material abgebaut werden [96]. Die Druckfestigkeit des Porenbeton-Grünkörpers (β_D) liegt bei $0,2\text{--}0,3 \text{ N/mm}^2$ [66]. Im Folgenden erhöht sich, abhängig von der Güteklasse und dem Feuchtegehalt, die Materialfestigkeit auf $\beta_D > 2,0 \text{ N/mm}^2$. Temperaturgradienten im Härtungsgut in der Abfahrphase des Autoklavs können durch die „Verdampfungskühlung“ im gehärteten Material ebenfalls zu einer Rissgefahr führen.

Derzeit erfolgt die Bestimmung der zeitlichen Auslegung der Auf- und Abfahrphase im Autoklaven experimentiell. Beide Phasen können über den Dampfdruck gesteuert werden [25], [66]. Bedingt durch die hohen Taktzeiten im Durchlauf des industriellen Produktionsprozesses können ausschließlich Grünkörper verwendet werden, die in der Geometrie begrenzt sind und bestimmte Eigenschaften in der Form aufweisen. Eigenspannungen können zu kritischen Bedingungen führen. Es ist somit eine Abstimmung der Auf- und Abfahrphase des Autoklavs auf die Materialparameter des Porenbetons sowie auf die Planstein- bzw. Planelementgeometrien erforderlich.

2.4 Eigenschaften des Porenbetons

2.4.1 Wärme-, Schall-, Feuchtetransport

Die bauphysikalisch relevanten Transportprozesse Wärme-, Schall- und Feuchtetransport werden maßgebend durch die innere mikro- und makroporöse Gefügestruktur bestimmt [37].

Porenbeton besitzt, aufgrund hoher Porositäten, gute Wärmedämmeigenschaften als Baustoff (Vgl. zu anderen Baustoffen - **Tab. 2-1**). Die mikro- und makroporöse Gefügestruktur begrenzt die Leitfähigkeiten von thermischen Energien wesentlich. Die Wärmeleitfähigkeit (λ_{pb}) beträgt zwischen 0,08-0,25 W/(K·m). Im industriellen Produktionsprozess werden die Wärmeleitfähigkeiten vereinfachend über die Rohdichte im Treibprozess gesteuert.

Porenbeton besitzt als Baustoff günstige akustische Eigenschaften. Bei Körperschallübertragung über Kraftanregung zeigt sich, dass die Vibrationen durch die diffuse Vermischung der Schwingungsenergien reduziert werden. Der Grund dafür ist die makroporöse Gefügestruktur bei einer breiten Porengrößenverteilung; die Masseanteile der Feststoffphase sind gering im Vergleich zu vielen anderen Baustoffen. Im Bereich der Frequenzen unter 500 Hz sind die Verlustfaktoren etwa um den Faktor 3 größer gegenüber Vergleichswänden aus Gipsplatten und Hochlochziegeln [60]. Auch das Schallabsorptionsmaß kann maßgebend durch die makroporöse Gefügestruktur des Porenbetons verbessert werden. Durch eine Vielzahl von Unstetigkeiten in der Gefügestruktur findet eine Behinderung der Schallausbreitung durch Schallreflexion statt.

Porenbeton besitzt, aufgrund seiner mikroporösen Gefügestruktur, ein gesteigertes Feuchtetransportverhalten (Kapillarität). Entgegen der Erwartung, dass Porenbeton viel Wasser aufnimmt, zeigt sich jedoch aufgrund der hohen Makroporosität, die ohne nennenswerte Saugfähigkeit vorliegt, eine geringe Wasseraufnahmekapazität (s. Wasseraufnahme und Wasseraufnahmekoeffizient - Vgl. zu anderen Baustoffen - **Tab. 2-1**). Die hohe Diffusionsoffenheit des Porenbetons kann vorhandene Raumluftfeuchtigkeit durch Aufnahme bzw. Abgabe von Feuchtigkeit ausgleichen und verbessert das Raumklima.

Angaben zum treibrichtungsabhängigen Verhalten des Wärme-, Schall- und Feuchtetransports des Porenbetons wurden in der Literatur nicht gefunden. Die Vermutung liegt nahe, dass das Verhalten ebenfalls von o. g. Anisotropien bestimmt wird (s. Kap. 2.4.2.3.2).

Tab. 2-1 Auswahl feuchtetechnischer und thermischer Kennwerte des Porenbetons im Vergleich zu Sandstein, Gips, Kalksandstein und Normalbeton

Baustoff			Sandstein	Gips	Kalksandstein	Normalbeton	Porenbeton	
Grundkennwerte	Rohdichte (ρ)	[kg/m ³]	2100	850	1830	2250	500	600
	Gesamtporosität, (V_P) + (V_{MP})	[-]	0,16	0,65	0,35	0,18	0,72	0,72
Hygrische Kennwerte	Sorptionsfeuchte (w_{SF} ($\varphi = 80\%$))	[kg/m ³]	19	6,3	27,5	85	27	27
	Freie Wassersättigung (w_{WS})	kg/m ³	128	400	257	150	340	290
	Wasseraufnahmekoeffizient (A)	kg/(m ² ·h ^{0,5})	0,02	17,4	3	1,8	6	6
	Dampfdiffusionswiderstandszahl	-	32	19	28	60	8	8
Thermische Kennwerte	Wärmekapazität	J/(kg·K)	850	900	850	850	850	850
	Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)	1,6	0,35	0,7	1,51	0,14	0,2

2.4.2 Spannungs-, Dehnungs- und Versagensanalyse

Das Tragverhalten des Porenbetons wird im Wesentlichen durch die innere mikro- und makroporöse Gefügestruktur beeinflusst (s. Kap. 2.2). Im Rohdichtebereich $\rho_{pb} = 450\text{--}550 \text{ kg/m}^3$ wird die Spannungsverteilung durch die Morphologie der Makroporosität dominiert [75].

2.4.2.1 Mechanismen der Strukturschädigung unter Beanspruchung

Aufgrund von heterogen verteilten Steifigkeits- und Festigkeitsbereichen ergeben sich im Porenbeton unter Beanspruchung gefügestrukturspezifisch ungleichmäßige Spannungsverteilungen bei ausgeprägten lokalen Zugspannungen.

Bei einer äußeren Druckbeanspruchung zeigen die Einflussbereiche um die Makroporen auf mesoskopischer Ebene parallel zur Lasteinwirkung tangentielle Druckspannungen, senkrecht tangentielle Zugspannungen (s. **Abb. 2-8, links**). Im Bereich eines Bindersandrestpartikels entstehen parallel zur äußeren Lasteinwirkung radiale Druckspannungen, senkrecht dazu radiale Zugspannungen (s. **Abb. 2-8, rechts**).

Diese Spannungsinhomogenitäten ergeben starke Spannungskonzentrationen (Spannungsspitzen), die unter kritischer Beanspruchung lokal zum Versagen führen können.

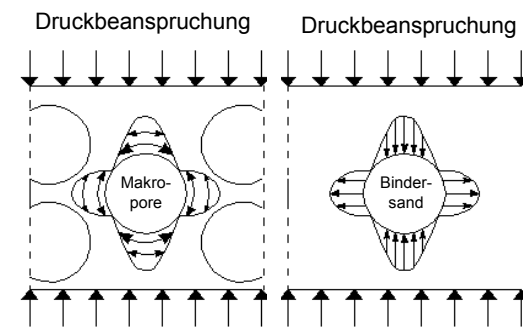


Abb. 2-8 Spannungsverteilung heterogen verteilter Steifigkeits- und Festigkeitsbereiche [92], **links**: Spannungsverteilung um eine Makropore, **rechts**: Spannungsverteilung um einen Bindersandrestpartikel

2.4.2.2 Festigkeits- und Verformungsverhalten des Porenbetons

Das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Porenbetons wird i. d. R. über das Last-Verformungs-Verhalten unter Druck-, Zug-, Biege- und Schubbeanspruchung charakterisiert.

2.4.2.2.1 Allgemeines

Die Druckspannungs-Stauchungs-Linien verlaufen bis zur 0,8fachen Druckfestigkeit (β_D) nahezu linear [79]. Der Elastizitätsmodul liegt zwischen 1 500–4 500 N/mm². Im Belastungsverlauf führen Auflockerungen bzw. Verdichtungen im Calciumsilikathydratphasensystem sowie die Entfestigung an den Grenzflächen zu Bindersandrestpartikeln, bei plastischer Verformung, zu Mikrorissbildungen [92]. Die Druckspannungs-Stauchungs-Linien flachen ab. Es können sich zwei Versagensmechanismen ergeben:

- Bei höherem Feststoffanteil bilden sich abhängig von der Spannungsverteilung erweiterte Mikrorisse. Diese formieren sich zu einzelnen Sammelrissen. Die irreversiblen Verformungen in Querrichtungen sind gegenüber denen in Längsrichtung bedeutend höher. In Querrichtung stellt Wehr [92] bei 0,8fachem β_D einen deutlichen Steifigkeitsabfall fest. Parallel zur Beanspruchungsrichtung stellt sich, durch die Rissausbreitung bei Längsrissbildung, eine Zerstörungszone ein. Trennbrüche verursachen letztendlich sprödes Absolutversagen.
- Bei höherem Makroporositätsanteil entstehen Strukturschädigungen aufgrund auftretender Instabilitäten in den Stegwänden. Es kann davon ausgegangen werden, dass zum inneren Lastabtrag ein Netzwerk von Stegen und dünnen Stegwänden unterschiedlicher Schlankheit zur Verfügung steht [78]. Die o. g. Spannungsheterogenitäten können Spannungsspitzen bilden und beanspruchen die Stegwände kritisch. Die Folge ist das Ausknicken der Stegwände. Lokale Spannungsumlagerungen können anschließend umliegende Brüche in den Stegwänden initiieren. Es kommt zu schlagartigem Versagen. Dieses Verhalten ist ge-

steigert durch den hohen Wasseranteil in der Anfangssuspension und den damit verbundenen hohen Kapillarporenanteil in den Stegen bzw. Stegwänden [25]. Die Querdehnzahl bleibt konstant [97]. Es ergibt sich orthogonal zur Beanspruchungsrichtung eine Zerstörungszone bei Stauchung der Makroporen bzw. Verdichtung des Feststoffgefüges.

Schädigungsmechanismen aus Rissausbreitung bzw. instabilem Versagen der Stegwände sind somit abhängig von Porosität bzw. Porengrößenverteilung. Die Entwicklung der Strukturschädigung durch Instabilitäten in den Porenwänden nimmt mit steigender Porosität und steigender mittlerer Porengröße zu [29], [45]. Bei hohen Porositäten bzw. gesteigerten Steganteilen ist das Phänomen des Ausknickens der Stegwände der maßgebende Versagensmechanismus. Im Rohdichtebereich $\rho_{pb} = 450\text{--}550 \text{ kg/m}^3$ überlagern sich beide Versagensmechanismen. Die Geometrie des Materials hat ebenfalls einen großen Einfluss.

Das Verhalten unter einachsiger Zugbeanspruchung wird, ähnlich wie bei der einachsigen Druckbeanspruchung, von der Gefügestruktur bestimmt. Maßgebend sind wieder die Spannungsverteilungen um die Makroporen und um die Bindersandrestpartikel sowie die damit verbundene Auflockerung des Calciumsilikathydratphasensystems und die Entfestigung an den Grenzflächen zu den Bindersandrestpartikeln. Versagensmechanismus ist die o. g. Rissausbreitung. Die einachsige Zugfestigkeit (β_Z) des Porenbetons beträgt ca. 15-17% der einachsigen Druckfestigkeit (β_D) [78]. Die Zugspannungs-Verformungs-Linie wird bis nahe β_Z als linear elastisch angenommen. Bei β_Z versagt der Probekörper schlagartig (Trennbruch).

Unter Biegebeanspruchung verhält sich der Porenbeton bis zur Biegefestigkeit (β_B) ebenfalls weitgehend linear [92]. β_B beträgt ca. 20-30% der einachsigen Druckfestigkeit (β_D). Die Zusammenhänge zwischen β_B und β_D sind nicht linear [25]. Die Rissausbreitung ist wieder der maßgebende Schädigungs- bzw. Versagensmechanismus.

Unter räumlicher Beanspruchung überlagern sich mehrere Beanspruchungszustände. Linse et al. [44] zeigen bei Würfelprobekörpern unter zweiachsiger Zug- bzw. Druckbeanspruchung die Versagensmechanismen sowie das Festigkeitsverhalten auf. Die zweiachsige Zugbeanspruchung reduziert die Zugfestigkeit (β_Z) gegenüber der einachsigen Zugfestigkeit.

Bei zweiachsiger Druckbeanspruchung wird eine ca. 15% höhere Festigkeit festgestellt. Dabei werden lokale Zugspannungen überdrückt, das Versagen über das Erreichen der kritischen Querdehnungen wird behindert. Die plastischen Deformationen im Material sind maßgebend. Treibrichtungsabhängige Phänomene in der Gefügestruktur wurden über eine spezifische Anordnung der Probekörper im Versuchsaufbau ausgeschlossen.

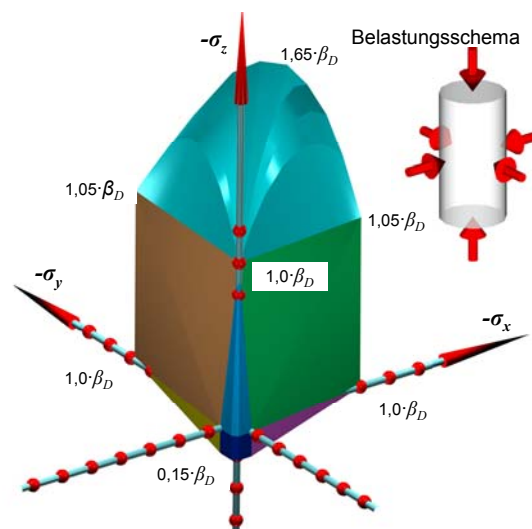


Abb. 2-9 Räumliche Spannungsfigur des Porenbetons (Untersuchungen bzw. theoretischen Annahmen von Wehr [92])

Diese Ergebnisse aufgreifend, untersuchte Wehr [92] Zylinderproben über eine Triaxialbelastungszelle. Die seitliche Beanspruchung erfolgte in radialer Richtung (Manteldruck). Es ergibt sich die räumliche Spannungsfigur nach **Abb. 2-9**. Aussagen über die nicht untersuchten Quadranten (u. a. Mantelzug) wurden theoretisch hergeleitet.

Porenbeton nimmt Schubspannungen nur eingeschränkt auf; die Schubkraftübertragung ist, aufgrund der fehlenden Rissufferrauigkeit bei Kornverzahnung, reduziert. Der Einfluss der Bindersandrestpartikel ist, durch die Partikelfinheit, begrenzt. Vaikhanski et al. [90] untersuchten das statische Schubtragverhalten von komplexen Mauerwerkswänden aus Porenbeton.

ton-Plansteinen (2,0 x 2,5 x 0,24 m³), (s. Kap. 1.2). Diese wurden über einen Versuchsrahmen vertikal vorgespannt und horizontal beansprucht. Vertikale Vorspannung, Steifigkeit (PPW 2 und 4), Überbindemaß und Ausführung der Stoßfugen (vermörtet/ unvermörtet) wurden variiert. Das Schubversagen trat bei allen Ausführungsvariationen schlagartig ein, sowohl in Plansteinen als auch in Fugen. Reibungsversagen in den Fugen war, aufgrund der hohen Verbundfestigkeit und des hohen Reibungsbeiwerts, nicht maßgebend. Das Verhalten ist unabhängig von Verband, Dünnbettfugenmörtel und Verbund zwischen Mörtel und Stein.

Anmerkung

Die mikro- und makroporösen Gefügestrukturen des Porenbetons führen bei äußeren Beanspruchungen zu lokal auftretenden Spannungsspitzen. Rissspannungen und -ausbreitungen werden durch die geringe Größe sowie die homogene Form der Bindersandrestpartikel im System kaum behindert. Der Mechanismus der Rissentkopplung bei der Rissfortpflanzung an den Makroporen ist dabei kaum von Bedeutung.

In einer Literaturrecherche zeigte sich, dass das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Porenbetons unter den verschiedenen Beanspruchungen i. d. R. nur bis zur Festigkeit betrachtet wurde. Detaillierte Untersuchungen des Bruch- bzw. des Entfestigungsverhaltens bis zur Materialtrennung wurden kaum durchgeführt, lediglich Wehr [92] untersuchte das Nachbruch- bzw. Entfestigungsverhalten unter Biegebeanspruchung genauer.

2.4.2.2.2 Bruch- und Entfestigungsverhalten

Beanspruchungen führen im Porenbeton zu strukturellen Veränderungen. Durch schadensakkumulative Prozesse versagt die Gefügestruktur bei Überschreitung kritischer Werte. Charakterisiert wird dieses Versagen über die Beschreibung des Bruch- bzw. Entfestigungsverhaltens unter den spezifischen Beanspruchungen.

Ein in diesem Zusammenhang wesentlicher Begriff ist die Duktilität (*lat.: ducere = ziehen, führen, leiten*). Diese Materialeigenschaft, auch Zähigkeit genannt, die die Fähigkeit beschreibt, dass Materialien sich unter „Überbeanspruchungen“ aus Druck-, Zug- bzw. Momentenbelastung plastisch verformen. Dabei kann es zu Rissbildung kommen. Die Zähigkeit stellt somit das Umlagerungsvermögen von Kräften im Material während des Versagens dar (Duktilbruch). Kennzeichnend für einen Sprödbbruch hingegen ist schlagartiges Versagen.

Die Charakterisierung der beanspruchungsspezifischen Duktilitäten erfolgt i. d. R. über die Quantifizierung der Festigkeit, die Beschreibung des funktionalen Zusammenhangs, welcher die Änderung der lokalen mechanischen Eigenschaften im Prozess der Schädigungen beschreibt sowie durch Energiebetrachtungen (s. Gl. [2-11]).

$$G = \int_0^{\varepsilon = \infty} \sigma \cdot d\varepsilon \quad [2-11]$$

G Energie (allgemein); $[G] = \text{N/mm}$

σ Spannung; $[\sigma] = \text{N/mm}^2$

ε Verformung; $[\varepsilon] = \%$

Abb. 2-10, a) zeigt die Druckspannungs-Stauchungs-Linie eines Normalbetons [82]. Die Gesamtenergien können in plastische (G_{pl}) und elastische (G_{el}) Anteile sowie einen betonspezifischen Dämpfungsanteil durch verzögerte visko-elastische Verformungen ($G_{Dä}$) aufgeteilt werden. Die plastischen Anteile werden hervorgerufen durch echte plastische und quasiplastische Verformungen infolge der Bildung von neuen inneren Oberflächen in Form von Mikrorissen. Der plastische Anteil an der Gesamtenergie ist maßgebend für die fortschreitende Zerstörung des Materials (s. Abb. 2-10, **b**)). G_{el} und $G_{Dä}$ nehmen mit zunehmender Zerstörung bzw. plastischer Deformation ab (s. Abb. 2-10, **c**)).

Zur Beschreibung der für das Bruch- und Entfestigungsverhalten maßgebenden Energien eignet sich die spezifische Bruchenergie (G_F). Eine Beschreibung dieser Energie erfordert die Festlegung kritischer Beanspruchungsgrößen als Kriterium für Beginn und Ende der signifikanten lokalen Schädigungsprozesse und der damit verbundenen Erfassung der dissipierenden Energien innerhalb dieser Beanspruchungsgrenzen. Die Grenze kann deformations- oder kraftbezogen gesetzt werden.

Die Beanspruchungsgrenzen liegen i. d. R. zwischen dem Erstabfall der Festigkeit und dem vollständigen Bruch, d. h. der Materialtrennung (auch als Entfestigungsenergie (G_E) (tension softening) bezeichnet). Bewertungsmaßstäbe, die eine festgelegte untere Gebrauchstauglichkeitsgrenze eines Baustoffs festlegen, können ebenfalls als Kriterium für ein Ende der Erfassung der Energie dienen. Diese ergeben sich vorzugsweise aus dem Sicherheitsempfinden des Menschen. Das Sicherheitskonzept des Stahlbetonbaus [N 21] sieht beispielsweise eine Mindestbewehrung zur Sicherstellung eines duktilen Bauteilversagens vor.

Neben der Auswertung der spezifischen Bruchenergie (G_F) schlägt Siebel [82] vereinfachend die Bewertung des Bruch- und Entfestigungsverhaltens über den Zähigkeitsindex (I_Z) nach Gl. [2-12] vor.

$$I_Z = \frac{G_E}{G_{el}} \quad [2-12]$$

I_Z Zähigkeitsindex; [I_Z] = 1

G_E Entfestigungsenergie; [G_E] = N/mm

G_{el} Elastische Energie; [G_{el}] = N/mm

Eine weitere Beschreibung des Bruch- und Entfestigungsverhaltens eines Materials ergibt sich aus der Quantifizierung von bruchmechanischen Kennwerten [18].

Hillerborg [30] beschreibt die Duktilität des Normalbetons über die charakteristische Länge (l_{ch}). In der Risspitze wird eine fiktive Rissverlängerung des sichtbaren Risses (fiction crack model) unter Annahme linear elastischen Verhaltens quantifiziert. l_{ch} erfasst dabei die Mikrorissbildung in einer Bruchprozesszone vor der Risspitze. Die Entfestigung vollzieht sich ausschließlich in dieser Prozesszone. l_{ch} berechnet sich aus der Gleichsetzung ausfallender elastischer Energien (G_{el}) und Energien zur Schaffung neuer Bruchflächen (G_{pl}) nach Gl. [2-13] (s. **Abb. 2-11**). Für einen fiktiven Riss ist l_{ch} ein Maß für die Sprödigkeit des Betons.

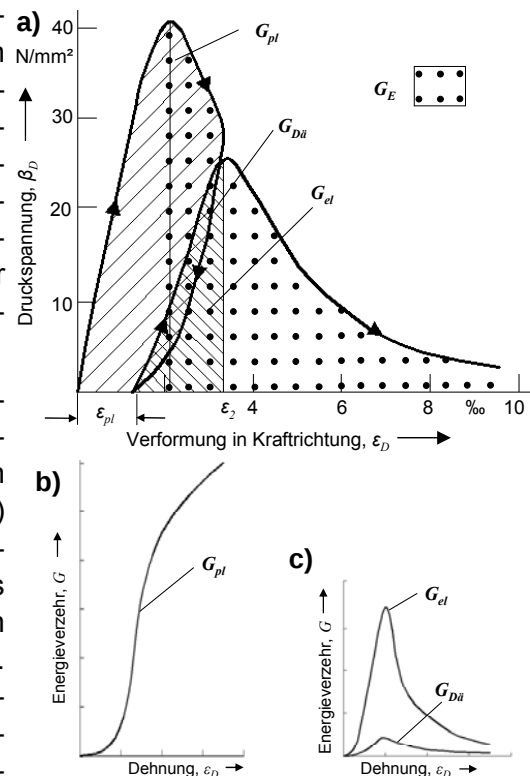


Abb. 2-10 Darstellung von Teil- bzw. Gesamtenergie unter einachsiger Druckbeanspruchung des Normalbetons [82], **a)** Aufteilung der Energieanteile: plastischer - (G_{pl}), elastischer - (G_{el}) und dämpfender Anteil (G_{Da}), Entfestigungsanteil (G_E), **b)** Dissipierte Energie infolge G_{pl} , **c)** Dissipierte Energie infolge G_{el} und G_{Da}

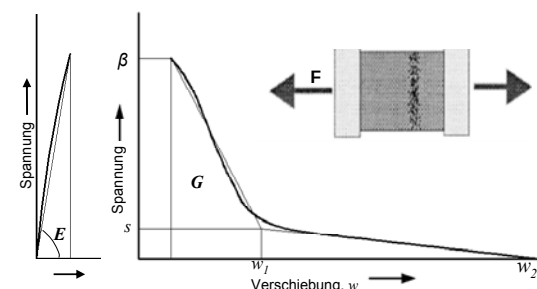


Abb. 2-11 Beschreibung des Duktilitätsverhaltens in Anlehnung an [89], **a)** Spannungs-Verchiebungs-Kurve - elastischer Anteil, **b)** Spannungs-Verchiebungs-Kurve - plastischer Anteil

$$l_{ch} = \frac{E \cdot G_{pl}}{\beta^2} \quad [2-13]$$

l_{ch} Charakteristische Länge; $[l_{ch}] = \text{mm}$ G_{pl} Plastische Energie; $[G_{pl}] = \text{N/mm}$
 E Elastizitätsmodul; $[E] = \text{N/mm}^2$ β Festigkeit; $[\beta] = \text{N/mm}^2$

Je kleiner l_{ch} , desto weniger Spannungen werden in der Bruchprozesszone aufgenommen. Die Entfestigung und damit die Sprödigkeit wird dadurch erhöht. Vorteilhaft ist die Beschreibung des Bruchverhaltens unabhängig vom abfallenden Ast der Last-Verformungs-Linie.

Eine weitere Möglichkeit der Beschreibung des Bruch- bzw. Entfestigungsverhaltens stellt die direkte Berücksichtigung der Last-Verformungs-Linie dar; dazu werden verschiedene mathematische Ansätze, die den Entfestigungsast funktional beschreiben, herangezogen. Ein möglicher Ansatz ist beispielsweise die Ermittlung eines Entfestigungsmoduls (F_E) unter Annahme eines bilinearen Entfestigungsverhaltens nach Gl. [2-14]. Dabei wird die Steigung des ersten Bereichs des abfallenden Asts der Last-Verformungs-Linie erfasst (s. Abb. 2-11).

$$F_E = \frac{\partial \sigma(w)}{\partial w} \Big|_{min} = \frac{\beta - s}{w_l} \quad [2-14]$$

F_E Entfestigungsmodul; $[F_E] = \text{N/mm}^2$
 s Bilinearer Schnittpunkt auf der Ordinate - Spannung; $[s] = \text{N/mm}^2$
 w_l Bilinearer Schnittpunkt auf der Abszisse - Dehnung; $[w_l] = \text{mm/m}$

Beschreibungen über weitere lineare und exponentielle Modelle sind möglich. Zur direkten empirischen Ermittlung der Materialentfestigung eignet sich ausschließlich der weggesteuerte zentrische Zugversuch. Indirekte Untersuchungen bei Überlagerung der Beanspruchungsgrößen können über weggesteuerte Biege-, Druck- bzw. Keilspaltbeanspruchungen erfolgen. Belastungsart und -geschwindigkeit und Materialgeometrie haben einen Einfluss.

Porenbeton

Voruntersuchungen werden unter einachsiger Druck- sowie Biegebeanspruchung mit Kerbung in Abhängigkeit von ρ_{pb} durchgeführt (s. Kap. 2.2.3). Mischungszusammensetzung und Randbedingungen sowie Versuchs- und Probekörperparameter werden, wie in Kap. 5.1 beschrieben, gewählt. In **Abb. 2-12** sind beanspruchungsspezifisch beispielhaft jeweils die empirisch ermittelten Spannungs-Stauchungs- und Kraft-Durchbiegungs-Linien dargestellt.

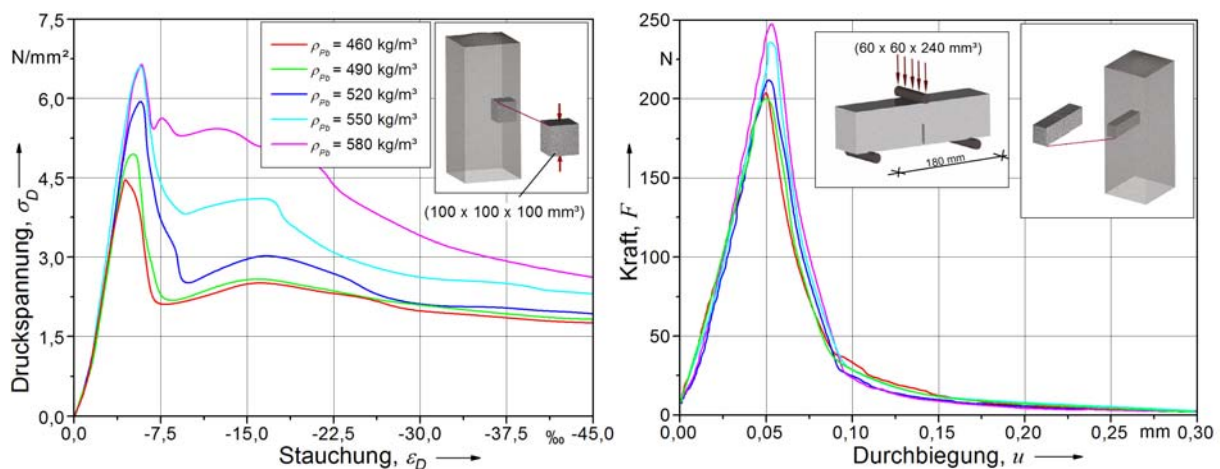


Abb. 2-12 Festigkeits- und Verformungsverhalten des Porenbetons in Abhängigkeit von der Rohdichte (ρ_{pb}), **links:** Spannungs-Stauchungs-Linie unter einachsiger Druckbeanspruchung (Probekörper, parallel zur Treibrichtung beansprucht, mittlere Treibebeine, s. Kap. 5.3.1), **rechts:** Kraft-Durchbiegungs-Linie unter Biegebeanspruchung mit Kerbung (Probekörper parallel zur Treibrichtung beansprucht, mittlere Treibebeine, s. Kap. 5.3.3)

Porenbeton im Rohdichtebereich $\rho_{pb} = 450\text{--}550 \text{ kg/m}^3$ versagt unter Druck-, Zug-, Biege- und Schubbeanspruchung nach Erreichen der Festigkeit plötzlich und ohne Vorankündigung. Das Entfestigungsverhalten ist, unabhängig von der Beanspruchungsrichtung im Bezug auf die Treibrichtung des Materials schlagartig.

Die Druckspannungs-Stauchungs-Linien des Porenbetons (s. **Abb. 2-12, links**) zeigen bei $\rho_{pb} \leq 550 \text{ kg/m}^3$ nach Erreichen der Druckfestigkeit (β_D) einen steilen Abfall der Kurve. Es kommt zu einer schlagartigen Erstentfestigung des Materials. Rohdichteabhängig führen weitere Verformungen, aufgrund der makroporösen Gefügestrukturen, zu erneuten Teilverfestigungen. Die Porenwände knicken aus, die Feststoffanteile werden zusammengestaucht. Überlagert wird dieser Versagensmechanismus rohddichteabhängig durch die Rissausbreitung bei Längsrissbildung parallel zur Beanspruchungsrichtung. Mit zunehmender Stauchung zeigt sich eine plateauartige Ausbildung der Druckspannungs-Stauchungs-Linien. Mit steigender Rohdichte kommt es zur Zunahme der Rissausbreitung bei Längsrissbildung (s. Kap. 2.4.2.2.1). Eine genaue Differenzierung zwischen der Zerstörungszone längs und quer zur Beanspruchungsrichtung ist zu diesem Zeitpunkt nicht möglich. Es bildet sich rohddichteabhängig ein idealplastischer Verlauf der Arbeitslinie aus. Die ausgeprägten Ebenen sind bis zu einem Endstauchungsmaß von 45‰ vorhanden. Bei $\rho_{pb} \geq 580 \text{ kg/m}^3$ zeigt sich ein annähernd linearer Abfall der Druckspannungs-Stauchungs-Linie; o. g. Effekte der Teilverfestigungen setzen bei geringeren Stauchungen ein. Das gesamte Verhalten wird wesentlich von der Querdehnungsbehinderung der Versuchsdurchführung beeinflusst.

Die Kraft-Durchbiegungs-Linien des Porenbetons unter Biegebeanspruchung mit Kerbung (s. **Abb. 2-12, rechts**) zeigen trotz deutlicher Rohddichtevariation qualitativ keine Unterschiede. Lediglich die Biegefestigkeit (β_B) steigt mit Erhöhung von ρ_{pb} . Im Bereich von β_B entstehen in der Kerbzone Mikrorisse. Die bis dahin im Material gespeicherte elastische Energie wird für die Rissentwicklung aufgezehrt bzw. schlagartig in Rissfortschrittsenergie umgewandelt. An den Probekörpern bilden sich sichtbare Sammelriss aus, die sich in die Balkendruckzone vorarbeiten. Nach Überschreiten von β_B fällt die Linie schlagartig ab.

Der abfallende Ast der Kraft-Durchbiegungs-Linie kann in zwei Abschnitte unterteilt werden, die sich in der Steigung voneinander unterscheiden. Zur Beschreibung des Bruch- bzw. Entfestigungsverhaltens kann somit o. g. bilinearer Verlauf angenommen werden.

Alternativ beschreibt Wehr [92] das Bruch- bzw. Entfestigungsverhalten des Porenbetons unter Biegebeanspruchung mit Kerbung über den exponentiellen Ansatz nach Gl. [2-15].

$$F(u) = \beta_B \cdot e^{\frac{\beta_B - w}{G_B}} \quad [2-15]$$

$F(u)$ Spannung im Entfestigungsbereich in Abhängigkeit von der Durchbiegung; $[F(u)] = \text{N/mm}^2$

G_B Bruchenergie unter Biegebeanspruchung; $[G_B] = \text{N/mm}$

β_B Biegefestigkeit; $[\beta_B] = \text{N/mm}^2$

w Durchbiegung; $[w] = \text{mm}$

2.4.2.3 Zusammenhang zwischen Festigkeits- und Verformungsverhalten und makroporöser Gefügestruktur

Das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Porenbetons (s. Kap. 2.4.2.2.2) im Rohdichtebereich $\rho_{pb} = 450\text{--}550 \text{ kg/m}^3$ wird, wie oben beschrieben, maßgebend von der Beschaffenheit der makroporösen Gefügestruktur (s. Kap. 2.2.1) bestimmt.

2.4.2.3.1 Allgemeines

Die Beziehungen von Festigkeits- und Verformungsverhalten des Porenbetons und makroporöser Gefügestruktur wurden in der Vergangenheit sowohl empirisch als auch rein physi-

kalisch untersucht. Mit zunehmender Rohdichte steigen die Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften des Porenbetons.

Empirische Studien zur Beschreibung der Druckfestigkeit nutzen vereinfachend oft Rohdichte bzw. Makroporosität (V_P), als Bezugsgröße [29], (s. u. a. Gl. [2-16] und Gl. [2-17]).

$$\beta_D = \beta_{D,0} (1 - V_P)^n \quad [2-16]$$

$$\beta_D = \beta_{D,0} e^{(-n \cdot V_P)} \quad [2-17]$$

β_D Einachsige Druckfestigkeit; $[\beta_D] = \text{N/mm}^2$

$\beta_{D,0}$ Druckfestigkeit des unporierten Materials; $[\beta_{D,0}] = \text{N/mm}^2$

V_P Volumenanteil der Makroporosität; $[V_P] = \text{Vol.-%}$

n Konstante; $[n] = 1$

Exakte Korrelationsanalysen lassen sich jedoch nur unter Einbeziehung der makroporösen Kennwerte der Gefügestruktur des Porenbetons durchführen (s. Kap. 2.2.1). Gl. [2-18] berücksichtigt zur Beschreibung der Druckfestigkeit (β_D) beispielsweise, dass die größten Poren im Material zuerst versagen.

$$\beta_D = \frac{m}{\sqrt{d}} \cdot e^{(-n \cdot V_P)} \quad [2-18]$$

m, n Konstanten; $[m, n] = 1$

d Maximaler Durchmesser der Makroporen; $[d] = \text{mm}$

Unter Berücksichtigung der Makroporengrößenverteilung ergibt sich u. a. der Ansatz nach Gl. [2-19], [40]. Dabei wird als Kennwert der Variationskoeffizient der Makroporengrößenverteilung (C_V^*) verwendet. Dieser berücksichtigt die Einflussgrößen mittlerer Porendurchmesser, Verteilungsdichte nach Porendurchmesser und Verteilungsdichte nach Porenvolumen [25], [40] (s. Gl. [2-20]).

$$\beta_D = m \cdot \sqrt{\frac{I}{C_V^*}} \cdot (120 \rho^2 - 40,5 \rho + 12,5) \quad [2-19]$$

$$\text{mit} \quad C_V^* = \sum_{i=1}^{i=n} C_V^n \cdot \frac{d_m^n}{d_m} \quad \text{mit} \quad C_V^n = \frac{\sigma}{n_m} \quad [2-20]$$

m Konstante; $[m] = 1$

C_V^* Variationskoeffizient - Makroporengrößenverteilung; $[C_V^*] = 1$

ρ Rohdichte des Porenbetons; $[\rho] = \text{kg/m}^3$

C_V^n Variationskoeffizient - Makroporengrößenverteilung einer Durchmesserfraktion; $[C_V^n] = 1$

d_m^n Mittlerer Durchmesser der Durchmesserfraktion der Makroporen; $[d_m^n] = \text{mm}$

d_m Mittlerer Durchmesser aller Makroporen; $[n] = 1$

σ Mittlere quadratische Abweichung (Standardabweichung); $[\sigma] = 1$

n_m Mittlere Anzahl der Makroporen einer Durchmesserfraktion; $[n_m] = 1$

Der Einfluss der Größenverteilung der Makroporosität auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Porenbetons ist wesentlich. He [29] zeigt, dass bei gleicher Makroporosität bzw. Rohdichte unter Nutzung reduzierter Porengrößen die Festigkeit unter einachsiger Druckbeanspruchung deutlich gesteigert wird. Von Bedeutung sind ebenfalls die Gleichmäßigkeit der Porengrößenverteilung, die homogene Porenverteilung und die Porenform.

Schneider et al. [75] stellen weiterhin eine starke Abhängigkeit zwischen einachsiger Druckfestigkeit und dem minimalen Abstand der Porenschwerpunkte fest.

Die ideale Makroporenstruktur für ein optimales Festigkeits- und Verformungsverhalten des Porenbetons entsteht somit bei einer homogenen Verteilung von Makroporen. Diese sollten einen geringen Durchmesser und eine sphärische Form aufweisen. Daraus ergibt sich eine Verminderung rissinitiierender lokaler Spannungsspitzen in der Gefügestruktur bei Beanspruchungen. Störungen des Spannungsverlaufs als Folge der Ablenkung der Spannungen und damit der Bildung von Umlenk- bzw. Zugspannungen sind reduziert [92].

2.4.2.3.2 Treibhöhe / Treibrichtung

Die treibhöhenabhängigen Gefügestrukturen (s. Kap. 2.2.3) werden in der Qualitätsüberwachung des industriellen Produktionsprozesses durch Mittelung der zu untersuchenden Eigenschaft (u. a. Druck und Biegung) aus der unteren, mittleren und oberen Drittelebene eines aufgetriebenen Rohblocks ($h = 60\text{--}80\text{ cm}$) berücksichtigt. Die Untersuchungen erfolgen einheitlich parallel zur Treibrichtung im Treibkörper.

Die einachsige Druckfestigkeit des Porenbetons parallel zur Treibrichtung erreicht nur ca. 80% der Druckfestigkeit orthogonal zur Treibrichtung [92]. Zug- und Biegefestigkeit zeigt qualitativ ähnliche Tendenz. Trunk et al. [89] weisen über einen modifizierten Keilspaltversuch (in Anlehnung an [6]), durch die Auswertung der bruchmechanischen Kennwerte ebenfalls nach, dass Porenbeton deutliche Anisotropien aufweist. Diese resultieren im Wesentlichen daraus, dass unterschiedliche Masseanteile je nach Beanspruchungsrichtung vorhanden sind. Es ergeben sich, aufgrund der sich bildenden rotationsellipsoiden Form der Makroporen (s. Kap. 2.2.3), unterschiedliche Spannungsverteilungen parallel bzw. orthogonal zur Treibrichtung. Um die Anisotropien in der Praxis zu berücksichtigen, werden die Plansteine bzw. -elemente bei Einbau parallel zur Treibrichtung ausgerichtet. Diese Ausrichtung wird baupraktisch durch konstruktive Maßnahmen, u. a. durch die Vorgabe der Anordnung der Nut bzw. Feder und der Geometrie, erreicht.

2.4.3 Innere Beanspruchungen im „Gebrauchszustand“

Innere Beanspruchungen im „Gebrauchszustand“ des Porenbetons ergeben sich vorwiegend aus den hygrischen Verformungen bei Wasseraufnahme (Quellen) und Wasserabgabe (Schwinden) in der mikroporösen Gefügestruktur. Sie können im System zu Mikro- bzw. zu größeren makroskopischen Trennrissen führen. Ursache ist die Einlagerung von Wasser im Porensystem, vor allem in Poren mit Porenradien $r = 0,1-0,2 \mu\text{m}$ [76]. Ein weiterer Mechanismus ist die Ab- bzw. Aufnahme von Wasser in die Zwischenschichten der Calciumsilikathydratphasen. Beide Mechanismen werden somit von der Beschaffenheit der mikroporösen Feststoffphase bzw. durch die Feststoffmasseanteile des Gesamtmaterials beeinflusst [25]. Bei diesen hygrischen Verformungen sind richtungsabhängige Unterschiede zu erwarten, die auf unterschiedliche Kapillar- und Gelporenanteile zurückzuführen sind.

Hygrische Verformungen sind, aufgrund der gesteigerten Wasseraufnahme im Vergleich zu anderen Baustoffen, hoch (s. **Abb. 2-13**). Das Schwindmaß ist im Rohdichtebereich $\rho_{pb} = 450-600 \text{ kg/m}^3$ nahezu unabhängig von der Rohdichte [6]. Die Beschaffenheit der Calciumsilikathydratphasen hat starken Einfluss auf das Schwindmaß [12].

Das Calciumsilikathydratphasensystem weist bei „scharfem“ Trocknen ab einer massebezogenen Feuchte des Baustoffs von $u < 5 \text{ M.-%}$ sehr hohe hygrische Verformungen auf. Das Schwindmaß ist generell jedoch niedriger als das Schwindmaß von Normalbeton, was auf die Reduzierung sehr kleiner Poren durch die hydrothermale Härtung und auf die geringen Masseanteile des Feststoffs gegenüber dem Normalbeton zurückzuführen ist.

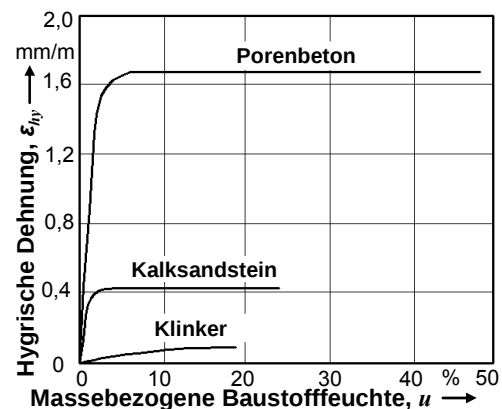
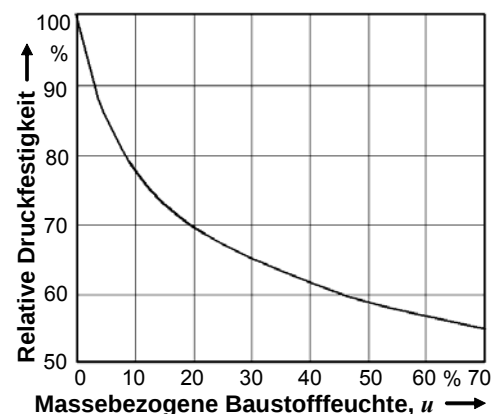


Abb. 2-13 Hygrisches Verformungsverhalten des Porenbetons ($\rho_{pb} = 700 \text{ kg/m}^3$) im Vergleich zu Kalksandstein ($\rho_{KS} = 1700 \text{ kg/m}^3$) und Klinker ($\rho_K = 1800 \text{ kg/m}^3$) [49]

Der Wert $u = 5 \text{ M.-%}$ entspricht einer relativen Luftfeuchtigkeit von $\varphi \approx 95\%$. $\varphi > 95\%$ bzw. das Füllen von Poren mit einem Radius $r > 10^{-7} \text{ m}$ führen i. d. R. nicht zu weiteren Verformungen [66]. Die Absolutschwindmaße des trockenen Porenbetons (ε_{pb}) liegen zwischen 1,5-2,5 mm/m.

Das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Porenbetons wird infolge hygrischer Beanspruchungen stark beeinflusst. Nach Gundlach [25] (s. **Abb. 2-14**) nimmt die Druckfestigkeit bei einer massebezogenen Baustofffeuchte $u = 10\%$ bereits um 25% ab. Durch adsorbtiv gebundenes Wasser werden die Oberflächenspannungen in den Calciumsilikathydratphasen reduziert. Bei höheren Baustofffeuchten bildet sich durch den Einbau eines Wasserfilms ein Spaltdruck aus. Das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Porenbetons nimmt ab.



In der Güteüberwachung der Festigkeitseigenschaften wird eine massebezogene Baustofffeuchte $u = 6\%$ als genormt definiert (s. Kap. 2.4.2.3.2).

Abb. 2-14 Beziehungen zwischen Feuchtegehalt und Druckfestigkeit im Porenbeton [25]

Im Gegensatz zum Normalbeton ($\text{pH} \approx 12,6$) besitzt Porenbeton nur einen pH-Wert von 8,8-9,3. Diese geringe Alkalität macht einen zusätzlichen Korrosionsschutz des Stahls bei Einbau einer Bewehrung notwendig.

3. Phänomologische Vorüberlegungen

Überblick

Die Faserstruktur lässt sich über Faserform und -material sowie über gesamtheitliche Faserstrukturparameter beschreiben. Diese kann bei Einbau einer Reihe von Fasern über die Röntgen- bzw. Synchrotron-Computertomographie erfasst werden. Eine digitale computer-gestützte dreidimensionale Bildanalyse kann die Faserstruktur quantifizieren. Die Feststoffstrukturen verändern sich im Rahmen des Treibprozesses durch den Fasereinbau. Es zeigen sich treibrichtungsabhängige Anisotropien; diese führen zu gesteigertem richtungsabhängigen Eigenschaftsverhalten. Die Wirkmechanismen von Fasern im Porenbeton bestehen im Wesentlichen aus der Reduzierung der Mikrorissbildung bzw. -ausbreitung und der Aufnahme von Beanspruchungen im Rissbereich. Steigerungen im Festigkeits- und Verformungsverhalten des Porenbetons erfordern den Einbau von Fasern mit hoher Verbundwirkung und hohen mechanischen Eigenschaften. Faserform und -orientierung sowie mittlerer Faserabstand haben ebenfalls einen Einfluss auf die Wirkung. Neben den Versagensarten Faserauszug und Faserbruch können auch die porösen Feststoffstrukturen in der Faserumgebung versagen. Der derzeitige Kenntnisstand zu faserverstärktem Porenbeton zeigt wesentliche Lücken auf. Wissen über faserverstärkte porös getriebene Systeme anderer Werkstoffe sind vorhanden, können aber nur ansatzweise als Wissensbasis genutzt werden.

3.1 Allgemeines

Faserverbundwerkstoffe (Faserkomposite) bestehen aus einem Grundmaterial (Matrix) und einer eingebetteten Faserkomponente. Als Fasern werden lineare, elementare Gebilde mit einem Formfaktor $l_f/d_f > 10$ (Faserlänge (l_f) / Faserdurchmesser (d_f) - aspect ratio) bezeichnet [52]. Sie kommen als Kurz- und Langfaser sowie als zweidimensionales (2D) und dreidimensionales (3D) Textil (gerichtete Endlosfaserstruktur) zum Einsatz. Aus der Literatur ergeben sich verschiedene Definitionen von Kurz- und Langfasern [50]. In dieser Arbeit werden die Kurzfasern über die Grenzkriterien $l_f/d_f \leq 10\,000$ und $l_f \leq 15$ mm definiert.

Die Eigenschaften bzw. die Versagensmechanismen bei Einbau von Fasern divergieren in Abhängigkeit von der Rohdichte (ρ_{pb}) und den Kennwerten der Feststoff- bzw. Makroporenphase (s. Kap. 2.2.1). Im Rahmen dieser Arbeit wird ausschließlich faserverstärkter Porenbeton im Rohdichtebereich $\rho_{pb} = 450\text{--}550$ kg/m³ betrachtet.

3.2 Faserverstärkte, getriebene, makroporöse Gefügestrukturen

Die Verstärkung poröser, getriebener Werkstoffe mit Fasern findet bereits breite Anwendung. So kommen Faserverstärkungen u. a. im Bereich der organischen, festen Polymerschäume sowie bei Gummi-, Kautschuk- und Stärkeschäumen zum Einsatz. Organische feste Polymerschäume werden z. B. im Schiffs-, Flugzeug- und Automobilbau sowie in der Bauindustrie eingesetzt. Die Verstärkung dieser Werkstoffe durch Fasern kann zu deutlichen Verbesserungen im Festigkeits- und Verformungsverhalten führen [81]; die Wirkmechanismen dieser Fasern im Grundmaterial sind bekannt. Die Zusammenhänge sind im Wesentlichen über Grundmaterial- und Faserparameter sowie die Herstellungsprozesse steuerbar.

Phenolharzschäume, verstärkt durch kommerzielle Aramid- bzw. Elementarglasfasern (Faserkonzentration $\psi_f = 5\text{--}10$ M.-%, Faserlänge $l_f = 6,4$ mm), zeigen faserspezifisch deutliche Verbesserungen im Festigkeits- und Verformungsverhalten [80], [81]. Untersucht wurden die Eigenschaften unter Abrieb-, Druck-, Biege- und Scherbeanspruchungen. Die glasfaserverstärkten Phenolharzschäume zeigen deutliche Steigerungen in den Steifigkeiten und Festigkeiten unter Druck-, Biege- und Scherbeanspruchungen. Die aramidfaserverstärkten Phenolharzschäume weisen vorzugsweise Verbesserungen unter Abriebbeanspruchung auf. Das Entfestigungsverhalten kann durch Aramidfasern bei o. g. Beanspruchungen wesentlich

erhöht werden. Glasfaserverstärkte Phenolharzschäume versagen weiterhin vorzugsweise spröde. Sie zeigen gegenüber den aramidfaserverstärkten Phenolharzschäumen deutlich stärkere Anisotropien. Begründet wird dies mit der stärkeren Orientierung der Glasfasern durch die Scherströmungsbeanspruchungen während des Treibprozesses [80].

Alonso et al. [4] untersuchten glas- und aramidfaserverstärkte Epoxidharzschäume. Es wurden Untersuchungen unter Druck- und Scherbeanspruchungen durchgeführt. Ähnlich wie bei faserverstärkten Phenolharzschäumen lassen sich Steigerungen im Festigkeits- und Verformungsverhalten gegenüber unverstärkten Epoxidharzschäumen feststellen. Das Festigkeits- und Verformungsverhalten wird mit Zunahme von ψ_f und l_f gesteigert.

Soykeabkaew et al. [84] untersuchten faserverstärkte stärkebasierte Schäume. Diese werden beispielsweise als biologisch abbaubares Verpackungsmaterial in der Lebensmittelindustrie eingesetzt. Durch den Einbau von Jute- und Flachsfasern werden deutliche Verbesserungen im Festigkeits- und Verformungsverhalten unter Biegebeanspruchungen festgestellt ($\psi_f = 5\text{--}10\text{ M.-%}$, $l_f = 2\text{--}20\text{ mm}$ bzw. $6\text{--}60\text{ mm}$, Faserdurchmesser $d_f = 70\text{ }\mu\text{m}$ bzw. $210\text{ }\mu\text{m}$). Diese sind mit Zunahme des aspect ratios und ψ_f steigerbar. Neben der Verstärkungswirkung durch die Fasern werden diese Verbesserungen auf die Viskositätssteigerung der Anfangssuspension zurückgeführt. Durch die Interaktion von Faser und Pore im Treibprozess ergeben sich geringere Porosierungsgrade, geringere mittlere Zelldurchmesser bzw. dickere Zellwände. Faserorientierungseffekte bzw. damit verbundene Wirkweisen ergeben wieder anisotrope Materialeigenschaften. Die Verbundeigenschaften werden, aufgrund ähnlicher chemisch funktionaler Gruppen von Grund- und Fasermaterial, als gut eingestuft.

Lin et al. [43] führten Untersuchungen mit faserverstärkten mikrozellularen Schäumen aus Gummi und Kautschuk durch. Die Verstärkung besteht aus Polyamidfasern ($\psi_f = 5\text{ M.-%}$, $l_f = 5\text{ mm}$, $d_f = 20\text{ }\mu\text{m}$). Eine Beschichtung der Faser mit einem Haftvermittler kann die Verbundwirkung und damit das Festigkeits- und Verformungsverhalten weiter erhöhen. Die Form der Poren wird ungleichförmiger.

Untersuchungen an geschäumtem Borosilikatglas bei Einbau von Metallfasern ($l_f = 100\text{ }\mu\text{m}$, $d_f = 8\text{ }\mu\text{m}$) [48] zeigen, neben der Steigerung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens, hin zu kleineren Radien verschobene und gleichmäßigere Porengrößen. Als Begründung dafür werden hier die Behinderung des Porenwachstums und die höhere Anzahl von Nukleierungskeimen durch größere Faseroberflächen genannt. Auch hier sind Porendeformationen feststellbar. Diese werden vorzugsweise durch „porenanstechende“ Fasern hervorgerufen.

Die Nutzung der Erkenntnisse aus dem Bereich der vorbeschriebenen porös getriebenen Materialsysteme ist als Basis für die Erforschung des faserverstärkten Porenbetons nur begrenzt möglich. Ausgangsbedingungen, stoffliche Zusammensetzung und Herstellung divergieren erheblich. Dennoch gibt es eine Reihe von Anknüpfungspunkten, die im Rahmen dieser Arbeit weiterverfolgt werden sollen.

Anmerkung

Thiede [88] hat intensive Untersuchungen an glasfaserverstärktem Schaumbeton durchgeführt. Eine Glasfaserverstärkung kann die Druck- und Biegefestigkeit deutlich steigern. Das Tragverhalten unter Beanspruchungen kann, aufgrund der mikro- und makroporösen Gefügestrukturen, mit dem Tragverhalten von faserverstärktem Porenbeton verglichen werden. Aufgrund der chemischen und physikalischen Zusammensetzung des Grundmaterials weisen die Fasern Ähnlichkeiten in der Alterungsbeständigkeit und Dauerhaftigkeit sowie im Verbundverhalten zum Grundmaterial auf.

Gesamtheitliche Betrachtungen des Festigkeits- und Verformungsverhaltens (Duktilität) wurden bei Thiede nicht angestellt. Die Gefügestruktur des glasfaserverstärkten Schaumbetons wird nicht durch einen Treibprozess geprägt: Bei der Herstellung wird ein Gas in feinverteilter

Form in einem Schaummittel eingeschlossen und dem Frischbeton untergemischt. Die Entstehung der Gefügestruktur von faserverstärktem Schaum- und faserverstärktem Porenbeton ist nur ansatzweise vergleichbar. Anisotrope Eigenschaften sind nicht vorhanden.

3.3 Faserstruktur

Faserstrukturen in makroporösen Werkstoffen lassen sich wie folgt charakterisieren:

- Formbezogene Faserparameter (Einzelfaserkennwerte):
 - Fasermorphologie (Längsschnitt- (l_f), Querschnitt- (d_f), Oberflächenformen (Oberflächenstruktur)),
 - Fasertektonik (elementar, zusammengesetzt),
- Materialbezogene Faserparameter (Einzelfaserkennwerte):
 - Mechanische Eigenschaften der Faser (Elastizitätsmodul (E_f), Festigkeit (β_f), Bruchdehnung ($\epsilon_{f,Br}$)),
 - Alterungsbeständigkeit und Dauerhaftigkeit der Faser,
- Gesamtheitliche Faserstrukturparameter:
 - Faserorientierung (η_f),
 - Lokale Faserverteilung (χ_f) / -konzentration (ψ_f), mittlerer Faserabstand (s_f),
 - Lage der Fasern im Grundmaterial (Steg- bzw. Stegwandkonzentration, Porenanstich),
 - Räumliche Anordnung der Fasern, z. B. Paarkorrelationsfunktion,
 - Faserverbund zum Grundmaterial.

Die Möglichkeiten der Faserstrukturerfassung in Verbundwerkstoffen sind faser- bzw. grundmaterialabhängig. Als bildgebende Erfassungsverfahren können Rück- und Durchstrahlungsverfahren genutzt werden (s. Kap. 2.2.2). Es ergeben sich digitalisierte zweidimensionale (2D) Datensätze aus Beugungs-, Schliif- und Durchstrahlungsbildern. Diese können, bei Nutzung der Computertomographie (CT), zu einem dreidimensionalen (3D) Datensatz zusammengesetzt werden. Die form- und materialbezogene Bandbreite sowie die Variation der Faserkonzentration (ψ_f) erfordern die Anpassung von Messverfahren bzw. -parameter. Alle Verfahren müssen die Extrahierung der Faserinformation aus dem Grundmaterial ermöglichen.

Die Faserstrukturanalyse erfolgt über Analyse der extrahierten digitalisierten Faserphase. Die formbezogenen und gesamtheitlichen Faserparameter können computergestützt analysiert werden. Zur Bestimmung der formbezogenen Faserkennwerte ist eine Segmentierung der Einzelfasern im Datensatz notwendig („Labelling“). Die Faserform kann direkt pixel- bzw. voxelbasiert ermittelt werden. Idealerweise wird eine lang gestreckte Faserform angenommen. Im Folgenden werden die gesamtheitlichen Faserstrukturparameter vorgestellt.

Faserorientierung

Die Faserorientierung (η_f) wird i. d. R. 3D beurteilt ($\eta_{f,3D}$). $\eta_{f,3D}$ wird über die Einzelkomponenten des Einheitsorientierungsvektors ($R_{f,x,y,z}$) bzw. über den kugelbeschreibenden Azimutwinkel (φ_f) (Winkel um die Vertikale) und den Polarwinkel (θ_f) (Winkel gegen die Vertikale) in einer Einheitskugel charakterisiert (s. **Abb. 3-1**).

Bei einer digitalisierten 2D-Erfassung der Faserstruktur wird die Faserorientierung an ebenen Schliifbildern aufgenommen. Dazu wird die Faserphase aus den Schnitten über Schwellwertoperationen extrahiert. Die segmentierten Faseranschnitte werden ausgewertet.

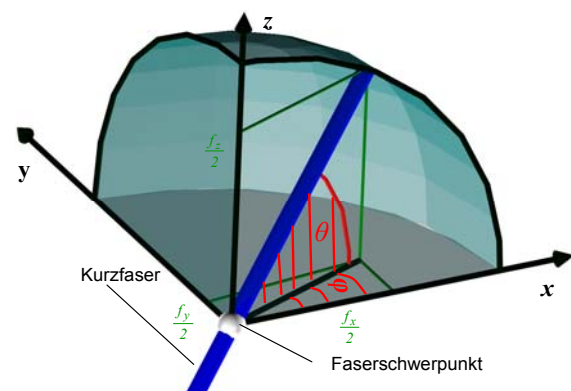


Abb. 3-1 Beschreibung der 3D-Faserorientierung ($\eta_{f,3D}$) über den Einheitsorientierungsvektor ($R_{f,x,y,z}$) bzw. über den Polar- (θ_f) und den Azimutwinkel (φ_f) in der Einheitskugel

Aus den ebenen Faseranschnittinformationen kann der Orientierungswinkel in der Schnittebene (ϕ_f) direkt (s. **Abb. 3-2, a)**) und der Orientierungswinkel, orthogonal zur Schnittebene (θ_f) indirekt über das Haupt-/ Nebenachsen-Verhältnis des Faseranschnitts nach Gl. [3-1] ermittelt werden (s. Abb. 3-2, **b)**), [31]. Die Bestimmung muss für jede Einzelfaser der Schnittebene getrennt erfolgen. Die Faserorientierung im Raum wird dann über die Mittelung der Orientierungswinkel der Einzelfasern in einer Schnittebene erhalten.

$$\theta_f = \arcsin\left(\frac{a_f}{b_f}\right) \quad [3-1]$$

θ_f Orientierungswinkel der Faser, orthogonal zur Schnittebene; $[\theta_f] = \text{Grad}$

a_f Länge der Hauptachse der Schnittellipse; $[a_f] = \text{mm}$

b_f Länge der Nebenachse der Schnittellipse; $[b_f] = \text{mm}$

Die Umrechnung der Faserorientierungswinkel ϕ_f und θ_f für jede Einzelfaser in die Komponenten des räumlichen Einheitsfaserorientierungsvektors (R_f) kann nach Gl. [3-2] erfolgen.

$$\vec{R}_f = \begin{pmatrix} R_{f,x} \\ R_{f,y} \\ R_{f,z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi_f \cdot \cos \theta_f \\ \sin \phi_f \cdot \cos \theta_f \\ \sin \theta_f \end{pmatrix} \quad [3-2]$$

R_f Orientierungsvektor im Raum; $[R_f] = 1$

$R_{f,x,y,z}$ Komponenten von R_f im Raum; $[R_{f,x,y,z}] = 1$

ϕ_f Winkel in Schnittebene; $[\phi_f] = \text{Grad}$

θ_f Winkel orthogonal zur Schnittebene; $[\theta_f] = \text{Grad}$

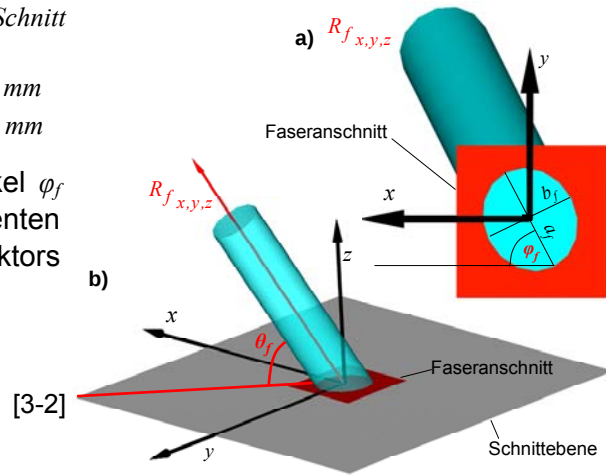


Abb. 3-2 Beschreibung der dreidimensionalen Faserorientierung ($\eta_{f,3D}$) bei einer zweidimensionalen Erfassung der Faserstruktur, **a)** Winkel in der Schnittebene (ϕ_f), **b)** Winkel orthogonal zur Schnittebene (θ_f)

Die integrale Betrachtung aller Fasern in der Schnittebene ergibt den kollektiven Einheitsfaserorientierungstensor (f_{ij}) (s. Gl. [3-3]).

$$f_{ij} = \frac{1}{n} \sum_i^n R_{f_i} \cdot R_{f_j} = \begin{pmatrix} f_{xx} & f_{xy} & f_{xz} \\ f_{yx} & f_{yy} & f_{yz} \\ f_{zx} & f_{zy} & f_{zz} \end{pmatrix} \quad [3-3]$$

Die Diagonalkomponenten (f_{xx}), (f_{yy}), (f_{zz}) ergeben den mittleren Orientierungsvektor der Fasern (f_x), (f_y), (f_z). Dieser beschreibt die Anteile der Faserorientierung in den jeweiligen Koordinatenrichtungen im Raum (bezogen auf die Schnittebene). Die Summation der Richtungsanteile ergibt 1 (s. Gl. [3-4]).

$$f_{xx} + f_{yy} + f_{zz} = 1 \quad \text{daraus folgt vereinfachend: } f_x + f_y + f_z = 1 \quad [3-4]$$

f_x, f_y, f_z Mittlere normierte Orientierung in x-, y-, z-Koordinatenrichtung (kartesisch); $[f_i] = 1$

Bei einer digitalisierten 3D-Erfassung der Faserstruktur wird die Faserorientierung computer-gestützt an einen CT-Datensatz aufgenommen. Die Fasern werden wieder aus der gesamt-heitlichen Gefügestruktur extrahiert. Dazu wird die Faserphase aus dem CT-Datensatz über eine Schwellwertoperation herausgetrennt. Shen et al. [80] bestimmen $R_{f,x,y,z}$ bzw. ϕ_f und θ_f direkt vereinfachend über ein manuelles „voxelbasiertes Vermessen“ der Fasern in einem räumlichen Visualisierungssoftwaretool. Durchläuft der Faserdatensatz ein "Labelling", wird jeder Faser eineindeutig ein Grauwert zugeordnet. Es können die minimalen und maximalen x-, y- und z-Positionen jeder Einzelfaser der Faserstruktur voxelbasiert bestimmt werden. Wird angenommen, dass die Fasern durch lange, frei im Raum orientierte Zylinder be-

schreibbar sind, kann aus deren Endpunktkoordinaten die Zylinderorientierung über geometrische Beziehungen errechnet werden. Dazu sind Softwaretools auf dem Markt. Die Mittelung über alle Fasern ergibt wieder die Gesamtorientierung des Faserkollektivs im Raum.

Die Einzelwinkel φ_f und θ_f können am anschaulichsten in einer winkeltreuen stereographischen Projektion (konform-azimutale Projektion) dargestellt werden. Dabei liegt die Projektionsfläche in der Äquatorebene einer Kugel. Der Azimuthwinkel (φ_f) wird am Umfang, der Polarwinkel (θ_f) in Radialrichtung aufgetragen. Beispielhaft ist eine $45^\circ/45^\circ$ (φ_f / θ_f) Faservorzugorientierung mit Farbkodierung in **Abb. 3-3, a)** dargestellt. Es wird zum Maximum hin interpoliert. Nebenstehend ist der extrahierte CT-Faserdatensatz ($45^\circ/45^\circ$) abgebildet.

Die Ermittlung der konzentrischen Kreise in der stereographischen Projektion ergibt sich aus dem Raumwinkel (Ω_f) (s. Abb. 3-3, **b**). Dieser wird definiert über ein Kugeloberflächensegment, welches unter dem Öffnungswinkel 2θ in einer Einheitskugel erscheint. Mathematisch wird Ω_f über die Mantelfläche einer Kugelkappe nach Gl. [3-5] hergeleitet (s. Abb. 3-3, **c**)).

$$\Omega = \frac{A_M}{r^2} = \frac{2\pi r h'}{r^2} \quad [3-5]$$

Ω Raumwinkel; [Ω] = Steriant

r Radius der Einheitskugel; [r] = mm

A_M Mantelfläche; [A_M] = mm²

h' Stich nach Abb. 3-3, b); [h] = mm

Durch Umformen ergibt sich Ω_f zu Gl. [3-6].

$$\Omega_f = 2\pi \cdot (1 - \cos \theta) \quad [3-6]$$

Fasern, die in einem Raumwinkelbereich, beschrieben über Azimuth- ($\varphi_f \pm \Delta\varphi_f$) und Polarwinkel ($\theta_f \pm \Delta\theta_f$), liegen, werden zusammengefasst. Vergleichbare Aussagen über die Faserorientierung ($\eta_{f,3D}$) werden bei unterschiedlicher Faseranzahl (n_f) pro Messfeld über Normierung mit der Flächendichte erhalten. Daraus ergibt sich das Orientierungsverteilungsmaxima jeweils zu 1 (s. Legende in Abb. 3-3, a)).

In der letzten Zeit gab es vermehrt Bemühungen, die 3D-Bildanalyse von Faserstrukturen voranzutreiben [65]. Einschränkungen gibt es derzeit noch bei der Herausarbeitung aus dem Gesamt-CT-Datensatz, der mangelhaften Segmentierungsqualität von Fasern sowie der Darstellung der Informationen.

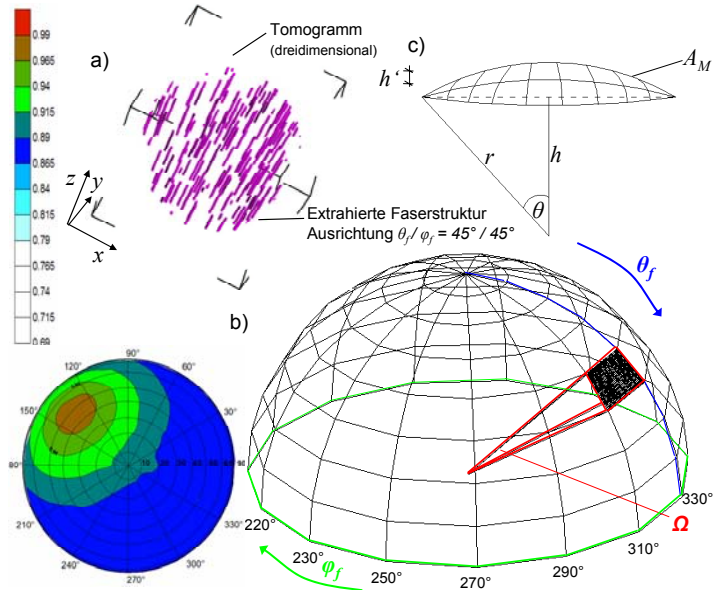


Abb. 3-3 Beschreibung der dreidimensionalen Faserorientierung ($\eta_{f,3D}$), **a)** Darstellung der Orientierungswinkel φ_f und θ_f in einer stereographischen Projektion (normiert, Orientierung $45^\circ/45^\circ$), (Darstellung des Computertomographie-Datensatzes bei Faserextraktion), **b)** Mantelfläche einer Kugelkappe, **c)** Berechnung des Raumwinkels (Ω_f) auf der Halbkugel

Lokale Faserverteilung und -konzentration

Die lokale Faserverteilung (χ_f) und die -konzentration (ψ_f) werden über kg/m³ bzw. Vol.-%, bezogen auf das Gesamtmaterial, definiert. ψ_f dient zur Beschreibung der gesamtheitlichen Verteilungsdichte im Raum. χ_f wird zur Beschreibung lokaler Divergenzen innerhalb der gesamtheitlichen Verteilungsdichte im Raum genutzt. χ_f und ψ_f können bei der 3D-Erfassung der Faserstruktur direkt aus dem „gelabelten“ CT-Datensatz über die Anzahl der Faserobjek-

te (n_f), bezogen auf das Volumen, herausgelesen werden. Sie können jeweils in die Masse- bzw. Volumenangabe umgerechnet werden.

Lage der Faser im Grundmaterial

Die Faserlage im Grundmaterial wird über die Position der Fasern im Bezug auf die mesoskopischen Phasen Feststoff und Makropore beurteilt. Ein wichtiger Indikator ist, wie wandnah die Fasern an den Makroporen liegen und in welchem Teil des Feststoffs (Steg, Stegwand) die Fasern angeordnet sind. Eine Quantifizierung der Faserlage kann u. a. über die mittlere Massebelegung mit Feststoffmaterial durchgeführt werden.

Räumliche Faseranordnung

Die räumliche Faseranordnung wird über die Nachbarschaftsbeziehungen der Fasern untereinander beurteilt. Sie bilden ein Fasernetzwerk. Bei isotroper 3D-Faserorientierung lässt sich die räumliche Faseranordnung anschaulich über den mittleren Faserabstand (s_f) nach Gl. [3-7] beschreiben. Die Faserschwerpunkte liegen dabei auf den Eckpunkten eines kubisch-raumzentrierten Gitters. Der kürzeste Abstand zwischen zwei Faserschwerpunkten und damit die Gitterkonstante ergibt idealisiert den mittleren Faserabstand (s. Gl. [3-7]) [31].

$$s_f = \sqrt[3]{\frac{V_{Sus.}}{n_f^3}} \quad [3-7]$$

s_f Mittlerer Faserabstand (bei isotroper dreidimensionaler Faserorientierung); [s_f] = mm

V_{Sus} Volumen der Suspension; [V_{Sus}] = mm³

n_f Faseranzahl; [n_f] = 1

Weiterhin lassen sich, ähnlich wie in Kap. 2.2.1, Nachbarschaftsbeziehungen über Paarkorrelationsfunktionen bestimmen. Es wird an dieser Stelle auf Kap. 3.5.3 verwiesen.

Faserverbund zum Grundmaterial

Der Faserverbund im Grundmaterial wird beurteilt über die Qualität der Fasereinbettung im Feststoff (Hohlräume, etc.). Auszugsversuche dienen als weitere Kenngröße der Beurteilung.

3.4 Faserwirkmechanismen

Zur Erläuterung der Faserwirkung werden Ansätze aus dem Bereich der faserverstärkten zementgebundenen Baustoffe herangezogen. Die chemische und physikalische Zusammensetzung des Zementsteins zeigt ein vergleichbares Verbundverhalten [92]. Es sind durch die Wechselwirkungen mit dem Grundmaterial folgende drei Faserwirkmechanismen unter Beanspruchungen möglich:

- Reduzierung der Mikrorissbildung bzw. -ausbreitung,
- Statische Bewehrungsfunktion,
- Aufnahme von Beanspruchungen im Rissbereich [88].

Mikrorissbildung und -ausbreitung werden durch die Mikrobewehrungsfunktion der Faser reduziert. Fasern nehmen die Zugkräfte in unmittelbarer Umgebung eines sich bildenden (Mikro-)Risses auf bzw. dissipieren durch eine erzwungene Rissumlenkung Energie. Rissweiterleitung bzw. -vergrößerung wird verhindert [9]. Lokal auftretende, hohe Spannungen werden abgebaut. Um diesen Wirkmechanismus zu aktivieren, ist u. a. ein geringer mittlerer Faserabstand (s_f) im Grundmaterial erforderlich.

Eine statische Bewehrungsfunktion im Sinne einer makroskopischen Bewehrung bzw. die Aufnahme von Beanspruchungen im Rissbereich erfordert hohe Verbundwirkung zum Grundmaterial und höhere mechanische Fasereigenschaften gegenüber dem Grundmaterial.

Die Wirkung beruht darauf, dass einwirkende Kräfte durch Verbundspannungen vom Grundmaterial über die Verbundzone in die Fasern eingeleitet werden. Die Verbundmechanismen sind der initiale Adhäsions- bzw. Haftverbund und der Reibverbund. Versagensmechanismen sind Faserauszug und -bruch. Ein zähes duktiler Versagen erfordert elastische Fasereigenschaften bzw. sukzessiv nachgebenden Verbund bei Faserauszug.

Das Festigkeits- und Verformungsverhalten faserverstärkter zementgebundener Baustoffe kann über einen mathematischen Ansatz beschrieben werden [9], [59]. Er berücksichtigt Faserkonzentration (ψ_f), -orientierung ($\eta_{f,3D}$) und -einbindelänge (l_b) in Beanspruchungsrichtung.

Dabei lässt sich die Faserauszugskraft (F_f) über den exponentiellen Ansatz nach Gl. [3-8] erfassen.

$$F_f(\delta, \varphi) = F(\delta, \varphi = 0) \cdot e^{f\varphi} \quad [3-8]$$

- F_f Faserauszugskraft; $[F_f] = N$
 δ Verschiebung am Faseraustrittspunkt; $[\delta] = mm$
 φ Winkel zwischen Faser und Beanspruchungsrichtung; $[\varphi] = Grad$
 f Winkelbeiwert; $[f] = 1$

Bei Annahme kreisrunder Faserquerschnitte ergeben sich für den elastischen Bereich (Faseraktivierung (A)) nach Gl. [3-9] und für den Bereich des Faserauszugs (Debonding (D)) nach Gl. [3-10] folgende Faserauszugskräfte (s. **Abb. 3-4**).

$$F_{f,A}(\delta) = \frac{\pi}{2} \sqrt{d_f^3 E_f \tau_f \delta} \cdot e^{f\varphi} \quad \text{für } \delta \leq \delta_0 \quad [3-9]$$

$$F_{f,D}(\delta) = d_f \pi \tau_f (l_b - (\delta - \delta_0)) \cdot e^{f\varphi} \quad \text{für } \delta_0 < \delta \leq l_b \quad [3-10]$$

- $F_{f,A}$ Faserauszugskraft (Aktivierung); $[F_{f,A}] = N$ E_f Elastizitätsmodul der Faser; $[E_f] = N/mm^2$
 $F_{f,D}$ Faserauszugskraft (Debonding); $[F_{f,D}] = N$ l_b Einbindelänge der Faser; $[l_b] = mm$
 δ Verschiebung am Faseraustrittspunkt; $[\delta] = mm$ δ_0 Verschiebung am Faseraustrittspunkt bei Beginn des Faserauszugs; $[\delta_0] = mm$
 d_f Durchmesser der Faser; $[d_f] = mm$

Bei Überlagerung der Faseranteile in Beanspruchungsrichtung unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $p(\varphi) = \sin(\varphi)$ und $p(z) = l_f/2$ ergibt sich bei isotroper Faserorientierung die Gl. [3-11].

$$\sigma_{A,D}(\delta) = \frac{4 \cdot \psi_f}{\pi \cdot d_f^2} \left[\int_0^{\pi/2} \int_0^{(l_f/2)} \cos \varphi F_{f,A,D}(\delta) \cdot p(\varphi) \cdot p(z) dz d\varphi \right] \quad [3-11]$$

- $\sigma_{A,D}$ Rissüberbrückungsspannung für den Bereich Faseraktivierung (A) bzw. Debonding (D); $[\sigma_{A,D}] = N/mm^2$
 ψ_f Faserkonzentration; $[\psi_f] = Vol.-%$
 z Abstand zwischen Fasermittelpunkt und Rissfläche; $[z] = mm$

Durch Integration über z und φ erhält man für die Faseraktivierung (A) die Gl. [3-12] und für das Debonding (D) die Gl. [3-13], [9].

$$\sigma_{f,A}(\delta) = \sigma_0 \frac{2}{4 + f^2} (1 + e^{f \cdot \pi/3}) \left[\sqrt{\frac{\delta}{2\delta_0}} - \frac{\delta}{4\delta_0} \right] \quad \text{für } 0 \leq \delta \leq 2\delta_0 \quad [3-12]$$

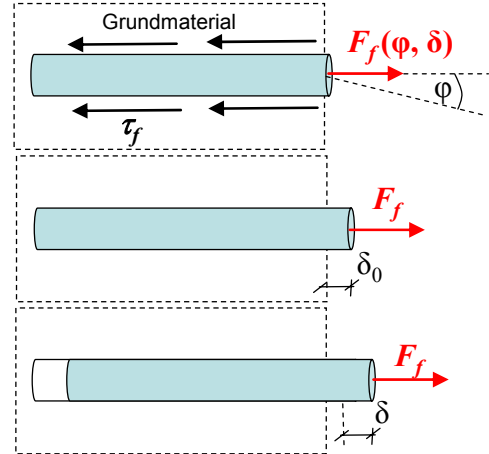


Abb. 3-4 Schematische Darstellung der Verschiebung bei Faseraktivierung (A) und Faserauszugs (D)

$$\sigma_{f,D}(\delta) = 2\sigma_0 \frac{2}{4+f^2} (1 + e^{f \cdot \pi/3}) \left[\frac{1}{2} - \frac{\delta - 2\delta_0}{l_f} \right]^2 \quad 2\delta_0 < \delta \leq \frac{l_f}{2} \quad [3-13]$$

σ_0 Maximale Rissüberbrückungsspannung; $[\sigma_0] = \text{N/mm}^2$

In Beanspruchungsrichtung geneigte Fasern erfahren im Riss zusätzliche Belastungen. An den Umlenkpunkten treten Biegespannungen auf. Diese Umlenkkräfte erzeugen Querkzugspannungen, die die Fasern an die Rissante des Grundmaterials drücken und damit eine Kerbwirkung hervorrufen [59]. Diese zusätzlichen Belastungen müssen bei genauer Betrachtung ergänzend berücksichtigt werden.

Die Projektionslänge in Beanspruchungsrichtung ($\kappa_{f,3D}$) wird nach Gl. [3-14] errechnet. Dieser gibt den richtungsabhängig zum Lastabtrag zur Verfügung stehenden Faserlängenanteil an.

$$\kappa_{f,3D} = \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} \frac{\cos \theta \cdot \cos \varphi}{(\pi/2)^2} d\theta d\varphi \quad [3-14]$$

$\kappa_{f,3D}$ Dreidimensionaler Faserorientierungsbeiwert in Beanspruchungsrichtung; $[\kappa_{f,3D}] = 1$

φ Azimuthwinkel (Winkel um die Vertikale); $[\varphi] = \text{Grad}$

θ Polarwinkel (Winkel gegen die Vertikale); $[\theta] = \text{Grad}$

Bei isotroper 3D-Faserorientierung ($\eta_{f,3D}$) ergibt sich die richtungsabhängige Faserwirksamkeit zu 41%. Bei Einbeziehung dieser richtungsabhängigen Faserwirksamkeit und Berücksichtigung der Faserform kann mithilfe von Gl. [3-7] der effektive mittlere Faserabstand (s_{eff}) (Faserorientierungs-Korrekturfaktor) nach Gl. [3-15] ermittelt werden.

$$s_{eff} = 13,8 \cdot \frac{d_f}{\psi_f} \quad [3-15]$$

s_{eff} Effektiver mittlerer Faserabstand; $[s_{eff}] = \text{mm}$

ψ_f Faserkonzentration; $[\psi_f] = \text{Vol.-%}$

Weitere Berechnungsansätze bei Berücksichtigung anderer Wirksamkeits- und Formparameter werden in [85] vorgestellt.

Energiebetrachtungen

Unter Berücksichtigung von Gl. [3-12] und Gl. [3-13] können die Verformungsenergien für Faseraktivierung ($G_{f,A}$) und Debonding ($G_{f,D}$) nach Gl. [3-16] und Gl. [3-17] erfasst werden [9].

$$G_{f,A}(\delta) = \sigma_0 \frac{2}{4+f^2} (1 + e^{f \cdot \pi/3}) \left[\frac{1}{3} \sqrt{\frac{2}{\delta_0}} \delta^{3/2} + \frac{1}{8\delta_0} \cdot \delta^2 \right] \quad \text{für } 0 \leq \delta \leq 2\delta_0 \quad [3-16]$$

$$G_{f,D}(\delta) = \sigma_0 \frac{2}{4+f^2} (1 + e^{f \cdot \pi/3}) \left[\frac{5\delta_0}{6} + \frac{l_f}{12} - \frac{4\delta_0 + l_f - 2\delta^3}{12l_f^2} \right] \quad \text{für } 2\delta_0 < \delta \leq \frac{l_f}{2} \quad [3-17]$$

$G_{f,A}(\delta)$ Entfestigungsenergie im elastischen Bereich (Aktivierung); $[G_{f,A}(\delta)] = \text{N/mm}$

$G_{f,D}(\delta)$ Entfestigungsenergie für den Faserauszug (Debonding); $[G_{f,D}(\delta)] = \text{N/mm}$

3.5 Vorbetrachtungen - Faserverstärkter Porenbeton

Faserverstärktem Porenbeton fällt zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine baupraktische Bedeutung zu. Die theoretischen Grundlagen zur Herstellung, zu den Verhaltensweisen und zu den Eigenschaften sind nur in den Anfängen bekannt. Der „kleine Anteil“ der Forschung, der in der Vergangenheit stattgefunden hat, fokussierte sich nahezu ausschließlich auf die Poten-

ziale zur Steigerung der Festigkeit unter Druck und Biegung. Untersuchungen unter Betrachtung des gesamtheitlichen Festigkeits- und Verformungsverhaltens sowie anderer Eigenschaften des faserverstärkten Porenbetons sind nahezu nicht vorhanden.

3.5.1 Derzeitiger Kenntnisstand

Untersuchungen im Rahmen von Patentveröffentlichungen der Ytong Holding GmbH [N 15], [N 10], [N 11] zeigen Steigerungen der Druckfestigkeit (β_D) des Porenbetons bei Einbau einer Mikrobewehrung in Form von kurzen Pflanzenfasern (Faserlänge $l_f = 0,01\text{--}2,0\text{ mm}$, Faserkonzentration $\psi_f = 0,25\text{--}1,0\text{ M.-%}$ zu Trockstoffeinwaage). Bei den Untersuchungen wurden mittels Ultraschall aufgeschlossene elementarisierte Flachsfasern verwandt. Sie werden vorzugsweise, aufgrund ihrer Affinität zu einigen Mischungsbestandteilen, im Feststoffmaterial eingebettet [N 11]. Es lassen sich Festigkeitssteigerungen von bis zu 40% unter Biegebeanspruchung erzielen. Die Rohdichte bei Einbau dieser Fasern erhöht sich um 3–5%.

[N 16] schlägt den Einsatz von Polymerisationsfasern aus Polymethylpenten ($l_f = 2\text{--}10\text{ mm}$, $\psi_f = 0,5\text{--}5,0\text{ M.-%}$ /Trockstoffeinwaage) im Porenbeton vor. Polymethylpentenfasern sind unter den hydrothermalen Härtingsbedingungen der Porenbeton-Herstellung inert. Untersuchungen zeigen Steigerungen des Festigkeits- und Verformungsverhaltens, die Zugfestigkeit kann u. a. um bis zu 70% gesteigert werden. Eine Stabilisierungswirkung im Treibverhalten wird angedeutet. Für das Schneiden des Porenbetons wird die übliche Methode über den „stehenden Drahtdurchzug“ im grünsten Zustand vorgeschlagen (s. Kap. 2.1).

Park et al. [56] zeigen bei Einbau von Fasern aus alkaliresistentem (AR) Glas ($l_f = 10\text{ mm}$, Faserdurchmesser $d_f = 14\text{ }\mu\text{m}$) und Kohlenstoff ($l_f = 10\text{ mm}$, $d_f = 7\text{ }\mu\text{m}$) ebenfalls Steigerungen in den Festigkeiten unter Druck- und Zugbeanspruchungen des Porenbetons. Gegenüber dem unverstärkten Porenbeton werden deutliche Steigerungen im Festigkeits- und Verformungsverhalten unter Biegebeanspruchungen erreicht (s. **Abb. 3-5**). Die Entfestigungsenergien (G_E) werden wesentlich erhöht. Untersuchungen beider Fasermaterialien zu den Faserbeständigkeiten unter den hydrothermalen Härtingsbedingungen der Porenbeton-Herstellung zeigen keine Auffälligkeiten.

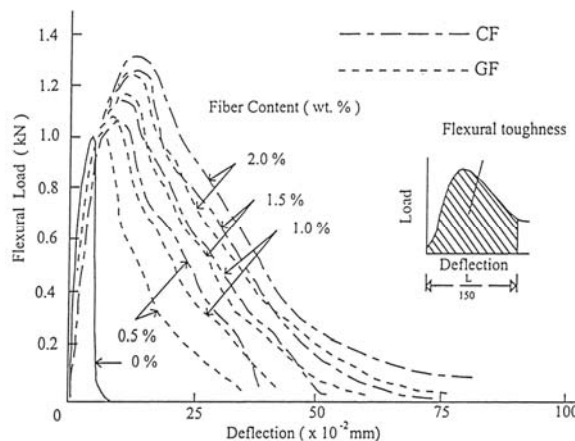


Abb. 3-5 Kraft-Durchbiegungs-Linien unter Biegebeanspruchung bei Einbau von Kurzfasern aus Kohlenstoff (CF) und alkaliresistentem Glas (GF) in den Porenbeton [56]

West et al. [95] untersuchten den Einbau von AR-Glasfasern (Cem-FIL) in dampfgehärteten unporisierten Calciumsilikatmaterialien. Dabei zeigt sich bei der AR-Glasfaser eine uneingeschränkte Beständigkeit bei hydrothormaler Beanspruchung und im Langzeitverhalten.

Die bisher durchgeführten Untersuchungen zu faserverstärktem Porenbeton sind noch unzureichend. Um detailliertere Aussagen über das Festigkeits- und Verformungsverhalten machen zu können, sind systematische Untersuchungen der Eigenschaften und Betrachtungen zu den Zusammenhängen von Eigenschaften und Gefügestruktur notwendig. Im Folgenden werden dazu theoretische Vorüberlegungen angestellt.

3.5.2 Vorüberlegungen zu Fasereinbau

Im Herstellungsprozess des faserverstärkten Porenbetons sind spezifische Verhaltensweisen zu erwarten (s. Kap. 2.3). Es wird vermutet, dass die Gefügestrukturen am Endprodukt faserverstärkter Porenbeton markante Charakteristika aufweisen. Folgende Verhaltensweisen bzw. Problemstellungen können vorausgesagt werden:

- Die Anfangssuspension ist, aufgrund geringerer Viskosität bei hohen Mehlkornanteilen, anfällig für Verteilungsdifferenzen und Orientierungsinhomogenitäten der Fasern.
- Der Treibprozess und die damit nach oben gerichtete Treibbewegung lassen divergierende Faserverteilungen und Faservorzugsorientierungen erwarten (s. Kap. 3.2). Feststoffstrukturen bzw. Makroporositäten werden faserspezifisch im Treibprozess verändert.
- Der Treibprozess und die hydrothermale Behandlung beanspruchen die Fasern.
- Die Faserwirksamkeit im Porenbeton ist abhängig von der Feststoffstruktur bzw. der Makroporosität, den Fasern sowie der Beanspruchungsart.

Die o. g. Punkte sind in der bisher veröffentlichten Forschung kaum berücksichtigt worden.

3.5.3 Fasereinfluss auf die Bildung der Gefügestruktur

Viele Fasern binden Porenbeton-Suspension auf ihren Oberflächen. Interagierend kommt es durch die Wechselwirkungen der Fasern mit der Suspension und durch weitere faserspezifische Einflüsse im Treibprozess zu Gefügestrukturveränderungen. Die Fasern werden im getriebenen Zustand des Porenbetons vorzugsweise im Feststoff der Stege und Stegwände liegen (s. auch Kap. 3.2). Die Veränderung der Gefügestruktur ist abhängig von folgenden Faser- sowie Mischungs- und Randparametern.

Tab. 3-1 Einflussgrößen auf die Bildung der Gefügestruktur des faserverstärkten Porenbetons

Faserparameter	Mischungs- und Randparameter
• Hydrophilie und Hygroskopizität der Faser, • Oberflächenstruktur der Faser, • Faserform (u. a. Faserlänge (l_f), Faserdurchmesser (d_f)), • Faserkonzentration (ψ_f),	• Beschaffenheit der Treibsuspension, • Treibprozessparameter, • Beschaffenheit von Treibkörper und -schalung.

Gefügestrukturanisotropien

Durch gesteigerte Steg- bzw. Stegwandanteile in Faserlängsrichtung entsteht bei einer möglichen Faservorzugsrichtung eine anisotrope räumliche Gefügestruktur.

Folgende Verhaltensweisen werden vermutet:

- Fasern mit $l_f \gg l_s$ (Faserlänge (l_f) und Steg- bzw. Stegwandlänge (l_s)) können parallel zur Faserausrichtung im Nahbereich der Faser zu einer Aneinanderreihung von Makroporen („Porenkette“) führen (s. **Abb. 3-6, links, a**). Die Feststoffphase mit der Faser geht als materialbelegter Steg über die komplette Faserlänge.
- Fasern mit $l_f < l_s$ und höherer Faserkonzentration (ψ_f) können durch die gesteigerte Menge an suspensionsbindendem Fasermaterial zu deutlich dickeren Steg- bzw. Stegwandanteilen parallel zur Faserausrichtung führen (s. **Abb. 3-6, links, b**).

Es wird eine Überlagerung der Ausrichtungsphänomene im Treibprozess vermutet. Die o. g. Faser- und Steg- bzw. Stegwandausrichtungen parallel zur Treibrichtung und die damit verbundenen Porenanordnungen überlagern sich mit den flachliegenden rotationselliptischen Makroporenformen orthogonal zur Treibrichtung (s. Kap. 2.2.3). Die Superposition beider Phänomene ergibt möglicherweise einen Ausgleich beider Anisotropiephänomene.

Die Untersuchung des anisotropen Verhaltens setzt, ergänzend zur Beschreibung der Nachbarschaftsbeziehungen über die Paarkorrelationsfunktion (s. Kap. 2.2.1), die Kenntnisse weiterer Kennwerte zur Charakterisierung der räumlichen Anordnung der Feststoff- bzw. Makroporenphase voraus. **Abb. 3-6, rechts** gibt eine Auswahl von Analysemöglichkeiten.

Die Analysemöglichkeiten sind zwei- (2D) bzw. dreidimensional (3D) möglich. Feststoff- und Makroporenphase werden dabei durch eine Schwellwertsetzung extrahiert (s. Kap. 2.2).

Gefügestrukturanisotropien können über eine Feststoffphasenerosion bzw. Makroporositätsdilation quantitativ erfasst werden [29], [86]. Abb. 3-6, **rechts, a)** zeigt in 2D Darstellung schematisch das Konzept der Dilation der Makroporosität. Die Makroporen werden in den Bildern von links nach rechts sukzessiv über einen Dilationsalgorithmus pixelbasiert vergrößert. Bei Anisotropien in der Makroporosität bleiben Stegsysteme in einer Vorzugsrichtung stehen (hier: beispielhaft in y -Richtung); die Makroporen reihen sich aneinander. Bei der Erosion der Feststoffphase tritt das gleiche Phänomen auf. Durch die Bildanalyse können die Orientierungen bzw. Formen der Makroporen neu und eindeutiger quantifiziert werden.

Gefügestrukturanisotropien lassen sich weiterhin über das Konzept der mittleren Schnittpunkt-Länge, (MIL, Mean Intercept Length) beschreiben. Dieses Konzept beruht darauf, dass der mittlere Abstand der Kreuzungspunkte zwischen einer normierten Linie und der Grenzfläche Pore-Feststoff als Funktion der Orientierung der Linie nach Abb. 3-6, **rechts, b)** ermittelt wird [19]. Das Ergebnis kann in einem Polarkoordinatensystem oder einem kartesischen Koordinatensystem dargestellt werden. Eine vorhandene Anisotropie ergibt in Polardigramm-Darstellung 2D eine Ellipse bzw. 3D ein Rotationsellipsoid. Im kartesischen Diagramm ergeben Anisotropien signifikante Maxima bzw. Minima in der Verlaufsform.

Unter Nutzung des Keim-Korn-Modells aus der stochastischen Geometrie ergibt sich eine weitere Möglichkeit der Beschreibung. Dazu werden die vorhandenen Keime (Porenschwerpunkte) in einem normierten Kreisring (annulus) bei eingeschlossenem Winkel α gezählt (s. Abb. 3-6, **rechts, c)**) [86]. Die Ausrichtung von α kann so erfolgen, dass Richtungsphänomene charakterisiert werden können. Die Porenform bleibt gänzlich unberücksichtigt. Eine Beschreibung ist beispielsweise nach Gl. [3-18] möglich.

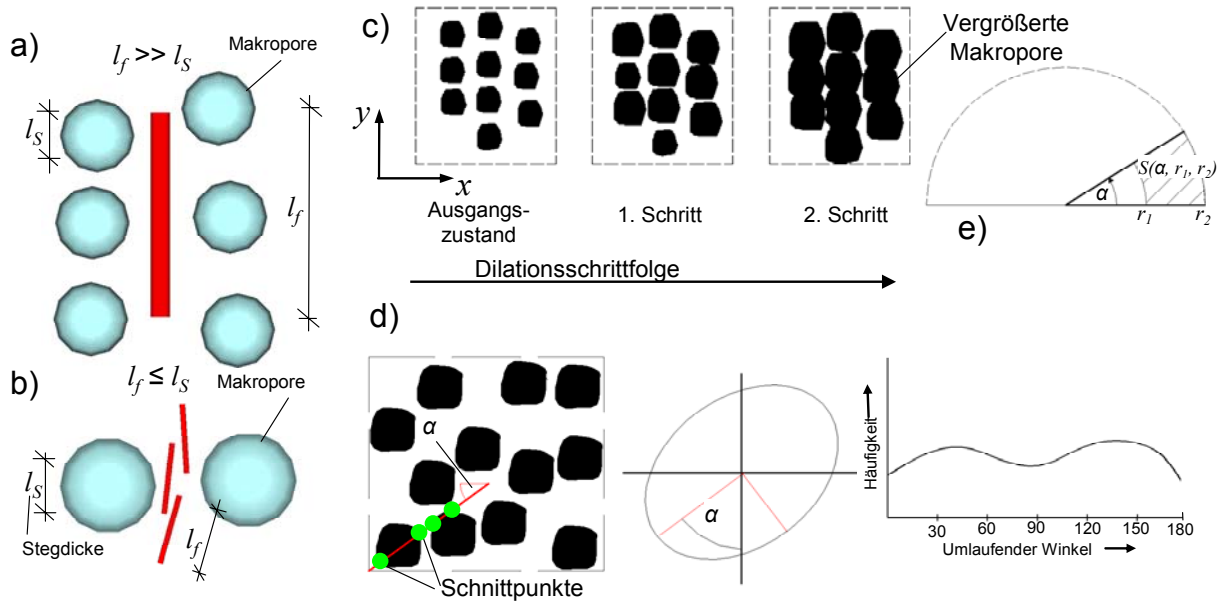


Abb. 3-6 Anisotropien faserverstärkter makroporöser Gefügestrukturen, **links:** Möglichkeiten der Ausbildung von Gefügestrukturanisotropien durch Fasereinbau, **a)** Phänomen bei Einbau von Fasern mit Faserlängen (l_f) $\gg$ Steglängen (l_s), **b)** Phänomen von Fasern mit Faserlängen mit $l_f \leq l_s$, **rechts:** Zweidimensionale (2D) Beschreibungsmöglichkeiten von Gefügestrukturanisotropien, **c)** 2D-Darstellung des Konzepts der Dilation der Makroporosität, **d)** 2D-Darstellung des Konzepts der mittleren Schnittpunkt-Länge (MIL), **e)** 2D-Darstellung des Konzepts der winkelabhängigen Schwerpunktausrichtung [86]

$$\Theta_{r_1, r_2}(\alpha) = \frac{S(n)_{\alpha, r_1, r_2}}{S(n)_{\pi, r_1, r_2}} \quad [3-18]$$

$\Theta_{r_1, r_2}(\alpha)$ Relative Häufigkeit in Abhängigkeit von α ; $[\Theta_i] = 1$

$S(n)_{\alpha, r_1, r_2}$ Anzahl der Objekte im eingeschlossenen Winkel α ; $[S_{\alpha, r}] = 1$

$S(n)_{\pi, r_1, r_2}$ Anzahl der Objekte im eingeschlossenen Winkel π ; $[S_{\pi, r}] = 1$

Die Faserstrukturen werden i. d. R. integral bei Analyse der Feststoffphase erfasst. Anisotrope räumliche Anordnungen der Faserschwerpunkte können, aufgrund der sich überlagernden Orientierungsphänomene, unberücksichtigt bleiben. Es werden ausschließlich die Faserorientierungen als Anisotropien erfasst.

3.5.4 Fasereinfluss auf die Eigenschaftsanisotropien und deren Nutzung

Potenzielle Gefügestrukturanisotropien aus Faser- sowie Feststoff- und Makroporenausrichtung (s. Kap. 2.2.3 und Kap. 3.5.3) lassen richtungsabhängige Eigenschaften vermuten. Eigenschaften in einer Richtung könnten auf „Kosten“ der anderen Richtung gesteigert werden. Die Eigenschaften in einer „schwachen“ Richtung werden oft nur eingeschränkt gebraucht.

Anisotrope Faserstrukturen

Anisotrope Faserstrukturen könnten das Festigkeits- und Verformungsverhalten in einer Richtung vermutlich steigern. Eine optimale Verstärkung stellt sich bei einer Faserausrichtung parallel zur größten Zugbeanspruchung ein. Die Phänomene der Quer- und Längszugbehinderung bei spezifischen Beanspruchungen könnten so richtungsabhängig durch den zielgerichteten Einbau der Faserstrukturen genutzt werden (s. Kap. 2.2.3).

Die bauphysikalisch relevanten Transportphänomene Wärme-, Schall- und Feuchteleitung (s. Kap. 2.4.1) könnten durch ausgerichtete Faserstrukturen ebenfalls in einer Beanspruchungsrichtung gesteigert werden. Der faserspezifische Einfluss auf Dämpfung und Resonanz bei der Schallübertragung könnte ein weiterer Untersuchungsansatz sein.

Die Faserwirkung kann u. a. über den Effektivitätsindex (ξ_f) erfasst werden (s. Gl. [3-19]).

$$\xi_f = \frac{x_{f, pro}}{x_f} \quad [3-19]$$

ξ_f Effektivitätsindex; $[\xi_f] = 1$

$x_{f, pro}$ Eigenschaft bei paralleler unidirektionaler Faserausrichtung, z. B. Druckfestigkeit; $[x_{f, pro}] = N/mm^2$

x_f Gemessene Eigenschaft bei vorhandener Faserausrichtung, z. B. Druckfestigkeit; $[x_f] = N/mm^2$

Anisotrope Feststoffstrukturen

Anisotrope Feststoffstrukturen könnten die Eigenschaften in einer Richtung vermutlich ebenfalls steigern. Faserausrichtungen und damit verbundene höhere Materialbelegungen in Faserrichtung ergeben richtungsabhängig höhere Feststoffanteile (s. Kap. 3.5.3).

Das Festigkeits- und Verformungsverhalten und die bauphysikalisch relevanten Transportphänomene Wärme-, Schall- und Feuchteleitung könnten, aufgrund der direkten Abhängigkeit zur Feststoffstruktur, richtungsabhängig verbessert werden. Neben der richtungsabhängig höheren Massebelegung ergeben sich Unterschiede in den Eigenschaften durch die Anordnung der Makroporen (kettenförmige Makroporenanordnung, s. Kap. 3.5.3).

Es könnte möglich sein, zielgerichtet faserverstärkten Porenbeton für die Verbesserung des richtungsabhängigen Verhaltens herzustellen. Plansteine und -elemente müssten in Abhängigkeit zur maßgebenden Beanspruchungsrichtung eingebaut werden. Quantifizieren ließen sich diese Eigenschaftsanisotropien u. a. über den Anisotropieindex (I_A) nach Gl. [3-20] im Bezug auf die Treibrichtung.

$$I_A = \frac{x_{par}}{x_{orth}} \quad [3-20]$$

I_A Anisotropieindex; $[I_A] = 1$

x_{par} Eigenschaft parallel zu einer definierten Richtung, z. B. Druckfestigkeit; $[x_{par}] = N/mm^2$

x_{orth} Eigenschaft orthogonal zu dieser definierten Richtung, z. B. Druckfestigkeit; $[x_{orth}] = N/mm^2$

Diese möglichen anisotropen Faser- und Feststoffstrukturen in faserverstärkten, porös getriebenen Gefügestrukturen, bei Ausbildung von richtungsabhängigen Eigenschaften, wurden in der Vergangenheit nicht untersucht; es liegen keine Forschungsergebnisse vor.

3.6 Gefügestrukturanalyse - Faserverstärkter Porenbeton

Zur Erfassung der Gefügestruktur des Porenbetons (Feststoffstruktur bzw. Makroporosität) wurde in der Vergangenheit zweidimensional (2D) das Rückstrahlungsverfahren und 3D teilweise die Röntgen-Computertomographie eingesetzt (s. Kap. 2.2.3). Die Gefügestrukturanalyse wurde computergestützt über eine 2D- bzw. 3D-Bildanalyse durchgeführt. Analysemethoden am faserverstärkten Porenbeton sind aus der Literatur nicht bekannt.

Faserstruktur

Die 2D-Rückstrahlungsverfahren sind, aufgrund von Porenbetoncharakteristik, Faserform und -material sowie Schwierigkeiten bei der Umwandlung in räumliche Aussagen (Stereologie), zur Erfassung der Faserstruktur nur eingeschränkt sinnvoll. Daher ist die 3D-Strahlungs-Computertomographie zur Erfassung der Faserstruktur das optimale Verfahren. Diese muss die Fasern detektieren und eine extrahierte Faserinformation zur Verfügung stellen, sowie jeweilig an die Faserparameter (Kap. 3.3) und die Eigenschaften des Porenbetons (Rohdichte (ρ_{pb}), Probekörpergeometrie, etc.) angepasst werden. Marktübliche Fasern liegen in einer großen form- und materialbezogenen Bandbreite vor ($7 \mu\text{m} < \text{Faserdurchmesser } (d_f) < 2\,500 \mu\text{m}$, $1,4 \text{ g/cm}^3 < \text{Faserfeststoffdichte } (\rho_f) > 9,0 \text{ g/cm}^3$, einschränkende farbliche Kontrastierung). Optimal ist eine gleichzeitige Erfassung von Faser- und Feststoffstruktur über ein 3D-Erfassungsverfahren bei Nutzung des gleichen Datensatzes für die Bildanalyse.

Voruntersuchungen ergaben, dass sich die Strahlungs-Computertomographie (CT), unter flexibler Nutzung der Strahlungsart und -intensität sowie Auflösung, für die Detektion einer Vielzahl von Fasern anbietet. Die Strahlungs-CT ermöglicht Untersuchungen auf verschiedenen Größenskalen. Über die Röntgenstrahlung sind beispielsweise Auflösungen bis fünf Mikrometer, bei der monochromatischen Synchrotronstrahlung kleiner als ein Mikrometer möglich [93]. Durch Kombination beider Verfahren könnte eine Vielzahl von Faserformen detektiert werden. **Abb. 3-7** zeigt computertomographische Darstellungen bei Einbau von alkaliresistenten (AR) Glasfasern mit unterschiedlichen Formen.

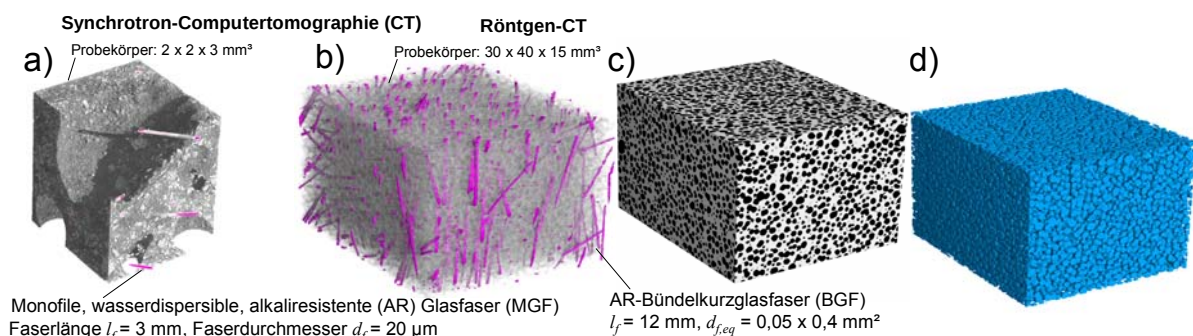


Abb. 3-7 Möglichkeiten der Erfassung der dreidimensionalen Gefügestruktur des faserverstärkten Porenbetons, **a)** Erfassung der wasserdispersiblen monofilen alkaliresistenten (AR) Glasfasern (Faserlänge $l_f = 3 \text{ mm}$, Faserdurchmesser $d_f = 20 \mu\text{m}$) (Synchrotron-Computertomographie (CT)-Datensatz), **b)-d)** Erfassung der AR-Bündelglasfasern ($l_f = 12 \text{ mm}$, $d_{f,eq} = 0,05 \times 0,4 \text{ mm}^2$) (Röntgen-CT-Datensatz), **b)** Faserextrahierung bei Transparenzschaltung von Feststoff und Makroporosität, **c)** Binärisierte Darstellung der Gefügestruktur (Makropore: schwarz, Feststoff: weiß), **d)** Extrahierung der Makroporosität

Die mesoskopischen Phasen Feststoff, Makropore und Glasfaser können hervorragend erfasst und voneinander getrennt werden. **Abb. 3-7, a)** zeigt einen Synchrotron-CT-Datensatz. Die eingebauten wasserdispersiblen monofilen AR-Glasfasern sind detektier- und extrahierbar. Aufgrund der hohen Objektselektierung lässt die Synchrotron-CT außerdem quantitative Aussagen zu Menge und Größe der Bindersandrestpartikel zu. **Abb. 3-7, b)-d)** zeigt einen

Datensatz aus der Röntgen-CT. Fasern größerer Form (beispielhaft: AR-Bündelglasfasern) sind durch dieses Verfahren detektier- und extrahierbar (s. Abb. 3-7, b)) sowie über die 3D-Bildanalyse auswertbar. Weitere Möglichkeiten der Phasenextraktion sind in Abb. 3-7, c) und Abb. 3-7, d) dargestellt.

Nach der Phasenseparierung und der Einzelobjektsegmentierung können geeignete computergestützte 3D-Bildanalysealgorithmen genutzt werden, um jeweils die in Kap. 2.2.1 und die in Kap. 3.3 beschriebenen Kennwerte der Feststoff- und der Faserstruktur zu analysieren. Dazu werden die pixel- bzw. voxelbasierten Informationen automatisiert vermessen.

Einschränkungen

Die Faserdetektion bzw. -extrahierung zeigt verfahrensabhängige Einschränkungen bei Faserfeststoffdichten $\rho_f < 1,9 \text{ g/cm}^3$. Das Feststoffmaterial wird, aufgrund der spezifischen Auflösung, einschließlich einiger Teile der Mikroporosität integral erfasst. Feststoff und Fasern besitzen ähnliche Absorptionskoeffizienten. Die erfassten Fasergrauwerte heben sich vom Grundmaterial im Datensatz nicht weit genug ab. Es sind keine Schwellwertoperationen zur Extrahierung des Fasermaterials möglich. Eine Vielzahl der Kunststoff- und Naturfasern fallen damit aus der Detektion heraus. Für die Beschreibung von d_f für eine zuverlässige Weiterverarbeitung der Informationen im Rahmen der Bildanalyse sind mindestens 3 Voxel im Datensatz notwendig. Die Auflösung muss dementsprechend angepasst werden.

Hohe Auflösung bedingt Einschränkungen in der maximal erfassbaren Probekörpergeometrie. Untersuchungen zur Faserverteilung (χ_f) und -orientierung ($\eta_{f,3d}$) mit statistischer Aussage setzen eine hohe Anzahl von detektierbaren Fasern (n_f) voraus. Faserverstärkter Porenbeton kann jedoch nur eine vergleichsweise geringe Faserkonzentration ($\psi_f \leq 2 \text{ Vol.-%}$, Vgl. faserverstärkte Kunststoffe) enthalten, es ergibt sich die Notwendigkeit der Festlegung einer faserspezifisch repräsentativen Probekörpergeometrie.

Eine Untersuchung der Morphologie einzelner Makroporen und der Umgebung einzelner Fasern sowie die Untersuchungen des Baustoffversagens bei Detektion von Rissbildung bzw. -ausbreitung sowie Faserdelamination sind jedoch bei diesen hohen Auflösungen möglich.

3D zerstörungsfreie Strahlungs-CT und Bildanalyse ergeben, aufgrund gesteigerter Leistungsfähigkeit in den Rechenkapazitäten derzeitiger Computer, neue Möglichkeiten der Beschreibung und Analyse der Phasen des Porenbetons. Bei der Wahl o. g. Verfahren steht die Suche nach dem Optimum zwischen den maximal erfüllbaren Prüfanforderungen, den maximal erzielbaren Genauigkeiten (Auflösungsvermögen) sowie den minimalen Kosten und der minimal notwendigen Kompetenz des Bedieners des Prüfsystems im Vordergrund [57]. Die Optimierung wird derzeit vorangetrieben, zukünftig wäre eine gesteigerte Einbeziehung der Verfahren in Forschung und Qualitätsüberwachung des Porenbetons erstrebenswert.

3.7 Faserwirkmechanismen unter Berücksichtigung der makroporösen Gefügestruktur des Porenbetons

Die Beschreibung der Faserwirkmechanismen im Porenbeton erfordert, ergänzend zu den Betrachtungen in Kap. 3.4, die Berücksichtigung der faserumgebenden Makroporosität. Als Versagensmechanismus bei Faserbeanspruchung kann, neben Faserbruch und Faserauszug, das Versagen des angrenzenden makroporösen Feststoffmaterials maßgebend werden. Dieses Versagen wird als Faserumgebungsbruch definiert.

Bei Ausbildung eines Makrorisses werden die Zugkräfte in die risskreuzende Faser eingeleitet. Die Faser erhält eine Zugkraft in Beanspruchungsrichtung. Die Verbundspannungen (τ) aus Haft- und Reibverbund (s. Kap. 3.4) wirken dieser Kraft entgegen (s. **Abb. 3-8, a)**). Der Verlauf der Verbundspannungen im Auszugsbereich des Haftverbunds ist hyperbolisch (s. **Abb. 3-8, b)**) [59]. Cox [11] beschreibt den Faserauszug im Zustand des Haftverbunds

über die Ausbildung eines fasenumlaufenden elastischen Kreiszylinders („Shear Lag Theorie“). Die Verbundspannungen werden dabei in einen die Faser umgebenden „Feststoffkreis-zylinder“ eingeleitet und pflanzen sich radial im Material fort. Die Theorie nimmt ausschließlich Verformungen infolge Schubspannungen bzw. -dehnungen in x -Richtung an. Die Normalspannungen in Längs- (dx) und Radialrichtung (dr) werden vernachlässigt.

In einem differenziellen Element werden die Verbundspannungen (τ_{rx}) in der Verbundzone bzw. in der Faserumgebung gezeigt (s. Abb. 3-8, **c**). Fall 1 stellt den Verlauf der Verbundspannungen im Abstand r vom Faserrand für ein homogenes Material dar (s. Abb. 2-7, **d**). In Abhängigkeit von der Koordinate r nehmen die Verbundspannungen durch Umlagerung nichtlinear ab („Abklingen“ der Verbundspannungen).

Bei Einbeziehung der Makroporosität des Porenbetons in der Faserumgebung kann der Fall 1 mit einem zusätzlichen Effekt überlagert werden. Die Verbundspannungen nehmen, aufgrund der Verringerung der zur Verfügung stehenden Spannungsfläche, durch den Anstieg der Makroporosität im Abstand r vom Faserrand bei konstanter Faserauszugskraft zu. Das Abklingen der Verbundspannungen in radialer Richtung ist porositätsabhängig. Es ergibt sich der Fall 2, wobei die schraffierte Fläche als indifferent dargestellt wird (s. Abb. 3-8, **d**). Der genaue Verlauf ergibt sich ausschließlich unter empirischer Betrachtung beider Phänomene.

Die Makroporosität ist in einem Abstand r vom Faserrand homogen verteilt. Im Nahbereich der Faser ist die Materialbelegung maßgebend. Die zur Verfügung stehende Fläche wird in einem Abstand r zum Faserrand reduziert. Die Verbundspannung im Abstand r wird als Faserumgebungsschubspannungen ($\tau_u(r)$) definiert. Erfassbar ist ($\tau_u(r)$) über Gl. [3-21].

$$\tau_u(r) = \frac{F_f}{A_{f,u}(r) - A_p(r)} = \frac{F_f}{(l_b \cdot 2\pi \cdot r) \cdot V_p} \quad [3-21]$$

τ_u	Faserumgebungsschubspannung; $[\tau_u] = \text{N/mm}^2$	l_b	Fasereinbindelänge; $[l_b] = \text{mm}$
F_f	Faserauszugskraft; $[F_f] = \text{N}$	V_p	Makroporosität; $[V_p] = \text{Vol.-%}$
$A_{f,u}$	Faserumgebungsfläche; $[A_f] = \text{mm}^2$	r	Abstand zum Faserrand; $[r] = \text{mm}$
A_p	Maßgebende Fläche im fasenumlaufenden Porenbetonmaterial; $[A_p] = \text{mm}^2$		

Inhomogene Spannungsfelder führen in Faserumgebung zu Spannungsspitzen in den Stegen bzw. Stegwänden. Bei Erreichen einer kritischen Faserumgebungsschubfestigkeit ($\tau_{u,krit}$) kommt es zum Materialversagen. Umliegende Bereiche werden beeinflusst und versagen fortsetzend bei Spannungsumlagerung. Ein „Bruchpfad“ bildet sich aus (s. Abb. 3-8, **e**). Die Faser wird mit einer umliegenden Verbundzone ausgezogen.

Die maximal durch eine Faser aufnehmbare Kraft wird somit durch die drei Faktoren maximale Faserzugkraft (F_β), maximale Verbundkraft (F_v) und kritische örtliche Umgebungsschubkraft (F_u) begrenzt (s. Gl. [3-22]).

$$\max F_f = \min (F_\beta, F_v, F_u(r)) \quad [3-22]$$

$\max F_f$	Maximale Faserauszugskraft; $[F_f] = \text{N}$	F_v	Kraft bei Verbundfestigkeit; $[F_v] = \text{N}$
F_β	Kraft bei Faserzugfestigkeit; $[F_\beta] = \text{N}$	F_u	Kraft bei Umgebungsfestigkeit; $[F_u] = \text{N}$

Daraus ergibt sich die maximale Faserauszugskraft (F_f) zu Gl. [3-23].

$$\max F_f = \min (\sigma_f \cdot A_f, \tau_a \cdot A_v, \tau_u \cdot A_u(r)) \quad [3-23]$$

σ_f	Faserzugfestigkeit; $[\sigma_f] = \text{N/mm}^2$	A_v	Faserverbundfläche; $[A_v] = \text{mm}^2$
A_f	Faserquerschnittsfläche; $[A_f] = \text{mm}^2$	τ_u	Charakteristische Materialschubfestigkeit; $[\tau_u] = \text{N/mm}^2$
τ_a	Charakteristische Verbundfestigkeit; $[\tau_a] = \text{N/mm}^2$	A_u	Spannungsfläche in Abhängigkeit vom Umgebungsradien $A_u(r)$; $[A_u] = \text{mm}^2$

Die maßgebende Schubspannung ergibt sich aus dem Minimum aus charakteristischer Verbundfestigkeit und charakteristischer Materialschubfestigkeit. Sie wird im Folgenden als charakteristische Schubspannung definiert (s. Gl. [3-24]). Dabei ist es notwendig, die Spannungen auf eine Bezugs(scher-)fläche umzurechnen. Gewählt wurde die Fasermantelfläche.

$$\text{maßgeb. } \tau = \min \left\{ \begin{array}{l} \tau_a \\ \tau_u \cdot k_d \cdot k_p \end{array} \right. = \tau_d \quad [3-24]$$

k_d Beiwert zur Berücksichtigung des Wirkungsdurchmessers ($k_d < 1$); $[k_d] = 1$

k_p Beiwert zur Berücksichtigung der Makroporosität ($k_p > 1$); $[k_p] = 1$

τ_d Charakteristische Schubspannung; $[\tau_d] = \text{N/mm}^2$

Der Beiwert zur Berücksichtigung des Wirkungsdurchmessers (k_d) ergibt sich aus dem Abstand zwischen der Fasermantelfläche und dem potenziell ausgebildeten Bruchpfad. k_p berücksichtigt die Makroporosität am potenziellen Bruchpfad.

Durch Gleichgewichtsbetrachtungen an der Faser kann die kritische Faserlänge ($l_{f,krit}$) nach Gl. [3-25] ermittelt werden. Oberhalb von $l_{f,krit}$ wird die gesamte Faserlänge für die Verstärkung herangezogen. Die Faser versagt bevor τ_a bzw. τ_u erreicht werden.

$$l_{f,krit} = \frac{\sigma_f}{4 \cdot \tau_d} \cdot d_f \quad [3-25]$$

$l_{f,krit}$ Kritische Faserlänge; $[l_{f,krit}] = \text{mm}$

d_f Faserdurchmesser; $[d_f] = \text{mm}$

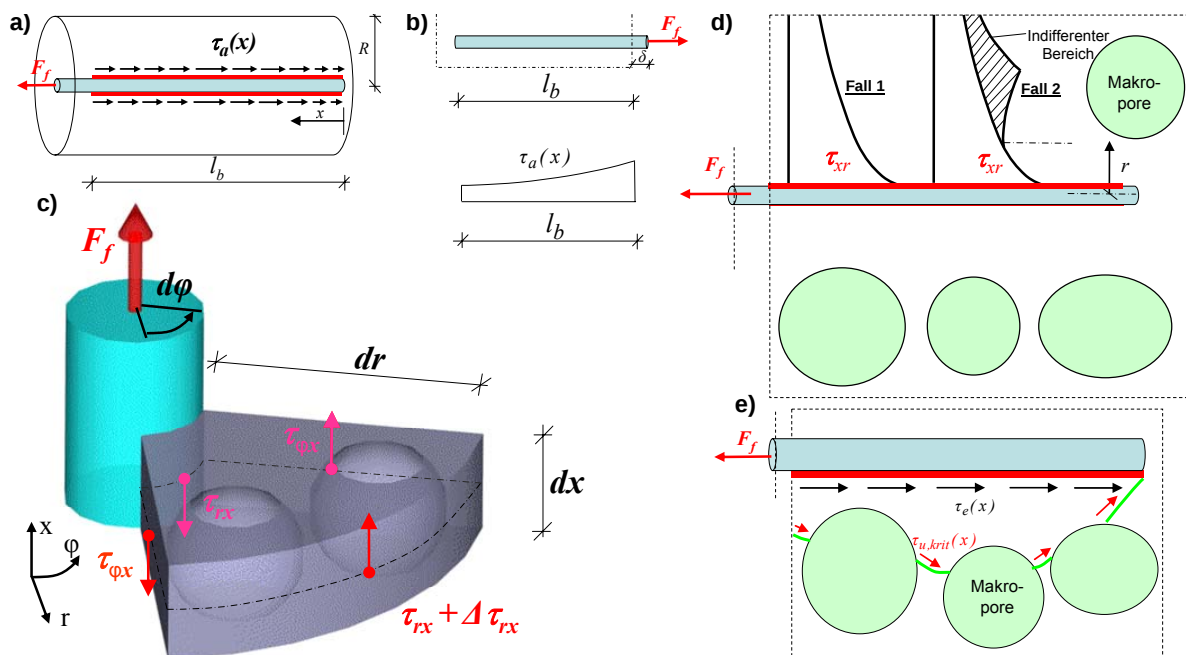


Abb. 3-8 Mechanismen des Faserauszugs in makroporösen Materialien, **a)** Verlauf der Verbundspannungen, **b)** Schubspannungsverteilung während des Haftverbundes der Faser **c)** Betrachtung der Schubspannungen eines differenziellen Elements in der Faserverbundzone, **d)** Schubspannungsverteilung in Abstand vom Faserrand: Fall 1: homogenes Material, Fall 2: Übergang: homogenes Material - Makroporosität, **e)** Mögliche Ausbildung eines „Bruchpfades“ durch Schubspannungsversagen in Faserumgebung

4. Wahl der Faser für faserverstärkten Porenbeton

Überblick

Fasern weisen in Material- und Formvariation ein breites Spektrum auf. Sie müssen in Abhängigkeit von der Einbauzielsetzung in ihrem Anforderungsprofil für den Porenbeton geeignet sein. Eine Reihe potenzieller Faserwirksamkeiten sind möglich. Fasern sollten neben Wirksamkeit ebenfalls Unschädlichkeit, Umweltverträglichkeit, gutes Preis-Leistungs-Verhältnis sowie technische Realisierbarkeit im Produktionsprozess aufweisen. Die Faseranforderungen werden form- und materialbezogen diskutiert. Fasern mit kritischen Material- bzw. Formparametern erweisen sich, aufgrund des Absinkens in der Anfangssuspension, als ungeeignet für den Porenbeton-Einbau. Eine Vielzahl von Fasern ist unter den hydrothermalen Härtungsbedingungen im Produktionsprozess nicht bzw. nur eingeschränkt beständig.

4.1 Faserübersicht

Die Vielfalt an Fasern erscheint nahezu unbegrenzt. Faserklassifizierungen erfolgen u. a. form-, material-, ursprungs-, wirkungs- bzw. funktionsbezogen. Einen Überblick über Theorie und Systematik bei Fasern gibt Schnegelsberg [71]. **Tab. 4-1** zeigt beispielhaft die ursprungsbezogene Faserklassifizierung [N 23], [N 27].

Tab. 4-1 Faserklassifizierung über die Ursprungsbezogenheit nach [N 23], [N 27]

Naturfasern	Pflanzenfasern	Samenfasern	Baumwolle-, Kabokfasern
		Bastfasern	Leinen (Flachs)-, Hanf-, Jute-, Ramiefasern
		Hartfasern	Sisal-, Bambusfasern, allgemein (Holz-)fasern
		Fruchtfasern	Kokosfasern
	Fasern tierischen Ursprungs	Wolle bzw. Haarfaser einer Reihe von Tieren, Seidefasern	
Kunstfasern (engl.: man-made fibres)	Fasern mineralischen Ursprungs	Asbest-, Wollastonit-, Erionitfasern	
	Fasern aus natürlichen Polymeren	Zellulosefasern	Viskose-, Modal-, Lyocell-, Papierfasern
		Polykondensationsfasern	Polyester-, Polyamid-, Aramidfasern
		Polymerisationsfasern	Polyacrylnitril-, Polyethylenfasern
		Polyadditionsfasern	Polyurethanfasern
	Anorganische Chemiefasern	Mineral- (Glas, Basalt, etc.), Kohlenstoff-, Metall-, Keramikfasern	

4.2 Faseranforderungen

Grundlage einer Faserbewertung für den Einsatz im Porenbeton sind die vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) erstellten Zulassungsgrundsätze für Faserprodukte als Betonzusatzstoffe [24]. Dort definiertes Anforderungsprofil bei Einteilung der Kategorien Gleichmäßigkeit, Wirksamkeit, Unschädlichkeit und Umweltverträglichkeit wird für den faserverstärkten Porenbeton weiterentwickelt und durch Preis-Leistungs-Betrachtungen sowie die Bewertung der technischen Realisierbarkeit im industriellen Produktionsprozess ergänzt. Im Folgenden wird das Anforderungsprofil diskutiert, die Fasereinordnung erfolgt über Form und Material.

Gleichförmigkeit

Fasern für den Einsatz im Porenbeton sollen in Form, Geometrie, Wasseraufnahme, chemischer Zusammensetzung, Schmelz- bzw. Zersetzungstemperatur sowie mechanischen Eigenschaften möglichst gleiche Beschaffenheit aufweisen.

Wirksamkeit

Fasern im Porenbeton müssen mindestens eine der folgenden Wirksamkeiten hervorrufen:

- Stabilisierung der Anfangssuspension bzw. des Treibprozesses,
- Stabilisierung des „Treibkuchens“ und Erhöhung der Grünstandsfestigkeit,
- Richtungsabhängige Optimierung der Gefügestruktur bzw. der Materialeigenschaften,
- Reduzierung der Rissneigung durch Beanspruchungen bei der hydrothermalen Härtung,
- Steigerung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens unter Beanspruchungen,

- Steigerung von Schlagfestigkeit und Verschleißwiderstand (Transport und Handling).

Unschädlichkeit

Porenbeton darf durch Fasereinbau keine gravierenden Schädigungen aufweisen.

Folgende Einzelanforderungen ergeben sich für den Herstellungsprozess:

- Rieselfähigkeit der Fasern.
- Einmischbarkeit der Fasern:
 - Fasern müssen in der Mischung dispergierbar sein. Mischungsabhängige Querzugbeanspruchungen erfordern elastisches Faserverformungsverhalten. Faserbrüche müssen vermieden werden. Faserhygroskopizität darf die Verarbeitbarkeit nicht beeinflussen.
- Fließfähigkeit der Anfangssuspension:
 - Fasern dürfen das Fließvermögen bzw. die Fähigkeit zum Niveauausgleich nicht einschränken. Es darf beim Einfüllen in den Treibbehälter nicht durch Faser-Faser-Wechselwirkungen aus der Strömung zur Bildung von Faserigel bzw. Fasercluster kommen.
- Homogene Verteilung und kontrollierte Orientierung der Fasern in der Anfangssuspension:
 - Fasern müssen, als Ausgangsbedingung für den Treibprozess, homogen verteilt sein. Fasersinken bzw. -konglomeration in der Anfangsphase des Treibprozesses darf nicht stattfinden. Die Faserorientierung muss zielgerichtet eingebracht werden können.
- Verträglichkeit der Fasern:
 - Fasern dürfen keine qualitätseinschränkende Wechselwirkungen mit Treib- bzw. Grünmedium eingehen. Beanspruchungen während der Hydrothermalhärtung dürfen nicht zu physikalischen und chemischen Veränderungen der Calciumsilikathydratphasen führen.

Folgende Auswirkungen dürfen sich nicht am Endprodukt Porenbeton ergeben:

- Beeinträchtigung der Feststoffstruktur bzw. der Makroporosität:
 - Fasern sollen Porenform, Homogenität der Gefügestruktur und Porosierungsgrad nicht wesentlich verändern. Wechselwirkungen zwischen Fasern und Treibmedium dürfen lokal in Faserumgebung keine Inhomogenitäten in der Makroporosität hervorrufen.
- Beeinträchtigung der Faserstruktur:
 - Fasern sollen eine homogene Faserverteilung im getriebenen System aufweisen. Die Faserorientierung muss kontrollierbar und reproduzierbar sein. Die Einbindung der Fasern in die mikroporöse Feststoffstruktur muss in Lage und Verbund vorhanden sein.
- Beeinträchtigung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens:
 - Fasern sollen das Festigkeits- und Verformungsverhalten nicht wesentlich einschränken. Festigkeitsrelevante Kennwerte bzw. Entfestigungsverhalten müssen ähnlich denen von unverstärktem Porenbeton sein.
- Beeinträchtigung des Verbundverhaltens zu eventuell vorhandener Stabstahlbewehrung:
 - Fasern sollen den Verbund bei Einbau von Stabstahlbewehrung nicht einschränken. Die Wirksamkeit möglicher konstruktiv- bzw. tragfähigkeitsrelevanter Bewehrung im Porenbeton muss weiter gegeben sein.

- Beeinträchtigung der Alterungsbeständigkeit und Dauerhaftigkeit:

- Fasern sollen bei allen potenziellen Expositionen alterungsbeständig und dauerhaft sein. Wechselnde Feuchte, Temperatur und Alkalität dürfen keinen Einfluss auf Faserverbund bzw. Fasereigenschaften besitzen.

- Verarbeitung und Bearbeitung:

- Fasern sollen das „Handsägen“ individueller Schnittformate bzw. das Schleifen von Oberflächen des Porenbetons auf der Baustelle nicht einschränken. Fasern, die aus bearbeiteten Oberflächen herausragen, dürfen beim Handling nicht zu Verletzungen führen.

- Beeinträchtigung der gesundheitlichen Unbedenklichkeit:

- Fasern dürfen keine krebserregende Wirkung im menschlichen Körper aufweisen. Bisher gibt es keine präzise wissenschaftliche Definition der Faktoren, die eine kanzerogene Faserwirkung aufweisen [10]. Allgemein gültig werden faserartige Gebilde als potenziell kanzerogen bei der Fasermorphologie: Faserdurchmesser $d_f < 3 \mu\text{m}$, -länge $l_f < 5 \text{ mm}$ bzw. $l_f/d_f > 3$ eingestuft (z. B. Faserbruch (u. a. Längsspaltung), Faserlänge) [87]. Die kanzerogene Faserwirkung wird über die chemische Zusammensetzung (Kanzerogenitätsindex) sowie die Biolöslichkeit der Fasern (RAL-Gütezeichen) bewertet [22]. Eine Biolöslichkeit der Faser, bei Abbau im menschlichen Körper < 3 Tage, wird als unkritisch angesehen.
- Fasern dürfen bei Hautkontakt keine Hautirritationen hervorrufen bzw. dürfen bei Kontakt mit dem faserversetzten Porenbeton keine Hautirritationen entstehen.

Fasern mit der Wirksamkeit: Steigerung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens erfordern „hochwertige“ Materialeigenschaften. Sie dürfen durch Herstellung und Gebrauch in ihrer Wirksamkeit nicht eingeschränkt werden. Es ergeben sich folgende Einzelanforderungen:

- Hohe mechanische Materialeigenschaften,
- Alterungsbeständigkeit und Dauerhaftigkeit,
- Ausreichender Haft- bzw. Reibverbund zum Verbundmaterial,
- Beständigkeit bzw. Formstabilität unter Beanspruchungen der hydrothermalen Härtung,
- Ähnliches thermisches und hygrisches Verformungsverhalten gegenüber Porenbeton.

Umweltverträglichkeit

Fasern für den faserverstärkten Porenbeton müssen Umweltverträglichkeit, wie im Merkblatt „Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ des DIBt festgeschrieben, aufweisen [24].

Preis-Leistungs-Verhältnis

Porenbeton ist ein Massenbaustoff. Fasern für faserverstärkten Porenbeton müssen in ausreichenden Mengen zu akzeptablen Preisen, unter Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit, verfügbar sein.

Technische Realisierbarkeit

Der Einbau von Fasern soll den industriellen Produktionsprozess zur Herstellung des Porenbetons nicht beeinflussen bzw. sollte einfach in die Abläufe integrierbar sein.

Es ergeben sich folgende Einzelanforderungen:

- Schneidbarkeit:

- Fasern sollen den Schneidprozess der grünfesten Rohblöcke im Schneidprozess, möglichst bei Grünstandsfestigkeit, weiterhin ermöglichen. Formate heutiger Plansteine bzw. -elemente müssen schneidbar sein.

- Formgebung

- Die Rohblöcke sollten in ähnlicher Geometrie herstellbar sein. Die Einarbeitung der Taschen bzw. des Nut- und Federsystems in die Plansteine muss weiterhin möglich sein.

- Prozessführung

- Misch-, Treib- und Schneidprozess sowie Standzeit vor der hydrothermalen Härtung sollten bei jetziger Durchlaufzeit im Herstellungsprozess weiter gewährleistet sein.

4.3 Auswertung nach Fasieranforderungen

Unter Berücksichtigung der Fasieranforderungen für den faserverstärkten Porenbeton wird die Faserbandbreite form- und materialbezogen diskutiert. Es werden die fasernetzwerkbezogenen Anforderungen im Bezug auf die Gefügestruktur dargestellt. Die potenziellen Wirksamkeiten der Fasern im Porenbeton (s. Kap. 4.2) werden zusammenhängend betrachtet.

Reduzierte mechanische Eigenschaften der Fasern, starke Unterschiede im hygri-schen und thermischen Verformungsverhalten gegenüber dem Feststoff sowie Teilzersetzungen der Fasern bei der hydrothermalen Härtung führen zu einer Reduzierung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens. Eine Wirksamkeit zur Stabilisierung der Anfangssuspension, zur Stabilisierung des Treibprozesses bzw. eine positive richtungsabhängige Veränderung der Gefügestruktur könnten u. U. weiterhin gegeben sein. Es muss zwischen Wirksamkeit und Unschädlichkeit der Fasern im faserversetzten Porenbeton abgewogen werden.

Zur Diskussion der Fasieranforderungen für den Einsatz im Porenbeton werden wieder die Erkenntnisse aus dem Bereich der faserverstärkten zementgebundenen Medien genutzt. Literaturrecherchen, Herstellerangaben sowie eigene Untersuchungen werden angeführt. Ziel ist, potenzielle Fasern in Form, Material und Struktur zu benennen, die in Kap. 4.2 beschriebene Wirksamkeiten für das System faserverstärkter Porenbeton aufweisen.

4.3.1 Formbezogene Anforderungen an Fasern

Fasern für den Einbau im Porenbeton werde über die morphologische und tektonische Formbestimmtheit charakterisiert [71].

4.3.1.1 Morphologische Beschaffenheit von Fasern

Morphologisch wird in Längsschnitt-, Querschnitts- und Oberflächenform der Fasern unterschieden. Die Längsschnittform setzt sich zusammen aus Faserverlaufsform und -länge (l_f). Als Faserverlauf sind lang gestreckte, gewellte oder geknickte Formen möglich. Die Querschnittsform wird in Faserschnitt (Gestalt) und Faserfeinheit (Tex-Maß, Faserdurchmesser (d_f)) eingeteilt. Die Querschnittsgestalt der Fasern ist nahezu unbegrenzt, kreis-, hohl-, stab- bzw. sternförmige Formen sind nur eine Auswahl von Klassifizierungen. Die Oberflächenform lässt sich in Faserstruktur (Gestalt) und Strukturfeinheit (Größe) aufspalten. Faserstrukturen werden u. a. in glatte und raue Beschaffenheit eingeteilt.

Krüger [41] zeigt eine Auswahl von Oberflächenbehandlungen, Beschichtungen und Imprägnierungen von Fasern. Eine Vielzahl von Fasern besitzen Schichten (0,2-2,0 M.-%), die aus wasserlöslichen bzw. -festen Oberflächenbeschichtungen bestehen. Die chemische Zusammensetzung dieser Schichte basiert meist auf verschiedenen Polymeren [41]. Detaillierte Angaben zu der Zusammensetzung und zu den Eigenschaften der Schichte sind oft „ein gut geschütztes Geheimnis“ der Faserhersteller [61].

Auch die Betonindustrie setzt seit Jahren Fasern mit Schichten ein. So besitzen u. a. die herkömmlich eingesetzten Glasfasern im glasfaserverstärkten bzw. -modifizierten Normalbeton eine Schichte. Diese Schichten können die Verarbeitbarkeit der Fasern wesentlich verbessern bzw. gar erst ermöglichen; die Fasern werden geschmeidiger und widerstandsfähiger.

ger gegen mechanische Beanspruchungen. Die Kerbwirkung kann reduziert werden. Schichten können weiterhin als Haftvermittler zwischen Faser und Feststoffmaterial dienen. Ebenso können sie die mechanischen Eigenschaften sowie die Alterungs- und Dauerhaftigkeitsbeständigkeit der Fasern selbst erhöht werden.

Zur Steigerung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens des Porenbetons sollten die Fasern in ihrer Verlaufsform gewellte, geknickte oder gewendelte Formen besitzen. Die Verbundeigenschaften bei Fasern mit Endverankerung bzw. gewellter Form sind deutlich verbessert. Die Querschnittsform der Fasern sollte eine große Oberfläche hervorrufen. Die Oberflächenform ist möglichst stark strukturiert zu wählen. Eine Schlichte zur Verbesserung der Eigenschaften unter Berücksichtigung der Hydrothermalbeständigkeit ist anzustreben. Die Faserform sollte so beschaffen sein, dass die Entstehung homogener Gefügestrukturen während des Treibprozesses und die Schneidbarkeit des grünfesten Porenbetons im industriellen Produktionsprozess sichergestellt werden.

4.3.1.2 Tektonische Beschaffenheit von Fasern

Tektonisch wird in elementare und zusammengesetzte Fasern (Filamentgarnfasern) unterschieden. Zusammengesetzte Fasern werden aus Elementarfasern (Filamente) zu Bündeln zusammengefasst. Sie sind teilbar gebündelt (Faserbündel) bzw. teilbar (Faserverbund) oder unteilbar (Fasereinheit) künstlich zusammengesetzt.

Wesentliches Anwendungsfeld der künstlich a) zusammengesetzten unteilbaren Fasern ist der Bereich des textilibewehrten Normalbetons. Monofilamente ($d_f = 5\text{--}35\ \mu\text{m}$) werden zu Bündeln über eine Schichtenverklebung (Bündelfasern) zusammengesetzt. Das Tragverhalten dieser Bündelfasern unterscheidet sich grundlegend von dem homogener monolithischer Fasern. Der Haftverbund zum Grundmaterial liegt ausschließlich über die äußeren Filamente im Bündel vor, die inneren Filamente weisen nur eine geringe Haftung mit den äußeren Filamenten und damit zum Grundmaterial auf (s. **Abb. 4-1, a)**).

Die Monofilamente erfahren bei Beanspruchungen unterschiedliche Dehnungen im Querschnitt des Bündels (s. **Abb. 4-1, b)**).

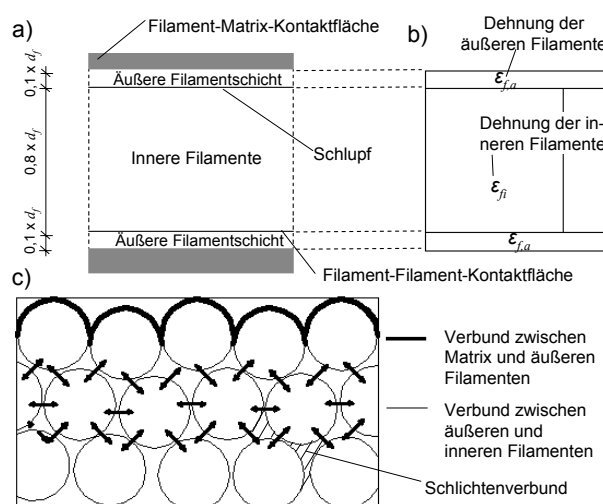


Abb. 4-1 Tragverhalten der Bündelfasern [38], a) Innere und äußere Filamente - Geometrie, b) Innere und äußere Filamente - Dehnung, c) Innerer und äußerer Verbund der Bündelfaser

Die Zugfestigkeit einer Bündelfaser, die sich aus der Summe der Festigkeiten aller einzelnen Filamente ergibt, wird praktisch nicht erreicht. Die streuende Festigkeit der Faserfilamente im Bündel lässt eine Aufsummierung der Festigkeiten nur eingeschränkt zu (Bündeleffekt). Die Bündelfasern versagen unter Zugbeanspruchung, aufgrund der Verbundwirkung untereinander, sukzessiv von außen nach innen (s. **Abb. 4-1, c)**), wobei der Schichtenverbund nachgiebig ist und gegenüber dem Monofilament deutlich geringere Festigkeiten aufweist.

Bei der Anwendung im zementgebundenen Medium sind die Bündelfasern teilweise offen für das Eindringen der Calciumsilikathydratphasen. Der innere Verbund kann gesteigert werden. Ein vollständiges Eindringen ist allerdings nicht möglich; es ergibt sich ein gesteigerter Schutz für die inneren Filamente gegenüber potenziell angreifenden Medien [41].

Fasern für den Einbau im Porenbeton zur Steigerung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens können sowohl als Bündelfaser als auch Monofilament eingesetzt werden. Die Wirksamkeit ist u. a. von Fasermorphologie, Faserkonzentration (ψ_f), Einbindung im Grundmate-

rial und Beanspruchungsart abhängig. Die Bündelfaser kann, aufgrund ihres nachgiebigen Verbunds, ein gesteigertes Entfestigungsverhalten unter Zugbeanspruchung bewirken.

4.3.2 Materialbezogene Anforderungen an Fasern

Fasern für den Einbau im Porenbeton werden über die in Tab. 4-1 dargestellte ursprungsbezogene Faserklassifizierung materialbezogen charakterisiert.

4.3.2.1 Naturfasern

4.3.2.1.1 Pflanzenfasern / Fasern tierischen Ursprungs

Pflanzen enthalten faserförmige Strukturen, die als Faserverstärkung dienen können. Geringe Materialdichte, reduzierte Energieaufwendung bei der Herstellung bzw. Aufarbeitung, geringe Abrasion bei der Verarbeitung und physiologische Unbedenklichkeit zeichnen Pflanzenfasern aus. Sie sind als nachwachsende Rohstoffe ökologisch wertvoll. Speziell die Bastfasern nehmen in Verbundwerkstoffen eine steigende Marktstellung ein [39].

Als Nachteil erweisen sich bei Pflanzenfasern die geringen mechanischen Eigenschaften im Vergleich zum Grundmaterial bzw. zu anderen Fasermaterialien sowie die hohen Streuungen in der Gleichförmigkeit. Die zellulose Struktur der Pflanzenfaser ist hygroskopisch [39]. Der Wasseranspruch kann hoch sein, wodurch die Verarbeitbarkeit eingeschränkt wird. Hygrische Wechselbedingungen durch Expositionswechsel führen zu Schwankungen in den mechanischen Fasereigenschaften. Eine biogene Degradation der Fasern kann stattfinden.

Untersuchungen zeigen bei Einbau von Pflanzenfasern in einem zementgebundenen Medium, dass eine Steigerung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens, trotz o. g. Nachteile, möglich ist [62], [98]. Im Wesentlichen besteht die Wirksamkeit in einer Steigerung des Entfestigungsverhaltens [3]. Der Einbau ist jedoch umstritten [27]; neben o. g. Nachteile führt stark unterschiedliches hygrisches Verformungsverhalten gegenüber dem Grundmaterial zu einer reduzierten Verbundwirkung. Die Alterungsbeständigkeit und Dauerhaftigkeit ist unter alkalisch feuchten Bedingungen langfristig nicht sichergestellt [41]. Temperaturbeanspruchungen führen zur dauerhaften Reduzierung der mechanischen Eigenschaften.

Beispielhaft werden Untersuchungen von Reussmann [64] angeführt, die die Abnahme der Reißfestigkeit für eine Auswahl von Bast- und Hartfasern unter 5-minütiger Umlufttemperaturbeanspruchung zeigen (s. **Abb. 4-2**). Es wird ein nahezu linearer Abfall der Reißfestigkeit bei Temperatursteigerung festgestellt. Der Zersetzungsgrad hängt vom Zellulosegehalt der Fasern, vom Polymerisationsgrad der Zellulose sowie vom thermischen Stabilitäts- und Abbauverhalten der Begleitsubstanzen Pektin, Hemizellulose und Lignin ab. Es kommt zu einer Reduzierung des Volumens und zu einer Aufspaltung der Bündelfasern.

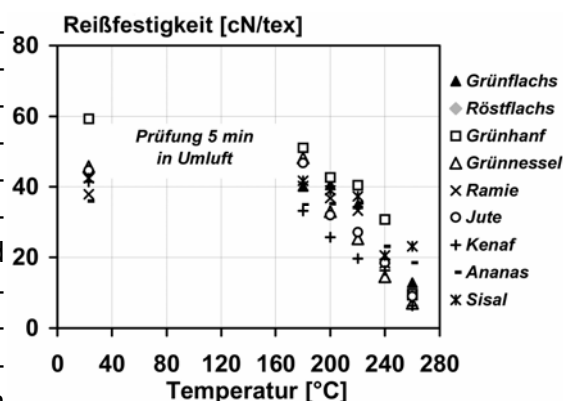


Abb. 4-2 Einfluss einer Temperaturbeanspruchung auf die Reißfestigkeit einer Auswahl von Pflanzenfasern [64]

Die hydrothermale Härtung bei der Herstellung des Porenbetons (s. Kap. 2.3.3) erhöht die Beanspruchung auf die Fasern. Mankowski et al. [47] untersuchten das Verhalten von pflanzenfaserverstärkten verdichteten Calciumsilikatbaustoffen. Hydrothermale Bedingungen bei Temperaturen $T < 200^{\circ}\text{C}$ führen hier zu einem erhöhten Festigkeits- und Verformungsverhalten, u. a. bei Druckbeanspruchung. Genaue Angaben über die Schädigungen der Fasern werden nicht gemacht. Es kann jedoch eine starke Faserschädigung und damit eine Reduzierung der mechanischen Eigenschaften der Fasern angenommen werden. Bei diesen Zersetzungsprozessen entstehen Spaltprodukte unter Gasentwicklung.

Bei fehlender Gasentweichung aus dem plastischen Grundmaterial wird der Faserverbund unter Bildung von Spaltbereichen in der Faserumgebung stark eingeschränkt. Das bei Pflanzenfasern und Porenbeton unterschiedliche hygrische und thermische Verformungsverhalten bzw. die Aufspaltungen der Faserbündel in der hydrothermalen Beanspruchungsphase führen zu fehlendem bzw. ungleichmäßigem Verbund. Hydrothermale Bedingungen bei Temperaturen $T > 200^\circ\text{C}$ führen zum Ausbrennen der eingebauten Pflanzenfasern im verdichteten Calciumsilikatbaustoff [47]. Im Feststoff zeigen sich Hohlstellen [64]. Höck [32] zeigt an flachsfaserverstärkten Kunststoffen, dass bei der thermischen Zersetzung der pflanzlichen Bestandteile deutliche Geruchsbeanspruchungen entstehen können. Das biogene Angriffspotenzial ist langfristig, aufgrund der hohen Mikro- und Makroporosität, hoch (s. Kap. 2.2.3).

Der Einsatz von Pflanzenfasern zur Steigerung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens im Porenbeton ist nur eingeschränkt sinnvoll. Andere Wirksamkeiten nach Kap. 4.2, sind u. U. möglich, müssen aber, aufgrund o. g. Nachteile, kritisch betrachtet werden.

Fasern tierischen Ursprungs werden hauptsächlich aus Haar und Seide hergestellt. Ein Anwendungsfeld im Bereich der Baustoffe ist nicht bekannt. Die meisten einschränkenden Argumente, die für den Einbau von Pflanzenfasern im Porenbeton gelten, gelten auch hier.

4.3.2.1.2 Fasern mineralischen Ursprungs

Zu den wichtigsten Fasern mineralischen Ursprungs zählen Asbest- und Wollastonitfasern.

Die Asbestfaser ist die bekannteste Faser mineralischen Ursprungs. Asbeste werden in die Gruppe der natürlich vorkommenden faserförmigen Silikate eingeordnet. Sie besitzen sehr gute mechanische Eigenschaften und hohe chemische Beständigkeit; die Faser ist kostengünstig. Die Anwendung im zementgebundenen Medium war lange Zeit üblich, ist aber, aufgrund gesundheitlicher Bedenklichkeit, in Deutschland seit 1993 untersagt.

Wollastonit ist ein polymorphes, stäbchenförmiges Calciumsilikat. Wollastonitfasern weisen ebenfalls gute mechanische Eigenschaften auf und sind gegenüber dem Alkaliangriff sehr widerstandsfähig. Wollastonitfasern sind in ihren geometrischen Formen, aufgrund der derzeitigen spezifischen Abbauprozesse, auf ein aspect ratio von ca. 1:40 begrenzt. Notwendige Einbindelängen für eine höhere Zähigkeit sind nur bedingt erreichbar. Die Faserbestandteile sind teilweise lungengängig, jedoch nicht krebserregend. Die Hersteller verweisen darauf, dass die Faserbestandteile innerhalb weniger Tage im Organismus abgebaut werden.

Der Einsatz von Fasern mineralischen Ursprungs im Porenbeton ist nur eingeschränkt möglich.

4.3.2.2 Kunstfasern

Kunstfasern werden industriell hergestellt. Die Gleichförmigkeit kann weitestgehend im Herstellungsprozess gesteuert werden. Eine gezielte Formgebung der Fasern ist möglich.

4.3.2.2.1 Fasern aus natürlichen Polymeren

Die Ausgangsstoffe für Fasern aus natürlichen Polymeren sind Stoffe auf pflanzlicher Basis, die chemisch bzw. physikalisch aufbereitet werden. Das wichtigste Fasermaterial aus natürlichen Polymeren ist die Zellulose. Die größte Bedeutung dieses Fasermaterials liegt in der Papierherstellung. In der Baustoffindustrie werden sie zur Verstärkung von gips- bzw. zementgebundenen Medien im Frühzustand eingesetzt.

Der Einbau von Fasern aus natürlichen Polymeren zur Steigerung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens im Porenbeton ist nur bedingt möglich. Einschränkende Eigenschaften aus o. g. Betrachtungen der Pflanzenfasern sind auch hier zu berücksichtigen.

4.3.2.2.2 Fasern aus synthetischen Polymeren

Fasern aus synthetischen Polymeren werden über Monomersynthese zu Polymerketten umgebildet. Dabei wird in Polymerisation, -kondensation und -addition unterschieden.

Die wichtigsten synthetischen Polymerfasern im Bereich der Werk- und Baustoffe sind aus Polypropylen (PP), Polyacrylnitril (PAN), Polyvinylalkohol (PVA), Polyamid (PA), Polyester (PE) und Aramid. Die Eigenschaften variieren in einer großen Bandbreite. Im Bereich der zementgebundenen Medien werden u. a. Fasern aus PP, PAN und PVA zur Verringerung des Fröhschwindens genutzt. Bei hochfestem Beton werden synthetische Polymerfasern zur Verbesserung der Eigenschaften im Brandfall eingesetzt.

Mankowski et al. [47] stellen bei verdichteten Calciumsilikatbaustoffen unter Einbau von synthetischen Polymerfasern ansatzweise eine Verbesserung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens fest. Allerdings muss beachtet werden, dass eine Vielzahl der Fasern aus synthetischen Polymeren unter den hydrothermalen Beanspruchungen der Porenbeton-Herstellung nicht beständig ist. Die Fasern verlieren ihre Form und zersetzen sich teilweise. Unter Gasentwicklung können Spaltprodukte entstehen.

Eine Reihe von potenziell hydrothermal beständigen Fasern aus synthetischen Polymeren (u. a. Phenolharzfasern) erweisen sich als ungeeignet, da ihre mechanischen Eigenschaften zu gering sind. Die Aramidfaser, als eine der am Weitesten verbreiteten synthetischen Polymerfasern, besitzt hohe mechanische Eigenschaften und hohe hydrothermale Beständigkeit. Anwendungen dieser im Bereich der zementgebundenen Medien sind, aufgrund der Empfindlichkeit gegenüber Feuchtigkeit und fehlender langfristiger Alkalibeständigkeit, jedoch umstritten. Da Porenbeton aber im Vergleich zu zementgebundenen Medien niedrigere pH-Werte aufweist, könnten Aramidfasern dennoch einsetzbar sein. Einschränkend aus ökonomischer Sicht ist der Preis.

4.3.2.2.3 Anorganische Chemiefasern

Anorganische Chemiefasern werden in Mineral-, Kohlenstoff-, Metall- und Keramikfasern unterschieden. Die Gleichförmigkeit kann in der Herstellung sichergestellt werden.

Mineralfasern

Als Mineralfasern werden üblicherweise glasig erstarrte silikatische Fasern bezeichnet. Wichtige Mineralfasern sind Glasfasern und Basaltfasern.

Die Glasfasern werden in Verstärkungssystemen u. a. als elementares (E) und alkaliresistentes (AR) Glas eingesetzt. Als Glasbildner dient vorwiegend Kieselsäure (SiO_2). Im zementgebundenen Medium werden, aufgrund der hohen Alkalität, AR-Glasfasern eingesetzt. Sie werden durch Einbau von Zirkon (15-24 M.-%) modifiziert [41]. Eine Schlichte bildet zusätzlich einen mechanischen Schutzüberzug (s. Kap. 4.3.1.1). Derzeit befinden sich wasserdispersible, monofile AR-Glas- (Faserdurchmesser $d_f = 12\text{-}35\ \mu\text{m}$) sowie AR-Bündelglasfasern auf dem Markt. Der technische Stand zum AR-Glasfaserbeton ist weitgehend genormt [15]. Hohe mechanische Fasereigenschaften können beanspruchungsspezifisch das Festigkeits- und Verformungsverhalten sowie das Schwindverhalten des Betons verbessern [28].

Die Basaltfaser ist eine aufstrebende Faser. Sie wird als Schmelzprodukt aus dem Basaltgestein gewonnen. Mögliche Faserformen können mit denen der Glasfaser gleichgesetzt werden. Vorteil ist die deutlich bessere Alkalibeständigkeit gegenüber der E-Glasfaser. Sie braucht nicht über einen „Zirkoneinbau“ modifiziert zu werden. Daraus ergibt sich eine kostengünstigere Herstellung. Die Entwicklung dieser Faser steht erst am Anfang. Derzeit werden intensive Untersuchungen im Bereich der zementgebundenen Medien durchgeführt [5].

Kohlenstofffasern

Kohlenstofffasern werden meist aus Polyacrylnitril hergestellt. Sie haben sehr hohe mechanische Eigenschaften; ihre Oberfläche ist weitestgehend chemisch inert gegenüber aggressiven Medien. Sie gelten im alkalischen Milieu der zementgebundenen Medien als dauerhaft [36]. Kohlenstofffasern besitzen niedrige Oberflächenenergien, was eine eingeschränkte Be-

netzung der Faser durch das Grundmaterial nach sich ziehen kann. Die Folge könnte ein eingeschränkter Verbund zum Grundmaterial sein; eine Schlichte könnte dem entgegen wirken [70]. Für die Kohlenstofffasern ist aus ökonomischer Sicht der Preis einschränkend.

Metallfasern

Metallfasern zur Verstärkung werden u. a. aus Stahl und Aluminium eingesetzt. Im Bereich der zementgebundenen Medien sind Stahlfasern weit verbreitet. Sie erhalten oft Profilierungen (u. a. Endaufbiegung, Wellenform) zur Steigerung des Auszugswiderstands. Durch hohes plastisches Verformungsvermögen (Fließen) eignen sich Metallfasern in Verbundsystemen hervorragend zur Duktilitätssteigerung. Sie besitzen gute mechanische Eigenschaften.

Stahlfasern bauen im alkalischen Milieu der zementgebundenen Medien eine Passivierungsschicht auf [41]. Durch die geringe Alkalität des Porenbetons ist diese Schutzschicht nicht dauerhaft; Korrosion ist möglich [92] (s. Kap. 2.4.3). Korrosionsbeständig sind beispielsweise Edelstahlfasern, bei denen allerdings das Preis-Leistungs-Verhältnis beachtet werden muss. Ihre hohe Materialdichte kann formspezifisch zu einem Faserabsinken in der Anfangssuspension führen. Bei größeren Faserdurchmessern besteht, aufgrund der hohen Biegesteifigkeit, eine Verletzungsgefahr durch herausstehende Faserenden an offenen Schnittoberflächen bei nachträglicher Bearbeitung ($d_f > 60 \mu\text{m}$). Außerdem kann durch den Einbau von diesen Fasern die leichte Ver- und Bearbeitung von Porenbeton eingeschränkt werden. Auch das geringe Gewicht des Porenbetons spricht gegen den Einbau von Metallfasern.

Keramikfasern

Keramikfasern bestehen aus faserförmigen Keramikstrukturen. Unterteilt werden sie in oxidische (u. a. Aluminiumoxide) und nicht-oxidische (u. a. SiC, SiCN) Fasertypen. Hauptsächlich werden sie als Verstärkungsmaterial bei Verbundwerkstoffen im Hochtemperaturbereich verwendet. In zementgebundenen Medien finden Keramikfasern derzeit keine Anwendung. Teile der Keramikfasern stehen im Verdacht, eine krebserregende Wirkung zu haben. Faserformen in betrachteter Bandbreite (s. Kap. 3.1) sind für den Einbau im Porenbeton ungeeignet.

Zusammenhang zwischen Form- und Materialbezogenheit der Fasern

Materialien in Faserform besitzen gegenüber vergleichbarem Kompaktmaterial verbesserte mechanische Eigenschaften. Erklären lässt sich dieses Phänomen durch die abnehmende Defektdichte des Materials, abweichend von der Realstruktur bei Fasern. Die Defektdichte, die die mechanischen Eigenschaften widerspiegelt, ist somit direkt abhängig vom Durchmesser des Materials (s. Abb. 4-3) (Griffith'sches Faserparadoxon). Es ergeben sich mit Reduzierung des Faserdurchmessers annähernde theoretische mechanische Materialeigenschaften bei den Fasern.

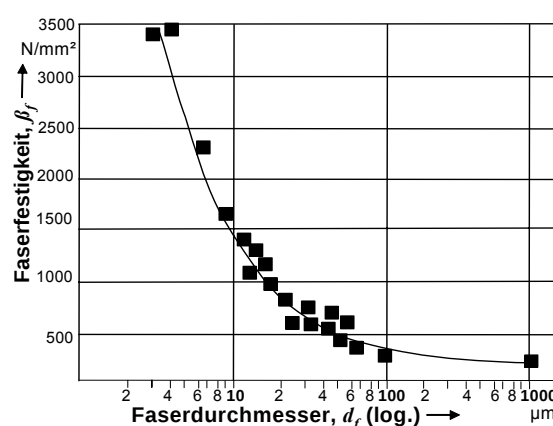


Abb. 4-3 Einfluss des Faserdurchmessers auf die Zugfestigkeit der Faser (Griffith'sches Faserparadoxon)

4.3.3 Netzwerkbezogene Anforderungen an Fasern

Für eine netzwerkbezogene Charakterisierung der Fasern ist es erforderlich, den Zusammenhang zwischen der Faserform und den gesamtheitlichen Faserstrukturparametern (s. Kap. 3.3) herzustellen. Zu den gesamtheitlichen Faserstrukturparametern gehören u. a. Faserverteilung und -konzentration, Faserlage im Material sowie räumliche Anordnung der Fasern im Gefüge. Dieser Zusammenhang kann vereinfacht werden, indem der mittlere Fa-

serabstand (s_f) im Grundmaterial (s. Gl. [3-7] und [3-15]), bezogen auf den Feststoffanteil, bestimmt wird. Die Faserorientierung muss berücksichtigt werden.

Unter Druckbeanspruchung sollten Fasern zur Steigerung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens einen geringen mittleren Faserabstand, bezogen auf die Feststoffanteile, aufweisen. Die daraus resultierende hohe Faserdichte in den Stegwänden könnte die Spannungsspitzen lokal reduzieren und ein Wegknicken der Stegwände verhindern.

Unter Zugbeanspruchung sind Fasern mit möglichst großer Faserlänge und großen Faserdurchmessern sowie gutem Verbund mit hohen umliegenden Feststoffanteilen notwendig. Die Fasern müssen eine hohe Aufnahme von Zugkräften gewährleisten. Sie sollten vorzugsweise in den, gegenüber den Stegwänden deutlich dickeren Stegen liegen. Ein geringer mittlerer Faserabstand, bezogen auf die Feststoffanteile, ist nicht zwangsläufig erforderlich.

Für die Wirksamkeiten Stabilisierung der Anfangssuspension und Stabilisierung des Treibprozesses sind Fasern erforderlich, die einen geringen mittleren Faserabstand im Medium aufweisen. Alle betrachteten Zusammenhänge erfordern die Einbeziehung der Eigenschaften des Fasermaterials und die Sicherstellung der Unschädlichkeiten nach Kap. 4.2.

4.3.4 Eigene Untersuchungen

4.3.4.1 Sinkverhalten von Fasern

Eine homogene höhenunabhängige Faserverteilung ($\chi_{f,3D}$) in der Anfangssuspension, als Startbedingung für den Treibprozess des faserverstärkten Porenbetons, ist als Anforderung in Kap. 4.2 formuliert. Die Faserverteilung ($\chi_{f,3D}$) in der Anfangssuspension wird direkt übertragen auf $\chi_{f,3D}$ im getriebenen Endprodukt Porenbeton.

Ein wichtiger Einflussfaktor ist das Sinkverhalten der Faser im Anfangsstadium, respektive die Zeit nach Beendigung des Einfüllens der faserversetzten Anfangssuspension bis zu einer deutlich nach oben gerichteten Treibbewegung bzw. einem Ansteifen des Systems. Fasern mit kritischen Material- bzw. Formparametern sind anfälliger für ein Absinken. Im Folgenden wird ein vereinfachter Ansatz, der das Sinkverhalten quantifiziert, vorgestellt [31]. Dieser Ansatz leitet das Fasersinken in einer Flüssigkeit bei schleichender Strömung ($Re \leq 0,25$) aus dem Kräftegleichgewicht einer sedimentierenden Kugel ab (s. Gl. [4-1]).

$$R_{Ku} + A_{Ku} - M_{Ku} = 0 \quad [4-1]$$

R_{Ku} Widerstands- bzw. Reibungskraft der Kugel; $[R_{Ku}] = N$

A_{Ku} Auftriebskraft der Kugel; $[A_{Ku}] = N$

M_{Ku} Gewichtskraft der Kugel; $[M_{Ku}] = N$

Durch Umformen ergibt sich die Stokes'sche Sinkgeschwindigkeit (v_{St}) der Kugel.

$$v_{St} = \frac{1}{18} \cdot \frac{\rho_{Ku} \cdot \rho_{Fl}}{\eta_{Fl}} \cdot g \cdot d_{Ku}^2 \quad [4-2]$$

v_{St} Stokes'sche Sinkgeschwindigkeit; $[v_{St}] = m/s$ η_{Fl} Dynamische Viskosität; $[\eta_{Fl}] = Pa \cdot s$

ρ_{Ku} Dichte der Kugel; $[\rho_{Ku}] = g/cm^3$ g Erdbeschleunigung; $[g] = m/s^2$

ρ_{Fl} Dichte der Flüssigkeit; $[\rho_{Fl}] = g/cm^3$ d_{Ku} Durchmesser der Kugel; $[d_{Ku}] = mm$

Die Erfassung der Fasermorphologie erfolgt nach Hawksley [26] über einen Näherungsansatz (s. Gl. [4-3]). Dabei wird die Faser als volumenäquivalente Kugel behandelt und über einen Korrekturwert k_H (s. Gl. [4-4]), der die Abweichung von der Sphärizität berücksichtigt, die Fasersinkgeschwindigkeit $v_{Ku,eq}$ berechnet.

$$v_{Ku,eq} = k_H \cdot v_{St} \quad [4-3]$$

$$k_H = \frac{x_V}{x_S} \quad [4-4]$$

$$x_V = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_f}{\pi}} \quad ; \quad x_S = \sqrt{\frac{A_f}{\pi}} \quad [4-5]$$

$v_{Ku,eq}$	Fasersinkgeschwindigkeit; $[v_{Ku,eq}] = \text{m/s}$	x_S	Äquivalentdurchmesser einer oberflächen- gleichen Kugel; $[x_S] = \text{mm}$
k_H	Korrekturwert; $[k_H] = 1$	V_f	Volumen der Faser; $[V_f] = \text{mm}^3$
x_V	Äquivalentdurchmesser einer volumengleichen Kugel; $[x_V] = \text{mm}$	A_f	Oberfläche der Faser; $[A_f] = \text{mm}^2$

Durch Einsetzen in Gl. [4-2] ergibt sich die Gl. [4-6].

$$v_{Ku,eq} = \frac{x_V \cdot g}{18} \cdot \frac{\rho_f - \rho_{Sus}}{\eta_{Fl}} \quad [4-6]$$

ρ_f	Feststoffdichte der Faser; $[\rho_f] = \text{g/cm}^3$
ρ_{Sus}	Dichte der Porenbeton-Anfangssuspension; $[\rho_{Sus}] = \text{g/cm}^3$

Betrachtet wird in diesem Ansatz ausschließlich das Oberflächen-Volumen-Verhältnis der Faser. Der Einfluss von Faserlänge, -durchmesser und -orientierung bzw. mögliche instationäre Bedingungen durch die Faserumorientierung während des Absinkens werden nicht berücksichtigt. Die Sinkgeschwindigkeit der Faser ist umso höher, je größer die Faser ist. Bei flachliegenden Fasern sind die Umströmungswiderstände erhöht [31]. Es wird vereinfachend angenommen, dass bei der hier vorliegenden schleichenden Umströmung die sedimentierende Faser ihre Anfangsorientierung beibehält. Faserträchtigkeit, Faser-Faser- bzw. Faser-Partikel-Wechselwirkungen, unregelmäßige Partikelform bzw. -größenverteilung, Veränderungen der Fließeigenschaften über die Zeit und einsetzender Treibprozess werden nicht berücksichtigt. Die genannten Faktoren wirken der Fasersinkbewegung entgegen.

Untersuchungen

Im Rahmen der folgenden Untersuchungen werden allgemein gültige Kriterien zur kritischen Sinkmorphologie ermittelt. Betrachtet werden Fasermaterialien (s. Tab. 4-1) und Faserformen, die kommerziell erhältlich sind. Die dynamische Viskosität der Basismischung wird mit 8 Pa·s angenommen (s. Gl. [4.6]).

Kritisches Fasersinken zeigt sich ausschließlich in den ersten fünf Minuten nach Einfüllen der Suspension. Anschließend stabilisiert sich die Faser in ihrer Lage. Das Ansteifen des Mediums und der Treibprozess reduzieren die Fließeigenschaften, der Treibprozess entgegen der potenziellen Sinkrichtung der Fasern wird maßgebend. Als kritische Sinkgeschwindigkeit der Faser in der Anfangssuspension wird $v_f = 3,0 \text{ mm/min}$ angenommen. Daraus ergibt sich eine maximale Sinkstrecke $s = 1,5 \text{ cm}$ in fünf Minuten.

Um o. g. Einflussfaktoren zu berücksichtigen, wird der Koeffizient i eingeführt (s. Gl. [4-7]).

$$v_f = v_{Ku,eq} \cdot i \quad [4-7]$$

v_f	Fasersinkgeschwindigkeit in der Porenbeton-Suspension; $[v_f] = \text{m/s}$
i	Empirisch ermittelter Umrechnungskoeffizient; $[i] = 1$

Zur Ermittlung von i werden vereinfachte Untersuchungen in der ungestörten Anfangssuspension durchgeführt. Die Porenbeton-Suspension wird in ein Gefäß mit einer Einfüllhöhe $h = 5,0 \text{ cm}$ gegeben. Eine Edelstahlfaser ($l_f = 3 \text{ mm}$, $d_f = 200 \text{ }\mu\text{m}$) wird in die Suspension getaucht und die Zeit bis zum Absinken der Faser auf den Boden röntgen-radiographisch erfasst. In diesem Fallbeispiel ist die Sinkgeschwindigkeit 10,8mal geringer als im Berechnungsansatz aus Gl. [4-6]. Daraus folgt hier vereinfachend ein $i = 10,8$.

Abb. 4-4, links zeigt die Ergebnisse für eine kommerzielle wasserdispersible monofile Glasfaser ($\rho_f > 2,7 \text{ g/cm}^3$, $d_f = 20 \mu\text{m}$), eine Bündelglasfaser ($\rho_f > 2,7 \text{ g/cm}^3$, $d_{f,eq} = 160 \mu\text{m}$) und eine Edelstahlfaser ($\rho_f > 7,71 \text{ g/cm}^3$, $d_f = 100 \mu\text{m}$). Die Sinkzeiten für eine mittlere Sinkstrecke $s = 10 \text{ cm}$ werden in Abhängigkeit von der Faserlänge (l_f) aufgetragen. Dabei zeigt keine der betrachteten Fasern kritisches Sinkverhalten. Lediglich bei Metallfasern können Formen auftreten, die kritisches Sinkverhalten unter Berücksichtigung der in Kap. 3.1 gegebenen formbezogenen Fasergrößen für Kurzfasern bedingen.

Abb. 4-4, **rechts** zeigt für die Edelstahlfaser das Sinkverhalten bei einer mittleren Sinkstrecke $s = 10 \text{ cm}$ in Abhängigkeit von l_f . Der Faserdurchmesser wird variiert. Edelstahlfasern erreichen die festgelegte kritische Sinkstrecke bei $d_f = 200 \mu\text{m}$ und der Faserlänge $l_f = 9 \text{ mm}$ bzw. bei $d_f = 300 \mu\text{m}$ und der Faserlänge $l_f = 3 \text{ mm}$. Daraus resultierend werden deutliche Einschränkungen für die Nutzbarkeit der Edelstahlfasern im Porenbeton festgestellt.

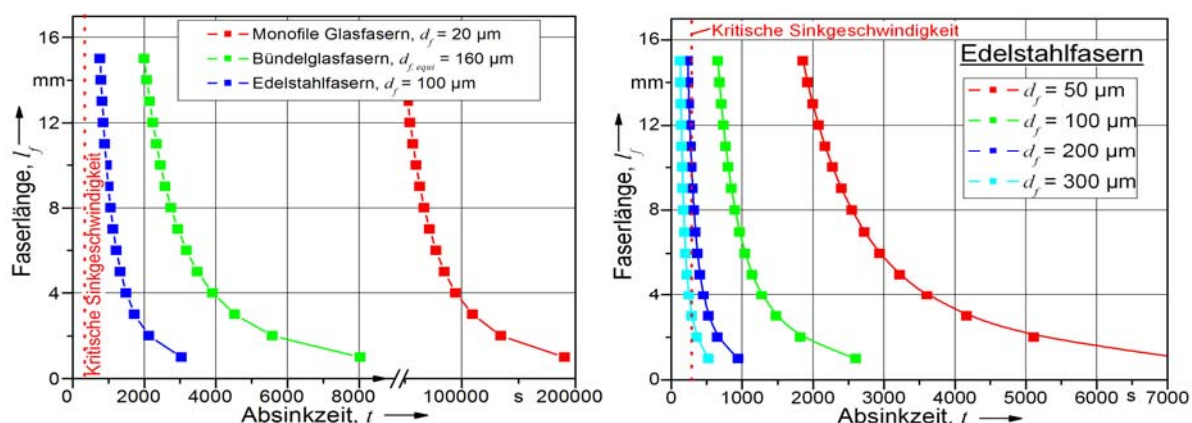


Abb. 4-4 Sinkzeiten von Fasern für eine mittlere Strecke $s = 10 \text{ cm}$ in Abhängigkeit von der Faserlänge (l_f) in der Anfangssuspension, **links:** Auswahl von Fasern: wasserdispersible monofile alkaliresistente (AR) Glasfaser, AR-Bündelglasfaser und Edelstahlfaser, **rechts:** Auswahl einer Bandbreite von Edelstahlfasern bei unterschiedlichen Faserdurchmessern (d_f) in Abhängigkeit von l_f

4.3.4.2 Faserbeständigkeit unter den Bedingungen der hydrothermalen Härtung

Fasern im kurzfaserverstärkten Porenbeton würden während der hydrothermalen Härtung im Herstellungsprozess starken Beanspruchungen unterliegen. Dabei könnten Auflösungs- bzw. Umwandlungsprozesse bei Entstehung von Spaltprodukten stattfinden.

Die Stabilitätsgrenzen der Fasern ergeben sich materialabhängig aus Schmelz-, Zersetzungs- bzw. Erweichungstemperaturen. Diese Temperaturen sinken aufgrund des aggressiven, alkalisch überhitzten Wasserdampfs. Aus der Clausius-Clapeyron-Gleichung kann näherungsweise die druckabhängige Temperatur im Vergleich zu den Normalbedingungen hergeleitet werden (s. Gl. [4-8]).

$$\Delta T = \frac{T \Delta V \Delta p}{H} \quad [4-8]$$

ΔT Temperaturdifferenz infolge Druck; $[\Delta T] = K$

Δp Druckdifferenz; $[\Delta p] = N/mm^2$

T Absolute Temperatur; $[T] = K$

H Umwandlungsentropie; $[H] = J$

ΔV Volumendifferenz; $[\Delta V] = mm^3$

Fasern, die unter den Härtungsbedingungen der Porenbeton-Herstellung keine Stabilität aufweisen, sind zur Steigerung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens des Porenbetons nur eingeschränkt einsetzbar. Für diese Fasern sind weitere quantifizierende Untersuchungen hinsichtlich der absoluten Beeinträchtigung der Fasertragfähigkeit und des Verbunds erforderlich. In erster Näherung werden die Fasern vor dem Porenbeton-Einbau untersucht.

Versuchsbeschreibung und Durchführung

Eine Auswahl an Fasermaterialien (Trocknung: 65°C) werden den hydrothermalen Härtingsbedingungen der Porenbeton-Herstellung unterworfen. Die Bedingungen werden über eine abgeschlossene Autoklavierungseinheit simuliert. Das Fasermaterial wird in einer gesättigten Calciumhydroxidlösung (pH-Wert: 12,6) gelagert und bei 190°C (ca. 13 bar) für einen Zeitraum von sechs Stunden beansprucht. Die Lösung nimmt 25 Vol.-% im Autoklav ein. Durch die direkte Einlagerung des Fasermaterials in die Lösung ergeben sich verschärfte Bedingungen. Anschließend werden die Fasermaterialien schonend mit destilliertem Wasser gereinigt und bei 65°C auf Massekonstanz getrocknet. Eine Zustandsbeurteilung der Fasern erfolgt vereinfacht gravimetrisch. Ergänzend werden einige hydrothermal beanspruchte Fasermaterialien unter dem Lichtmikroskop betrachtet. Folgende Fasern werden untersucht:

Pflanzenfasern

- 1a Bambusfaser**, PMG Geotex GmbH, Armierungsfaser
- 1b Jutefaser**, Schwarzwälder Textil-Werke, F501/1000
- 1c Sisalfaser**, Schwarzwälder Textil-Werke, F506/1000
- 1d Flachsfaser**, SachsenLeinen GmbH, F035/98/3A05
- 1e Hanffaser**, Hanffaserfabrik Uckermark, Armierungsfaser
- 1f Ramiefaser**, Consortex, Karl Doelitzsch GmbH
- 1g Kokosfaser**, Eigenherstellung

Fasern aus natürlichen und künstlichen Polymeren

- 2a Baumwollfaden**, Schwarzwälder Textil-Werke, SB 67/10
- 2b Zellwolle-/ Viskosefaser**, Schwarzwälder Textil-Werke, Zw gl 3,3/4
- 2c Zellulosefaser**, Lenzing fibers Ltd., Tencel
- 2d Polyacrylnitrilfaser (PAN - allgemein)**, Schwarzwälder Textil-Werke, PAC 251/ 2,1 /4T
- 2e Dolanitfaser**, Kelheim Fibres GmbH, DOLANIT - Type 10
- 2f Phenolharzfaser**, Kynol Europe GmbH, KF 0206
- 2g Kunstseidefaser**, Cordenka GmbH, Rayon RT 700
- 2h Polyesterfaser (PE)**, Schwarzwälder Textil-Werke, PES gl 3,3/ 6
- 2i Aramidfaser**, TEIJIN, Technora CF

Anorganische Chemiefasern

- 3a Mineralwollefaser**, Unifrax GmbH, Roxul 1000 706 K2
- 3b Alkali resistente Glasfaser**, Saint Gobain, Cem-FIL ARC20 70/30
- 3c Basaltfaser**, BAXALT Technologie GmbH
- 3d Edelstahlfaser**, Stax, M 30, Mat. 1.4113
- 3e Kohlenstofffaser**, Toho Tohex, Tenax®-U 143
- 3f Keramikfaser**, Unifrax GmbH, Fiberfrax B 822

Ergebnisse und Diskussion

Abb. 4-5 zeigt die Masseverluste o. g. Pflanzenfasern und Fasern aus natürlichen und künstlichen Polymeren. Pflanzenfasern (s. **Abb. 4-5, 1a-g**) verlieren deutlich an Masse. Dies wird in erster Linie auf die Pyrolyse bei Zersetzung des Lignins sowie anderer flüchtiger Bestandteile zurückgeführt (s. Kap. 4.3). Das Fasermaterial bleibt makroskopisch betrachtet formstabil. Charakteristisch bei allen Pflanzenfasern ist die dunkle Verfärbung des Materials. Unter dem Lichtmikroskop ist ein teilweises Auflösen in die Monofilamente festzustellen. Stellenweise zeigen die Pflanzenfasern auch Quer- und Schrägrisse auf den Oberflächen.

Die Fasern aus natürlichen Polymeren (s. **Abb. 4-5, 2a-c**) zeigen ebenfalls deutliche Masseverluste. Dafür sind auch hier im Wesentlichen Zersetzungsprozesse verantwortlich. Die Fasern aus synthetischen Polymeren variieren stark in ihrem Verhalten (s. **Abb. 4-5, 2d-i**). Die Polymerisationsfasern aus PAN (**2d**) und Dolanit (**2e**) weisen starke plastische Verformungen auf; die Masseverluste sind gering. Die Phenolharzfasern (**2f**) und die Kunstseidefasern (**2g**) unterliegen höheren Masseverlusten. Die PE-Fasern (**2h**) zersetzen sich, trotz Temperaturbeständigkeit bis 330°C, unter den Bedingungen der Hydrothermalbeanspruchung durch eine Hydrolyse. Bei mechanischer Beanspruchung zerfällt das Fasermaterial. Die Aramidfa-

sern (2i) zeigen keine Masseverluste. Untersuchungen der Fasern aus PP und PVA zeigen, neben deutlichen Masseverlusten, starke Materialdeformationen.

Die anorganischen Fasern (3a-f) zeigen keine messtechnisch erfassbaren Masseverluste.

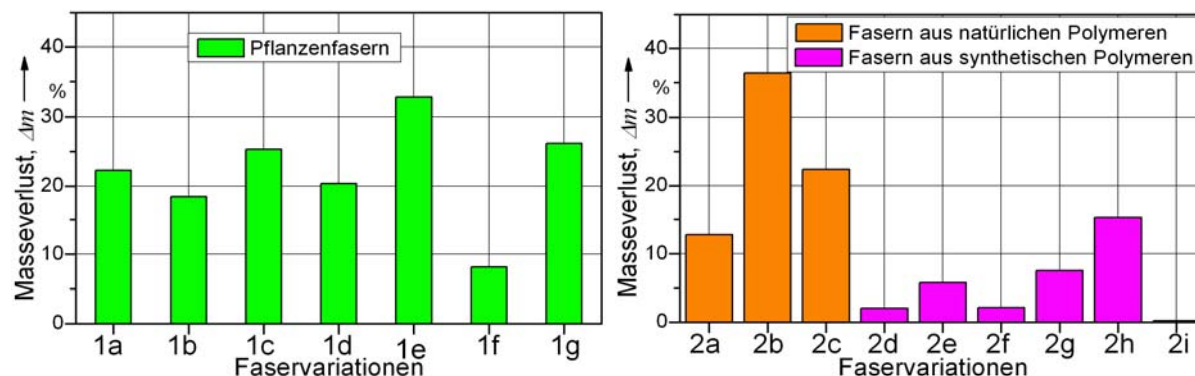


Abb. 4-5 Faserbeständigkeit unter hydrothormaler Beanspruchung (simulierte Porenbeton-Herstellung, Brantkalklösung, 190°C, 12 bar, 6 h), **links**: Masseverluste für eine Auswahl an Pflanzenfasern, **rechts**: Masseverluste für eine Auswahl an Fasern aus natürlichen und synthetischen Polymeren

Die wasserdispersiblen monofilen alkaliresistenten (AR) Glasfasern Saint Gobain Cem-FIL ARC20 70/30 werden im Folgenden detaillierter betrachtet. Nach Auswertung der Anforderungen in Kap. 4.3 wird vermutet, dass der Einbau der AR-Glasfasern u. a. eine hohe Wirksamkeit auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Porenbetons aufweist.

Allerdings können bereits kleine lokale Defekte auf der Faseroberfläche der Glasfaser bei späterer Beanspruchung zu Spannungsspitzen führen (Kerbwirkung). Die Glasfaser begünstigt, aufgrund der Glassprödigkeit, dieses Verhalten. Die Betrachtung der Faseroberflächen wird über ein ESEM¹ (Environment scanning electronic microscope) vorgenommen. **Abb. 4-6** zeigt elektronen-mikroskopische Aufnahmen von o. g. AR-Glasfasern:

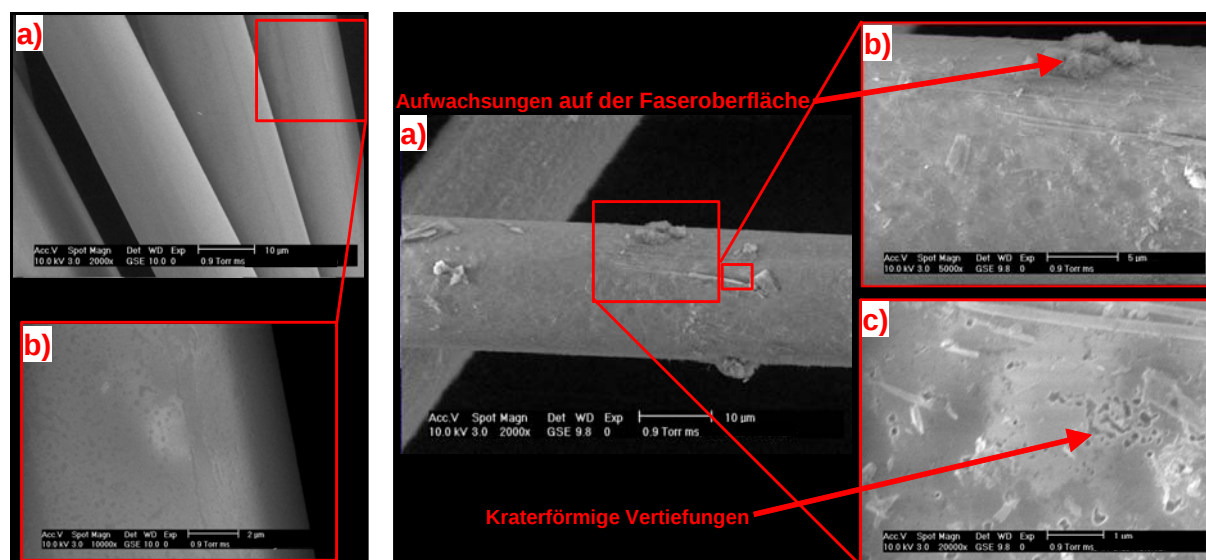


Abb. 4-6 Untersuchungen zur Faserbeständigkeit der alkaliresistenten Glasfasern, **links**: a) Faser (Faserdurchmesser $d_f = 20 \mu\text{m}$) im gewaschenen unbehandelten Zustand, b) Detail von a), **rechts**: a) Faser nach hydrothormaler Beanspruchung, (Laborautoklav: 190°C, 12 bar, 6 h) in alkalisch gesättigter Brantkalklösung, b) Detail von a) - Aufwachsungen, c) Detail von a) - kraterförmige Vertiefungen

Die AR-Glasfaser im gewaschenen Zustand (20°C, destilliertes Wasser) hat eine glatte, homogene Oberflächenstruktur (s. Abb. 4-6, **links**). Die Schlichte ist deutlich sichtbar. Nach der hydrothermalen Beanspruchung sind leichte Aufwachsungen (s. Abb. 4-6, **rechts**, a)-b)) und kraterförmige Vertiefungen auf den Faseroberflächen bzw. auf den Schlichten festzustellen

¹ Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Technische Chemie, Bereich Wasser- und Geotechnologie, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen.

(s. Abb. 4-6, **rechts, a)-c)**). Es zeigen sich teilweise Längsstreifen auf den Faseroberflächen. Die Aufwachsungen lassen sich durch Spülen mit destilliertem Wasser nicht lösen. Die Röntgenbeugungsanalyse zeigt keine kristallinen Strukturen. Daher kann angenommen werden, dass silikatische Bestandteile aus dem Fasermaterial in die alkalische Lösung übergehen und neue Calciumsilikathydrataufwachsungen (festkörperbildende Hydratationsprodukte) entstehen. Bei einer Thermoanalyse konnten keine Kalkhydratbestandteile als Aufwachsungen gefunden werden. Die kraterförmigen Vertiefungen lassen sich in verschiedenen Größen (Durchmesser $< 1 \mu\text{m}$) feststellen. Sie sind im Wesentlichen oberflächennah.

Es wird angenommen, dass die mechanischen Eigenschaften der AR-Glasfaser (Cem-FIL) durch die hydrothermale Beanspruchung reduziert werden. Das in Lösung gehende Silikat und der Schichtenabtrag können zu Faserschädigungen führen. Inwieweit die mechanischen Eigenschaften der AR-Glasfasern durch die detektierten Faserschädigungen reduziert werden, lässt sich zu diesem Zeitpunkt nicht abschließend sagen.

4.4 Vorauswahl der Fasern

Die Auswertung der Faseranforderungen (s. Kap. 4.3) zeigt, dass viele Fasern nur eingeschränkte Wirksamkeit (s. Kap. 4.2) im Porenbeton aufweisen werden. Fasern, die bestimmte Wirksamkeiten hervorrufen, können zu Schädigungen in Teilbereichen des Anforderungsprofils führen. Fasereinbauten, die richtungsabhängig die Gefügestruktur bzw. die Materialeigenschaften verbessern, können z. B. das Festigkeits- und Verformungsverhalten gegenüber dem unverstärkten Porenbeton verschlechtern. Kap. 5 untersucht einzelne Wirksamkeiten. Im Vordergrund steht die Verbesserung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens.

Trotz kritischer Betrachtungen des Anforderungsprofils werden alle kommerziell verfügbaren Fasermaterialien bzw. -formen in den Porenbeton eingebaut. Es wird sich systematisch der Vorzugsfaser genähert. Vorerst ergeben sich ausschließlich folgende Ausschlusskriterien:

- Morphologische Faserform: (Faserlänge/ -durchmesser) $l_f/d_f \leq 10\,000$ und $l_f \geq 12 \text{ mm}$.
 - Die Festlegung dieser Grenzkriterien ist zur Kontrolle der Faserverteilung und -orientierung in der Anfangssuspension erforderlich. Fasern außerhalb dieser Grenzkriterien führen zu nicht tolerierbaren Inhomogenitäten in der Faser- bzw. Feststoffstruktur.
 - Faser mit $l_f \leq 12 \text{ mm}$ werden im Folgenden als Kurzfasern bezeichnet (s. Kap. 3.1).
- Kurzfasern mit einer Sinkgeschwindigkeit $v_s \geq 3 \text{ mm/min}$ in der Anfangssuspension.
 - Dieses Grenzkriterium schließt Kurzfasern mit einer Rohdichte $\rho_f \geq 5 \text{ g/cm}^3$ bei einer Form von $l_f = 3 \text{ mm}$ mit $d_f < 500 \mu\text{m}$ bzw. $l_f = 6 \text{ mm}$ mit $d_f < 300 \mu\text{m}$ aus (s. Kap. 4.3.4.1).
- Kurzfasern mit geringer Beständigkeit unter hydrothermalen Härtingsbedingungen.
 - Dieses Grenzkriterium schließt Fasermaterialien aus den Untersuchungen zum Festigkeits- und Verformungsverhalten aus, die während der hydrothermalen Härtung zerstört, stark deformiert bzw. in ihren mechanischen Eigenschaften stark reduziert werden.
- Kurzfasern mit geringer Alterungsbeständigkeit und Dauerhaftigkeit.
 - Dieses Grenzkriterium schließt Kurzfasern aus, die ein hohes Korrosionspotenzial aufweisen, u. a. Stahlfasern bzw. nicht alkalibeständig sind, u. a. Elementarglasfasern.
- Kurzfasern mit gesundheitlicher Bedenklichkeit (s. Kap. 4.2).
- Kurzfasern mit einem Preis $> 50 \text{ Euro/kg}$.
- Kommerzielle Nichtverfügbarkeit.

Ziel ist es, ein gesamtheitliches Verständnis des Verhaltens bei Fasereinbau zu erhalten. Die durchgeführte Auswertung der Anforderungen in Kap. 4 dient als Diskussionsgrundlage.

5. Untersuchungen zur Wirksamkeit von Kurzfasern im Porenbeton

Überblick

Der Einbau von Kurzfasern zeigt bei Porenbeton mit Rohdichten $\rho_{Pb} = 450\text{-}550 \text{ kg/m}^3$ stark unterschiedliche Verhaltensweisen. Das Verhalten ist abhängig von Form, Material und Konzentration der Kurzfasern. Kurzfasern verändern im Treibprozess die Feststoffstrukturen; sie befinden sich vorzugsweise im Feststoff und orientieren sich tendenziell parallel zur Treibrichtung. Es ergeben sich anisotrope Gefügestrukturen und anisotrope Eigenschaften. Richtungsabhängige Untersuchungen unter Druck-, kombinierter Druck-Schub- und Biegebeanspruchung bei Einbau von alkaliresistenten Kurzglasfasern sowie von Kohlenstoff- und Aramidkurzfasern zeigen deutliche Steigerungen im Festigkeits- und Verformungsverhalten. Unter Biegebeanspruchung ergeben sich die größten Verbesserungspotenziale, die Neigung zum Spröbruch wird deutlich reduziert. Die spröde Erstentfestigung unter Druckbeanspruchung ist im betrachteten Rohdichtebereich durch Fasereinbau nur bedingt reduzierbar. Bauphysikalisch relevante Transportphänomene, die stark abhängig sind von der Gefügestruktur, werden in Abhängigkeit von der Einbaurichtung des Porenbetons nicht beeinflusst.

5.1 Mischungszusammensetzung, Herstellung, Randbedingungen

Die Porenbeton-Basismischung für die folgenden Untersuchungen orientiert sich praxisnah in Zusammensetzung, Herstellung und Randbedingungen an den langjährigen Produktionserfahrungen der XELLA Technologie- und Forschungsgesellschaft mbH².

Mischungszusammensetzung, Herstellung

Neben den Hauptbestandteilen Bindersand, Branntkalk, Portlandzement, Anhydrit, Wasser und Porosierungsmittel werden Porenbetonsplitt und Rückgutschlämme eingearbeitet. Der Porenbetonsplitt besteht aus Bruch- und Ausschussware, die im Rahmen der Durchlaufherstellung im industriellen Produktionsprozess anfällt. Die Rückgutschlämme beinhaltet das grünste Restschneidmaterial, das ebenfalls in die Prozesskette der industriellen Herstellung zurückgeht, ein. Dazu wird im Vorfeld eine Mischung mit gleicher Zusammensetzung (s. u.) aufgetrieben, zerstört und bei Wasserzugabe auf eine Rohdichte $\rho \approx 1380 \text{ kg/m}^3$ im Mischer aufgeschlämmt. Die Standzeit vor der Aufschlämmung, inklusive Treibprozesszeit, beträgt ca. zwei Stunden. Die Schlämme wird nach ca. vier Stunden der Mischung zugegeben. Sie dient neben dem Bindersand, dem Zugabewasser und dem Porenbetonsplitt als Vorlage im Mischprozess. Das Wasser-Mehlkorn-Verhältnis berücksichtigt das Überschusswasser der Schlämme. Der Porosierungsmittelgehalt wird auf den Mehlkornanteil bezogen. Die Basismischung hat folgende quantitative Zusammensetzung:

• Bindersand (DORSILIT 1600, Kaolin- und Kristallquarzsand-Werke KG, Hirschau)	56,7 M.-%
• Branntkalk (WFK 11/6, Fels Werke, XELLA International GmbH, Rübeland)	13,5 M.-%
• Portlandzement (CEM I, 52,5 Pb, Rüdersdorfer Zementwerke, CEMEX GmbH, Rüdersdorf)	16,5 M.-%
• Anhydrit (Anhydrit Extra, Harzer Gipswerke, Osterode)	2,5 M.-%
• Porenbetonsplitt trocken (0-1 mm aufgemahlen, XELLA International GmbH, Produktion - Porenbetonwerk Brück)	10,8 M.-%
• Aluminiumpulver (STAPO Alupor RO 200, ECKART Werke, Fürth)	0,09 M.-%
• Wasser-Mehlkorn-Verhältnis	0,6

² XELLA Technologie- und Forschungsgesellschaft mbH, Technologie- und Forschungszentrum Brück, Gregor-von-Brück-Ring 9A, 14822 Brück.

• Rückgutschlämme

(Mischungszusammensetzung, wie oben beschrieben, Ansetzung ca. 4 h vorher)

10,0 M.-%

- Randbedingungen:**
- Abgusstemperatur $T = 40^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2^{\circ}\text{C}$), relative Luftfeuchtigkeit $\varphi = 50\%$ ($\pm 10\%$)
 - Einfüllhöhe: 43-44 cm (Schalungsgrundfläche: 30 x 30 cm)

Wahl der Kurzfasern

Die Kurzfasern (s. Anhang: Tab.-A.: 2) werden bei Variation von Material und Form unter Berücksichtigung der in Kap. 4.3 angestellten Überlegungen gewählt: 28 verschiedene Faservariationen kommen zum Einsatz. Es werden Kurzfasermaterialien verwendet, bei denen eine Steigerung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens bzw. eine Gefügemanipulation bei richtungsabhängiger Verbesserung bauphysikalisch relevanter Transportphänomene zu erwarten ist (s. Kap. 4.4); Teilersetzungen der Kurzfasern sind hier nicht maßgebend.

Die Faserkonzentration (ψ_f) wird im Vorfeld faserspezifisch festgelegt und zur besseren Ergebnisinterpretation auf Volumen pro Anfangssuspension bezogen. Die Faservolumina werden mithilfe der Faserfeststoffdichten auf spezifische Einwaagen umgerechnet. Die Faserfeststoffdichten werden über das Heliumpyknometer ermittelt [N 26]. Die Datenblätter der Faserproduzenten bzw. -lieferanten dienen ergänzend als Informationsquelle. Eine Auswahl der eingebauten Kurzfasern in Material- und Formvariation wird in **Abb. 5-1** dargestellt:

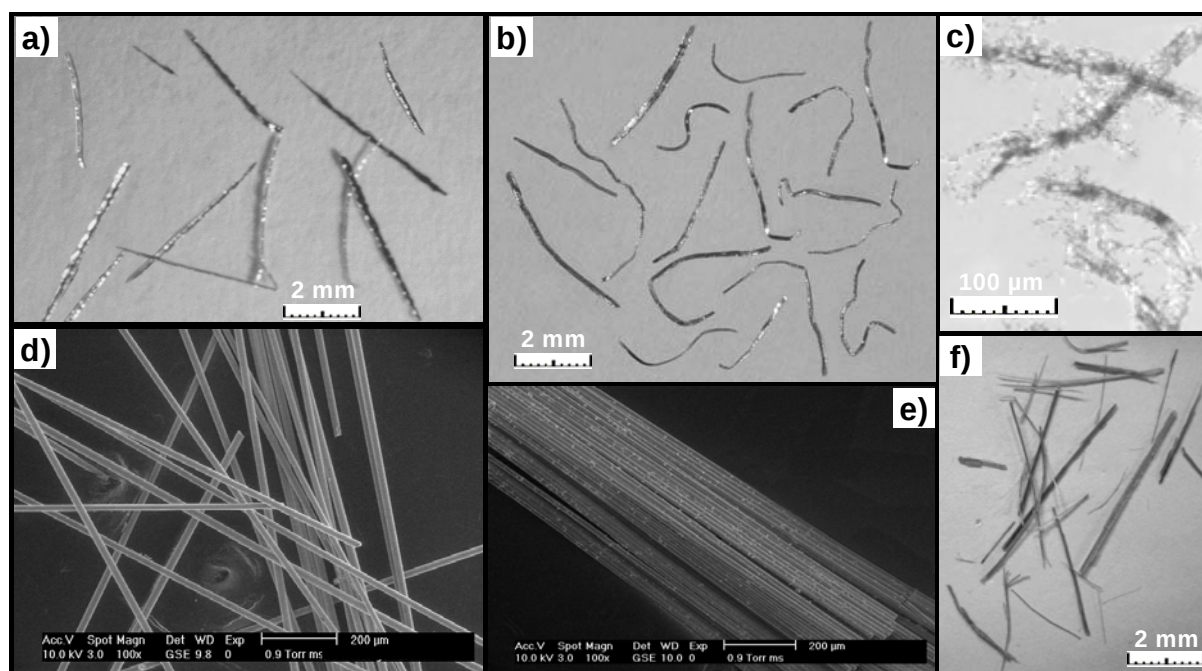


Abb. 5-1 Auswahl eingebauter Kurzfasern nach Tab.-A.: 2 bei Material- und Formvariation, **a)** Edelstahlkurzfasern Mat. 1.4767 (1-16), **b)** Edelstahlkurzfasern Stax M30 (1-15), **c)** Aramidpulpe - fibrilliert (1-7), **d)** Wasserdispersible monofile alkaliresistente (AR) Kurzglasfasern Saint Gobain (SG) Cem-FIL ARC20 70/30 (1-24), **e)** AR-Bündelkurzglasfasern SG Cem-FIL ARC20 62/2 (1-27), **f)** Bambuskurzfasern (1-1)

Abb. 5-1, a) zeigt eine Lichtbildaufnahme der Edelstahlfasern (Fraunhofer³, Mat. 1.4767, Faserdurchmesser $d_f = 300\ \mu\text{m}$, Faserlänge $l_f = 5\ \text{mm}$ (1-16)), hergestellt nach dem Schmelzextraktionsverfahren [2], [42] (CME-Verfahren). Die Oberflächen sind leicht strukturiert, die Verlaufsform ist lang gestreckt. Das Masse-Form-Verhältnis ist grenzwertig eingehalten (s. Kap. 4.3.4.1). **Abb. 5-1, b)** zeigt eine Lichtbildaufnahme weiterer Edelstahlfasern (Stax M30, Mat. 1.4113, $d_f = 90\ \mu\text{m}$, $l_f = 3\ \text{mm}$ (1-15)). Diese werden spanabhebend aus Drähten gewonnen. Sie erhalten ebenfalls durch den Fertigungsprozess eine ungleichmäßige bzw. raue Oberfläche. Ihre Verlaufsform ist herstellungsbedingt gebogen. **Abb. 5-1, c)** zeigt eine

³ Diese Kurzfasern werden im Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung, Nöthnitzer Straße 44, 01187 Dresden hergestellt.

elektronen-mikroskopische Aufnahme von Aramidpulpen (Kevlar® 953, (1-7)). Es sind deutlich die verzweigten Strukturen (Fibrillen) zur Vergrößerung der Faseroberfläche festzustellen, woraus sich eine optimale Verankerung im Grundmaterial ergibt. Abb. 5-1, **d)** zeigt elektronen-mikroskopisch erfasste wasserdispersible monofile alkaliresistente (AR) Kurzglasfasern ((MGF) Saint Gobain (SG) Cem-FIL ARC20 70/30, $d_f = 20 \mu\text{m}$, $l_f = 3 \text{ mm}$). Sie werden über das Düsenziehverfahren hergestellt und mit einer Schlichte überzogen. Die Oberfläche dieser Kurzfasern ist nahezu glatt. Abb. 5-1, **e)** stellt eine AR-Bündelkurzglasfaser (BGF) SG Cem-FIL ARC20 62/2 dar. Dabei werden 102 monofile Einzelfasern ($d_f = 14 \mu\text{m}$, Einzelfilamente) zu einem Bündel durch Schichtenverklebung im Herstellungsprozess zusammengefasst. Es entsteht ein Rechteckquerschnitt ($0,4 \times 0,05 \text{ mm}^2$) mit unteilbaren Fasereinheiten (s. Kap. 4.3.1.2). Die Schlichte fungiert als Matrix und verbindet die Einzelfilamente. Alle Pflanzenkurzfasern liegen ebenfalls als Bündelkurzfasern vor. So werden die Bambuskurzfasern nach Abb. 5-1, **f)** zermahlen und abgesiebt. Sie weisen eine breitbandige Form auf ($d_f = 0,3\text{-}2,0 \text{ mm}$, $l_f = 3\text{-}14 \text{ mm}$). Die Oberflächen sind fein gerieft, fibrilliert und z. T. quer verschoben. Die Querschnitte des Gesamtprofils bzw. der Einzelfilamente variieren stark.

Verarbeitbarkeit

Gemischt wird in einem 150-Liter-Zwangsmischer (s. **Abb. 5-3, a)**) mit separater Einfülleinrichtung. Die Einmischbarkeit ist bei allen Kurzfasern gegeben. Faserbruch durch Scherbeanspruchung während des Mischprozesses kann ausgeschlossen werden. Um einen möglichst hohen Homogenisierungsgrad zu erreichen, wird folgende Mischungssequenz gewählt:

- Vorlage von:
 - Zugabewasser
 - Bindersandanteile
 - Rückgutschlämme
 - Porenbetonsplittanteile
 - Kurzfasern
 - Bindemittelanteile: Portlandzement, Branntkalk, Anhydrit
 - Porosierungsmittel
- 30 s
30-60 s (faserspezifisch angepasst)
30 s
30 s

Die Verarbeitbarkeiten bei Kurzfasereinbau unterscheiden sich deutlich. In erster Näherung werden Fließverhalten, Dispergierbarkeit bzw. Fähigkeit zum Niveauausgleich der Suspension zur Beurteilung herangezogen. Folgende Verhaltensweisen lassen sich verallgemeinern:

Die eingesetzten Pflanzenkurzfasern ((1-1)-(1-4)) besitzen gute Verarbeitbarkeiten. Lediglich die Hanffasern (1-2) sind, aufgrund ihrer Form ($l_f \approx 15 \text{ mm}$), in ihrer Dispergierbarkeit leicht eingeschränkt. Die Faserhygroskopizität hat in der Mischphase keinen Einfluss auf den Wasseranspruch der Mischung, die direkte Oberfläche des Faserbündels ist zu gering.

Die verwendeten Kurzfasern aus natürlichen Polymeren ((1-5)-(1-6)) sind nur eingeschränkt verarbeitbar. Die Baumwollfäden neigen im Mischprozess, aufgrund geringer Biegesteifigkeit und Länge (bis $l_f = 20 \text{ mm}$), zur Igelbildung. Weiterhin treten starke Wechselwirkungen mit dem Rührwerk auf. Bei Einbau der Zellulosekurzfasern (1-5) werden neben einer schlechten Dispergierbarkeit, ebenfalls Igel festgestellt. Diese werden auf den geringen mittleren Faserabstand zurückgeführt. Beide Faserarten setzen die Fließfähigkeit der Anfangssuspension bedeutend herab, eine gleichmäßige Faserverteilung ist nicht vorhanden.

Die synthetischen Polymerkurzfasern ((1-7)-(1-12)) sind bis auf die Aramidkurzfasern (1-8) uneingeschränkt verarbeitbar; sie dispergieren sich hervorragend. Bei Einbau der Aramidkurzfasern werden jedoch ebenfalls starke Igelbildungen bzw. Konglomerationen festgestellt. Ursache dafür sind ebenfalls die geringen mittleren Faserabstände in Verbindung mit einer schlechten Dispergierbarkeit. Durch Reduzierung von $\psi_f = 0,50 \text{ Vol.-%}$ auf $\psi_f = 0,25 \text{ Vol.-%}$ bzw. Optimierung der Oberflächenschlichte ließe sich die Verarbeitbarkeit verbessern.

Die eingesetzten anorganischen Chemiefasern ((1-13)-(1-28)) haben i. d. R. eine einge-

schränkte Hygroskopizität. Die Edelstahlfasern ((1-15)-(1-16)) und die Keramikfasern (1-19) sind uneingeschränkt verarbeitbar. Kohlenstoffkurzfasern ((1-17)-(1-18)) mit $l_f = 6$ mm neigen, aufgrund der geringen Biegesteifigkeit und der Länge, zur Igelbildung im Mischprozess. Sie sind daher nur eingeschränkt verarbeitbar, eine Reduzierung von ψ_f ist notwendig. Die Anfangssuspension steift durch den Wasseranspruch der Kurzfasern deutlich an. Die Glasfasern der Cem-FIL-Reihe ((1-23)-(1-28)) lassen sich gut dispergieren; lediglich bei Einbau der wasserdispersiblen monofilen alkaliresistenten (AR) Kurzglasfasern mit $l_f = 12$ mm entstehen leichte Faserigel im Mischprozess. Die eingesetzten Basaltkurzfasern ((1-13)-(1-14)) und die Aluminium-modifizierten Kurzglasfasern BelCoTex ((1-21)-(1-22)) lassen sich schlecht dispergieren. Optimierte Oberflächenschichten nach dem Prinzip der Cem-FIL-Reihe wären auch hier vorteilhaft. Die Mineralwollefaser (1-20) zeigen durch ihre Formbezogenheit starke Einschränkungen in der Rieselfähigkeit und somit in der Dispergierbarkeit.

Bei Einbau aller Kurzfaservariationen sind Faservorzugsorientierungen in der Strömung durch Rotation des Rührwerks feststellbar. Diese ergeben sich vor allem aufgrund der flüssigen Beschaffenheit und der hohen Mehlkornanteile der Anfangssuspension. Geringe Faserfeststoffdichten stellen, aufgrund des intensiven Mischprozesses, keine Einschränkung dar.

Herstellung der Treibkörper

Die Abgustemperatur wird über die Temperatur des Zugabewassers gesteuert. Die Schalung besteht aus phenolharzbeschichteten Holzleimplatten. Die Oberflächen des Schalungsmaterials werden mit einem Silikonöl behandelt.

Das Befüllen erfolgt konstant mit einer Einfüllhöhe $h = 43-44$ cm (s. Abb. 5-3, **b**). Die Treibhöhe liegt, faserabhängig, bei 60-80 cm ($\rho_{pb} = 450-600$ kg/m³). Dies entspricht praxisnah der Treibhöhe im industriellen Produktionsprozess. Kurzfaserspezifische Verhaltensweisen können so ansatzweise im Industriemaßstab untersucht werden. Die Schalung wird über das Aufsetzen des Mischbehälters auf die Schalung und einem kontrollierten Abguss (ca. 3 s) der faserversetzten Anfangssuspension (s. Abb. 5-3, **b**) befüllt. Potenzielle Anfangsorientierungen der Kurzfasern sollen in jeder Charge gleich eingeprägt werden. Die Geometrie der Schalung (30 x 30 x 90 cm³) wird so gewählt, dass Anfangsorientierungen der Kurzfasern durch das Befüllen reduziert werden. Es kommt zu turbulenten Einfüllbewegungen unter Wechselbewegungen mit den Schalungswandungen. Die Schalungen werden nach der Befüllung mit Folien luftdicht abgeschlossen und ca. vier Stunden bei Raumklima (Temperatur $T = 22^\circ\text{C}$ ($\pm 2^\circ\text{C}$), relative Luftfeuchtigkeit $\varphi = 50\%$ ($\pm 10\%$)) gelagert (Abb. 5-3, **c**). Im Anschluss werden die Lagerungsbedingungen auf $T = 50^\circ\text{C}$, $\varphi = 50\%$ umgestellt.

Vor der hydrothermalen Härtung im Autoklaven werden die Treibkörper mittig hochkant mit einer „Porenbetonsäge“ durchtrennt (s. **Abb. 5-2, a**) bzw. Abb. 5-3, **d**). Bei Voruntersuchungen wurden bei größeren Treibkörpergeometrien in der Dampfdruckaufbauphase Schäden durch thermisch induzierte Eigenspannungen beobachtet. Abb. 5-2, **b**) zeigt einen Treibkörper mit einer Grundfläche: 60 x 60 cm², mittig durchtrennt (s. Kap. 2.3.3). Der Treibkörper zeigt deutliche schalenförmige Ausbrüche im Randbereich auf den Längsseiten. Die hydrothermale Härtung wird im Technikum der XELLA Technologie- und Forschungsgesellschaft mbH in Brück ca. 24 h nach dem Einfüllen in die Schalung durchgeführt. Sie findet unter den technischen Bedingungen der Werksproduktion nach folgendem Autoklavierungsprogramm bei 200°C und 12 bar statt (Abb. 5-3, **e**) und Abb. 5-3, **f**):

- Unterdruck ziehen 1 h
- Dampfdruck auffahren 2 h
- Dampfdruck halten 6 h
- Dampfdruck abfahren 2 h

Der Porosierungsmittelgehalt 0,09 M.-% ergibt eine Porenbeton-Rohdichte $\rho_{pb} \approx 450$ kg/m³.

Porenbeton mit dieser Rohdichte zeigt gute bauphysikalische Eigenschaften und bereits eine verhältnismäßig hohe Druckfestigkeit (= Kompromisslösung). Die Festigkeitsklasse beträgt 4 [N 24]. Um einen Vergleich zu ermöglichen, werden weitere Treibkörper bei Variation des Porosierungsmittelgehalts zwischen 0,05-0,11 M.-% hergestellt (s. Tab.-A.: 1).

Die Probekörper für die Untersuchungen werden nass mit einer Steinkreissäge aus den Treibkörpern herausgeschnitten (s. Abb. 5-2, **c**) bzw. Abb. 5-3, **g**). Randeffekte werden durch Abtrennen eines Rands (1 cm) umlaufend berücksichtigt. Eigenspannungsrisse werden nicht festgestellt.

Nach der hydrothermalen Beanspruchung sind bei Einbau einiger Pflanzenkurzfasern starke Geruchsbelastungen festzustellen. Der Wassergehalt unmittelbar nach Abschluss der Hydrothermalbeanspruchung beträgt ca. 20,0 M.-%.

Die folgenden Untersuchungen dienen als erster Anhaltspunkt zur Beurteilung der Faserwirksamkeit. Für fundierte Aussagen ist die Einbeziehung einer größeren Anzahl von Probekörpern erforderlich.

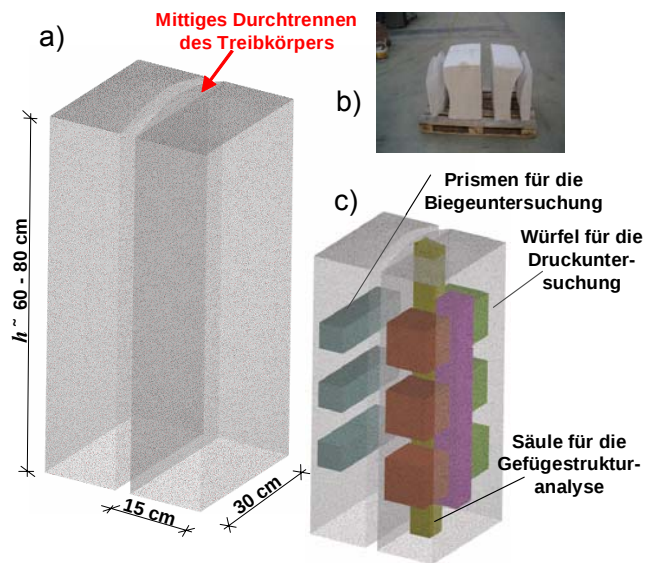


Abb. 5-2 Darstellung des Treibkörpers, **a**) Treibkörper, mittig in der Grünphase geteilt, **b**) Schadensbild bei Treibkörpern mit 30 x 60 cm² Grundfläche, **c**) Lage der Probekörper im Treibkörper

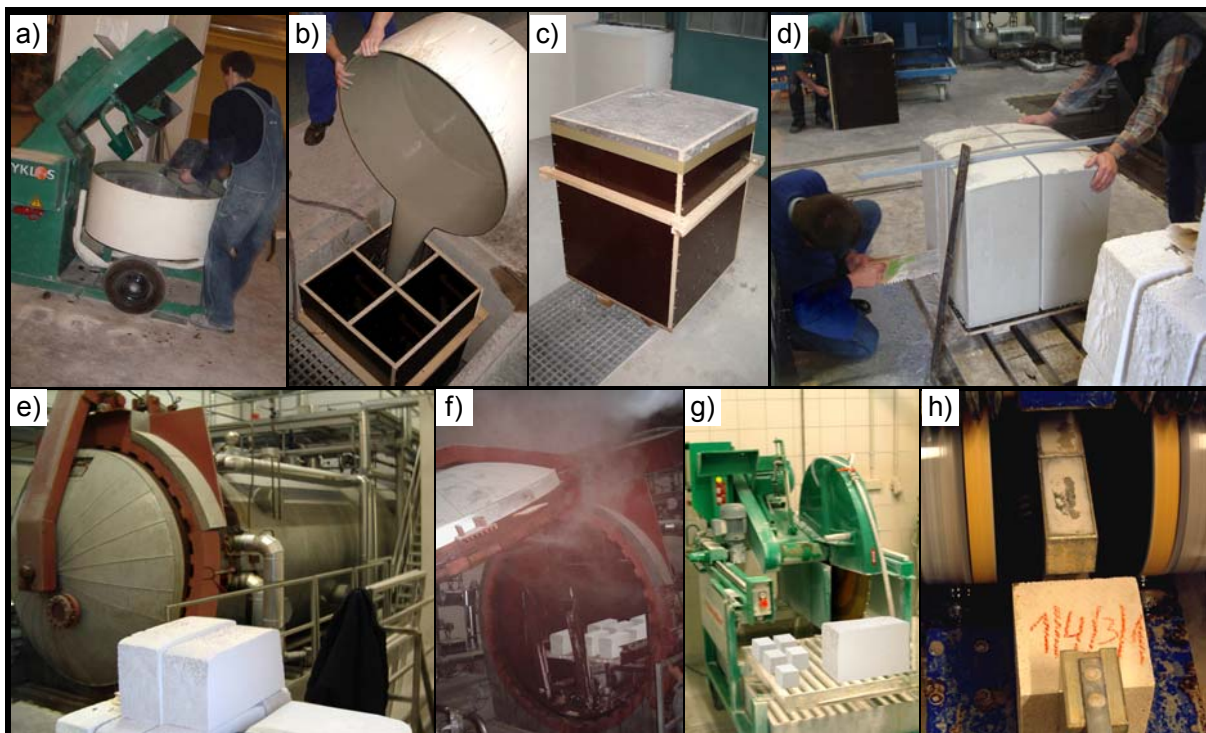


Abb. 5-3 Herstellung der Porenbeton-Probekörper, **a**) Einfüllen bei Vorlage o. g. Mischungsbestandteile bzw. Mischen, **b**) Einfüllen der Anfangssuspension in die Treibschalung, **c**) Lagerung des Treibkörpers in der Treibprozessphase, **d**) Durchtrennen des Treibkörpers zur Reduzierung der Eigenspannungen, **e**) Autoklav, im Vordergrund Treibkörperhälften, **f**) Öffnen des Autoklavs nach der hydrothermalen Behandlung, **g**) Nassschneiden der Probekörper aus den Treibkörpern, **h**) Nassschleifen des Probekörpers auf Planparallelität und Maßhaltigkeit für die Untersuchung unter Druckbeanspruchung

5.2 Gefügestruktur

Die Gefügestruktur der Treibkörper bei Variation der Faserparameter nach Tab.-A.: 2 mit den mesoskopischen Phasen Kurzfaser, mikroporöse Feststoffstruktur und Makroporosität wird qualitativ bzw. stichpunkthaft quantitativ analysiert.

5.2.1 Kurzfaserstruktur

Die Kurzfaserstruktur wird u. a. über die dreidimensionale (3D) Bildanalyse bewertet. Der verfahrenstechnisch hohe Aufwand der 3D-Erfassung bzw. -analyse der Kurzfaserstruktur sowie die verfahrens- und kurzfaserspezifisch notwendigen kleinen Probekörpergeometrien ermöglichen systematische Untersuchungen nur eingeschränkt.

Versuchsbeschreibung und Randinformationen

Die Kurzfaserstruktur wird über die 3D-Röntgen-⁴ bzw. die 3D-Synchrotron-Computertomographie⁵ (CT) erfasst (s. Kap. 3.3). Aus der digitalisierten tomographischen Datensatzinformation wird die Kurzfaserstruktur bei divergierenden Adsorptionskoeffizient mittels Schwellwertoperation aus dem Feststoffmaterial und den Makroporen extrahiert (s. Kap. 2.2.2). Die Kurzfaserstruktur wird visuell qualitativ beurteilt bzw. unter Nutzung eines 3D-Bildanalyse-tools quantitativ bewertet. Faserverteilung ($\chi_{f,3D}$) und -orientierung ($\eta_{f,3D}$) werden bestimmt.

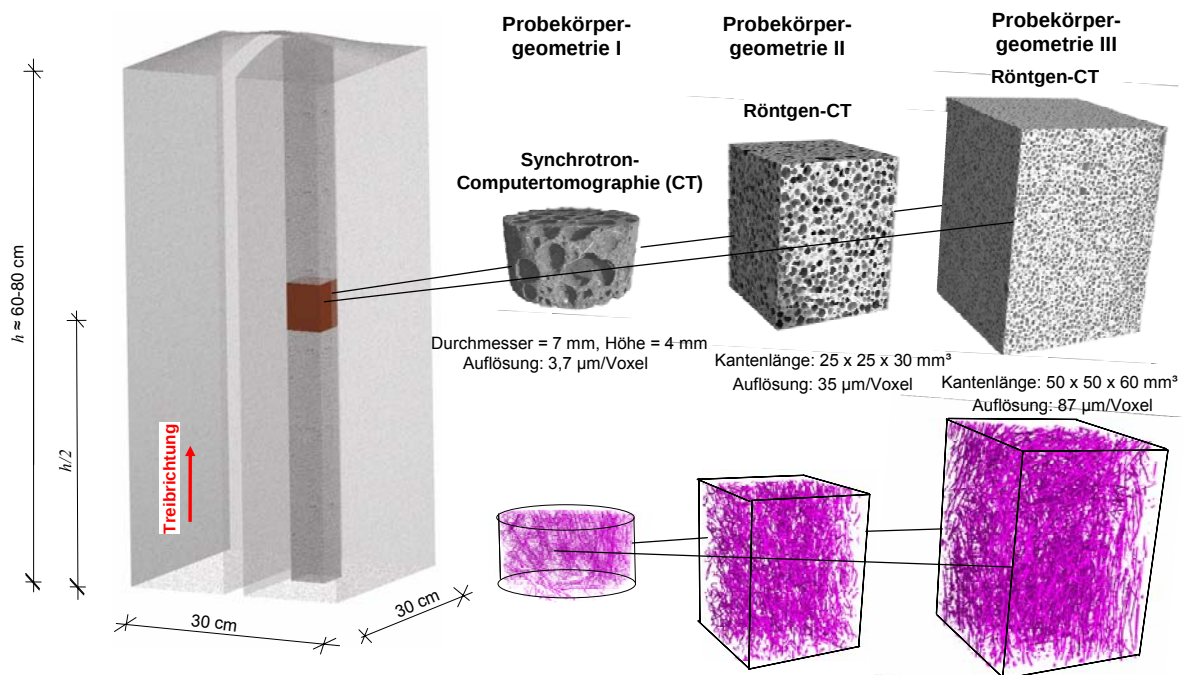


Abb. 5-4 Analyse der Kurzfaserstruktur des kurzfaserverstärkten Porenbetons, **links**: Anordnung des Probekörpers im Treibkörper, **oben rechts**: Tomographische Darstellung des Probekörpers bei Betrachtung der gesamten Gefügestruktur (Probekörpergeometrie ergibt sich aus Material und Form der Kurzfasern, 3 Probekörpergeometrien sind erforderlich), **unten rechts**: Tomographische Darstellung des Probekörpers bei Betrachtung der extrahierten Kurzfaserstruktur

Die Probekörper werden in mittlerer Treibkörperhöhe aus einer zentral angeordneten Säule herausgeschnitten (s. **Abb. 5-4**). Um bei der computertomographischen Fasererfassung die notwendige Auflösung zu erzielen, werden die Probekörpergeometrien (I, II, III) verwendet.

Die Röntgen-CT wird für die Detektion von Kurzfasern bei Faserdurchmessern $d_f > 30 \mu\text{m}$ genutzt. Die Untersuchung wird an einer 225-kV-Mikrofokus-Röntgenröhre der Firma Feinfocus durchgeführt. Sie ist mit einem Reflektionstarget und einer minimalen Brennfleckgröße

⁴ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Berlin, Fachgruppe VIII.3: Radiologische Verfahren; Computertomographie, Unter den Eichen 87, 12205 Berlin.

⁵ BESSY, Berliner Elektronenspeicherring - Gesellschaft für Synchrotronstrahlung mbH, Albert-Einstein-Straße 15, 12489 Berlin.

von ca. 8 μm bei 8 W sowie einem Flachdetektor mit einem strukturierten CsI-Szintillator (2048 x 2048 Pixel) ausgestattet. Zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses werden jeweils 2 x 2 Detektorpixel zusammengefasst. Die Untersuchungen werden bei einer Röhrenspannung von 60 kV und 130 μA durchgeführt. Ein Kupfervorfilter (Dicke $d = 0,25$ mm) wird vorgeschaltet. Es werden 900 Winkel auf 360° umlaufend aufgenommen. Die Integrationszeit für jedes Einzelbild beträgt 2 s. Die spezifische Auflösung ergibt sich aus der zu detektierenden Faserform. Sie beträgt 35 - bzw. 87 $\mu\text{m}/\text{Voxel}$, (Probekörpergeometrie II und III), wobei mindestens drei Voxel den Faserdurchmesser beschreiben. Die Probekörpergeometrie ergibt sich unter der Zielsetzung der Erfassung eines maximalen Gesichtsfelds.

Die Synchrotron-CT wird, aufgrund hoher räumlicher Auflösung und guter Objektselektierung (monochromatische Strahlung), für die Fasererfassung bei $d_f < 30$ μm bzw. zur Differenzierung bei ähnlichen Absorptionskoeffizienten genutzt. Dabei werden die Probekörper bei einer Strahlung von 20 kV und 130 μA ohne Vorfilter auf einen Szintillator projiziert und über eine Optik mit einer CCD-Camera (2048 x 2048 Pixel) abgebildet. 900 Winkel werden auf 180° halb umlaufend aufgenommen. Die Integrationszeit für das Einzelbild beträgt 10 s bei 3,7 $\mu\text{m}/\text{Voxel}$ Auflösung. Diese Auflösung und die Messstrahldimension (Höhe $h < 5$ mm) führen zu Einschränkungen im Erfassungsfeld und damit in der maximalen Probekörpergeometrie. Die Synchrotron-CT stand im Rahmen dieser Arbeit als Erfassungsmöglichkeit zu Verfügung.

Alle Probekörpergeometrien weisen eine repräsentative Anzahl von Kurzfasern auf. Die Probekörper der Synchrotronerfassung enthalten mehr als 500 Kurzfasern, die Probekörper der Röntgenerfassung mehr als 1000 Kurzfasern.

Vorbetrachtungen - Digitale Bildanalyse

Die Kurzfaserstrukturanalyse wird über eine digitale Bildanalyse der 3D-CT-Datensätze durchgeführt. Ein Softwaretool, das in Zusammenarbeit mit der BAM Berlin entwickelt wurde, wird eingesetzt. In diesem Tool wurden Rechenalgorithmen implementiert, die die charakteristischen Kennwerte der Kurzfaserstruktur (s. Kap. 3.3) über die Lagebestimmung aus den Endpunktkoordinaten der Kurzfasern nach einem „Labelling“ aus dem CT-Datensatz ermitteln. Die Kurzfasern müssen im Datensatz voneinander separierbar sein.

Ergänzend wurde ein Rechenalgorithmus eingebaut, der $\eta_{f,3D}$ über eine Parallelprojektion-Methode ermittelt. Dieses Verfahren wurde im Rahmen der hier bearbeiteten Problemstellung entwickelt [93], [94] und wird kontrollierend eingesetzt. Das Verfahren erlaubt es, auf eine Segmentierung der Kurzfasern zu verzichten. Die Faserorientierung ($\eta_{f,3D}$) von faserverstärkten Probekörpern mit hoher Faserkonzentration (ψ_f), bei denen Berührungspunkte zwischen den Einzelfasern auftreten, kann so analysiert werden. In den Bereichen kurzfaserverstärkter Porenbeton mit hohem ψ_f sowie kurzfaserverstärkten Kunststoffen (ψ_f bis 60 Vol.-%) ergeben sich erweiterte Analysemöglichkeiten. Längs- und Querschnittsform der Kurzfasern schränken die Analyse nicht ein. Die quantitative Bestimmung von $\chi_{f,3D}$ und $\eta_{f,3D}$ ist ausschließlich durch Vergleich möglich; Einzelfaserkennwerte können nicht bestimmt werden.

Lagebestimmung aus den Endpunktkoordinaten der Kurzfasern nach einem „Labelling“

Das notwendige „Labelling“ (16 bit) wird über die kommerzielle Software MAVI V1.2.1 [S2] durchgeführt. Die Kurzfasern werden bei farblicher Differenzierung eindeutig als Einzelobjekte ausgewiesen (s. **Abb. 5-5, a**). Zur Reduzierung der Fehlerquellen werden (Kurzfaser)-Objekte mit einer Faserlänge $l_f < 20$ Voxel sowie zusammenhängende segmentierte Bereiche < 50 Voxel aus der weiteren Analyse ausgeschlossen.

Die Kurzfasern werden als lange, frei im Raum orientierte Zylinder angenommen, aus deren Endpunktkoordinaten sich die Faserorientierung berechnen lässt. Die Bestimmung der Endpunktkoordinaten erfolgt über Nutzung der Faserhauptachse. Diese wird definiert als die Strecke mit der maximalen Ausdehnung zweier Faserpunkte. Dazu werden von jedem (Kurz-

faser)-Objekt die minimalen und maximalen x -, y - und z -Koordinaten sowie die restlichen, zu den Extrema gehörigen Koordinaten bestimmt. Es wird jenes Paar von Extrema gewählt, dessen Differenz den größten Absolutwert liefert (s. Abb. 5-5, **b**). Deren Koordinaten unterscheiden sich am geringsten von den Endpunktkoordinaten der Zylinderachse. Es kommt so zu den kleinsten Fehlern, wenn die Kurzfaser von einer idealen Zylinderform abweicht [93]. Die Koordinaten werden als Faserendpunkte angesehen. Aus den Endpunktkoordinaten werden über geometrische Betrachtungen die gesamtheitlichen Kurzfaserkennwerte $\chi_{f,3D}$ und $\eta_{f,3D}$ sowie die form- und ortsbezogenen Kennwerte (l_f , d_f , Faserschwerpunkt ($S_{x,y,z}$)) bestimmt. Die Faserorientierung ($\eta_{f,3D}$) wird über stereographische Projektionen bei Beschreibung von Azimuth- (φ_f) und Polarwinkel (θ_f) angegeben (s. Kap. 3.3). $\chi_{f,3D}$ wird direkt über die gelabelte Anzahl von Kurzfasern ermittelt.

Orientierungsbestimmung mittels Parallelprojektion

Das Prinzip der Orientierungsbestimmung mittels Parallelprojektion beruht darauf, dass jede Kurzfaser bei der Projektion in einer Schnittebene eine Fläche abschattet. Die Fläche hängt von dem Winkel zwischen Projektionsrichtung und Faserrichtung ab und wird minimal, wenn die Kurzfaser parallel zur Projektionsrichtung liegt (s. Abb. 5-5, **c**).

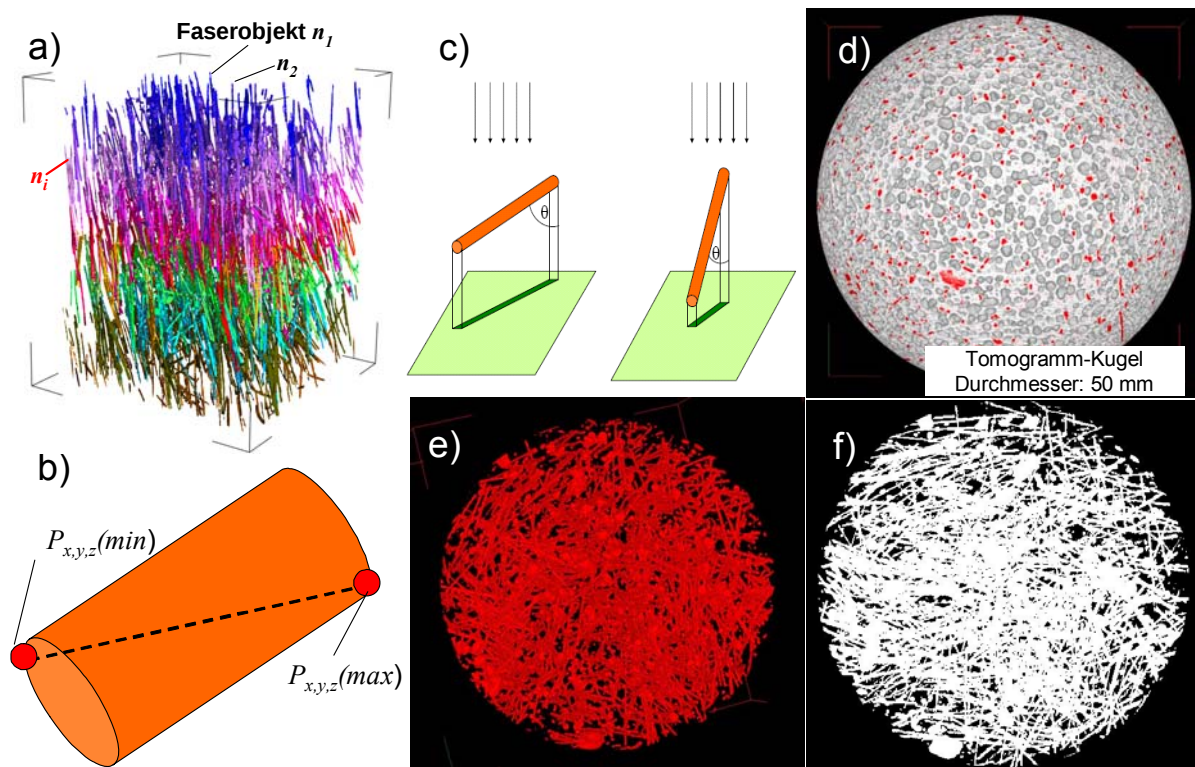


Abb. 5-5 3D-Bildanalyseverfahren zur Bestimmung der Kurzfaserstruktur, **a**) Visualisierter gelabelter computertomographischer Datensatz, **b**) Maximaldistanz zwischen den Faserendpunkten (gestrichelte Linie), **c**) Winkelabhängigkeit der Faserabschattung bei der Projektion auf die Ebene, **d**) Probekörper (dreidimensional (3D)) für die Parallelprojektion-Methode; außerhalb einer Kugel werden die Werte auf Null gesetzt, Kurzfasern (Grauwert > 80 (8 bit)) sind rot markiert, **e**) Binärbild einer gedrehten Kurzfaserprojektionsebene (3D), **f**) Parallelprojektion der Kurzfasern in die Ebene (2D), binarisiert

Die abgeschattete Fläche ist proportional zum Sinus des Faserneigungswinkels (θ). Gleiches gilt auch für ein Ensemble von Kurzfasern. Diese Abhängigkeit kann genutzt werden um $\eta_{f,3D}$ zu messen. Das Minimum der abgeschatteten Fläche entspricht der Vorzugsorientierung der Kurzfasern. Zur Bestimmung der Faservorzugsorientierung wird der CT-Datensatz bei feststehender Projektionsrichtung um die zwei Raumwinkel Azimuth- (φ) und Polarwinkel (θ) gedreht. Da der CT-Datensatz in einem quadratischen Raster vorliegt, bildet er einen Quader. Um eine Variation der Projektionsfläche beim Drehen zu vermeiden, werden zu-

nächst alle Voxel außerhalb einer größtmöglichen Kugel auf den Wert Null gesetzt (s. Abb. 5-5, **d**). Mittels einer Schwellwertoperation werden die Kurzfasern extrahiert (s. Abb. 5-5, **e**) und ein Binärbild generiert. Die Werte dieses Binärbilds werden entlang der Projektionsrichtung aufsummiert (s. Abb. 5-5, **f**). In dem resultierenden Projektionsbild bedeutet ein Grauwert von Null (schwarz), dass jene Pixel von keiner Kurzfaser abgeschattet werden. Somit ist die bevorzugte Faserrichtung jene, in der die meisten Pixel im Projektionsbild mit dem Wert Null gefunden werden. Die normierte Anzahl der Pixel mit dem Wert Null wird für eine Vielzahl von Azimut- (φ) und Polarwinkel (θ) durch abschnittsweise Drehung des Datensatzes bestimmt. Es ergibt sich eine Matrix, aus der $\eta_{f,3D}$ über Darstellung von φ_f und θ_f aufgezeigt werden kann. Die Darstellung kann wieder in einer stereographischen Projektion erfolgen.

Ergebnisse und Diskussion

Die Faserorientierungen ($\eta_{f,3D}$) zeigen bei vielen Fasereinbauten deutliche Vorzugsausrichtungen, tendenziell parallel zur Treibrichtung (Polarwinkel $\theta_f \rightarrow 0$). Diese erklären sich über die nach oben gerichtete Treibbewegung im Treibprozess. Die Faserorientierungen im Azimutwinkel (φ_f) können deutliche Inhomogenitäten aufweisen. Eine homogene Verteilung in φ_f liegt i. d. R. nicht vor. Die Mechanismen der Faserausrichtung werden in Kap. 6.3.2 untersucht. Folgende Faktoren könnten $\eta_{f,3D}$ im kurzfaserverstärkten Porenbeton beeinflussen:

- Fasermaterial, -form (u. a. Faserlänge (l_f), Faserdurchmesser (d_f)) und -konzentration (ψ_f),
- Faserverteilung ($\chi_{f,3D}$) und -orientierung ($\eta_{f,3D}$) in der Anfangssuspension,
- Porosierungsparameter (s. Kap. 2.3.1.1).

Eine Reihe von Kurzfasern scheiden, aufgrund von Erfassungsschwierigkeiten, für die Analyse aus (s. Kap. 3.6). Fasereinbauten, die deutliche Gefügestrukturinhomogenitäten hervorrufen bzw. Faserigel entstehen lassen, werden ebenfalls aus der Analyse ausgeschlossen. Durch hohe Faser-Faser-Wechselwirkungen ist hier eine unabhängige Bewertung nicht möglich. In **Abb. 5-6** wird eine Auswahl an Ergebnissen dargestellt. Dabei wird $\eta_{f,3D}$ in den stereographischen Projektionen ausschließlich über die Endpunkt-Methode angegeben.

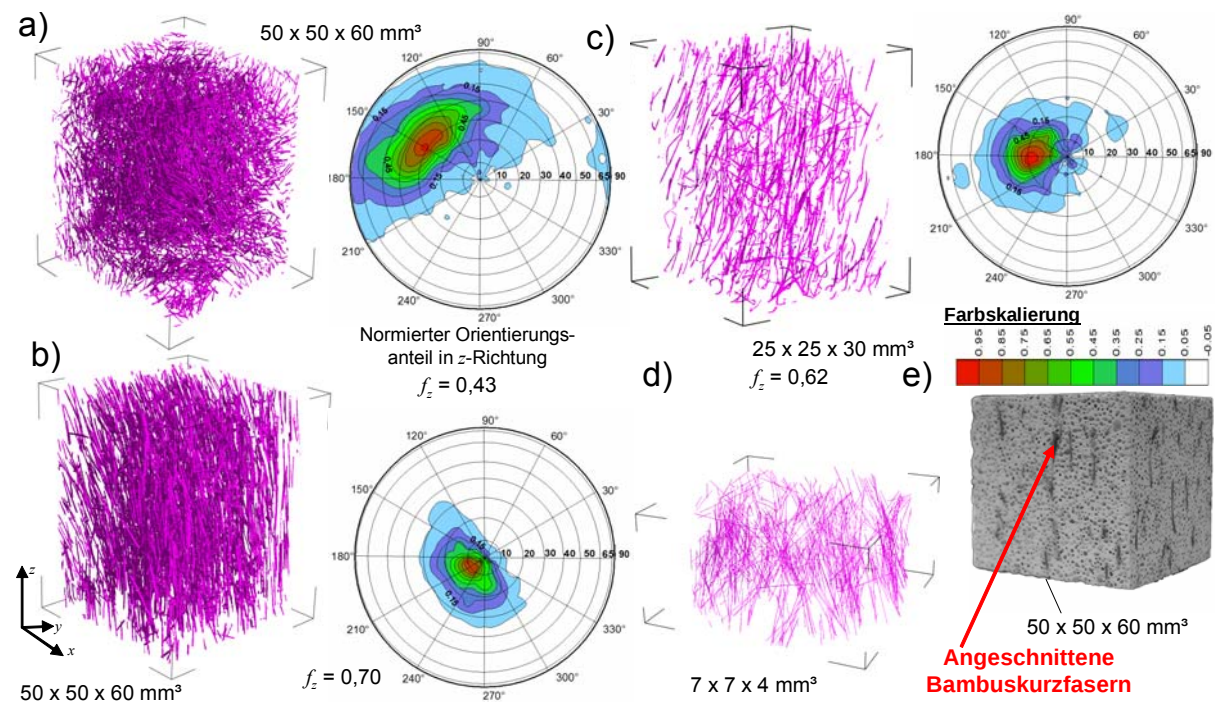


Abb. 5-6 Beispiele für Faserorientierungen ($\eta_{f,3D}$). **a**) Einbau der alkaliresistenten (AR) Bündelkurzglasfasern (BGF) Saint Gobain (SG) Cem-FIL ARC20 62/2 (1-27), **b**) Einbau der BGF SG Cem-FIL ARC20 62/2 (1-28), **c**) Einbau der Edelstahlkurzfasern (Tiegelschmelzverfahren) (1-16), **d**) Einbau der wasserdispensiblen monofilamenten AR-Kurzglasfasern (MGF) SG Cem-FIL ARC20 70/30 (1-24), **e**) Kompletter Probekörper bei Einbau der Bambuskurzfasern (1-1)

Abb. 5-6, **a)** zeigt ein Tomogramm (Röntgen-CT) mit extrahierter Kurzfaserstruktur bei Einbau der alkaliresistenten (AR) Bündelkurzglasfasern (BGF) Saint Gobain (SG) Cem-FIL ARC20 62/2 (1-27), ($\psi_f = 1,0$ Vol.-% mit $l_f = 6$ mm). Das Maximum der Orientierung, dargestellt in nebenstehender stereographischer Projektion, ist im Polarwinkel $\theta_f = 35^\circ$ und im Azimutwinkel $\varphi_f = 145^\circ$ (s. Kap. 3.3). Der normierte Orientierungsanteil in z -Richtung (f_z) wird über die Endpunkt-Methode zu $f_z = 0,43$ ermittelt; die Faserorientierung parallel zur Treibrichtung ist deutlich eingeschränkt. Gegensätzlich dazu sind bei Einbau der BGF mit $l_f = 12$ mm (1-28) deutlich gesteigerte Ausrichtungen in z -Richtung sichtbar (Maxima in $\theta_f = 10^\circ$, Maxima in $\varphi_f = 220^\circ$, $f_z = 0,70$) (s. Abb. 5-6, **b)**). Die Kurzfasern stehen nahezu senkrecht im Treibkörper. In θ_f entstehen vernachlässigbare Inhomogenitäten in der Winkelverteilung.

Abb. 5-6, **c)** zeigt das Tomogramm mit extrahierter Kurzfaserstruktur bei Einbau der Edelstahlkurzfasern (1-16). Die Kurzfasern sind ebenfalls vorzugsweise parallel zur Treibrichtung ausgerichtet (Maxima in $\theta_f = 20^\circ$) ausgerichtet. In φ_f sind wieder leichte Inhomogenitäten zu erkennen. Abb. 5-6, **d)** stellt das extrahierte Fasergefüge im Tomogramm bei Einbau der MGF (1-24), ermittelt über die Synchrotron-CT, dar. Es wird auch hier eine deutliche Vorzugsausrichtung der Kurzfasern parallel zur Treibrichtung festgestellt. Die Orientierungsverteilung von θ_f ist bei der Faserform $d_f < 20 \mu\text{m}$, $l_f < 6$ mm, aufgrund des stärkeren Einflusses der Faserumorientierung bei der späten Makroporenvergrößerung, wesentlich breiter. φ_f zeigt reduzierte Inhomogenitäten. Potenzielle Vorzugsorientierungen der Kurzfasern aus der Anfangssuspension werden stärker aufgehoben. Ergänzend wird in Abb. 5-6, **e)** eine lichtbildliche Darstellung eines Probekörpers bei Einbau von Bambuskurzfasern (1-1) gezeigt. Diese heben sich farblich deutlich von der Feststoffphase ab und lassen sich so qualitativ gut in ihrer Orientierung an Schnittflächen beurteilen. Auch hier ist eine Faservorzugsorientierung festzustellen.

Die Vorzugsorientierung der Kurzfasern in der Anfangssuspension wirkt sich stark auf die Beschaffenheit des Endprodukts kurzfaserverstärkter Porenbeton aus (s. Kap. 5.1). Diese Vorzugsorientierung wird auf das getriebene System übertragen; nur so lassen sich die starken Inhomogenitäten in den Orientierungsverteilungen erklären. Die Richtung, aus der der Abguss erfolgte, die auch die potenzielle Anfangsorientierung der Kurzfasern determiniert, konnte im Nachgang nicht mehr festgestellt werden.

Die stereographischen Projektionen aus der Parallelprojektions-Methode zeigen ähnliche Faserorientierungsverteilungen. **Abb. 5-7** zeigt vergleichend die stereographischen Projektionen der drei Beispiele (1-27) = a), (1-28) = b), (1-16) = c) aus Abb. 5-6.

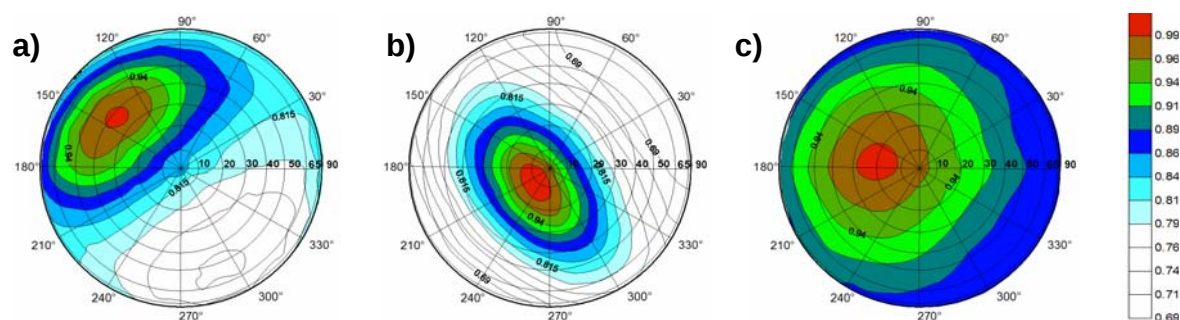


Abb. 5-7 Stereographische Projektionen der Faserorientierungsverteilungen, ermittelt über die Parallelprojektion, **a)** Einbau der alkaliresistenten (AR) Bündelkurzglasfasern (BGF) Saint Gobain (SG) Cem-FIL ARC20 62/2 (1-27), (s. Abb. 5-6, a)) **b)** Einbau der BGF SG Cem-FIL ARC20 60/2 (1-28), (s. Abb. 5-6, b)), **c)** Einbau der Edelstahlkurzfasern (Tiegelschmelzverfahren) (1-16), (s. Abb. 5-6, c))

Das hier erstmals eingesetzte Parallelprojektions-Verfahren kann somit als geeignet angesehen werden, die Faserorientierung ($\eta_{f,3D}$) des kurzfaserverstärkten Porenbetons zu bestimmen. Die Kurzfaserstrukturanalyse von kritischen Faserkonzentrationen ($\psi_{f,krit}$) ist möglich.

Inhomogenitäten in $\chi_{f,3D}$ und $\eta_{f,3D}$ sind, aufgrund der geringen Abmessung der Probekörper, schwierig zu erfassen. Es wird stichpunktartig bei Einbau von sinkanfälligen Kurzfasern $\chi_{f,3D}$

und $\eta_{f,3D}$ in Abhängigkeit von der Höhe im Treibkörper untersucht (s. Kap. 4.3.4.1). Dazu werden Probekörper ($25 \times 25 \times 30 \text{ mm}^3$) mittig aus dem oberen und unteren Höhendrittel des Treibkörpers röntgen-computertomographisch erfasst und bildanalytisch ausgewertet.

Abb. 5-8 zeigt die Ergebnisse bei Einbau der Edelstahlfasern Stax, M30 (1-15) (Faserfeststoffdichte, $\rho_f = 7,71 \text{ g/cm}^3$). Diese Kurzfasern werden idealisiert als näherungsweise stabförmig angenommen (s. Abb. 5-1, b); $\eta_{f,3D}$ wird über die Endpunkt-Methode analysiert.

Es zeigen sich keine Unterschiede in $\chi_{f,3D}$ und $\eta_{f,3D}$. $\chi_{f,3D}$ wird über die mittlere Faseranzahl (n_f) gemessen. Das Maximum von θ_f ist nahezu parallel zur Treibrichtung. Es ergeben sich keine Inhomogenitäten in φ_f .

Aus den Ergebnissen wird geschlossen, dass $\chi_{f,3D}$ und $\eta_{f,3D}$ im Wesentlichen unabhängig von der Höhe im Treibkörper sind. Die Sedimentation (Fasersinkverhalten) besitzt bei keiner der eingebauten Kurzfasern einen Einfluss. Weitere Untersuchungen werden in Kap. 7.2.1 durchgeführt. Die Faserlängen aller Kurzfasern bei Einbau bleiben konstant; im Herstellungsprozess tritt somit kein Faserbruch auf (s. Kap. 5.1).

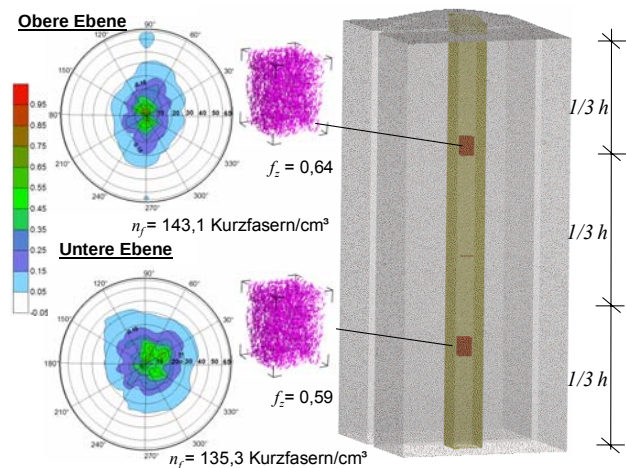


Abb. 5-8 Vergleichsanalyse zur Faserverteilung ($\chi_{f,3D}$) bzw. -orientierung, ($\eta_{f,3D}$) über die Höhe im Treibkörper bei Einbau der Edelstahlfasern

Die Kurzfasern sind vorzugsweise eingebettet im Feststoffmaterial des Porenbetons. Wenn die Kurzfasern in die Makroporen „ragen“, dann ausschließlich porenwandnah (s. **Abb. 5-9**).

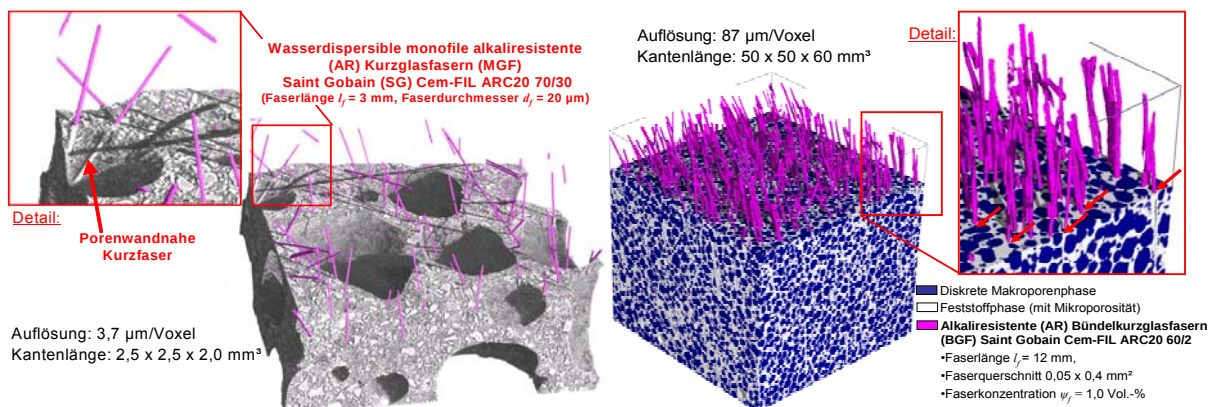


Abb. 5-9 Beschreibung der Lage der Kurzfasern bei Extrahierung der Kurzfasern im oberen Teilbereich, **links**: Synchrotron-Computertomographie (Synchrotron-CT) bei Einbau der dispersiblen monofilen alkaliresistenten (AR) Kurzglasfasern (MGF) Saint Gobain (SG) Cem-FIL ARC20 70/30 (1-24), **rechts**: Röntgen-CT bei Einbau der AR-Bündelkurzglasfasern (BGF) SG Cem-FIL ARC20 62/2 (1-28)

Abb. 5-9, links zeigt einen Ausschnitt eines über die Synchrotronstrahlung erfassten Tomogramms bei Extrahierung der MGF SG Cem-FIL ARC20 70/30 im oberen Bereich des Datensatzes (1-24). Die Einbettung der Kurzfasern in das Feststoffmaterial ist deutlich sichtbar, genauso wie die Vorzugsorientierung parallel zur Treibrichtung. Abb. 5-9, **rechts** zeigt ein über die Röntgenstrahlung erfasstes Tomogramm bei Extrahierung der BGF SG Cem-FIL ARC20 62/2 im oberen Bereich des Probekörpers (1-27). Die Makroporenphase (blau) und die Feststoffphase (weiß) sind binarisiert dargestellt. Es wird auch hier beobachtet, dass die Kurzfasern vorzugsweise im Feststoffmaterial liegen. Verantwortlich dafür sind im Wesentlichen die oberflächenphysikalischen Bindungskräfte der Kurzfasern (Faserhydrophilie) (s. Kap. 3.5.4). Lediglich bei Einbau der Kohlenstoffkurzfasern ((1-17)-(1-18)) liegen vermehrt Anteile der Kurzfasern, aufgrund der Faserhydrophobizität, im Wandbereich der Makroporen offen. Die Kurzfasern zeigen keine Biegeverformungen.

Sterische Faser-Faser-Wechselwirkungen (z. B. Anfangssuspension) schränken die Faserausrichtung ein. Es zeigen sich, aufgrund des hohen Wasseranspruchs der Fasern sowie der Wechselwirkungen zwischen Kurzfasern und Treibmedium, starke Inhomogenitäten in der umliegenden Makroporosität. Anfällig für dieses Phänomen sind u. a. die Basaltkurzfasern ((1-13)-(1-14)), Aluminium-modifizierten Kurzglasfasern BelCoTex ((1-21)-(1-22)) und Zellulosekurzfasern (1-5). Quantitative Analysen sind nur eingeschränkt sinnvoll. **Abb. 7-10** zeigt einen Basaltkurzfaserigel; die Makroporen in den umliegenden Bereichen sind nur schwach ausgebildet.



Abb. 5-10 Inhomogenitäten in der umliegenden Makroporosität im Nahbereich eines Faserigels (Einbau von Basaltkurzfaser (1-13))

Die Phänomene der Fasertranslation und -rotation lassen sich zu diesem Zeitpunkt nicht für alle Kurzfasereinbauten umfassend beschreiben (Vgl. Kap. 6 und Kap. 7).

5.2.2 Feststoffstruktur

Die Feststoffstruktur wird über die Rohdichte sowie qualitativ über Schnittebenen beurteilt.

Ergebnisse und Diskussion

Abb. 5-11 zeigt die gemittelte Rohdichte (ρ_{pb}) über die Höhe. Es werden die Probekörper aus der Untersuchung zur einachsigen Druckbeanspruchung genutzt (s. Kap. 5.3.1) und bei 65°C bis zur Ausgleichsfeuchte bei Massekonstanz getrocknet. Die Prüfung wird nach [N 17] durchgeführt. **Abb. 5-12 a)-l)** zeigt eine Auswahl charakteristischer Gefügestrukturen bei Einbau der Kurzfaservariationen. Die dargestellten Schnittflächen der Probekörper werden mittig aus der Treibkörpersäule nach Abb. 5-4, links entnommen.

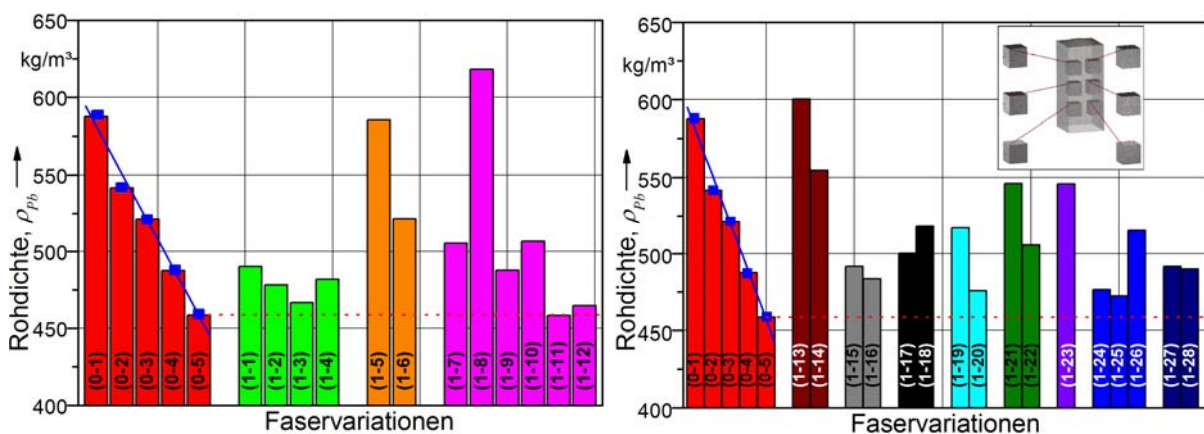


Abb. 5-11 Einfluss des Fasereinsatzes auf die mittlere Rohdichte (ρ_{pb}) im Treibkörper, **links:** ρ_{pb} der unverstärkten Referenz ((0-1)-(0-5)), vergleichend zu den Einbauvariationen: Pflanzenkurzfasern ((1-1)-(1-4)) sowie Kurzfasern aus natürlichen ((1-5)-(1-6)) und künstlichen Polymeren ((1-7)-(1-12)), **rechts:** ρ_{pb} der Referenz, vergleichend zu den Einbauvariationen anorganische Chemiefasern ((1-13)-(1-28))

Die Rohdichten (ρ_{pb}) der Treibkörper des unverstärkten Porenbetons ((0-1)-(0-5)) verhalten sich linear von 450-580 kg/m³ (s. Abb. 5-11, **links**). Dieses Verhalten ist auf eine Verschiebung hin zu kleineren Porengrößen zurückzuführen. Abb. 5-12, **a)** und **b)** stellt die Schnittebenen (0-5) und (0-1) dar. Das mittlere ρ_{pb} bei Kurzfasereinbau variiert faserspezifisch deutlich. Bei allen Einbauvariationen ergibt sich ein gleich bleibendes bzw. höheres mittleres ρ_{pb} im Vergleich zur Referenz bei gleichem Porosierungsmittelgehalt (0-5). Abb. 5-11, **links** zeigt ρ_{pb} bei Einbau der Pflanzenkurzfasern sowie bei Einbau der Kurzfasern aus natürlichen und künstlichen Polymeren. Abb. 5-11, **rechts** zeigt den Einfluss auf ρ_{pb} bei Einbau der anorganischen Chemiefasern. Der Einfluss der Pflanzenkurzfasern ((1-1)-(1-4)) auf ρ_{pb} ist, auf-

grund des erhöhten mittleren Faserabstands (s_f), vernachlässigbar. Abb. 5-12, **c**) stellt die Schnittebene bei Bambuskurzfasereinbau (1-1) dar. Es werden keine einschränkende Gefügestrukturen festgestellt. Lediglich im Nahbereich der Kurzfasern ist vermehrt gebundenes Feststoffmaterial zu finden; die Makroporen verschieben sich, aufgrund der hydrophilen und hygroskopischen Wirkung bei hohem Einzelfaservolumen, hin zu kleineren Radien.

Bei Einbau der Kurzfaservariationen aus natürlichen Polymeren ((1-5)-(1-6)) zeigt sich ein deutlicher Anstieg in ρ_{pb} . Die Makroporosität ist inhomogen. Der Einbau der Zellulosekurzfasern (1-5) bewirkt wellenförmige „Gefügeschlieren“, in denen keine Porosierung stattfindet (s. Abb. 5-12, **d**)). Im Vergleich zur Referenzprobe (0-5) nimmt die Größe der Makroporen bei Verwendung von Baumwollfäden (1-6) zu (s. Abb. 5-12, **e**)). Der Anteil kleinerer Makroporen nimmt deutlich ab, die Steganteile nehmen zu. Der Einbau der Kurzfasern aus synthetischen Polymeren ((1-7)-(1-12)) zeigt, bis auf die Aramidkurzfasern, keinen wesentlichen Einfluss auf ρ_{pb} . Die Gefügestrukturen sind homogen. Bei Einbau der Kunstseidekurzfasern verändert sich die Gefügestruktur. Hier ist der mittlere Makroporenradius deutlich kleiner (s. Abb. 5-12, **g**)). Der Einbau der Aramidkurzfasern zeigt einen bedeutenden Anstieg in ρ_{pb} und deutliche Gefügestrukturinhomogenitäten (s. Abb. 5-12, **f**)).

Durch den Einbau der anorganischen Chemiekurzfasern ((1-13)-(1-28)) entstehen Treibkörper mit stark unterschiedlichen Rohdichten (s. Abb. 5-11, **rechts**). Durch die Faserigel der Basaltkurzfasern ((1-13)-(1-14)) bilden sich deutliche Feststoffcluster aus (Abb. 5-10). Diese sind in der Schnittebene in Abb. 5-12, **h**) erkennbar. Gleiche Einschränkungen gelten für den Einbau der Aluminium-modifizierten Kurzglasfasern ((1-21)-(1-22)) (Abb. 5-12 **i**)). Festzustellen ist, dass die Inhomogenitäten bei Zunahme von l_f abnehmen. Bei Einbau der Kohlenstoffkurzfasern (s. Abb. 5-12 **j**)) zeigen sich homogene Makroporenanordnung. Die Poren bilden z. T. parallel zur Treibrichtung Rotationsellipsen aus; leichte „Porenschlieren“ sind erkennbar. Abb. 5-12, **k**) zeigt das Ergebnis bei Einbau der wasserdispersiblen monofilen alkaliresistenten (AR) Kurzglasfasern, Abb. 5-12, **l**) bei Einbau der AR-Bündelkurzglasfasern.

Inhomogenitäten in der Gefügestruktur haben hohe Rohdichten zur Folge. Es lässt sich verallgemeinern, dass Treibkörper bei $\rho_{pb} > 530 \text{ kg/m}^3$ ausgeprägte qualitätsmindernde Inhomogenitäten aufweisen. ρ_{pb} nimmt über die Höhe im Treibkörper ab.

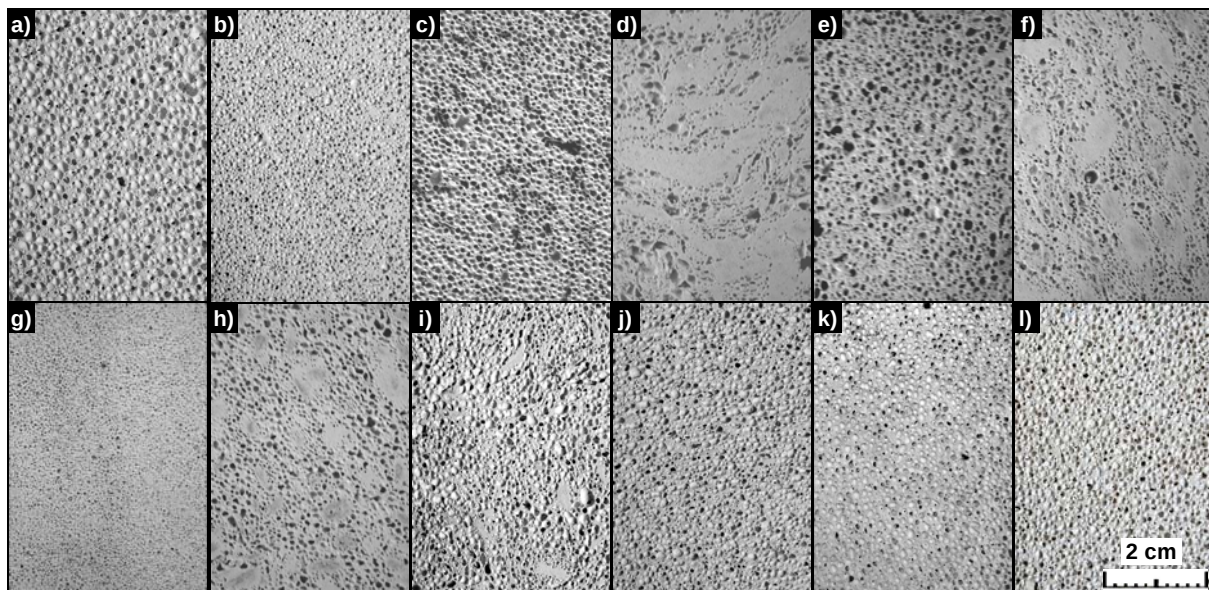


Abb. 5-12 Beispiele für Gefügestrukturen bei Einbau folgender Kurzfasern, **a**) Keine Kurzfasern - Referenz (0-5), **b**) Keine Kurzfasern - Referenz (0-1), **c**) Bambuskurzfasern (1-1), **d**) Zellulosekurzfasern (1-5), **e**) Baumwollfäden (1-6), **f**) Aramidkurzfasern (1-8), **g**) Kunstseidekurzfasern (1-10), **h**) Basaltkurzfasern (1-1), **i**) Aluminium-modifizierte Kurzglasfasern (1-21), **j**) Kohlenstoffkurzfasern (1-11), **k**) Wasserdispersible monofile alkaliresistente (AR) Kurzglasfasern, Saint Gobain (SG) Cem-FIL ARC20 70/30 (1-24), **l**) AR-Bündelkurzglasfasern SG Cem-FIL ARC20 62/2 (1-27)

5.3 Festigkeits- und Verformungsverhalten

Das Festigkeits- und Verformungsverhalten bei Einbau der Kurzfasern nach Tab.-A.: 2 wird unter folgenden äußeren Beanspruchungen untersucht:

- Einachsige Druckbeanspruchung,
- Kombinierte Druck-Schubbeanspruchung,
- Dreipunkt-Biegebeanspruchung mit Kerbung.

Diese Beanspruchungen spiegeln eine Auswahl an wesentlichen Belastungsfällen unter Erdbebeneinwirkung wider. Die Untersuchungen werden richtungs- bzw. höhenabhängig an o. g. praxisrelevanten Treibkörpern durchgeführt, so dass die Zusammenhänge von faser-spezifischem Verhalten und Treibverhalten betrachtet werden können. Die Probekörper werden im Vorfeld bei 65°C bis zur Ausgleichsfeuchte bei Massekonstanz getrocknet.

Aufgrund der Vielzahl der Untersuchungsergebnisse ist es notwendig, Teile der Ergebnisse zusammenzufassen. Die Bandbreite der Verhaltensweisen wird dargestellt und charakteristische Phänomene werden diskutiert. Im Mittelpunkt der Betrachtungen stehen die Fasereinbauten mit gesteigertem Festigkeits- und Verformungsverhalten, die vergleichend mit der unverstärkten Referenz betrachtet werden. Zur Einordnung der Ergebnisse wird die Referenz in fünf Rohdichteklassen im Rohdichtebereich $\rho_{pb} = 450\text{--}550 \text{ kg/m}^3$ betrachtet (s. Kap. 5.1).

5.3.1 Einachsige Druckbeanspruchung

Versuchsbeschreibung und Randinformationen

Aus den Treibkörpern mit den Fasereinbauten nach Tab.-A.: 2 werden für die Untersuchung zur einachsigen Druckbeanspruchung sechs Probekörper ($100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$) entnommen (s. Abb. 5-2). In Anlehnung an die Norm [N 18] werden diese Probekörper aus den Drittelpunkten über die Treibhöhe, jeweils parallel und orthogonal zur Treibrichtung, geschnitten. Die Probekörper werden nass allseitig auf Planparallelität, Ebenheit und Maßgenauigkeit geschliffen. Die Belastungsgeschwindigkeit beträgt $100 \text{ } \mu\text{m/min}$ (Bruchkriterium: $< 60 \text{ s}$). Die Längsstauchung wird über den Traversenweg aufgenommen. Die Druckspannungs-Stauchungs-Linien und die charakteristischen Materialparameter Druckfestigkeit (β_D) und Entfestigungsenergie (G_D) werden bestimmt. G_D wird von der Bruchdehnung ($\varepsilon_{D,Br}$) bis zur Dehnung bei 45‰ ($\varepsilon_{D,45\text{‰}}$) ermittelt (s. Gl. [2-11]). Nachgelagerte Arbeitsanteile stehen bei einer Vielzahl von Probekörpern zum Lastabtrag nicht zur Verfügung; die Probekörper zerfallen.

Anmerkung

Die starren Druckplatten im Versuchsaufbau führen zu einer Querdehnungsbehinderung des Probekörpers. Räumliche Beanspruchungen in den Lastezugsbereichen entstehen. Es kommt zu einer Überlagerung von eindimensionalen und räumlichen Versagensphänomenen. Die isolierte Bewertung unter einachsiger Druckbeanspruchung, bei Betrachtung der richtungsabhängigen Faserwirkung, ist somit nur eingeschränkt möglich.

Ergebnisse und Diskussion

Die Druckfestigkeit (β_D) kann durch geeigneten Fasereinbau ausschließlich parallel zur Treibrichtung gesteigert werden. Der steile Abfall der Druckspannungs-Stauchungs-Linien nach Überschreiten von β_D reduziert sich nur marginal. Qualitative Unterschiede in den Linien zwischen den Beanspruchungsrichtungen parallel und orthogonal zur Treibrichtung sind nur eingeschränkt festzustellen. Die Versagensmechanismen durch Zerstörung der Stegwände bei inneren Porenverdichtungen und -quetschungen und die Entstehung von Trennrissen orthogonal zur Beanspruchungsrichtung überlagern sich (s. Kap. 2.4.2.2). Im untersuchten Stauchungsbereich bilden sich bei allen Fasereinbauten Plateaus in den Druckspannungs-Stauchungs-Linien bei nahezu idealplastischem Verlauf aus. Es zeigt sich ein Peak auf die-

sem Plateau in Abhängigkeit von der Faservariation und der Beanspruchungsrichtung.

Abb. 5-13 zeigt beispielhaft richtungsabhängig empirisch ermittelte Spannungs-Stauchungs-Linien unter einachsiger Druckbeanspruchung bei Einbau einer Auswahl von Kurzfasern. Die Linien bei Einbau von Bambus- (1-1), Kunstseide- (1-10), Edelstahl- (1-15) und Kohlenstoffkurzfasern (1-18) werden vergleichend zur Referenz (0-5) dargestellt. Beispielhaft werden die Ergebnisse der Probekörper aus der mittleren Ebene im Treibkörper (Belastung: parallel zur Treibrichtung, s. Abb. 5-13, **links**,)) und der unteren Ebene im Treibkörper (Belastung: orthogonal zur Treibrichtung, Abb. 5-13, **rechts**) dargestellt.

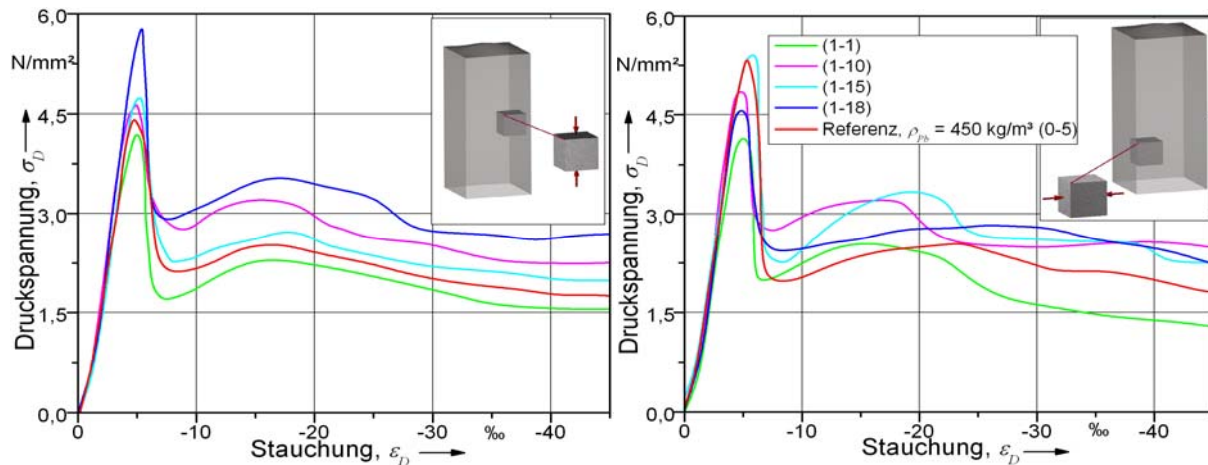


Abb. 5-13 Beispiele für charakteristische Verläufe der Spannungs-Stauchungs-Linien unter einachsiger Druckbeanspruchung bei Einbau der Bambus-, (1-1), Kunstseide- (1-10), Edelstahl- (1-15) und Kohlenstoffkurzfasern (1-18) im Vergleich zur Referenz (0-5), **links**: Probekörper, parallel zur Treibrichtung beansprucht, mittlere Ebene im Treibkörper, **rechts**: Probekörper, orthogonal zur Treibrichtung beansprucht, untere Ebene im Treibkörper

Die Druckspannungs-Stauchungs-Linien (s. Abb. 5-13) parallel und orthogonal zur Treibrichtung sind, aufgrund der Höhenabhängigkeit der Rohdichte im Treibkörper (s. Kap. 2.4.2.3.2), nicht direkt miteinander vergleichbar. Die über die Höhe im Treibkörper abnehmende Rohdichte entsteht durch reduzierte Feststoffanteile; diese stehen zum Lastabtrag nicht zur Verfügung. Die Kurzfasern sind daraus folgend weniger stark im Feststoff eingebunden.

- Parallel zur Treibrichtung ergeben sich aus den Druckspannungs-Stauchungs-Linien bei den hier aufgezeigten Fasereinbauten (s. **Abb. 5-13, links**), außer bei den Bambuskurzfasern, leichte Steigerung in β_D gegenüber der Referenz (0-5). Bambuskurzfasern stellen, aufgrund der in Kap. 4.3.2.1.1 genannten Gründe, deutliche Fehlstellen dar. Bei Einbau der Kohlenstoffkurzfasern wird β_D deutlich erhöht. Es sind keine Ausrundungen im Bereich von β_D vorhanden. Alle vier Fasereinbauten zeigen in der Erstentfestigung qualitativ ähnlich sprödes Verhalten wie die Referenz. Die Linien fallen nach Überschreiten von β_D steil ab. Es kommt zur Ausbildung eines faserspezifischen Plateaus auf einem Niveau zwischen der 0,7- und 0,4fachen Festigkeit. Die Plateaus sind bis $\varepsilon_{D,45\%}$ gleichmäßig. Ausschließlich bei Einbau der Bambuskurzfasern liegt das Plateau unterhalb der Referenz.
- Orthogonal zur Treibrichtung ergeben sich aus den Druckspannungs-Stauchungs-Linien bei den hier aufgezeigten Fasereinbauten (s. **Abb. 5-13, rechts**) leichte Reduzierungen in β_D . Lediglich bei Einbau der Edelstahlfasern zeigen sich vergleichbare Werte. Dieses Verhalten wird u. a. mit der homogenen Gefügestruktur (Vgl. Referenz (0-5)), der Verbundwirkung sowie der gekrümmten Form der Kurzfasern erklärt (s. Abb. 5-1, b)). Die Kurzfasern tragen, bezogen auf β_D , in beide Richtungen. Es wird bei allen Fasereinbauten eine leichte Ausrundung im Bereich von β_D festgestellt. Der steile Abfall der Linie nach Überschreiten von β_D wird durch die aufgezeigten Fasereinbauten auch orthogonal zur Treibrichtung ausschließlich marginal beeinflusst. Die Entfestigungsniveaus sind im Vergleich zur Referenz etwas höher. Ausnahme ist wieder das Verhalten bei Einbau der Bambuskurzfasern.

Bei Vergleich der Probekörper unter Beanspruchungen parallel und orthogonal zur Treibrichtung werden im Wesentlichen Unterschiede in den Unebenheiten und in der Höhe der Entfestigungsniveaus sowie in der Festigkeit sichtbar. Die Unebenheiten sind zum Teil orthogonal zur Treibrichtung deutlich höher; der Peak auf der Entfestigungslinie ist teilweise ausgeprägter. Dieses Verhalten wird auf die vernähende Wirkung einiger Kurzfasern parallel zur Treibrichtung zurückgeführt. Die Plateaus orthogonal zur Treibrichtung sind tendenziell höher.

Abb. 5-14 zeigt die mittleren Entfestigungsenergien (G_D) in Abhängigkeit zur Druckfestigkeit für alle eingebauten Faservariationen nach Tab.-A.: 2. Parallel (s. Abb. 5-14, **oben**) und orthogonal zur Treibrichtung (Abb. 5-14, **unten**) werden die Ergebnisse über die drei Probekörper im Treibkörper gemittelt. Die gemittelten Werte über die Höhe des Treibkörpers spiegeln das Verhalten der Probekörper in den aufgezeigten Linien aus Abb. 5-13 wider.

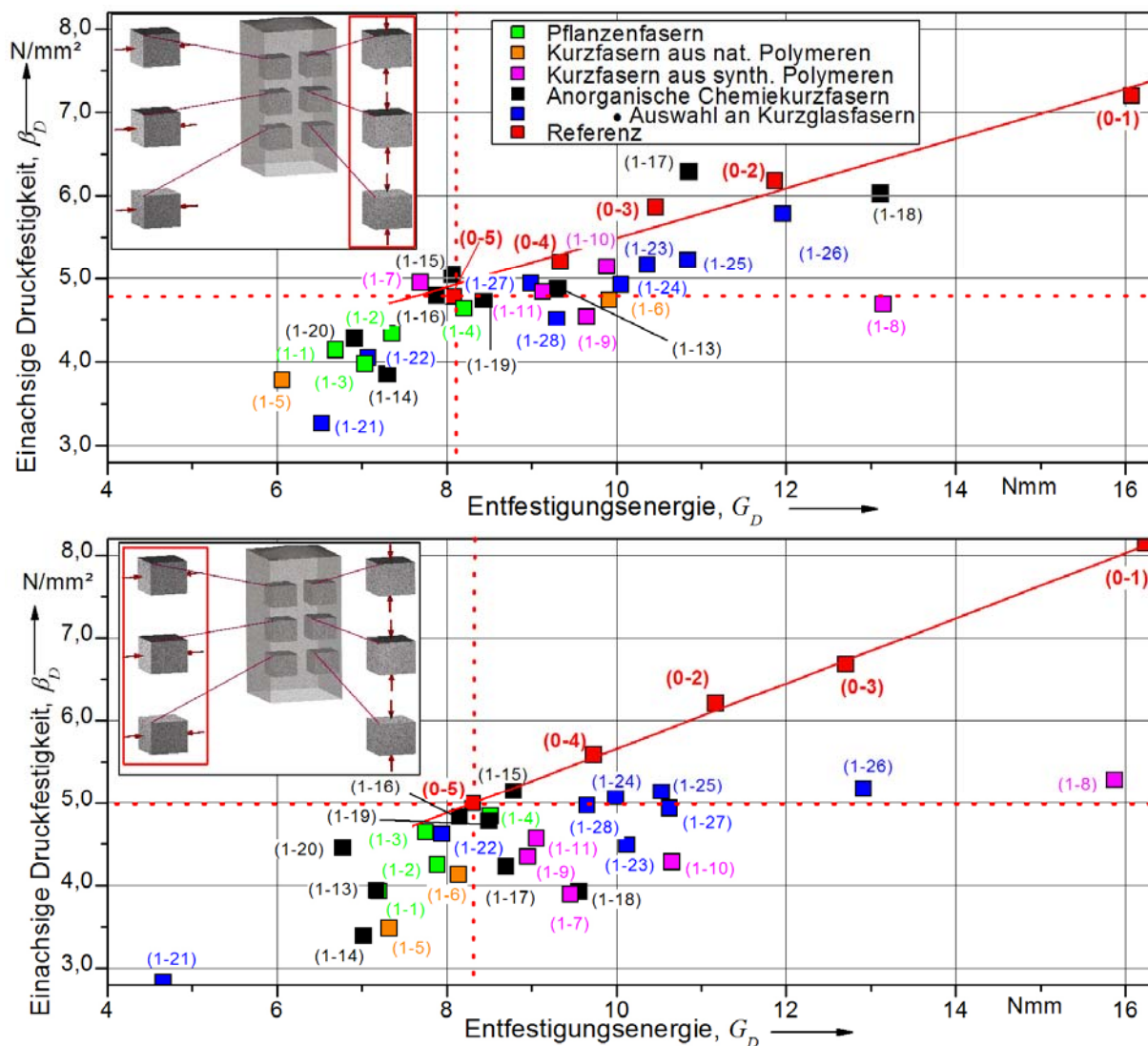


Abb. 5-14 Einfluss von Kurzfasern auf die Entfestigungsenergie in Abhängigkeit zur Festigkeit unter einachsiger Druckbeanspruchung (Einbau nach Tab.-A.: 2 - gemittelt über die Höhe), **oben**: Parallel zur Treibrichtung beanspruchte Probekörper, **unten**: Orthogonal zur Treibrichtung beanspruchte Probekörper

Die Referenzen ((0-1)-(0-5)) zeigen zwischen G_D und β_D lineare Abhängigkeit. Die Werte beider Größen sind bei Beanspruchung parallel gegenüber orthogonal zur Treibrichtung kleiner. Damit lassen sich die in Kap. 2.4.2.3 festgestellten Anisotropien bestätigen. Das anisotrope Verhalten in Abhängigkeit zur Rohdichte und Treibhöhe zeigt keine eindeutigen Tendenzen.

- β_D lässt sich parallel zur Treibrichtung bei Druckbeanspruchung durch den Einbau von Kurzfasern gegenüber der Referenz (0-5) steigern. Voraussetzung dafür sind gute mecha-

nische Fasereigenschaften, hohe Faserdichte im Feststoff und guter Faserverbund zum Grundmaterial. Geeignete Fasermaterialien in Verbindung mit einer geeigneten Faserform führen zu massiveren Stegen bzw. Stegwänden (s. Kap. 3.5.3). Es können Porenketten entstehen. Höhere Steganteile in Beanspruchungsrichtung verstärken die Tragwirkung. Inhomogenitäten in der Kurzfasern- und Feststoffstruktur führen zu einer Reduzierung von β_D .

- G_D lässt sich ebenfalls durch Fasereinbauten bei o. g. Voraussetzungen steigern. Die Ergebnisse orthogonal sind gegenüber parallel zur Treibrichtung tendenziell besser. Es kann eine vernähende Wirkung durch die Kurzfasern orthogonal zur Treibrichtung einsetzen. Fasereinbauten, die hohe Inhomogenitäten in der Gefügestruktur im Treibprozess hervorgerufen, zeigen in beiden Richtungen deutlich geringere Werte in G_D .

Bei Einbau der Pflanzenkurzfasern, der Kurzfasern aus natürlichen und künstlichen Polymeren (Ausnahme: Aramidkurzfasern (1-8)) sowie der anorganischen Chemiekurzfasern aus Keramik (1-19) und Mineralwolle (1-20) zeigen sich keine Steigerungen im Festigkeits- und Verformungsverhalten. β_D und G_D lassen sich aufgrund o. g. Voraussetzungen bei diesen Fasereinbauten nicht steigern. Bei Verwendung der Basaltkurzfasern ((1-13)-(1-14)) und der Aluminium-modifizierten Kurzglasfasern BelCoTex ((1-21)-(1-22)) bilden sich inhomogene Porenformen und Faserstrukturen aus (s. Kap. 5.2). Die Folge ist eine deutliche Reduzierung im Festigkeits- und Verformungsverhalten. An den Inhomogenitäten treten lokale Spannungsspitzen auf, die Risse im Feststoff initiieren können. Feststellen lässt sich, dass sich dieses Phänomen stärker auf β_D als auf G_D auswirkt. Der Einbau der Edelstahlkurzfasern (1-15) zeigt leichte Steigerungen parallel zur Treibrichtung. Die alkaliresistenten (AR) Bündelkurzglasfasern ((1-27)-(1-28)) zeigen vernachlässigbare Wirksamkeiten.

Im Folgenden wird der Einbau der wasserdispersiblen monofilen AR-Kurzglasfasern (MGF) ((1-23)-(1-26)) sowie der Kohlenstoff- ((1-17)-(1-18)) und Aramidkurzfasern (1-8) kurz umrissen. Diese Kurzfasern sind vorzugsweise geeignet, das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Porenbetons unter einachsiger Druckbeanspruchung zu verbessern.

- β_D lässt sich unter Beanspruchungen parallel zur Treibrichtung (s. **Abb. 5-14, oben**) bei Einbau der Kohlenstoffkurzfasern ((1-17)-(1-18)) sowie der MGF ((1-23)-(1-26)) gegenüber der Referenz (0-5) steigern. Orthogonal zur Treibrichtung (s. **Abb. 5-14, unten**) ergibt sich für keine der Fasereinbauvariante eine Steigerung in β_D , teilweise ist β_D sogar geringer im Vergleich zur Referenz. Beim Vergleich beider Beanspruchungsrichtungen zeigt der Einbau der Kohlenstoffkurzfasern in β_D deutliche Auffälligkeiten. Hier sind bei einer Beanspruchung parallel zur Treibrichtung bis zu 50% höhere Festigkeiten, aufgrund o. g. Faservorzugsrichtung und erhöhter Feststoffanteile, feststellbar. Der Einbau der Aramidkurzfasern führt in beiden Richtungen zu keiner Steigerung von β_D . Die Erstentfestigung erfolgt überwiegend durch innere Porenverdichtung bzw. -quetschung; Längsrisse parallel zur Beanspruchungsrichtung sind nur eingeschränkt sichtbar. Die Kurzfasern, die statistisch verteilt liegen, haben keinen Einfluss; die Gefügestrukturinhomogenitäten sind maßgebend.
- G_D wird bei Einbau der MGF deutlich gesteigert. Dieser Effekt ist bei Beanspruchungen orthogonal zur Treibrichtung, aufgrund der o. g. vernähenden Wirkung in Faservorzugsrichtung, stärker ausgeprägt. Der Einbau der Aramidkurzfasern ergibt im Gegensatz zum Verhalten bei β_D ebenfalls deutlich gesteigerte Werte in G_D . Daraus folgt, dass G_D nicht so stark von den Inhomogenitäten in der Gefügestruktur abhängig ist. Steigerungen in G_D ergeben sich im Wesentlichen aus den höheren Plateaus im Entfestigungsast der Druckspannungs-Stauchungs-Linie. Bei treibrichtungsabhängigem Vergleich von G_D können keine eindeutigen Aussagen getroffen werden. Der Einbau der Kohlenstofffasern ergibt keine wesentliche Steigerung in G_D ; die Werte parallel zur Treibrichtung sind hier vergleichbar mit β_D höher gegenüber orthogonal zur Treibrichtung. Die vernähende Wirkung ist, aufgrund der Faservorzugorientierung, nicht vorhanden.

Das Festigkeits- und Verformungsverhalten verschlechtert sich bei allen Fasereinbauten über die Höhe des Treibkörpers. Der Zusammenhalt der Probekörper ist, im Gegensatz zu den Referenz-Probekörpern, bei allen o. g. Fasereinbauten stärker gegeben, was sich vorzugsweise in G_D widerspiegelt.

Anmerkung

Die Würfelgeometrie der Probekörper und die damit verbundenen großen Bereiche der Querdehnungsbehinderung „verwischen“ das richtungsabhängige Verhalten unter einachsigem Druck. Charakteristika der Faservorzugorientierung werden nur eingeschränkt sichtbar.

5.3.2 Kombinierte Druck-Schubbeanspruchung

Kap. 1.2 stellt den zweiachsigen Plattenschub einer Wandscheibe bei Vertikallastabtrag und zusätzlichem Horizontallastangriff vor. Diese Beanspruchung ist eine der häufigsten erdbebenspezifischen Einwirkungen auf ein Porenbeton-Mauerwerk. Das Verhalten des kurzfaserverstärkten Porenbetons unter diesem Beanspruchungsfall, bezogen auf den Einzelstein, wird über einen eigens entwickelten kombinierten Druck-Schubversuch untersucht.

Versuchsbeschreibung und Randinformationen

Der Versuchsaufbau bzw. theoretische Zusammenhänge des kombinierten Druck-Schubversuchs sind in **Abb. 5-15** dargestellt. Ein achsenbeweglicher „Plattenrahmen“, in dem ein Probekörper eingebaut ist, wird einseitig vertikal verschoben. Abb. 5-15, **a)** zeigt den Versuchsaufbau im unbelasteten Zustand. Der eingebaute Probekörper wird zweidimensional gleichzeitig auf Druck und Schub (Vgl. Zustand I und II, Abb. 5-15, **b)**) beansprucht. Die Geschwindigkeit der Vertikalverschiebung beträgt verformungsgesteuert 15 mm/min. Die Verformungen entsprechen dem in Abb. 5-15, **c)** skizzierten geometrischen Verformungsmodell (Vgl. rotes und schwarzes Viereck).

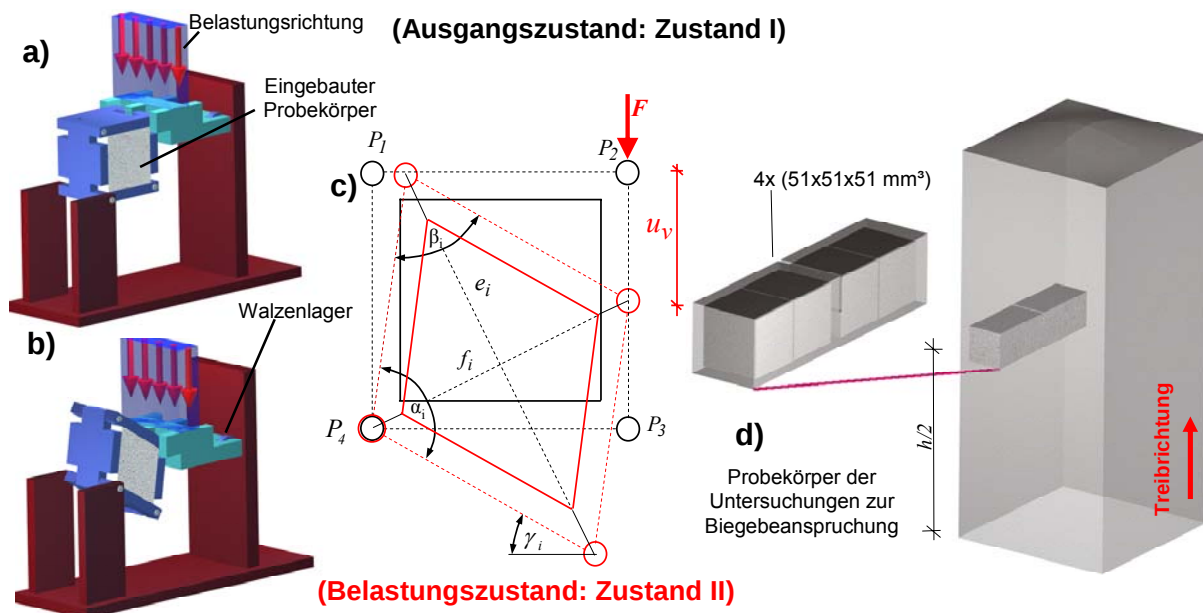


Abb. 5-15 Untersuchungen unter kombinierter Druck-Schubbeanspruchung, **a)** Versuchsaufbau - Ausgangszustand: Zustand I, **b)** Belastungszustand: Zustand II, **c)** Geometrische Verformungsfigur - Theoretische Zusammenhänge bei der Vertikalverschiebung (u_v), **d)** Probekörperanordnung im Treibkörper

Untersucht werden vier Probekörper, die aus einem orthogonal zur Treibrichtung liegenden Probekörper (2. Ebene) der Biegeuntersuchungen herausgeschnitten werden (s. Abb. 5-15, **d)**). Die Probekörpergröße beträgt 51 x 51 x 51 mm³. Die Probekörper werden parallel zur Treibrichtung eingebaut. Die Kraft, die notwendig ist, um den Rahmen zu verformen, wird verformungsabhängig aufgezeichnet. Über einem Vergleich der Kraft-Vertikalverschiebungslinien und der massebezogenen Energien werden die Versuchsergebnisse ausgewertet und

über die vier Probekörper gemittelt. Treibrichtungsabhängige Betrachtungen sind, aufgrund der symmetrischen Beanspruchung, nicht sinnvoll. Die Ausklinkungen in den Eckpunkten der Versuchsanordnung werden hier vernachlässigt. (s. Abb. 5-16).

Ergebnisse und Diskussion

Durch die Winkelverschiebung in α_i (s. Abb. 5-15, c)) versagen die Probekörperekcken P_1 und P_3 auf Druck; die Gefügestruktur wird in diesen Bereichen „gequetscht.“ Der entscheidende Abfall der Kraft wird in der Hauptspannungsebene durch ein Schubversagen des Probekörpers verursacht. Dies führt zu einem diagonalen Riss im Probekörper (s. **Abb. 5-16**). Festzustellen ist, dass gegensätzlich dazu die Probekörper einiger Fasereinbauten ein Rissbild mit vielen kleinen Rissen zeigen.

Der Probekörper wird im Verlauf der weiteren Vertikalverschiebung sukzessiv zerquetscht. Ein Großteil der Entfestigungsenergie wird aufgebraucht. Bei einer Vertikalverschiebung $u_V > 70$ mm ergeben sich Zugbeanspruchung auf den Probekörper. Die Länge der Diagonale e_i wird kleiner, die Diagonallänge f_i größer (s. Abb. 5-15, c)).

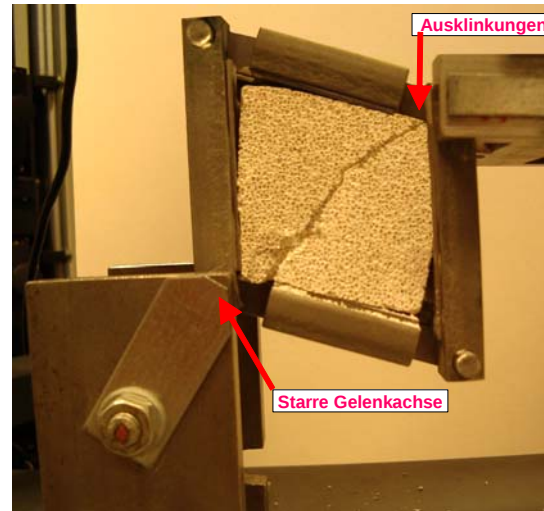


Abb. 5-16 Charakteristisches Schubversagen eines Probekörpers unter kombinierter Druck-Schubbeanspruchung

Abb. 5-17 stellt eine Auswahl an empirisch ermittelten Kraft-Vertikalverschiebungs-Linien bei Einbau von Kurzfasern unter kombinierter Druck-Schubbeanspruchung dar. Abb. 5-17, **links** zeigt die Kraft-Vertikalverschiebungs-Linien bei Einbau von Bambus- (1-1), Kunstseide- (1-10), Edelstahl- (1-15) und Kohlenstoffkurzfasern (1-17) im Vergleich zur Referenz (0-5). Abb. 5-17, **rechts** zeigt die Kraft-Vertikalverschiebungs-Linien bei Einbau einer Auswahl von alkaliresistenten (AR) Kurzglasfasern ((1-24)-(1-28)), vergleichend zur Referenz.

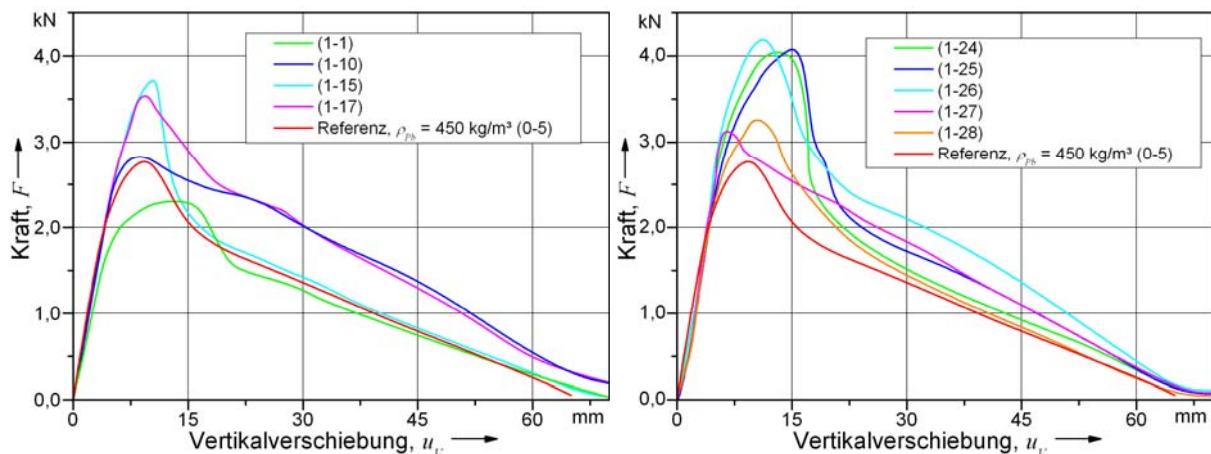


Abb. 5-17 Beispiele für charakteristische Verläufe der Kraft-Vertikalverschiebungs-Linien unter kombinierter Druck-Schubbeanspruchung (Mittelung der vier Probekörper), **links**: Einbau der Bambus- (1-1), Kunstseide- (1-10), Edelstahl- (1-15) und Kohlenstoffkurzfasern (1-17), **rechts**: Einbau einer Auswahl von alkaliresistenten (AR) Kurzglasfasern: Wasserdispersible monofile Kurzglasfasern (MGF) ((1-24)-(1-26)) sowie Bündelkurzglasfasern (BGF) ((1-24)-(1-28))

- Bei Einbau der Bambuskurzfasern (1-1) zeigt sich gegenüber der Referenz (0-5) eine deutliche Verschlechterung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens (s. **Abb. 5-17, links**). Die Steifigkeit und die Festigkeit (β_{DS}) nehmen ab; die Entfestigung ist auf Referenzniveau. Pflanzenfasern, wie in Kap. 5.3.1 festgestellt, wirken als innere Fehlstellen. Das Festigkeits- und Verformungsverhalten der anderen gezeigten Einbauvariationen ist deutlich erhöht. Auffallend ist der steile Abfall der Linie nach β_{DS} bei Einbau der Edelstahlkurzfasern (1-15).

Im Entfestigungsverhalten besitzen die Edelstahlkurzfasern nur eingeschränkte Wirksamkeit. Bei Einbau der Kunstseide- (1-10) und der Kohlenstoffkurzfasern (1-17) zeigt sich ein wesentlich höheres Niveau des abfallenden Asts der Linien. β_{DS} kann durch den Einbau der Kohlenstofffasern ebenfalls deutlich gesteigert werden.

- Bei Einbau der Kurzglasfasern zeigen sich ebenfalls deutliche Steigerungen im Festigkeits- und Verformungsverhalten gegenüber der Referenz (0-5) (s. Abb. 5-17, **rechts**). Die BGF weist gegenüber der MGF reduzierte Wirksamkeiten unter kombinierter Druck-Schubbeanspruchung auf. Bei Einbau der Faserlänge $l_f = 6$ mm (1-27) ergibt sich zwar keine Erstentfestigung, β_{DS} kann jedoch kaum gesteigert werden. Bei $l_f = 12$ mm (1-28) ist die Ausrundung bei β_{DS} und das Entfestigungsniveau deutlich geringer ausgeprägt gegenüber der Faserlänge $l_f = 6$ mm. Zurückführen lässt sich dieses Verhalten auf die reduzierte Faserdichte. Bei Einbau der MGF ((1-24)-(1-26)) zeigen sich wesentliche Steigerungen für β_{DS} gegenüber der Referenz und dem Einbau der BGF. Für die Erklärung der Kraft-Vertikalverschiebungs-Linien muss, neben den Faserparametern, die Rohdichte herangezogen werden. Die Niveaus des Entfestigungsasts sind deutlich höher.

Abb. 5-18 zeigt die mittleren Entfestigungsenergien (G_{DS}) in Abhängigkeit zur Druckfestigkeit (β_{DS}) für alle eingebauten Faservariationen nach Tab.-A.: 2.

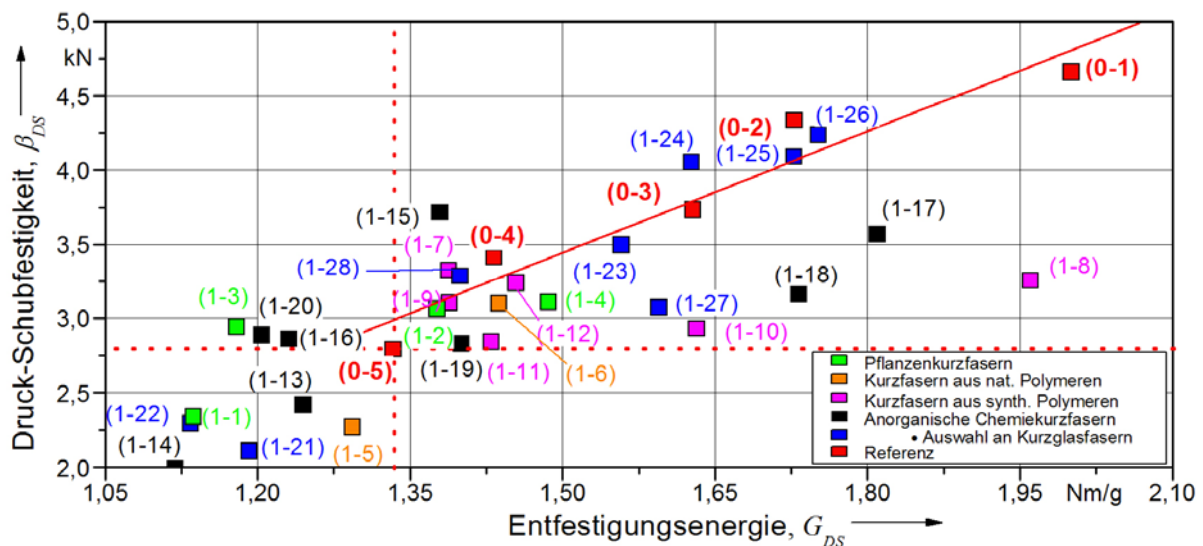


Abb. 5-18 Einfluss des Fasereinbaus auf die Druck-Schubfestigkeit (β_{DS}) in Abhängigkeit zur Entfestigungsenergie (G_{DS}) bei kombinierter Druck-Schubbeanspruchung (Einbau nach Tab.-A.: 2), (Mittelung der vier Probekörper)

Das Verhalten der Probekörper mit Fasereinbauten zeigt unter kombinierter Druck-Schubbeanspruchung tendenziell eine Übereinstimmung mit dem Verhalten unter einachsiger Druckbeanspruchung (s. Kap. 5.3.1). Im Folgenden wird die Wirksamkeit des Fasereinbaus gegenüber der Referenz (0-5) über die Größen β_{DS} und G_{DS} diskutiert. Es werden lediglich Kurzfasereinbauten nach Tab.-A.: 2 betrachtet, die Steigerungen im Festigkeits- und Verformungsverhalten unter kombinierter Druck-Schubbeanspruchung aufweisen.

- β_{DS} lässt sich gegenüber der Referenz (0-5) am deutlichsten durch Einbau der MGF ((1-24)-(1-26)) steigern. β_{DS} ist bei allen drei Einbauten um ein Drittel höher. Weiterhin weist der Einbau von Edelstahlkurzfasern (1-15) hohe Wirksamkeiten auf. Auch Kohlenstoffkurzfasern erweisen sich als wirksam, wobei festzustellen ist, dass β_{DS} bei Fasereinbau der Faserlänge $l_f = 4$ mm (1-17) bedeutend höher ist als bei Fasereinbau der Länge $l_f = 6$ mm (1-18). Bei Einbau der Aramidkurzfasern (1-8) kommt es ebenfalls zum Anstieg von β_{DS} .

Die Voraussetzungen bei der Faserwahl zur Erlangung einer hohen Wirksamkeit können aus Kap. 5.3.1 übernommen werden. Die Rohdichte (ρ_{Pb}) bzw. die Porosität hat bei homogener Gefügestruktur einen höheren Einfluss auf die Steigerungen von β_{DS} als auf β_D .

- G_{DS} lässt sich ebenfalls gegenüber der Referenz (0-5) bei o. g. Fasereinbauten, außer bei Einbau der Edelstahlkurzfasern, deutlich steigern. Die Rohdichte ist im Rahmen der Ermittlung von G_{DS} über den Massebezug berücksichtigt ($[G_{DS}] = \text{N} \cdot \text{m/g}$). Generell kann gesagt werden, dass ein wirksamer Fasereinbau das Rissverhalten verändert. Besonders o. g. Fasereinbauten zeigen im Bereich der abfallenden Kraft-Vertikalverschiebungs-Linien von β_{DS} bis $0,5 \cdot \beta_{DS}$ ein Rissbild mit vielen kleinen Rissen, teilweise in unsystematischer Anordnung. Der übliche diagonale Rissverlauf des Porenbetons wird aufgehoben (s. Abb. 5-16).

5.3.3 Biegebeanspruchung

Versuchsbeschreibung und Randinformationen

Die Biegebeanspruchung wird über den Dreipunkt-Biegeversuch mit Kerbung, weggesteuert an Prismen ($60 \times 60 \times 240 \text{ mm}^3$) nach Tab.-A.: 2, (s. **Abb. 5-19, a)**), durchgeführt.

Die Probekörper orthogonal zur Treibrichtung werden in Anlehnung an [N 22] aus drei Höhenebenen (Drittelebenen) im Treibkörper herausgeschnitten; die Probekörper parallel zur Treibrichtung werden mittig aus zwei Höhenebenen (s. **Abb. 5-19, b)**) herausgeschnitten. Alle Probekörper werden mittig an der Unterseite bis $h/2$ gekerbt. Die Kerbe wird zur reproduzierbaren Schärfe des Anschnitts über ein feines Diamantsägeblatt einer Tischkreissäge geschnitten. Die Belastungsgeschwindigkeit beträgt $200 \mu\text{m/min}$ (Bruchkriterium: $< 60 \text{ s}$).

Voruntersuchungen ohne Kerbriss über den Drei- und Vierpunkt-Biegeversuch ergaben bei vielen Probekörpern instabiles messtechnisch nicht erfassbares, schlagartiges Versagen. Eine Charakterisierung der in dieser Arbeit im Vordergrund stehenden Duktilitäten war somit nicht in vergleichender Form möglich. In der Untersuchung wird die Durchbiegung seitlich des Kerbrisses über einen Taster gemessen.

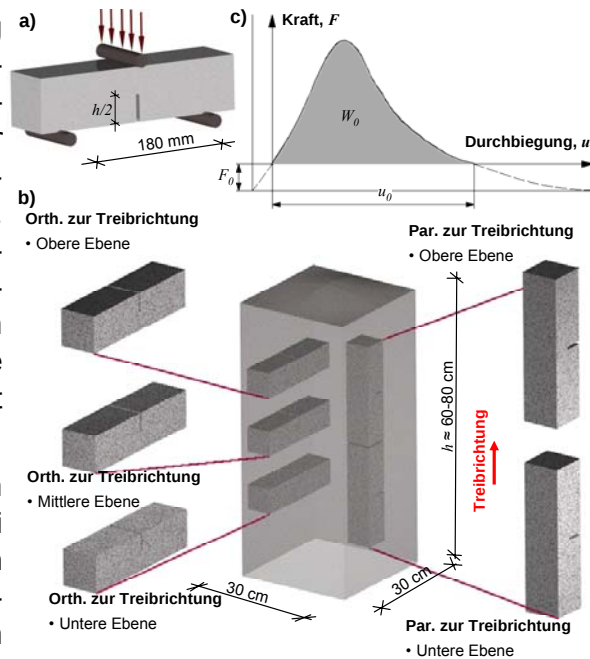


Abb. 5-19 Untersuchungen unter Biegebeanspruchung mit Kerbung, **a)** Versuchsaufbau: Dreipunkt-Biegeversuch, **b)** Probekörperanordnung im Treibkörper, **c)** Arbeitsanteile bei Berücksichtigung des Eigengewichts

Über den Vergleich der Kraft-Durchbiegungs-Linien bzw. aus den sich daraus ergebenden Energiebeziehungen werden die Versuche ausgewertet. Zur Erfassung der Entfestigungsenergien (G_B) werden ausschließlich die Arbeitsanteile im Bereich zwischen 100% und 20% der Biegefestigkeit (β_B) genutzt. Nachgelagerte Arbeitsanteile stehen bei einigen Probekörpern zum Lastabtrag nicht zur Verfügung. Die Probekörpergeometrie wird über Berücksichtigung des Eigengewichts umgerechnet (s. **Abb. 5-19, c)**), s. Gl. [5-1]).

$$G_B = \frac{W_B + m \cdot g \cdot u}{A_{Lig}} \quad [5-1]$$

G_B Entfestigungsenergie unter Biegebeanspruchung; $[G_B] = \text{N/m}$

W_B Fläche unter der Kraft-Durchbiegungs-Linie; $[W_B] = \text{N} \cdot \text{m}$

m Gewicht des Balkens, bezogen auf die Stützweite; $[m] = \text{kg}$

g Erdbeschleunigung; $[g] = \text{m/s}^2$

u Endverschiebung bei Bruch; $[u] = \text{mm}$

A_{Lig} Ligamentfläche am Balkenanriss; $[A_{Lig}] = \text{mm}^2$

Ergebnisse und Diskussion

Unter Biegebeanspruchung mit Kerbung werden bei einer Auswahl von Fasereinbauten wesentliche Steigerungen im Festigkeits- und Verformungsverhalten festgestellt; die spröde Entfestigung des Porenbetons kann deutlich reduziert werden.

Abb. 5-20 zeigt beispielhaft empirisch ermittelte Kraft-Durchbiegungs-Linien, die bei Einbau einer Auswahl von Kurzfasern für die untere Ebene des Treibkörpers parallel zur Treibrichtung das charakteristische Verhalten unter Biegebeanspruchung abbilden. Dargestellt werden nur Fasereinbauten mit einer Wirksamkeit gegenüber der Referenz (0-5). **Abb. 5-20, links** zeigt die Verhaltensweisen bei Einbau der Zellulose- (1-5), Kunstseide- (1-10), Edelstahl- ((1-15)-(1-16)) und Kohlenstoffkurzfasern ((1-17)-(1-18)), vergleichend zur Referenz. **Abb. 5-20, rechts** stellt die Verhaltensweisen bei Einbau einer Auswahl von wasserdispersiblen monofilen alkaliresistenten (AR) Kurzglasfasern (MGF) ((1-23)-(1-25)) und AR-Bündelkurzglasfasern (BGF) ((1-27)-(1-28)), vergleichend zur Referenz, dar.

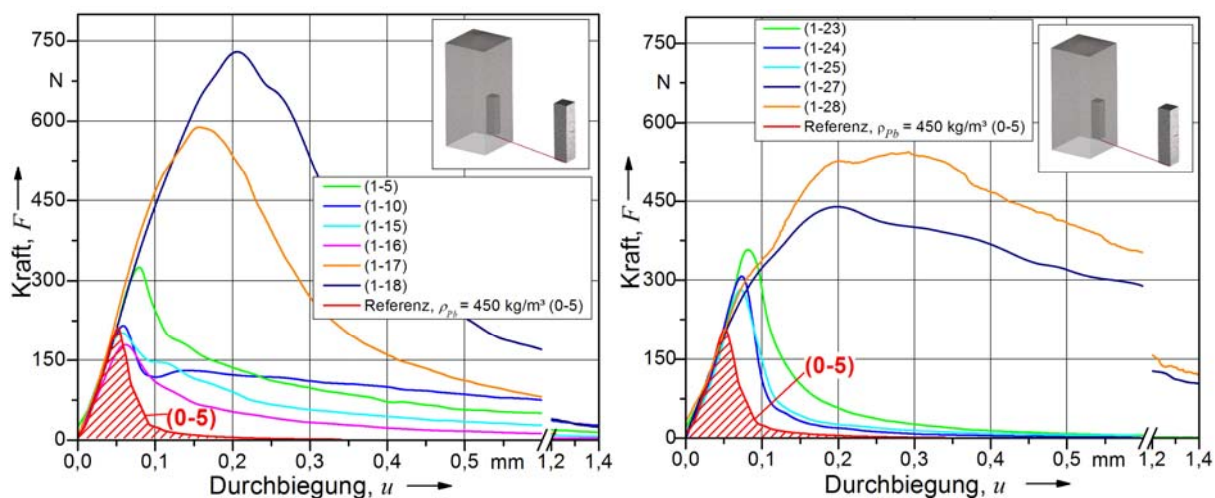


Abb. 5-20 Beispiele für charakteristische Verläufe der Kraft-Durchbiegungs-Linien unter Biegebeanspruchung mit Kerbung, parallel zur Treibrichtung beansprucht (untere Ebene des Treibkörpers), **links**: Auswahl an Kurzfasern: Zellulose- (1-5), Kunstseide- (1-10), Edelstahl- ((1-15)-(1-16)) und Kohlenstoffkurzfasern ((1-17)-(1-18)) **rechts**: Auswahl an Kurzglasfasern: Wasserdispersible monofile alkaliresistente (AR) Kurzglasfasern (MGF) Saint Gobain (SG) Cem-FIL ARC20 70/30, ((1-23)-(1-25)) sowie Bündelkurzglasfasern (BGF) SG Cem-FIL ARC20 62/2 ((1-27)-(1-28))

Die dargestellten Fasereinbauten nach **Abb. 5-20, links** weisen im Vergleich zur Referenz (0-5) ein gesteigertes Festigkeits- und Verformungsverhalten auf. β_B und das Entfestigungsverhalten wird bei Einbau der Zellulose- (1-5) und der Kohlenstoffkurzfasern ((1-17)-(1-18)) deutlich erhöht, bei Einbau der Kunstseide- (1-10) und Edelstahlkurzfasern ((1-15)-(1-16)) sind ausschließlich Steigerungen im Entfestigungsverhalten sichtbar. Auffallend ist die ausgeprägte Erstentfestigung bei Einbau der Kunstseidekurzfasern. Die Fasern kommen ausschließlich im späten Entfestigungsbereich zur Wirkung. Die mechanischen Eigenschaften der Fasereinbauten bzw. die sich ergebenden Gefügestrukturen aus Faser- und Feststoffanteil haben maßgebenden Einfluss.

Die dargestellten Linien für die Auswahl der MGF und der BGF nach **Abb. 5-20, rechts** zeigen alle deutliche Steigerungen in β_B . Die Entfestigung nach Überschreiten von β_B wird bei Einbau der MGF gegenüber der Referenz (0-5) nicht wesentlich verbessert, sie erfolgt weiterhin schlagartig. Die Unterschiede im Festigkeits- und Verformungsverhalten zwischen den Probekörpern der Treibkörper (1-23) und (1-24) lassen sich über die höhere Faserdichte im Treibkörper (1-23) erklären. Gegensätzlich dazu zeigt sich, bei Einbau der BGF, neben einer noch weiteren Steigerung von β_B , eine deutliche Verbesserung des Entfestigungsverhaltens. Starke Ausrundungen der Linien vor β_B und lang anhaltende Plateaus nach Überschreiten von β_B sind charakteristisch.

Bei Vergleich der Probekörper der jeweiligen Treibkörper zeigen sich deutliche richtungs- und treibhöhenabhängige Verläufe in den Kraft-Durchbiegungs-Linien. **Abb. 5-21** zeigt die Verläufe der Linien für die drei orthogonal und die beiden parallel liegenden Probekörper mit eingebauten alkaliresistenten Bündelkurzglas- (1-28) (**links**), Kohlenstoffkurz- (1-17) (**Mitte**) und Kunstseidekurzfasern (1-10) (**rechts**). Diese zeigen von allem Fasereinbauten die ausgeprägtesten Unterschiede im richtungs- und höhenabhängigen Verhalten im Treibkörper.

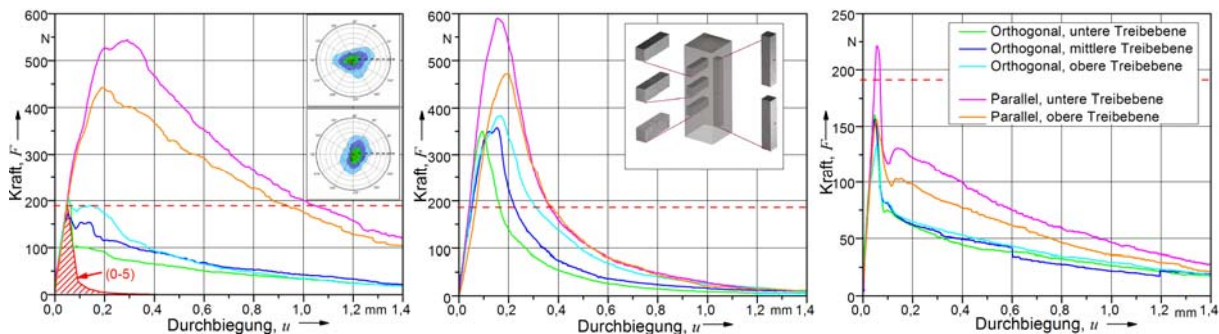


Abb. 5-21 Treibrichtungs- und treibhöhenabhängiger Einfluss auf die Kraft-Durchbiegungs-Linien bei der Biegebeanspruchung mit Kerbung, **links**: Einbau der alkaliresistenten Bündelkurzglasfasern (BGF) (1-28), **Mitte**: Einbau der Kohlenstoffkurzfasern (1-18), **rechts**: Einbau der Kunstseidekurzfasern (1-10)

Die Faservorzugsrichtung parallel zur Treibrichtung wirkt sich positiv auf die Biegefestigkeit (β_B) und das Entfestigungsverhalten der Probekörper parallel zur Treibrichtung aus. Über die Höhe im Treibkörper nimmt das Festigkeits- und Verformungsverhalten jeweils ab. Dies ist vor allem auf den abnehmenden Feststoffanteil bzw. die dadurch reduzierte Fasereinbindung zurückzuführen. Inhomogenitäten in der Faserverteilung ($\chi_{f,3D}$) und der -orientierung ($\eta_{f,3D}$) können jedoch so stark sein, dass sie das o. g. Verhalten überlagern bzw. verändern.

Bei Einbau der BGF (1-28) (s. **Abb. 5-21, links**) zeigen alle Probekörper im Treibkörper deutliche Steigerungen im Entfestigungsverhalten gegenüber der Referenz. β_B kann jeweils lediglich bei den Probekörpern parallel zur Treibrichtung gesteigert werden; β_B ist im unteren Probekörper größer. Rechts oben sind die stereographischen Projektionen für die Faserorientierungsverteilung, in Ausblick auf die Untersuchungen in Kap. 7.2.1, dargestellt. Die Faserorientierung im Polarwinkel ist vorzugsweise parallel zur Treibrichtung. Die Faserorientierung im Azimutwinkel im unteren Teil des Treibkörpers ist zur Faserorientierung im oberen Teil orthotrop. Das Festigkeits- und Verformungsverhaltens bei den Probekörpern orthogonal zur Treibrichtung nimmt, im Gegensatz zu den Probekörpern parallel zur Treibrichtung, im Treibkörper nach oben hin zu. Die wirksamen Faseranteile in Beanspruchungsrichtung werden, aufgrund der stärkeren Ausrichtung nach oben hin mehr (oben: Vorzugsorientierung im Azimutwinkel (φ_f) $\approx 90^\circ$, unten: $\varphi_f \approx 0^\circ$). Bei den Probekörpern parallel zur Treibrichtung zeigen sich keine so starken Abhängigkeiten zur Faserausrichtung im Azimutwinkel.

Bei Einbau der Kohlenstoffkurzfasern (1-18) (s. **Abb. 5-21, Mitte**) zeigen die Probekörper parallel und orthogonal zur Treibrichtung ähnliche Geometrien in an- und absteigendem Kurvenverlauf. Alle Probekörper weisen deutliche Steigerung von β_B auf, die Entfestigung ist nur eingeschränkt verbesserbar. Es zeigt sich, dass die Monofilamente parallel und orthogonal zur Treibrichtung eine Tragwirkung besitzen. Die Faservorzugsorientierung im Polarwinkel ist deutlich geringer; die Anisotropien sind eingeschränkt. Auffallend sind die über die Höhe des Treibkörpers stark zunehmenden Bruchdehnungen der Probekörper.

Bei Einbau der Kunstseidekurzfasern (1-10) (s. **Abb. 5-21, rechts**) ist für alle Probekörper der o. g. stark abfallende Ast nach Erreichen von β_B markant. β_B ist bis auf den Probekörper - parallel zur Treibrichtung, untere Ebene - geringer gegenüber der Referenz. Die spröde Erstentfestigung wird durch die Kurzfasern erst bei einer mittleren Entfestigung aufgefangen. Auffallend sind die deckungsgleichen Linien der Entfestigung bei den Probekörpern orthogonal zur Treibrichtung. Dies kann zurückgeführt werden auf die homogene Gefügestruktur

bei gleich bleibenden Feststoffanteilen und damit der Fasereinbindung über die Treibhöhe.

Abb. 5-22 zeigt die Entfestigungsenergien (G_B) in Abhängigkeit zur Festigkeit (β_B) unter Biegebeanspruchung mit Kerbung parallel und orthogonal zur Treibrichtung für alle eingebauten Faservariationen nach Tab.-A.: 2. Parallel (s. Abb. 5-22, **links**) und orthogonal zur Treibrichtung (Abb. 5-22, **rechts**) werden die Ergebnisse jeweils über die Höhe im Treibkörper gemittelt. Die Verhaltensweisen der Kraft-Durchbiegungs-Linien aus Abb. 5-20 und Abb. 5-21 spiegeln sich in den gemittelten Werten für β_B und G_B wider. Es werden ausschließlich Kurzfasereinbauten mit erhöhter Wirksamkeit gegenüber der Referenz (0-5) diskutiert.

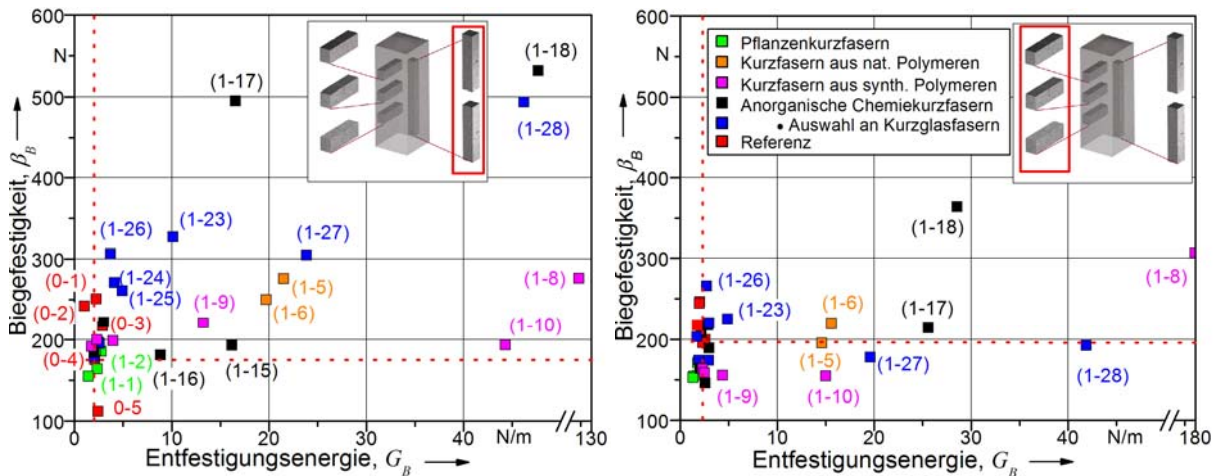


Abb. 5-22 Einfluss des Fasereinbaus auf die mittlere Entfestigungsenergie (G_B) in Abhängigkeit zur Festigkeit (β_B) unter Biegebeanspruchung mit Kerbung (Fasereinbau nach Tab.-A.: 2 - unwirksame Fasereinbauten werden vernachlässigt und nicht beschriftet), **links**: Parallel zur Treibrichtung beanspruchte Probekörper, **rechts**: Orthogonal zur Treibrichtung beanspruchte Probekörper

Parallel zur Treibrichtung werden bei Einbau von Kohlenstoff-, Aramid- und AR-Bündelkurzglasfasern Steigerungen in β_B und G_B festgestellt (s. **Abb. 5-22, links**). Beeindruckende Ergebnisse zeigt der Einbau der Kohlenstoff- ((1-17)-(1-18)) und AR-Bündelkurzglasfasern ((1-17)-(1-18)). Der Einbau der Kunstseidekurzfasern (1-10) führt ausschließlich zu Steigerungen in G_B . Die monofilen AR-Kurzglasfasern rufen lediglich Steigungen in β_B hervor; im Entfestigungsverhalten erweisen sie sich als nur eingeschränkt wirksam.

Orthogonal zur Treibrichtung sind β_B und G_B bei den Fasereinbauten, die eine hohe Wirksamkeit parallel zur Treibrichtung gegenüber der Referenz (0-5) zeigen, deutlich reduziert (s. Abb. 5-22, **rechts**). Ursache dafür ist der verringerte Faseranteil in der Beanspruchungsrichtung. Die isotrope Faserausrichtung unter Bildung von Faserigeln und Gefügestrukturinhomogenitäten bei Einbau der Aramidkurzfasern spiegelt sich wider; die Ergebnisse parallel und orthogonal zur Treibrichtung sind nahezu vergleichbar.

Der Anisotropieindex (A_G) bei Nutzung der Mittelwerte von G_B der Probekörper parallel und orthogonal zur Treibrichtung beträgt bei Einbau der BGF mit $l_f = 6$ mm (1-27) ca. 3,5 und mit $l_f = 12$ mm (1-28) ca. 11 (s. Gl. [3-20]). Bei den anderen Faservariationen liegt A_G zwischen 1 und 2. Fasereinbauten mit hohen Inhomogenitäten in der Gefügestruktur oder eingeschränkten Faserausrichtungen und Kurzfasern mit reduzierten mechanischen Eigenschaften oder spezifischer Form weisen vernachlässigbare Anisotropien in G_B auf. β_B zeigt ähnliche Anisotropieverhaltensweisen wie G_B .

Versagensbilder unter Biegebeanspruchung

Abb. 5-23 zeigt typische Versagensbilder einer Auswahl von Kurzfasern.

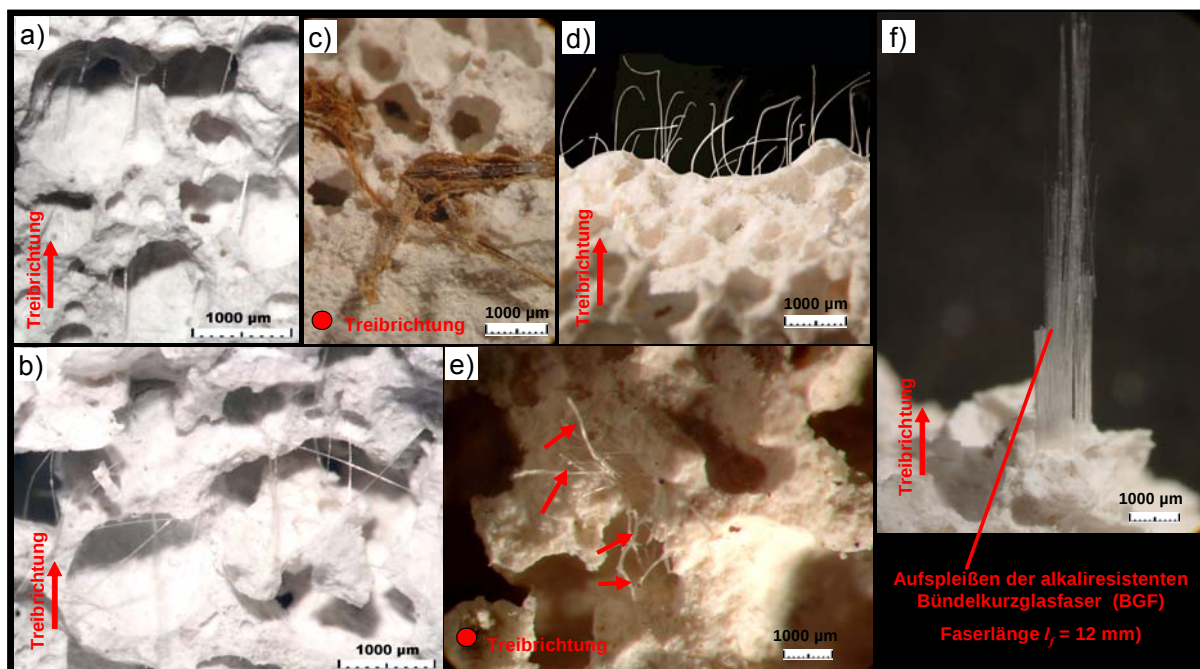


Abb. 5-23 Versagensbilder unter Biegebeanspruchung für eine Auswahl an Kurzfasern (s. Tab.-A.: 2), **a)** Was-serdispersible monofile alkaliresistente (AR) Kurzglasfasern (MGF) (1-24), **b)** Aramidkurzfasern (1-8), **c)** Bambuskurzfasern (1-1), **d)** Kunstseidekurzfasern (1-15), **e)** Baumwollfäden (1-6), **f)** AR-Bündelkurzglasfasern (BGF) (1-28)

Abb. 5-23, a) zeigt eine Bruchfläche bei Einbau der MGF (1-24) orthogonal zur Treibrichtung (s. Abb. 5-22, rechts). Die Kurzfasern stehen vorzugsweise parallel zur Treibrichtung; die Faserwirkung ist somit vernachlässigbar. Bei Beanspruchungen parallel zur Treibrichtung kommt es bei $l_f = 3$ mm vorzugsweise zum Faserbruch. Sporadisch ist auch Faserauszug festzustellen, vor allem, wenn die Kurzfasern porenwandnah im Feststoff eingebunden sind. Charakteristisch ist ein hörbares „Knistern“ während der Belastung; das Versagen wird vor-angekündigt.

Abb. 5-23, b) zeigt eine orthogonal zur Treibrichtung liegende Bruchfläche bei Einbau der Aramidkurzfasern (1-8). Eine Faserausrichtung ist nicht gegeben (s. Kap. 5.2.1). Es kommt vorwiegend zum Auszug der Kurzfasern. Pflanzenkurzfasern zeigen vorzugsweise Faserbruch bzw. bei größerer Faserform auch Faserauszug mit Faseraufspaltungen. Beispielhaft wird in **Abb. 5-23, c)** eine Bruchflächendraufsicht bei Einbau der Bambuskurzfasern (1-1) gezeigt. Das Bündel der Bambuskurzfaser filamentiert, aufgrund der von außen nach innen abnehmenden Dehnungsanteile beim Faserauszug, auf (s. Kap. 4.3.1.2). Die Faser versagt vorzugsweise durch Faserauszug, was trotz der thermischen Festigkeitsverluste und geringen mechanischen Eigenschaften (s. Kap. 4.3.2.1.1) darauf hindeutet, dass der Verbund nur eingeschränkt vorhanden ist. **Abb. 5-23, d)** zeigt das Verhalten bei Einbau der Kunstseidekurzfasern (1-10). Diese werden größtenteils aus dem Porenbeton ausgezogen. Für einen Faserbruch sind die Steifigkeiten und der Verbund zu gering sowie die Bruchdehnungen zu hoch. **Abb. 5-23, e)** zeigt ein Bruchbild bei Einbau von Baumwollfäden (1-6). Es kommt hier ebenfalls zu einem Aufspleißen der ausgezogenen Faserenden.

Bei Einbau der BGF (1-28) (s. **Abb. 5-23, f)**) werden ebenfalls Faseraufspaltungen festgestellt. Die dargestellte Kurzfaser ($l_f = 12$ mm) parallel zur Treibrichtung zeigt das Versagen der Einzelfilamente im Randbereich des Bündels durch Filamentbruch. Der Hauptstrang wird ausgezogen; die Filamente brechen sukzessive von Außen nach Innen. Dies könnte durch eine Erhöhung des inneren Verbunds verhindert werden (s. Kap. 4.3.1.2).

5.4 Hygrisches Verformungsverhalten

In den folgenden Untersuchungen wird der Einfluss von Kurzfasern auf das hygrische Verformungsverhalten des Porenbetons (Trocknungsschwinden) betrachtet (s. Kap. 2.4.3). Richtungsabhängige Unterschiede im Treibkörper werden untersucht.

Versuchsbeschreibung und Durchführung

Die Untersuchungen werden beispielhaft bei Einbau der wasserdispersiblen monofilen alkaliresistenten Kurzglasfasern (MGF) Saint Gobain Cem-FIL ARC20 70/30 unter Variation von Faserlänge (l_f) und -konzentration (ψ_f) durchgeführt. Neben der Referenz (0-5) werden die Treibkörper ((1-24)-(1-26)) sowie, vorgezogen aus Kap. 7, die Treibkörper (4-2) und (4-5) untersucht. Folgende Faserparameter variieren somit:

- $l_f = 3 \text{ mm}$
- $\psi_f = 0,25 - \text{(1-24)}^1 / 0,50 - \text{(4-2)} \text{ Vol.-%,}$
- $l_f = 6 \text{ mm}$
- $\psi_f = 0,25 - \text{(1-25)} / 0,50 - \text{(4-5)} \text{ Vol.-%,}$
- $l_f = 6 \text{ mm}$
- $\psi_f = 0,25 - \text{(1-26)}^a \text{ Vol.-%.}$

^a Nummerierung der Einbauvariationen

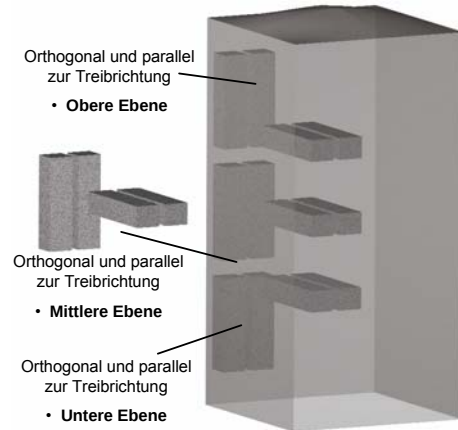


Abb. 5-24 Untersuchungen zum hygrischen Verformungsverhalten; Anordnung der Probekörper im Treibkörper

Es werden jeweils zwei Probekörper ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$) parallel und orthogonal zur Treibrichtung aus den Drittpunkten über die Höhe des Treibkörpers geschnitten (s. **Abb. 5-24**) [N 19]. Auf die Stirnflächen der Probekörper werden Messzapfen geklebt. Im Anschluss werden die Probekörper für den Zeitraum $t = 72 \text{ h}$ unter Wasser gelagert. Nach Abschluss der Wässerung trocknen die Probekörper bei einer Temperatur $T = 20^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchtigkeit $\varphi = 50\%$ allseitig belüftet.

Das Endschwindmaß (ε_{pb}) wird aus dem Abstand zwischen den Messzapfen nach Trocknung bis zur Ausgleichsfeuchte bei Massekonstanz ermittelt. ε_{pb} wird über die Höhe des Treibkörpers jeweils aus den Probekörpern parallel und orthogonal zur Treibrichtung gemittelt.

Ergebnisse und Diskussion

Fasereinbauten haben nur einen geringen Einfluss auf das hygrische Verformungsverhalten des Porenbetons. Ansatzweise ist eine Reduzierung von ε_{pb} bei Steigerung von l_f und ψ_f bzw. bei Probekörpern parallel gegenüber orthogonal zur Treibrichtung festzustellen.

Anisotropien in den Feststoffstrukturen (s. Kap. 3.5.4) führen zu einem erhöhten Schwinden entlang der stärker ausgebildeten Richtung im Probekörper. Diese Schwindverformungen überlagern die potenziell positive Wirkung von Kurzfasern; die Wirkung des Fasereinbaus kann nicht extrahiert festgestellt werden.

Abb. 5-25 stellt treibrichtungsabhängig das mittlere ε_{pb} der untersuchten Treibkörper vergleichend zur Referenz dar. Orthogonal zur Treibrichtung zeigen die Probekörper aller Treibkörper gegenüber parallel zur Treibrichtung ein erhöhtes ε_{pb} . Die Endschwindmaße sind somit in Faservorzugsrichtung, d. h. parallel zur Treibrichtung (s. Kap. 5.2.1), reduzierter.

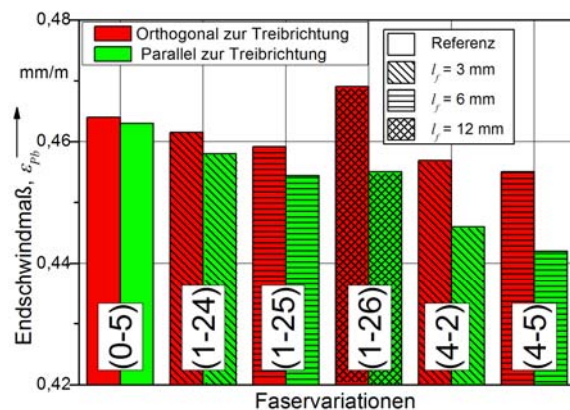


Abb. 5-25 Mittleres Endschwindmaß (ε_{pb}) bei Einbau der wasserdispersiblen monofilen alkaliresistenten Kurzglasfasern Saint Gobain Cem-FIL ARC20 70/30 in Abhängigkeit von Faserlänge und Faserkonzentration

Trotz der zu vermutenden höheren Feststoffanteile parallel zur Treibrichtung (s. Kap. 5.2.2) reduziert sich ε_{pb} aufgrund der orientierten, vorzugsweise parallel zur Treibrichtung, wirkenden Kurzfasern im Treibkörper. Die Endschwindmaße parallel zur Treibrichtung nehmen mit Steigerung der Faserlänge von $l_f = 3$ mm auf $l_f = 6$ mm bei beiden untersuchten Faserkonzentrationen ab. Die Probekörper des Treibkörpers (1-26) parallel zur Treibrichtung mit $l_f = 12$ mm haben das höchste ε_{pb} . Die hohen Feststoffanteile (Rohdichte $\rho_{pb} = 520$ kg/m³) werden hier neben der Faserwirkung und den o. g. richtungsabhängigen Feststoffanteilen maßgebend.

Orthogonal zur Treibrichtung sind faserlängenabhängig gleiche Tendenzen festzustellen. Die Unterschiede zwischen parallel und orthogonal zur Treibrichtung sind bei Steigerung von ψ_f höher; dies deutet auf eine höhere Faserwirkung hin. Die unterschiedlichen Verläufe gegenüber der Referenz ergeben sich jeweils erst ab einem Wasserverlust $w > 50$ M.-%.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bei Einbau der MGF in den Porenbeton das Schwindverhalten reduziert werden kann. Faserspezifische Verhaltensweisen können abgelesen werden, werden aber überlagert von der Ausrichtung des Feststoffgefüges. Eine praxisrelevante Verbesserung des hygrischen Verformungsverhaltens des Porenbetons lässt sich jedoch, aufgrund der geringen Absolutbeeinflussung von ε_{pb} , nicht voraussagen.

5.5 Charakterisierung der Gefügestrukturanisotropien

Die richtungsabhängige Optimierung der Gefügestruktur bzw. der Materialeigenschaften, die in Kap. 4.2 als eine der Wirksamkeiten des Fasereinbaus beschrieben wird, wird im Folgenden diskutiert. Ergänzende Untersuchungen werden durchgeführt.

5.5.1 Allgemeines

Kurzfaserverstärkter Porenbeton kann bei Einbau geeignete Kurzfasern Anisotropien im Festigkeits- und Verformungsverhalten unter äußeren und inneren Beanspruchungen aufweisen (s. Kap. 5.3-5.4). Bei Beachtung der Einbaurichtung des Porenbetons könnte sich gezielt die Möglichkeit ergeben, das Material richtungsabhängig zu verstärken. Ergänzend wird das Anisotropieverhalten unter Einfluss des bauphysikalisch relevanten Transportphänomens Schall untersucht. Wenn sich die Gefügestruktur des Porenbetons in der einen Richtung auf „Kosten“ der anderen orthotropen Richtung optimieren ließe, könnten durch gezielten Einbau des faserverstärkten Porenbetons hier neue Anwendungsfelder geschaffen werden.

5.5.2 Akustische Eigenschaften

Untersucht wird stichpunkthaft das akustische Verhalten des Porenbetons über das Stoßstellendämmmaß. Dieser praxisrelevante Beanspruchungsfall beinhaltet Körperschall und Schallabsorption. In Zusammenarbeit mit der XELLA Technologie- und Forschungsgesellschaft mbH⁶ wird untersucht, inwieweit faser- und richtungsabhängige Phänomene im Porenbeton festzustellen sind. Folgende Phänomene können richtungsabhängig auftreten:

- Differierende Materialanteile, aufgrund der Orientierung des Feststoffs,
- Innere Materialdämpfung, Veränderung der Resonanzfrequenz durch die Kurzfasern.

Versuchsbeschreibung und Randinformationen

Untersucht werden Probekörper bei Nutzung der Basismischung und der Randbedingungen nach Kap. 5.1. Die Abmessungen der Treibkörper sind 220 x 220 x (≈ 220) mm³. Das Porosierungsmittel wird auf das feinere RO 450 zur Steigerung der Porosierungsgrade sowie der Wirksamkeit umgestellt.

Als Kurzfasern werden die in **Tab.-A.: 3** angegebenen Kurzfaservariationen eingesetzt. Da-

⁶ XELLA Technologie- und Forschungsgesellschaft mbH, Technologie- und Forschungszentrum Brück, Gregor-von-Brück-Ring 9A, 14822 Brück.

bei wird bewusst die Bandbreite der betrachteten Kurzfasern erweitert. Unbeständige Kurzfasern (z. B. Polypropylenfasern), die die Feststoffstruktur im Treibprozess beeinflussen, sich aber im Rahmen der hydrothermalen Beanspruchung bei der Porenbeton-Herstellung zersetzen und Fehlstellen im System verursachen, könnten sich ebenfalls zum Einbau eignen.

Der Versuchsaufbau bzw. die Randbedingungen werden in Anlehnung an [74] gewählt (s. **Abb. 5-26**).

Der horizontale Balken des Versuchsaufbaus ist $2,0 \times 0,20 \times 0,25 \text{ m}^3$ (1). Der am Balkenende senkrecht orientierte Balken ist $1,50 \times 0,20 \times 0,20 \text{ m}^3$ (2). Beide Balken sind aus dem Porenbeton P4/0,55. Zwischen den beiden Balken werden die jeweiligen Prüfkörper (3) eingebaut. Die Probekörper werden geschnitten auf die Abmessungen $200 \times 200 \times 200 \text{ mm}^3$. Es werden verschiedene Anordnungen des Kleinhammerwerks und der Beschleunigungsaufnehmer gewählt; aus allen Kombinationen werden die Mittelwerte berechnet. Die Probekörper werden parallel und orthogonal zur Treibrichtung eingebaut.

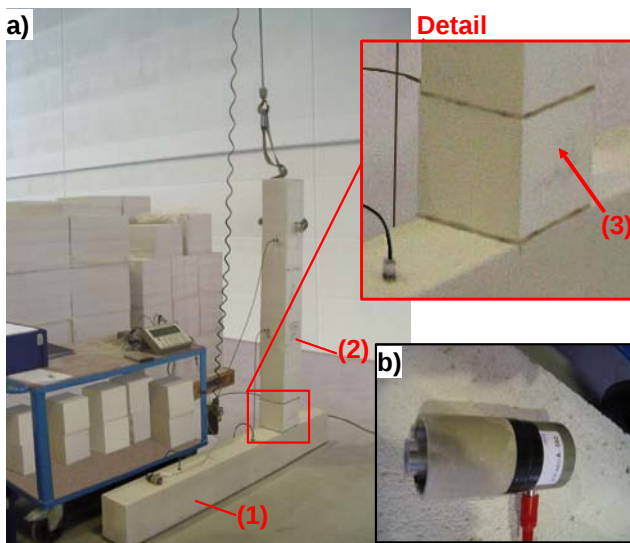


Abb. 5-26 Einfluss der Gefügestrukturanisotropien auf das akustische Materialverhalten - Schallpegeldifferenzuntersuchung, a) Versuchsaufbau, b) Gösele-Kleinhammerwerk

Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen keine signifikanten richtungsabhängigen Unterschiede im Differenzpegelmaß bei Einbau der Faservariationen (s. **Tab. 5-1**).

Tab. 5-1 Untersuchungsergebnisse der schnellen Schallpegeldifferenzmessung in [dB] bei einem Versuchsaufbau nach Abb. 5-26

Nr.	Referenz (0-6)	(2-1) [dB]	(2-2) [dB]	(2-3) [dB]	(2-4) [dB]	(2-5) [dB]	(2-6) [dB]	(2-7) [dB]	(2-8) [dB]	(2-9) [dB]
zur Treibrichtung	16,9	13,3	12,8	13,6	14,1	13,2	14,1	13,4	14,4	15,3
⊥ zur Treibrichtung	16,1	12,2	14,4	11,7	13,4	16,9	13,6	12,7	14,4	14,8

Die Gefügestruktur des untersuchten kurzfaserverstärkten Porenbetons zeigt keine signifikanten Anisotropieeigenschaften bei Untersuchung der akustischen Problemstellung Stoßstellendämmmaß. Untersuchungen zum Schallabsorptionsgrad über das Impedanzrohr laufen derzeit noch bei der XELLA Technologie- und Forschungsgesellschaft mbH.

5.6 Faserbeschaffenheit und Faserverbund

Die Faserbeschaffenheit und -verbund wird bei Einbau der Kurzfasern nach Tab.-A.: 2 und Tab.-A.: 3 untersucht. Beides hat ebenfalls wesentlichen Einfluss auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten des kurzfaserverstärkten Porenbetons (s. Kap. 4.2).

5.6.1 Faserbeschaffenheit

Faserschädigungen können vorzugsweise durch die hydrothermale Beanspruchung in der Porenbeton-Herstellung entstehen (s. Kap. 4.2). Anknüpfend an die Untersuchungen im Kleinversuch aus Kap. 4.3.4.2 wird die Beschaffenheit der Faseroberfläche im eingebauten Zustand untersucht. Die Faserschädigungen werden indirekt visuell über die Beschaffenheit der Faseroberfläche beurteilt. Probekörper bzw. Bruchstücke werden stichpunkthaft mittig aus einer Säule im Treibkörper entnommen (s. Abb. 5-8) und über das Elektronen-Mikroskop betrachtet. Alle Betrachtungen finden im Zeitrahmen $t < 100$ Tagen statt.

Abb. 5-27 zeigt charakteristische elektronen-mikroskopische Aufnahmen einer Auswahl von Faseroberflächen der untersuchten Faservariationen.

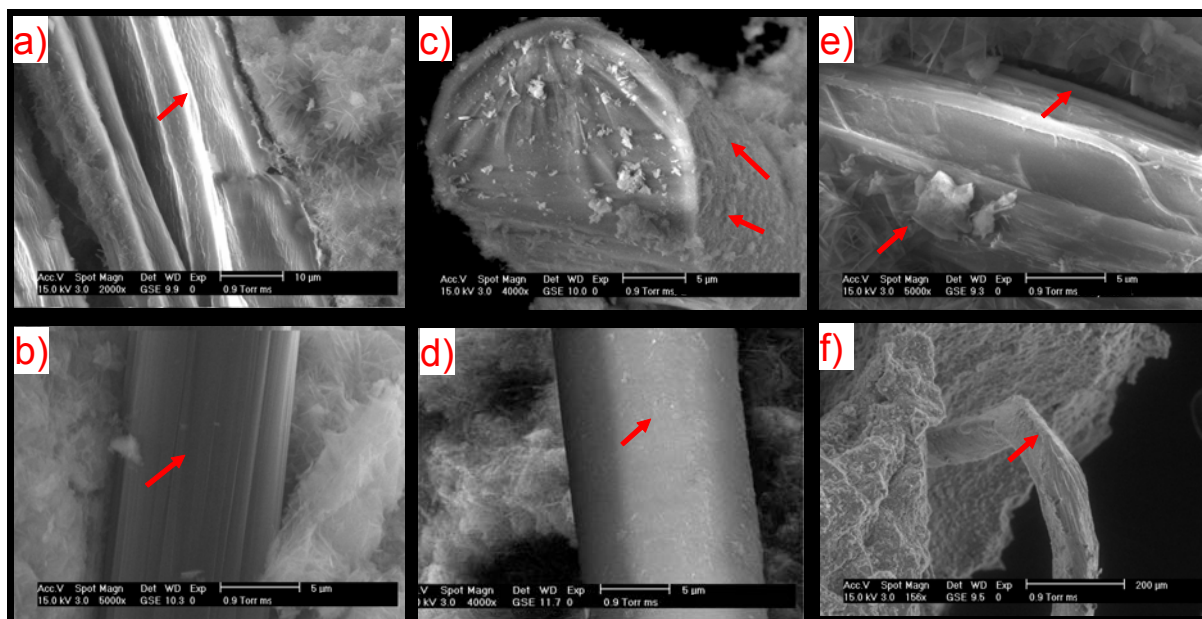


Abb. 5-27 Auswahl elektronen-mikroskopischer Aufnahmen von eingebetteten Kurzfasern im Porenbeton - Bewertung der Beschaffenheit der Faseroberfläche, **a)** Sisalkurzfaser (1-3), **b)** Kohlenstoffkurzfaser (1-17), **c)** Wasserdispersible monofile Elementarkurzfaser (2-6), **d)** Wasserdispersible monofile alkaliresistente Kurzfaser (1-24), **e)** Polyacrylnitrilkurzfaser (2-4), **f)** Edelstahlkurzfaser (1-15)

Pflanzenkurzfasern elementieren in ihre Monofilamente auf, sie liegen tendenziell nebeneinander in offenen Faserbündeln vor („Zerfaserung“). Es zeigen sich deutlich Spaltbereiche zwischen den Monofilamenten. **Abb. 5-27, a)** zeigt die elektronen-mikroskopische Aufnahme einer Sisalkurzfaser (1-3). Die Faseroberflächen sind glatt bis fibrilliert; die Querschnittsform ist stark deformiert. Kohlenstoffkurzfasern (1-17) zeigen keine Veränderung in der Beschaffenheit der Oberflächen (s. Abb. 5-27, **b)**). Die Fasern sind glatt, sie weisen leichte Längsstrukturen aus der Faserherstellung auf. Abb. 5-27, **c)** zeigt eine elektronen-mikroskopische Aufnahme einer eingebauten wasserdispersiblen monofilen Elementarkurzfaser (2-6). Auf der Oberfläche sind deutliche Faseraufwachsungen feststellbar, starke Schädigungen in den mechanischen Eigenschaften der Fasern werden vermutet. Die eingebetteten AR-Kurzfaserfasern der Cem-FIL-Reihe (z. B. Saint Gobain Cem-FIL ARC20 70/30) (1-24) zeigen dagegen nur leichte Aufwachsungen auf den Oberflächen (Abb. 5-27, **d)**), vergleichbar mit denen, die in Kap. 4.3.4.2 beschrieben sind; die Schlichte ist angegriffen. Daraus lässt sich die Annahme ableiten, dass bei den Glasfasern ausschließlich die AR-Glasfasern als mögliches Einbaumaterial in den Porenbeton in Frage kommen. Inwieweit sich sichtbare Schädigungen auf die mechanischen Eigenschaften der AR-Glasfasern und damit auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten des kurzfaserverstärkten Porenbetons auswirken, kann zu diesem Zeitpunkt nicht abschließend beantwortet werden.

Die für die Bewertung der Feststoffgefügeanisotropien eingebauten Polyacrylnitrilkurzfaser (PAN) (2-4) (s. Kap. 5.5) zeigen deutliche plastische Verformungen und deformierte Oberflächenstrukturen (s. Abb. 5-27, **e)**). Die Polypropylenfasern (PP) (2-3) lösen sich, bei Bildung von Hohlstellen, komplett während der hydrothermalen Beanspruchung auf. Edelstahlfasern (1-15) nach Abb. 5-27, **f)** zeigen keine Schädigungen. Die stark strukturierte Oberfläche ergibt sich bei der Stax M30 aus dem Herstellungsprozess (s. Kap. 5.1).

5.6.2 Faserverbund

Der Porenbeton wird durch die Kurzfasern nur dann verstärkt, wenn zwischen den Verbundkomponenten die Kraftübertragung gewährleistet wird. Der Faserverbund wird über die Be-

trachtung der Grenzschicht zwischen Kurzfaser und Feststoffmaterial bewertet. **Abb. 5-28** zeigt charakteristische elektronen-mikroskopische Aufnahmen von einer Auswahl von Fasern der untersuchten Faservariationen.

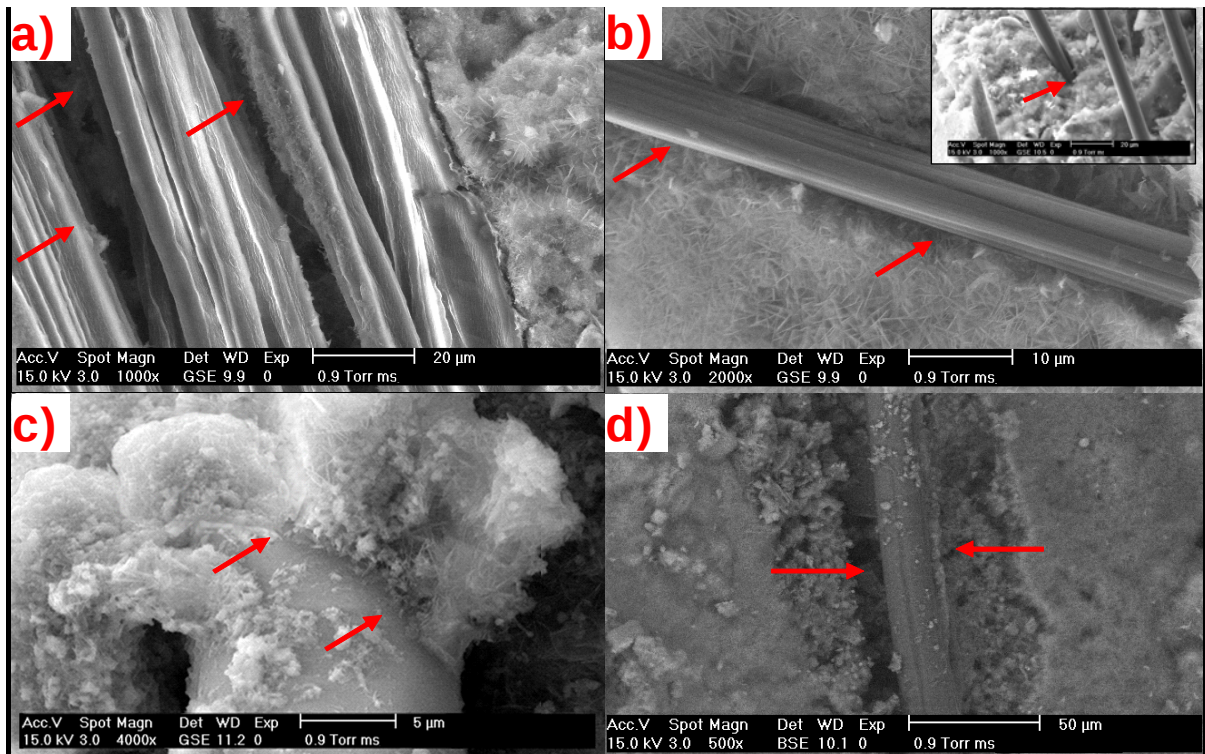


Abb. 5-28 Auswahl elektronen-mikroskopischer Aufnahmen von eingebetteten Kurzfasern im Porenbeton zur Bewertung des Verbundverhaltens der Kurzfaser, **a)** Sisalkurzfaser (1-21) - Elementarisierung der Kurzfaser, **b)** Kohlenstoffkurzfaser (1-17) - Hohlräume um die Kurzfaser **c)** Wasserdispersible monofilament alkaliresistente Kurzglasfaser (MGF) Saint Gobain Cem-FIL ARC20 70/30 (1-24) - Gutes Verbundverhalten, **d)** Polyacrylnitrilkurzfaser (2-4) - Hohlräume um die Kurzfaser

Pflanzenkurzfasern (s. Abb. 5-28, **a**), hier Sisalkurzfaser (1-3)) zeigen im Verbundbereich zum Feststoffmaterial deutliche Spaltbereiche. Es lassen sich starke Faserenthaftungen feststellen. Die elementierten Monofilamente haben im Bündel nur einen eingeschränkten Verbund untereinander. Dies wird u. a. auf die stark unterschiedlichen hygrischen und thermischen Verformungseigenschaften gegenüber dem Feststoff und der Instabilität einiger Faserbestandteile während der hydrothermalen Behandlung zurückgeführt (s. Kap. 4.3.2.1.1). Calciumsilikathydratphasen zwischen den Monofilamenten sind kaum festzustellen. Dieses Phänomen deutet auf ein „Auseinander-Filamentieren“ bzw. starke Faserverformungen am Ende der hydrothermalen Beanspruchung hin. Mit diesem Verhalten lässt sich u. a. das reduzierte Festigkeits- und Verformungsverhalten bei Einbau im Porenbeton erklären.

In der Grenzschicht zwischen Kohlenstoffkurzfasern und dem Feststoffmaterial befinden sich Hohlstellen (s. Abb. 5-28, **b**), (1-17)). Die fehlende Affinität zum Feststoff, durch die eingeschränkte Benetzung der Kurzfaser, könnte eine Erklärung liefern (s. Kap. 4.3.2.2.3). Teilweise entstehen in die Struktur eingeprägte Kanäle; der Verbund ist nicht optimal. Das Festigkeits- und Verformungsverhalten unter den untersuchten Beanspruchungen kann dennoch gesteigert werden, was u. a. auf die hohe Faserdichte und die guten mechanischen Eigenschaften der Kohlenstoffkurzfasern zurückzuführen ist. Kurzfasern der Cem-FIL-Reihe zeigen sehr gutes Verbundverhalten. Die Calciumsilikathydratphasen wachsen direkt auf den Oberflächen auf (s. Abb. 5-28, **c**), (1-24)). PAN-Kurzfasern (s. Abb. 5-28, **d**), (2-4)) besitzen keinen bzw. nur noch einen eingeschränkten Verbund zur Matrix. Flüchtige Spaltprodukte (Gasbildung) verhindern die Bildung von Calciumsilikathydratphasen in unmittelbarer Faserumgebung während der hydrothermalen Härtung.

5.7 Schlussfolgerungen

Eine Verstärkung des Porenbetons durch Kurzfasern ist ausschließlich bei formgeeigneten, höher moduligen und höher festen Kurzfasern mit gutem Verbund zum Grundmaterial zu erzielen. Weiterhin haben die Beanspruchungsart, die Fasereinbindung sowie die Gefügestruktur, bei Ausbildung der Feststoff- und Kurzfaserstrukturen, einen hohen Einfluss.

Es ergibt sich der Zusammenhang zwischen den Faserparametern und der faserspezifischen Veränderungen der Feststoffstruktur im Treibprozess. Die Faserverteilung und -orientierung sowie die gestreuten Material- und Formeigenschaften der Kurzfasern müssen berücksichtigt werden. Die Wirkung der Kurzfasern lässt sich somit nur schwer isoliert betrachten.

Die Untersuchung der Gefügestruktur zeigt die vielfältige faserspezifische Ausprägung der Faserstruktur. Viele der in Kap. 5 eingebauten Kurzfasern zeigen starke Faserausrichtungen in Richtung parallel zur Treibrichtung. Entlang der Kurzfasern kommt es faserspezifisch zu einer Umstrukturierung der Feststoffstruktur. Die Ausrichtung der Kurzfasern hat somit eine Ausrichtung des Feststoffs zur Folge. Die erhöhten Feststoffanteile können in Faservorzugsrichtung zusätzlich die Tragwirkung, so u. a. unter Druckbeanspruchung, verbessern.

Wesentliche Steigerungen im Festigkeits- und Verformungsverhalten werden beanspruchungsspezifisch ausschließlich bei formgeeigneten Kurzfasern aus Aramid, alkaliresistentem (AR) Glas und Kohlenstoff festgestellt. Untersuchungen zur Verbesserung des hygrischen Verformungsverhaltens (s. Kap. 5.4) und der optimierten Nutzung anisotroper Gefügestrukturen für die bauphysikalischen Transportphänomene Wärme, Schall und Feuchtetransport (s. Kap. 5.5) durch den Einbau von Kurzfasern sind derzeit noch nicht zielführend.

Aufbauend auf den Untersuchungen in Kap. 5 werden mit den AR-Bündelkurzglasfasern (BGF) und den wasserdispersiblen monofilen AR-Kurzglasfasern (MGF) der Cem-FIL-Reihe (Hersteller: Saint Gobain) weitere Untersuchungen durchgeführt (s. Kap. 6-8). Bei Einbau dieser Kurzfasern in den Porenbeton kann es beanspruchungsspezifisch zu wesentlichen Steigerungen des Festigkeits- und Verformungsverhaltens kommen. Darüber hinaus weisen die BGF und die MGF eine Reihe weiterer positiver Eigenschaften auf. Aufgrund der hohen Gleichförmigkeit, der geringen Hygroskopizität und der optimierten Dispergierbarkeit im zementgebundenen Medium eignen sich AR-Kurzglasfasern hervorragend zur Schaffung der allgemeinen Grundlagen in Verarbeitbarkeit, Treib- und Verformungsverhalten sowie Grünstabilität und Grünstandsfestigkeit bei kurzfaserverstärktem Porenbeton. Weiterhin ermöglichen diese Kurzfasern die Erfassung der Abhängigkeiten zwischen Faserparametern und Gefügestruktur. Die BGF und die MGF werden nach den in Kap. 5 erfolgten Untersuchungen als Vorzugsfasern für den kurzfaserverstärkten Porenbeton angesehen.

Anmerkungen zur Alterungsbeständigkeit und Dauerhaftigkeit

Die Alterungsbeständigkeit und Dauerhaftigkeit der eingebauten Fasermaterialien wird in dieser Arbeit nicht explizit untersucht. Die AR-Glasfasern wird in zementgebundenen Medien (pH-Wert: ca. 12,6) mit großem Erfolg eingesetzt (s. Kap. 4.3.2.2.3). Langzeituntersuchungen zeigen auch in autoklavierten Calciumsilikatmaterialien keine Auffälligkeiten [95]. Die maßgebende langfristige innere Beanspruchungsgröße Alkalität ist durch den im Porenbeton herrschenden pH-Wert 8,8-9,3 reduziert (s. Kap. 2.4.3). Dadurch sind die Schädigungspotentiale deutlich herabgesetzt.

6. Einfluss der Kurzfasern auf Eigenschaften der Anfangssuspension, Treibverhalten, Grünstabilität sowie Grünstandsfestigkeit des Porenbetons

Überblick

Kurzfasern beeinflussen die Fließeigenschaften der Anfangssuspension des Treibmediums. Kritische Faserparameter sowie die stoffliche Beschaffenheit und die Bedingungen beim Einfüllen in den Treibbehälter können zu Faserverteilungs- und Faserorientierungsinhomogenitäten führen. Es zeigen sich starke Abhängigkeiten zwischen Faseranfangs- und Faserendorientierungen im „Treibkuchen“. Durch die Treibprozessgrößen und die Faserparameter kann die Ausrichtung der Kurzfasern parallel zur Treibrichtung gesteuert werden. In einer gezielten Einprägung der Faserorientierung zur Beanspruchungsrichtung können große Potenziale für Steigerungen im Festigkeits- und Verformungsverhalten liegen. Treibkinetik und Porosierungsgrad des Treibmediums sind faserabhängig. Die Grünstabilität des „Treibkuchens“ wird durch den Einbau von Kurzfasern erhöht. Der Zeitpunkt des Erreichens der Grünstandsfestigkeit kann vorverlegt bzw. die Grünstandsfestigkeit kann gesteigert werden.

6.1 Mischungszusammensetzung, Herstellung, Randbedingungen

Die Mischungszusammensetzung, das Herstellungsverfahren sowie die Randbedingungen aus dem industriellen Produktionsprozess, die in Kap. 5.1 verwendet wurden, sind nur unter technisch und zeitlich hohem Aufwand zu realisieren. Die Erarbeitung von Zusammenhängen in Anfangssuspension, Treibkinetik und Porosierungsgrad, Grünstabilität sowie Grünstandsfestigkeit erfordern nicht zwangsläufig diesen Aufwand. Vereinfachend wird in Kap. 6 nachstehende Mischungszusammensetzung bei angegebenen Randbedingungen eingesetzt. Die Herstellung wird untersuchungsspezifisch angepasst.

• Bindersand (W10, Quarzwerke Frechen, Weferlingen)	57,0 M.-%
• Branntkalk (WFK 11/6, Fels Werke, XELLA International GmbH, Rübeland)	17,0 M.-%
• Portlandzement (CEM I 32,5 R, Rüdersdorfer Zementwerke, CEMEX, Rüdersdorf)	16,0 M.-%
• Anhydrit (Anhydrit Extra, Harzer Gipswerke, Osterode)	3,0 M.-%
• Wasser-Mehlkorn-Verhältnis	0,55
• Aluminiumpulver (STAPO Alupor, ECKART Werke, Fürth)	• Untersuchungsspezifisch angepasst: – Gehalt: 0,05-0,11 M.-% / Mehlkorngesamt – Feinheit: RO 200 und RO 450

Randbedingungen:

- Mischungssequenz nach Kap. 5.1 (Kleintrührwerk),
- Anmischvolumen: 200-500 ml (Glasbehälter),
- Abguss- bzw. Treibmilieu: – Temperatur $T = 32^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2^{\circ}\text{C}$),
– Relative Luftfeuchtigkeit $\varphi = 50\%$ ($\pm 10\%$).

Die Kurzfasern zur Untersuchung der Verhaltensweisen werden in Material, Form sowie Konzentration an die Untersuchungsmethodik angepasst. Vorzugsweise werden die monofilen, wasserdispersiblen alkaliresistenten (AR) Kurzglasfasern (MGF) Saint Gobain (SG) Cem-FIL ARC20 70/30 bzw. die AR-Bündelkurzglasfasern (BGF) SG Cem-FIL ARC20 62/2 eingesetzt (s. Kap. 5.7: Vorzugsfasern).

Das röntgen-radiographische Verfahren, genutzt zur „in situ“ Bestimmung der Faserposition in der Anfangssuspension (s. Kap. 6.2) und der Verfolgung der Faserbewegungen im Treib-

prozess (s. Kap. 5.2.1), erfordert Kurzfasern, die hochfrequent aufgelöste Ortsinformationen liefern. Die Belichtungszeit sollte, zum Erhalt rauscharmer Bilder in der treibenden Bewegung, < 5 s betragen. BGF und MGF liefern bei der erforderlichen kurzen Belichtungszeit im Treibprozess sowie den fehlenden Absorptionsunterschieden gegenüber der integral erfassten stark strukturierten Porenbeton-Suspension (Durchstrahlungsdicke $d > 1$ cm) keinen ausreichenden Kontrast. Es müssen Kurzfasern mit den Faserparametern Faserfeststoffdichte $\rho_f \geq 5,0$ g/cm³ und Faserdurchmesser $d_f \geq 60$ µm eingesetzt werden.

Für das röntgen-radiographische Verfahren werden somit ausschließlich Metallkurzfasern aus Kupfer bzw. Edelstahl eingesetzt. Metallkurzfasern mit $d_f = 0,1$ mm und $d_f = 0,2$ mm werden jeweils aus Kupfer- und Edelstahl-Kabeldraht (Litzen) manuell in die Faserlängen $l_f = 3$ mm und $l_f = 6$ mm geschnitten. Ergänzend kommen kommerzielle Kurzfasern mit $d_f = 0,3$ mm und $d_f = 0,5$ mm aus Edelstahl mit gleicher Faserlänge zum Einsatz. Alle eingesetzten Kurzfasern sind in der morphologischen Verlaufsform lang gestreckt (s. Kap. 4.3.1.1).

Voruntersuchungen über die Synchrotron-Radiographie zeigen, dass mit diesem Verfahren auch Kurzfasern mit den Faserparametern $\rho_f \geq 2,0$ g/cm³ und $d_f \geq 30$ µm bei o. g. Versuchsparametern und Belichtungszeiten erfasst werden können (s. Kap. 5.2.1). Aufgrund des begrenzten Gesichtsfelds (Synchrotronstrahlgeometrie: max. 7×4 mm²) sowie des hohen Untersuchungsaufwands erwies sich diese Methode allerdings für systematische Untersuchungen im Rahmen dieser Themenstellung als ungeeignet.

6.2 Eigenschaften der Anfangssuspension

Die Eigenschaften der faserversetzten Anfangssuspension haben Einfluss auf Treibkinetik, Strukturstabilität und Porosierungsgrad sowie auf entstehende Gefügestrukturen.

6.2.1 Verarbeitbarkeit, Fließfähigkeit, Homogenität

Die Grenzen der Verarbeitbarkeit von Kurzfasern ergeben sich aus der Sicherstellung der Dispergierbarkeit aller Mischungskomponenten, dem Fließvermögen bzw. der Fähigkeit zum Niveaueausgleich der Anfangssuspension (s. Kap. 5.1) sowie der erforderlichen Schaffung homogener Gefügestrukturen im getriebenen Zustand des Porenbetons. Faserspezifisch zeigen sich bei Fasereinbau deutlich unterschiedliche Verhaltensweisen. Wichtige Einflussfaktoren sind Material und Form der Kurzfasern sowie die Faserkonzentration (ψ_f).

Kurzfasern mit schlechter Rieselfähigkeit zeigen Einschränkungen in der Einmischbarkeit. Der intensive turbulente Mischprozess verursacht starke Faser-Faser-Wechselwirkungen in der Mischung. Diese sind umso höher, je größer Faserkonzentration (ψ_f), Faserlänge (l_f) und Faserdurchmesser (d_f) sind. Kurzfasern mit geringerer Biegesteifigkeit lassen sich deutlich schwerer dispergieren. Im Mischprozess können sich „Igel“ durch „Ineinanderhaken“ der Kurzfasern bilden. Hohe Mehlkornanteile in der Porenbeton-Suspension reduzieren die Fähigkeit zu einer Vereinzelung der Kurzfasern wesentlich. Die „zermahlende“ bzw. dispergierende Wirkung, die bei Einbau größerer Gesteinskörnungen in den faserversetzten Mischungen auftritt, ist hier nicht vorhanden. Viele dieser genannten einschränkenden Verhaltensweisen wurden bei Einbau der Faservariationen nach Tab.-A.: 2 festgestellt (s. Kap 5.1).

Kurzfasern erhöhen den Wasseranspruch im Mischprozess. Wasser kann materialabhängig adsorptiv im Fasergefüge oder an den Faseroberflächen gebunden werden. Faserigel bzw. Fasercluster können Wasseranteile bindend einschließen.

Untersuchungen

Die folgenden Untersuchungen zeigen die Grenzen der Verarbeitbarkeit ($\psi_{f,krit}$), beispielhaft bei Einbau der wasserdispersiblen monofilen alkaliresistenten (AR) Kurzglasfasern (MGF) Saint Gobain (SG) Cem-FIL ARC20 70/30 bzw. bei Einbau der AR-Bündelkurzglasfasern (BGF) SG Cem-FIL ARC20 62/2, unter Variation der Faserparameter l_f und ψ_f , auf.

Die Untersuchungen dienen als Vorarbeit für den systematischen Einbau der BGF und der MGF in den Porenbeton (s. Kap. 7). Mischungszusammensetzung sowie Randbedingungen folgen, gegensätzlich zu Kap. 6.1, dem Kap. 5.1. Die faserversetzte Anfangssuspension wird in einen transparenten Abgussbehälter (80 x 80 x 160 mm³, quadratische Grundform) gegeben und durch unregelmäßiges Durchrühren mit einem Glasstab erneut homogenisiert. Anschließend wird die Suspension definiert über die flache Seite des Abgussbehälters abgegossen (s. **Abb. 6-1**). Die Abgussmenge der faserversetzten Anfangssuspension wird über einen Schieber, der eine Öffnung von 1,5 cm freigibt, kontrolliert. Im Auffangbehälter werden stichpunktartig die Kurzfasern über ein Sieb volumenbezogen „ausgewaschen“.

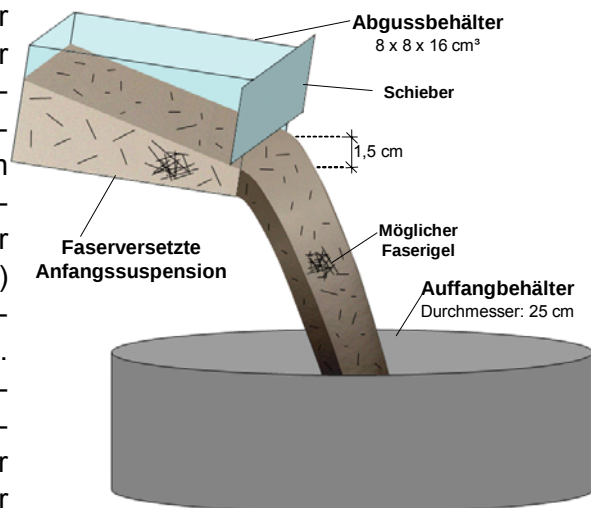


Abb. 6-1 Bestimmung der Grenzen der Verarbeitbarkeit bei Einbau von Kurzfasern in Abhängigkeit von Faserlänge (l_f) und Faserkonzentration (ψ_f)

Die Grenzen der Verarbeitbarkeit werden über die „subjektive“ Beurteilung des Fließverhaltens und der Dispergierbarkeit der faserversetzten Anfangssuspension festgestellt. Als Beurteilungskriterium dienen die Fähigkeit des igel- bzw. blockierungsfreien Abgusses aus dem Abgussbehälter und die Homogenität der Faserverteilung im Auffangbehälter.

Abb. 6-2 zeigt zusammenfassend die ermittelten Grenzen der Verarbeitbarkeiten.

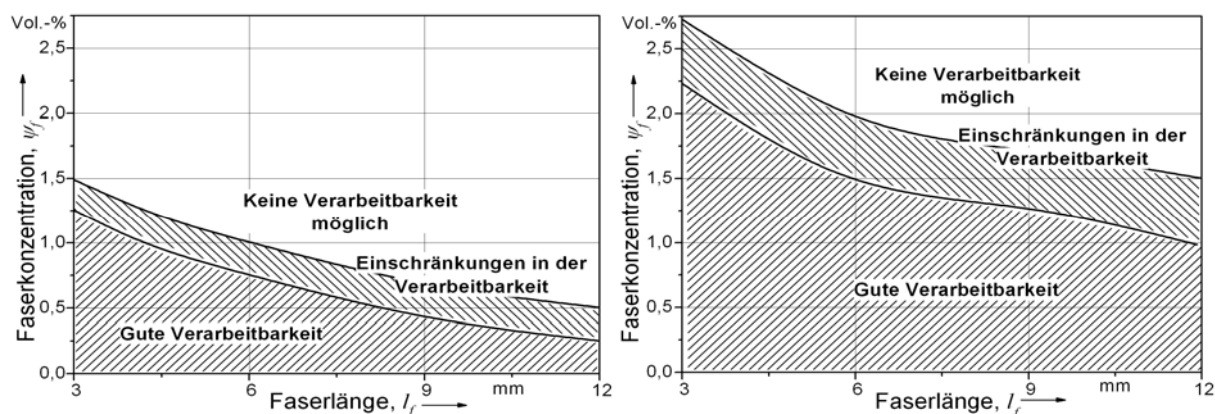


Abb. 6-2 Grenzen der Verarbeitbarkeit ($\psi_{f,krit}$), beispielhaft bei Einbau der alkaliresistenten (AR) Kurzglasfasern in Abhängigkeit von Faserlänge (l_f) und Faserkonzentration (ψ_f). **links:** Verhalten bei Einbau der wasserdispersiblen monofilen AR-Kurzglasfasern (MGF) Saint Gobain (SG) Cem-FIL ARC20 70/30, **rechts:** Verhalten bei Einbau der AR-Bündelkurzglasfasern (BGF) SG Cem-FIL ARC20 62/2

Bei Einbau der BGF (s. **Abb. 6-2, rechts**) zeigen sich im Vergleich zur MGF (s. **Abb. 6-2, links**) deutlich höhere maximale Faserkonzentration in Abhängigkeit von der Faserlänge. Diese ergeben sich vorzugsweise aus den gesteigerten Faserabständen (Verringerung der Faser-Faser-Wechselwirkungen), reduzierten wasserbindenden Faseroberflächen sowie höheren Biegesteifigkeiten der Kurzfasern. Bei Einbau der BGF ist die kritische Verarbeitungslänge $l_f > 12$ mm. Faserlängen $l_f > 12$ mm führen zur Clusterbildung im Auffangbehälter. Die Kurzfasern sammeln sich nach dem Auftreffen auf dem Behälterboden in den Randbereichen des Auffangbehälters; es kommt zum „Faserentmischen“ (Trägheitswirkung). Die kapillare Wasseraufnahme in die Filamentstruktur der Bündel über die Mischzeit ist unerheblich.

Bei Einbau der MGF ergibt sich eine kritische Verarbeitungslänge $l_f > 9$ mm. Bereits bei geringer Faserkonzentration werden bei $l_f = 12$ mm trotz intensiven Mischens „Faserigel“ festgestellt. Die Kurzfasern lassen sich im Mischprozess kaum noch separieren. Die fehlende

Biegesteifigkeit der MGF und der daraus resultierende hohe Anteil gekrümmter Kurzfasern begünstigt den Aufbau lokaler Faserzusammenballungen. Es werden deutliche Unebenheiten auf der Oberfläche der Suspension im Auffangbehälter festgestellt. Untersuchungen bei Einbau der MGF in die Trockenmischung und nachträglicher Wasserzugabe ergeben keine Steigerungen in den Grenzen der Verarbeitbarkeit ($\psi_{f,krit}$).

6.2.2 Anfangsverteilung und -orientierung der Kurzfasern

Die flüssige Beschaffenheit der Anfangssuspension bei hohem Mehlkornanteil hat deutlichen Einfluss auf die Faserverteilung und -orientierung. Durch das Einfüllen ergeben sich in Strömungsrichtung orientierte Faserstrukturen im Treibmedium als Ausgangspunkt für den Treibprozess. Es zeigen sich starke Inhomogenitäten in der Faserverteilung (s. Kap. 5.2.1).

Die faserversetzte Anfangssuspension des Porenbetons zeigt rheodynamische und strukturviskose Fließeigenschaften beim Einfüllen. Die rheodynamischen Fließeigenschaften ergeben sich aus der Scherbeanspruchung bei Umorientierung der Kurzfasern in der turbulenten Fließströmung. Bei anfänglich statistisch verteilten, unorientierten Kurzfasern wird das Fließverhalten der faserversetzten Suspension durch einen Viskositätsanstieg und eine nachfolgende Viskositätsabnahme bei Faserumorientierung in der Fließströmung charakterisiert [17]. Turbulente Strömungen zeigen deutlich „Faserspuren“ in Strömungsrichtung. Die strukturviskosen Fließeigenschaften ergeben sich aus dem ausgeprägten Einfluss von Wechselwirkungen der Kurzfaserstruktur gegenüber den viskosen Fließkräften bei kleinen Scherbeanspruchungen. Diese wirken somit in Bereichen, in denen die Fließströmung beim Einfüllen im Treibbehälter reduziert ist, wie z. B. in den Randbereichen bzw. in den Behälterecken.

Anfangsverteilung ($\chi_{f,3D}$) und -orientierung ($\eta_{f,3D}$) der Kurzfasern im Treibbehälter sind u. a. von folgenden stofflichen Einflussparameter abhängig:

- Chemische und physikalische Mischungszusammensetzung,
- Materialbezogenheit der Kurzfasern (u. a. Faserfeststoffdichte (ρ_f), Schlichte, Hydrophilie),
- Formbezogenheit der Kurzfasern (u. a. Faserlänge (l_f), Faserdurchmesser (d_f)),
- Faserkonzentration (ψ_f).

Neben der Beschaffenheit der faserversetzten Anfangssuspension haben die Bedingungen beim Einfüllen großen Einfluss. Folgende Einflussparameter sind maßgebend:

- Einfüllrichtung und -geschwindigkeit,
- Flussrate und Menge der faserversetzten Anfangssuspension,
- Schalungsform und -berandung.

Untersuchungen

Untersuchungen über die digitale Röntgen-Radiographie zeigen „in situ“ theoretisch zweidimensional (2D) Möglichkeiten für inhomogene lokale Faseranfangsverteilungen ($\chi_{f,3D}$) und -orientierungen ($\eta_{f,3D}$).

Eine Küvette (Polyvinylchlorid, 150 x 80 x 10 mm³) wird mit einer Einfüllhöhe von ca. 30 mm befüllt (s. **Abb. 6-3**). Als Messapparatur wird die 225-kV-Mikrofokus-Röntgenröhre bei Nutzung der Messparameter 40 kV und 200 μ A (ohne Vorfilter) eingesetzt (s. Kap. 5.2.1). Als Auflösung wird 50 μ m/Pixel gewählt; das Gesichtsfeld beträgt 80 x 100 mm².

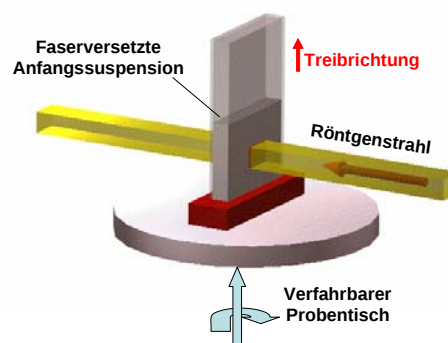


Abb. 6-3 „In situ“ röntgen-radiographische Untersuchung der Faserdistribution und -orientierung nach dem Einfüllen der Anfangssuspension; Küvettenaufbau

Mischungszusammensetzung bzw. Randbedingungen werden nach Kap. 6.1 eingesetzt. Es

werden ausschließlich Metallkurzfasern eingesetzt, diese sind, aufgrund ihrer Material- und Formspezifika, gesteigert anfällig für Inhomogenitäten in $\chi_{f,3D}$ und $\eta_{f,3D}$. Die Faserkonzentration wird an die Fragestellung angepasst. O. g. Einflussparameter werden stichpunktartig variiert.

Abb. 6-4 zeigt drei Beispiele für Faserverteilungsinhomogenitäten ($\chi_{f,3D}$).

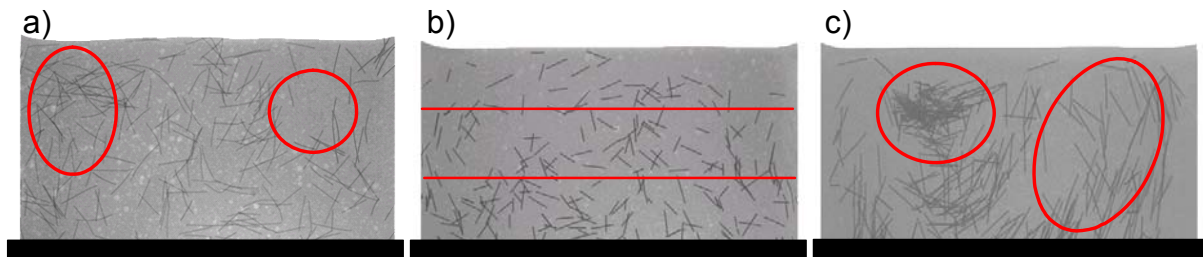


Abb. 6-4 Inhomogene lokale Faserverteilungen ($\chi_{f,3D}$) in der Anfangssuspension, **a)** Clusterbildung im Randbereich bzw. Leerraum (z. B. Kupferkurzfasern, Faserdurchmesser $d_f = 100 \mu\text{m}$, Faserlänge $l_f = 6 \text{ mm}$), **b)** Verteilungsdifferenzen über die Einfüllhöhe (z. B. Edelstahlkurzfasern, $d_f = 500 \mu\text{m}$, $l_f = 3 \text{ mm}$), **c)** Igelbildung bzw., ergänzend zu Abb. 6-5, Faservorzugsorientierungen in Einfüllrichtung (z. B. Edelstahlkurzfasern, $d_f = 500 \mu\text{m}$, $l_f = 6 \text{ mm}$)

Abb. 6-4, a) zeigt Fasercluster im Randbereich links bzw. Leerräume im Randbereich rechts in der faserversetzten Anfangssuspension (s. rote Markierungen). Diese können u. a. durch ungleichmäßiges Eingießen bzw. durch sterische Faser-Faser-Wechselwirkungen, hervorgerufen werden. **Abb. 6-4, b)** stellt Differenzen in der Faserverteilung über die Höhe der Einfüllung dar, der mittlere Faserabstand (s_f) nimmt nach oben ab. Dieses Phänomen zeigt sich bei hoher Einfüllgeschwindigkeit bzw. bei Kurzfasern mit gesteigertem Sinkverhalten in der Anfangssuspension (s. Kap. 4.3.4.1). Starke Faserigel und Verteilungsunterschiede aus der Faserorientierung der Kurzfasern in der Strömung sind in **Abb. 6-4, c)** sichtbar. Faserigel werden vorzugsweise bei kritischer Faserform, geringer Faserbiegesteifigkeit (s. Kap. 6.2.1) und hoher Faserkonzentration gebildet.

Abb. 6-5 zeigt drei Beispiele für Faservorzugsorientierungen ($\eta_{f,3D}$).

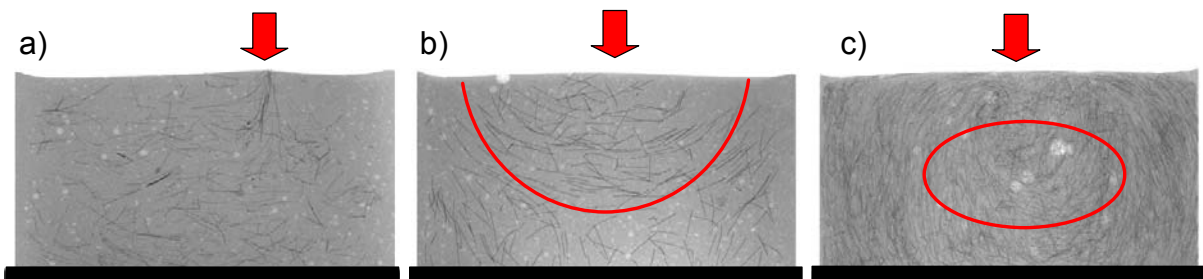


Abb. 6-5 Vorzugsorientierungen von Kurzfasern in der Anfangssuspension, **a)** „Eintrittspur“ der Kurzfasern am Einfüllpunkt (z. B. Kupferkurzfasern, Faserdurchmesser $d_f = 100 \mu\text{m}$, Faserlänge $l_f = 6 \text{ mm}$), **b)** Halbkreisförmige Kurzfaserverstrukturen im oberen Bereich (z. B. Kupferkurzfasern, $d_f = 100 \mu\text{m}$, $l_f = 6 \text{ mm}$), **c)** Kreisförmige Kurzfaserverstrukturen über den gesamten Einfüllbereich (z. B. Edelstahlkurzfasern, $d_f = 200 \mu\text{m}$, $l_f = 6 \text{ mm}$)

Abb. 6-5, a) zeigt eine „Faserspur“ im Einfüllbereich, im unteren Bereich der eingefüllten Anfangssuspension liegen die Kurzfasern vorzugsweise statistisch orientiert vor. Ein Phänomen, das sich bei langsamem Einfüllen der faserversetzten Anfangssuspension feststellen lässt. **Abb. 6-5, b)** stellt halbkreisförmige Faserstrukturen im oberen Bereich der Anfangssuspension dar. Diese ergeben sich u. a. bei sukzessiver Steigerung der Einfüllgeschwindigkeit. Bei einer hohen Einfüllgeschwindigkeit zeigen sich nach **Abb. 6-5, c)** kreisförmige Anordnungen der Faserstrukturen (s. rote Markierungen). Diese entstehen im Wesentlichen durch Interaktion der faserversetzten Suspension mit dem Küvettenboden bzw. den Küvettenwänden beim Einfüllen (Pralleffekte). Es kommt zu Faserverwirbelungen in der Küvette.

Die Kurzfaserverstrukturanalyse nach Kap. 5.1 sowie die röntgen-radiographische Küvettenuntersuchung zeigen, dass lokal differierende Faserverteilungen ($\chi_{f,3D}$) und Inhomogenitäten in

der Faserorientierung ($\eta_{f,3D}$) in der Anfangssuspension kaum zu vermeiden sind. Kurzfasern sind somit im industriellen Produktionsprozess unter üblichen Einfüllbedingungen nicht homogen verteilt und isotrop orientiert in die Anfangssuspension des Treibbehälters einzubauen. Die Inhomogenitäten aus $\chi_{f,3D}$ korrelieren nicht zwangsläufig mit den Anisotropien aus $\eta_{f,3D}$. Die Faserorientierung ist deutlich anfälliger für Inhomogenitäten in der Anfangssuspension.

6.2.3 Strukturstabilität der Anfangssuspension durch Kurzfasern

Kurzfasern können die Anfangssuspension stabilisieren. Die Partikelsedimentation, die u. a. Rohdichteunterschiede über die Treibhöhe hervorruft (s. Kap. 2.2.3), wird reduziert. Makroskopisches Merkmal der Partikelsedimentation ist die Bildung eines Wasserfilms auf der Suspensionsoberfläche. Die Sedimentation wird i. d. R. bei Einsetzen des Treibprozesses von Treibphänomenen überlagert und klingt mit zunehmendem Ansteifen des Treibmediums ab.

Untersuchungen

Untersuchungen mit dem Schwingungsrheometer PHYSICA RHEOSWING [16] sollen die Strukturstabilität bei Einbau der alkaliresistenten (AR) Bündelkurzglasfasern (BGF) Saint Gobain Cem-FIL ARC20 62/2 und der wasserdispersiblen monofilen AR-Kurzglasfasern (MGF) SG Cem-FIL ARC20 70/30 in der Anfangssuspension bewerten.

Das Messprinzip beruht darauf, dass ein Metallstab bei geeigneter Torsionsresonanzfrequenz „online“ in einer ungestörten faserversetzten Suspension schwingt und über Wechselwirkungen mit der Grenzschicht der Suspension Dämpfungen erhält. Diese Dämpfungen werden, unter Berücksichtigung der Eigendämpfung des ungestörten „Schwingers“, in dieser Arbeit zur Bestimmung einer Dämpfungskennzahl verwendet.

Die Mischungszusammensetzung bzw. die Randbedingungen folgen Kap. 6.1. Es werden 250 ml faserversetzte Anfangssuspension in einen 450-ml-Glasmessbecher gegeben und homogenisiert. Die Messung erfolgt im unteren Bereich des Torsionsstabs (ca. 1 cm oberhalb des Messbecherbodens) (s. **Abb. 6-6**). Bei Partikelsedimentation wird die Dämpfungskennzahl bei sonst konstanten Verhältnissen in der Anfangssuspension erhöht. Betrachtet werden ausschließlich die ersten fünf Minuten nach Einfüllen in den Messbecher.

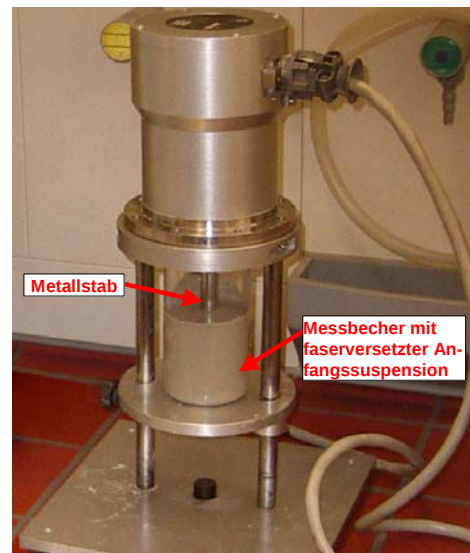


Abb. 6-6 Untersuchung der Strukturstabilität der faserversetzten Anfangssuspension; Aufbau des PHYSICA RHEOSWING

Die Untersuchungen zeigen, dass die Partikelsedimentation in der Anfangssuspension durch Einbau von BGF und MGF reduziert werden kann. Die Partikelsedimentation nimmt mit Steigerung der Faserkonzentration (ψ_f), der Faserlänge (l_f) und der Reduzierung des mittleren Faserabstands (s_f) weiter ab.

Abb. 6-7 zeigt beispielhaft das Verhalten in der Anfangssuspension bei Einbau der MGF ($l_f = 3$ mm, $\psi_f = 0,50$ -, $0,75$ -, $1,00$ Vol.-%), vergleichend zu einer nicht faserversetzten Suspension (Referenz). Die Referenz zeigt einen deutlichen Anstieg der Dämpfungskennzahl in den Anfangsminuten. Durch Einbau der MGF reduziert sich in Abhängigkeit von ψ_f dieses Phänomen, bereits ca. $\psi_f = 0,75$ Vol.-% reichen aus, um die Partikelsedimentation bei o. g. Mischungszusammensetzung und Randbedingungen auszuschließen. Bei Steigerung der Faserlänge von $l_f = 3$ mm auf $l_f = 6$ mm ($\psi_f = 0,50$ Vol.-%) kann die Dämpfungskennzahl bzw. der zeitliche Verlauf weiter reduziert werden. Die Partikelsedimentation und somit die Strukturstabilität der Anfangssuspension werden weiter erhöht.

Die Dämpfungskennzahl in der Anfangssuspension zum Zeitpunkt $t = 0$ s wird bei Steigerung von Faserkonzentration (ψ_f) und Faserlänge (l_f) bzw. bei Reduzierung des mittleren Faserabstands (s_f) ebenfalls erhöht.

Diese Verhaltensweisen werden im Wesentlichen auf die Netzwerkstrukturausbildung in der Anfangssuspension zurückgeführt. Untersuchungen von Fasersuspensionen durch Hochstein [31] zeigen, dass mit der Steigerung von ψ_f bei sonst konstanten Verhältnissen die Speichermodule ansteigen. In Bereichen, in denen die fluiddynamischen Kräfte die Fließvorgänge nicht dominieren, werden die elastischen Eigenschaften der Suspension durch Kurzfasern verstärkt. Die Kurzfasern bilden in der Suspension ein "Gerüst" bzw. "Netzwerk" aus, das elastische Energie aufnimmt; die Anfangssuspension steift an.

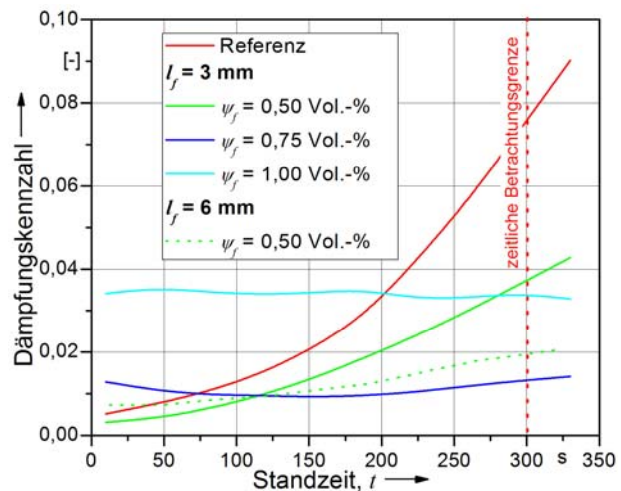


Abb. 6-7 Einfluss des Einbaus der wasserdispersiblen monofilen alkaliresistenten Kurzglasfasern (MGF) Saint Gobain Cem-FIL ARC20 70/30 auf die Stabilität der Anfangssuspension - Verlauf der Dämpfungskennzahl in Abhängigkeit zur Standzeit, ermittelt über das PHYSICA RHEOSWING

6.3 Treibverhalten

Kurzfasern beeinflussen den Treibprozess, sie orientieren sich faser- und treibprozessabhängig um. Treibkinetik sowie Porosierungsgrad variieren u. a. in Abhängigkeit von Fasermaterial, -form und -konzentration.

6.3.1 Allgemeines

Mithilfe eines mechanischen Expandometers (s. **Abb. 6-8, links**) werden Treibkinetik und Porosierungsgrad (μ_T) des unverstärkten Porenbetons ermittelt. Dazu wird ein Glaszylinder (Durchmesser $d = 37$ mm) bis zu einer Höhe $h = 4$ cm befüllt; die Treibbewegung wird über einen aufgesetzten Stempel kontinuierlich digitalisiert aufgenommen. Die Reibungskraft zwischen Glaswand und Stempel bzw. die Stempelauflast wird vernachlässigt. Zum Einsatz kommt eine Mischungszusammensetzung nach Kap. 6.1. In Abhängigkeit von den Porosierungsparametern nach Kap. 2.3.1.1 werden folgende Treibprozessgrößen betrachtet:

- Porosierungsgrad (μ_T),
- Treibprozessgeschwindigkeit (v_T),
- Treibzeit (t_T).

Abb. 6-8, rechts zeigt beispielhaft die zeitliche Entwicklung von μ_T im Treibprozess in Abhängigkeit vom Gehalt des Porosierungsmittels RO 200 ($< 71 \mu\text{m} = 85 \text{ M.-%}$). Weiterhin wird das Verhalten bei Einbau des feineren RO 450 ($< 71 \mu\text{m} = 98 \text{ M.-%}$) dargestellt (s. Kap. 6.1).

Der Treibprozess verläuft bis zu einem Porosierungsmittelgehalt von 0,11 M.-% bei beiden Porosierungsmitteln stabil. Weitere Steigerungen des Porosierungsmittelgehalts führen bei beiden Porosierungsmitteln zu Instabilitäten im Treibprozess; das Treibmedium kann zusammenstürzen. Der Zeitpunkt des Treibprozessbeginns bzw. der Zeitpunkt der Maximalgeschwindigkeit des Treibprozesses verschiebt sich mit der Erhöhung des Porosierungsmittelgehalts bzw. der Porosierungsmittelfeinheit nach vorne. Der Porosierungsgrad (μ_T) verhält sich linear zum Porosierungsmittelgehalt. Der Treibprozess ist bei Nutzung des feineren Porosierungsmittels (RO 450) deutlich früher abgeschlossen.

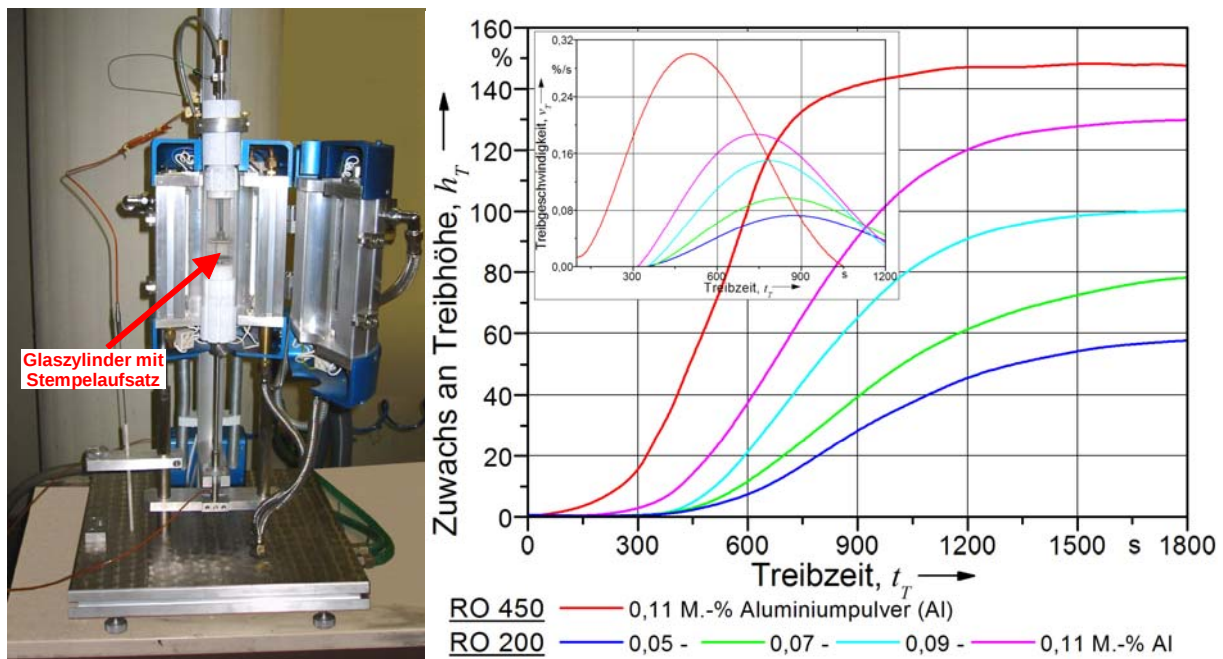


Abb. 6-8 Untersuchung von Treibkinetik und Porosierungsgrad (μ_T) des nicht faserversetzten Porenbetons (Referenz), **links**: Aufbau des mechanischen Expandometers, **rechts**: Porosierungsgrad in Abhängigkeit von der Treibzeit bei Variation des Porosierungsmittelgehalts (RO 200) und der Porosierungsmittelfinheit (RO 450), **oben links**: Geschwindigkeitsprofile der Porosierungsmittelvariationen

Visuelle Gefügestrukturbetrachtungen zeigen, dass bei Steigerung der Feinheit des Porosierungsmittels bei gleichem μ_T (Anpassung über Porosierungsmittelgehalt) in den Makroporositäten deutlich größere mittlere Porenradien entstehen. Die Ursache dafür ist u. a. die höhere Gasfreisetzungsrates bei gleichen Fließeigenschaften (s. Kap. 2.2.3).

Im industriellen Produktionsprozess wird durch die Variation von Gasfreisetzungsrates (z. B. Porosierungsmittelgehalt und -feinheit) und Fließeigenschaften des Treibmediums (z. B. Wasser-Mehlkorn-Verhältnis) die Porengrößenverteilung gesteuert. Untersuchungen an industrienahen Treibkörpern mit Treibhöhen von $h = 60-80$ cm (s. Kap. 5.1) zeigen bereits bei 0,11 M.-% Aluminiumpulver für beide Feinheiten deutliche Instabilitäten. Der Treibkörper stürzt im Endstadium des Treibprozesses in sich zusammen.

6.3.2 Einfluss der Kurzfasern auf den Treibprozess

Die Einflüsse von Kurzfasern im Treibprozess lassen sich in indirekte Einflüsse bei Veränderung der Fließeigenschaften des Treibmediums und Einflüsse aus der direkten Wirkung der Kurzfasern im Treibmedium unterteilen. Im Folgenden werden die Einflüsse über eine Energiebilanz des gesamten Treibmediums erfasst und diskutiert; die Gl. [2-7] wird herangezogen und durch die Fasereinflussgrößen erweitert. Die Treibenergie, die in Treibhöhe umgesetzt wird (G_T), ergibt sich im faserversetzten Treibmedium aus den Energieanteilen nach Gl. [6-1]:

$$G_T = [G_P] - [G_a + G_\gamma + G_{hy}] - [G_\tau] - [G_{gas}] - [G_{f,kin}] - [G_{f,el}] \quad [6-1]$$

Energie des normalen Treibprozesses		Faserspezifische Treibenergien		$[G_i] = J$
G_T	Treibenergie (real)	G_{hy}	Energie aus Überwindung des hydrostatischen Drucks des Treibkörpers	
G_P	Porosierungsenergie bei vollständiger Umsetzung in Treibhöhe	G_τ	Energie aus Schubwiderstand des Treibmediums	
G_a	Energie aus Überwindung des Drucks aus dem Außenmedium	G_{gas}	Energieverlust aus der Gasentweichung	
G_γ	Energie aus Überwindung der Oberflächenspannung	$G_{f,kin}$	Energie aus Faserkinetik	
		G_{el}	Energie aus gespeicherter elastischer Energie der Fasernetzwerke	

Die Porosierungsenergie (G_P) entsteht aus der Freisetzung des Wasserstoffs nach Gl. [2-7] in der Porenbetonsuspension. G_P wird jedoch nicht vollständig in Treibenergie (G_T) (Volumenvergrößerung des Treibmediums) umgesetzt. Neben dem Verlust von Energieanteilen durch die Entgasung aufsteigender Poren zu Beginn des Treibprozesses (G_{gas}) wird G_T durch Energiepotenziale aus dem hydrostatischen Druck des Treibmediums (G_{hy}), dem Druck des Außenmediums (G_a) sowie der Oberflächenspannung der Poren (G_γ) vermindert. Des Weiteren ist der Schubwiderstand des Treibmediums zu überwinden, erfasst im elastischen Energieanteil G_e . Faserspezifisch sind weiterhin Energien aus der Faserkinetik ($G_{f,kin}$) und aus der Elastizität des Fasernetzwerks ($G_{f,el}$) zu überwinden. Im Folgenden werden die einzelnen Energieanteile bzw. deren Zusammenhänge im Treibprozess betrachtet.

6.3.2.1 Einfluss der Kurzfasern auf die Fließeigenschaften des Treibmediums

Kurzfasern erhöhen den Wasseranspruch. Die Fließgrenze (τ_0) des Treibmediums, das wesentliche Maß für die Porenstabilität, wird heraufgesetzt (s. Gl. [2-8] und Gl. [2-9]). Es zeigt sich somit ein Einfluss der Kurzfasern auf das Treibverhalten des Porenbetons.

Da der Druck zur Überwindung von τ_0 der jeweiligen Spannungsrichtung entgegenwirkt, ergibt sich bei der Referenz ebenso wie im faserversetzten Treibmedium ein Widerstand entgegen der Treibrichtung. Den o. g. Zusammenhängen folgend, ist dieser im faserversetzten Treibmedium größer. Jedoch vermindert das Fasernetzwerk durch Gerüstwirkung die Spannungen aus hydrostatischem Druck und Außendruck. Der Anteil der Porosierungsenergie, der hierfür benötigt wird, resultiert aus der Differenz dieser Spannungen (s. Kap. 6.3.3.2).

Durch die Verringerung der Gasentweichung wird der Energieanteil G_{gas} bei Fasereinbau reduziert. Der Fließwiderstand des ansteyfenden Systems wird durch „Verzahnung“ der einzelnen Partikel des Treibmediums im Treibverlauf erhöht. Kritische Bedingungen, bei denen kein Wachstum stattfinden kann, werden somit bei Fasereinbau nach kürzerer Treibdauer erreicht. Drainagephänomene werden durch die höheren Fließwiderstände reduziert. Bezüglich der Makroporosität zeigt sich eine Verschiebung hin zu kleineren mittleren Porengrößen.

Neben der Bindung von Treibsuspension durch die Faserhydrophilie (s. Kap. 3.5.3) können Kurzfasern Wasseranteile direkt im Körper binden. Hygroskopische Kurzfasern führen lokal um die Fasern zu geringeren Fließeigenschaften. Dies zeigt sich bei größerer Faserform im Fasernahbereich durch die Verschiebung der Porosität hin zu kleineren Porengrößen.

6.3.2.2 Direkter Einfluss der Kurzfasern im Treibmedium

Die Energieanteile aus direktem Fasereinfluss im Treibmedium lassen sich unterteilen in:

- Energie aus Faserkinetik ($G_{f,kin}$),
- Elastische Energie infolge Spannungen im Fasernetzwerk ($G_{f,el}$).

6.3.2.2.1 Energie aus Faserkinetik

Kurzfasern bewirken im Treibprozess einen vermehrten Treibwiderstand durch Faserträgheit und -umorientierung. Der Betrag dieses elastischen Energieanteils ($G_{f,kin}$) unterscheidet sich faserspezifisch. Auf die Kurzfasern wirken Scher-, Druck- und Trägheitskräfte aus dem Treibmedium; die Kurzfasern werden im Treibprozess mitgenommen und richten sich in der nach oben gerichteten Treibströmung aus. Es kommt zu Translations- und Rotationsbewegungen der Kurzfasern im Treibprozess. Durch Faserumorientierungen ergeben sich unter Wechselwirkungen von Kurzfaser, Treibmedium und Treibprozessgrößen sowohl instationäre Scher-, Druck- und Trägheitskräfte als auch rheodynamisches Verhalten.

Die Fasertranslation wird durch Scherkräfte bei Mitnahme der Kurzfasern im Treibprozess in Abhängigkeit von Fasermaterial und -form hervorgerufen. Für die Überwindung der Trägheitsdifferenz aus Faserfeststoffdichte (ρ_f) und umgebender Dichte des Treibmediums (ρ_{pb}),

($\rho_f > \rho_{pb}$) wird Porosierungsenergie (G_P) benötigt. Diese wird als Faserträgheitsenergie ($G_{f,in}$) bezeichnet. Kurzfasern bewegen sich in diesem Fall relativ zur treibenden Suspension.

Die Faserrotation ergibt sich vorzugsweise in Richtung einer Achse parallel zur Treibrichtung (s. Kap. 5.2.1). Das Fließ- und Treibverhalten ist rheodynamisch. Folgende Mechanismen der Faserausrichtung bzw. -umorientierung in einer Strömung sind bekannt:

- Umorientierung der Kurzfasern durch einen Geschwindigkeitsgradient in der Strömung,
- Umorientierung der Kurzfasern durch Ausdehnung des umgebenden Treibmediums,
- Umorientierung der Kurzfasern durch Strömung infolge Scheren,
- Umorientierung durch lokales Wachstum der Makroporen.

Der Grad der Umorientierung hängt von Dauer und Größe der Beanspruchung, Form- und Material der Kurzfasern sowie der Faserkonzentration (ψ_f) ab. Sterische Faser-Faser-Wechselwirkungen sowie Wechselwirkungen der Kurzfasern mit den Partikeln im Treibmedium können die Umorientierung überlagern. Die Energie für die Umorientierung der Kurzfaser ($G_{f,um}$) steht dem System für den Treibprozess nicht mehr zu Verfügung. Im Folgenden werden die Umorientierungsmechanismen von Kurzfasern beschrieben.

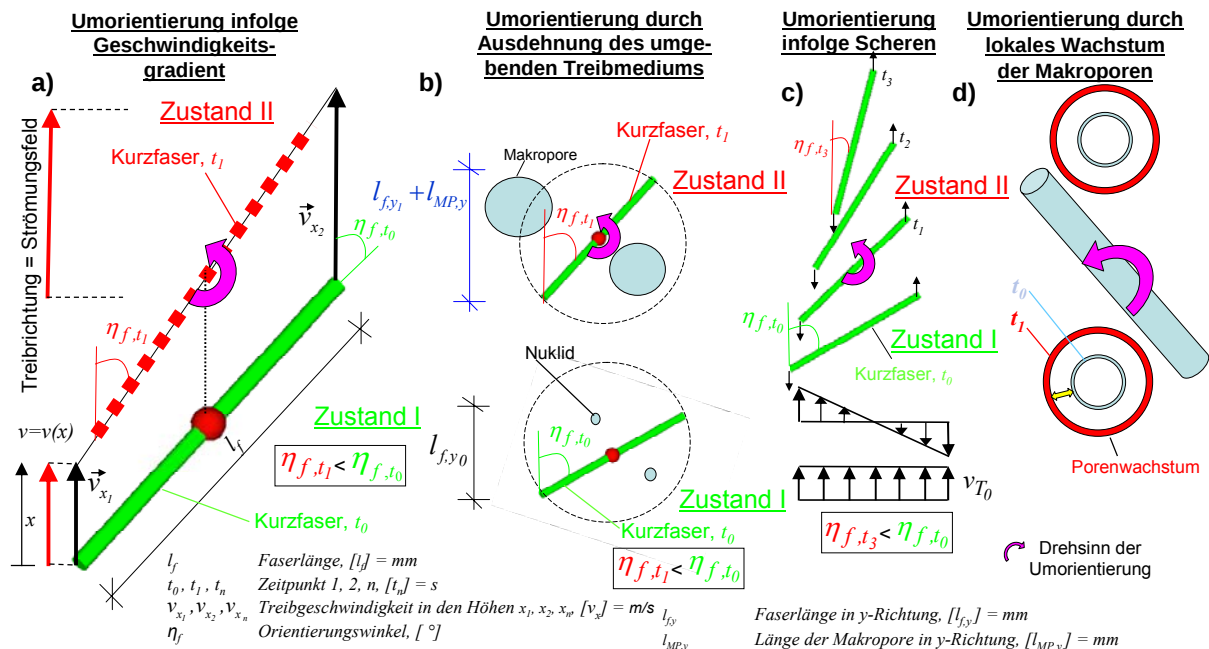


Abb. 6-9 Mögliche Mechanismen der Faserorientierung in der Treibströmung, **a)** Umorientierung der Kurzfaser, bedingt durch Geschwindigkeitsgradienten zwischen den Faserendpunkten, **b)** Umorientierung der Kurzfaser durch Ausdehnung des umgebenden Treibmediums, **c)** Umorientierung der Kurzfaser, bedingt durch Mitnahme des Treibmediums (Scheren), **d)** Umorientierung der Kurzfaser durch lokales Wachstum der Makroporen im Einflussbereich der Kurzfaser

Umorientierung der Kurzfasern durch Strömung infolge Geschwindigkeitsgradient

Die Treibgeschwindigkeit im faserversetzten Treibmedium verändert sich über die Höhe. Wenn sich die Faserenden einer Kurzfaser in unterschiedlicher Höhe befinden, erhalten die Faseroberflächen Reibungskräfte unterschiedlich starker Fließbereiche. Da sich die Kurzfaser nur als starres Ganzes bewegen kann, stimmen Fasergeschwindigkeit und Treibgeschwindigkeit nur an einem Punkt entlang der Kurzfaser überein. Oberhalb und unterhalb dieses Punkts tritt ein Geschwindigkeitsgradient in dem die Kurzfaser umgebenen, nach oben strömenden Treibmedium auf. Auf die Kurzfaser wirkt ein Rotationsanteil; sie richtet sich parallel zur Treibrichtung aus (s. **Abb. 6-9, a)**). Maßgebend ist die Treibgeschwindigkeit.

Umorientierung der Kurzfasern durch Ausdehnung des umgebenden Treibmediums

Das Treibmedium wird durch sukzessives Wachsen der Makroporen im Treibprozess gestreckt. Das sich im Nahbereich der Kurzfaser befindende Treibmaterial dehnt sich ebenfalls aus. Es ergibt sich eine Verlängerung der projizierten Ebene in Treibrichtung. Die Bewegung der Kurzfaser bekommt einen Rotationsanteil und richtet sich parallel zur Treibrichtung aus (s. Abb. 6-9, **b**)). Maßgebend ist der Porosierungsgrad des Treibmediums.

Umorientierung der Kurzfasern durch Strömung infolge Scheren

Kurzfasern besitzen bei der Wirksamkeit fluiddynamischer Kräfte eine starke Tendenz, sich entlang der Stromlinien auszurichten. Orientierte Kurzfasern haben einen kleineren Strömungswiderstand (s. Abb. 6-9, **c**)). Bei einer Treibströmung in aufsteigender Richtung würden sich die Kurzfasern vorzugsweise parallel zur Treibrichtung ausrichten. Maßgebend ist die Geschwindigkeit des Treibmediums.

Umorientierung durch lokales Wachstum der Makroporen um die Kurzfaser

Eine Umorientierung durch lokale Porenbildung ergibt sich aus der Entstehung bzw. dem Wachstum von Poren im direkten Rotationswirkungsbereich der Kurzfaser oder indirekt durch Fernwirkungen bei Materialverschiebung. Bei maßgebender Einwirkung bekommen die Kurzfasern einen Rotationsanteil (s. Abb. 6-9, **d**)); sie können sich parallel zur Treibrichtung ausrichten. Kurzfasern geringerer Länge und Dichte sind für diesen Umorientierungsmechanismus deutlich anfälliger. Maßgebend sind höhere Porosierungsgrade.

6.3.2.2.2 Elastische Energie des faserversetzten Treibmediums

Kurzfasern bilden im Treibmedium ein dreidimensionales "Gerüst" bzw. "Netzwerk", welches elastische Energie (G_{fel}) speichert. Diese lässt sich zerlegen in die Energieanteile:

- Energieanteil aus den Poren-Faser-Wechselwirkungen (G_{PFW}),
- Energieanteil aus den Faser-Faser-Wechselwirkungen (G_{FFW}),
- Energieanteil aus dem Faserverbund in unmittelbarer Porenumgebung (G_V).

Poren-Faser-Wechselwirkungen

Kurzfasern können die räumliche Ausdehnung der Poren im Treibprozess behindern. Es ergibt sich ein Energieanteil aus der Poren-Faser-Wechselwirkung (G_{PFW}) in Gl. [6-2].

Das Porenwachstum wird lokal von umliegenden Kurzfasern, angeordnet im Fasernetzwerk, eingeschränkt (s. Abb. 6-10, **a**)). Die Kurzfasern sind in ihrer örtlichen Lage bei einer Faserlänge (l_f), die deutlich größer als der Durchmesser der wachsenden Pore ist, festgelegt. Die Pore muss eine Widerstandskraft (F_w), die eine Lageänderung der Kurzfaser hervorruft, überwinden. Widerstandskräfte ergeben sich aus der räumlich verzweigten Faserstruktur und deren Wechselwirkungen mit dem Treibmedium. Faserkonzentration, -form und -material sowie die Fließeigenschaften des Treibmediums beeinflussen die Poren-Faser-Wechselwirkung. Es zeigen sich ebenfalls Abhängigkeiten von Faserbiege- und -torsionssteifigkeit.

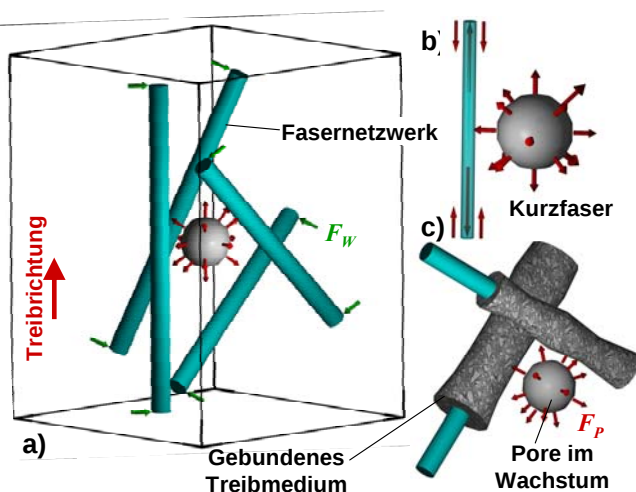


Abb. 6-10 Einflüsseffekte der Kurzfasern auf den Treibprozess, **a**) Poren-Faser-Wechselwirkung, **b**) Aufnahme von Schubspannungen in Umgebung einer wachsenden Pore, **c**) Wechselwirkung zwischen Fasergränzfläche und Treibmedium

Faser-Faser-Wechselwirkungen

Kurzfasern können aufgrund auftretender Faser-Faser-Wechselwirkungen den Treibprozess behindern. Diese Faser-Faser-Wechselwirkungen werden unterteilt in direkte sterische sowie indirekte Wechselwirkungen durch elektrostatische Kräfte und Van-der-Waals-Kräfte. Es ergibt sich ein Energieanteil aus den Faser-Faser-Wechselwirkungen (G_{FFW}) nach Gl. [6-2].

Die Haupteinflussfaktoren der Faser-Faser-Wechselwirkungen sind die Faserkonzentration (ψ_f) und das aspect ratio im faserversetzten Treibmedium.

Advani [1] unterteilt in unter-, halb- und kritische Konzentration in Abhängigkeit von ψ_f und l_f/d_f -Verhältnis in der faserversetzten Suspension (s. Abb. 6-11). Bei unterkritischer Konzentration können Wechselwirkungen zwischen den Kurzfasern ausgeschlossen werden. Bei halbkritischen Konzentrationen entstehen hydrodynamische Wechselwirkungen, bei denen sich die Fließbereiche der Einzelfasern überschneiden. Im Fall einer hohen Konzentration kommt es zusätzlich zu direktem Kontakt über sterische Faser-Faser-Wechselwirkungen. Als Maß zur Charakterisierung dieser Wechselwirkungen kann auch der mittlere Faserabstand (s_f) genutzt werden (s. Gl. [3-7]).

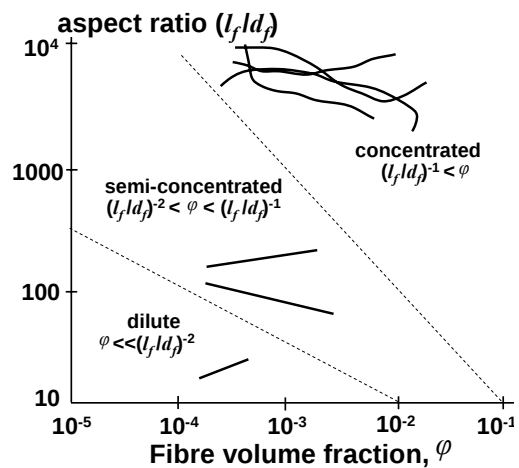


Abb. 6-11 Differenzierung der unterschiedlichen Faser-Faser-Wechselwirkungen [1], Faserdurchmesser (d_f), -länge (l_f), und -konzentration (ψ_f)

Die Faser-Faser-Wechselwirkungen ergeben sich in erster Linie im Einfüllprozess. So werden Faserigel bzw. Faserinhomogenitäten i. d. R. auf den Treibprozess übertragen.

Aufnahme von Schubkräften in unmittelbarer Porenumgebung

Das auftreibende System wird durch die Kurzfasernetzwerk zusammengehalten. Die Kurzfasern nehmen bei einem Porenwachstum in unmittelbarer Fasernumgebung über die Einbinde-länge Faserschubspannungen (τ_f) auf (s. Abb. 6-10, b)). Das Fasernetzwerk wirkt durch diesen Mechanismus dem Porenwachstum und somit dem Treibprozess entgegen, zur Überwindung des elastischen Potenzials ist Porosierungsenergie erforderlich. Die Größe dieser Energie korrespondiert mit der Fasereinbindung und deren Verbund. Letzterer ist abhängig von den Fließeigenschaften und der zeitlichen Entwicklung bzw. den Wechselwirkungen von Kurzfasern und Treibmedium. Die Faserorientierung sowie die mechanischen Eigenschaften der Kurzfasern haben nur eingeschränkten Einfluss auf den Energieanteil G_V nach Gl. [6-2].

6.3.2.2.3 Wechselwirkungen an der Grenzfläche zwischen Kurzfasern und Treibmedium

Die Wechselwirkungen an der Grenzfläche zwischen Kurzfasern und Treibmedium sind in Abhängigkeit zu Hydrophilie, Hygroskopie und Oberflächenstruktur der Kurzfasern zu betrachten.

Die Kurzfasern bindet in Abhängigkeit von Faserhydrophilie und -hygroskopie umliegende Treibsuspension (s. Abb. 6-10, c)). Ein Suspensionsfilm, der sich in Abhängigkeit von den Wechselwirkungen auf der Oberfläche der Kurzfasern adsorptiv bindet, muss im Treibprozess zusätzlich bewegt werden. Der „Raum“, den die suspensionsbindenden Kurzfasern einnehmen, steht für die Porenbildung nur eingeschränkt zur Verfügung. Die Faserhygroskopie reduziert die Fließeigenschaften des Treibmediums um die Kurzfasern; es ergeben sich Einflüsse auf den Treibprozess. Die Faserträgeit wird erhöht. Die Beschaffenheit der Faseroberflächen erhöht die Mantelreibung und damit o. g. Wirkungen aus der Faserschubspannung.

Durch die Fasernorientierung findet eine Umstrukturierung der Fasernetzwerke statt. Der Vernetzungsgrad ist umso kleiner, je größer der Orientierungsgrad der Kurzfasern wird.

Auf Gl. [6-1] aufbauend können die Energieanteile weiter aufgesplittet werden (s. Gl. [6-2]):

$$G_T = [G_P] - [G_a + G_\gamma + G_{hy}] - [G_\tau] - [G_{gas}] - [G_{f,in} + G_{f,um}] - [G_{FPW} + G_{FFW} + G_V] \quad [6-2]$$

⏟

Energie des normalen
Treibprozesses

⏟

Energieverbrauch
durch Faserkinetik
($G_{f,kin}$)

⏟

Energieverbrauch durch gespeicherte
elastische Energie der Faser-
netzwerke ($G_{f,el}$)

$[G_i] = J$

$G_{f,in}$	Energie aus der Masseträgheit der Faser	G_{FFW}	Energie aus Faser-Faser-Wechselwirkungen
$G_{f,um}$	Energie aus der Umorientierung der Faser	G_V	Energie aus dem Faserverbund
G_{FPW}	Energie aus Pore-Faser-Wechselwirkungen		

Durch geeignete Faserwahl ist das Treibmedium reduziert anfällig auf mechanische Beanspruchungen; ein externer Energieeintrag hat geringere Auswirkungen auf die Stabilität des „Treibkuchens“. Sensible Treibprozesse mit hohen Porosierungsgraden sind möglich.

6.3.3 „In -“ und „Ex situ“ Vergleichsstudie des Treibprozesses bei Variation von Faserparametern und Treibprozessgrößen

Für die Untersuchung der faserspezifischen Einflüsseffekte (s. Kap. 6.3.2) bzw. der Zusammenhänge im Treibprozess werden „in situ“ und „online“ die inneren Vorgänge der Fasertranslation und -rotation im Zusammenspiel mit dem Porenwachstum betrachtet. Weiterhin wird „ex situ“ der zeitliche Ablauf von Treibkinetik und Porosierungsgrad untersucht. Versuchsmethodik und Randparameter werden der jeweiligen Fragestellung angepasst.

6.3.3.1 „In situ“ Untersuchung des Treibprozesses

Die Fasertranslationen und -rotationen, die in Interaktion mit dem Porenwachstum im Treibprozess auftreten, werden über die digitale Röntgen-Radiographie zeitlich aufgelöst quantifiziert (Küvettenaufbau-Messparameter: s. Kap. 5.2.1). Die Zusammenhänge zwischen Treibprozessgrößen (s. Kap. 6.3.1) und Faserparameter (s. Kap. 3.3) werden untersucht. Dabei wird die Faserverteilung ($\chi_{f,3D}$) und -orientierung ($\eta_{f,3D}$) ausschließlich über die Projektionsfläche zweidimensional (2D) im Küvettenaufbau bewertet.

Faserversetzte Suspensionen werden nach Kap. 6.1 in eine Küvette (s. Abb. 6-3) gegeben und zum Treiben gebracht. Als Kurzfasern werden ausschließlich Musterkurzfasern aus Edelstahl und Kupfer bei Variation von Faserlänge (l_f) und Faserdurchmesser (d_f) verwendet (s. Kap. 6.2.2). Damit können die Verhaltensweisen nur tendenziell auf die Vorzugsfasern aus alkaliresistentem Glas und deren Faserparameter übertragen werden (s. Kap. 5.7). Die Faserkonzentration (ψ_f) wird so gewählt, dass eine repräsentative Menge im Treibmedium zur Analyse zur Verfügung steht (Faseranzahl $n_f > 200$). Sterische Faser-Faser-Wechselwirkungen sollen nicht auftreten. Die Treibprozessgrößen werden über die Porosierungsmittelfeinheit bei Konstanzhaltung des Porosierungsmittelgehalts variiert, die Umweltbedingungen des Treibprozesses auf die Temperatur $T = 22^\circ\text{C}$ ($\pm 2^\circ\text{C}$) und die relative Luftfeuchtigkeit $\varphi = 50\%$ ($\pm 10\%$) festgelegt. $\chi_{f,2D}$ und $\eta_{f,2D}$ werden durch unregelmäßiges Durchrühren mit einem Stab nach dem Einfüllen homogenisiert. Gleiche Anfangsbedingungen können bei stochastischer Verteilung und isotroper Orientierung der Kurzfasern ($\theta_f = 45^\circ$ ($\pm 2^\circ$)) sichergestellt werden. Die dynamische Treibbewegung wird röntgen-radiographisch alle zwei Sekunden bis zum Abschluss des Treibprozesses erfasst. Die Integrationszeit für jedes Einzelbild ist eine Sekunde; die Bildauflösung wird auf 50 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$ festgelegt.

Zur Orientierungsanalyse werden die Kurzfasern aus den digitalen Röntgen-Radiographien über Schwellwertsetzung extrahiert, binarisiert und gelabelt (s. **Abb. 6-12, a)-c)**, Darstellungen des Treibmediums zu den Zeitpunkten $t_T = 0, 5, 10$ min nach Einfüllen in die Küvette). Die zweidimensionale Bestimmung der Faserorientierung ($\eta_{f,2D}$) lässt sich aus den Faserendpunktkoordinaten der Extrema min/max x_f und min/max y_f jeder Einzelfaser, in Anlehnung an die „Lagebestimmung aus den Endpunktkoordinaten der Kurzfasern“ nach Kap. 5.2.1, bestimmen. Als beschreibender Winkel für die Quantifizierung der Orientierung dient der

Winkel gegen die Vertikale (θ - Polarwinkel), (s. Abb. 6-12, d)).

Die Analyse erfolgt über die kommerzielle 2D-Bildanalysesoftware ImageJ [S1]. Sich kreuzende, hintereinanderliegende Kurzfasern werden manuell über die farbliche Unterscheidung, bei Nutzung einer Bildbearbeitungssoftware, separiert (s. Abb. 6-12, e)). Eine manuelle Bearbeitung ist möglich, da es sich um eine überschaubare Kreuzungsmenge an Einzelfasern handelt. Die farblich separierten Ebenen werden in Abhängigkeit von der Setzung des Schwellwerts jeweils einzeln analysiert. Die Ergebnisse der Einzelebenen werden superponiert. Höhere Kreuzungsmengen wären über computergestützte Rechenalgorithmen, vorgeschlagen u. a. in [17], separier- und vermessbar.

Die äußersten 4 mm des Randbereichs werden nicht in die Faserorientierungsanalyse einbezogen ($4 \text{ mm} > l_f/2$, s. Randlinie in Abb. 6-12, e)). Diese entsprechen dem maximalen Rotationsradius der eingesetzten Kurzfasern. Randlinienkreuzende Kurzfasern werden in die Analyse einbezogen. Mögliche einschränkende Berandungseffekte der Seitenwandungen können so, im Gegensatz zu den Berandungseffekten auf der Längsseite, berücksichtigt werden. Aussagen über die Umentorierung der Kurzfasern im Azimuthwinkel können, aufgrund der 2D-Betrachtung, nicht gemacht werden.

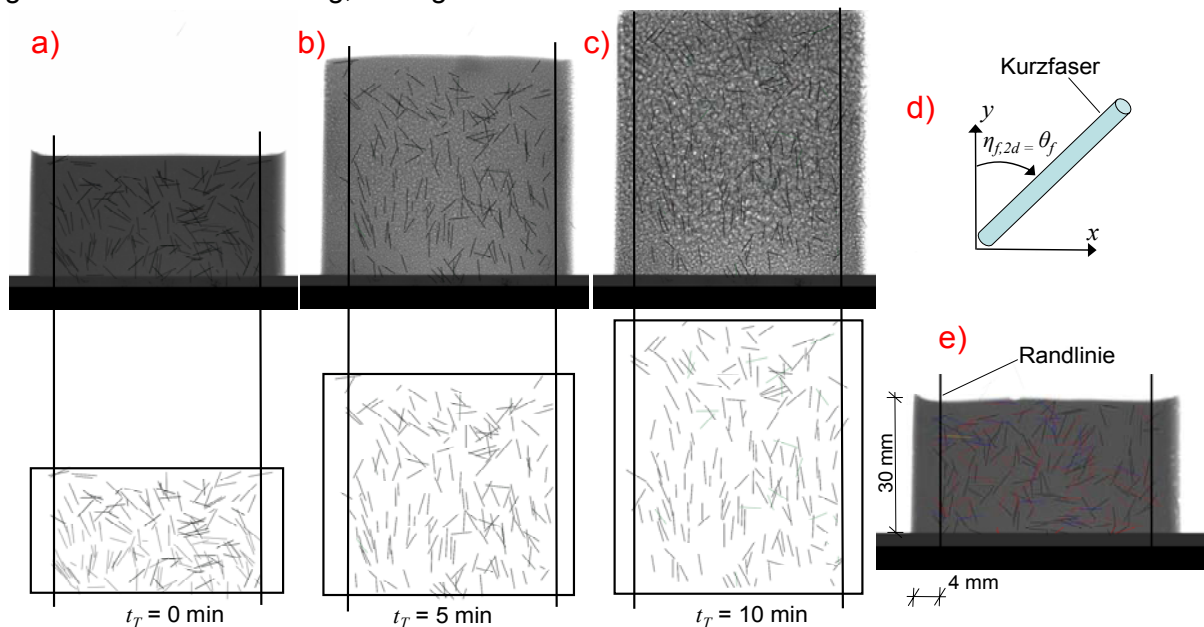


Abb. 6-12 Röntgen-radiographische „in situ“ Betrachtung des Treibprozesses bei kurzfaserverstärktem Porenbeton (Kupfer: Faserlänge $l_f = 3 \text{ mm}$, -durchmesser $d_f = 100 \mu\text{m}$), a) Polarwinkel (θ_f) zur Beschreibung der 2D-Faserorientierung, b)-d) Darstellung des auftreibenden Mediums zu den Zeitpunkten $t_T = 0, 5, 10 \text{ min}$ (oben: Gesamtheitliche Betrachtung des Treibmediums, unten: Extrahierung der Kurzfasern aus dem Grundmaterial), alle Ebenen, e) Farbliche Trennung sich kreuzender Einzelfasern

Bei allen Treibversuchen entsteht eine ausgerundete Treibkappe auf dem „Treibkuchen“. Diese lässt sich auf Berandungseffekte und lokale Temperaturdifferenzen zurückführen. An den Seitenwandungen werden röntgen-radiographisch deutlich dichtere Bereiche festgestellt. Die integrale 2D-Betrachtung und die damit verbundene fehlende Tiefeninformation sowie die starken Berandungseffekte, durch eng gegenüber stehende Seitenwandungen, erlauben nur eine einschränkende Übertragung der Informationen auf die Treibphänomene im Großversuch. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind ausschließlich als erster Ansatz zur Erfassung von $\chi_{f,3D}$ und $\eta_{f,3D}$ im realen Treibmedium zu betrachten.

6.3.3.1.1 Faserumorientierung und deren Einflussparameter

Treibprozessgrößen

Untersucht wird der Einfluss der Treibprozessgrößen Treibprozessgeschwindigkeit und -dauer sowie Porosierungsgrad auf Verlauf und Endmaß der Faserorientierung ($\eta_{f,2D}$).

Die Treibprozessgeschwindigkeit (v_T) hat keinen direkten Einfluss auf Verlauf und Endmaß der Faserorientierung ($\eta_{f,2D}$). Die Faserumorientierungen parallel zur Treibrichtung verlaufen unter Steigerung von v_T zwar schneller, dies ist aber vorzugsweise auf die erhöhte Streckung des Suspensionsmaterials lokal um die Kurzfaser zurückzuführen (s. Abb. 6-9).

Beispielhaft wird dieses Verhalten unter Variation von v_T bei Nutzung der Aluminiumpulver RO 200 bzw. RO 450 aufgezeigt. Der massebezogene Aluminiumpulvergehalt wird konstant bei 0,09 M.-% gehalten. **Abb. 6-13** zeigt die Faserorientierung bei Einbau von Kupferkurzfasern in Abhängigkeit zur Treibzeit (Faserlänge $l_f = 6$ mm, -durchmesser $d_f = 100$ μm).

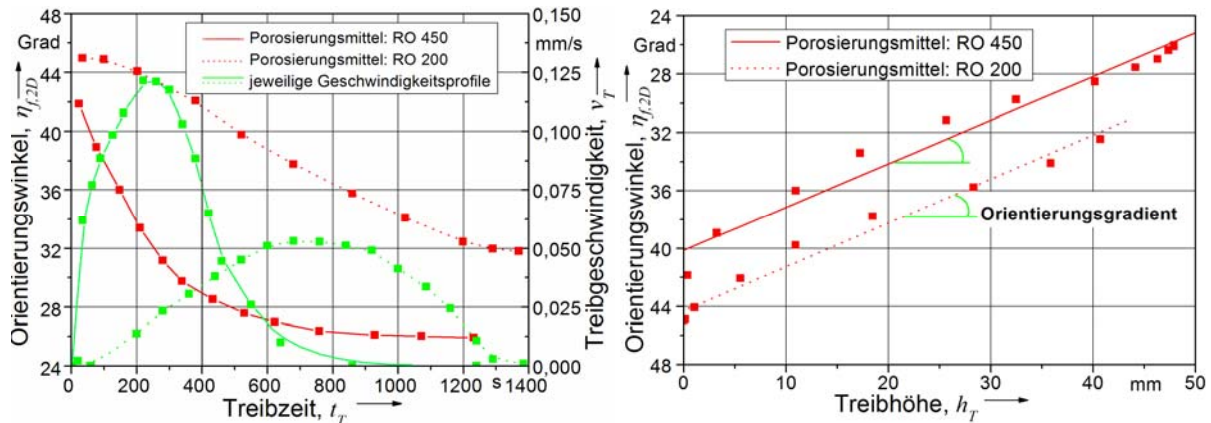


Abb. 6-13 Einfluss der Treibprozessgeschwindigkeit (v_T) auf Verlauf und Endmaß des mittleren Orientierungswinkels der Kurzfasern ($\eta_{f,2D}$) (Kupfer: Faserlänge $l_f = 6$ mm, -durchmesser $d_f = 100$ μm), **links**: Veränderung von $\eta_{f,2D}$ und v_T über Treibzeit (t_T), **rechts**: Veränderung von $\eta_{f,2D}$ über die Treibhöhe (h_T)

Die Kurzfasern orientieren sich unter Nutzung des Porosierungsmittels RO 450 wesentlich schneller um (s. **Abb. 6-13, links**). Der Absolutwert der Faserorientierung ($\eta_{f,2D}$) ist, gegenüber dem Porosierungsmittel RO 200, deutlich gesteigert. Festzustellen ist, dass eine Reduzierung von v_T (RO 200) eine gleichmäßigere Umorientierung der Kurzfasern bewirkt.

Abb. 6-13, **rechts** zeigt die Gegenüberstellung von Faserorientierungs- und Treibhöhenverlauf beider Variationen. Eine lineare Abhängigkeit ergibt sich bei gleichem Orientierungsgradienten. Demnach ist die Steigerung in der Umorientierung der Kurzfasern ausschließlich vom Zuwachs der Treibhöhe (h_T) (= Porosierungsgrad (μ_T)) bzw. von der lokalen Dehnung des Suspensionsmaterials um die Kurzfaser abhängig. Dieses Verhalten wird ausschließlich dem Mechanismus der „Faserumorientierung durch Materialdehnung in der Faserumgebung“ zugeschrieben (s. Kap. 6.3.2). Die geschwindigkeitsabhängigen Mechanismen der Scherströmungs- und Dehnströmungsorientierung haben somit bei der schleichenden Strömung des Porenbeton-Treibprozesses nur eine untergeordnete Bedeutung.

Der höhenabhängige Einfluss von v_T auf Verlauf und Endmaß von $\eta_{f,2D}$ ist begrenzt. Lokale Einzelbetrachtungen verschiedener Höhenbereiche in der Anfangssuspension zeigen keine wesentlichen Unterschiede in $\eta_{f,2D}$ und $\chi_{f,3D}$. Der zunehmende Geschwindigkeitsgradient über die Höhe des Treibmediums hat somit keinen Einfluss auf $\eta_{f,2D}$.

Faserparameter

Der Einfluss von Faserlänge, -durchmesser und -feststoffdichte wird untersucht.

Die Faserlänge (l_f) hat nur einen eingeschränkten Einfluss auf die Faserumorientierung. Der Faserdurchmesser (d_f) bzw. die Faserfeststoffdichte (ρ_f) gehen signifikant in Verlauf und Endmaß von $\eta_{f,2D}$ ein. Die der „Faserumorientierung durch Materialdehnung in der Faserumgebung“ überträgt sich nicht direkt auf die Faserumorientierung.

Der Einfluss der Faserparameter auf Verlauf und Endmaß von $\eta_{f,2D}$ unter Variation von Faserform und -material wird aufgezeigt. Für die Untersuchungen wird das Porosierungsmittel RO 200 genutzt. **Abb. 6-14, links** stellt beispielhaft das Verhalten bei Variation von l_f dar. In

Abb. 6-14, **rechts** wird beispielhaft das Verhalten bei Variation von d_f bzw. ρ_f aufgezeigt:

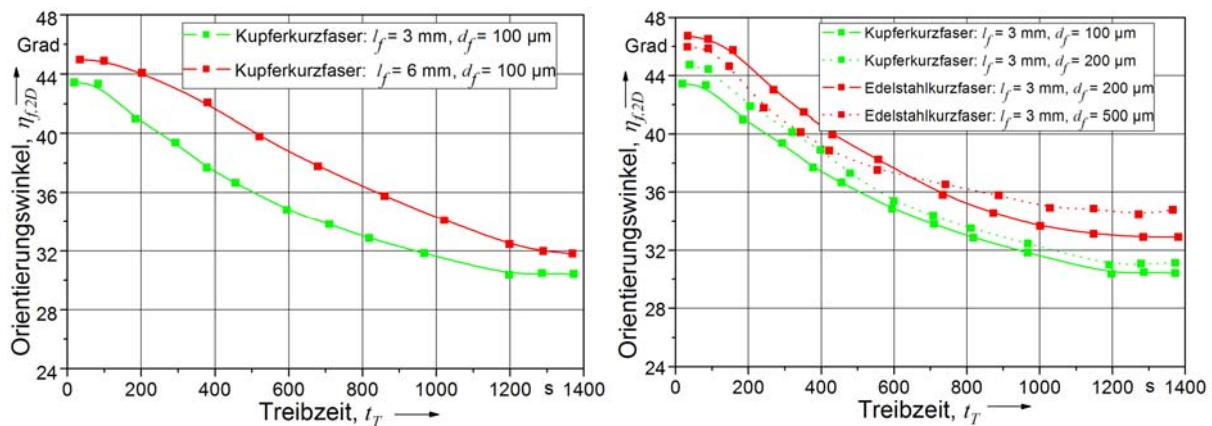


Abb. 6-14 Einfluss von Fasermaterial und -form auf Verlauf und Endmaß des mittleren Orientierungswinkels der Kurzfasern ($\eta_{f,2D}$) (RO 200), **links:** Variation der Faserlänge (l_f) (Kupfer: $l_f = 3$ und $l_f = 6$ mm, Faserdurchmesser $d_f = 100 \mu\text{m}$), **rechts:** Variation des Faserdurchmessers (d_f) und der Faserfeststoffdichte (Kupfer: $l_f = 3$ mm, $d_f = 100$ und $200 \mu\text{m}$; Edelstahl: $l_f = 3$ mm, $d_f = 200$ und $500 \mu\text{m}$)

Verlauf und Endmaß von $\eta_{f,2D}$ sind bei Änderung der Faserlänge von $l_f = 3$ mm auf $l_f = 6$ mm tendenziell gleich (s. **Abb. 6-14, links**). Unterschiedliche Verläufe ergeben sich ausschließlich aus der Anfangsorientierung der Kurzfasern bzw. den Inhomogenitäten durch das Porenwachstum. Die untergeordnete Bedeutung der geschwindigkeitsabhängigen Umoorientierungsmechanismen kann bestätigt werden (s. Kap. 6.3.2.2.1). Längere Kurzfasern müssten unter Einfluss dieser Mechanismen in der Anfangsphase stärkere Umoorientierung erfahren.

Der Faserdurchmesser (d_f) hat einen deutlichen Einfluss auf die Umoorientierung der Kurzfasern (s. **Abb. 6-14, rechts**). Die Edelstahlkurzfasern mit $d_f = 500 \mu\text{m}$ richten sich wesentlich schlechter aus als die Edelstahl- und die Kupferkurzfasern mit $d_f = 200 \mu\text{m}$ bzw. $d_f = 100 \mu\text{m}$ ($l_f = 3$ mm). Offensichtlich nimmt mit Zunahme des Faserdurchmessers der Widerstand bei der Umoorientierung zu; die Faserträgheit ist höher.

In der Faserfeststoffdichte (ρ_f) spiegelt sich der Einfluss des Fasermaterials maßgeblich wider. Bei Vergleich zwischen dem Einbau der Edelstahl- ($\rho_f = 7,17 \text{ g/cm}^3$) und der Kupferkurzfasern ($\rho_f = 8,96 \text{ g/cm}^3$) ($d_f = 200 \mu\text{m}$) wird kein Unterschied im Umoorientierungsverhalten festgestellt (s. **Abb. 6-14, rechts**). Es liegt jedoch die Vermutung nahe, dass ρ_f , ähnlich wie der Faserdurchmesser, über die Faserträgheit einen wesentlichen Einfluss besitzt. Interessant wäre eine Betrachtung bei stärker divergierender Faserfeststoffdichte (ρ_f). Eingesetzte röntgen-radiographische Verfahren stoßen hier aber an die Erfassungsgrenze (s. Kap. 6.1).

6.3.3.1.2 Umoorientierung der Kurzfasern in Abhängigkeit von der Anfangsorientierung

In den vorherigen Untersuchungen liegen $\chi_{f,2D}$ und $\eta_{f,2D}$ näherungsweise 2D statistisch verteilt in der Anfangssuspension vor (s. **Abb. 6-13, Abb. 6-14**, $\theta_f = \eta_{f,2D} \approx 45^\circ$). Die Faserorientierung der Einzelfasern wird über die gesamte Küvette bzw. größere Bereiche gemittelt. Im Folgenden wird untersucht, welchen Einfluss die Anfangsorientierung der Einzelfaser bzw. die lokale Faserposition im Treibmedium auf $\chi_{f,2D}$ bzw. auf Verlauf und Endmaß von $\eta_{f,2D}$ besitzt.

Die Untersuchungen werden bei Einbau von Kupferkurzfasern ($l_f = 6 \text{ mm}$, $d_f = 100 \mu\text{m}$) unter Nutzung des Porosierungsmittels RO 450 durchgeführt. Jeweils sechs Kurzfasern mit den Startneigungswinkeln $\theta_f \approx 50^\circ$ und $\theta_f \approx 90^\circ$ (= waagerechte Ausrichtung) werden im oberen und unteren Teilbereich des Treibmediums über die Zeit betrachtet. Ihre Positionen und ihre Neigungswinkel werden zu zehn Zeitpunkten über den Treibprozess erneut bestimmt.

Abb. 6-15 zeigt die Positionen und die Neigungswinkel der betrachteten Kurzfasern in der Anfangssuspension und nach Abschluss des Treibprozesses. Verlauf und Endmaß von $\eta_{f,2D}$ werden in nebenstehenden Diagrammen beschrieben:

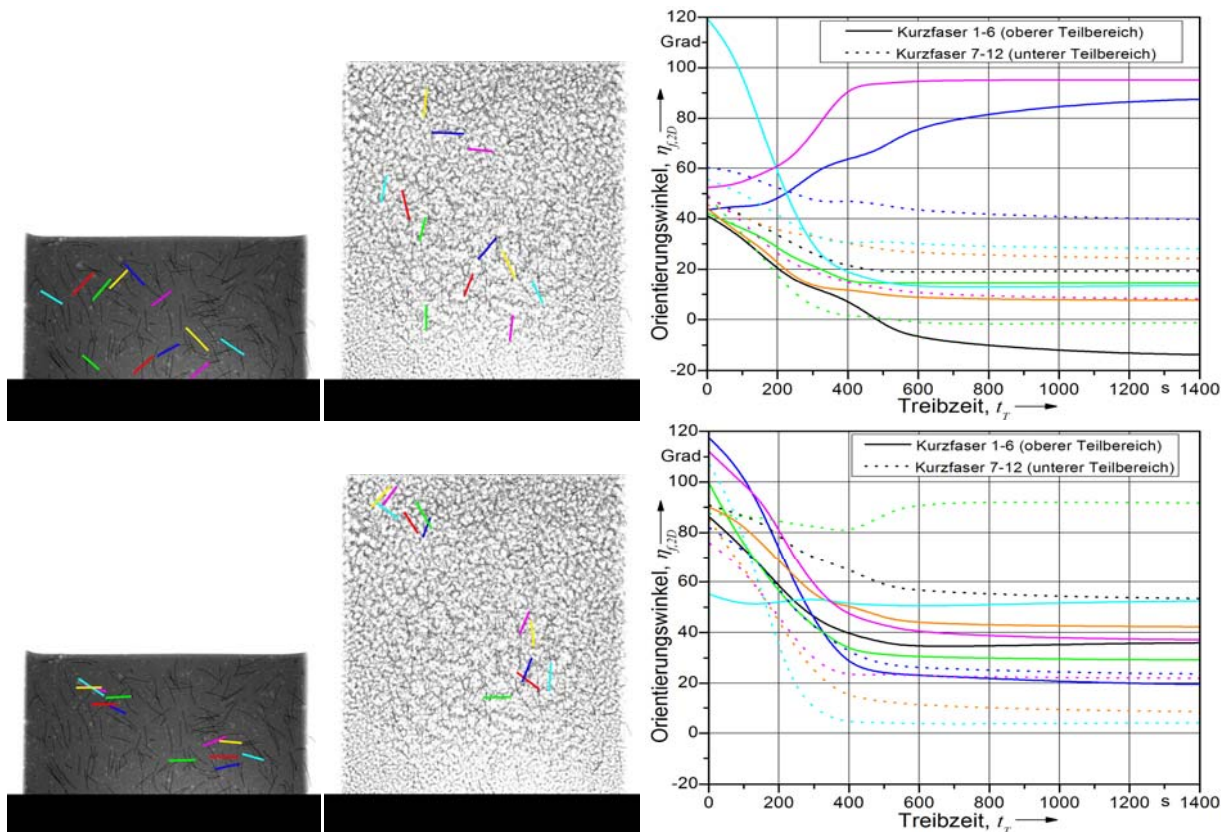


Abb. 6-15 Einfluss von Position und Anfangsneigungswinkel der Kurzfasern auf Faserverteilung ($\chi_{f,2D}$) sowie Verlauf und Endmaß der Faserorientierung ($\eta_{f,2D}$) im getriebenen System bei einem Startneigungswinkel $\theta_f \approx 50^\circ$ (**oben**) und Startneigungswinkel $\theta_f \approx 90^\circ$ (**unten**), (Kupferkurzfaser: Faserdurchmesser $d_f = 100 \mu\text{m}$, Faserlänge $l_f = 6 \text{ mm}$, RO 450), **links**: Anfangssuspension bei farblicher Markierung der untersuchten Einzelfasern, **Mitte**: Getriebenes System bei farblicher Markierung der untersuchten Einzelfasern, **rechts**: Zeitlicher Verlauf der Faserrotation für die jeweilige Einzelfaser

$\eta_{f,2D}$ zeigt nach Abschluss des Treibprozesses im Mittel bei allen vier Fasergruppen eine deutliche Faserausrichtung in Richtung parallel zur Treibrichtung. Bei Betrachtung der Einzelfasern ergeben sich stark inhomogene Orientierungsverläufe. Einige Kurzfasern bleiben waagrecht (z. B. die grün markierte Kurzfasern im unteren Teilbereich bei einem Startneigungswinkel $\theta_f \approx 90^\circ$ (s. **Abb. 6-15, unten**)) oder sie legen sich erst flach (z. B. die magenta- und die blau markierte Kurzfasern im oberen Teilbereich bei Startneigungswinkel $\theta_f \approx 50^\circ$ (s. **Abb. 6-15, oben**)). Diese Kurzfasern zeigen, vergleichbar mit den anderen Kurzfasern, ähnliche bzw. stärkere Positionsänderungen im Treibmedium. Es kann vermutet werden, dass teilweise eine ungeordnete örtliche Bewegung der Kurzfasern im Treibprozess stattfindet. Besonders deutlich wird dieses Verhalten in der Fasergruppe oben links, die sich in zwei räumlich weit entfernte Teilgruppen aufspaltet ($\theta_f \approx 50^\circ$). Der ungeordnete Charakter des Materialtransports um die Kurzfasern wird auch deutlich in den zeitlichen Verläufen der Umorientierung. Zur Darstellung in den Diagrammen sind die Neigungen der Kurzfasern so gewählt, dass sie den Intervallbereich $-20-120^\circ$ abdecken.

Bei einem Startneigungswinkel $\theta_f \approx 50^\circ$ legt sich die türkis markierte Kurzfasern zunächst flach, bevor sie sich wieder aufrichtet (entsprechend der Winkeländerung von ca. 110°). Der Startneigungswinkel wird von $\theta_f = 61^\circ$ auf $\theta_f = 119^\circ$ gesetzt. Die violett- und die blau markierte Kurzfasern haben sich flach gelegt. Die anderen Kurzfasern richten sich auf. Die rot markierte Kurzfasern hat sich leicht zur anderen Seite geneigt. Unregelmäßige Rotationsbewegungen entstehen vorzugsweise durch Porenwachstum im Fasernahbereich (s. Kap. 6.3.2). Die Kurzfasern können einen, durch die durch die Treibrichtung vorgegebene Rotation, entgegen gesetzten Drehsinn bekommen; beide Rotationsbewegungen überlagern sich.

Bei einem Startneigungswinkel $\theta_f \approx 90^\circ$ ergeben sich homogenere Orientierungsverläufe.

Kurzfasern dieser Anfangslage sind durch die fasernahe Porenentstehung nicht so stark beeinflussbar. Bei einer Porenbildung ist der Drehsinn durch die Porenentstehung mit dem Drehsinn der Umorientierung der Kurzfaser aus der Treibrichtung aufgrund der neutralen Anfangslage gleichgesetzt. Es ergeben sich reduzierte Variationsmöglichkeiten.

Es sind keine signifikanten Unterschiede in $\eta_{f,2D}$ und $\chi_{f,2D}$ zwischen den Kurzfasern im unteren und oberen Teil des Treibmediums festzustellen (s. **Abb. 6-16**). Der o. g. geringe Einfluss der Orientierungsphänomene aus der Treibgeschwindigkeit kann auch hier bestätigt werden.

Die Kurzfasern mit unterschiedlichen Startneigungswinkeln zeigen am Ende des Treibprozesses unterschiedliche Endneigungswinkel. Die mittlere Umorientierung der Kurzfasern bei einem Startneigungswinkel $\theta_f \approx 90^\circ$ beträgt ca. 55° . Bei $\theta_f \approx 50^\circ$ rotieren die Kurzfasern um $30-40^\circ$. Im oberen Bereich ist die Streuung bei der Faserumorientierung größer, woraus sich hier eine geringere mittlere Endorientierung ($\eta_{f,2D}$) der Kurzfasern ergibt.

Die mittlere Endorientierung bei $\theta_f \approx 50^\circ$ ist kleiner. Daraus ergibt sich, dass bei weiterer Erhöhung des Porosierungsgrads (μ_T) weitere Faserumorientierungen stattfinden würden. Es findet eine Annäherung an eine „streubefähigte“ Maximalausrichtung statt ($\theta_f \rightarrow 0$).

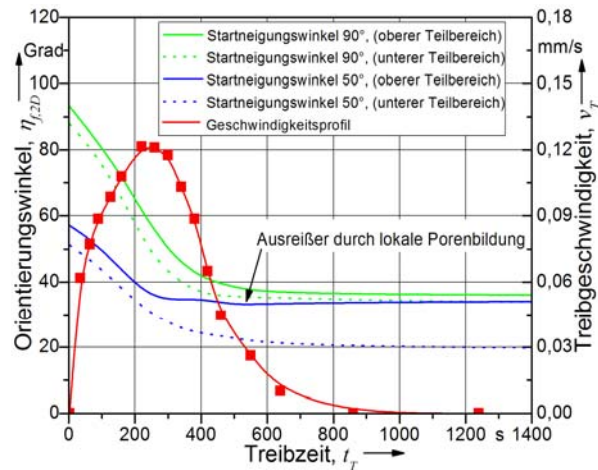


Abb. 6-16 Mittlerer Verlauf der Faserorientierung für den unteren und oberen Bereich des Treibmediums, Startneigungswinkel $\theta_f \approx 50^\circ$ und $\theta_f \approx 90^\circ$ sowie dazugehöriges Geschwindigkeitsprofil

Die Umorientierung der Kurzfasern ergibt sich, unabhängig von deren Startneigungswinkel, linear zur Entwicklung der Treibhöhe (s. auch Abb. 6-13). Im letzten Teil des Treibprozesses (ab Treibzeit $t_T = 300-400$ s) orientieren sich die Kurzfasern, unabhängig von der Treibbewegung, aufgrund der kleineren Faserneigungswinkel (θ_f), nur noch bedingt um. Die mittlere Faservorzugsausrichtung beträgt hier nur noch $\eta_{f,2D} = 20-30^\circ$. Es können deutlich geringere Mitnahmeeffekte bei den Kurzfasern im Treibprozess festgestellt werden. Am Ende des Treibprozesses nimmt der Einfluss der Faserrotation durch Materialdehnung ab; der Einfluss der Faserrotation durch die lokal wachsende Porenstruktur hingegen nimmt zu. Dieser wechselnde Einfluss ist vor allem bei kleinen Faserlängen maßgebend.

Bei statistisch verteilten Anfangsorientierungen der Kurzfasern (s. Abb. 6-13) findet die Umorientierung in einem wesentlich größeren Zeitrahmen statt. Aus Abb. 6-13, links geht hervor, dass die Umorientierung nach $t_T = 600-800$ s abgeschlossen ist. Bei einer Einzelbetrachtung der Kurzfasern mit einem Startneigungswinkel $\theta_f \approx 50^\circ$ sind die Umorientierungen deutlich früher abgeschlossen ($t_T = 200-400$ s).

Kurzfasern mit einem Neigungswinkel $\theta_f \approx 0^\circ$ ändern ihre Position im Verlauf des Treibprozesses nur eingeschränkt. Ein homogenes $\chi_{f,2D}$ ist daraus folgend nicht mehr gegeben.

6.3.3.1.3 Zusammenfassung

Die röntgen-radiographischen „in situ“ Untersuchungen zur Faserverteilung ($\chi_{f,2D}$) und -orientierung ($\eta_{f,2D}$) zeigen, dass ausschließlich statistische Aussagen sinnvoll sind. Im Mittel nimmt $\eta_{f,2D}$ deutlich ab. Kurzfasern richten sich tendenziell parallel zur Treibrichtung aus. $\chi_{f,2D}$ bleibt bei üblichen Porosierungsgraden ($< 150\%$) im Wesentlichen homogen über die Treibhöhe.

Der maßgebende Ausrichtungsmechanismus der Kurzfasern resultiert aus der Ausdehnung des die Kurzfaser umgebenden Treibmediums (s. Kap. 6.3.2). Dieser Mechanismus kann durch die Porenbildung in unmittelbarer Faserumgebung gestört werden. Es zeigen sich dar-

aus folgend mitunter chaotische Orientierungsverläufe. Die Wahrscheinlichkeit dieser chaotischen Verläufe ist bei mittleren Startneigungswinkeln erhöht. Die Faserträgheit hat einen maßgebenden Einfluss.

6.3.3.2 „Ex situ“ Untersuchung des Treibprozesses

Treibkinetik und Porosierungsgrad werden systematisch bei Variation von Faserlänge (l_f) und -konzentration (ψ_f) über das mechanische Expandometer (s. Abb. 6-8, links) quantifiziert. Dazu werden die wasserdispersiblen monofilen alkaliresistenten Kurzglasfasern (MGF) Saint Gobain Cem-FIL ARC20 70/30 eingebaut. In Abhängigkeit vom Porosierungsmittelgehalt (Aluminiumpulver: RO 200, 0,05-0,11 M.-%) wird der Zusammenhang von Treibhöhe und -zeit betrachtet. Mischungszusammensetzung, Herstellung und Randbedingungen werden aus Kap. 6.1 eingesetzt. Verteilungsinhomogenitäten bzw. Vorzugsorientierungen der Kurzfasern in der Anfangssuspension werden durch Umrühren vor Treibbeginn homogenisiert.

Ergebnisse und Diskussion

Der Zeitpunkt des Treibprozessbeginns wird bei Einbau der MGF nach vorne verschoben. Die maximale Treibprozessgeschwindigkeit kann deutlich erhöht werden. Der Porosierungsgrad (μ_T) ist stark abhängig von ψ_f . Eine Erhöhung von l_f steigert genannte Phänomene.

Abb. 6-17 zeigt beispielhaft eine Auswahl der Treibhöhen-Treibzeit-Beziehungen bei Einbau der MGF. Es wird der Porosierungsmittelgehalt 0,05 M.-% (s. Abb. 6-17, **oben**) und 0,09 M.-% (s. Abb. 6-17, **unten**) bei Einbau von Kurzfasern mit $l_f = 3$ mm und $l_f = 6$ mm für die Faserkonzentrationen $\psi_f = 0,5$ -, $0,75$ - und $1,0$ Vol.-%, vergleichend zur Referenz, dargestellt.

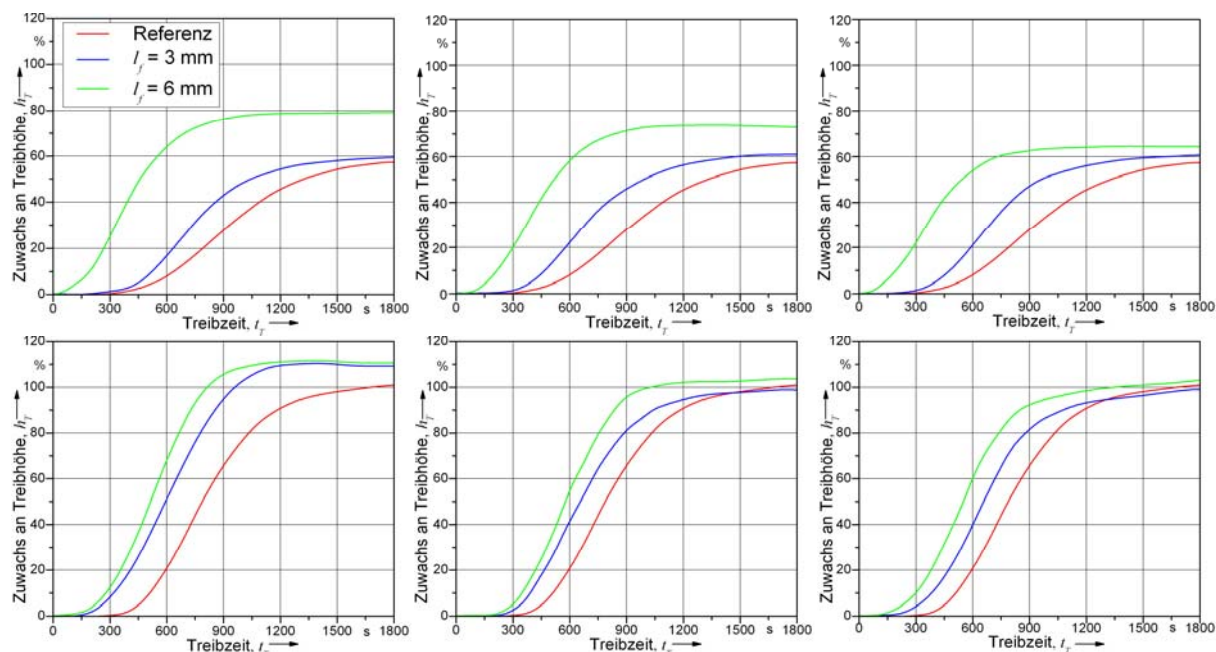


Abb. 6-17 Fasereinfluss im Treibprozess des kurzfaserverstärkten Porenbetons (wasserdispersible monofile alkaliresistente Kurzglasfasern Saint Gobain Cem-FIL ARC20 70/30, Faserlänge $l_f = 3$ mm und $l_f = 6$ mm) für die Porosierungsgehalte 0,05 (**oben**) und 0,09 M.-% (**unten**) Al-Pulver, **links**: Faserkonzentration $\psi_f = 0,50$ Vol.-%, **Mitte**: $\psi_f = 0,75$ Vol.-%, **rechts**: $\psi_f = 1,00$ Vol.-%

Bei 0,05 M.-% Porosierungsmittel (s. **Abb. 6-17, oben**) findet, durch den Einbau von Kurzfasern, eine Vorverlegung des Treibprozessbeginns sowie eine Erhöhung der maximalen Treibprozessgeschwindigkeit und des Porosierungsgrads (μ_T) statt. Bei Erhöhung der Faserlänge von $l_f = 3$ mm auf $l_f = 6$ mm werden diese Phänomene verstärkt.

Die Ursache für die Vorverlegung des Treibprozessbeginns lässt sich aus der Energiebilanz herleiten (s. Gl. [6-2]). Zum Zeitpunkt 1 sind die destabilisierenden Kräfte im faserversetzten Treibmedium und im Referenz-Treibmedium jeweils maßgebend (s. Abb. 6-18). Zum Zeitpunkt 2 erreicht das faserversetzte Treibmedium ein energetisches Gleichgewicht zwischen

den destabilisierenden bzw. „stagnierenden“ ($G_a + G_\gamma + G_{hy} + G_\tau$) und den treibenden Kräften (G_i). Durch den erhöhten Energieverbrauch aus dem Schubwiderstand (G_τ) ist dieser „Gleichgewichts-Zeitpunkt“ im Vergleich zum Referenz-Treibmedium (s. Zeitpunkt 3) deutlich früher erreicht. Da zu diesem Zeitpunkt die treibenden Kräfte maßgebend werden, findet eine Umkehrung des wirkenden Anteils aus dem Schubwiderstand „sprunghaft“ statt; G_τ wirkt nun dem Wachstum entgegengesetzt. Bei Fasereinbau wirkt zusätzlich ein entlastender Anteil den abwärtsgerichteten Kräften entgegen; die Netzwerkstruktur erwirkt lokal und bezogen auf das ganze Treibmedium eine Reduzierung der Anteile von G_a und G_{hy} . Zum Zeitpunkt 4 erreichen die Poren des faserversetzten Treibmediums ein Gleichgewicht zwischen aufsteigenden und absteigenden Kräften; das Treibmedium beginnt zu steigen. Erst zum Zeitpunkt 5 findet der gleiche Vorgang im Referenz-Treibmedium statt. Eine stützende Wirkung des Fasernetzwerks, das die destabilisierenden Prozesse reduziert, ist hier nicht vorhanden.

Die Faserkonzentration hat kaum Einfluss auf den Treibprozessbeginn. Die stützende Wirkung des Fasernetzwerks wird jedoch mit Erhöhung von $l_f = 3$ mm auf $l_f = 6$ mm deutlich gesteigert. Das Phänomen der Reduzierung der Entgasung durch die deutlich steifere Treib-suspension ist gesteigert (s. Kap. 6.3.2.1); der Energieanteil G_i ist höher.

Der Treibprozess bei Kurzfasereinbau bzw. bei Erhöhung der Faserlänge von $l_f = 3$ mm auf $l_f = 6$ mm ist früher abgeschlossen. Die Fließeigenschaften des Treibmediums werden verändert (s. Kap. 6.3.2.1): Das faserversetzte Treibmedium steift bereits früher an, der Energieanteil aus dem Schubwiderstand des Treibmediums nimmt stark zu. Die Anteile aus den gespeicherten elastischen Energien bzw. die Energieanteile aus der Faserkinetik werden, neben dem Ansteifen des faserversetzten Treibmediums, maßgebend (s. Kap. 6.3.2.2). Zum Zeitpunkt 6 ergeben sich kritische Treibbedingungen. Eine Volumenvergrößerung ist nicht mehr möglich. Diese wird im Referenz-Treibmedium zu einem späteren Zeitpunkt erreicht.

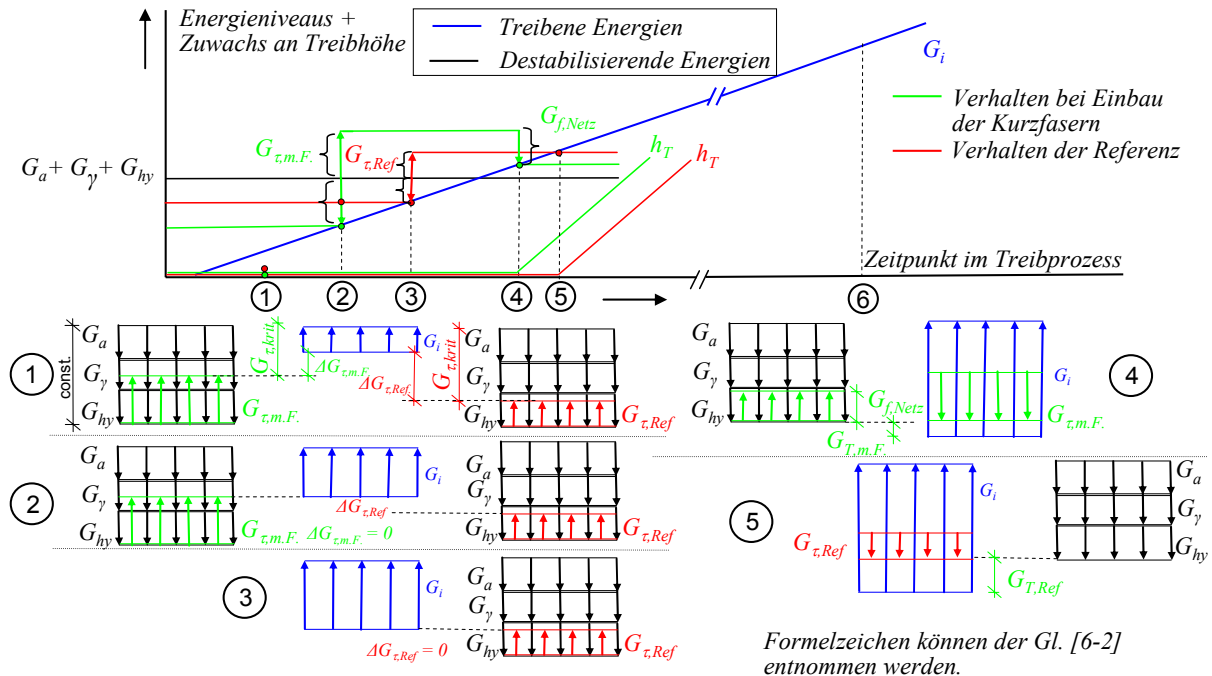


Abb. 6-18 Diskussion des Zeitpunkts von Treibprozessbeginn und -ende bei einem faserversetzten Treibmedium im Vergleich zu einem nicht-faserversetzten Treibmedium (Referenz) zu den Zeitpunkten 1-6 mithilfe der Energiebilanz nach Gl. [6-2] bezogen auf die Einzelpore (vereinfachend wird ein linearer zeitlicher Verlauf der Energieanteile aus der Erhöhung des Poreninnendrucks G_i angenommen.)

Bei erhöhtem ψ_f nähert sich μ_T dem Porosierungsgrad des Referenz-Treibmediums an. Bei $\psi_f = 1,00$ Vol.-% hat l_f zum Zeitpunkt $t_T = 1500$ s keinen Einfluss mehr auf μ_T . Ein kritischer Treibenergieverbrauch führt bei höherem ψ_f dazu, dass die Gasfreisetzung nicht mehr in Treibhöhe umgesetzt wird. Es kommt zu höheren Porendrücken; der Treibprozess stagniert.

Die Fasernetzwerke tragen in der Startphase des Treibprozesses zur Frühstabilität bei. Kritische Fließverhältnisse bzw. elastische Speicherung von Treibenergien, hervorgerufen durch die Fasernetzwerke, führen am Ende des Treibprozesses zur „Treibblockade“ im faserversetzten Treibmedium. Die Elastizität des Treibmediums wird nicht mehr überwunden. Kritische Bedingungen können den Treibprozess früher als im Referenz-Treibmedium beenden.

Bei Erhöhung des Porosierungsmittelgehalts auf 0,09 M.-% Porosierungsmittel erhöht sich der Porosierungsgrad (μ_T) (s. Abb. 6-17, **unten**). Die zeitlichen Unterschiede des Treibprozessbeginns sind geringer, die Treibprozessgeschwindigkeiten zwischen den faserversetzten Treibmedium und dem Referenz-Treibmedium gleichen sich an. Bei geringem ψ_f ist μ_T wieder bedeutend höher. Bei Erhöhung von ψ_f gleichen sich die Porosierungsgrade von faserversetztem und Referenz-Treibmedium an. Die Dauer des Treibprozesses verlängert sich mit der Vergrößerung von ψ_f . Es zeigen sich ähnliche Abhängigkeiten zu den Faserlängen; alle faserspezifischen Verhaltensweisen sind jedoch deutlich reduziert.

Der Einfluss von ψ_f auf den Beginn des Treibprozesses ist bei allen Porosierungsmittelgehalten gering. Daraus wird geschlossen, dass die Kurzfasern als Nukleierungskeime nur eine untergeordnete Rolle spielen (s. Kap. 2.3.1). Die Steigerung von μ_T bei Nutzung von 0,11 M.-% Porosierungsmittel führt bei allen Faserlängen und -konzentrationen zu Instabilitäten.

6.4 Grünstabilität und Grünstandsfestigkeit

Der „Treibkuchen“ erfordert nach Abschluss des Treibprozesses eine Grünstabilität. Für einen zeitlich optimal ausgelegten industriellen Produktionsprozess sollte die Grünstandsfestigkeit zu einem frühest möglichen Zeitpunkt erreicht werden (s. Kap. 2.3.2).

6.4.1 Einfluss von Kurzfasern

Untersuchungen im Bereich der zementgebundenen faserverstärkten Medien zeigen faserspezifisch reduzierte Verformungen und Grünfestigkeiten. Dies wird auf die Ausbildung eines Fasernetzwerks zurückgeführt (s. Kap. 6.2.3). Geeignete Kurzfasern halten das System zusammen; die mechanischen Fasereigenschaften sind von untergeordneter Bedeutung.

6.4.2 Vergleichsstudie bei Variation der Faserlänge und -konzentration

Der Einfluss der Kurzfasern auf die Grünstabilität und -standsfestigkeit des Porenbetons wird untersucht. Es wird die Basismischung aus Kap. 6.1 eingesetzt (kein Porosierungsmittel). Eingebaut werden alkaliresistente (AR) Bündelkurzglasfasern (BGF) Saint Gobain (SG) Cem-FIL ARC20 62/2 und wasserdispersible monofile AR-Kurzglasfasern (MGF) SG Cem-FIL ARC20 70/30 bei Variation von Faserlänge (l_f) und -konzentration (ψ_f). Die faserversetzten Mischungen werden nach dem Einfüllen in die Schalungen homogenisiert.

Untersucht wird ausschließlich isoliert am unporosierten ansteifenden System. Die Betrachtung erfolgt unabhängig von der entstehenden Gefügestruktur (theoretisches Modell). Das Verhalten ist somit nur eingeschränkt auf den realen „Treibkuchen“ des „grünen“ Porenbetons übertragbar. Die Ergebnisse können aber als erster Anhaltspunkt genutzt werden. Vernachlässigt werden die in den chemischen Reaktionen des Treibprozesses nicht verbrauchten Wasseranteile (s. Gl. [2-3]) sowie die Transportvorgänge im „Treibkuchen“ [25].

Versuchsaufbau und Durchführung

Es werden Probekörper (200 x 200 x 100 mm³) eingesetzt, die während der Ansteifphase bei einer Temperatur $T = 40^\circ\text{C}$ und einer relativen Umgebungsfeuchte $\varphi = 50\%$ gelagert werden. Der Fasereinfluss auf die Grünstabilität bzw. auf den Zeitpunkt des Erreichens der Grünstandsfestigkeit wird über den Eindringwiderstand untersucht.

Ein Druckkopf wird in den jeweiligen Probekörper mit der Geschwindigkeit von 50 mm/min über eine Zug-Druck-Prüfmaschine eingefahren (s. **Abb. 6-19, a**)).

Aufgenommen werden die Widerstandskurven des Druckkopfs nach 120, 150, 180, 210 und 240 Minuten bis zu einer Eindringtiefe $t_s = 50$ mm. Gegenseitige Wechselwirkungen der jeweiligen Eindringstellen werden ausgeschlossen (s. Fadenkreuz, Abb. 6-19, a)).

Abb. 6-19, b) zeigt die Kurven für die Referenz. Die Grünfestigkeit nimmt über die Zeit linear zu. Die Grünstandsfestigkeit wird bei $t_s = 45$ mm zeitabhängig quantifiziert. Als Vergleichswert für eine definierte Grünstandsfestigkeit dient die Festigkeit, die die Referenz nach der Ansteifzeit $t = 3$ h aufweist.

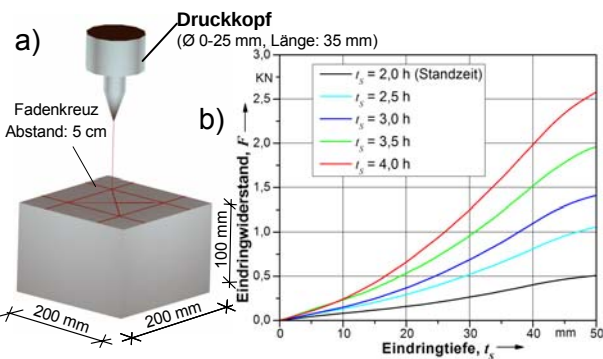


Abb. 6-19 Untersuchung der Grünstandsfestigkeit von Porenbeton a) Versuchsaufbau, b) Kraft-Eindringtiefen-Beziehung für unverstärkten (Poren)-beton (zeitabhängig)

Ergebnisse und Diskussion

Kurzfasern können die Grünstabilität steigern und den Zeitpunkt des Erreichens der Grünstandsfestigkeit vorverlegen. Es findet eine Steigerung der Grünstandsfestigkeit im „Treibkuchen“ bei Erhöhung von l_f und ψ_f statt.

Abb. 6-20 zeigt die Ergebnisse zum Eindringwiderstand bei Einbau der MGF im Vergleich zur Referenz. Es werden deutlich höhere Eindringwiderstände registriert. Die Steigerung von ψ_f und die Erhöhung von $l_f = 3$ mm auf $l_f = 6$ mm ergibt weitere Verbesserungen. Der o. g. Wasseranspruch der Kurzfasern sowie die stabilisierende Netzwerkstruktur der Kurzfasern (s. Kap. 6.3.2.2) können als Begründung für dieses Verhalten herangezogen werden.

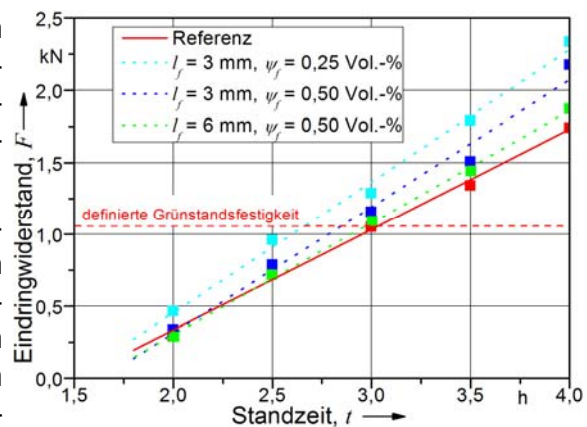


Abb. 6-20 Einfluss von Faserlänge (l_f) und -konzentration (ψ_f) auf die Grünstandsfestigkeit bei Einbau der wasserdispersiblen monofilen alkaliresistenten Kurzglasfasern

Die Grünstandsfestigkeit kann bei $l_f = 6$ mm und $\psi_f = 0,50$ Vol.-% gegenüber der Referenz um 30 Minuten nach vorne verschoben werden. Gleiches Verhalten ist bei Einbau der BGF festzustellen, wobei die Absolutwerte reduzierter gegenüber dem Einbau der MGF sind.

6.5 Schlussfolgerungen

Die in Kap. 6.2 festgestellte starke Anfälligkeit der Anfangssuspension zu lokal differierenden Faserverteilungen ($\chi_{f,3D}$) und Inhomogenitäten in der Faserorientierung ($\eta_{f,3D}$) kann beim Einfüllen kaum vermieden werden. Im industriellen Produktionsprozess des Porenbetons ist eine Kontrolle der Faserlage zu Beginn des Treibprozesses erforderlich.

$\eta_{f,3D}$ ist über Faser- und Treibprozessparameter steuerbar (s. Kap. 6.3). Der Startneigungswinkel der Kurzfasern im Treibprozess kann über die Faserorientierung in der Anfangssuspension gesteuert werden. Damit wären unerwünscht starke Faserausrichtungen vermeidbar, bzw. im Gegensatz dazu, starke Ausrichtungen gezielt herstellbar. Je nach Anforderung könnte das Eigenschaftsprofil des kurzfaserverstärkten Porenbetons angepasst werden.

Erhöhte Grünstabilität bzw. Grünstandsfestigkeit des „Treibkuchens“ lässt eine Reduzierung der Zugabemenge des Portlandzements bzw. eine Reduzierung der Durchlaufzeiten im industriellen Produktionsprozess zu (s. Kap. 6.4). Das Handling der Rohblöcke und die Schneidfähigkeit kann zu einem früheren Zeitpunkt erreicht werden (s. Kap. 2.3.2).

Auf- und Abfahrphase der hydrothermale Härtung könnten schneller erfolgen. Genannte Einschränkungen in Grünkörpergeometrie und -form könnten reduziert werden (s. Kap. 2.3.3).

7. Systematische Untersuchungen zum Einfluss von alkaliresistenten Kurzglasfasern auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Porenbetons

Überblick

Das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Porenbetons lässt sich im Rohdichtebereich $\rho_{pb} = 450-550 \text{ kg/m}^3$ unter Druck-, kombinierter Druck-Schub- sowie Biegebeanspruchung bei Einbau von alkaliresistenten (AR) Bündelkurzglasfasern bzw. wasserdispersiblen monofilen AR-Kurzglasfasern verbessern (s. Kap. 5.3). Systematische Untersuchungen unter Variation von Faserlänge und -konzentration zeigen beanspruchungsspezifisch die Zusammenhänge von Festigkeits- und Verformungsverhalten und Gefügestrukturparameter der Kurzfasern bzw. der entstehenden Feststoffstruktur auf.

Bei systematischer Variation der Kurzfaserparameter ist keine Systematik in der Ausrichtung der Kurzfasern in Richtung parallel zur Treibrichtung zu erkennen. Bei Steigerung der Faserlänge und -konzentration verschieben sich die Makroporengrößenverteilungen hin zu kleineren Porenradien. Das Festigkeits- und Verformungsverhalten unter Biegebeanspruchung nimmt bei Steigerung der mittleren wirksamen Faserlänge in Beanspruchungsrichtung zu. Eine „in situ“ Versagensanalyse zeigt die ausgeprägte Entfestigung unter einachsiger Druckbeanspruchung und stellt die Grenzen eines Fasereinbaus dar. Kurzfasern tragen nur einschränkt zu einer Reduzierung der spröden Erstentfestigung bei. Es ist ein guter Verbund zwischen den AR-Kurzglasfasern und den Calciumsilikathydratphasen vorhanden.

7.1 Mischungszusammensetzung, Herstellung, Randbedingungen

Die Mischungszusammensetzung, die Herstellung und die Randbedingungen werden aus Kap. 5.1 übernommen. Es werden ausschließlich die alkaliresistenten (AR) Bündelkurzglasfasern (BGF) Saint Gobain (SG) Cem-FIL ARC20 62/2 und die wasserdispersiblen monofilen AR-Kurzglasfasern (MGF) SG Cem-FIL ARC20 70/30 bei Variation von Faserlänge (l_f) und -konzentration (ψ_f) eingebaut. Beide Kurzfasern werden, aufgrund der in Kap. 6.1 genannten Vorzüge, ausgewählt. Die maximale Konzentration ergibt sich, abhängig von l_f und ψ_f aus den ermittelten Verarbeitbarkeitsgrenzen (s. Kap. 6.2.1). Folgende Faserparameter variieren:

Tab. 7-1 Einbauten von BGF und MGF bei Variation von Faserlänge (l_f) und -konzentration (ψ_f)

Alkaliresistente Bündelkurzglasfaser (BGF) Saint Gobain (SG) Cem-FIL ARC20 62/2	Wasserdispersible monofile alkaliresistente Kurzglasfaser (MGF) SG Cem-FIL ARC20 70/30
• $l_f = 6 \text{ mm}$ - $\psi_f = 0,5 - \text{(3-1)}^a / 1,0 - \text{(3-2)} / 1,5 - \text{(3-3)} / 2,0 - \text{(3-4)} \text{ Vol.-%}$ • $l_f = 12 \text{ mm}$ - $\psi_f = 0,5 - \text{(3-5)} / 1,0 - \text{(3-6)} / 1,5 - \text{(3-7)} \text{ Vol.-%}$ ^a Nummerierung der Einbauvariationen	• $l_f = 3 \text{ mm}$ - $\psi_f = 0,25 - \text{(4-1)} / 0,5 - \text{(4-2)} / 1,25 - \text{(4-3)} \text{ Vol.-%}$ • $l_f = 6 \text{ mm}$ - $\psi_f = 0,25 - \text{(4-4)} / 0,5 - \text{(4-5)} / 1,0 - \text{(4-6)} \text{ Vol.-%}$ • $l_f = 12 \text{ mm}$ - $\psi_f = 0,25 \text{ Vol.-% (4-7)}$

7.2 Gefügestruktur

Aufbauend auf die Untersuchungsmethodik in Kap. 5.2 werden die Kurzfasern- und Feststoffstrukturen bei Einbau der Kurzfaservariationen nach Tab. 7-1 analysiert und diskutiert.

7.2.1 Kurzfaserstruktur

Versuchsbeschreibung und Randinformationen

Die Kurzfaserstrukturanalyse bei Einbau alkaliresistenter (AR) Bündelkurzglasfasern (BGF) ((3-1)-(3-7)) wird über die röntgen-computertomographische Gefügestrukturerfassung bei

nachgeschalteter 3D-Bildanalyse durchgeführt (s. Kap. 5.2.1). Untersuchungen bei Einbau der wasserdispersiblen monofilen AR-Kurzglasfasern (MGF) ((4-1)-(4-7)) sind mit hohem Aufwand verbunden; zur Strukturermassung sind hoch auflösende synchrotron-computertomographische Verfahren notwendig und nur begrenzte Probekörpergeometrien einsetzbar (s. Kap. 5.2.1). Eine systematische Untersuchung ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Die Untersuchung der Faserstruktur bei Einbau der BGF wird höhenabhängig im Treibkörper durchgeführt. Probekörper ($50 \times 50 \times 60 \text{ mm}^3$) werden über eine zentral angeordnete Säule mittig aus dem oberen und unteren Drittel des Treibkörpers herausgeschnitten (s. **Abb. 7-1**). Die Probekörper werden mit $87 \text{ } \mu\text{m}/\text{Voxel}$ erfasst (Messparameter: s. Kap. 5.2.1). Die Faserstrukturanalyse wird ausschließlich über die „Endpunkt-Methode“ bei Bestimmung der Faserverteilung ($\chi_{f,3D}$) und Faserorientierung ($\eta_{f,3D}$) durchgeführt. Unter Einbeziehung von l_f wird aus den normierten Orientierungsanteilen f_x, f_y, f_z die mittlere Faserlänge ($l_{f,m}$) in den Koordinatenrichtungen $l_{f,x}, l_{f,y}, l_{f,z}$ ermittelt. $l_{f,x}, l_{f,y}, l_{f,z}$ stellen richtungsabhängig direkt den mittleren wirksamen Anteil der Kurzfasern, bezogen auf die Faserkonzentration (ψ_f), dar.

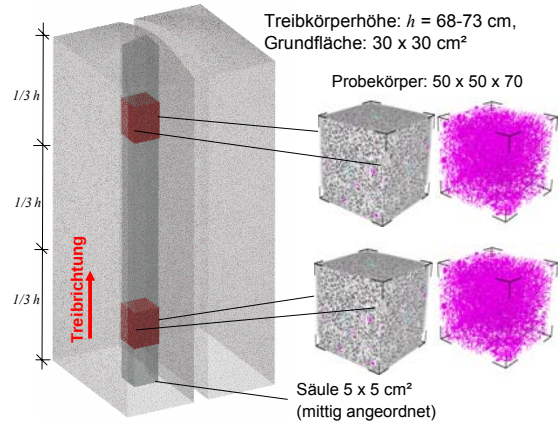


Abb. 7-1 Untersuchung der Kurzfaserverstruktur bei Einbau der alkaliresistenten Bündelkurzglasfaser Saint Gobain Cem-FIL ARC20 62/2, links: Anordnung der Probekörper im Treibkörper, rechts: Tomogramme der kompletten Probekörper bzw. der extrahierten Kurzfaserverstrukturen

Ergebnisse und Diskussion

Abb. 7-2 zeigt die Faserorientierungen in der stereographischen Projektion im oberen und unteren Probekörper bei Einbau der BGF unter Variation von ψ_f für $l_f = 6 \text{ mm}$ ((3-1)-(3-4)):

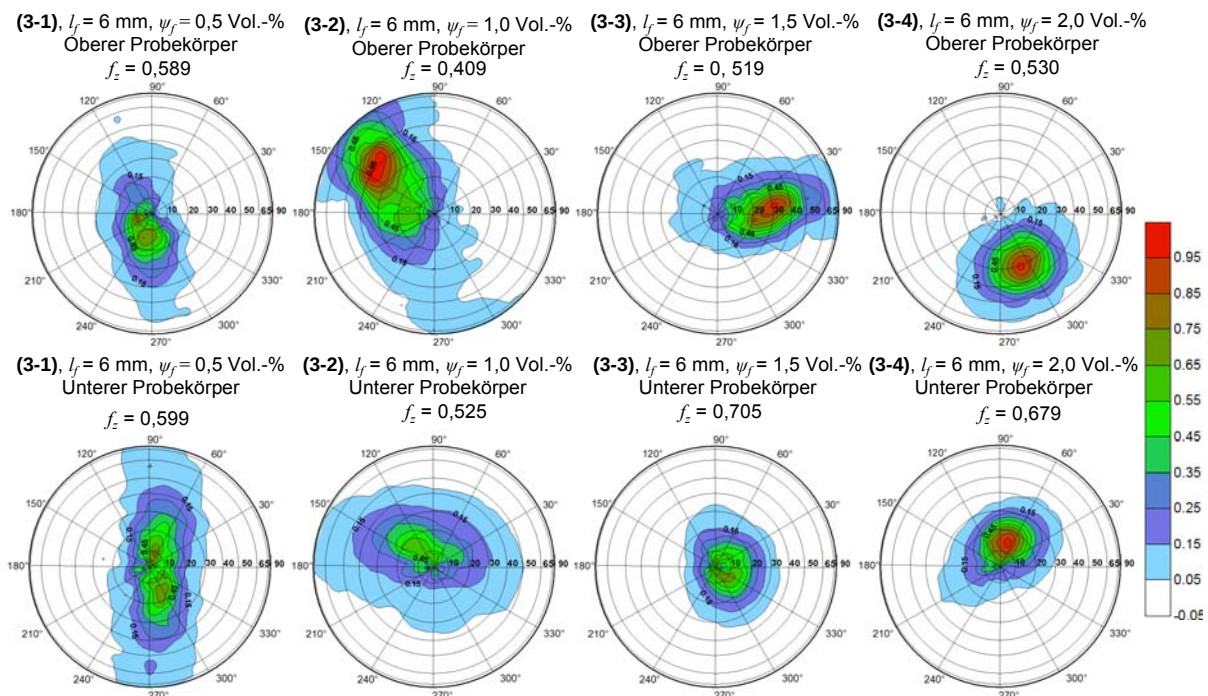


Abb. 7-2 Faserorientierung für den unteren und oberen Probekörper im Treibkörper (s. Abb. 7-1) bei Einbau der alkaliresistenten Bündelkurzglasfasern (BGF) Saint Gobain Cem-FIL ARC20 62/2 (Faserlänge $l_f = 6 \text{ mm}$) in Abhängigkeit von der Faserkonzentration (ψ_f), ((3-1)-(3-4)) (stereographische Projektion)

Die Kurzfasern weisen in allen Einbauvarianten, vergleichbar zu Kap. 5.2.1, deutliche Vorzugsorientierungen parallel zur Treibrichtung auf (s. **Abb. 7-2**). Es zeigen sich jedoch starke Inhomogenitäten im Polar- (θ_f) bzw. im Azimuthwinkel (φ_f). Die Abweichung des Maximums

im Polarwinkel ist im oberen Probekörper (3-2) maximal ($\theta_f = 40^\circ$). Alle anderen Probekörpern liegen bei $0^\circ < \theta_f < 30^\circ$. In mehreren Probekörpern zeigt die Verteilung von θ_f deutliche Nebenmaxima. Diese sind teilweise durch Raumwinkel $> 20^\circ$ voneinander getrennt. ψ_f zeigt keinen maßgebenden Einfluss auf θ_f . Für φ_f wird keine eindeutige Systematik festgestellt.

Die unteren sowie die oberen Probekörper vieler Faservariationen zeigen tendenziell eine in einer Richtung verbreiterte Faserorientierungsverteilung. Eine starke Gratausbildung weisen die Treibkörper (3-1) und (3-2) auf. Einige Probekörper zeigen deutlich „Faserschlieren“; die Kurzfasern folgen hier einer „Schmierbewegung“ im Probekörper.

Abb. 7-3 zeigt den computertomographischen Datensatz des oberen Probekörpers des Treibkörpers (3-4); die Kurzfasern sind vollständig extrahiert. Es ist ein Drehsinn in der Faserorientierung ($\eta_{f,3D}$) zu erkennen (s. Pfeilrichtung). $\eta_{f,3D}$ variiert innerhalb des Probekörpers. Da nur integrale stereographische Projektionen zur Auswertung der Faserorientierung im Probekörper herangezogen werden (s. Abb. 7-2), ist nur die Absolutorientierung sichtbar. Inhomogene Faserorientierungen innerhalb eines Probekörpers werden somit nicht berücksichtigt. Durch die Verkleinerung der Probekörpergeometrie könnte $\eta_{f,3D}$ differenzierter betrachtet werden.

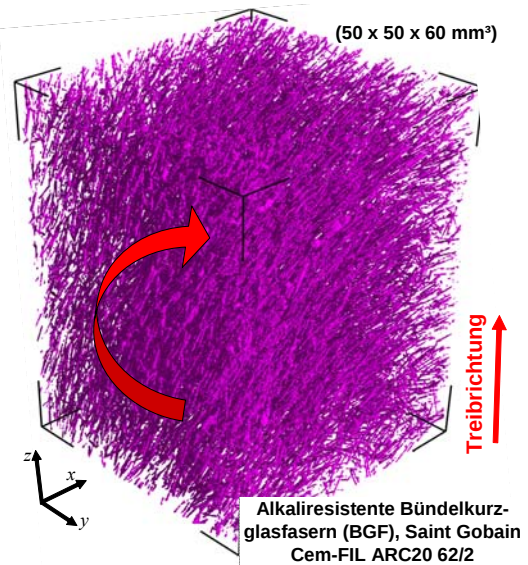


Abb. 7-3 Tomogramm der extrahierten Faserstruktur bei Einbau der AR-Bündelkurzglasfasern - oberer Probekörper des Treibkörpers (3-4)

Abb. 7-4 zeigt die Faserorientierungen in der stereographischen Projektion im oberen und unteren Probekörper bei Einbau der BGF unter Variation von ψ_f für $l_f = 12$ mm ((3-5)-(3-7)):

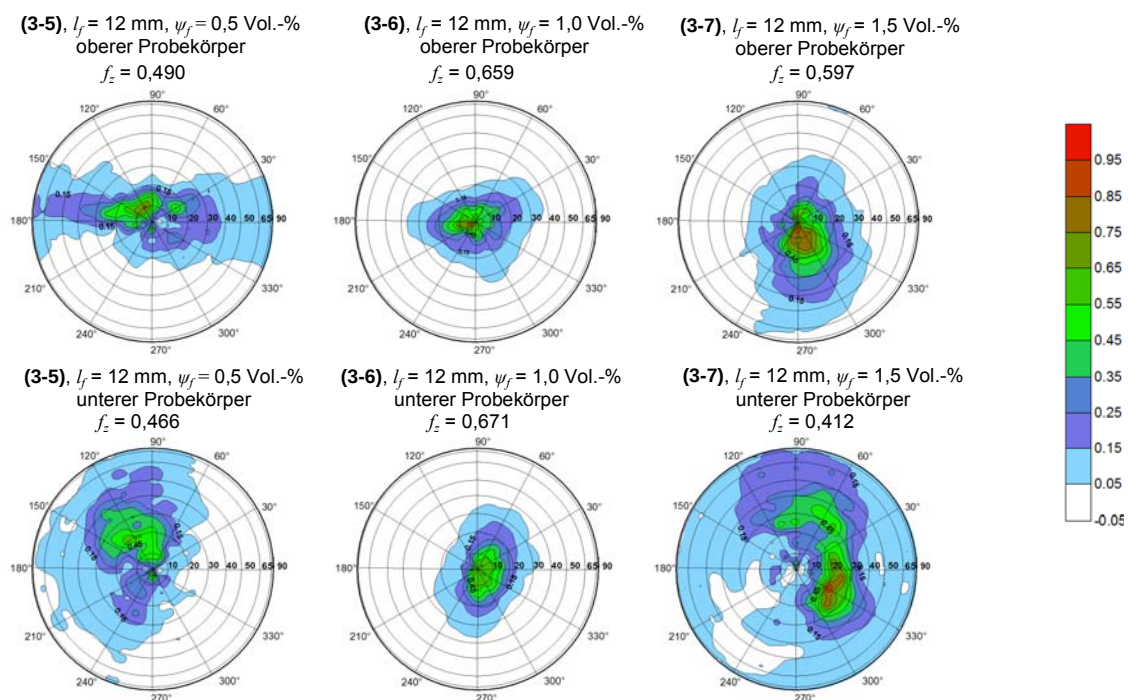


Abb. 7-4 Faserorientierung für den unteren und oberen Probekörper im Treibkörper (s. Abb. 7-1) bei Einbau der alkaliresistenten Bündelkurzglasfasern (BGF) Saint Gobain Cem-FIL ARC20 62/2 (Faserlänge $l_f = 12$ mm) in Abhängigkeit von der Faserkonzentration (ψ_f), ((3-5)-(3-7)) (stereographische Projektion)

Bei Einbau der BGF mit $l_f = 12$ mm (s. **Abb. 7-4**) verhält sich $\eta_{f,3D}$ ähnlich wie bei Einbau mit $l_f = 6$ mm. Es zeigen sich bei vorzugsweiser Faserausrichtung parallel zur Treibrichtung e-

benfalls Inhomogenitäten im Polar- (θ_f) bzw. Azimuthwinkel (φ_f). Die „verschmierte“ Orientierungsverteilung im unteren Probekörper des Treibkörpers (3-7) ist auf starke sterische Faser-Faser-Wechselwirkungen in der Anfangs- bzw. in der Treibsuspension zurückzuführen.

Die breitesten Orientierungsverteilungen (jeweils mit Nebenmaxima) ergeben sich bei $\psi_f = 0,5$ Vol.-% für $l_f = 6$ mm (3-1) und für $l_f = 12$ mm (3-5). Ein höheres ψ_f führt zunächst zu stärkeren Ausrichtungen der Kurzfasern. Das Optimum der Faserausrichtung in θ_f liegt bei $l_f = 6$ mm für $\psi_f = 1,5$ Vol.-% und bei $l_f = 12$ mm für $\psi_f = 1,0$ Vol.-%. Bei Steigerung von ψ_f wird die Ausrichtung parallel zur Treibrichtung wieder reduziert.

Die ausgerichtete Faserstruktur sowie die „Faserschlieren“ deuten darauf hin, dass die Faservorzugsorientierung aus der Strömung beim Einfüllen der Anfangssuspension übernommen wird. Probekörper mit kleinerem ψ_f sind, aufgrund geringerer sterischer Faser-Faser-Wechselwirkung, stärker anfällig für die Faservorzugsorientierung in der Anfangssuspension.

Zwischen den oberen und unteren Probekörpern der jeweiligen Treibkörper treten im Maximum der Verteilung nur geringe Winkeldifferenzen von 5-25° auf. Die Winkeldifferenzen in θ_f und φ_f zwischen den einzelnen Treibkörpern sind bedeutend stärker.

Bei Einbau der BGF mit $l_f = 6$ mm haben normierter Orientierungsanteil in z -Richtung (f_z) (s. Abb. 7-2) und Verteilungsmaximum von θ_f (s. **Abb. 7-5, links**) im unteren Probekörper des Treibkörpers höhere Werte als im oberen Probekörper.

Der Grund dafür sind u. a. Inhomogenitäten in den Strömungsfeldern beim Treiben. Diese nehmen durch Temperaturunterschiede, Schalungsrandeffekte, Auflast sowie örtlichen Inhomogenitäten in der Stabilität des faserversetzten „Treibkuchens“ nach oben hin zu. Im unteren Teilbereich ist das Strömungsfeld nahezu senkrecht, es ergibt sich eine Faserausrichtung vorzugsweise gleichmäßig in Richtung parallel zur Treibrichtung. Mit zunehmender Höhe treiben Bereiche mit „Schlieren“ auf (s. Abb. 7-5, **rechts**). Diese werden u. a. von der anfänglichen Faserstruktur vorgegeben.

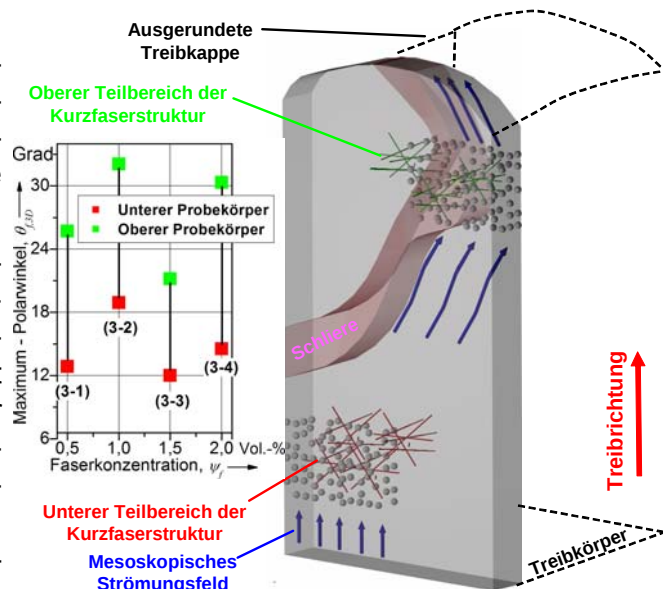


Abb. 7-5 Faserumorientierung bei Einbau der alkaliresistenten Bündelkurzglasfasern Saint Gobain Cem-FIL ARC20 62/2 (Faserlänge $l_f = 6$ mm), **links**: Verteilungsmaxima im Polarwinkel (θ_f) **rechts**: Schematische Darstellung eine Scheibe aus dem Querschnitt des Treibkörpers - Faserumorientierung

Bei Einbau der BGF mit $l_f = 12$ mm sind f_z (s. Abb. 7-4) und Verteilungsmaximum von θ_f zwischen oberem und unterem Probekörper nahezu gleich. Lediglich Treibkörper (3-7) zeigt, aufgrund o. g. Faser-Faser-Wechselwirkungen, eine Abweichung von der Systematik. Die Anfälligkeiten für Inhomogenitäten in der Faserausrichtung werden mit zunehmender Faserlänge reduziert. Die Ausrundung der Treibkappe ist bei gleicher Faserkonzentration in Treibkörpern mit $l_f = 12$ mm deutlich schwächer ausgeprägt als in Treibkörpern mit $l_f = 6$ mm.

Da dieses Verhalten in Abhängigkeit von der Faserlänge beim Küvettenversuch in Kap. 6.3 nicht festgestellt wurde, wird vermutet, dass die Schalungsform einen Einfluss auf die Inhomogenitäten in der Faserausrichtung hat. Die Faserverteilung ($\chi_{f,3D}$) ist über den Treibkörper homogen. Die Faseranzahl zwischen oberem und unterem Probekörper divergiert kaum.

Bei Einbau der MGF sind ebenfalls deutliche Vorzugsorientierungen der Kurzfasern in Richtung parallel zur Treibrichtung in den Treibkörpern festzustellen.

Abb. 7-6, a) mit $l_f = 12$ mm und **Abb. 7-6, b)** mit $l_f = 6$ mm zeigen, lichtmikroskopisch betrachtet, an Treibrisskavernen im Randbereich zweier Treibkörper deutliche Faserausrichtungen. Die Treibrisse werden bei beiden Treibkörpern über Erhöhung der Abgusstemperatur und Verwendung des Porosierungsmittels RO 450 im Randbereich provoziert.

Die MGF ist mit $l_f = 3$ mm und $l_f = 6$ mm aufgrund ihrer Form wesentlich anfälliger für die Umorientierung aus der Bildung der Makroporen in der Spätphase des Treibprozesses (s. Kap. 6.3.2). Die deutliche Faserausrichtung der biegeweichen MGF bei $l_f = 12$ mm parallel zur Treibrichtung bestätigt die Theorie, dass die Ausdehnung des umgebenden Treibmediums für eine Faserausrichtung maßgebend ist. Die Faserverteilung ist über die Höhe im Treibkörper ebenfalls homogen.

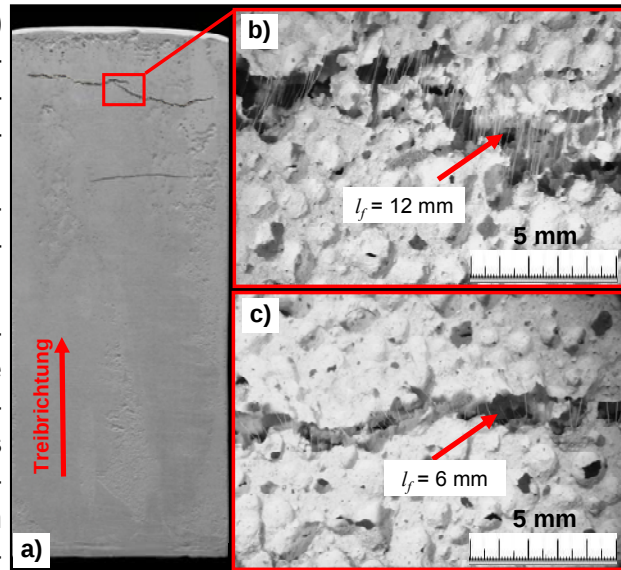


Abb. 7-6 Darstellung der Faserausrichtung bei Einbau der wasserdispersiblen monofilen alkaliresistenten Kurzglasfasern (MGF) Saint Gobain Cem-FIL ARC20 70/30, **a)** Treibkörperansicht nach Abb. 7-1, **b)** Faserlänge $l_f = 12$ mm, **c)** $l_f = 6$ mm

7.2.2 Feststoffstruktur

Die Feststoffstruktur wird über die Beurteilung der Rohdichte, über die qualitative Bewertung der Gefügestruktur an Schnittebenen sowie über die quantitative Bestimmung der Makropositätskennwerte analysiert. Untersucht wird weiterhin der Fasereinfluss auf die Bildung der umliegenden Makroporen sowie die örtliche Treibprozessbeanspruchung auf die Kurzfasern.

7.2.2.1 Rohdichte

Versuchsbeschreibung und Randinformationen

Versuchsaufbau und Randinformationen werden in Kap. 5.2.2 beschrieben.

Ergebnisse und Diskussion

Abb. 7-7 stellt die Mittelwerte der Rohdichte und die Rohdichte in Abhängigkeit zur Höhe im Treibkörper bei Einbau der BGF und der MGF nach Tab. 7-1 dar:

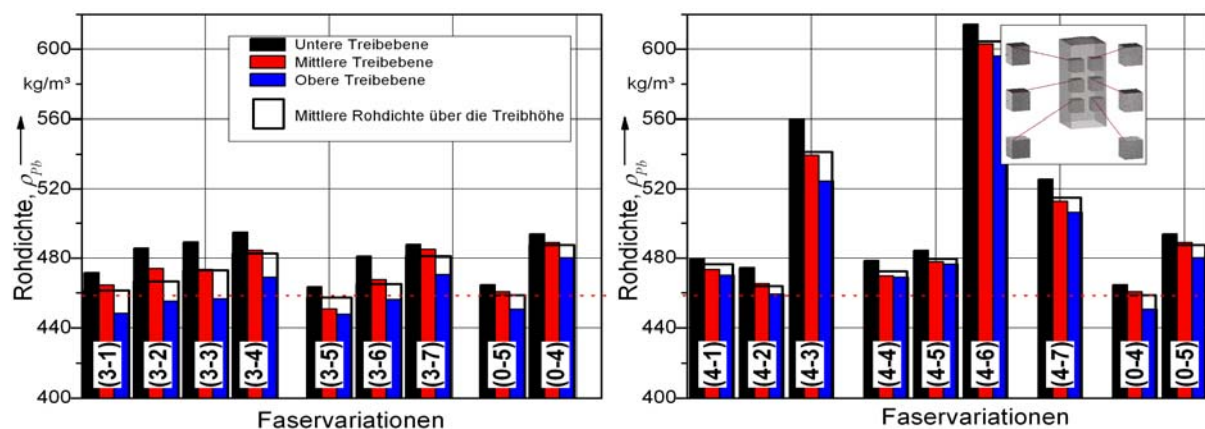


Abb. 7-7 Einfluss des Einbaus der alkaliresistenten (AR) Bündelkurzglasfasern (BGF) Saint Gobain Cem-FIL ARC20 62/2 und der wasserdispersiblen monofilen AR-Kurzglasfasern (MGF) SG Cem-FIL ARC20 70/30 auf die Rohdichte (ρ_{Pb}) im Vergleich zu den Referenzen (0-4), (0-5) nach Tab. 7-1, **links:** Einbau bei Variation der BGF ((3-1)-(3-7)), **rechts:** Einbau bei Variation der MGF ((4-1)-(4-7))

Bei Einbau der BGF wird eine erhöhte Rohdichte (ρ_{Pb}) gegenüber der Referenz (0-5) festgestellt (s. Abb. 7-7, **links**). ρ_{Pb} nimmt mit Erhöhung der Faserkonzentration (ψ_f) zu. Bei Steige-

rung der Faserlänge (l_f) reduziert sich ρ_{pb} leicht. Der Gradient über die Treibkörperhöhe ist gegenüber den Treibkörpern der Referenz (0-4) bzw. (0-5) tendenziell geringer. Über die Höhe des Treibkörpers nimmt ρ_{pb} linear ab. Die Makroporosität bleibt bei allen Fasereinbauten homogen verteilt. Die empirisch ermittelten Verarbeitbarkeitsgrenzen (s. Kap. 6.2.1), beurteilt ausschließlich über die Einmischbarkeit der Kurzfasern bzw. die Fließfähigkeit der Anfangssuspension, können auch unter dem Kriterium der Gefügehomoogenität (Anforderungen, s. Kap. 4.2) im getriebenen Zustand bestätigt werden.

Bei Einbau der MGF ergeben sich ebenfalls Steigerungen in ρ_{pb} gegenüber der Referenz (s. Abb. 7-7, **rechts**). Bei $l_f = 3$ mm reduziert sich mit Erhöhung von ψ_f die Rohdichte (ρ_{pb}). Bei $l_f = 6$ mm zeigt sich wieder ein Anstieg von ρ_{pb} mit Zunahme von ψ_f . Die Extremeinbauten (4-3) und (4-6) weisen ein deutlich gesteigertes ρ_{pb} auf. **Abb. 7-8** zeigt beispielhaft, in Anlehnung an Kap. 5.2.2, Lichtbildaufnahmen von Schnittebenen der Treibkörper:

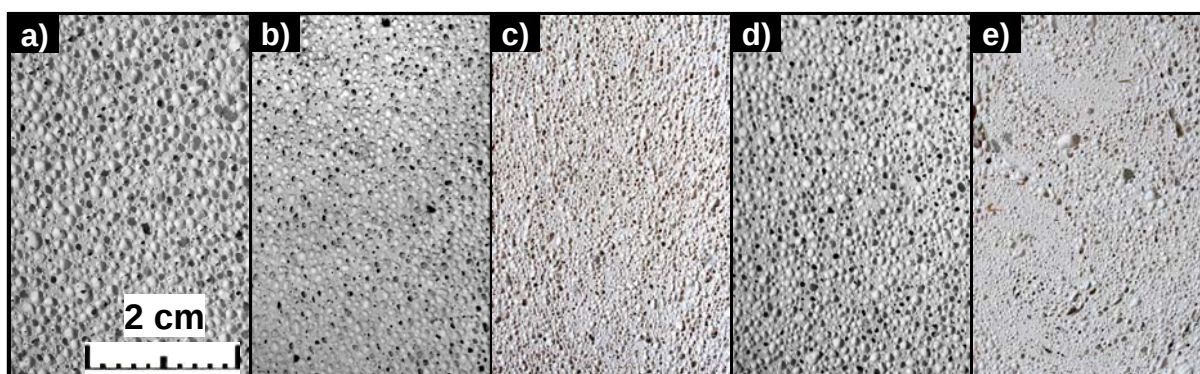


Abb. 7-8 Einfluss des Einbaus der wasserdispensiblen monofilen alkaliresistenten (AR) Kurzglasfasern (MGF) Saint Gobain Cem-FIL ARC20 70/30 auf die Gefügestruktur, Vergleichsanalyse zur Referenz, **a**) Referenz (0-5), **b**) (4-1), Faserlänge $l_f = 3$ mm, Faserkonzentration $\psi_f = 0,25$ Vol.-%, **c**) (4-3), $l_f = 3$ mm, $\psi_f = 1,25$ Vol.-%, **d**) (4-4), $l_f = 6$ mm, $\psi_f = 0,25$ Vol.-%, **e**) (4-6), $l_f = 6$ mm, $\psi_f = 1,0$ Vol.-%

Es zeigen sich deutliche Divergenzen in der Beschaffenheit des Feststoffgefüges bzw. der Makroporosität. **Abb. 7-8, a)** stellt die Referenz (0-5) dar; sie weist eine homogene Gefügestruktur in der Schnittebene auf. Bei Einbau der Faservariation (4-1), (**Abb. 7-8, b**) und (4-3), (**Abb. 7-8, c**) mit $l_f = 3$ mm sowie der Faservariation (4-4), (**Abb. 7-8, d**) und (4-6), (**Abb. 7-8, e**) mit $l_f = 6$ mm zeigen sich deutliche Verschiebungen hin zu kleineren Makroporengrößen. Die o. g. Inhomogenitäten in der Makroporosität bei hohem ψ_f sind ausgeprägt, im Besonderen bei (4-6). Es sind deutliche „Porenschlieren“ bzw. „Porenverzerrungen“ sowie Makroporen mit Übergröße festzustellen. Die nahezu sphärische Porenform ist aufgehoben; Teilbereiche sind unporosiert. Diese Inhomogenitäten in der Makroporenstruktur haben eine deutliche Steigerung der Rohdichte zur Folge. Treibkörper mit $\rho_{pb} > 550$ kg/m³ (Porosierungsmittelgehalt: 0,09 M.-%) sind, wie in Kap. 5.2.2 festgestellt, Ausschuss.

7.2.2.2 Quantitative Analyse der Makroporosität

Versuchsbeschreibung und Randinformationen

Die Untersuchungen bei Einbau der BGF werden über die 3D-Bildanalyse durchgeführt. Es stehen die Tomogramme der Probekörper der Kurzfaserverstrukturanalyse nach Abb. 7-1 zur Verfügung. Als Bildbearbeitungssoftware wird die kommerzielle 3D-Bildbearbeitungs- und Bildanalyse-Programmbibliothek MAWI [S2] eingesetzt. Die Makroporen der Datensätze werden über eine Schwellwertsetzung und einen „Opening“ Algorithmus (3 Voxel, Erosion, Dilation) extrahiert und bearbeitet. Das „Opening“ zerstört Teile der unteren Makroporosität (Porendurchmesser $d_p < 0,3$ mm). Für die eindeutige Segmentierung der Makroporen und die Unterdrückung des „Rauschens“ ist dieser Algorithmus jedoch erforderlich. Nach einem „Labelling“ werden die Makroporen standardisiert über MAWI 3D analysiert (s. Kap. 2.2.1).

Die Untersuchungen bei Einbau der MGF werden über die 2D-Bildanalyse durchgeführt. Die

Gefügestruktur wird vereinfachend 2D über die Lichtbildtechnik („Scanning Methode“) erfasst (42 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$). Dazu werden abschnittsweise vertikal Schnittebenen (Höhe $h = 6\text{ cm}$) über eine zentral angeordnete Säule aus dem Treibkörper aufgenommen (s. Abb. 7-1). Vor der Bildaufnahme wird der Kontrast zwischen Pore und Feststoff zur besseren Segmentierung der Einzelphasen verstärkt. Dazu werden die Schnittebenen mit Kunstharzlack (schwarz) „eingesprüht“ und anschließend die Feststoffoberflächen geschliffen. Der Feststoff hebt sich weiß ab. Als Bildbearbeitungs- und Bildanalysesoftware wird das 2D-ImageJ Tool [S1] eingesetzt. Zur Verbesserung der Segmentierungsqualität werden die Makroporen über einen „Opening“ Algorithmus (2 Voxel) nach der Binarisierung bearbeitet. Anschließend folgt ein „Labelling“; die Makroporen werden standardisiert über das ImageJ Tool vermessen.

Die Kurzfasern werden, aufgrund des geringen Volumenanteils im Verhältnis zu den anderen Phasen, bei beiden Untersuchungsmethoden ausschließlich als Feststoffmaterial erfasst.

Ergebnisse und Diskussion

Bei Einbau der BGF zeigen die Probekörper aus dem unteren Bereich des Treibkörpers folgende bildanalytisch erfasste kumulative Radienverteilung der Makroporosität (s. **Abb. 7-9**):

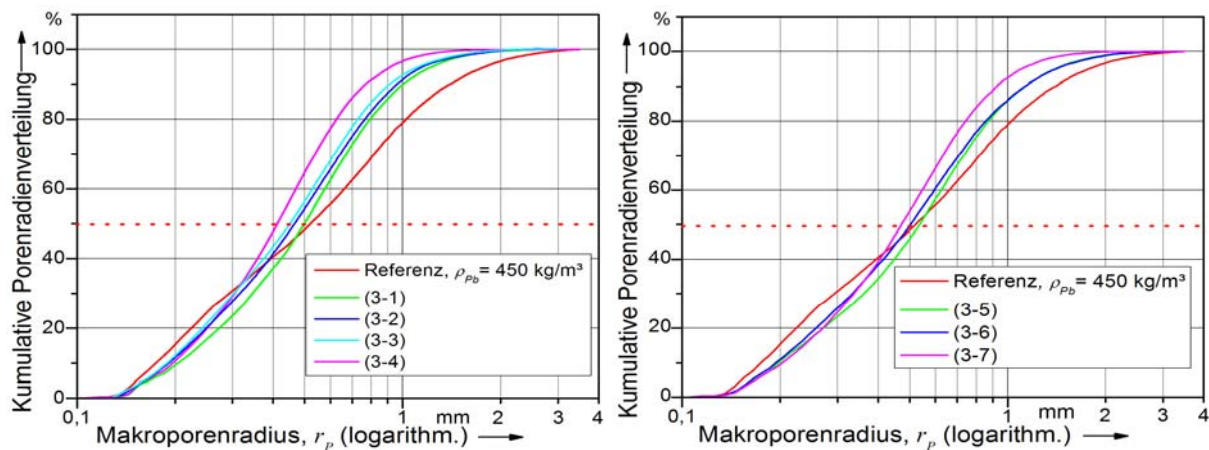
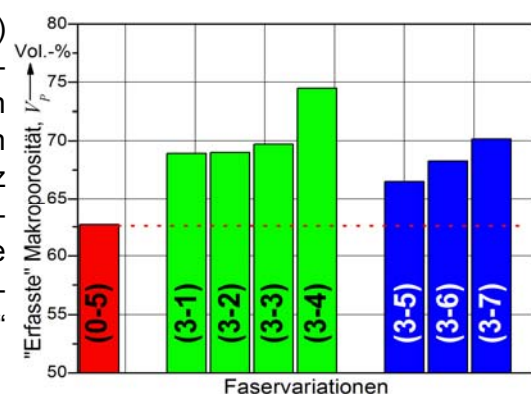


Abb. 7-9 Einfluss der alkaliresistenten Bündelkurzglasfasern Saint Gobain Cem-FIL ARC20 62/2 auf die Radienverteilung der Makroporosität, **links**: Kumulative prozentuale Porenradienverteilung, $g(r_p)$ bei der Faserlänge $l_f = 6\text{ mm}$, **rechts**: Kumulative prozentuale Porenradienverteilungen ($g(r_p)$) bei $l_f = 12\text{ mm}$

Die kumulativen Makroporenradienverteilungen ($g(r_p)$) bei Einbau der Faserlänge $l_f = 6\text{ mm}$ verschieben sich hin zu kleineren mittleren Porenradien (s. **Abb. 7-9, links**). Diese Tendenz setzt sich bei systematischer Erhöhung von ψ_f fort. Bei Einbau von $l_f = 12\text{ mm}$ zeigt $g(r_p)$ gleiche Verhaltensweisen wie bei $l_f = 6\text{ mm}$ (s. Abb. 7-9, **rechts**). Bei Vergleich von $l_f = 6\text{ mm}$ und $l_f = 12\text{ mm}$ wird deutlich, dass die mittleren Porenradien bei $l_f = 12\text{ mm}$ kleiner sind.

Die gemittelten „erfassten“ Makroporositäten (V_p) der Faservariation der BGF ((3-1)-(3-7)) aus unterem und oberem Probekörper (s. Abb. 7-1) sind in **Abb. 7-10** dargestellt. Alle eingebauten Variationen haben Erhöhungen in V_p gegenüber der Referenz zur Folge. Die Referenz besitzt eine breitere Verteilung der Makroporosität; es zeigt sich eine höhere Porenanzahl bei Porenradien $r_p < 0,3\text{ mm}$ (Vergleiche **Abb. 7-9**). Diese werden durch den „Opening“ Algorithmus der Bildanalyse wegerodiert.



Bei Einbau der BGF ist deutlich der Zusammenhang von Rohdichte und V_p festzustellen. Der Vergleich zwischen V_p beider Faserlängen zeigt keine auf die Faserlänge zurückzuführenden Verhaltensweisen.

Abb. 7-10 Einfluss der alkaliresistenten Bündelkurzglasfasern (BGF) Saint Gobain Cem-FIL ARC20 62/2 auf die mittlere Makroporosität über die Treibhöhe

Die mittleren Makroporenradien nehmen nach oben hin im Treibkörper bei allen Einbauvariationen der BGF zu (Vergleiche Kap. 2.2.3).

Erklären lassen sich diese Charakteristika wieder durch das Zusammenspiel aus Fließeigenschaften, Energieverbrauch und Wechselwirkungen von Kurzfasern und Treibmedium (s. Kap. 6.3.2). Der Porenformfaktor aller Einbauvariationen ist nahe 1 ($\pm 0,05$).

Bei Einbau der MGF unter Variation von ψ_f und l_f zeigen sich in den Makroporositäten ebenfalls Verschiebungen hin zu kleineren Makroporengrößen. **Abb. 7-11** stellt den mittleren Makroporenradius ($r_{P,m}$) bei Mittelung der vertikalen Schnittebenen über die Treibkörperhöhe dar. $r_{P,m}$ ist bei allen Einbauvariationen gegenüber der Referenz reduziert.

Bei Einbau der MGF mit der Faserlänge $l_f = 3$ mm und $l_f = 6$ mm nimmt $r_{P,M}$ jeweils mit Zunahme von ψ_f zu. Der Gradient ist bei $l_f = 6$ mm höher. Es zeigen sich ähnliche Verhaltensweisen wie bei Einbau der BGF. Der Einbau von $l_f = 12$ mm führt zu einem deutlich geringeren $r_{P,M}$, auch hier lässt sich ein Zusammenhang zur Rohdichte feststellen.

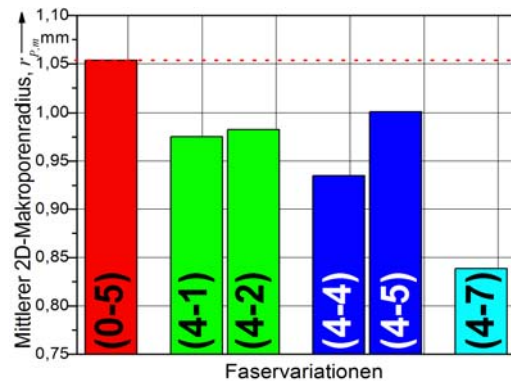


Abb. 7-11 Einfluss der wasserdispersiblen mono-filen alkaliresistenten Kurzglasfasern (MGF) Saint Gobain Cem-FIL ARC20 70/30 auf den mittleren zweidimensionalen Makroporenradius ($r_{P,M}$)

Die mittlere Porengröße nimmt bei allen Treibkörpern nach oben hin linear zu. Der Gradient von $r_{P,M}$ über die Höhe im Treibkörper wird mit Zunahme der Faserlänge gesteigert; bei der Referenz ist er am stärksten ausgeprägt. Aufgrund der Inhomogenitäten in den Treibkörpern (4-3) und (4-6) ist eine Analyse der Makroporositäten bei diesen Treibkörpern nicht möglich.

Abweichungen zwischen 2D- und 3D-Bilderfassung bzw. Bildanalyse und unterschiedliche Auflösungen bei der Erfassung der Probekörper lassen einen direkten Vergleich zwischen den Gefügestrukturen bei Einbau der BGF und der MGF nicht zu.

7.2.2.3 Nachweis der Gefügestrukturanisotropien

Die Kurzfasern liegen vorzugsweise im Feststoff (s. Kap. 5.2.1). Dieses Phänomen führt bei Faservorzugsorientierung in Richtung parallel zur Treibrichtung zu einer Vorzugsausrichtung des Feststoffs in Richtung parallel zur Treibrichtung. Im Folgenden werden die Anisotropien der Gefügestruktur stichpunktartig qualitativ untersucht.

Versuchsbeschreibung und Randinformationen

Die Anisotropien werden über die schrittweise Erosion (6 Voxel) der Feststoffphase beurteilt (s. Kap. 3.5.3). Dazu wird 3D die Programmbibliothek MAWI [S2] genutzt. Untersucht werden stichpunktartig die Gefügestrukturanisotropien bei Einbau der BGF. Es stehen hierzu die Tomogramme der Probekörper der Kurzfaserstrukturanalyse zur Verfügung.

Ergebnisse und Diskussion

Abb. 7-12, a) zeigt zweidimensional (2D) die Schnittebene eines Tomogramms aus dem unteren Probekörper der Referenz. Die dazugehörige erodierte Fläche ist in **Abb. 7-12, b)** dargestellt. **Abb. 7-12, c)** stellt beispielhaft 2D eine erodierte Schnittebene eines Tomogramms aus dem unteren Probekörper des Treibkörpers (3-3) dar. **Abb. 7-12, d)** zeigt die ellipsengleichen Porenformen der erodierten Gefügestruktur aus **Abb. 7-12, c)**.

Im Gegensatz zu den erodierten Schnittebenen der Referenz zeigen sich bei allen erodierten Schnittebenen bei Einbau der BGF deutliche Gefügestrukturanisotropien. Diese nehmen bei Erhöhung von ψ_f zu. Ein Unterschied zwischen der Faserlänge $l_f = 6$ mm und $l_f = 12$ mm wird nicht festgestellt. Die Anisotropien bei Fasereinbau weisen auf größere Masseanteile parallel zur Treibrichtung hin; die Steganteile sind deutlich stärker ausgeprägt.

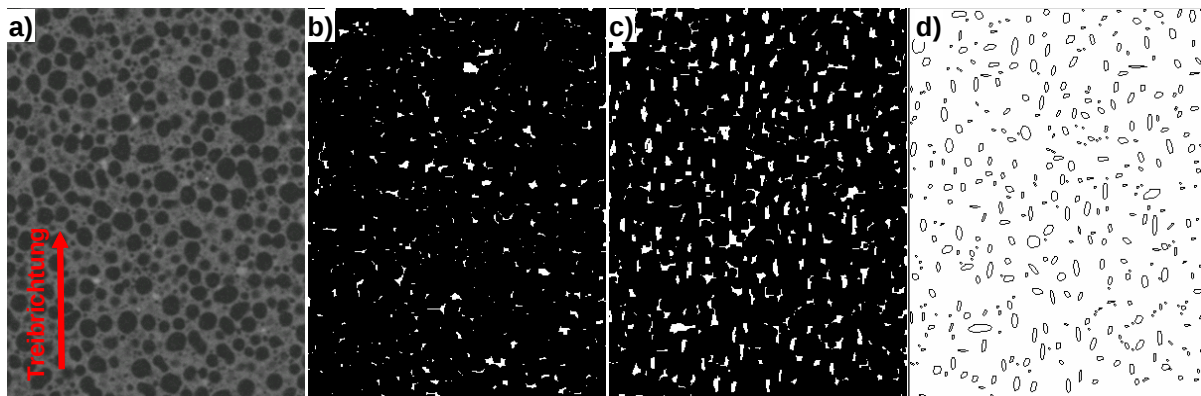


Abb. 7-12 Anisotropien im Feststoffgefüge bei Einbau der alkaliresistenten Bündelkurzglasfasern (BGF) Saint Gobain Cem-FIL ARC20 62/2, **a)** zweidimensionale (2D) Schnittenebene eines Tomogramms der Referenz, **b)** 2D Schnittenebene der Referenz nach dem Erosionsverfahren, **c)** 2D Schnittenebene des Treibkörpers (3-3) nach der Erosion, (Faserlänge $l_f = 12$ mm, -konzentration $\psi_f = 1,5$ Vol.-%), **d)** Schematische Darstellung der größtmöglichen Ellipsen der jeweiligen erodierten Restflächen aus c)

7.2.2.4 Einfluss der Kurzfasern auf die Bildung der Makroporosität

Der Einbau von Kurzfasern beeinflusst die Nahordnung der Makroporen um die Kurzfasern (s. Kap. 3.5.3). Stichpunktartig wird untersucht, in welchem minimalen radialen Abstand vom Mittelpunkt der BGF eine homogene Makroporosität erreicht wird.

Versuchsbeschreibung und Randinformationen

Der mittlere Teil (Durchmesser $d = 10$ mm, Höhe $h = 40$ mm) des unteren Probekörpers im Treibkörper (3-1) wird röntgen-computertomographisch erfasst (s. **Abb. 7-13, links, a)**). Die Erfassung wird bei einer Röhrenspannung von 40 kV und 200 μ A ohne Vorfilter aufgelöst bei 12,3 μ m/Voxel durchgeführt (s. Kap. 5.2.1). Es werden Einzelbereiche ($5 \times 5 \times 15$ mm³) mit jeweils einer zentral angeordneten BGF aus dem Gesamtdatensatz extrahiert (s. **Abb. 7-13, links, b)-c)**). Senkrecht zur Kurzfaser werden die zur Dichte proportionalen Grauwerte über die Faserlänge aufsummiert. Es ergibt sich eine 2D-Grauwertverteilung nach **Abb. 7-13, links, d)**. Zur besseren Skalierung werden die Faservoxel (Grauwerte > 65) auf den mittleren Grauwert des Porenbetons (65) gesetzt (s. **Abb. 7-13, links, e)**). Die Grauwerte werden entlang der Kurzfaser radial um den jeweiligen Fasermittelpunkt aufsummiert und mit dem Umfang normiert. Die Region mit ansteigender Materialdichte um die Faser wird detektiert.

Ergebnisse und Diskussion

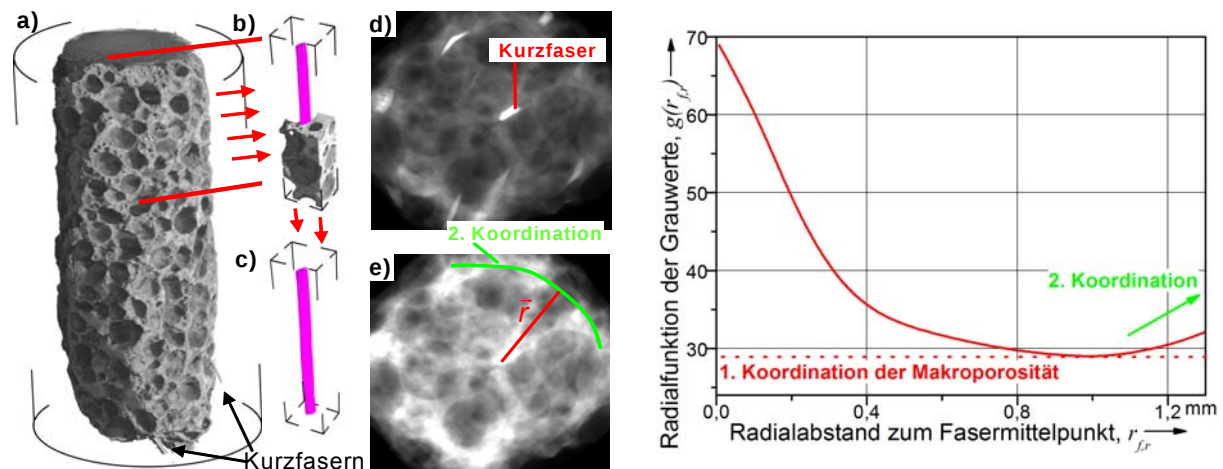


Abb. 7-13 Fasereinfluss auf die umliegende Makroporosität des Porenbetons, beispielhaft für die alkaliresistente Bündelkurzglasfaser, **links:** Ablauf der Analyse, **a)** Tomogramm des unteren Probekörpers des Treibkörpers (3-1) nach **Abb. 7-1**, **b)** Separierung von zu analysierenden Teilbereichen (Faserextrahierung im oberen Bereich), **c)** Extrahierung der kompletten Einzelfaser, **d)** Aufsummiertes Grauwertbild (8 bit, normiert) entlang der Faserlänge, **e)** Grauwertbild: Grauwerte $> 65 = 65$, **rechts:** Radialfunktion der Grauwerte ($g(r_{fr})$) - Fasereinfluss auf die Anordnung der Makroporosität im Abstand zur Faser

Abb. 7-13, **rechts** zeigt die mittlere Radialfunktion ($g(r_{f,r})$) der Grauwerte aus sechs Einzelfasern. Im Nahbereich der Kurzfasern ist eine deutlich höhere mittlere Materialdichte festzustellen. In weiter entfernten Regionen reduziert sich die Materialdichte. Das Minimum befindet sich bei einem mittleren Abstand vom Faserschwerpunkt $r_{f,r} \approx 0,95$ mm. Der anschließende Bereich weist keine Änderung der Materialdichte auf; ein „Ring“ von Makroporen ordnet sich um die Kurzfaser an. Die Kurve steigt ab $r_{f,r} > 1,10$ mm wieder an, wenn sich der Feststoffanteil hinter dem ersten konzentrischen Porenring erhöht. Bei geringerem ψ_f ergeben sich weitere konzentrische Anordnungen von Makroporenringen; diese werden spätestens im dritten Porenring aufgehoben. Bei hohen ψ_f und damit verbundenen geringen mittleren Faserabständen überschneiden sich die Nahordnungsbereiche der Makroporosität. Daraus geht hervor, dass die BGF verstärkt Porenbetonmaterial auf den Oberflächen bindet.

7.2.2.5 Beanspruchung auf die Kurzfaser im Treibprozess

Bei Bildung der Makroporosität können die Kurzfasern beansprucht werden, es zeigen sich Verformungen in der Faserform. Das Fasertragverhalten wird dadurch verändert. Die folgenden Untersuchungen zeigen den Einfluss des Treibprozesses auf Faserbiegung und -torsion.

Versuchsbeschreibung und Randinformationen

Aus o. g. Röntgen-Computertomographien (Röntgen-CT) wird jeweils eine BGF extrahiert und hinsichtlich vorhandener Faserbiegung und -torsion beurteilt. Ergänzend erfolgt die gleiche Beurteilung an Synchrotron-CT's nach Kap. 5.2.1 bei Einbau der MGF.

Ergebnisse und Diskussion

Abb. 7-14, a) stellt eine hoch aufgelöste Synchrotron-CT bei Einbau der MGF dar. Die extrahierten Kurzfasern zeigen keine Biegeverformungen; die Monofilamente behalten ihre Längsschnittform. Torsionsverformungen können bei sphärischem Querschnitt ausgeschlossen werden. Diese Ergebnisse bestätigen die gemachten Feststellungen zur Faserbiegung nach Kap. 5.2.1.

Abb. 7-14, b) zeigt elektronen-mikroskopisch eine BGF im eingebauten Zustand. Die Aufnahme erfolgte an einer Bruchfläche längs der Faser. Die Monofilamente sind deutlich im Faserbündel erkennbar. Sie liegen teilweise lose, es sind innere „Verdrillungen“, die aus der Verarbeitung und dem Treibprozess stammen, vorhanden. Biegephänomene sind auch bei Analyse der Röntgen-CT's bei BGF-Einbau kaum feststellen (**Abb. 7-14, c)**).

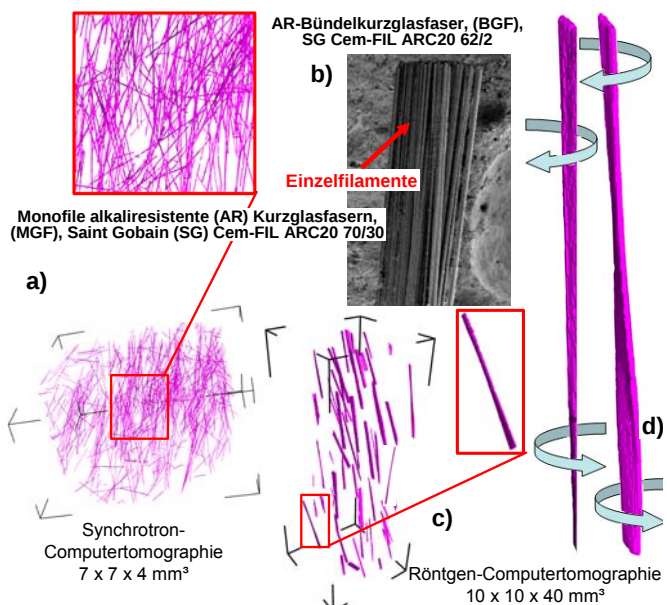


Abb. 7-14 Einfluss des Treibprozesses auf die Biege- und Torsionsverformungen der Einzelfasern, **a)** Tomogramm bei Einbau der MGF, **b)** Elektronen-mikroskopische Aufnahme der BGF, **c)** Tomogramm bei Einbau der BGF, **d)** Detail zur Fasertorsion der BGF (Faserlänge $l_f = 6$ mm)

Lediglich Torsionsverformungen der Fasern sind zu erkennen. **Abb. 7-14, d)** zeigt beispielhaft zwei hoch aufgelöste extrahierte BGF ($l_f = 6$ mm). Es sind deutliche, durch die Pfeilrichtungen angedeutete, Verdrehungen um die Faserlängsachse erkennbar. Grund dafür sind die Torsionskräfte bei örtlicher Porenbildung im Treibprozess. Die BGF ist, aufgrund ihrer Querschnittsform (Rechteckquerschnitt: $0,05 \times 0,4$ mm²) bei geringem Länge-Breite-Verhältnis, stark anfällig für die Torsionsbeanspruchung. Die Torsionssteifigkeit der BGF ist somit eingeschränkt und nimmt bei Steigerung der Faserlänge zu.

7.3 Festigkeits- und Verformungsverhalten

Das Festigkeits- und Verformungsverhalten bei Einbau der alkaliresistenten (AR) Bündelkurzglasfasern (BGF) Saint Gobain (SG) Cem-FIL ARC20 62/2 und der wasserdispersiblen monofilen AR-Kurzglasfasern (MGF) SG Cem-FIL ARC20 70/30 nach Tab. 7-1 wird unter folgenden äußeren Beanspruchungen untersucht:

- Einachsige Druckbeanspruchung,
- Kombinierte Druck-Schubbeanspruchung,
- Dreipunkt-Biegebeanspruchung mit Kerbung.

Die Untersuchungen werden höhen- und richtungsabhängig im Treibkörper durchgeführt. Die Probekörper lagern im Vorfeld bei 65°C bis zur Ausgleichsfeuchte bei Massekonstanz.

7.3.1 Einachsige Druckbeanspruchung

7.3.1.1 Allgemeines

Versuchsbeschreibung und Randinformationen sind in Kap. 5.3.1 beschrieben.

Ergebnisse und Diskussion

Bei Einbau der alkaliresistenten (AR) Bündelkurzglasfasern (BGF) Saint Gobain (SG) Cem-FIL ARC20 62/2 zeigen sich unter Druckbeanspruchung nur eingeschränkte Verbesserungen im Festigkeits- und Verformungsverhalten (s. Kap. 5.3.1). Die BGF besitzt ausschließlich in der Druckfestigkeit (β_D) parallel zur Treibrichtung bei hohem ψ_f und bei fortgeschrittener Entfestigung eine Wirksamkeit. Der abfallende Ast im Bereich der Erstentfestigung ist bei allen Variationen bis zu einem Plateau auf mittlerer faserspezifischer Festigkeit ausgeprägt.

Abb. 7-15 zeigt richtungsabhängig eine Auswahl empirisch ermittelter Druckspannungs-Stauchungs-Linien bei Einbau der BGF. Es werden parallel zur Treibrichtung die Würfel der mittleren Ebene (Abb. 7-15, **links**) und orthogonal zur Treibrichtung die Würfel der unteren Ebene (Abb. 7-15, **rechts**) des Treibkörpers dargestellt.

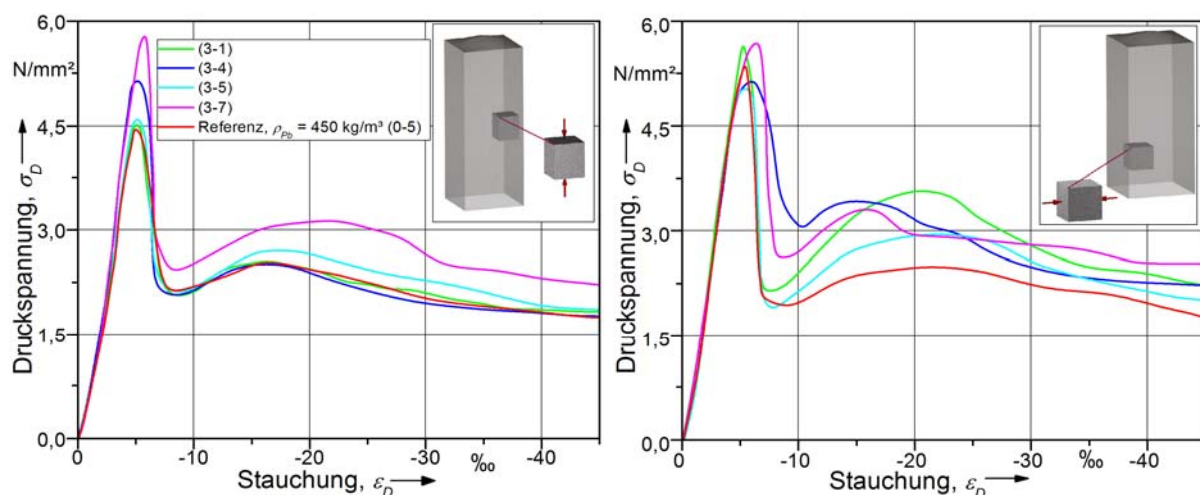


Abb. 7-15 Spannungs-Stauchungs-Linien unter einachsiger Druckbeanspruchung bei Einbau der alkaliresistenten Bündelkurzglasfasern (BGF) Saint Gobain Cem-FIL ARC20 62/2 für die Faserlänge $l_f = 6$ mm (3-1), (3-4) und $l_f = 12$ mm (3-5), (3-7) im Vergleich zur Referenz (0-5), **links**: Probekörper, parallel zur Treibrichtung beansprucht (mittlere Ebene des Treibkörpers), **rechts**: Probekörper, orthogonal zur Treibrichtung beansprucht (untere Ebene des Treibkörpers)

Es ergeben sich parallel und orthogonal zur Treibrichtung nur untergeordnete Steifigkeitsunterschiede in Abhängigkeit von Faserlänge (l_f) und Faserkonzentration (ψ_f). Die Kurvenanstiege bis zur 0,9fachen Druckfestigkeit (β_D) sind bei allen Einbauvarianten nahezu linear. Die Erstentfestigung kann auch bei hohem ψ_f nicht wesentlich reduziert werden.

- Bei Beanspruchung parallel zur Treibrichtung wird β_D gegenüber der Referenz (0-5) mit Zunahme von l_f und ψ_f erhöht (s. **Abb. 7-15, links**). Verantwortlich dafür ist die faserkonzentrationsabhängige Vorzugsorientierung der Gefügestruktur, welche sich aus Faser und der umgebenden Feststoffphase zusammensetzt. Die Feststoffanteile sind parallel zur Treibrichtung im Probekörper vergrößert. Die Verläufe der Entfestigungslinien zeigen bei Zunahme von l_f wesentlich höhere Niveaus. Aufgrund der fehlenden Verbundlänge hat die BGF mit Faserlänge $l_f = 6$ mm auch in der Entfestigung nur eingeschränkte Wirksamkeit.
- Bei Beanspruchung orthogonal zur Treibrichtung (s. **Abb. 7-15, rechts**) ergeben sich bei höheren Faserkonzentrationen (ψ_f) ausgeprägte Ausrundungen für β_D im Vergleich zur Referenz (0-5). Gegenüber der Referenz und bei Steigerung von l_f sowie ψ_f sind deutlich höhere Entfestigungsplateaus vorhanden. Dies ist in erster Linie auf die mittlere wirksame Faserlänge ($l_{f,m}$), durch die Vorzugsorientierung der Kurzfasern und der damit verbundenen Querkzugbehinderung orthogonal zur Beanspruchungsrichtung, zurückzuführen. Im weiteren Verlauf der eingepprägten Verschiebung kommt dieser Effekt in Abhängigkeit von $l_{f,m}$ immer stärker zum Tragen. Es werden deutliche Unebenheiten bzw. die Ausbildung eines weiteren Peaks auf der Entfestigungslinie festgestellt. Die Entfestigungsplateaus parallel zur Treibrichtung zeigen eine wesentlich gleichmäßigere Ausprägung.

Bei Einbau der wasserdispersiblen monofilen AR-Kurzglasfasern (MGF) SG Cem-FIL ARC20 70/30 ergeben sich ebenfalls ausschließlich parallel zur Treibrichtung in β_D und im Entfestigungsverhalten Verbesserungen im Festigkeits- und Verformungsverhalten (s. Kap. 5.3.1).

Abb. 7-16 zeigt richtungsabhängig eine Auswahl empirisch ermittelter Druckspannungs-Stauchungs-Linien bei Einbau der MGF vergleichend zur Referenz (0-5). Es werden parallel zur Treibrichtung die Würfel der mittleren Ebene (**Abb. 7-16, links**) und orthogonal zur Treibrichtung die Würfel der unteren Ebene des Treibkörpers (**Abb. 7-16, rechts**) dargestellt.

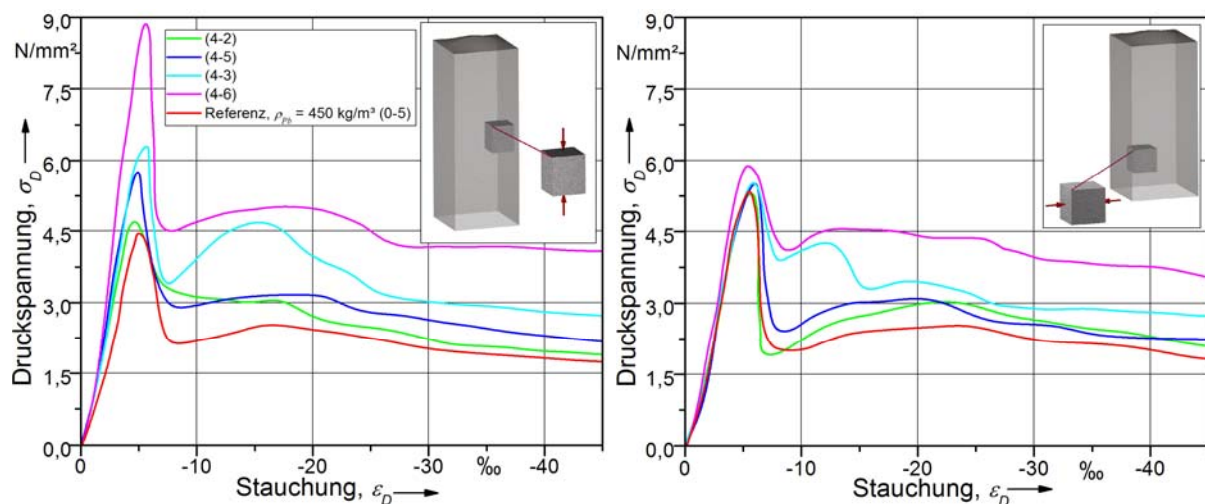


Abb. 7-16 Spannungs-Stauchungs-Linien unter einachsiger Druckbeanspruchung bei Einbau der wasserdispersiblen monofilen alkaliresistenten Kurzglasfasern (MGF) Saint Gobain Cem-FIL ARC20 70/30 für die Faserlänge $l_f = 3$ mm (4-2), (4-3) und $l_f = 6$ mm (4-5), (4-6) im Vergleich zur Referenz (0-5), **links**: Probekörper, parallel zur Treibrichtung beansprucht (mittlere Ebene des Treibkörpers), **rechts**: Probekörper, orthogonal zur Treibrichtung beansprucht, (untere Ebene des Treibkörpers)

Es zeigen sich qualitativ ähnliche Linienverläufe wie bei Einbau der BGF. Treibrichtungsabhängig lassen sich jedoch deutlich ausgeprägtere Steifigkeits- und Festigkeitsanisotropien feststellen. Die spröde Erstentfestigung wird lediglich bei hohem ψ_f orthogonal zur Treibrichtung reduziert. Der Effekt wird allerdings von der steigenden Rohdichte bzw. den Kennwerten der Gefügestruktur des Probekörpers überlagert. Die Entfestigungsenergien (G_D) sind in beiden Richtungen deutlich vergrößert gegenüber der Referenz (0-5).

- Bei Beanspruchung parallel zur Treibrichtung (s. **Abb. 7-16, links**) zeigen sich signifikante

Steifigkeits- und Festigkeitssteigerungen. So kann β_D bei Treibkörper (4-6) nahezu verdoppelt werden. Die Entfestigungslinien sind gegenüber der Referenz auf deutlich höherem Niveau. Die Erhöhung von l_f und ψ_f führt zur signifikanten Steigerung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens, wobei die Erstentfestigung nicht reduziert werden kann.

- Bei Beanspruchung orthogonal zur Treibrichtung (s. Abb. 7-16, **rechts**) werden demgegenüber nahezu keine Steifigkeits- und Festigkeitssteigerungen festgestellt. Der steil abfallende Ast im Erstentfestigungsbereich kann bei höherem ψ_f jedoch reduziert werden. Die vernähende Wirkung der Kurzfasern orthogonal zur Treibrichtung wird ansatzweise sichtbar. Wie die höheren Plateaulinien im Entfestigungsbereich zeigen, ist das Entfestigungsverhalten signifikant von l_f und ψ_f abhängig. Charakteristisch ist die unstetige Abnahme der Linie bei Treibkörper (4-3); die Querdehnungsbehinderung bei Wirkung der mittleren wirksamen Faserlänge ($l_{f,m}$) in orthogonaler Beanspruchungsrichtung wird maßgebend.

Abb. 7-17 zeigt zusammenfassend die mittlere Entfestigungsenergie (G_D) bis $R(45)$ in Abhängigkeit zur mittleren Festigkeit (β_D) bei Einbau von BGF und MGF.

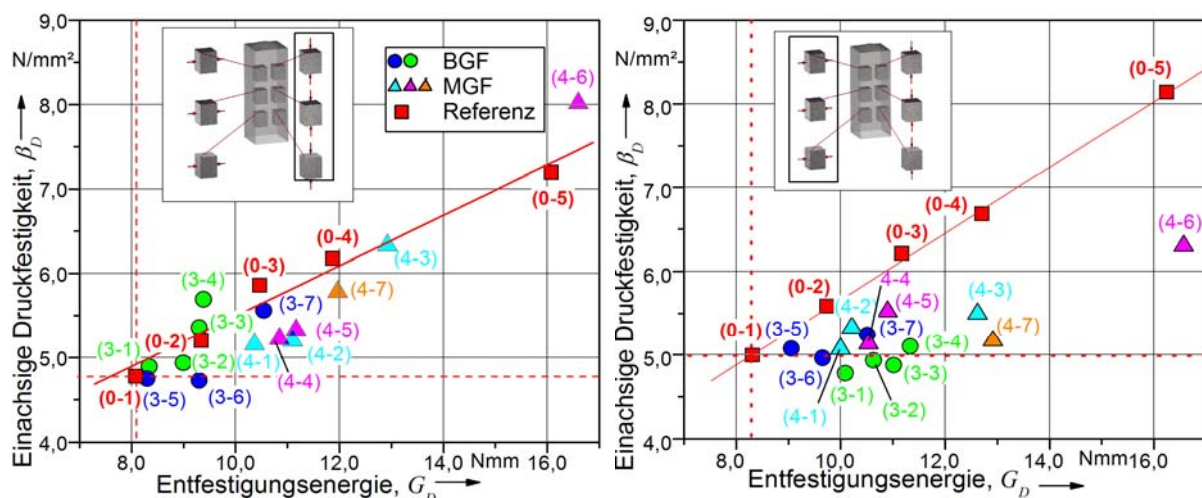


Abb. 7-17 Einfluss des Einbaus der alkaliresistenten (AR) Bündelkurzglasfasern (BGF) Saint Gobain (SG) Cem-FIL ARC20 62/2 und der wasserdispensiblen monofilen AR-Kurzglasfasern (MGF) SG Cem-FIL ARC-20 70/30) auf die mittlere Festigkeit (β_D) in Abhängigkeit zur Entfestigungsenergie (G_D) unter einachsiger Druckbeanspruchung (gemittelt über die Höhe des Treibkörpers), **links**: Parallel zur Treibrichtung beanspruchte Probekörper, **rechts**: Orthogonal zur Treibrichtung beanspruchte Probekörper

Die Verhaltensweisen der Druckspannungs-Stauchungs-Linien (s. Abb. 7-15 und Abb. 7-16) spiegeln sich in den Mittelwerten von β_D und G_D über die Höhe des Treibkörpers wider.

- Bei Einbau der BGF bzw. durch Steigerung der Faserkonzentration lässt sich parallel zur Treibrichtung β_D und G_D gegenüber der Referenz (0-5) nicht bzw. lediglich leicht steigern (s. **Abb. 7-17, links**). Unterhalb von $\psi_f = 1,0$ Vol.-% zeigen sich keine Steigerungen von β_D . G_D zeigt gleiche Verhaltensweisen, jedoch in stärkerem Ausmaß. Bei höherem ψ_f ist der Einfluss von l_f gesteigert, die BGF mit der Faserlänge $l_f = 12$ mm zeigt höhere Werte. Orthogonal zur Treibrichtung lassen sich ausschließlich Steigerungen in G_D feststellen. Diese nehmen ebenfalls mit Erhöhung von l_f und ψ_f zu (s. Abb. 7-17, **rechts**).
- Bei Einbau der MGF lässt sich parallel zur Treibrichtung β_D gegenüber der Referenz (0-5) erhöhen. Deutliche Unterschiede zwischen den Faserlängen zeigen sich in β_D bei hohen Faserkonzentrationen. Orthogonal zur Treibrichtung (s. Abb. 7-17, rechts) wird β_D nicht erhöht; es sind kaum Veränderungen gegenüber der Referenz festzustellen. Demgegenüber kann G_D mit Zunahme von l_f und ψ_f deutlich erhöht werden. Es zeigen sich höhere Absolutwerte gegenüber den Werten bei Einbau der BGF.

Bei den Referenzen ((0-1)-(0-5)) zeigen sich keine Anisotropien in der Festigkeit (A_β) und in der Entfestigungsenergie (A_G) (s. Gl. [3-20]). Bei Einbau der BGF ist A_G kleiner 1; die Werte

parallel zur Treibrichtung sind deutlich geringer. Es ist somit ansatzweise eine vernähende Wirkung durch den Einbau der BGF ersichtlich. Bei Einbau der MGF ist A_β bei geringem ψ_f nahezu 1. Mit Zunahme von ψ_f (Treibkörpern (3-3) und (3-6)) wird A_β deutlich größer als 1. Der Grund dafür ist die starke Ausrichtung der Kurzfasern bzw. der Feststoffanteile parallel zur Treibrichtung und damit parallel zur Beanspruchungsrichtung. A_G hingegen wird reduziert ($A_G < 1$); die MGF hat eine deutlich stärkere vernähende Wirkung. Mit Zunahme von ψ_f wird A_G erhöht; die Inhomogenitäten in der Feststoffstruktur werden maßgebend.

Die Faserorientierung lässt sich nur eingeschränkt abbilden. Grund dafür ist vor allem die behinderte Querdehnung in den Lasteinzugsbereichen. Zu den Bruchformen lassen sich, vergleichbar mit Kap. 5.3.1, nur schwer einheitliche Aussagen treffen. Allgemein lässt sich sagen, dass die Probekörper bei Einbau der MGF einen stärkeren Zusammenhalt aufweisen.

7.3.1.2 Mechanismen des Strukturversagens

Zum Verständnis des Festigkeits- und Verformungsverhaltens bzw. der Mechanismen des Strukturversagens unter Druckbeanspruchung werden stichpunktartig „in situ“ Druckbelastungs-Untersuchungen durchgeführt. Die Veränderung der inneren Strukturen wird über die Synchrotron-Computertomographie (Synchrotron-CT) erfasst. Die Ursache für die deutliche Erstentfestigung, die durch Kurzfasern nicht reduziert werden kann, soll untersucht werden.

Versuchsbeschreibung und Durchführung

Eingesetzt wird ein Probekörper des Treibkörpers (4-1) (MGF, $l_f = 3$ mm, $\psi_f = 0,25$ Vol.-%) und vergleichend ein Referenz-Probekörper gleicher Rohdichte (0-5). Die Probekörper ($7 \times 7 \times 7$ mm³) werden mittig aus den jeweiligen Treibkörpern entnommen (s. Abb. 7-1). Planparallelität, Ebenheit und Maßgenauigkeit werden durch das Nassschleifen sichergestellt. Die Untersuchung erfolgt ausschließlich bei Einbau der MGF, weil das Festigkeits- und Verformungsverhalten unter Druckbeanspruchung hier, u. a. aufgrund der höheren Faserdichte, höhere Wirksamkeiten aufweist.

Es wird ausschließlich der mittlere Abschnitt der Probekörper nach **Abb. 7-18**, oben links untersucht. Die Querdehnungsbehinderung in den Lasteinzugsbereichen hat somit nur einen eingeschränkten Einfluss.

Die Synchrotron-CT kommt nach Kap. 5.2.1 zum Einsatz. Die Höhe der betrachteten Scheibe beträgt, aufgrund der Strahlhöhe, $h \approx 4$ mm. Die Auflösung beträgt auch hier $3,75$ μ m/Voxel. Die Probekörper sind bei maximalem Gesichtsfeld des Strahls zylinderförmig ($d = 7$ mm, $h = 4$ mm) (s. **Abb. 7-19**).

Die Belastung findet jeweils am gleichen Probekörper parallel zur Treibrichtung auf der Laststufe $P_1 \approx 0$, $P_2 \approx 1,01 \cdot \beta_D$ und $P_3 \approx 1,5 \cdot \varepsilon_{Br}$ statt (s. Abb. 7-18). Die Belastungsgeschwindigkeit beträgt 100 μ m/min. Als Laststufe P_3 wird ein charakteristischer Punkt auf der Linie bei abgeschlossener Erstentfestigung festgelegt.

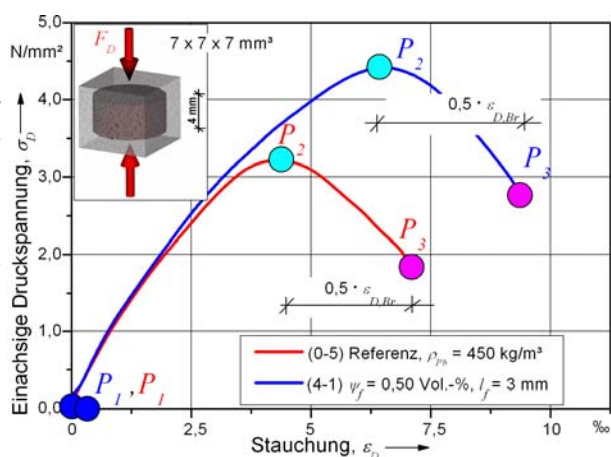


Abb. 7-18 „In situ“ Druckuntersuchung bei Einbau der alkaliresistenten wasserdispersiblen monofilen Kurzglasfasern (MGF) Saint Gobain Cem-FIL ARC20 70/30, vergleichend zur Referenz, Druckspannungs-Stauchungs-Linien bei Markierung der Untersuchungspunkte: P_1 , P_2 und P_3

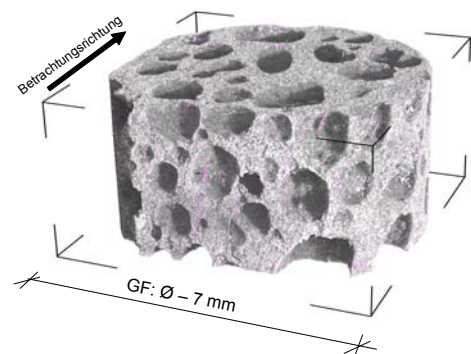


Abb. 7-19 Darstellung des Tomogramms, ermittelt über die Synchrotron-Computertomographie (s. Kap. 5.2.1)

Der Homogenisierungsgrad des Probekörpers zur Sicherstellung aussagekräftiger Ergebnisse ist eingehalten [29]. Dieser ergibt sich aus der Bedingung, dass die Prüfkörpergröße 15-30mal größer als die zu untersuchenden Elemente der Gefügestruktur sein sollte.

Ergebnisse und Diskussion

Der unverstärkte Probekörper (Referenz, (0-5)) versagt an der Festigkeitsgrenze (β_D) im Wesentlichen über das spröde Ausbrechen der Makroporenwände. **Abb. 7-20** zeigt beispielhaft detektierte Versagensphänomene auf den Belastungsstufen P_1 , P_2 und P_3 nach Abb. 7-18.

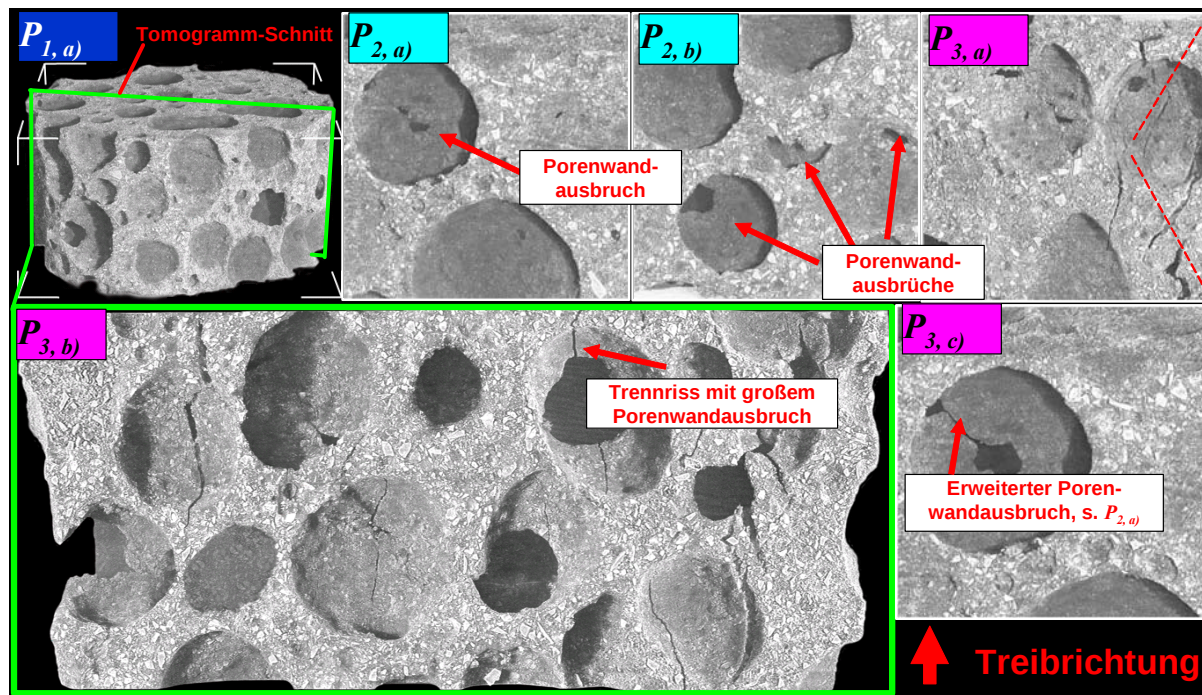


Abb. 7-20 Versagensmechanismen unter einachsiger Druckbeanspruchung bei der Referenz (0-5), (Rohdichte $\rho_{pb} = 450 \text{ kg/m}^3$), $P_{1,a}$ Tomographische Darstellung des Probekörpers, $P_{2,a}$ Darstellung eines Porenwandausbruchs, $P_{2,b}$ Weitere Detaildarstellung von Porenwandausbrüchen, $P_{3,a}$ Darstellung von Längsrissen, schwach gegen die Längsachse geneigt, $P_{3,b}$ Darstellung des Komplettschnitts aus $P_{1,a}$, $P_{3,c}$ Darstellung des erweiterten Porenwandbruchs von $P_{2,a}$ (unterschiedliche Maßstäbe)

Auf der Laststufe P_2 sind deutlich Stauchungen in der Gefügestruktur des Probekörpers parallel zur Beanspruchungsrichtung festzustellen. Die Makroporen werden zusammen geschoben. Die Erstentfestigung nach Erreichen von β_D entsteht im Wesentlichen durch das Wegbrechen der Porenwände in der Struktur. Längsrisse parallel zur Beanspruchungsrichtung, das Versagenskriterium im Normalbeton, sind bei β_D nicht feststellbar (s. Kap. 2.4.2.2.1). **Abb. 7-20**, $P_{2,a}$ und $P_{2,b}$ zeigen typische Ausbrüche von Makroporenwänden. Diese treten in den Bereichen auf, in denen das Beanspruchungs-Geometrie-Verhältnis am ungünstigsten ist. Ausbrüche sind vor allem parallel zur Beanspruchungsrichtung an größeren Makroporenwänden festzustellen. Maßgebend ist das Ausknicken sowie das Zug- bzw. Biegeversagen der Stegwände. Die hohen Kapillarporenanteile in den Stegwänden unterstützen diesen Versagensmechanismus (s. Kap. 2.4.2.2). Das Erreichen struktureller Instabilität ist somit bei einer Rohdichte $\rho_{pb} \approx 450 \text{ kg/m}^3$, unter Einbeziehung der hier vorhandenen Kennwerte der Makroporosität, für das Versagen an der Festigkeitsgrenze des Porenbetons maßgebend.

Erst bei weiterer Stauchung (3. Laststufe, P_3) sind deutlich makroskopische Trennrisse parallel zur Beanspruchungsrichtung (Längsrisse) festzustellen (s. Abb. 7-20, $P_{3,a}$ und $P_{3,b}$). $P_{3,a}$ zeigt schwach gegen die Längsachse geneigte Längsrisse. Diese entstehen, aufgrund der Querdehnungsbehinderung in den Laststeinszugsbereichen, vorzugsweise oben und unten im Probekörper (s. Kap. 5.3.1). $P_{3,b}$ stellt eine komplette vertikale Schnittebene des Tomogramms dar. Die makroskopischen Längsrisse ergeben teilweise unstrukturierte Ausbildung

gen und werden durch die Spannungsverteilungen in der Gefügestruktur bestimmt. Die Bindersandrestpartikel haben nur eine eingeschränkte Rissblockadewirkung (s. Kap. 7.3.1.1). $P_{3, c}$ zeigt den gleichen Bereich wie das Tomogramm $P_{2, a}$. Die Porenwandausbrüche erweitern sich; makroskopische Trennrisse haben hier teilweise ihren Ausgangspunkt.

Durch den Einbau der MGF werden die Stegwände deutlich verstärkt (s. Kap. 7.2.2.3). Die Kurzfasern liegen teilweise inhomogen in den Stegen bzw. Stegwänden vor. Somit werden Teilbereiche stärker bzw. schwächer verstärkt. Die Druckfestigkeit (β_D) steigt, das Entfestigungsverhalten wird ansatzweise erhöht. Der maßgebende Versagensmechanismus an der Festigkeitsgrenze ist ebenfalls das Ausbrechen der Makroporenwände. Beispielhaft werden in **Abb. 7-21** typische Versagensphänomene bei Einbau der MGF auf den Belastungsstufen P_1 , P_2 und P_3 nach Abb. 7-18 gezeigt. Die Kurzfasern sind vorzugsweise parallel zur Beanspruchungsrichtung orientiert, daraus resultiert, dass eine vernähende Faserwirkung im Entfestigungsbereich nur eingeschränkt vorhanden ist.

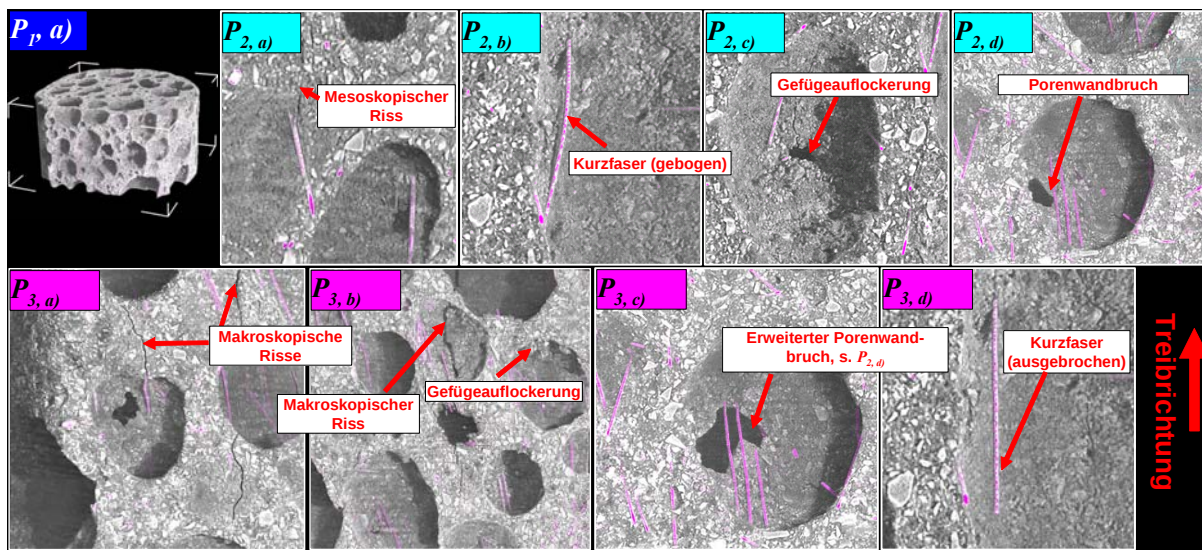


Abb. 7-21 Versagensmechanismen unter einachsiger Druckbeanspruchung bei Einbau der wasserdispersiblen monofilen alkaliresistenten Kurzglasfasern Saint Gobain Cem-FIL ARC20 70/30 ((4-1) in den Porenbeton ($\rho_{pb} = 450 \text{ kg/m}^3$), $P_{1, a}$) Tomographische Übersicht des Probekörpers, $P_{2, a}$) Blockierung eines Mikrorisses, $P_{2, b}$) Gebogene Kurzfaser durch Stauchung des Probekörpers, $P_{2, c}$) Ausbruch bzw. Auflockerung des Feststoffs, $P_{2, d}$) Wandausbruch im Bereich einer Kurzfaser, $P_{3, a}$) Längsrissbildung, $P_{3, b}$) Längsrissbildung, $P_{3, c}$) Darstellung eines erweiterten Porenwandbruchs von $P_{2, d}$, $P_{3, d}$) Kurzfaserausbruch im oberflächennahen Bereich einer Makropore von $P_{2, b}$) - (unterschiedliche Maßstäbe)

Auf der Laststufe P_2 ist die Anzahl und Größe der Ausbrüche in den Porenwänden gegenüber der o. g. Referenz (0-5) deutlich reduziert. Es zeigt sich eine gesteigerte Anzahl an mesoskopischen Längsrissen in Beanspruchungsrichtung. **Abb. 7-21**, $P_{2, a}$) bildet den Schnittbereich eines Tomogramms mit einem auslaufenden mesoskopischen Riss an einer MGF ab. Kurzfasern können hier deutlich gesteigerte Anteile von Rissenergien aufbrauchen. Die Querdehnungsüberbeanspruchung scheint jedoch auch hier nicht maßgebend zu sein. $P_{2, b}$) zeigt eine druckbeanspruchte Kurzfaser oberflächennah an einer Porenwand. Die Kurzfaser ist gebogen, wobei die Faser oben und unten im Feststoffmaterial eingespannt ist. Ein deutliches Indiz für eine Stauchung der Makroporen. $P_{2, c}$) und $P_{2, d}$) zeigen Beispiele für Porenwandausbrüche bzw. mesoskopische Auflockerungen der Gefügestruktur; diese sind im Wesentlichen im mittleren Bereich des Krümmungsradius der Porenwände festzustellen. Die Porenwandausbrüche sind trotz deutlich höherem β_D bei Einbau der MGF gegenüber der Referenz geringer. Die MGF hält die Gefügestruktur des Porenbetons somit besser zusammen.

Auf der Laststufe P_3 zeigen sich erste makroskopische Trennrisse (s. $P_{3, a}$) und $P_{3, b}$) parallel zur Beanspruchungsrichtung. Eine vernähende Wirkung haben die Kurzfasern nur eingeschränkt. Bei Beanspruchungen orthogonal zur Treibrichtung könnten die Kurzfasern hier ei-

ne deutlich höhere Wirksamkeit im Entfestigungsbereich aufweisen (s. Kap. 7.3.1.1). $P_{3, c}$ zeigt den erweiterten Ausbruch der Makroporenwand von $P_{2, d}$. $P_{3, d}$ stellt einen Faserausbruch aus dem Feststoff dar; die MGF ist unten nicht mehr eingespannt. Auch auf der Laststufe P_3 sind die Porenwände im Vergleich zur Referenz weniger stark ausgebrochen.

Der Einbau der MGF bewirkt in erster Linie eine Versteifung der Makroporenwände. Geeignete Kurzfasern wie die MGF können höhere Festigkeiten (β_D) im Porenbeton hervorrufen und die Anzahl der Stegwandausbrüche deutlich reduzieren. Eine bessere Lastverteilung bei Verringerung der Spannungsspitzen in den Stegwänden wird erreicht. Die Erstentfestigung nach Überschreiten von β_D kann jedoch nur eingeschränkt reduziert werden. Damit sind qualitativ keine signifikanten Unterschiede zur Referenz (0-5) in der Erstentfestigung vorhanden.

Die Untersuchung zeigt, dass die MGF bei Einbau in den Porenbeton im Rohdichtebereich $\rho_{pb} = 450 \text{ kg/m}^3$ nur eingeschränkt in die Stegwände eingebunden werden kann. Sie ist nur ansatzweise im Feststoff verankert und kann ausknicken. Ihre Wirksamkeit zur Steigerung der Erstentfestigung ist eingeschränkt. Um eine signifikante Reduzierung der Erstentfestigung zu erreichen, sollte ein faserverstärkter Porenbeton mit einer höheren Rohdichte und entsprechenden Gefügestrukturkennwerten gewählt werden. Maßgebende Beanspruchungen unter Zug könnten hier durch die höhere Wirksamkeit von Kurzfasern bei stärkerer Einbindung im Feststoff besser aufgenommen werden. Als Versagensmechanismus sollte das „Querzugversagen bei Bildung von Längsrissen“ im Porenbeton angestrebt werden.

7.3.2 Kombinierte Druck-Schubbeanspruchung

Versuch und Randinformationen sind in Kap. 5.3.2 beschrieben.

Ergebnisse und Diskussion

Bei Einbau der alkaliresistenten (AR) Bündelkurzglasfasern (BGF) Saint Gobain (SG) Cem-FIL ARC20 62/2 und der wasserdispersiblen monofilen AR-Kurzglasfasern (MGF) SG Cem-FIL ARC20 70/30 lässt sich das Festigkeits- und Verformungsverhalten unter kombinierter Druck-Schubbeanspruchung verbessern (s. Kap. 5.3.2). Es werden Steigerungen in der Festigkeit (β_{DS}) und im Entfestigungsverhalten gegenüber der Referenz (0-5) festgestellt.

Abb. 7-22 zeigt beispielhaft eine Auswahl empirisch ermittelter mittlerer Kraft-Vertikalverschiebungs-Linien unter kombinierter Druck-Schubbeanspruchung bei Einbau der BGF (s. Abb. 7-22, **links**) und der MGF (s. Abb. 7-22, **rechts**) in den Porenbeton.

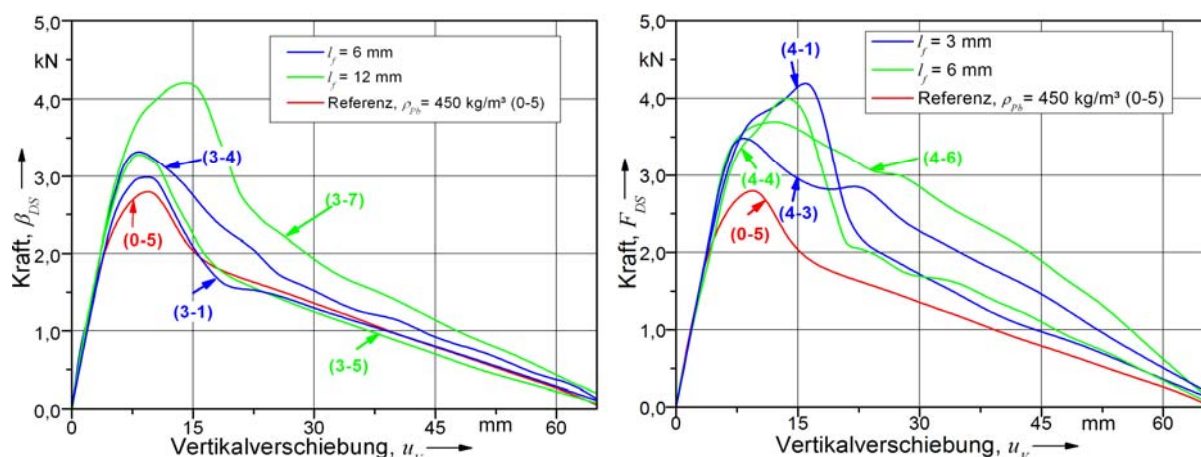


Abb. 7-22 Kraft-Vertikalverschiebungs-Linien unter kombinierter Druck-Schubbeanspruchung bei Einbau der alkaliresistenten (AR) Glasfasern unter Variation von Faserlänge (l_f) und Faserkonzentration (ψ_f), (Mittelung der Probekörper) **links**: AR-Bündelkurzglasfasern (BGF) Saint Gobain (SG) Cem-FIL ARC20 62/2, **rechts**: Wasserdispersible monofile AR-Kurzglasfasern (MGF) SG Cem-FIL ARC20 70/30

- Bei Einbau der BGF wird mit Zunahme von ψ_f eine Erhöhung von β_{DS} gegenüber der Referenz (0-5) festgestellt (s. **Abb. 7-22, links**). Die Faserkonzentration $\psi_f = 0,5 \text{ Vol.-%}$ führt bei

56der Faserlänge $l_f = 6$ mm und $l_f = 12$ mm zu einem deutlichen Abfall der Kraft-Vertikalverschiebungs-Linien nach Überschreiten von β_{DS} . Dies wird auf den hohen schlagartigen Energieverzehr zurückgeführt. Kurzfasern mit geringem ψ_f kommen hier nicht zur Wirkung; der Entfestigungsast bleibt nahezu auf dem Niveau der Referenz. Mit Zunahme von ψ_f verlaufen die abfallenden Äste auf höherem Niveau; das Entfestigungsverhalten ist deutlich verbessert. Mit Steigerung der Faserlänge (l_f) werden diese Phänomene verstärkt.

- Durch den Einbau der MGF lässt sich das Festigkeits- und Verformungsverhalten gegenüber der Referenz (0-5) weiter verbessern (s. Abb. 7-22, **rechts**). β_{DS} ist ein Drittel höher gegenüber der Referenz. Bei $\psi_f = 0,25$ Vol.-% ändert sich in Abhängigkeit von der gewählten Faserlänge ausschließlich die Bruchdehnung. Erhöhte Feststoffanteile, veränderte Gefügestrukturkennwerte und Faserwirkung interagieren. Bei (4-3) und (4-6) zeigen sich deutlich höhere Entfestigungslinien in den Kraft-Vertikalverschiebungs-Linien, wohingegen β_{DS} wieder reduziert wird. Die Kurven sind stärker im Bereich von β_{DS} ausgerundet.

Abb. 7-23 zeigt die mittlere Druck-Schubfestigkeit (β_{DS}) in Abhängigkeit von der Entfestigungsenergie (G_{DS}) bei Einbau von BGF und MGF. Die Verhaltensweisen aus den Kraft-Vertikalverschiebungs-Linien finden sich auch hier wieder.

Bei Einbau der BGF nimmt mit Abnahme des mittleren Faserabstands (s_f) die Wirksamkeit zu. Daraus ergibt sich, dass β_{DS} und G_{DS} mit Zunahme von ψ_f und l_f steigen. Ausnahme bilden die Probekörper des Treibkörpers (3-4), hier sinken die Absolutwerte trotz höherem ψ_f (2,0 Vol.-%) wieder ab. Inhomogenitäten in den Gefügestrukturen der Probekörper werden nun maßgebend; der Einfluss der Kurzfasern geht zurück.

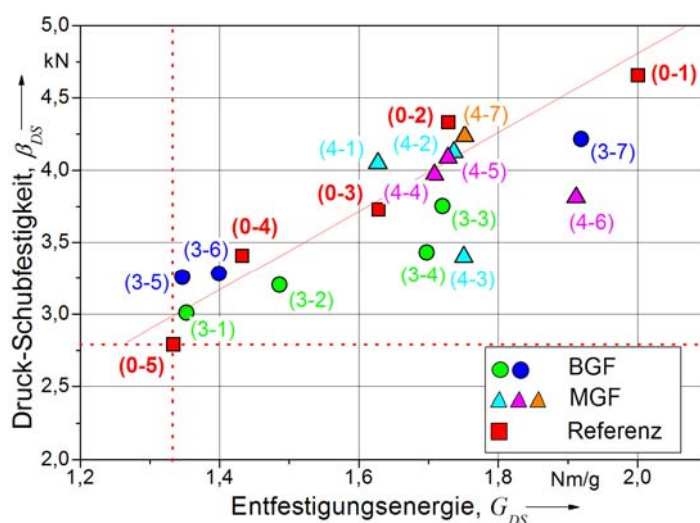


Abb. 7-23 Einfluss des Einbaus von alkaliresistenten (AR) Bündelkurzglasfasern (BGF) Saint Gobain (SG) Cem-FIL AR-C20 62/2 und wasserdispersiblen monofilen AR-Kurzglasfasern (MGF) SG Cem-FIL ARC20 70/30 auf die mittlere Festigkeit in Abhängigkeit zur Entfestigungsenergie bei kombinierter Druck-Schubbeanspruchung

Bei Einbau der MGF zeigen sich bereits bei geringerem ψ_f deutliche Verbesserungen in G_{DS} . Mit Zunahme von ψ_f und l_f steigt G_{DS} , wobei sich auch hier feststellen lässt, dass aufgrund der Inhomogenitäten in der Gefügestruktur bei höheren Faserkonzentrationen G_{DS} wieder reduziert wird. Auch hier lassen sich die Inhomogenitäten in der Gefügestruktur heranziehen.

Eine Systematik zwischen dem Festigkeits- und Verformungsverhaltens und der Steigerung von l_f und ψ_f lässt sich somit bei Einbau der MGF und der BGF nur eingeschränkt feststellen.

7.3.3 Biegebeanspruchung

Versuch und Randinformationen sind in Kap. 5.3.3 beschrieben.

Ergebnisse und Diskussion

Bei Einbau der alkaliresistenten (AR) Bündelkurzglasfasern (BGF) Saint Gobain (SG) Cem-FIL ARC20 62/2 (s. Kap. 7.1) zeigen sich parallel und orthogonal zur Treibrichtung deutliche Steigerungen im Festigkeits- und Verformungsverhalten unter Biegebeanspruchung gegenüber der Referenz (0-5) (s. Kap. 5.3.3). Wesentlich sind die Steigerungen bei den Probekörpern parallel zur Treibrichtung aufgrund der Faservorzugsrichtung.

Im Verlauf der Einprägung der Durchbiegung entstehen am Wurzelende des Kerbanrisses

des Probekörpers Mikrorisse, die sich sukzessiv zu einem Sammelriss erweitern. Ein Teil der gespeicherten elastischen Energie (Rissfortschrittsenergie) wird freigesetzt. Die BGF wird an diesem Punkt parallel zur Treibrichtung aktiviert, vorzugsweise bei Ausrichtung parallel zur Beanspruchungsrichtung. Aufgrund ihrer guten Fähigkeit zur Aufnahme von Zugkräften am Riss und ihres nachgiebigen Verbunds zum Grundmaterial eignet sich die BGF hervorragend dazu das Festigkeits- und Verformungsverhalten unter Biegebeanspruchung zu verbessern. Ein Rissfortschritt bei Auszug der BGF aus den jeweiligen Rissufern stellt sich ein.

Es zeigen sich deutliche Unterschiede im Festigkeits- und Verformungsverhalten in Abhängigkeit von Faserlänge (l_f) und Faserkonzentration (ψ_f). **Abb. 7-24** zeigt eine Auswahl empirisch ermittelter Kraft-Durchbiegungs-Linien bei Einbau der alkaliresistenten (AR) Bündelkurzglasfasern (BGF) Saint Gobain (SG) Cem-FIL ARC20 62/2. Dargestellt sind treibhöhenabhängig die Probekörper aus den Treibkörpern (3-1), (3-6) und (3-7) parallel und orthogonal zur Treibrichtung. Die stereographischen Projektionen von der Faserorientierung ($\eta_{f,3D}$) (rechts oben) werden aus Abb. 7-2 und Abb. 7-4 übernommen. Die Referenz (0-5) orthogonal zur Treibrichtung aus der mittleren Ebene im Treibkörper wird vergleichend dargestellt.

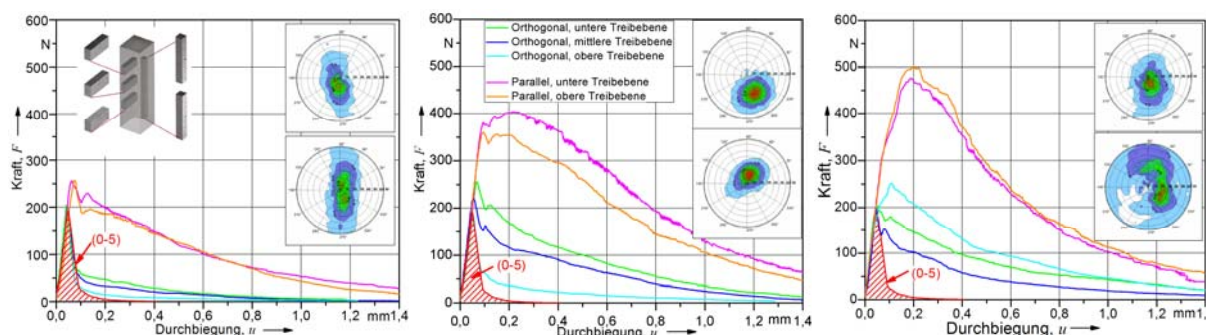


Abb. 7-24 Treibrichtungs- und -höhenabhängiger Einfluss auf die Kraft-Durchbiegungs-Linien unter Biegebeanspruchung mit Kerbung bei Einbau der alkaliresistenten Bündelglasfasern (BGF) Gobain Cem-FIL ARC20 62/2, vergleichend zur Referenz (0-5) (Probekörper: orthogonal zur Treibrichtung, mittlere Ebene), **links**: Treibkörper (3-1), Faserlänge $l_f = 6$ mm, Faserkonzentration $\psi_f = 0,50$ Vol.-%, **Mitte**: Treibkörper (3-4), $l_f = 6$ mm, $\psi_f = 2,0$ Vol.-%, **rechts**: Treibkörper (3-7), $l_f = 12$ mm, $\psi_f = 1,5$ Vol.-%

Bereits bei einer Faserkonzentration $\psi_f = 0,5$ Vol.-% wird die Entfestigung parallel zur Treibrichtung deutlich reduziert (**Abb. 7-24, links**: $l_f = 6$ mm). Die Entfestigungslinie fällt nahezu linear bis zu einer Durchbiegung von 1,6 mm ab. Orthogonal zur Treibrichtung können die Steigerungen im Festigkeits- und Verformungsverhalten gegenüber der Referenz vernachlässigt werden; β_B wird nicht beeinflusst. Der abfallende Ast flacht erst spät im Entfestigungsbereich ab. Das Festigkeits- und Verformungsverhalten nimmt nach oben im Treibkörper zu. Die Faserausrichtung parallel zur Treibrichtung (s. stereographische Projektion) spiegelt sich im unterschiedlichen Verhalten parallel und orthogonal zur Treibrichtung hervorragend wider.

Bei Zunahme der Faserkonzentration auf $\psi_f = 2,0$ Vol.-% können weitere Steigerungen im Festigkeits- und Verformungsverhalten festgestellt werden (**Abb. 7-24, Mitte**: $\psi_f = 2,0$ Vol.-%, $l_f = 6$ mm). β_B kann parallel zur Treibrichtung wesentlich gesteigert werden. Es zeigt sich ein starkes Abflachen bzw. ein ausgeprägtes Ausrunden bei β_B . Ansatzweise bildet sich ein Plateau. Diese Plastizität kann auf die o. g. Rissblockade im Kerbansatz durch die hohe Faseranzahl zurückgeführt werden. Der Faserauszug ist deutlich an dem „vibrierenden“ Verlauf der Kraft-Durchbiegungs-Linien erkennbar, der Verbund zwischen der BGF und dem Grundmaterial versagt sukzessiv. Dieses Verhalten ist typisch für ein hohes ψ_f . Orthogonal zur Treibrichtung zeigt sich ebenfalls ein verbessertes Festigkeits- und Verformungsverhalten. Die Entfestigung nimmt von unten nach oben im Treibkörper wieder zu. Die Kurzfasern mit einer Ausrichtung im Polarwinkel deutlich größer als $\theta = 0^\circ$ werden aktiviert.

Der Steigerung von $l_f = 6$ mm auf $l_f = 12$ mm folgt parallel zur Treibrichtung ein Anstieg in β_B (**Abb. 7-24, rechts**: $\psi_f = 1,5$ Vol.-%, $l_f = 12$ mm). Die Rissblockade und damit die markante

Ausrundung der Kraft-Durchbiegungs-Linie ist, aufgrund der geringeren Faserdichte, nicht so ausgeprägt vorhanden. Orthogonal zur Treibrichtung ergibt sich in den Höhen ein uneinheitliches Bild. Das Entfestigungsverhalten ist in der mittleren Ebene am höchsten, maßgebend sind die inhomogenen Faserorientierungsverteilungen. Im Vergleich zu Abb. 7-24, Mitte kann festgestellt werden, dass die Probekörper orthogonal zur Treibrichtung aus einem Treibkörper mit schlechterer Qualität der Faserausrichtungsrate ein besseres Biegeverhalten als die Probekörper aus einem Treibkörper mit höherer Faserausrichtungsrate parallel zur Treibrichtung (s. Abb. 7-24, Mitte) besitzen.

Eine Systematik zwischen den Kraft-Durchbiegungs-Linien und den Faserparametern l_f und ψ_f ist nur ansatzweise vorhanden. Orthogonal zur Treibrichtung treten größere Schwankungen auf als parallel zur Treibrichtung (höhere Faseranteile).

Abb. 7-25 zeigt die empirisch ermittelten Kraft-Durchbiegungs-Linien bei systematischem Einbau der BGF parallel zur Treibrichtung. Die Probekörper der unteren (s. Abb. 7-25, **links**) und oberen Ebene (s. Abb. 7-25, **rechts**) aller Treibkörper werden jeweils dargestellt.

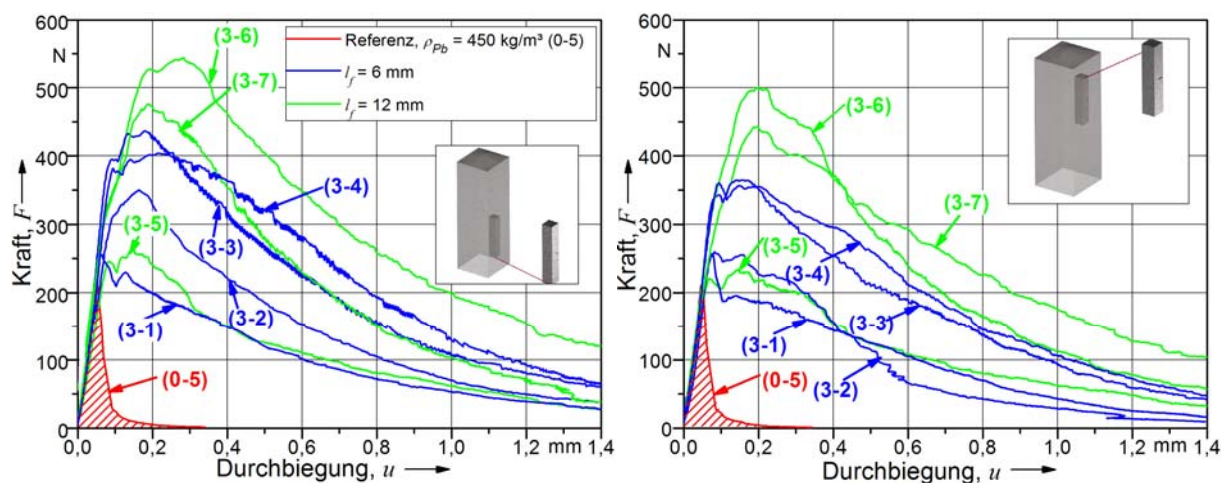


Abb. 7-25 Auswahl an Kraft-Durchbiegungs-Linien unter systematischem Einbau der alkaliresistenten Bündelkurzglasfasern (BGF) Saint Gobain Cem-FIL ARC20 62/2 bei Variation von Faserlänge (l_f) und Faserkonzentration (ψ_f) ((3-1)-(3-7)) - Vergleich zur Referenz (0-5), **links**: Probekörper, beansprucht parallel zur Treibrichtung (untere Ebene des Treibkörpers), **rechts**: Probekörper, beansprucht parallel zur Treibrichtung (obere Ebene des Treibkörpers)

Abb. 7-25, links stellt die Zusammenhänge zwischen den Kraft-Durchbiegungs-Linien und den Faserparametern l_f und ψ_f in der unteren Ebene des Treibkörpers parallel zur Treibrichtung dar. Die Kurvenanstiege sind bei geringem ψ_f bis β_B nahezu linear. Mit Steigerung von l_f zeigt sich eine Zunahme von β_B und ε_u . Bei hohem ψ_f kommt es zu weiterer Steigerung der Kraft nach Ausbildung eines makroskopischen Risses. Mit Steigerung der Faserkonzentration von Treibkörper (3-6) auf Treibkörper (3-7) bei gleicher Faserlänge zeigt sich ein deutlicher Rückgang des Festigkeits- und Verformungsverhaltens, welches sowohl in β_B als auch in der halbierten Kraft bei einer Durchbiegung von 1 mm zum Ausdruck kommt; G_B ist deutlich reduziert. Der Grund dafür ist eine stärkere Ausrichtung der Kurzfasern parallel zur Treibrichtung (Vergleiche normierten Orientierungsanteil in z -Richtung (f_z) für Treibkörper (3-6) bei $f_z = 0,651$ und für Treibkörper (3-7) bei $f_z = 0,412$) (s. Kap. 5.2.1).

Die Probekörper in der oberen Ebene parallel zur Treibrichtung zeigen ähnliche Verhaltensweisen (s. Abb. 7-25, **rechts**). Allerdings sind die Absolutwerte aufgrund der reduzierten Feststoffanteile und damit der eingeschränkten Feststoffeinbindung der Kurzfasern geringer.

Wie oben gezeigt, ist das Festigkeits- und Verformungsverhalten bei den Probekörpern aus Treibkörper (3-6) höher als bei (3-7). Dies lässt darauf schließen, dass neben l_f und ψ_f die mittlere wirksame Faserlänge in Beanspruchungsrichtung ($l_{f,m}$) einbezogen werden muss. Im Folgenden wird der direkte Einfluss von $l_{f,m}$ auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten

unter Biegebeanspruchung mit Kerbung parallel und orthogonal zur Treibrichtung untersucht.

Es wird jeweils $l_{f,m}$ der Probekörper höhenabhängig im Treibkörper ermittelt. Dazu werden die normierten Orientierungsanteile in z -Richtung (f_z) nach Kap. 7.2.1 mit den jeweiligen Faserlängen multipliziert. Parallel zur Treibrichtung werden direkt die f_z -Werte aus dem oberen bzw. unteren Probekörper der Kurzfasernanalyse genutzt. Orthogonal zur Treibrichtung werden, aufgrund fehlender Differenzierung zwischen f_x und f_y , beide Richtungen gemittelt. Die gemittelten Orientierungswerte (f_{xy}) werden wieder direkt von dem oberen bzw. unteren Probekörper der Kurzfasernanalyse übernommen. f_{xy} für den mittleren Probekörper wird über die Mittelung von f_{xy} des oberen und des unteren Probekörpers der Kurzfasernanalyse bestimmt.

Abb. 7-26 zeigt die Beziehungen zwischen $l_{f,m}$ in Beanspruchungsrichtung und G_B . G_B wird erneut bis zu einer Resttraglast von 20% betrachtet. **Abb. 7-26, links** stellt die gemittelten Beziehungen der Probekörper parallel zur Treibrichtung und **Abb. 7-26, rechts** die Beziehungen der Probekörper orthogonal zur Treibrichtung dar.

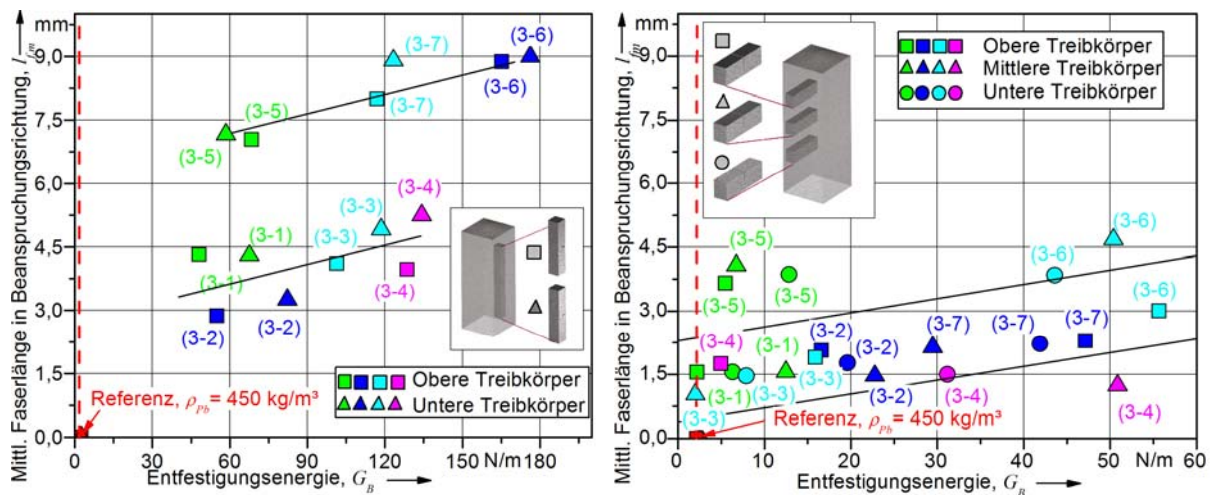


Abb. 7-26 Einfluss der mittleren wirksamen Faserlänge in Beanspruchungsrichtung $l_{f,m}$ auf die Entfestigungsenergie unter Biegebeanspruchung (G_B) bei Einbau der alkaliresistenten Bündelkurzglasfasern (BGF) ((3-1)-(3-7)) in den Porenbeton, **links**: Parallel zur Treibrichtung beanspruchte Probekörper (gemittelt), **rechts**: Orthogonal zur Treibrichtung beanspruchte Probekörper (gemittelt)

- Parallel zur Treibrichtung zeigen $l_{f,m}$ und G_B ansatzweise einen linearen Zusammenhang (s. **Abb. 7-26, links**). Die höheren Feststoffanteile und damit die stärkere Fasereinbindung zwischen unterer und oberer Ebene im Treibkörper überträgt sich bei vielen Treibkörpern bei einem gleichbleibenden $l_{f,m}$ direkt auf die Verbesserung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens. Bei $l_f = 6 \text{ mm}$ nimmt der Einfluss von $l_{f,m}$ auf G_B mit Steigerung von ψ_f ab. Dies kann mit den starken Wechselwirkungen zwischen den Kurzfasern bzw. deren Einflussbereichen erklärt werden. Bei $l_f = 12 \text{ mm}$ werden ähnliche Tendenzen festgestellt.
- Orthogonal zur Treibrichtung zeigen $l_{f,m}$ und G_E ebenfalls tendenziell lineare Zusammenhänge (s. **Abb. 7-26, rechts**). Festzustellen ist, dass $l_{f,m}$ teilweise keine systematischen Ergebnisse über die Höhe liefert. Dies kann nach Kap. 7.2.1 mit den inhomogenen Faserorientierungen im Azimutwinkel erklärt werden. Durch die geringen Faseranteile orthogonal zur Treibrichtung sind deutlich größere Streuungen in den Ergebnissen vorhanden, die sich dann deutlich stärker auf die Korrelation zwischen $l_{f,m}$ und G_E auswirken. Verstärkt wird dieses Verhalten durch die geringe Faseranzahl bei $l_f = 12 \text{ mm}$ bzw. bei einem geringen ψ_f .

$l_{f,m}$ spiegelt sich somit richtungsabhängig direkt im Festigkeits- und Verformungsverhalten unter Biegebeanspruchung wider. Parallel zur Treibrichtung zeigen sich deutlich erhöhte Werte. Orthogonal zur Treibrichtung ergeben sich ausschließlich bei höherem ψ_f und bei breiterer Faserorientierungsverteilung, oder bei einer Faservorzugsorientierung, deren Maximum stark von der Treibrichtung abweicht, Steigerungen im Festigkeits- und Verformungsverhalten.

Auch hier sind die Gefügestrukturinhomogenitäten im Verhalten sichtbar; so ist ein unsystematisches Verhalten der Probekörper über die Höhe im Treibkörper in beiden Ausrichtungen bei einigen Treibkörpern festzustellen. Ungenauigkeiten in den Verhaltensweisen können auch aufgrund der nicht übereinstimmenden Faserorientierung zwischen den Probekörpern der Gefügestrukturanalyse und den Probekörpern der Biegeuntersuchung auftreten.

Abb. 7-27 zeigt eine Auswahl empirisch ermittelter Kraft-Durchbiegungs-Linien bei Einbau der wasserdispersiblen monofilen AR-Kurzglasfasern (MGF) SG Cem-FIL ARC20 70/30 bei Variation von ψ_f und l_f . In **Abb. 7-27, links** werden die Kraft-Durchbiegungs-Linien parallel zur Treibrichtung in der unteren Ebene des Treibkörpers und in **Abb. 7-27, rechts** orthogonal zur Treibrichtung in der oberen Ebene des Treibkörpers dargestellt.

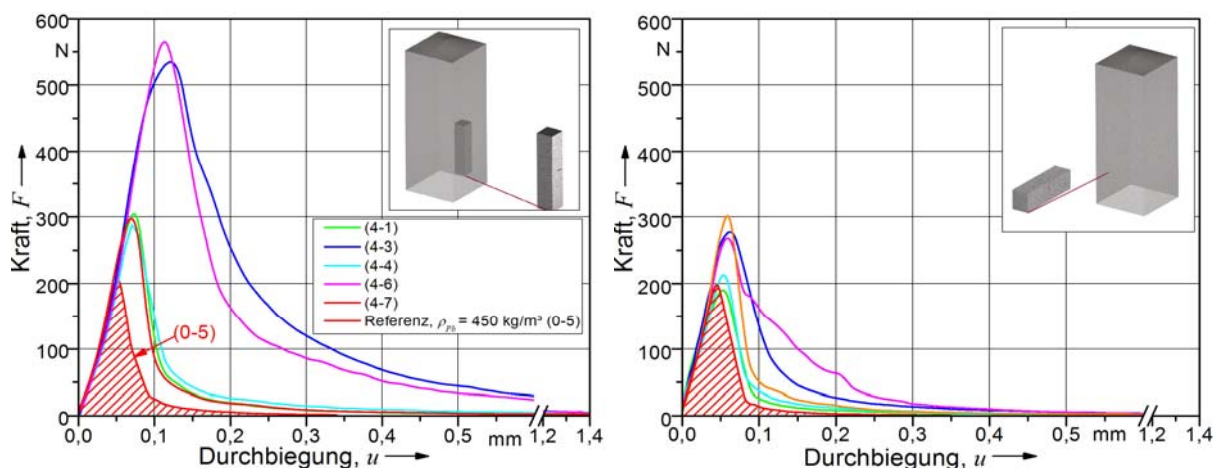


Abb. 7-27 Charakteristische Verlaufsformen von Kraft-Durchbiegungs-Linien unter Einbau der wasserdispersiblen monofilen alkaliresistenten Kurzglasfasern (MGF) Saint Gobain Cem-FIL ARC20 70/30 in den Porenbeton bei Variation von Faserlänge (l_f) und Faserkonzentration (ψ_f) (Treibkörper: (4-1), (4-3), (4-4), (4-6), (4-7)), vergleichend zur Referenz (0-5) (Probekörper, orthogonal aus der mittleren Ebene), **links**: Untere Ebene des Treibkörpers, parallel zur Treibrichtung, **rechts**: Untere Ebene des Treibkörpers, orthogonal zur Treibrichtung

- Parallel zur Treibrichtung (s. **Abb. 7-27, links**) kann das Festigkeits- und Verformungsverhalten nur eingeschränkt verbessert werden. Die Biegefestigkeit (β_B) steigt gegenüber der Referenz (0-5) an. Im Entfestigungsbereich wird mit Vergrößerung von l_f und ψ_f ein leichtes Abflachen der Kraft-Durchbiegungs-Linien festgestellt.
- Orthogonal zur Treibrichtung kann das Festigkeits- und Verformungsverhalten nicht verbessert werden (s. **Abb. 7-27, rechts**). Die leichte Erhöhung von β_B und die Steigerung im Entfestigungsverhalten sind vorzugsweise auf die gesteigerte Rohdichte gegenüber der Referenz (0-5) zurückzuführen.

Ein Einfluss auf die Steifigkeiten wird nicht festgestellt. Die Verbesserung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens bei Einbau der MGF beruht im Wesentlichen auf der Veränderung der Gefügestruktur; die Rohdichte der Probekörper wird mit Zunahme von l_f und ψ_f erhöht. Das Entfestigungsverhalten kann kaum gesteigert werden. Lediglich im Entfestigungsverhalten ergeben sich ansatzweise Verbesserungen bei Erhöhung von l_f und ψ_f . Das Versagen kündigt sich teilweise akustisch durch ein Knistern bei Faserbruch an.

Versagensmechanismen

Die BGF verbessert das Festigkeits- und Verformungsverhalten unter Biegebeanspruchung in Richtung der Vorzugsorientierung der Faser deutlich. Maßgebend sind die hohen mechanischen Eigenschaften, die tektonische Faserbeschaffenheit, die guten Verbundeigenschaften der AR-Glasfaser zum Porenbeton-Feststoff und die gute Einbettung in den Feststoff.

Aufgrund der tektonischen Formbezogenheit der BGF wachsen die Calciumsilikathydratphasen in die Faserbündel (s. **Abb. 7-28**). Dabei dringt Wasser mit darin gelösten Bestandteilen

in die Zwischenräume der Monofilamente ein. Im hydrothermalen Härtingsprozess entstehen dann Hydratphasen, die teilweise durch das ganze Faserbündel hindurchgehen. Der Verbund zwischen den Monofilamenten kann gesteigert werden; es bilden sich Haftbrücken zwischen den Filamenten aus. Die Phasenstruktur zwischen den Monofilamenten unterscheidet sich teilweise deutlich von der Phasenstruktur des üblichen Porenbeton-Feststoffs.

Zwischen den äußeren Monofilamenten des Faserbündels und den Hydratphasen zeigt sich ein guter Verbund. In den zugbeanspruchten Bereichen werden die äußeren Filamente der Bündel stärker beansprucht (s. Kap. 4.3.1.2) und versagen zu einem früheren Zeitpunkt (s. Kap. 5.3.3). Die Filamente an der kurzen Seite des Bündels sind anfälliger für dieses Versagen, welches mit Zunahme von ψ_f und Reduzierung von l_f abnimmt. Wenn die äußeren Filamente bei Erhöhung der Beanspruchung reißen, werden die inneren Filamente verstärkt zur Tragwirkung herangezogen. Das Verbundversagen erfolgt somit sukzessiv.

Wie festgestellt, ist die BGF vorzugsweise in den Stegen angeordnet. Sie ist, im Vergleich zur MGF, stärker in den Feststoff eingebunden. Die in Beanspruchungsrichtung geneigten Kurzfasern weisen, aufgrund der Biegebeanspruchung in den Umlenkpunkten, eine deutlich höhere Anzahl von Filamentbrüchen in den äußeren Bereichen der Bündel auf. Das Erreichen der kritischen Faserumgebungsschubspannung ($\tau_{u,krit}$) ist als Versagensmechanismus nicht maßgebend (s. Kap. 3.7).

Bei Einbau der MGF mit der Faserlänge $l_f = 12$ mm tritt Faserbruch auf. Bei den Faserlängen $l_f = 3$ mm und $l_f = 6$ mm versagt die MGF aufgrund einer Kombination aus Verbundversagen und Faserbruch. Eine genaue Differenzierung ist nicht möglich, da die Kurzfasern unterschiedlich stark im Feststoff eingebunden sind. So sind die Fasern in wandnahen Bereichen der Makroporen bzw. in Stegwänden weniger stark „eingefasst“ als die Fasern, die zentral in den Stegen angeordnet sind. Auch hier wird $\tau_{u,krit}$ nicht maßgebend.

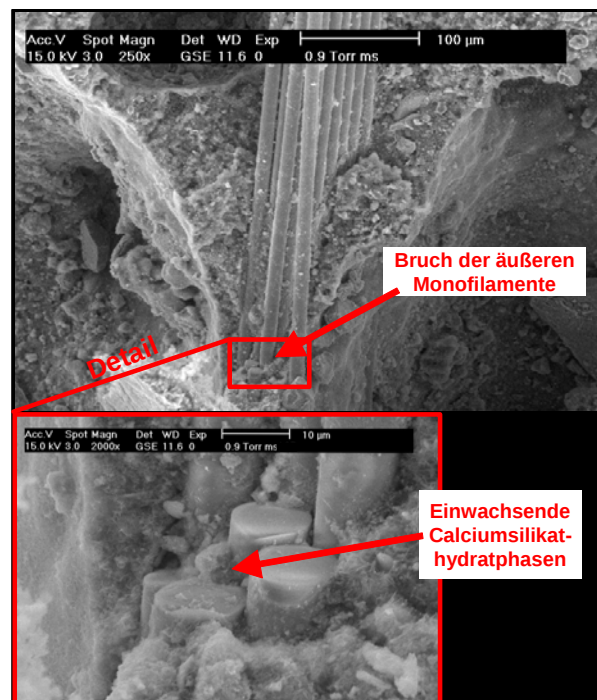


Abb. 7-28 Elektronen-mikroskopische Aufnahme einer in einem Steg eingebetteten alkaliresistenten Bündelkurzglasfaser (BGF) im Porenbeton am Ansatz zur Bruchfläche (nach Biegebeanspruchung)

7.4 Schlussfolgerungen

Die starken Streuungen in der Faserorientierung ($\eta_{f,3D}$), die sowohl bei Vergleich der Probekörper aus einem Treibkörper als auch bei Vergleich der Probekörper verschiedener Treibkörper auftreten, zeigen, dass die Anfangsorientierung noch nicht in ausreichendem Maße bei Einbau in den Porenbeton kontrolliert werden konnte (s. Kap. 7.2.1). Diese Streuungen haben deutlichen Einfluss auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten unter Druck-, kombinierter Druck-Schub- und Biegebeanspruchung. Kurzfasern sind jeweils nur mit den Anteilen parallel zur maßgebenden Beanspruchung wirksam; diese Anteile variieren stark. Zielsetzung muss die Kontrolle der Faserorientierung im Herstellungsprozess sein.

Die Erkenntnisse aus Kap. 6.3.3.1.3 einbeziehend kann je nach Anforderung eine gezielte Faserausrichtung des kurzfaserverstärkten Porenbetons erreicht werden. Bei gewünschter maximaler Verstärkung in eine Richtung sollte eine möglichst enge Orientierungsverteilung und für eine unidirektionale Verbesserung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens eine möglichst breite Orientierungsverteilung der Kurzfasern im Porenbeton angestrebt werden.

8. Produktionsprozess des Porenbetons bei Einbau von Kurzfasern

Überblick

Die starke Abhängigkeit zwischen Fasernanfangs- und Faserendorientierung im „Treibkuchen“ unterstreicht die Bedeutung einer definierten Faserausrichtung in der Anfangssuspension. Verfahren zur Herstellung von isotropen bzw. gezielt anisotropen Fasernanfangsorientierungen, die im industriellen Produktionsprozess anwendbar wären, werden vorgeschlagen.

Der Fasereinbau führt bei derzeitiger industrieller Produktionstechnologie zu Schwierigkeiten im Schneidprozess. Kurzfasern üben in Abhängigkeit von grünfesten Schneidmaterial-, Schneidgeometrie- sowie den zur Verfügung stehenden Schneidprozessparametern einen Widerstand auf den Schneidedraht aus. Dieser Widerstand kann zur Überanspruchung des Schneidedrahts bzw. zu „unsauberen“ Schnitten führen. Bei kritischen Bedingungen versagt die herkömmliche Schneidtechnologie über den „stehenden Drahtdurchzug“.

Als Alternative werden Schneidtechnologien über Druckflüssigkeits- sowie Sägeverfahren vorgeschlagen. Untersuchungen bei Einbau von alkaliresistenten (AR) Bündelkurzglasfasern und wasserdispersiblen, monofilen AR-Kurzglasfasern zeigen die Machbarkeit auf. Es werden die optimalen Schneidprozessparameter bzw. die Grenzen der Schneidbarkeit bei industriennahen Bedingungen bestimmt sowie die Vor- und Nachteile der jeweiligen Verfahren diskutiert. Die Nutzung dieser Schneidtechnologien bei hydrothermal gehärtetem kurzfaserverstärktem Porenbeton ist ebenfalls möglich.

8.1 Kontrolle der Faserausrichtung in der Anfangssuspension

Lokale Unterschiede in der Faserverteilung ($\chi_{f,3D}$) sowie lokale Faservorzugsorientierungen ($\eta_{f,3D}$) in der Anfangssuspension sind kaum zu vermeiden. Bei der üblichen Einfüllung im industriellen Produktionsprozess der Porenbeton-Herstellung sind gesteigerte Anfälligkeiten im Treibcontainer zu erwarten (s. Kap. 6.2.2). Diese Anfangsbedingungen haben großen Einfluss auf die Kurzfaserstruktur nach Abschluss des Treibvorgangs (s. Kap. 6.3.3.1 und Kap. 7.2.1). Das Verhalten des kurzfaserverstärkten Porenbetons ist maßgeblich von der Ausprägung der Kurzfaserstruktur abhängig. Bei der Herstellung muss somit sichergestellt werden, dass inhomogene Faserverteilungen und starke Faservorzugsorientierungen verhindert bzw. Kurzfasern gezielt gleichmäßig in der Anfangssuspension ausgerichtet werden können.

Aus den Untersuchungen (s. Kap. 6.3.3.1) geht hervor, dass kurzfaserverstärkter Porenbeton durch die gezielte Steuerung der Treibprozessparameter sowie der Fasernanfangsorientierung isotrope Endorientierung erhält. Beispielsweise ergeben sich bei eingepprägter Vorzugsorientierung im Anfangszustand und definierten Porosierungsgraden gezielte Faserendorientierungen nach dem Treibprozess. Geringe bzw. hohe Porosierungsgrade führen zu schwächeren bzw. stärkeren Ausrichtungen der Kurzfasern parallel zur Treibrichtung. Zur Kontrolle der Orientierung der Kurzfasern in der Anfangssuspension im industriellen Produktionsprozess werden folgende Vorschläge gemacht:

- Ausrichtungskontrolle durch Reduzierung des Wasser-Mehlkorn-Verhältnisses,
- Faserausrichtung durch kontrollierte Fließbewegungen beim Einfüllen im Treibcontainer,
- Faserausrichtung durch definierte Strömungsbewegung in der Anfangssuspension.

Ausrichtungskontrolle durch Reduzierung des Wasser-Mehlkorn-Verhältnisses

Durch den Einsatz eines Vibrationsverfahrens wird eine Erhöhung der Fließfähigkeit erreicht. Daraus ergibt sich, dass die Mischungszusammensetzung mit deutlich geringerem Wasser-Mehlkorn-Verhältnis bei gleicher Fließfähigkeit bzw. damit verbunden bei gleichem Treibverhalten eingesetzt werden kann. Das Wasser-Mehlkorn-Verhältnis kann hierbei um bis zu 50% gesenkt [25], die Festigkeiten können bei gleicher Makroporosität gesteigert werden.

Durch dieses Verfahren könnte es gelingen, die Strömungsbewegung beim Einfüllen der faserversetzten Anfangssuspension in den Treibcontainer so zu reduzieren, dass sich kein maßgebender Einfluss auf die Faserorientierung ergibt. Dieses Verfahren setzt ebenfalls eine homogene Faserverteilung ($\chi_{f,3D}$) in der Anfangssuspension voraus.

Ausrichtungskontrolle durch Fließbewegung beim Einfüllen im Treibcontainer

Beim Einfüllen in den Treibcontainer wäre es möglich, die Fließbewegung und damit die Faservorzugsorientierung so zu steuern, dass die Kurzfasern vorzugsweise waagrecht in der Anfangssuspension liegen. Es könnte beispielsweise die faserversetzte Anfangssuspension durch eine Breitschlitzdüse über die Breite des Treibcontainers kontrolliert eingebracht und somit ausgerichtete Kurzfaserstrukturen geschaffen werden.

Ausrichtungskontrolle durch definierte Fließbewegung in der Anfangssuspension

Diese Faserausrichtung setzt ein homogenes $\chi_{f,3D}$ in der Anfangssuspension voraus. Ein leicht vibrierendes Gitter könnte bei gleichmäßigem Vorschub durch die Anfangssuspension im Treibcontainer gezogen werden.

Durch die eingeprägte Strömungsbewegung erhalten die Kurzfasern gezielt eine zweidimensionale Faservorzugsorientierung von 90° zur Vertikalen (s. Abb. 8-1, a)). Um das Faseraufstauen vor dem Gitter zu verhindern, sollte die Gittermaschenweite mindestens die dreifache Faserlänge messen. Eine zweite Möglichkeit ist das Durchziehen einer Anordnung rotierender Walzenrollen (s. Abb. 8-1, b)). Die Kurzfasern erhalten durch die Rotation der Walzen vorzugsweise eine isotrope Orientierung (s. Abb. 8-1, c)). Die Abstände der Walzen müssen individuell an die Faserparameter und an die Rotation angepasst werden.

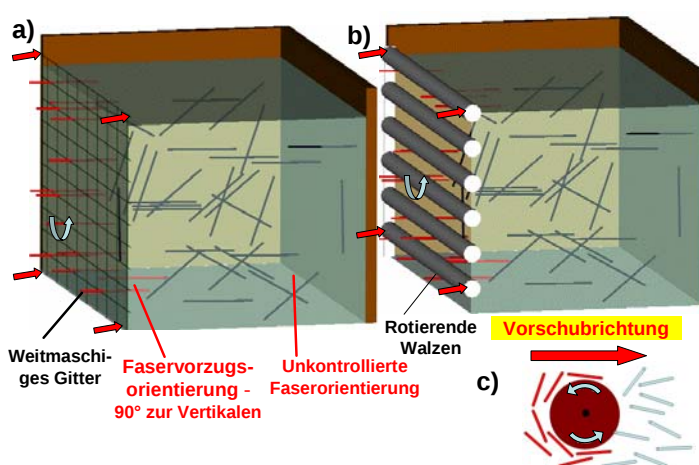


Abb. 8-1

Herstellung einer gezielten Faserorientierung in der Anfangssuspension, a) Durchzug eines weitmaschigen Gitters, b) Durchzug einer waagerechten Anordnung von Walzen, c) Schematische Skizze zur Faserorientierung bei b)

Oben beschriebene Varianten zeigen, dass durch ein gezieltes „Nachmischen“ im Treibcontainer, bei besonderer Konzeption der Mischwerkzeuge bzw. entsprechender Vorrichtungen, isotrope bzw. definierte Faserorientierungen geschaffen werden können.

8.2 Gegenwärtige Schneidpraxis

Porenbeton wird üblicherweise bei stand- bzw. schnittfester halbplastischer Konsistenz (Grünstandsfestigkeit) in Stein- bzw. Wand- und Plattenelemente geschnitten (s. Kap. 2.1). Durch die zur Anwendung kommenden Schneidverfahren werden folgende Vorteile erzielt:

- Steigerung der Rauigkeit der Steinoberflächen,
- „Versmieren“ der offenen Makroporosität an den Schnittoberflächen,
- Reduzierung der hydrothermalen Härtezeiten durch kleinere Geometrien,
- Reduzierung der energetischen Aufwendungen bei hydrothormaler Härtung,
- Reduzierung hygrischer und thermischer Beanspruchungen bei hydrothormaler Härtung,
- Reduzierung des Materialverschleißes auf die Sägewerkzeuge im Schneidprozess gegenüber dem Schneiden von hydrothermal gehärtetem Porenbeton.

In der Geschichte der industriellen Porenbeton-Produktion wurden verschiedene Schneidver-

fahren angewendet. Eine Auswahl an Schneidverfahren bei Grünstandsfestigkeit zeigen die Patentschriften [N 3], [N 4], [N 6], [N 7], [N 8], [N 9] und [N 14]. Marktführend sind Verfahren über eine vollautomatisierte Schneidedrahttechnologie an flachen bzw. hochkant aufgerichteten freistehenden grünfesten Rohblöcken (bis $8,0 \times 2,0 \times 0,85 \text{ m}^3$). Diese werden von einer Anordnung horizontaler bzw. vertikaler Schneidedrähte in allen drei Dimensionen durchfahren. Die Anordnung der Schneidedrähte wird über einen Sägegatterrahmen geführt. Dies ermöglicht synchrones Horizontal- und Vertikalschneiden. Das Vertikalschneiden unterscheidet sich in vertikales Längs- und Querschneiden. Die Drahtanordnungen können flexibel und schnell an gewünschte Stein- bzw. Wand- und Plattenelementformate angepasst werden.

Rohblock und Schneidedraht sind dabei verfahrensabhängig relativ zueinander verfahrbar. Die Vorschubgeschwindigkeit (v_s) ergibt sich in Abhängigkeit von der Beanspruchung des Schneidedrahts und der Schnittqualität zu $0,2\text{--}1,3 \text{ m/s}$ [34]. Als Schneidedrähte kommen vorgespannte, glatte, veredelte Federstahldrähte zum Einsatz („Pianodraht“, Drahtdurchmesser $d_d = 0,15\text{--}1,20 \text{ mm}$). Die Drähte führen neben dem Vorschub eine oszillierende Bewegung zur Minimierung des Widerstands auf den Draht bzw. für eine saubere Schnittführung und eine ebene Schnittoberfläche aus. Diese beträgt i. d. R. fünf Hübe je Sekunde bei einer Auslenkung von ca. 50 mm . Die Treibkappe wird über eine Absaugvorrichtung vom Rohblock genommen. Eventuell notwendige Griffstücke sowie Feder- und Nutführungen werden i. d. R. in den Schneidprozess integriert bzw. nach der hydrothermalen Behandlung eingearbeitet. Der Schneidprozess muss verfahrensabhängig (z. B. Blocktreibverfahren, Liegendtreibfertigung [66]) in der Mischungszusammensetzung (z. B. über Variation des Portlandzementgehalts) sowie in den Schneidparametern (z. B. Variation der Grünstandsfestigkeit, Rohblockgeometrie und Vorschubgeschwindigkeit) angepasst werden.

Das Schneiden des Porenbetons über die Technologie des „stehenden Drahtdurchzugs“ bei Grünstandsfestigkeit zeichnet sich durch hohe Qualität und Wirtschaftlichkeit aus [34]. Die Rohblöcke werden nach dem Schneidprozess in ihrer Gesamtheit hydrothermal gehärtet. Nach Abschluss der hydrothermalen Härtung haben die Schnitte des Rohblocks den Charakter von „Bruchmarkierungen“. Vorzugsweise die horizontalen Schnittflächen haften abhängig von Auflast und Mischungszusammensetzung des grünfesten Rohblocks zusammen.

Dies erfordert im Nachgang zur hydrothermalen Härtung ein maschinelles Trennen in die jeweiligen Einzelelemente. Dazu wird sich einer in den Produktionskreislauf integrierten Trennmaschine bedient [35]. Diese nimmt die Einzelelemente des Porenbetons lagen- bzw. stapelweise auseinander. Schnitt- bzw. „Bruch“-flächen zeigen nach **Abb. 8-2, a)** und **b)** charakteristische Beschaffenheit. Die Makroporositäten sind durch den Drahtdurchlauf „verschmiert“, die Oberflächen treibrichtungsabhängig markant strukturiert. Daraus ergibt sich eine hervorragende Haftung von Oberflächenschutzsystemen (Putze, Anstriche, etc.).

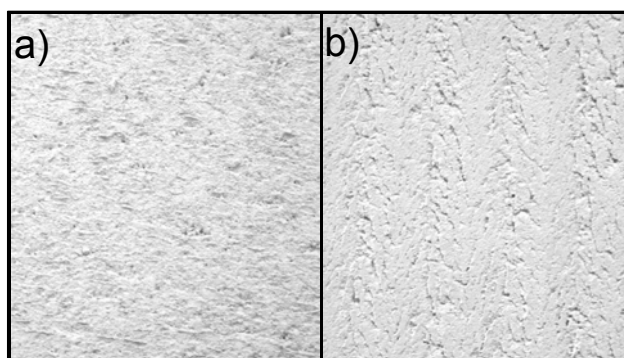


Abb. 8-2 Beschaffenheit der Schnittoberfläche über das herkömmliche Schneiden bei „stehendem Drahtdurchzug“ (Ansicht nach der hydrothermalen Härtung), **a)** Vertikale Schnittfläche des Einzelelements, **b)** Horizontale Schnittfläche des Einzelelements

8.2.1 Problemstellung

Kurzfasern üben abhängig von Material und Form sowie Konzentration einen Widerstand auf den Schneidedraht aus (Vgl. **Abb. 8-3, a)**). Kritische Faserparameter in Verbindung mit kritischen Schneidbedingungen können zu einem vollständigen Versagen der herkömmlich angewendeten Schneidtechnologie über den „stehenden Drahtdurchzug“ führen. Es können

sich die in Abb. 8-3, **b)-e)** aufgezeigten Versagensfälle im Porenbeton ergeben.

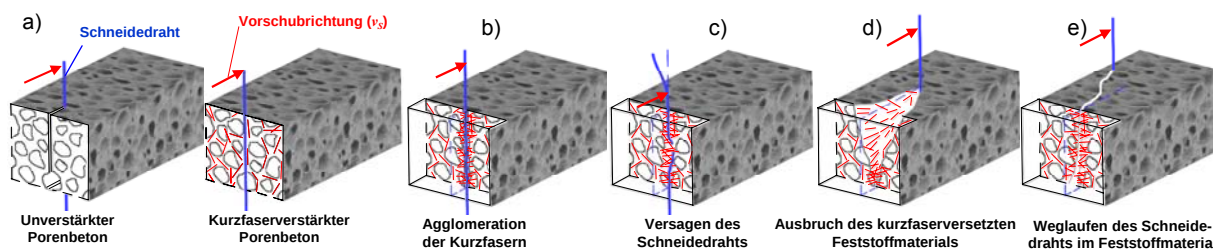


Abb. 8-3 Schnidproblematik über die herkömmliche Schneidtechnologie bei „stehendem Drahtdurchzug“ unter Fasereinbau im Porenbeton, **a)** Vergleich des Schneidens von un- bzw. faserverstärkten Porenbeton, **b)-e)**: Versagensfälle, **b)** Faserbündelung bei Mitnahme im Draht, **c)** Schneidedrahtversagen bei Überbeanspruchung in den Einspannungen bzw. „über die Drahtlänge“, **d)** Ausbruch des faserverstärkten Feststoffmaterials im Randbereich der Schnittlinie, **e)** „Weglaufen“ des Schneidedrahts

Kurzfasern können durch den Schneidedraht aus ihrer Einbindung im Feststoff herausgerissen werden. Sie können bei Mitnahme in der Schnittlinie am Schneidedraht konglomerieren (s. **Abb. 8-3, b)**). Das sich aufstauende Fasermaterial führt zu unebenen Schnittoberflächen bzw. eingeschränkten Planparallelitäten. Der Schneidedraht kann, aufgrund gesteigerter Widerstandskraft bei Mitnahme der Kurzfasern, stark beansprucht werden. Bei Überansprüchen führt dies dazu, dass der Schneidedraht aus seiner Einspannung im Schneidedrahtrahmen gerissen wird oder im Schneidbereich reißt (s. **Abb. 8-3, b)**). Der Schneidedraht kann beim Vorschub das faserverstärkte Feststoffmaterial in die Schnittlinie hineinziehen (s. **Abb. 8-3, c)**). Dies ist abhängig von den Faserparametern und der Beschaffenheit des Schneidguts. Bei kritischem Materialtransport führt dies zum vollständigen Auseinanderbrechen des Rohblocks. Weiterhin kann der Schneidedraht aus der vorgesehenen Schnittlinie in Richtung der geringsten Widerstandskraft herauslaufen (s. **Abb. 8-3, d)**). Auch in diesem Fall ergibt sich eine fehlerhafte Schnittqualität bzw. eine Überanspruchung auf den Schneidedraht. Folgende Faserparameter müssen beachtet werden:

- Faserlänge (l_f) und Faserdurchmesser (d_f),
- Faserkonzentration (ψ_f),
- Faserorientierung ($\eta_{f,3D}$),
- Faserbiegesteifigkeit.

Kritische Bedingungen beim Schneiden des Porenbetons bei Grünstandsfestigkeit können sich aus kritischen Faser- sowie kritischen Schneidprozess-, Schneidmaterial- und Schneidgeometrieparametern ergeben. Diese können wie folgt aufgeteilt werden (s. **Tab. 8-1**):

Tab. 8-1 Kritische Schneidparameter, in Ergänzung zu den kritischen Faserparametern, beim Schneiden des kurzfaserverstärkten Porenbetons über den „stehenden Drahtdurchzug“

Schneidprozessparameter	Schneidmaterialparameter	Schneidgeometrieparameter
• Schneidrichtung (vertikal, horizontal) • Schneidedrahtdurchmesser (d_d) • Vorschubgeschwindigkeit (v_s) • Beschaffenheit des Schneidedrahts (z. B. Rauigkeit) • Oszillationsbewegung des Schneidedrahts (Auslenkung, Frequenz) • Mechanische Eigenschaften des Schneidedrahts bzw. Beschaffenheit der Drahteinspannung	• Rohdichte (ρ_{pb}) bzw. Gefügestrukturparameter (s. Kap. 2.2.1) • Chemische und physikalische Zusammensetzung des Rohblocks • Grünstandsfestigkeit • Feuchtegehalt	• Schnitttiefe (l_s) • Schnittlänge (l_s)

Das Restschneidmaterial aus den Randbereichen des Rohblocks wird derzeit im industriellen Produktionsprozess unterhalb der Schneidanlage abgeführt und gesammelt. Es wird mit

Wasser vermischt, zu einer Schlämme aufgerührt und als Rückgut dem Produktionsprozess nachfolgender Mischungen erneut zugeführt (s. Kap. 5.1). Bei Kurzfasereinbau verharren diese somit in der Prozesskette; es treten bei Variation der Faserparameter Anpassungsschwierigkeiten auf bzw. es kommt zu Faserigelbildung in den nachfolgenden Mischungen.

Material aus der Ausschussware der Qualitätsüberwachung sowie anfallende Bruchkörper aus dem „Rohblocktrennen“ nach der hydrothermalen Härtung werden derzeit als aufgemahlenes Material erneut in den Produktionsprozess gegeben (s. Kap. 2.1). Im faserversetzten Restmaterial können jedoch durch das Aufmahlen kritische Faserformen entstehen, die gesundheitsgefährdend wirken können (s. Kap. 4.2). Die Nutzung des aufgemahlenen faserversetzten Restmaterials für Bodenausgleich und Katzenstreu ist nur eingeschränkt möglich.

Untersuchungen

Untersuchungen im Kleinversuch bei derzeitiger Schneidtechnologie über den „stehenden Drahtdurchzug“ sollen aufzeigen, welche kritische Faserkonzentration ($\psi_{f,krit}$) sich, abhängig von der Faserlänge (l_f) bei Einbau der alkaliresistenten (AR) Bündelkurzglasfasern (BGF) Cem-FIL Saint Gobain (SG) ARC20 60/2 und bei Einbau der wasserdispersiblen monofilen AR-Kurzglasfasern (MGF) SG ARC20 70/30, (Vorzugsfasern, s. Kap. 5.7) ergeben.

Es wird vereinfachend eine „Drahteinspannung“ (Durchmesser $d_d = 1,1$ mm) über eine Zug-Druck-Prüfmaschine bei der Vorschubgeschwindigkeit $v_s = 15$ mm/s vertikal in das kurzfaserversetzte grünste Porenbetonmaterial bei variierendem ψ_f und l_f gefahren (s. **Abb. 8-4**).

Mischungszusammensetzung, Herstellung sowie Randbedingungen werden aus Kap. 5.1 übernommen. Die Faserorientierung ist vorzugsweise in Richtung parallel zur Treibrichtung, muss aber in Abhängigkeit von den variierenden Faserparametern gesehen werden (s. Kap. 5.2.1).

Die Probekörper ($200 \times 100 \times 100$ mm³) werden aus Treibkörpern ($210 \times 110 \times 110$ mm³) nach der Standzeit $t = 4$ h hergestellt. Die Treibkappe wird, für den Erhalt einer definierten Probekörpergeometrie, entfernt. Das Treiben bzw. die Lagerung erfolgt in einer Klimakammer (Temperatur $T = 20^\circ\text{C}$, relative Luftfeuchtigkeit $\varphi = 50\%$). Die Untersuchungen werden treibrichtungsabhängig durchgeführt.

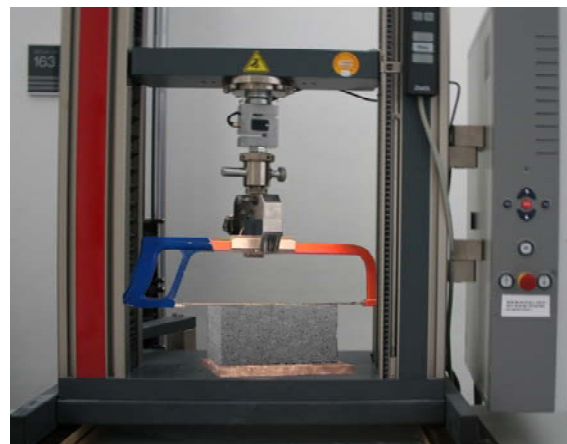


Abb. 8-4 Versuchsaufbau zur Bestimmung der kritischen Faserkonzentration ($\psi_{f,krit}$) über die Schneidtechnologie bei „stehendem Drahtdurchzug“

Die Schnittqualität wird optisch über die Schnittfläche bewertet. Als Bewertungskriterien dienen Rauigkeit der Oberfläche des Schnitts (R_t) ($R_t \leq 1$ mm, [N 20]) und Planparallelität des Schnitts (P_t) ($P_t \leq 1$ mm, [N 20]). Die Untersuchungsergebnisse sind, aufgrund der nach Tab. 8-1 abweichenden Schneidparameter, nicht direkt auf den großindustriellen Schneidprozess übertragbar. **Abb. 8-5** zeigt die kritische Faserkonzentration ($\psi_{f,krit}$) für die Schneidbarkeit bei Einbau der MGF und der BGF in Abhängigkeit von der Faserlänge (l_f).

Die kritische Faserkonzentration ($\psi_{f,krit}$) bei Einbau der BGF (s. Abb. 8-5, **rechts**) ist, verglichen mit $\psi_{f,krit}$ bei Einbau der MGF (s. Abb. 8-5, **links**), u. a. aufgrund höherer mittlerer Faserabstände, erhöhter Faserbiegesteifigkeiten und geringerer Grünstandsfestigkeiten (s. Kap. 6.3.3.2), bedeutend höher. Bei Erhöhung von l_f bzw. beim Schneiden orthogonal zur Treibrichtung werden jeweils geringere $\psi_{f,krit}$ festgestellt. Dies wird auf die Faservorzugsrichtung parallel zur Treibrichtung und damit auf die Verringerung des Schneidwiderstands zurückgeführt. Die Kurzfasern liegen vorzugsweise quer zum Schneidedraht.

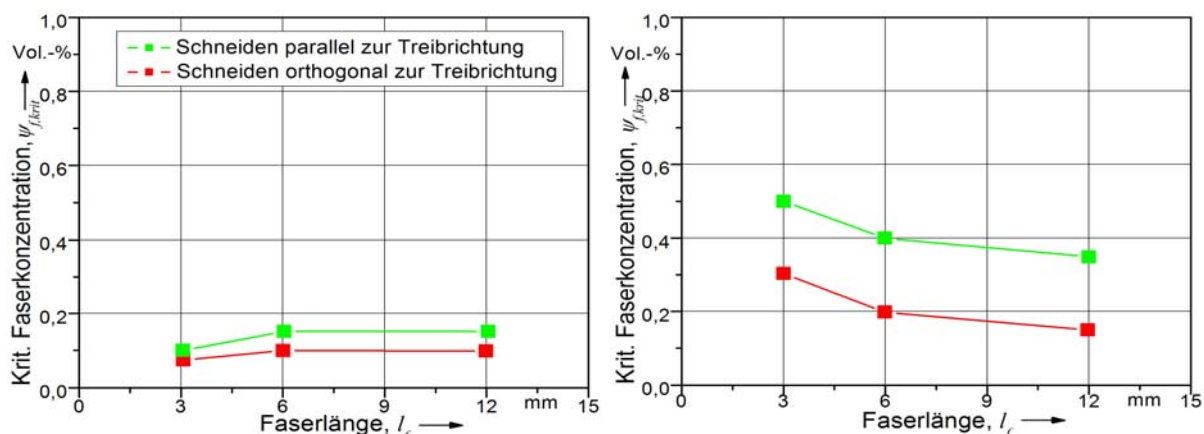


Abb. 8-5 Kritische Faserkonzentration ($\psi_{f,krit}$) im Porenbeton bei herkömmlicher Schneidtechnologie über den „stehenden Drahtdurchzug“, **links**: Einbau der wasserdispersiblen monofilen alkaliresistenten (AR) Kurzglasfasern (MGF) Saint Gobain (SG) Cem-FIL ARC20 70/30 bei Variation von l_f , **rechts**: Einbau der AR-Bündelglasfasern (BGF) SG Cem-FIL ARC20 60/2 bei Variation der Faserlänge (l_f)

Bei Einbau der MGF zeigen sich keine qualitativen Unterschiede in den Schneidrichtungen. Die „verfilzende“ Wirkung der Kurzfasern ergibt eine „Verschmierung“ der treibrichtungsabhängigen Phänomene; die Faserorientierung hat somit keinen wesentlichen Einfluss. Der Einfluss der Faserlänge (l_f) ist ebenfalls zu vernachlässigen, Phänomene aus Veränderung des Faserabstands und Schneidverhalten in Abhängigkeit von der Faserform heben sich auf. Längere Fasern werden schwieriger aus der Schnittlinie befördert. Die Zusammenhänge zu den Untersuchungen zur Grünstandsfestigkeit werden deutlich (s. Kap. 6.3.3.2).

Anmerkung

Die XELLA International GmbH führte in der Vergangenheit großmaßstäbliche Schneiduntersuchungen an kurzfaserverstärkten Porenbeton über die Schneidtechnologie bei „stehendem Drahtdurchzug“ durch (interne Forschung). Die Untersuchungen an standardisierten Rohblöcken der industriellen Porenbeton-Produktion (ca. 6 m³, industrielle Treibhöhe) bei Einbau der BGF zeigen ebenfalls nur eingeschränkte Machbarkeiten. Bei Einbau der Faserparameter ($\psi_f \approx 0,5$ Vol.-%, $l_f = 6$ mm) kam es zu einem Schneidedrahtversagen beim Schneiden orthogonal zur Treibrichtung. Neben den höheren Beanspruchungen orthogonal zur Faservorzugsorientierung ergeben sich durch Auflast und geometrieabhängige Schnitttiefe ($t_s \approx 1,8$ m) höhere Beanspruchungen orthogonal zur Treibrichtung. Parallel zur Treibrichtung wurden keine Einschränkungen im Schneidverhalten festgestellt. Erkenntnisse über die Rauigkeit der Schnittoberflächen (R_t) und die Planparallelität der Schnitte (P_t) bzw. zu den Beanspruchungen auf die Sägewerkzeuge liegen nicht vor.

Porenbeton ist in erforderlicher Faserkonzentration (ψ_f) über die herkömmliche Schneidtechnologie bei „stehendem Drahtdurchzug“ nicht schneidbar. Beispielsweise erfordert die Steigerung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens unter Biegebeanspruchungen bei Einbau der BGF mindestens ein $\psi_f > 0,5$ Vol.-% (s. Kap. 7.3.3). Aus den Untersuchungsergebnissen ergeben sich somit, trotz fehlender Vergleichsmöglichkeiten bei Nutzung großindustrieller Schneidprozess-, Schneidgeometrie- und Schneidmaterialparameter, Einschränkungen in der Machbarkeit.

8.2.2 Vorüberlegungen

Da kurzfaserverstärkter Porenbeton relevanter Faserkonzentrationen (ψ_f) bei Grünstandsfestigkeit nicht über die Schneidtechnologie bei „stehendem Drahtdurchzug“ schneidbar ist, ergibt sich die Notwendigkeit nach der Suche alternativer Schneidtechnologien. Lösungsansätze werden vorzugsweise für die Grünphase gesucht. Diese müssen, vergleichbar zur derzeitigen Schneidtechnologie, folgende Anforderungen erfüllen:

- Hochwertige Qualität der Schnittlinien bzw. der Schnittoberflächen:
 - Präzision von Schnittansatz und -austritt,
 - Rauigkeit der Schnittfläche ($R_t \leq 1 \text{ mm}$) [N 20],
 - Planparallelität des Schnitts ($P_t \leq 1 \text{ mm}$) [N 20],
 - Verschmieren der offenen Makroporosität an den Schnittoberflächen.
- Machbarkeit:
 - Technologische und zeitliche Einbindung im industriellen Produktionsprozess,
 - Handling durch den derzeitigen Personalbestand in der Produktion,
 - Wirtschaftlichkeit der Schneidtechnologie,
 - Ökologische Vertretbarkeit.

Folgende Schneidtechnologien werden für kurzfaserverstärkten Porenbeton vorgeschlagen:

- Druckflüssigkeitsschneiden,
- Schneiden über die Sägetechnologie.

Die im Folgenden durchgeführten Untersuchungen betrachten ausschließlich das vertikale Längs- und Querschneiden des kurzfaserverstärkten Porenbetons. Zum horizontalen Schneiden sind, ergänzend zu dieser Arbeit, weitere Untersuchungen erforderlich.

8.3 Schneiden des kurzfaserverstärkten Porenbetons in der „Grünphase“

8.3.1 Druckflüssigkeitsschneiden über Wasser- und Abrasivwasserstrahl-schneiden

Druckflüssigkeitsschneidverfahren werden unterschieden in die Trennverfahren Wasser- und Abrasivwasserstrahlschneiden [N 25]. Sie nutzen einen fokussierten, materialdurchtrennenden Hochdruckwasserstrahl (Wasserdruck max. 6 000 bar). Der Hochdruckwasserstrahl wird rein bzw. in Verbindung mit einem Abrasivmittel durch eine Düse (Material: u. a. Diamant, Saphir) bei Strahlgeschwindigkeiten von bis zu 1 000 m/s gedrückt. Im Grünzustand bei ausreichender Plastizität bzw. Festigkeit kann der Wasserstrahl das Schneidmaterial durchtrennen. Der Wasserstrahl wird elektronisch nach vorher programmierten Koordinaten gesteuert. Führung, Strahlverlauf und Präzision sind stark von den Schneidprozess-, Schneidgeometrie- und Schneidmaterialparametern abhängig.

8.3.1.1 Wasserstrahlschneiden (WSS)

Das WSS erfolgt materialabhängig durch Stoffverdrängung über einen reinen Wasserstrahl. Schneidverfahren mit porösen Werkstoffen sind bei den WSS-Technologie-Herstellern vorhanden. Die Beschaffenheit des grünsten Porenbetons lässt positive Ergebnisse erwarten; folgende Phänomene lassen sich bei Einsatz im Porenbeton voraussagen:

Der Wasserstrahl fächert tiefenabhängig aus (s. **Abb. 8-6, a**). Die partikuläre Zusammensetzung führt zu Partikelmitnahme bzw. Auswaschungen an den Schnittufern. Dieses Phänomen wird durch die porenbetonspezifisch hohe Porosität gesteigert, da die Porosität zu Energiereduzierung bzw. zu Luftverwirbelung im Randbereich des Wasserstrahls führt. Vorzugsweise durch hohe Vorschubgeschwindigkeit lässt sich die Abrasivwirkung minimieren. Es ergeben sich Grenzen in der Schnitttiefe.

Fehlende Strahlenergien führen zu einem Nachlauf bzw. zu einem „Springen“ des Hochdruckwasserstrahls (s. **Abb. 8-6, b**). Der Strahl durchstößt das Schneidgut nicht mehr senkrecht, sondern sucht sich, bei Reduzierung des Schneidwiderstands, eine nach hinten gerichtete nachlaufende Spur. Durch die Reduzierung des Widerstands springt der Strahl wieder nach vorne.

Der Wasserstrahl fächert durch das Vor- und Zurückspringen kegelförmig aus. Streifen- bzw. Wellenmuster an den Seitenwänden der Schnittoberflächen können entstehen [20]. Kritische Schneidprozess-, Schneidgeometrie- und Schneidmaterialparameter führen nicht mehr zum „Durchstoß“ des Reinwasserstrahls. Der Wasserstrahl bleibt im Schneidgut „stecken“.

Üblicherweise wird die Schnittqualität beim WSS bei gegebenen Schneidgeometrie- und Schneidmaterialparametern über die Vorschubgeschwindigkeit (v_s) des Wasserstrahls gesteuert. Folgende Schneidprozessparameter können neben v_s zusätzlich variiert werden:

- Fokussierdüsendurchmesser (d_{Fd}),
- Wasserdruck (p_w), -durchflussrate (Q_w),
- Wasserqualität, (Härte, Bestandteile),
- Wassertemperatur.

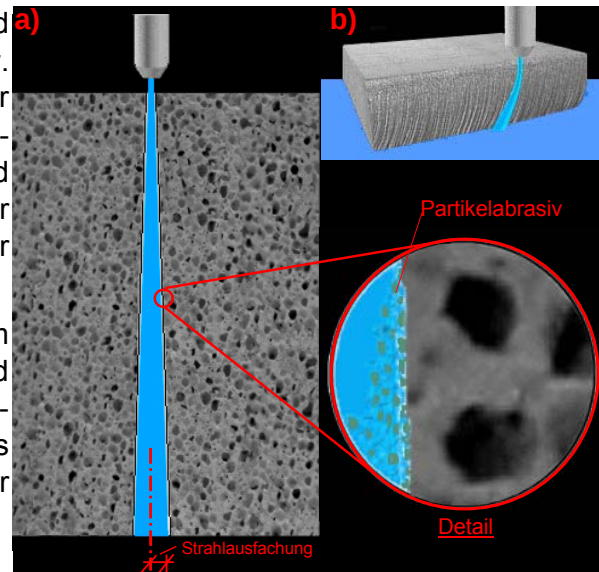


Abb. 8-6 Betrachtungen zum Wasserstrahlschneiden (WSS) bei Porenbeton, **a)** Tiefenabhängiges Ausfachen des Wasserstrahls bei Abrasivwirkung im Randbereich des Schnitts, **b)** Nachlauf des Wasserstrahls bei hoher Vorschubgeschwindigkeit (v_s)

In Abhängigkeit von den Schneidprozessparametern ergeben sich bei sonst gegebenen Parametern in dem Bereich zwischen stärkerer Ausfächerung und Nachlauf des Wasserstrahls optimale Schneidbedingungen. Qualitativ hochwertige Wasserstrahlschnitte an kurzfaserversetzten grünfesten Porenbeton erfordern somit die Abstimmung von Faser- und Schneidprozess-, Schneidgeometrie- sowie Schneidmaterialparameter (s. Tab. 8-1).

Machbarkeitsstudie

Eine Machbarkeitsstudie zum WSS zeigt die Schneidpotenziale auf.⁷ Beispielhaft werden alkaliresistente (AR) Bündelkurzglasfasern (BGF) Saint Gobain (SG) Cem-FIL ARC20 60/2 (Faserkonzentration $\psi_f = 0,75$ Vol.-%, Faserlänge $l_f = 12$ mm) sowie wasserdispersible monofile AR-Kurzglasfasern (MGF) SG Cem-FIL ARC20 70/30 ($\psi_f = 0,75$ Vol.-%, $l_f = 3, 6$ und 12 mm) in eine Basismischung nach Kap. 5.1 eingemischt und zum Treiben gebracht. Die Bewertung erfolgt wieder über die Grenzkriterien Rauigkeit der Schnittoberfläche ($R_t \leq 1$ mm) und Planparallelität des Schnitts ($P_t \leq 1$ mm) (s. **Abb. 8-8, rechts**).

Aus den Treibkörpern werden nach vier Stunden Standzeit getreptt abgestufte Probekörper parallel und orthogonal zur Treibrichtung über eine „Handsäge“ geschnitten (s. **Abb. 8-7**).

Die Schnittqualität wird in Abhängigkeit von der Schnitttiefe (t_s) und der Treibrichtung des Treibkörpers untersucht. Der Wasserdruck liegt bei $p_w = 3\,000$ bar, die Wasserdurchflussrate beträgt $Q_w = 3,0$ l/min. Die Fokussierdüse (Durchmesser $d_{Fd} = 0,2$ mm) wird zur Reduzierung von Energieverlusten < 1 mm über die Materialoberkante gesetzt. Die Vorschubgeschwindigkeit (v_s) wird von 0-10 000 mm/min variiert (s. **Abb. 8-8, links**).

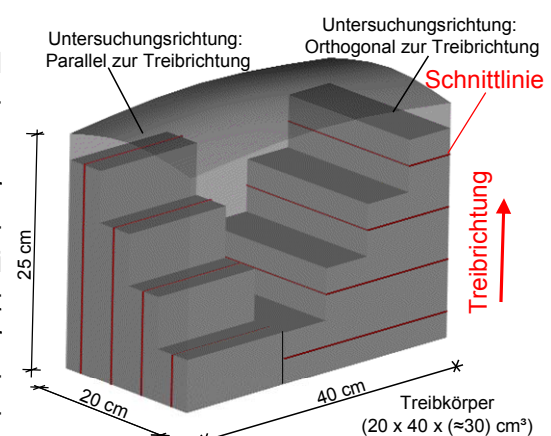


Abb. 8-7 Treibkörper sowie treibrichtungsabhängige Anordnung der treppenförmigen Probekörper im Treibkörper

⁷ Diese Studie wird am Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik, IPK, Pascalstraße 8-9, 10587 Berlin durchgeführt.

Die Untersuchungen zeigen, dass der Wasserstrahl im grünsten kurzfaserverstärkten Porenbeton hervorragend geführt werden kann. In der Bandbreite $1\,000\text{ mm/min} < v_s < 8\,000\text{ mm/min}$ werden bei allen Schnitttiefen ($t_s = 6, 12, 18$ und 24 cm , Abtreppungsstufen) qualitativ hochwertige Schnitte (R_t und $P_t \leq 1\text{ mm}$) erzielt (s. Abb. 8-8, **rechts**). Gesteigerte Strahlausfuchung bei Abrasivwirkung durch Partikelmitnahme sowie qualitätseinschränkende Rauigkeiten auf den Schnittoberflächen (Riefenbildung) sind nicht feststellbar. $v_s < 1\,000\text{ mm/min}$ ergibt Partikelabrasiv, der Schnitt facht bei $t_s \geq 10\text{ mm}$ bereits deutlich aus. Bei Vorschubgeschwindigkeiten $v_s > 8\,000\text{ mm/min}$ werden starke Riefen bei $t_s \geq 15\text{ mm}$ festgestellt.

Der Einbau der BGF und MGF hat, unabhängig von ψ_f und l_f , keinen maßgebenden Einfluss auf die Schnittqualitäten. Signifikante Unterschiede im Schneidverhalten parallel und orthogonal zur Treibrichtung durch Faserorientierungseffekte sind nicht festzustellen. Fasereinflüsse werden von den Schneidgeometrie- und Schneidmaterialparametern des grünsten Porenbetons überlagert. Schnittdurchkreuzende Kurzfasern werden an der widerstandsärmeren Schnittwand herausgezogen bzw. freigespült. Sie ragen leicht aus der Oberfläche heraus bzw. legen sich an der gegenüberliegenden Schnittwand um. Beide Kurzfaserformen bleiben formstabil; sie werden nicht durchtrennt. Die Schnittoberflächen mit der Makroporositäten „verschmieren“, die Kurzfasern liegen teilweise offen auf der Schnittoberfläche.

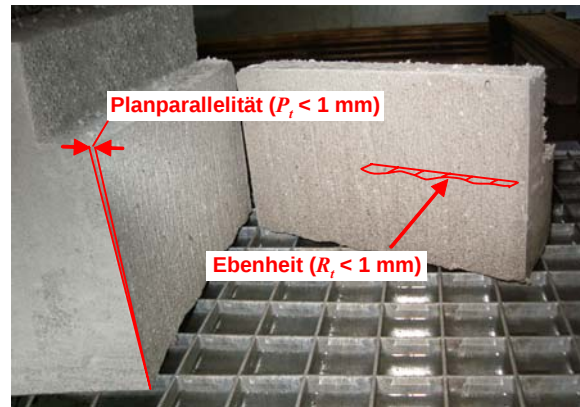


Abb. 8-8 Machbarkeitsstudie zum tiefenabhängigen Wasserstrahlschneiden (WSS) des kurzfaserverstärkten Porenbetons, **links**: Darstellung eines abgetreppten Probekörpers im Versuchsaufbau, **rechts**: Darstellung einer Schnittoberfläche bei einer Schnitttiefe $t_s = 15\text{ cm}$, (Einbau der wasserdispersiblen monofilen alkaliresistenten Kurzglasfasern Saint Gobain Cem-FIL ARC20 70/30, Faserlänge $l_f = 3\text{ mm}$, Faserkonzentration $\psi_f = 0,75\text{ Vol.-%}$, Vorschubgeschwindigkeit $v_s = 4\,000\text{ mm/min}$)

Weiterführende Untersuchungen

Aufbauend auf die Machbarkeitsstudie zum WSS werden systematische Untersuchungen an industrienahen Treibkörpern über das WSS durchgeführt.⁸ Es werden die derzeit maximal technologisch möglichen Schneidprozessparameter genutzt und für optimale Schnittqualitäten auf den kurzfaserverstärkten Porenbeton parallel zur Treibrichtung abgestimmt.

Es werden Treibkörper mit einer Grundfläche $30 \times 60\text{ cm}^2$ nach Kap. 5.1 hergestellt. Die Treibkörperhöhe und damit die Schnitttiefe beträgt $t_s = 70\text{--}75\text{ cm}$. Als Kurzfaser wird ausschließlich die BGF ($l_f = 6, 12\text{ mm}$, $\psi_f = 1,0\text{ Vol.-%}$) eingesetzt.



Abb. 8-9 Untersuchungen zum Wasserstrahlschneiden (WSS) an industrienahen Treibkörpern, **rechts oben**: Darstellung der Druckflüssigkeitsschneidanlage (Flow-waterjet)⁸

⁸ Diese Untersuchungen werden mit Flow - waterjet, Europe GmbH, Gewerbestrasse 95, 75015 Bretten durchgeführt.

Nach vier Stunden Standzeit werden aus den Treibkörpern Scheiben ($d \approx 7$ cm) in Längsrichtung parallel zur Treibrichtung über das WSS abgetrennt (s. **Abb. 8-9**). Die Fokussierdüse wird 1 mm über die Materialoberkante gesetzt. Q_w wird in Anlehnung an Optimierungsuntersuchungen von Flow-waterjet für die 0,2er Düse auf 1,93 l/min und für die 0,3er Düse auf 3,77 l/min festgelegt. Die Schneidprozessparameter werden wie folgt variiert:

- Fokussierdüsendurchmesser $d_{Fd} = 0,2$ und $0,3$ mm,
- Wasserdruck $p_w = 4\,137$ bar,
- Vorschubgeschwindigkeit $v_s = 1\,000$ - $10\,000$ mm/min.

Die Untersuchungen zeigen, dass auch für den grünsten kurzfaserverstärkten Porenbeton bei industrienahen Treibkörperhöhen hervorragende Schnittqualitäten möglich sind (Vertikalschnitte). Die Kurzfasern spielen auch hier nur eine untergeordnete Rolle. **Abb. 8-10** zeigt die maximale Rauigkeit (R_t) und die abweichende Planparallelität (P_t) in Abhängigkeit zur Vorschubgeschwindigkeit (v_s) bei jeweiligem d_{Fd} für die Untersuchungen:

Eine Vorschubgeschwindigkeit kleiner $v_s = 2\,500$ mm/min ($d_{Fd} = 0,2$ mm) bzw. $v_s = 3\,000$ mm/min ($d_{Fd} = 0,3$ mm) führt zu gesteigertem Partikelabrasiv an den Schnittwänden bei fehlender Planparallelität. Eine Vorschubgeschwindigkeit höher $v_s = 4\,000$ mm/min ($d_{Fd} = 0,2$ mm) bzw. $7\,000$ mm/min ($d_{Fd} = 0,3$ mm) ergibt signifikante Riefenbildungen im unteren Teil der Schnittwand bei gesteigerter Rauigkeit der Schnittoberflächen.

Unter Einbeziehung der zeitlichen bzw. wirtschaftlichen Aspekte lassen sich aus den Untersuchungen die optimalen Vorschubgeschwindigkeiten für das Schneiden des faserverstärkten Porenbetons unter industrienahen Bedingungen bestimmen:

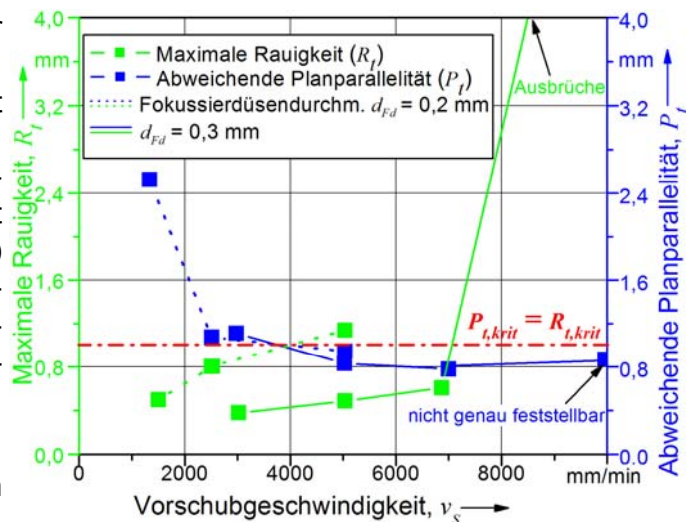


Abb. 8-10 Charakterisierung der Schnitte über das Wasserstrahlschneiden (WSS): max. Rauigkeit (R_t) bzw. abweichende Planparallelität (P_t) in Abhängigkeit zur Vorschubgeschwindigkeit (v_s) (Fokussierdüsendurchmesser $d_{Fd} = 0,2$ mm und $d_{Fd} = 0,3$ mm)

- $d_{Fd} = 0,3$ mm, $v_s = 4\,000$ - $5\,000$ mm/min,
- $d_{Fd} = 0,2$ mm, $v_s = 3\,000$ mm/min.

Abb. 8-11 zeigt eine Auswahl an Schnittoberflächen der durchgeführten Untersuchungen.

Abb. 8-11, **a)** stellt beispielhaft geschnittene Scheiben bei $d_{Fd} = 0,2$ mm und $d_{Fd} = 0,3$ mm in Abhängigkeit von v_s (s. Bildunterschrift) dar. Abb. 8-11, **b)** und Abb. 8-11, **c)** zeigen Oberflächendetails von Schnittflächen mit $l_f = 6$ mm und $l_f = 12$ mm (mittige Höhe im Treibkörper, $v_s = 5\,000$ mm/min, $d_{Fd} = 0,3$ mm). Das Umlegen der Kurzfasern an der Schnittwand ist deutlich zu erkennen. Es sind leichte „Rillen“ auf den Schnittoberflächen festzustellen, die Grenzkriterien der Rauigkeit werden jedoch nicht überschritten. Abb. 8-11, **d)** und Abb. 8-11, **e)** zeigen Oberflächendetails von Schnittflächen in Abhängigkeit von der Treibkörperhöhe ($d_{Fd} = 0,3$ mm, $v_s = 5\,000$ mm/min). Die Makroporosität ist oben offen und schließt sich mit zunehmender Schnitttiefe (t_s). Dies ist auf die verschmierende Wirkung des transportierten Partikelabrasivs im unteren Bereich zurückzuführen. Bei höherer Plastizität des Schneidmaterials ist das Phänomen der „Verschmierung“ der Makroporosität wesentlich ausgeprägter.

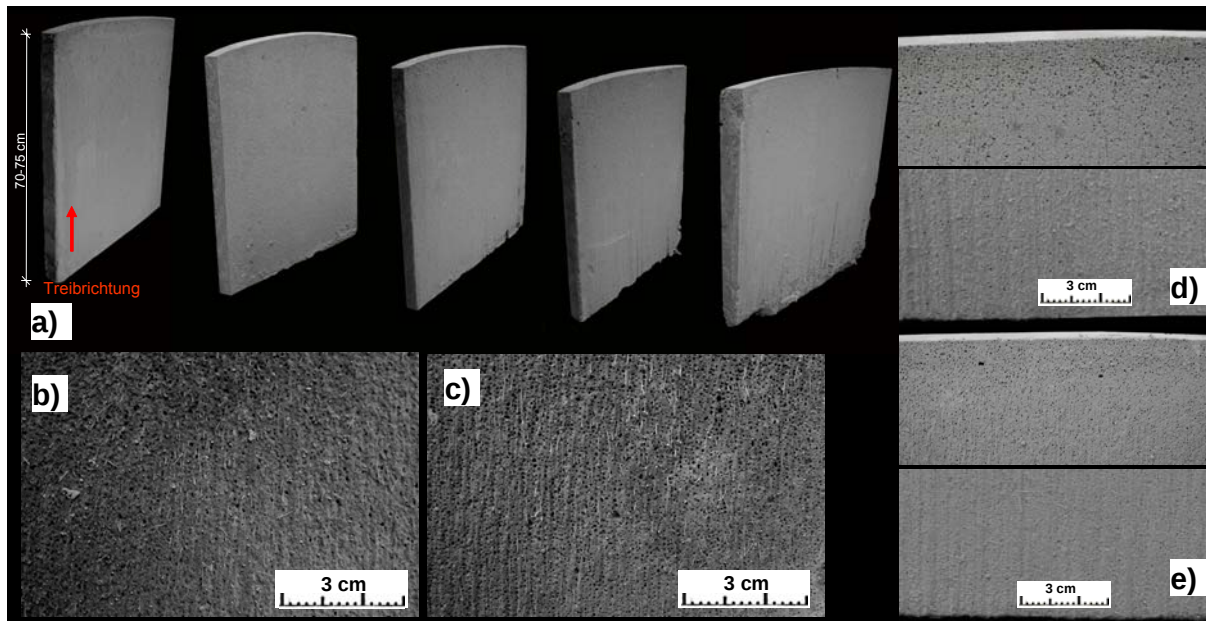


Abb. 8-11 Charakterisierung der Schnittoberflächen beim Wasserstrahlschneiden (WSS) (Einbau der alkaliresistenten Bündelkurzglasfasern Saint Gobain Cem-FIL ARC20 60/2, Faserlänge $l_f = 6$ mm und 12 mm, Faserkonzentration $\psi_f = 0,75$ Vol.-%), a) Darstellung der Schnittoberflächen bei einem Vorschubgeschwindigkeit/Fokussierdüsendurchmesser-Verhältnis (v_s/d_{Fd}) (von links nach rechts): (1 500/0,2), (3 000/0,3), (5 000/0,3), (7 000/0,3), (10 000/0,3) [mm/min / mm], ($l_f = 6$ mm), b)-e) Schnittoberflächen bei $v_s = 5000$ mm/min, $d_{Fd} = 0,3$ mm, b) Oberflächendetail der Schnittwand (mittig) mit $l_f = 6$ mm, c) Oberflächendetail der Schnittwand (mittig) mit $l_f = 12$ mm, d) Vergleich von Oberflächendetails der Schnittwände im unteren und oberen Bereich mit $l_f = 6$ mm, e) - mit $l_f = 12$ mm

8.3.1.2 Abrasivwasserstrahlschneiden (AWSS)

Das AWSS erfolgt ebenfalls materialabhängig durch Stoffverdrängung über einen Wasserstrahl. Bei der Technologie des AWSS wird dem Wasserstrahl ein Abrasivmittel beigemischt (Granat-, Korundsand, $d_{Par} = 50-300 \mu\text{m}$). Die Strahlenergie wird dadurch gesteigert. Das Gemisch besteht aus ca. 90% Luft, 9% Wasser und 1% Abrasivmittel. Fokussierdüsen- (d_{Fd}) bzw. Mischrohrdurchmesser (d_{Mr}) werden der Partikelgröße des Abrasivmittels angepasst.

Machbarkeitsstudie

Vergleichbar zu den Untersuchungen zum WSS wird das AWSS an industrienahen Treibkörpern betrachtet. Mischungszusammensetzung, Herstellung, Randbedingungen sowie Fasereinbauten werden beibehalten. Die Vorschubgeschwindigkeit wird wieder in o. g. Bandbreite variiert. Folgende abrasivspezifische Schneidprozessparameter werden verwendet:

- $d_{Fd} = 0,35$ mm, $d_{Mr} = 0,50$ mm,
- Granatsand: $d_{Par} \approx 80 \mu\text{m}$, Mohs-Härte 7-8,
- Abrasivmittelmassenstrom: 400 g/min.

Die Rauigkeiten (R_t) beim AWSS zeigen vergleichbare Ergebnisse zum WSS. Deutliche Unterschiede können jedoch in der Planparallelität (P_t) auftreten. Durch die gesteigerte abrasive Wirkung des Gemisches aus Luft, Wasser und Abrasivmittel entstehen starke „Keilspaltschnitte“ (s. Abb. 8-6, a)). Es kommt zu Verwirbelungen, P_t kann bis zu 250% gegenüber P_t beim Schneiden über das WSS divergieren. Daraus ergibt sich, dass das AWSS unter der Nutzung der angegebenen Schneidprozessparameter für das Schneiden industrienaher Treibhöhen nur eingeschränkt anwendbar ist.

Bei verfahrensspezifisch maximaler Vorschubgeschwindigkeit $v_s = 10\,000$ mm/min zeigt die Schnittqualität über das WSS und das AWSS unter vergleichbaren Schneidprozessparametern, bezogen auf die volle Schnitthöhe, jeweils deutlich Ausschusscharakter (s. **Abb. 8-12**).

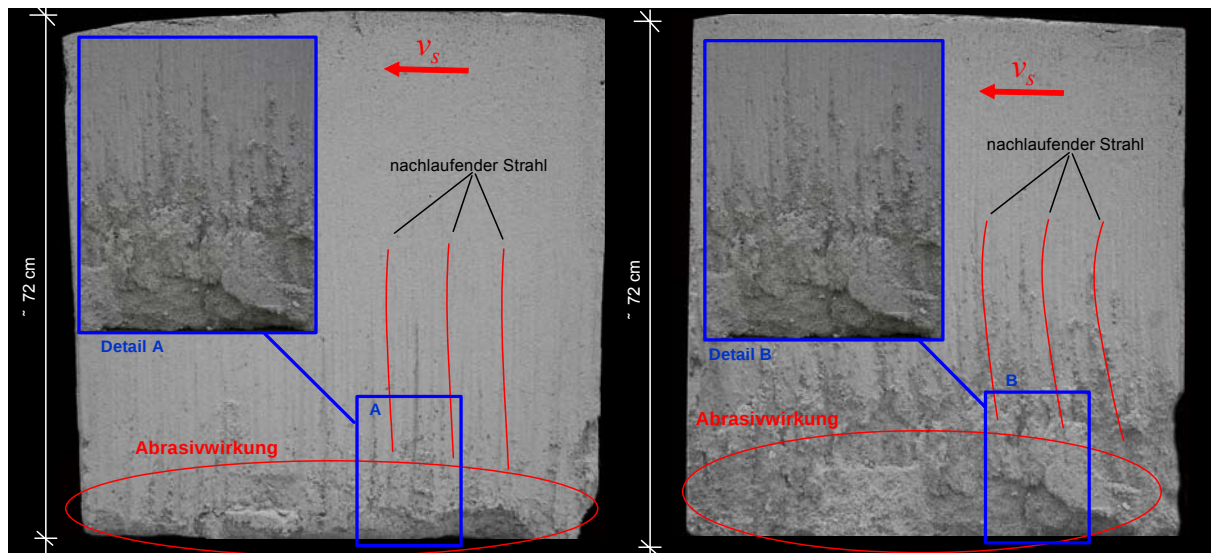


Abb. 8-12 Druckflüssigkeitsschneiden mit kritischen Schneidprozessparametern bei einer Vorschubgeschwindigkeit $v_s = 10\,000$ mm/min an industrienahen Treibkörpern, **links**: Schnittoberfläche über das Wasserstrahlschneiden (WSS) bei einem Fokussierdüsendurchmesser $d_{Fd} = 0,3$ mm, **rechts**: Schnittoberfläche über das Abrasivwasserstrahlschneiden (AWSS) bei $d_{Fd} = 0,35$ mm und Mischrohrdurchmesser $d_{Mr} = 0,5$ mm, Partikeldurchmesser $d_{Par} = 50$ µm, Abrasivmittelmassenstrom: 400 g/min

Bei Vergleich beider Schnittoberflächen zeigt sich, dass das WSS in Abb. 8-12, **links** im unteren Treibkörperbereich wesentlich schwächer ausgeprägte Charakteristika von Strahlnachlauf und -ausfächung gegenüber Abb. 8-12, **rechts** aufweist. Außerdem sind in der Abb. 8-12, links weniger herausbrechende Strukturen zu erkennen. Die Ursache dafür ist die o. g. gesteigerte Abrasivwirkung des Gemisches aus Luft, Wasser und Abrasivmittel. Der Strahl ist bedeutend diffuser, fächert wesentlich stärker auf bzw. greift nur noch „flächig“ im unteren Teil des Schneidmaterials an. Eine Schneidwirkung ist nur eingeschränkt vorhanden. Verdrängtes Schneidmaterial wird nicht mehr aus der Schnittlinie befördert.

8.3.1.3 Zusammenfassung

Das WSS ist bei grünfestem kurzfaserverstärktem Porenbeton unter derzeitig zur Verfügung stehenden Schneidprozessparametern bis zu einer vertikalen Schnitttiefe $t_{S,vert} \approx 80$ cm mit hohen Schnittqualitäten durchführbar. Horizontale Schnitte sind in ähnlicher Dimensionierung möglich, erfordern aber die Berücksichtigung der Auflast aus dem Schneidgut. Das AWSS eignet sich, aufgrund der hohen Abrasivwirkung auf den Schnittoberflächen bei fehlenden Planparallelitäten, nur eingeschränkt zum Schneiden des kurzfaserverstärkten Porenbetons. Die Kosten für das Abrasivmittel sind zusätzlich zu beachten. Kurzfasern haben keinen Einfluss auf die Schnittqualitäten bei beiden Schneidverfahren.

In der Regel bestimmen die Taktzeiten der Schneidanlagen die Kapazitäten der industriellen Produktion [66]. Beim Druckflüssigkeitsschneiden sollten mehrere Schneidköpfe parallel über die Breite des Rohblocks, jeweils flexibel einstellbar für verschiedene Steinformate, angeordnet werden. Diese Anordnung wird im Schneidprozess über die Länge des Rohblocks geführt. Dafür würde sich ein Schneidgatter, ähnlich dem im Schneidsystem über den „stehenden Drahtdurchzug“, eignen. Auch das gleichzeitige Schneiden horizontaler und vertikaler Schnitte ist somit möglich. Zusätzlich könnten hohe Vorschubgeschwindigkeiten bzw. gleichzeitiges vertikales und horizontales Schneiden die Schneidzeiten weiter reduzieren und damit die Wirtschaftlichkeit erhöhen. Die energie- und technologieaufwendige Wasserdruckerzeugung könnte in den hydrothermalen Autoklavierungskreislauf eingebunden werden. Ökologischen und ökonomischen Kriterien sind somit Rechnung getragen. Die Kosten für Verschleiß an den Fokussierdüsen und der Schneidanlage sind jedoch zusätzlich zu beachten.

Darüber hinaus müssen für einen industrierelevanten Einsatz des WSS an grünfesten kurz-

faserverstärkten Porenbeton Sicherheitsstandards eingehalten werden. Die Strahlenergien müssen nach Austritt aus dem Porenbeton-Rohblock schnell reduziert werden.

Durch die starke Ausfächerung des Wasserstrahls bei „Luftdurchschnitt“ (s. **Abb. 8-13**) werden die Strahlenergien nach Austritt aus dem Schneidgut wesentlich reduziert. In vertikaler Richtung lässt sich die Wasserstrahlintensität über das unterseitig installierte Wasserbecken zum Auffangen des Restschneidguts weiter reduzieren. In horizontaler Richtung wäre ein adäquater Widerstand, so z. B. eine „Prallplatte aus Stahl“ nach Strahlaustritt aus dem Schneidgut ergänzend erforderlich.

Ein weiterer Ansatz ist das ausschließliche Schneiden des Schneidguts in vertikaler Richtung. Der Rohblock wird während des Schneidens im industriellen Produktionsprozess gedreht, wodurch ausschließlich Vertikalschnitte zur Anwendung kommen. Bei Porenbeton-Planelementen, die über die komplette Treibhöhe reichen, sind ohnehin nur Vertikalschnitte erforderlich.

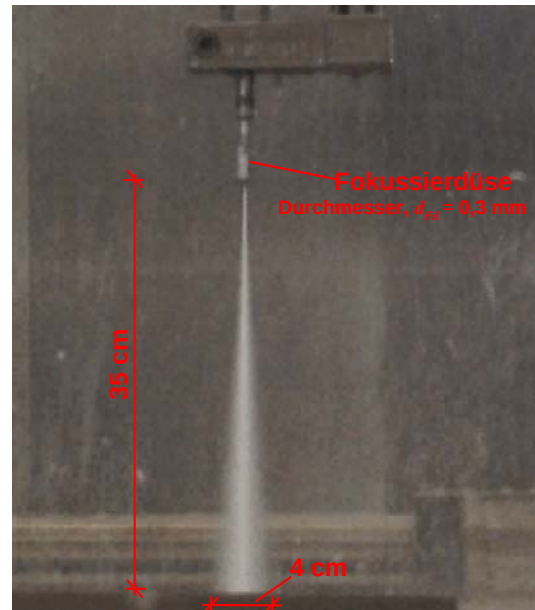


Abb. 8-13 Ausfächeren des Wasserstrahls (Wasserdruck $p_w = 4\,137$ bar, Wassermenge $Q = 3,77$ l/min)

Mit der neuesten Technologie im Bereich des Hochdruckpumpensektors können Materialien mit $p_w = 6\,000$ bar über das WSS und das AWSS geschnitten werden. Bei angepasster Durchlaufrate ließen sich t_S bzw. v_S in Zukunft um 30%-40% steigern.

8.3.2 Schneiden mit der Sägetechnologie

Das Schneiden mit der Sägetechnologie (SST) funktioniert über eine Abrasivwirkung oberflächenstrukturierter Sägewerkzeuge. Sägedrähte, -seile und -ketten können zum Einsatz kommen. Die Sägewerkzeuge durchlaufen den grünfesten „Treibkuchen“ bei gleichmäßigem Vorschub von Schneidgut bzw. Sägewerkzeug. Die Sägewerkzeuge werden endlos bzw. über eine stark oszillierende Bewegung geführt [N 5].

Bereits [N 6] aus dem Jahre 1950 schlägt eine Vorrichtung vor, bei der strukturierte Drähte leicht oszillierend durch den grünfesten Porenbeton gezogen werden. Ziel war es, über dieses Schneidverfahren rauere Schnittoberflächen zur verbesserten Haftung eines Oberflächenschutzsystems herzustellen. Es wurde vorgeschlagen, die Drähte oder Seile mit aufgeschweißten Spitzen, Haken bzw., auch vereinfacht, Platten, Kugel oder „Oliven“ zu versehen. **Abb. 8-17, a)** zeigt einen Sägedraht, bei dem ein Runddraht in Abständen abgeplattet wurde und Rohrstücke aufgesetzt und fixiert werden. Ein Verfahren, das im Rahmen der Fragestellung Schneiden von kurzfaserverstärktem Porenbeton wieder aufgegriffen werden könnte.

Die Gefahr des „Verschmierens“ der Sägewerkzeuge durch die hohe Plastizität des grünfesten Schneidguts kann durch die Installation einer mechanischen Abstreifvorrichtung oder die Installation eines Abspülsystems verhindert werden. Bei einem Abspülssystem könnte beispielsweise nach Durchlaufen des Schneidguts ein Hochdruckwasserstrahl auf das Sägewerkzeug treffen; das Sägewerkzeug wird abspülend gereinigt. Das „Brauchwasser“ wäre für die Schlammenaufbereitung im industriellen Produktionsprozess nutzbar (s. Kap. 5.1).

Die Planparallelität (P_t) kann konstruktiv durch die obere und untere Führung der Sägedrähte, -seile und -ketten bzw. durch Vorspannen der Sägewerkzeuge jederzeit eingehalten werden. Die Sägewirkung und der Heraustransport des Materials aus der Schnittlinie beim SST kann über folgende Schneidprozessparameter des Schneidwerkzeugs gesteuert werden:

- Rotationsgeschwindigkeit (v_{rot}) bzw. Oszillationsgeschwindigkeit des Sägewerkzeugs,
- Vorschubgeschwindigkeit der Sägewerkzeuge (v_s),
- Sägewerkzeuggeometrie (u. a. Draht-, Seil- bzw. Kettendurchmesser (d_d)),
- Beschaffenheit des Sägewerkzeugs, (z. B. Struktur bzw. Rauigkeit der Oberfläche),
- Zugspannung auf dem Sägedraht, auf dem Sägeseil bzw. auf der Sägekette,
- Reinigungspotenzial des Sägewerkzeugs.

Kurzfasern werden bei diesem Verfahren aus der Schnittlinie des Schneidguts heraustransportiert bzw. über Umlegen an die Schnittwand gedrückt. Sie stellen auch bei diesem Verfahren in den betrachteten Formen, Materialien und Konzentrationen einen zu vernachlässigen Widerstand dar. Die Schneideigenschaften, die sich aus den Schneidgeometrie- und Schneidmaterialparametern nach Tab. 8-1 ergeben, überlagern die Faserparameter.

Eigene Untersuchungen

Eigene Untersuchungen beschränken sich auf den Einsatz von elementaren Sägedrähten und -seilen. Sägeketten arbeiten nach ähnlichen Prinzipien und können, aufgrund ihrer gesteigerten Strukturiertheit sowie ihrer Robustheit, noch höhere Wirksamkeiten aufweisen. Eine Machbarkeitsstudie zeigt die Schneidpotenziale des SST bei Fasereinbau im Porenbeton unter Nutzung einer Auswahl an elementaren, kommerziellen bzw. selbst entwickelten Sägedrähten und -seilen (**Abb. 8-14, rechts unten**).

Mischungszusammensetzung und Probekörpergeometrie werden nach Kap. 8.3.1.1 eingesetzt. Untersucht wird treibrichtungs- und schnitttiefenabhängig. Als Kurzfasern kommen wasserdispersible monofile alkali-resistente Kurzglasfasern (MGF) (Faserlänge $l_f = 3$ und 6 mm, Faserkonzentration $\psi_f = 0,75$ Vol.-%) zum Einsatz. Sie gelten im Gegensatz zur BGF als schneidkritischer (s. Abb. 8-5). Zur Untersuchung wird ein Schneidgerät in Form einer Bandsäge nach **Abb. 8-14, links**) mit Spanneinheit und Führungseinrichtung entwickelt. Das untere Führungsrad treibt über eine Antriebseinheit das Sägewerkzeug an.

Die Drähte bzw. Seile werden über Spleißverbindungen zu Endlosschleifen umgearbeitet. Sie laufen nach oben aus dem Schneidmaterial heraus. Folgende Sägedrähte und -seile kommen zum Einsatz:

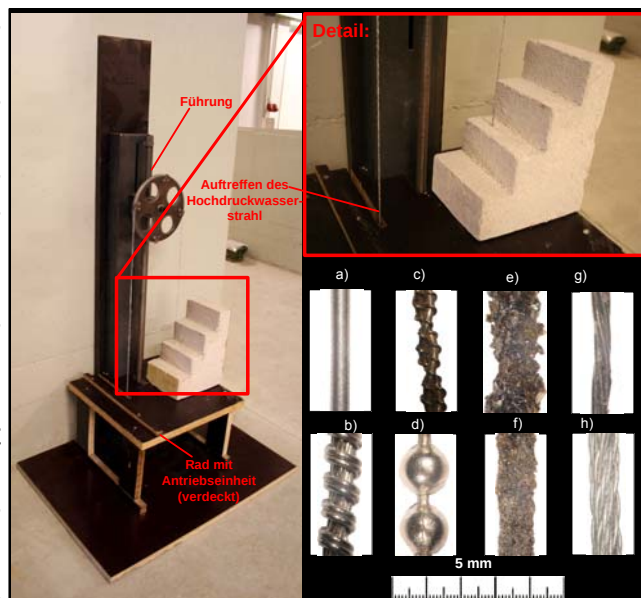


Abb. 8-14 Schnitten mit der Säge-Technologie (SST), **links**: Versuchsaufbau des Schneidgeräts, **rechts oben**: Detail: Schneidgerät mit präpariertem Probekörper (s. Abb. 8-7), **rechts unten**: Auswahl an Schneidedrähten bzw. -seilen

- Federstahldraht - glatt, veredelt,**
(Drahtdurchmesser $d_d = 1,0$ mm, Anwendung: herkömmliche Technologie des Schneidens von Porenbeton)
- Spezialschneideseil - HSS 6,**
($d_d = 2,3$ mm), G. Eiselt, Spezialmaschinen, Anwendung: „Steinschneiden“)
- Gekettetes Seil,**
($d_d = 1,2$ mm, Hörger GmbH, Anwendung: Medizintechnik)
- Kugelseil,**
($d_d = 2,3$ mm, Stahlkugeln auf einen Draht über eine zentrale Bohrung in jeder Kugel aufgefädelt)
- Korunddraht,**
(Eigenbau: $d_d = 1,5$ mm, Federstahldraht mit umlaufender Belegung von Korundpartikeln ($d_{par} = 0,5$ mm) (Befestigung über Epoxidharz-Beschichtung)

- f) **Korunddraht,**
(Eigenbau: $d_d = 1,2$ mm, Federstahldraht mit umlaufender Belegung von Korundpartikeln ($d_{Par} = 0,125$ mm) (Befestigung über Epoxidharz-Beschichtung)
- g) **Stahlfadenseil, verdreht**
(Eigenbau: $d_d \approx 0,9$ mm, $18 \times (d_d = 150 \mu\text{m})$ (Einzelfilament))
- h) **Stahlfadenseil, verflochten**
($d_d \approx 1,4$ mm, $50 \times (d_d = 150 \mu\text{m})$)

Das Schneidgut wird gleichmäßig durch die rotierende Bandsäge, bei jeweiligem Einbau des Sägedrahts bzw. -seils, geschoben. Die Vorschubgeschwindigkeit (v_s) wird in Abhängigkeit von dem zu untersuchenden Sägewerkzeug und den Schneidgeometrieparametern angepasst. Die Schnitttiefen variieren; die Rotationsgeschwindigkeit (v_{rot}) beträgt konstant ca. 2 m/s. Im Rücklauf werden die Sägewerkzeuge über einen Hochdruckwasserstrahl gereinigt.

Ergebnisse und Diskussion

Die Untersuchungen zeigen, dass das Schneiden über den glatten Federstahldraht **a)** bei kurzfaserverstärktem Porenbeton nicht angewendet werden kann. **Abb. 8-16, links** stellt einen Schnitt bei einer Schnitttiefe $t_s = 5$ cm dar. An dieser Stelle sind die gleichen Phänomene wie im Kap. 8.2.1 festzustellen. Der Sägedraht läuft aus der Ideallinie; ein weiterer erzwungener Vorschub lässt den Probekörper auseinanderbrechen.

Alle anderen Sägedrähte und -seile erzielen qualitativ unterschiedlich gute Schneidwirkungen. **Abb. 8-15** zeigt beispielhaft die maximale Vorschubgeschwindigkeit ($v_{s,max}$) der Schneidedrähte b)-h) für die Schnitttiefe $t_s = 24$ mm parallel zur Treibrichtung (Schneidgeometrieparameter, s. Abb. 8-7) für die Faserlängen $l_f = 3$ mm und $l_f = 6$ mm. Bewertet wird wieder über das Kriterium maximale Rauigkeit $R_t < 1$ mm und das Kriterium abweichende Planparallelität $P_t < 1$ mm [N 20].

Abb. 8-16, **rechts** zeigt eine optimale Schnittoberfläche des kurzfaserverstärkten Porenbetons über das Sägeseil **c)** (Schnitttiefe $t_s = 15$ cm) bei angedeuteter Darstellung von R_t und P_t . Die Sägeseile **b)** und **c)** erweisen sich bei allen Sägeschnitten als Vorzugsvarianten.

Schneidedrähte bzw. -seile **d)-h)** zeigen, aufgrund ihrer strukturellen Beschaffenheit, eine eingeschränkte Fähigkeit im Heraustransport des Schneidmaterials aus der Schnittlinie. Die Vorschubgeschwindigkeit muss reduziert werden. Die Schnittqualitäten sind bis zu $v_{s,max}$ qualitativ hochwertig. $l_f = 6$ mm zeigt nur eine geringfügige Veränderung im Verhalten gegenüber dem Einbau von $l_f = 3$ mm. Treibrichtungsabhängig lassen sich kaum Unterschiede feststellen.

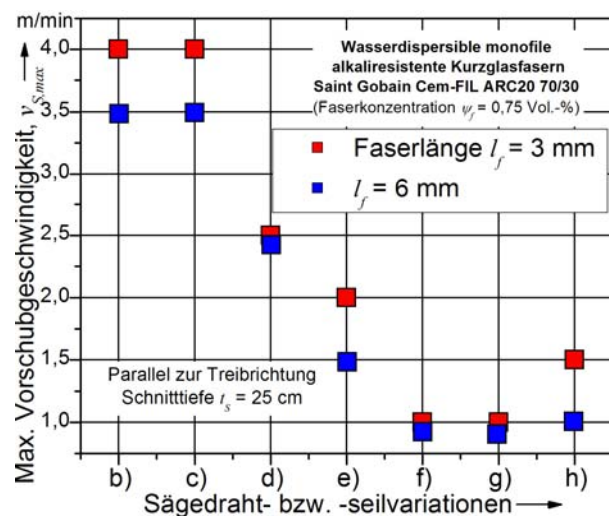


Abb. 8-15 Maximale Vorschubgeschwindigkeit (v_s) in Abhängigkeit von der Sägedraht- bzw. -seilvariation beim Schneiden mit der Sägetechnologie (SST)

Wesentlichen Einfluss auf die Schneidfähigkeit hat die Intensität der Abspülprozesse über den Hochdruckwasserstrahl. Fehlende bzw. eingeschränkte Reinigung der Sägedrähte und -seile führt zu mangelhaften Materialtransport. v_{rot} muss erhöht bzw. v_s reduziert werden. Durch das am Sägedraht bzw. -seil haftende Wasser ergibt sich eine verschmierende Wirkung an der Schnittwand. Die Qualität der Oberfläche wird somit wasserabhängig gesteigert.

Die Untersuchungen zeigen, dass bereits einfache Ausführungen der Sägetechnologie zu guten Schnittqualitäten bei kurzfaserverstärktem Porenbeton führen können. Das SST, ab-

gestimmt auf die richtigen Schneidprozessparameter, scheint auch bei großen Schnitttiefen (t_s) mit hohen Schnittqualitäten ausführbar zu sein. Auf genauere Untersuchungen bei Nutzung industrienaher Schneidgeometrieparameter kann somit verzichtet werden.

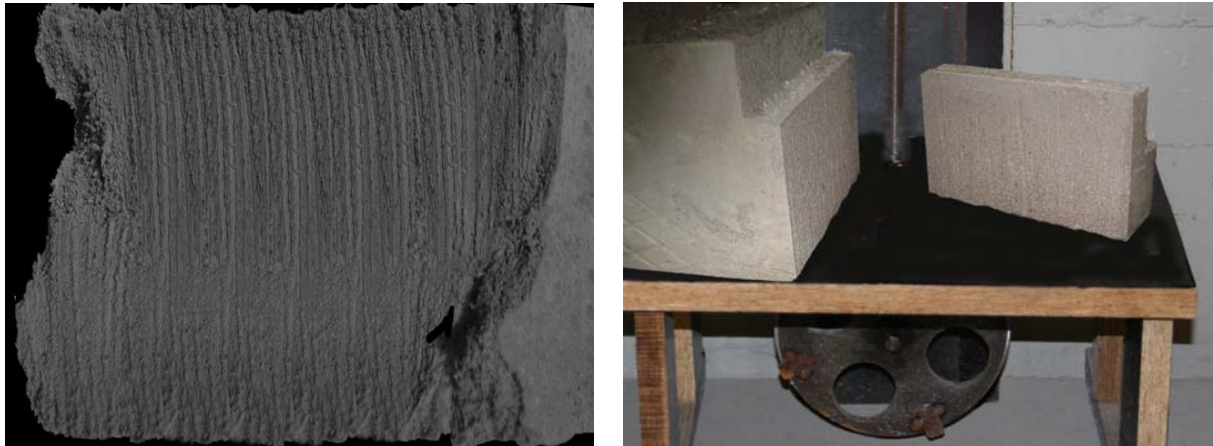


Abb. 8-16 Schneidergebnisse beim Schneiden mit der Sägetechnologie (SST) bei Einbau der wasserdispersiblen monofilien alkaliresistenten Kurzglasfasern Saint Gobain Cem-FIL ARC20 70/30 (Faserkonzentration $\psi_f = 0,75$ Vol.-%, Faserlänge $l_f = 3$ mm, parallel zur Treibrichtung), **links**: Schnittoberfläche bei Schneidversagen (Schneidedraht a), Schnitttiefe $t_s = 5$ cm), **rechts**: Darstellung einer qualitativ hochwertigen Schnittoberfläche (Schneidedraht c))

Weiterführende Betrachtungen

Das Schneiden über die positiv bewerteten Schneidedrähte bzw. -seile aus der vorhergehenden Untersuchung stellt nur eine Auswahl von Möglichkeiten für das Schneiden des grünfesten kurzfaserverstärkten Porenbetons dar. Es gibt eine Vielzahl kommerziell ausge-reifter „Sägewerkzeuge“, die sich weit besser eignen. So kann beispielsweise auf die Säge-seiltechnik zurückgegriffen werden. Die Säge-seiltechnik an Feststoffmaterialien ist bereits seit Langem bekannt. Sie erweist sich, gegenüber oben untersuchten elementaren Säge-drähten und -seilen, als deutlich leistungsfähiger. Dabei werden auf einem massiven Träger-seil Schneidelemente aus harten, abriebsarmen Materialien (Diamant, Korund) fixiert. Die Seile werden mit hoher Rotationsgeschwindigkeit geführt. Es zeigen sich folgende Vorteile:

- Erhöhter Verschleißwiderstand gegenüber Partikelabrasiv bzw. Kurzfasermaterial,
- Erhöhter Widerstand gegenüber Zug- und Drehmomentbeanspruchungen,
- Erhöhte Führungseigenschaften im Schneidmaterial und bei rotierender Umlenkung,
- Erhöhter Materialtransport durch potenziell stärker strukturierte Oberflächen.

Das Durchtrennen von hochfesten Materialien aus Beton, Keramik, Stahl bzw. Steingut ist so möglich. Viele der kommerziellen Säge-seilssysteme stellen „überdimensionierte“ Varianten für das Schneiden des grünfesten, kurzfaserverstärkten Porenbetons dar. **Abb. 8-17, b)-g)** zeigt Darstellungen einer Auswahl von Säge-seilen bzw. eine Auswahl von Optimierungsvarianten.

Üblicherweise werden Schleifperlen, bestehend aus einer Trägerhülse mit konzentrisch umlaufenden gehärteten, metallisch-gebundenen Schleifbelegen, auf einem Trägerseil befestigt (s. Abb. 8-17, **b)**). Zur besseren Führung und Kraftübertragung kann eine Federkonstruktion auf der Innenseite der Schleifperle angebracht werden (s. Abb. 8-17, **c)**, [N 14]). Diese kann über Führungsschienen bzw. in Umlenkrollen über eine Nut geführt werden. Das schleifperlenbesetzte Trägerseil wird optimiert durch das Schneidgut geführt. Das Seil läuft so nicht aus der Schnitlinie. Einen weiteren Vorschlag zur Optimierung der Seilführung, bei der die Schleifperlen das Schneidgut heraustransportieren, wird in Abb. 8-17, **d)** gezeigt [N 1]. Der Fortsatz der Schleifperlen wird so konstruiert, dass er sich in konkav-, konvex- bzw. winkelvartierender Beschaffenheit mit jeder Schneidperle verändert. Die Abstände zwischen den Schleifperlen werden durch Abstandshalter ausgefüllt.

[N 12] geht einen anderen Weg der Schneidoptimierung. Hierbei werden spiralförmige Schleifperlen auf einem Trägerseil befestigt (s. Abb. 8-17, **e**). Dieses Sägeseil erweist sich als äußerst effektiv hinsichtlich der Verschleißerscheinungen, da tiefer liegende Bereiche der spiralförmigen Schleifperle bei Abschleiß höher liegender Bereiche zum Tragen kommen. Nach [N 2] kann der Endlosverbund des Trägerseils auch über einen Gelenkverschluss gestaltet werden (s. Abb. 8-17, **f**). Dieser ist bedeutend fester als die üblichen Spliceverbindungen bei Endlosseilen und ermöglicht so schnelle Seilmontage und -demontage. Durch Nutzung von robusten Sägeketten mit Gelenken ergibt sich eine weitere Optimierungsmöglichkeit (s. Abb. 8-17, **g**) [N 13]). Die hohe Biegesteifigkeit orthogonal zur Vorschubrichtung verhindert ein „Weglaufen“ des Schneidwerkzeugs nahezu vollständig.

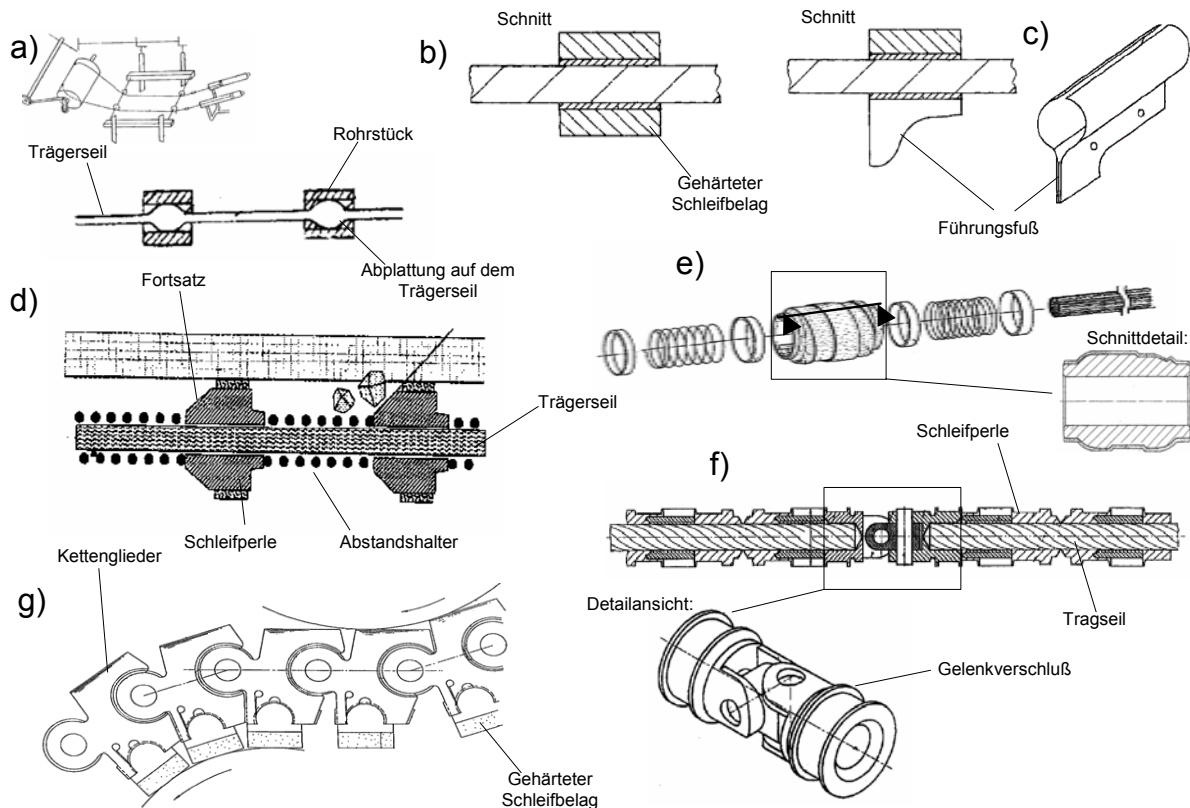


Abb. 8-17 Kommerzielle Auswahl an Sägeseilen und -ketten, **a**) Einfaches Sägeseil mit fixierten „Zahnreihen“, [N 6], **b**) Sägeseil mit fixierten Schneidperlen (Schneidbelag) [N 14], **c**) modifiziertes Sägeseil mit Schneidperlen und Führungsschiene [N 14], **d**) Sägeseil mit Schneidperlen und gesonderter Ausprägung des Fortsatzes [N 1], **e**) Sägeseil bei verschleißarmer spiralförmiger Ausführung der Schneidperlen [N 12], **f**) Sägeseil mit daran befestigten Schneidperlen und Gelenkverschluss [N 2], **g**) Sägekette mit gehärtetem Schneidbelag [N 13]

Feststellen lässt sich, dass eine Vielzahl von Optimierungsvarianten des SST auf dem Markt sind. Für grünfesten kurzfaserverstärkten Porenbeton genügen vereinfachte Varianten der vorgeschlagenen Verfahren. Die Verfahren bzw. die Schneidprozessparameter müssen auf die Schneidgeometrie- und die Schneidmaterialparameter abgestimmt werden.

Die Schnitte sind in vertikaler bzw. horizontaler Schnittrichtung in den Schnitttiefen der Rohblöcke im industriellen Produktionsprozess ausführbar. Die Sägetechnologie mit Antrieb bzw. Führung könnte in Schneidgattern heutiger Systeme integriert werden. Somit wäre das Einhalten der Taktzeiten im Durchlauf möglich. Einfaches Handling bei Einbau bzw. Umrüstung sowie die Installation von Reinigungsvorrichtungen sind wichtige Voraussetzungen.

8.3.3 Vergleich beider Schneidverfahren

Grünfester kurzfaserverstärkter Porenbeton lässt sich über das Wasserstrahlschneiden (WSS) und über das Schneiden mit der Sägetechnologie (SST) bei hohen Schnittqualitäten

vertikal und horizontal schneiden. Bei optimalen Schneidbedingungen sind die Planparallelität (P_t) der Schnittlinien und die Rauigkeit (R_t) der Schnittoberfläche mit den derzeitigen Schnittqualitäten über die Schneidtechnologie bei „stehendem Drahtdurchzug“ an unverstärkten Porenbeton vergleichbar. **Tab. 8-2** diskutiert Vor- und Nachteile beider Verfahren.

Tab. 8-2 Vergleichsanalyse bei Betrachtung der Vor- und Nachteile zwischen den beiden vorgeschlagenen Schneidverfahren Wasserstrahlschneiden (WSS) und Schneiden mit der Sägetechnologie (SST)

Wasserstrahlschneiden (WSS)		Schneiden mit der Sägetechnologie (SST)	
Vorteile	Nachteile	Vorteile	Nachteile
• Minimaler Materialanpressdruck, daraus folgt: es können kleine Geometrien geschnitten werden • Keine induzierten Spannungen durch Materialüberbeanspruchung • Flexibles Schneiden in alle Richtungen bei individueller Anordnung des Schneidkopfs bzw. des Schneidguts	• Makroporen und Kurzfasern liegen auf der Oberfläche teilweise offen • Vertikale Schnitttiefe begrenzt ($t_{s,vert} \approx 80$ cm) • Horizontale Schnitttiefe begrenzt ($t_{s,hor} \approx 60$ cm) • Verschleiß von Fokussierdüse bzw. Anlage • Hoher Energie- und Wasserverbrauch • Gesteigerter konstruktiver Aufwand - Schneidanlage	• Schnitttiefe (t_s) unbegrenzt • Planparallelität (P_t) immer gegeben • Makroporositäten i. d. R. geschlossen	• Verschleiß der Sägewerkzeuge • Gesteigerter konstruktiver Aufwand bei der Schneidanlage • Kurzfasern liegen im Oberflächenbereich teilweise offen

Die optimale Schneidtechnologie bei grünstem faserverstärktem Porenbeton könnte aus einer Kombination der vorgeschlagenen Verfahren entstehen. Es wäre möglich, vertikale Schnitte über das WSS und horizontale Schnitte über das SST durchzuführen. Hohe Vorschubgeschwindigkeiten bzw. gleichzeitiges Schneiden vertikaler und horizontaler Schnitte könnten die Schneidzeiten reduzieren und damit die Wirtschaftlichkeit des industriellen Produktionsprozesses erhöhen.

8.4 Schneiden des kurzfaserverstärkten Porenbetons nach der hydrothermalen Härtung

Das Druckflüssigkeitsschneiden sowie das Schneiden mit der Sägetechnologie können ebenfalls bei hydrothermal gehärteten kurzfaserverstärkten Porenbeton genutzt werden.

8.4.1 Druckflüssigkeitsschneiden

Maßgebend für das Schneiden des hydrothermal gehärteten kurzfaserverstärkten Porenbetons über das Druckflüssigkeitsschneiden ist die Materialfestigkeit bzw. indirekt die Porosität (unter Einbeziehung der Makroporenkennwerte). Die zunehmende tiefenabhängige Diffusität des Wasserstrahls schwächt die Strahlenergie deutlich ab (s. Kap. 8.3.1).

Untersuchungen

Untersuchungen sollen die Schneidbarkeit über die Druckflüssigkeitsschneidverfahren Wasser- (WSS) und Abrasivwasserstrahlschneiden (AWSS) zeigen. Die Schneidprozessparameter ergeben sich nach Kap. 8.3.1.1 und Kap. 8.3.1.2; Mischungszusammensetzung, Herstellung und Randbedingungen erfolgen nach Kap. 5.1. Die Schneidgeometrieparameter des Schneidguts werden an die jeweilige Fragestellung angepasst. Die Kurzfasern zeigen, aufgrund der gegenüber dem Feststoff geringen Konzentration und Materialausprägung, keinen Einfluss auf die Schnittqualitäten. Die Variation der Faserparameter kann vernachlässigt werden. Es kommen ausschließlich die alkaliresistenten Bündelkurzglasfasern (BGF) (Faserlänge $l_f = 12$ mm, Faserkonzentration $\psi_f = 1,0$ Vol.-%) zum Einsatz.

Ergebnisse und Diskussion

Abb. 8-18, a) zeigt die Grenzen des WSS bei hydrothermal gehärtetem Porenbeton auf.

Zum Einsatz kommt der Wasserdruck $p_w = 4\,137$ bar bei einem Fokussierdüsendurchmesser $d_{Fd} = 0,2$ mm. Die vier Schnittoberflächen bei $v_S = 5\,000$ -, $2\,500$ -, $1\,000$ - und 500 mm/min werden von links nach rechts dargestellt ($t_S = 70$ mm). R_t nimmt bei Reduzierung von v_S zu. Die Planparallelitäten werden nur eingeschränkt betrachtet, sie überschneiden sich mit den Oberflächenrauigkeiten. Alle vier Schnitte haben Ausschussqualität. Tiefenabhängige Untersuchungen zeigen, dass bei $t_S \geq 50$ mm die Schnitte unter den hier vorgegebenen Vorschubgeschwindigkeiten ausfächern. Bei $t_S = 130$ mm hat das WSS keine durchtrennende Wirkung mehr (s. Abb. 8-18, **b**). Ein zweiter überschneidender Schnitt zeigt das Weglaufen bzw. Ausbrechen des Materials am Strahlaustritt. Alle Untersuchungen deuten darauf hin, dass das WSS bei hydrothermal gehärtetem Porenbeton nur eingeschränkt Anwendung finden kann. Die Stahlenergien des WSS reichen bei hier untersuchtem Porenbeton ($\rho_{Pb} \approx 450$ kg/m³) nicht aus, um praxisrelevante Materialgeometrien zu schneiden.

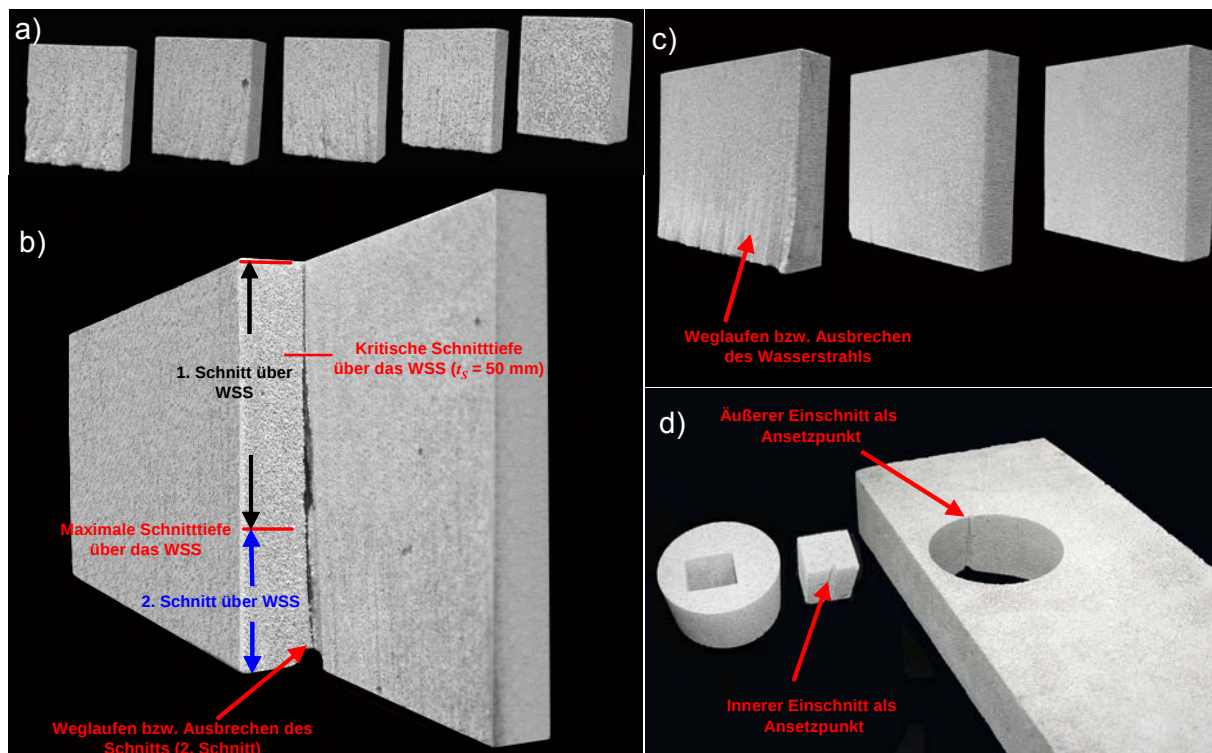


Abb. 8-18 Charakterisierung der Schnitte beim Druckflüssigkeitsschneiden von hydrothermal gehärtetem Porenbeton, **a**) Oberflächen über das Wasserstrahl- (WSS) bzw. Abrasivwasserstrahlschneiden (AWSS) bei (Vorschubgeschwindigkeit/Fokussierdüsendurchmesser-Verhältnis) v_S/d_{Fd} - Verhältnis (s. Text), **b**) Schnittoberflächen über AWSS bei v_S/d_{Fd} - Verhältnis (s. Text), **c**) Schnitflächen über das AWSS, **d**) Potenzielle Möglichkeiten der Geometrievariation über das AWSS

Gleiche Untersuchungen werden über das AWSS bei Verwendung der abrasivschneidspezifischen Schneidprozessparameter durchgeführt (s. Kap. 8.3.1). Abb. 8-18, a) rechts zeigt eine Schnittoberfläche, geschnitten über das AWSS ($v_S = 2\,500$ mm/min). Vergleichend mit der Abb. 8-18, a), zweite von links, ergeben sich deutlich bessere Schneidergebnisse. Ergänzend werden Schneiduntersuchungen bei $t_S = 200$ mm aufgezeigt. Die Schnittqualität nimmt in der Reihenfolge $v_S = 2\,000$ -, $1\,000$ - und 500 mm/min zu (s. Abb. 8-18, **c**)). Auch hier ist festzustellen, dass sich P_t bei Abnahme von v_S verschlechtert. Die kritische Schnitttiefe ($t_{S,krit}$) bei Einhaltung von R_t und $P_t \leq 1$ mm ist ca. 150 mm. Die Erhöhung der Strahlenergie über das Abrasivmittel führt dazu, dass bei optimalem v_S ein $t_{S,max} = 300$ mm erreicht werden kann.

Ergänzend zeigt Abb. 8-18, **d**) potenzielle Möglichkeiten für das AWSS bei Schnittgeometrievariation. Eine Anwendung im Bereich der komplexen bewehrten Porenbeton-Planelemente beim Ausschnitt von Aussparungen könnte möglich sein. Verlege- und Vergusskanäle in Plansteinen für ein bewehrtes faserverstärktes Planstein-Mauerwerk könnten eingearbeitet

werden. Innere Schnittansätze sind möglich. Nachteilig ist der ansteigende Wassergehalt des Materials bei den Druckflüssigkeitsschneidverfahren am Endprodukt Porenbeton. I. d. R. werden durch optimierte Abkühlparameter nach der hydrothermalen Behandlung des Porenbetons die Wassergehalte reduziert. Das Druckflüssigkeitsschneiden bringt wieder neues Wasser in das System. Eine nachträgliche Materialtrocknung für das Palettieren und Verpacken der Plansteine ist möglicherweise erforderlich.

Abb. 8-19 zeigt die Anwendung der kritischen Schneidprozess- und Schneidgeometrieparameter beim Schneiden des hydrothermal gehärteten Porenbetons. Beim Einsatz des AWSS zeigt sich bei höherem t_S bzw. v_S eine starke Ausfuchung der Schnittlinie, hier dargestellt an einem kommerziellen PPW 4/0,4 (s. Abb. 8-19, **a**). Durch eine flexible Schneidtechnologie mit einem Anstellwinkel des Schneidkopfs könnte der Keilschnitt einseitig reduziert werden; der Winkel des Gegenschnittufers wird erhöht sich. Die Gegenseite wäre aufgrund geringer Planparallelität nur bedingt nutzbar. Daraus folgt, dass ausschließlich Randschnitte optimal ausführbar sind. Abb. 8-19, **b**) stellt ein Beispiel für die Durchstoßgrenze unter kritischen Schneidbedingungen dar ($t_S = 7$ cm, $v_S = 10\,000$ mm/min). Der Strahl facht auf und drückt sich vor- und rückseitig aus der Schnittlinie heraus. An den Schnittoberflächen kommt es zu kegelförmigen Wellen. Durch die geringere Energie im Randbereich des Strahls wird die BGF, aufgrund ihrer höheren mechanischen Eigenschaften gegenüber dem Porenbeton, erst im mittleren Bereich des Strahls durchtrennt. Die Energie nimmt zur Mitte des Strahls hin zu. Die Faserenden, bzw. bei Faserdurchtrennen die Faserschnittenden, „ragen“ aus den Wellen heraus und splitten in ihre Einzelfilamente auf. Teile der BGF liegen offen auf der Schnittoberfläche (s. Abb. 8-19, **c**). Faserbruchstücke können freigesetzt werden.

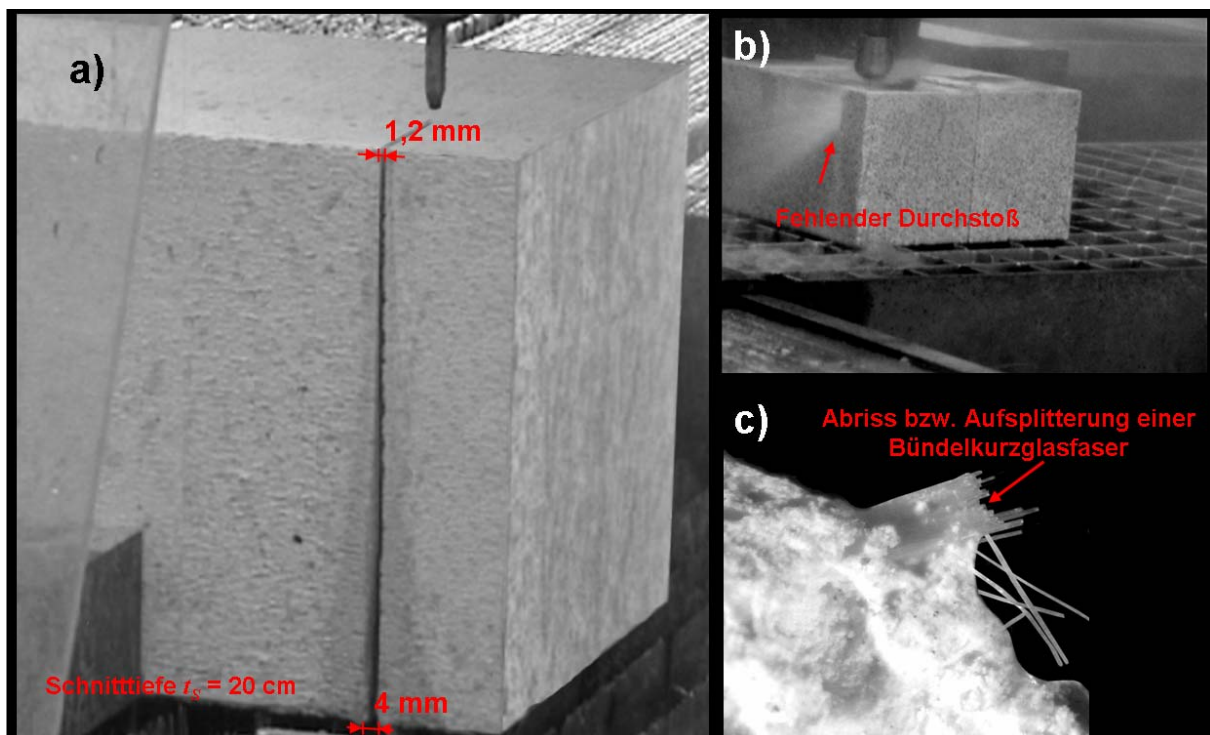


Abb. 8-19 Kritische Schneidergebnisse beim Druckflüssigkeitsschneiden von hydrothermal gehärtetem Porenbeton, **a**) Ausfuchung der Schnittlinie durch Abrasivwirkung (PPW 4/0,4), **b**) Tiefenabhängiges Versagen der Strahlwirkung bei kritischer Vorschubgeschwindigkeit ($v_{S,krit}$), **c**) Abriss bzw. Aufsplitterung einer alkaliresistenten Bündelkurzglasfaser an der Schnittwand bei Schnittoberflächen mit kegelförmiger Wellenausprägung

8.4.2 Schneiden mit der Sägetechnologie

Die in Kap. 8.3.2 vorgestellte Variante des Schneidens mit der Sägetechnologie ist üblicherweise für härtere Materialien im Einsatz. Diese Technologie ist ohne Einschränkung für hy-

drothermal gehärteten Porenbeton anwendbar. Bei einer möglichen Anwendung im industriellen Produktionsprozess der Porenbeton-Herstellung müssen lediglich verfahrenstechnologische Besonderheiten beachtet werden. Auf eigene Untersuchungen wird daher verzichtet.

8.4.3 Zusammenfassung

Das AWSS an hydrothermal gehärtetem Porenbeton zeigt bei Wahl der optimalen Schneidprozessparameter sowie angepasster Schneidgeometrie- und Schneidprozessparameter bis zu einer Schnitttiefe $t_s = 15$ cm gute Schnittqualitäten. Aufgrund der hohen Flexibilität des Verfahrens sind potenziell eine Vielzahl von Schneidgeometrien möglich. Zu berücksichtigen ist der Preis für Anlage und Betrieb (u. a. Abrasivmittel (200-300 Euro/t)) sowie der hohe Verschleiß der Sägewerkzeuge.

Das SST zeigt ebenfalls gute Schnittqualitäten an hydrothermal gehärtetem Porenbeton; die Schnitttiefen könnten hier noch wesentlich gesteigert werden. Das SST ist bereits ausgereift und für eine Vielzahl von Schneidmaterialien ähnlicher Art im Einsatz.

8.5 Schlussfolgerungen

Die vorgeschlagenen Verfahren zur Kontrolle der Faserausrichtung in der faserversetzten Anfangssuspension (s. Kap. 8.1) und die vorgeschlagenen Verfahren zum Schneiden des kurzfaserverstärkten Porenbetons (s. Kap. 8.3 und Kap. 8.4) erweisen sich als geeignet für die Einführung in den industriellen Produktionsprozess der Porenbeton-Herstellung.

Bei Einbau von Kurzfasern und bei Nutzung der Schneidverfahren über das AWSS und das SST ist der Verschleiß der Schneide- bzw. Sägewerkzeuge und der ökonomische Mehraufwand bei Installation und Betrieb deutlich höher. Dieses Schneiden ist für einen Massenaustoff wie Porenbeton mit hohen Rohblock-Durchlaufzahlen somit ein erheblicher Kostenfaktor. Unter Berücksichtigung einer möglichen deutlichen Erhöhung der Leistungsfähigkeiten des Porenbetons bei Einsatz von Kurzfasern und der eventuellen Entstehung neuer Anwendungsfelder für den Porenbeton könnten o. g. Einschränkungen gerechtfertigt sein. Das Schneiden des kurzfaserverstärkten Porenbetons in der Grünphase ist weiterhin als Vorzugsvariante zu sehen.

Bei einer nahezu kontrollierten 100%igen Ausrichtung der Kurzfasern parallel zur Treibrichtung könnte die herkömmliche Schneidtechnologie über den „stehenden Drahtdurchzug“ weiterhin für die Schnitte parallel zur Treibrichtung genutzt werden. Die vorgeschlagenen Schneidverfahren nach Kap. 8.3 und Kap. 8.4 wären somit ausschließlich für das Schneiden der Treibkörper orthogonal zur Treibrichtung notwendig.

9. Zusammenfassung und Ausblick

Ergebnisse und Diskussion

Faserverstärkter Porenbeton ist ein Baustoff mit großen Potenzialen.

Fasern erweisen sich bei richtiger Wahl der Faserparameter als geeignet, beanspruchungsspezifisch das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Porenbetons im Rohdichtebereich zwischen 450 und 550 kg/m³ zu verbessern. Weitere Wirksamkeiten können sich aus der Stabilisierung der Anfangssuspension, des Treibmediums bzw. des Treibkuchens sowie der Reduzierung der Eigenspannungen während der hydrothermalen Härtung ergeben. Im Treibprozess entsteht ein Baustoff mit veränderter Feststoffstruktur. Langfristig ist die praxisrelevante Anwendung des faserverstärkten Porenbetons möglich und erstrebenswert.

Ein Anforderungsprofil an Fasern für faserverstärkten Porenbeton, bei Einteilung in die Kategorien Gleichförmigkeit, Wirksamkeit, Unschädlichkeit, Umweltverträglichkeit, Preis-Leistungs-Verhältnis und technische Realisierbarkeit im industriellen Produktionsprozess, wurde erstellt. Unter Betrachtung der gesamten Faserbandbreite wurde dieses Anforderungsprofil form- und materialbezogen diskutiert. Theoretische Betrachtungen zum Fasersinkverhalten in der Anfangssuspension zeigen, dass kritische Faserparameter in Form und Material lediglich bei Metallfasern auftreten. Untersuchungen zur Faserbeständigkeit unter den hydrothermalen Härtungsbedingungen ergeben bei einer Reihe von Fasern deutliche Masseverluste, lediglich ein Großteil der anorganischen Chemiefasern erweist sich als massebeständig.

Untersucht wurden industriegleiche Mischungszusammensetzungen und Treibkörpergeometrien bei stichpunktartigem Einbau von Fasern. Dabei wurden ausschließlich Kurzfasern unter Variation der Faserlänge eingesetzt; die maximale Länge betrug 12 mm. Die Herstellung des faserverstärkten Porenbetons erfolgte industrienah orientiert an der heutigen Herstellung des Porenbetons. Es wurde nahezu die gesamte Bandbreite der Fasermaterialien herangezogen. Pflanzenfasern, Fasern aus natürlichen und synthetischen Polymeren sowie anorganische Chemiefasern kamen zum Einsatz. Für die Kurzfaserstrukturanalyse wurde ein dreidimensionales (3D) Bildanalysesoftwaretool unter Nutzung der Erfassung der Gefügestruktur durch computertomographische Verfahren entwickelt.

Die Kurzfasern befinden sich vorzugsweise im Feststoff und richten sich, bei Ausschluss von Faser-Faser-Wechselwirkungen, faserspezifisch tendenziell parallel zur Treibrichtung aus. Die Feststoffstruktur orientiert sich ebenfalls tendenziell parallel zur Treibrichtung. Das Orientierungsverhalten ist stark von der Anfangsverteilung und -orientierung der Kurzfasern abhängig. Die Faserverteilung über die Treibhöhe ist homogen. Material, Form und Konzentration der Kurzfasern haben Einfluss auf die Ausprägung der Feststoffstruktur.

Untersuchungen unter Druck-, kombinierter Druck-Schub- und Biegebeanspruchung zeigen, beanspruchungsspezifisch, bei einer Auswahl von eingebauten Kurzfasern wesentliche Steigerungen im Festigkeits- und Verformungsverhalten. Besonders gute Ergebnisse wurden bei den alkaliresistenten (AR) Glas-, Kohlenstoff- und Aramidkurzfasern erzielt. Festigkeiten, Bruchdehnungen und Verformungsenergien werden gesteigert. Es zeigen sich starke Abhängigkeiten zur Treibrichtung und zur Treibhöhe des Materials; die Ausrichtung der Kurzfasern hat je nach Beanspruchungsart direkten Einfluss auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten. Einschränkend ergibt sich, dass das spröde Entfestigungsverhalten unter einachsiger Druckbeanspruchung nicht maßgebend reduziert werden kann. Hingegen kann beispielsweise das Biegeverhalten bei Beanspruchung in Faserausrichtung deutlich gesteigert werden. Die Faserbeschaffenheit und der Faserverbund weisen faserspezifisch deutliche Unterschiede auf, wie elektronen-mikroskopische Untersuchungen zeigen. Untersuchungen zur zielgerichteten Nutzung der vorhergesagten Gefügestrukturanisotropien für bauphysikalisch relevante Transportphänomene zeigen keine eindeutigen Tendenzen. Es wurden stellvertretend Untersuchungen zum akustischen Verhalten durchgeführt.

Die AR-Bündelkurzglasfasern (BGF), unter Biegebeanspruchungen, und die wasserdispersiblen monofilen AR-Kurzglasfasern (MGF), unter Druck- bzw. kombinierter Druck-Schubbeanspruchung, kristallisieren sich als Vorzugsfasern zur Verbesserung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens des kurzfaserverstärkten Porenbetons heraus.

Für den Einbau von BGF und MGF wurden die Verarbeitungsgrenzen ermittelt. Durch Variation der Einfüllbedingungen, des Fasermaterials, der Faserform und der Faserkonzentration konnte die festgestellte Anfälligkeit der Anfangssuspension für Inhomogenitäten in Faserverteilung und -orientierung untersucht werden. Geeignete Kurzfasern stabilisieren die Anfangssuspension. Röntgen-radiographische „in situ“ Untersuchungen beim Einbau von Musterfasern aus Metall zeigen, dass Treibprozessparameter sowie Material und Form der Kurzfaser wesentlichen Einfluss auf die Faserbewegung und -umorientierung haben. Die Ausrichtung der Kurzfasern parallel zur Treibrichtung ergibt sich überwiegend aus der Materialdehnung im Nahbereich der Kurzfasern. Diese Ausrichtung ist gezielt in der Herstellung steuerbar. Porosierungsgrad und Treibkinetik werden, wie Treibversuche zeigen, ebenfalls maßgeblich von Faserparametern beeinflusst. Die Ausbildung von Fasernetzwerken wirkt sich stabilisierend auf den Treibprozess aus, der Zeitpunkt des Treibprozessbeginns und der maximalen Treibprozessgeschwindigkeit ist deutlich früher erreicht. Kurzfasern können den Zeitpunkt der Grünstandsfestigkeit nach vorne verlegen, Grünstabilitäten werden gesteigert.

Beim Einbau der BGF und der MGF wurden systematisch Faserlänge und -konzentration variiert und die Zusammenhänge zwischen der Gefügestruktur und Druck-, Biege- bzw. kombinierter Druck-Schubbeanspruchung aufgezeigt. Die 3D-Gefügestrukturanalyse zeigt bei Steigerung o. g. Faserparameter kleinere Porengrößen. Um die BGF ergeben sich im Nahbereich andere Porenanordnungen. Die Faserorientierung und die Anisotropien in der Feststoffstruktur wurden quantifiziert. Die fasernumliegenden Stege parallel zur Treibrichtung sind bei Faserausrichtung stärker ausgeprägt. „In situ“ Untersuchungen der Versagensmechanismen unter Druckbeanspruchung zeigen, dass, aufgrund der hohen Makroporosität vorzugsweise die Stegwandsysteme instabil versagen. Kurzfasern wirken nur eingeschränkt; die spröde Erstentfestigung kann nicht verhindert werden. Der Verbund ist gegeben, die Faserbeständigkeiten zeigen keine Auffälligkeiten.

Für die praxisrelevante Einführung des kurzfaserverstärkten Porenbetons müssen u. a. die Kontrolle der Faseranfangsorientierung und das „Schneiden“ im industriellen Produktionsprozess neu überdacht werden. Die Kontrolle der Faseranfangsorientierung kann u. a. durch kontrollierte Fließbewegungen beim Einfüllen erreicht werden. Für das produktionstechnische Schneiden in der „Grünphase“ wurden ebenfalls Lösungsansätze betrachtet. Kurzfasern führen i. d. R. zum Versagen der herkömmlichen Schneidtechnologie über den „stehenden Drahtdurchzug“. Es wurde aufgezeigt, dass alternativ Druckflüssigkeitsschneidverfahren, wie Wasserstrahlschneiden (WSS) und Abrasivwasserstrahlschneiden (AWSS) sowie die rotierende Sägetechnologie (SST) eingesetzt werden können. Unter den Bedingungen des industriellen Produktionsprozesses ergeben sich bei Auswahl optimaler Schneidprozessparameter qualitativ hochwertige Schnitte. Diese Verfahren wären technologisch hervorragend in den Produktionsprozess integrierbar. Es konnte ebenfalls gezeigt werden, dass das AWSS an hydrothermal gehärtetem Porenbeton als Schneidmöglichkeit in Frage kommt und somit besonders für großformatige Bauteile mit Fenster- und Türaussparungen nutzbar ist.

Ausblick

Kurzfaserverstärkter Porenbeton kann neue Anwendungsfelder eröffnen. Die vorliegende Arbeit zeigt, dass bei Einbau von AR-Kurzglasfasern eine Reihe von Wirksamkeiten, u. a. die Steigerung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens, eintreten können. Die Umlagerung von Spannungsspitzen durch Energieverzehr der Kurzfasern kann die Sicherheiten in den Bemessungsvorschriften des Porenbetons deutlich erhöhen. Materialeinsparungen bzw. Po-

rositätssteigerungen bei vergleichbarem Festigkeits- und Verformungsverhalten sind möglich. Ebenso können die Kosten und der hohe Aufwand beim Einbau von konstruktiven Bewehrungsstählen, die zum Transport von Planelementen notwendig sind, verringert werden. Plansteine und -elemente sind deutlich robuster für Transport und Handling.

Auf der anderen Seite muss gesagt werden, dass, aufgrund der porenbetonspezifischen Herstellung und der Beschaffenheit der Gefügestruktur, den Optimierungspotenzialen Grenzen gesetzt sind. Eine Anrechnung auf die Tragfähigkeit ist nicht möglich. Ein Einsatz bei einem in der Einleitung vorgeschlagenen faserverstärkten Porenbeton-Mauerwerk im Bereich des erdbebensicheren Bauens ist daher zu diesem Zeitpunkt nur eingeschränkt sinnvoll.

Die Entwicklung des kurzfaserverstärkten Porenbetons befindet sich in der Anfangsphase. Eine systematische Einordnung seiner stofflichen und physikalischen Kenndaten ist derzeit nur unvollständig möglich. Dafür wäre, neben der Einbeziehung von Fasermaterial, -form und -konzentration, die zuverlässige Berücksichtigung der Faserorientierung zwingend notwendig. Weiterhin muss die faserspezifische Beeinflussung der Feststoffstruktur im Treibprozess detaillierter untersucht werden. Die Ergebnisse bei Einbaus der BGF und der MGF im Porenbeton, die im Rahmen dieser Arbeit diskutiert wurden, sind eine gute Grundlage für weitere Untersuchungen. Darauf aufbauend müssten folgende Punkte betrachtet werden:

- Einfluss eines formbezogenen Fasercocktails aus beispielsweise BGF und MGF,
- Steuerung und Reproduzierbarkeiten der Faserendorientierung im Treibprozess,
- Steuerung des treibrichtungsabhängigen Festigkeits- und Verformungsverhaltens,
- Steuerung der treibrichtungsabhängigen bauphysikalischen Eigenschaften,
- Untersuchungen zur Alterungsbeständigkeit und Dauerhaftigkeit der Kurzfasern.

Die Vielzahl möglicher Einflussgrößen macht die Durchführung von Untersuchungen im industriellen Großmaßstab bei gegebenen Einfüll- und Treibprozessbedingungen erforderlich. Die vorgestellten Technologien, die es ermöglichen, Kurzfasern unter kontrollierter Anfangsorientierung treiben zu lassen, müssen gezielt untersucht werden. Schneiduntersuchungen sollten auf die Geometrien der industriellen Rohblöcke erweitert werden. Die Integration der Schneidtechnologien in ein Gattersystem herkömmlicher Art bzw. die Nutzung der Technologien aus der hydrothermalen Härtung für das Druckflüssigkeitsschneiden muss verfahrenstechnisch überdacht werden. Das Verhalten großformatiger Bauteile bzw. Planstein-Mauerwerks-Wände aus kurzfaserverstärktem Porenbeton muss untersucht werden.

Ein weiterer Ansatz zur Steigerung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens liegt in der Betrachtung des Porenbetons mit geringeren Porosierungsgraden bzw. bei kleineren mittleren Porengrößen. Daraus ergibt sich eine stärkere Fasereinbindung in den Feststoff. Die Vermutung geht dahin, dass sich das Festigkeits- und Verformungsverhalten weiter steigern ließe. Der spröden Erstentfestigung unter Druckbeanspruchung könnte weiter entgegengewirkt werden. Eine weitere Anwendung des kurzfaserverstärkten Porenbetons ergibt sich in Verbindung mit einer zusätzlichen Bewehrung. Kleinformatige Plansteine, die einen großen Variationsgrad bei der Ausrichtung und Kombination im Mauerwerksverband garantieren, könnten zielgerichtet unter Ausnutzung der Anisotropie eingebaut werden und über eine in horizontal und vertikal ausgerichtete Stabstahlbewehrung verstärkt werden. Verlege- bzw. Vergusskanäle wären über das WSS und SST hervorragend herstellbar.

Bis zur ökonomischen Nutzbarmachung bzw. Bemessung des kurzfaserverstärkten Porenbetons ist es noch ein weiter Weg. In dieser Arbeit wurde ein erster Beitrag zum Verständnis des faserverstärkten Porenbetons geleistet. Weitere intensive Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet könnten dazu beitragen, Porenbeton durch den Einbau von Kurzfasern zu einem Baustoff mit deutlich gesteigerten Leistungsfähigkeiten weiterzuentwickeln und dessen optimierte Verhaltensweisen für das erdbebensichere Bauen verstärkt nutzbar zu machen.

Literaturverzeichnis

- [1] Advani, S.: Flow and rheology in polymer composites manufacturing, Composite Material Series 10, 1994
- [2] Albrecht, F.: Metallfasern als schallabsorbierende Strukturen und als leitfähige Komponenten in Verbundwerkstoffen, Dissertation, Technische Universität Dresden, 2004
- [3] Al-Oraimi, S.K., Seibi, A.C.: Mechanical characterisation and impact behaviour of concrete reinforced with natural fibre, In: Composite Structures 32 (1995), S. 165-171
- [4] Alonso, M.V., Auad, M.L., Nutt, S.: Short-fiber-reinforced epoxy foams, In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 37 (2006), S. 1952-1960
- [5] Aaser&Hufnagl: Mitarbeiterzeitschrift, Intern, Unternehmen: Asamer&Hufnagl Holding AG Unterthallamstrasse 2, A-4694, Ohlsdorf, 12/2006
- [6] Autoclaved Aerated Concrete - Properties, Testing and Design, Rilem Recommended Practice, RILEM Technical Committee 78-MCA, 1983
- [7] Backfrieder, W.: Computertomographie, Dissertation, Universität Wien, 1999
- [8] Barg, A.: Anorganisch-organische Hybridschäume, Dissertation, Universität Paderborn, 2004
- [9] Bäuml, M.,F.: Steigerung der Dauerhaftigkeit selbstverdichtender Betone durch den Einsatz von Polymerfaserkurzschnitt, Dissertation, Eidgenössische Technische Universität Zürich, 2002
- [10] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Umweltberatung Bayern: Künstliche Mineralfasern, 2004
- [11] Cox, H.L.: The elasticity and strength of paper and other fibrous materials, In: British Journal of Applied Physics 3 (1952), S. 72-79
- [12] Deckers, S.: Einfluss der Eigenschaften hydraulischer Bindemittel auf die Eigenschaften hydrothermal gehärteter Leichtbetone, Dissertation, Universität Siegen, 2000
- [13] Deutsche Gesellschaft für Mauerwerksbau e.V., DGfM, Absatzstatistik, 2004
- [14] Deutsche Gesellschaft für Mauerwerksbau e.V., DGfM, Pressedienst Mauerwerksbau, 2007
- [15] Deutscher Beton-Verein e.V.: DBV-Sachstandsbericht: Glasfaserbeton für Fertigteile, 1996
- [16] Dual, J., Goodbread, J., Sayir, M.: Prozessrheometer – PHYSICA RHEOSWING, Institutsbericht, Institut für Mechanik, Eidgenössische Technische Universität Zürich
- [17] Eischen, J.-C.: Bildanalytische und rheologische Untersuchungen zum Orientierungs- und Strukturierungsverhalten von faserförmigen Partikeln in laminaren Scherströmungen, Dissertation, Eidgenössische Technische Universität Zürich, 1999
- [18] Faust, T.: Leichtbeton im konstruktiven Ingenieurbau, Ernst & Sohn, 2003
- [19] Franciosi, P., Lebaill, H.: Anisotropy features of phase and particle spatial pair distributions in various matrix/inclusions structures, In: Acta Materialia 52 (2004), S. 3161-3172
- [20] Friedrich, R., Radons, G., Ditzinger, T., Henning, A.: Ripple Formation through an Interface Instability from Moving Growth and Erosion Sources, In: Physical Review Letters 85 (2000) S. 4884-4887
- [21] Garbev, K.: Struktur, Eigenschaften und quantitative Rietveldanalyse von hydrothermal kristallisierten Calciumsilikathydraten (CSH-Phasen), Dissertation, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2003
- [22] Gefahrstoffverordnung - GefStoffV, Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen, 2004
- [23] Grote, F., Stemmler, M., Kaesberg, S.: Übertragung realer zellulärer Strukturen auf 3D-FEM-Modell - Methoden und Potential, In: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 31, 2000,

S. 455-458

- [24] „Grundsätze für die Erteilung von Zulassungen für Faserprodukte als Betonzusatzstoff (Zulassungsgrundsätze) - 2004“, Schriften des Deutschen Instituts für Bautechnik, Reihe B, Heft 18
- [25] Gundlach, H.: Dampfgehärtete Baustoffe, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1973
- [26] Hawksley, P., G., W.: The Physics of Particle Size Measurement: Part I. Fluid Dynamics and the Stokes Diameter, The British Coal Utilisation Research Association, Vol. XV, 1951
- [27] Hanselka, H.: Faserverbundwerkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen für den ökologischen Leichtbau, In: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 29, 1998, S. 300-311
- [28] Hardmeier, S.: AR-Glasfasern als Mikrobewehrung zur Rissbreitenbeschränkung und Festigkeitssteigerung von Estrich und Beton, In: Tagungsband "Proceedings of the Asia-Pacific Speciality Conference on Fibre, Singapore 28-29. Aug. 1997
- [29] He, T.: Festigkeits- und Verformungsverhalten von Porenbeton, Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 1988
- [30] Hillerborg, A., Modeer, M., Peterson, P.E.: Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, In: Cement and concrete research 6, 1976, S. 773-781
- [31] Hochstein, B.: Rheologie von Kugel- und Fasersuspensionen mit viskoelastischen Matrixeigenschaften, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1997
- [32] Höck, P.: Verstärkung von Polypropylen auf Gleichdralldoppelschneckenextrudern, Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Universität Aachen, 1994
- [33] Illerhaus, B.: Computertomographie, Bildverarbeitung und Auswertung von zellularen Metallen, In: ZfP - Zeitung 77, 12/2001
- [34] Ing Vance AG: Die neue Schneidelinie für Porenbeton-Blöcke, In: http://www.ingvance.de/presse_info_archiv.html [Stand: Dez. 2007]
- [35] Ing Vance AG: Die neue Trennmaschine für Porenbeton-Blöcke, In: http://www.ingvance.de/pres-se_info_archiv.html [Stand: Dez. 2007]
- [36] Jesse, F.: Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix, Dissertation, Technische Universität Dresden, 2004
- [37] Kadashevich, I., Schneider, H.J., Stoyan, D.: Statistical modeling of the geometrical structure of the system of artificial air pores in autoclaved aerated concrete, In: Cement and Concrete Research 35 (2005), S. 1495-1502
- [38] Kakemi, M., Hannant, D.J., Mulheron, M.: Techniques for determining some microstructural parameters in glass reinforced cement. In: Magazine of Concrete Research 18 (1996), S. 61-66
- [39] Karus, M.: Naturfasermärkte weltweit, Seminar: Bekleidungstextilien aus Hanf und anderen Naturfasern, Bremen 2000
- [40] Kunnos, G.J., Lindenberg, B.J., Zemcov, D.G.: Über die Beziehung zwischen der Festigkeit und der Makrostruktur der Porenbetone, In: Issledovanija po beton i zzelezobetonu VIII, 1965, S. 253-305
- [41] Krüger, M.: Vorgespannter textilbewehrter Beton, Dissertation, Universität Stuttgart, 2004
- [42] Lehnert, F., Lotze, G., Stephani, G.: Herstellung, Eigenschaften und Anwendung metallischer Kurzfasern, In: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 22 (1991), S. 355-358
- [43] Lin, G., Zhang, X.J., Liu, L., Zhang, J.C., Chen, Q.M., Zhang, L.Q.: Study on microstructure and mechanical properties relationship of short fibers/rubber foam composites, In: European Polymer Journal 40 (2004), S. 1733-1742

- [44] Linse, D., Stegbauer, A.: Festigkeit und Verformungsverhalten von Leichtbeton, Gasbeton, Zementstein und Gips unter zweiachsiger Kurzzeitbeanspruchung, Ernst & Sohn, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 254, 1976
- [45] Luping, T.: A study of the quantitative relationship between strength and pore size distribution of porous materials, In: Cement and concrete research (16), 1986, S. 87-96
- [46] Lutter, J.: Über den Einfluss der Sandqualität auf die Eigenschaften des hergestellten Porenbetons, Dissertation, Technische Universität Clausthal, 1993
- [47] Mankowski, B., Mörtel, H.: Einsatz von Fasern bei der Herstellung von Kalksandsteinen, Forschungsbericht, Bundesverband der Kalksandsteinindustrie e.V., 1996
- [48] Minay, E.J., Veronesi, P., Cannillo, V., Leonelli, C., Boccaccini, A.R.: Control of pore size by metallic fibres in glass matrix composite foams produced by microwave heating, In: Journal of the European Ceramic Society 24 (2004), S. 3203-3208
- [49] Möller, U.: Thermo-hygrische Formänderungen und Eigenspannungen von natürlichen und künstlichen Mauersteinen, Dissertation, Universität Stuttgart, 1993
- [50] Molter, M.: Zum Tragverhalten von textillbewehrtem Beton, Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Universität Aachen, 2005
- [51] Mtschedlow-Petrosian, O., Tischtschenko, O.A., Uscherow-Maschak, A.W.: Über die Berücksichtigung von Druck und Temperatur auf Gasphase der porosierte Mischung bei der Wahl der Parameter zur Bearbeitung von Gassilikatbeton, Int. Baustoff- und Silikattagung, 1973
- [52] Müller, K.: Beitrag zu Herstellung und Charakterisierung thermisch gespritzter kurzfaserverstärkter Kompositschichten, Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2002
- [53] Ojamaa, E., Eskusson, K., Sazner, N.: Untersuchung der Struktur und der physikalisch-mechanischen Eigenschaften des Zellenbetones in Abhängigkeit von der Höhe des zu formenden Körpers, Int. Baustoff- und Silikattagung Weimar, 1973
- [54] Oliveira, L.F., Lopes, R.T.: 3D histomorphometric quantification from 3D computed tomography, In: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 525 (2004), S.406-411
- [55] Ohser, J., Mückling, F.: Statistical Analysis of Microstructures in Materials Science, John Wiley & Son Ltd., 2000
- [56] Park, S. B., Yoon, E. S., Lee, B. I.: Effects of processing and materials variations on mechanical properties of lightweight cement composites, In: Cement and Concrete Research 29 (1999), S. 193-200
- [57] Peters, R.: Schaumstrukturanalyse mit digitalen Bildverarbeitungsmethoden, Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Universität Aachen, 2003
- [58] Petrov, I., Schlegel, E.: Application of automatic image analysis for the investigation of autoclaved aerated concrete structure, In: Cement and Concrete Research 24 (1994), S. 830-840
- [59] Phyl, T.: Tragverhalten von Stahlfaserbeton, Dissertation, Eidgenössische Technische Universität Zürich, 2003
- [60] Porenbeton Bericht 13: Schallschutz, Bundesverband Porenbeton, 2002
- [61] Priller, S.: Frühstadium der Korrosion von technischen Glasfasern, Dissertation, Technische Universität Clausthal, 1998
- [62] Ramaswamy, H.S., Ahuja, B.M., Krishnamoorthy, S.: Behaviour of concrete reinforced with jute, coir and bamboo fibres. In: International Journal Cement Composite Lightweight Concrete 5 (1983), S. 3-13
- [63] Ramiah, M.V.: Thermogravimetric and differential thermal analysis of cellulose, hemicellulose and lignin, In: Journal of Applied Polymer Science 14 (1970), S. 1323-1337

- [64] Reussmann, T.: Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von Langfasergranulat mit Naturfaserverstärkung, Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2002
- [65] Robb, K., Wirjadi, O., Schladitz, K.: Lokale 3D Orientierungsanalyse für Faserdaten, Jahrestagung, Deutsche Gemeinschaft für zerstörungsfreie Prüfungen, 2007
- [66] Röbert, S.: Silikatbeton, Verlag für Bauwesen, Berlin, 1989
- [67] Scharfenberg, R.: Charakterisierung poröser Medien mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung: Methoden der Bildgewinnung und -auswertung, Dissertation, Universität Hannover, 1998
- [68] Schick, C.: A mathematical analysis of foam films, Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2004
- [69] Schlegel, E.: Grundlagen technischer hydrothormaler Prozesse, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Freiburger Forschungsheft (A 834), 1982
- [70] Schmidt, S.: Beschichtung von Kohlenstofffasern durch Chemische Gasphasenabscheidung (CVD), Dissertation, Technische Universität Erlangen-Nürnberg, 2004
- [71] Schnegelsberg, G.: Handbuch der Faser - Theorie und Systematik der Faser, Deutsche Fachverlag, 1999
- [72] Schneider, H.-J., Schlegel, E.: „Feuchtemessung in Autoklaven“, 11. Feuchtetag 2002, Feuchtemessung - Ein vielfältiges Problem mit großen Perspektiven, Weimar 18.-19. Sept. 2002. Materialforschungs- und Prüfanstalt an der Bauhausuniversität Weimar, Vorträge, Poster, Geräteausstellung, Herausgeber: K. Kupfer & E. Trinks, S. 205-218
- [73] Schneider, H.-J.: Stoff- und Wärmeübergang im Autoklaven bei dampfgehärteten Baustoffen, Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2007
- [74] Schneider, M.: Bericht-Nr.132 009 03P-5, Hochschule für Technik, Fachbereich Bauphysik, Fachhochschule Stuttgart, 2004
- [75] Schneider, T., Greil, P., Schober, G.: Strength modeling of brittle materials with two- and three-dimensional pore structure, In: Computational Materials Science 16 (1999), S. 98-103
- [76] Schubert, P.: On the shrinkage behaviour of aerated concrete, In: Autoclaved aerated concrete, moisture and properties, Elsevier Scientific Publishing Company, 1983, S. 207-218
- [77] Schubert, P.: Biegezugfestigkeiten von Dünnbettmauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen, In: Das Mauerwerk, 4/2001
- [78] Sell, R., Zelger, C.: Festigkeit und Verformung von Gasbeton unter zweiaxialer Zug-Druckbeanspruchung und Versuche über den Verbund bei bewehrtem Gasbeton, Ernst & Sohn, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 209, 1970
- [79] Sell, R., Zelger, C.: Versuche zur Dauerstandfestigkeit von Leichtbetonen, Ernst&Sohn, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 207, 1969
- [80] Shen, H., Nutt, S., Hull, D.: Direct observation and measurement of fiber architecture in short-polymer composite foam through micro-CT imaging, In: Composites Science and Technology 64 (2004), S. 2113-2120
- [81] Shen, H., Nutt, S.: Mechanical characterization of short fiber reinforced phenolic foam, In: Composites: Part A 34 (2003), S. 899-906
- [82] Siebel, E.: Verformungsverhalten, Energieaufnahme und Tragfähigkeit von Normal- und Leichtbeton im Kurzzeitdruckversuch, In: Schriftreihe der Zementindustrie, Heft 50/1989
- [83] Simon, E.: Schubtragverhalten von Mauerwerk aus großformatigen Steinen, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2002
- [84] Soykeabkaew, N., Supaphol, P., Rujiravanit, R.: Preparation and characterization of jute- and flax-reinforced starch-based composite foams, In: Carbohydrate Polymers 58 (2004), S. 53-63

- [85] Stamm, M.: Einfluss von Stahlfasern auf die Schädigungsevolution von Beton in Abhängigkeit von der Dehnrage, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 2001
- [86] Stoyan, D., Kendall, W.S., Mecke, J.: Stochastic geometry and it's applications, John Wiley & Sons, 1987
- [87] Technische Regeln für Gefahrstoffe 921: TRGS 921, Faserstäube - Anorganische Faserstäube, 2002
- [88] Thiede, H.: Die Druck- und Biegezugfestigkeit von glasfaserverstärkten Schaumbeton, Dissertation, Technische Universität Berlin, 1978
- [89] Trunk, B., Schober, G., Helbling, A.K., Wittmann, F.H.: Fracture mechanics parameters of auto-claved aerated concrete. In: Cement and Concrete Research 29 (1999), S. 855-859
- [90] Vratsanou, V., Langer, P.: Untersuchung des Schubtragverhaltens von Wänden aus Porenbeton-Plansteinmauerwerk, In: Das Mauerwerk, 6/2001
- [91] Walk-Laufer, B.: Untersuchungen des Einflusses von Sulfaten auf das System $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-H}_2\text{O}$ mittels Wärmeflusskalorimetrie und in-situ Neutronenbeugung unter hydrothermalen Bedingungen, Dissertation, Universität Siegen, 2002
- [92] Wehr, G.: Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit von querkraftbewehrten Elementen aus Porenbeton, Dissertation, Bauhaus Universität Weimar, 2001
- [93] Weidemann, G., Stadie, R., Goebbels, J., Hillemeier, B.: Untersuchung von faserverstärkten Porenbeton mit Computertomographie, Jahrestagung, Deutsche Gemeinschaft für zerstörungsfreie Prüfungen, 2007
- [94] Weidemann, G., Stadie, R., Goebbels, J., Hillemeier, B.: Fibred reinforced autoclaved aerated concrete studied by computed tomography, International Symposium on digital Industrial Radiology and Computed Tomography, 2007
- [95] West, J.M., Speakman, K., Majundar, A.J.: Glass fibre reinforced autoclaved calcium silicate insulation material, In: Fibre reinforced Materials, The Construction Press, Vol. 2, S. 141-154
- [96] Winkler, A., Wieker, W.: Untersuchungen der Phasenbildung im System $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ unter Autoklavbedingungen, Silikatechnik 31 (1980), S. 331-334
- [97] Wittmann, F.H., Zaitsev, J.: Verformung und Bruchvorgang poröser Baustoffe bei kurzzeitiger Belastung und Dauerlast, Ernst & Sohn, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 232, 1974
- [98] Zhijian, L., Xungai W., Lijing W.: Properties of hemp fibre reinforced concrete composites, In: Composites: Part A 37 (2006), S. 497-505
- [99] Zolldann, K.: Modellierung der rezepturabhängigen Eigenschaften von Porenbeton, Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 1998
- [100] Zürn, S.: Einfluss der Sandminerale auf die Bildung von Calciumsilikathydrate (CSH-Phasen), das Gefüge und die mechanischen Eigenschaften von Porenbetonprodukten, Dissertation, Technische Universität München, 1997

Software

- [S1] ImageJ 1.37v, Wayne Rasband, National Institute of Health, USA
- [S2] MAVI V1.2.1, Modulare Algorithmen für Volumenbilder, Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik, Kaiserslautern
- [S3] VGStudio MAX 1.2.1, Volume Graphics GmbH, Heidelberg

Patente und Normen

- [N 1] AT 003 424, Gebrauchsmuster: Diamant-Sägeseil für die Gebäudesanierung, Inhaber: TYROLIT Schleifmittelwerke SWAROVSKI K.G., A-6130 Schwaz, Österreich
- [N 2] AT 400 018, Patentschrift: Seilsäge, Inhaber: TYROLIT Schleifmittelwerke SWAROVSKI K.G., A-6130 Schwaz, Österreich
- [N 3] CH 29 77 70, Patentschrift: Vorrichtung zum Schneiden von Bauelementen aus einem Porenbeton-Rohblock, Inhaber: Josef Hebel, Schweiz
- [N 4] DE 27 24 826, Patentschrift: Verfahren und Vorrichtung zum Schneiden von Gasbetonmassen-Ytong, Inhaber: Ytong Holding GmbH, 80797 München, Deutschland
- [N 5] DE 43 38 295, Patentschrift: Verfahren zum Zerschneiden eines Formkörpers, Inhaber: Mariotti, N., 63755 Alzenau, Deutschland
- [N 6] DE 84 63 74, Patentschrift: Verfahren und Vorrichtung zur Aufteilung plastischer Massen, insbesondere von Leichtbeton für Kunststeine, Inhaber: International Ytong-Stabalite Co. Ltd., London, Großbritannien
- [N 7] DE 195 15 758, Patentschrift: Vorrichtung zum Schneiden eines steifen, noch nicht gehärteten Porenbetonblocks, Inhaber: Ytong Holding GmbH, 80797 München, Deutschland
- [N 8] DE 195 38 676, Offenlegungsschrift: Verfahren und Vorrichtung zum Zerschneiden von Porenbetonkörpern, Inhaber: Ederer, S., 94496 Ortenburg, Deutschland
- [N 9] DE 196 36 671, Patentschrift: Verfahren zum Herstellen von Bauelementen wie insbesondere e Steine, Platten oder dergleichen und eine dazu geeignete Sägemaschine, Inhaber: Dorstener Maschinenfabrik AG, 46284 Dorsten, Deutschland
- [N 10] DE 199 33 297, Patentschrift: Faserarmerter Porenbeton sowie Verfahren zu seiner Herstellung, Inhaber: Ytong Holding GmbH, 80797 München, Deutschland
- [N 11] DE 199 33 298, Patenschrift: Faserverstärkter Schaumbeton sowie Verfahren zu seiner Herstellung, Inhaber: Ytong Holding GmbH, 80797 München, Deutschland
- [N 12] DE 298 17 266, Gebrauchsmuster: Diamantseilsäge, Inhaber: Hongia Industry Co., Taipeh, Taiwan
- [N 13] DE 690 24 165, Patentschrift: Schneidkette, Inhaber Mitsubishi Materials Corp., Tokio, Japan
- [N 14] EP 0 822 023, Patentschrift: Seilsäge für harte Stoffe, Inhaber: Etablissement Euroligna Maschinen Aggregate Industriebedarf, FL-9490, Liechtenstein
- [N 15] EP 1 069 089, Patentschrift: Faserarmerter Porenbeton sowie Verfahren zu seiner Herstellung, Inhaber: Ytong Holding GmbH, 80797 München, Deutschland
- [N 16] WO 92/11217, Patentschrift: Fibre-reinforced materials, Inhaber: Thermalite House, Station Road, Coleshill, Birmingham B46 IHP, Großbritannien
- [N 17] DIN EN 678, Bestimmung der Trockenrohdichte von dampfgehärtetem Porenbeton, 1994
- [N 18] DIN EN 679, Bestimmung der Druckfestigkeit von dampfgehärtetem Porenbeton, 2005
- [N 19] DIN EN 680, Bestimmung des Schwindens von dampfgehärtetem Porenbeton, 2003
- [N 20] DIN EN 771-4, Festlegung für Mauersteine, Teil 4: Porenbetonsteine, 2005
- [N 21] DIN 1045-1, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion, 2001
- [N 22] DIN EN 1351, Bestimmung der Biegezugfestigkeit von dampfgehärtetem Porenbeton, 1997
- [N 23] DIN ISO 2076, Textilien, Chemiefasern; Gattungsnamen und Kurzzeichen, 2001
- [N 24] DIN V 4165-100, Porenbetonsteine, Plansteine und Planelemente mit besonderen Eigenschaften, 2006
- [N 25] DIN 8200, Strahlverfahrenstechnik: Begriffe, Einordnung der Strahlverfahren, 1982
- [N 26] DIN 51913, Bestimmung der Dichte mit dem Gaspyknometer (volumetrisch) unter Verwendung von Helium als Messgas - Feststoffe, 2001
- [N 27] DIN 60001-1, Textile Faserstoffe, Teil 1: Naturfasern und Kurzzeichen, 2001

Anhang

Tab.-A.: 1 Referenz (unverstärkter Porenbeton)

Nummer	Porosierungsmittelanteil	
(0-1)	0,05 M.-%	(STAPO Alupor RO 200, ECKART Werke, Fürth)
(0-2)	0,06 M.-%	
(0-3)	0,07 M.-%	
(0-4)	0,08 M.-%	
(0-5)	0,09 M.-%	

Tab.-A.: 2 Kurzfaservariationen zur Untersuchung der Wirksamkeit im Porenbeton nach Kap. 5.2-5.4 mit Angaben zu Faserlänge (l_f), -durchmesser (d_f) und -konzentration (ψ_f) und -feststoffdichte (ρ_f)

Fasermaterial		Lieferant/Hersteller Typenbezeichnung	Faser- länge in mm	Faser-/ Fila- ment-Ø in µm bzw. (dtex)	Faserkon- zentration in Vol.-%	Faserfest- stoffdichte in g/cm³
Pflanzenfasern						
(1-1)	Bambusfaser	PMG Geotex GmbH, Armierungsfaser	0,1-20	100-2000	0,75	1,4502
(1-2)	Hanfaser	Hanffaserfabrik Uckermark, Armierungsfaser	0,1-20	100-1000	0,50	1,5635
(1-3)	Sisalfaser	Schwarzwälder Textil-Werke, F506/1000	≈ 4,5	20-400	0,50	1,5360
(1-4)	Jutefaser	Schwarzwälder Textil-Werke, F501/1000	≈ 5	30-500	0,50	1,5572
Fasern aus natürlichen Polymeren						
(1-5)	Zellulosefaser	TENCEL, Lenzing fibers Ltd., Tencel	4	(1,7)	0,50	1,5526
(1-6)	Baumwollfaden	Schwarzwälder Textil-Werke, SB 67/10	10	≈ 1000	0,50	1,6346
Fasern aus synthetischen Polymeren						
(1-7)	Aramidpulpe	Du Pont, Kevlar® 953	2,5	10-20	0,50	1,5572
(1-8)	Aramidfaser	TEIJIN, Technora CF	6	12	0,50	1,5572
(1-9)	Phenolharzfaser	Kynol Europe GmbH, KF 0206	6	15	0,50	1,3264
(1-10)	Kunstseidefaser	Cordenka GmbH, Rayon RT 700	4	10	0,50	1,5191
(1-11)	Polyamidfaser	Schwarzwälder Textil-Werke, PA hm 6,7/ 6	6	27	0,50	1,1554
(1-12)	Zellwolle/ Viskosefaser	Schwarzwälder Textil-Werke, Zw gl 3,3/4	4	17	0,50	1,5025
Anorganische Chemiefasern						
(1-13)	Basaltfaser	BAXALT Technologie GmbH	4	13	0,50	2,7606
(1-14)			12			
(1-15)	Edelstahlfaser	Stax, M 30, Mat. 1.4113	3	90	0,75	7,7123
(1-16)		Fraunhofer Institut, Mat. 1.4767, (Schmelzextraxion)	5	300	0,20	7,1977
(1-17)	Kohlenstofffaser	Toho Tohex, Tenax®-U 143	3	7	0,25	1,7534
(1-18)		Toho Tohex, Tenax®-U 150	6			
(1-19)	Keramikfaser	Unifrax GmbH, Fiberfrax B 822	0,125-0,650	2,1	0,50	2,5099
(1-20)	Mineralwollefaser	Unifrax GmbH, Roxul 1000 706 K2	0,125-0,650	5,5	0,25	2,7953
(1-21)	Glasfaser, (Aluminium-modifiziert)	BelCoTex, 110 SRF	4	9 ± 1	0,50	2,1357
(1-22)			6			
(1-23)	AR-Glasfaser (Zirkon-modifiziert)	Saint Gobain, Cem-FIL ANTI-CRAK HD	6	14	0,50	2,7450
(1-24)		Saint Gobain, Cem-FIL ARC20 70/30	3	20	0,25	2,7300
(1-25)			6			
(1-26)			12			
(1-27)		Saint Gobain, Cem-FIL ARC20 62/2	6	102 x 14 ($d_{f,eq} \approx 0,4-0,05$)	1,00	2,6821
(1-28)			12			

- Die Pflanzenfasern werden aus biologisch angebauten Pflanzen gewonnen und chemisch und mechanisch weiterbearbeitet.

Tab.-A.: 3 Kurzfaservariationen zur Untersuchung der Gefügeanisotropien im Porenbeton nach Kap. 5.5 mit Angaben zu Faserlänge (l_f), -durchmesser (d_f) und -konzentration (ψ_f) und -feststoffdichte (ρ_f)

Fasermaterial		Lieferant/Hersteller Typenbezeichnung	Faserlänge in mm	Faser-/ Fila- ment-Ø in µm	Faserkon- zentration in Vol.-%	Faserfest- stoffdichte in g/cm³
(2-1)	Polyesterfaser	Schwarzwälder Textil-Werke, PES gl 3,3/ 6	6	18	0,5	1,4188
(2-2)	Zellwolle/ Viskosefaser	Schwarzwälder Textil-Werke, Zw gl 3,3/4	6	17	1,00	1,5025
(2-3)	Polypropylenfaser	Schwarzwälder Textil-Werke, PP 2,8/ 6	6	18	0,75	0,9251
(2-4)	Polyacrylnitrilfaser	Schwarzwälder Textil-Werke, PAC 251/ 2,1 /4T	6	15	0,25	1,2047
(2-5)	Polyamidfaser	Schwarzwälder Textil-Werke, PA hm 6,7/ 6	6	27	1,00	1,1554
(2-6)	E-Glasfaser	John Manville, DuraCore, 1/2", M189, (Filamentfaser)	12	13	0,25	2,7000
(2-7)	AR-Glasfaser	Saint Gobain, Cem-FIL ARC20 70/30 (Filamentfaser)	3	20	0,5	2,7300
(2-8)			6		0,50	
(2-9)	Kohlenstofffaser	Toho Tohex, Tenax®-U 150	6	7	0,25	1,7534