

CO₂-optimierte und ressourceneffiziente Weiße Wannen, Tunnelschalen und konstruktive Bauteile für den Tiefbau

1. Zielerreichung und Projektstatus	1
2. Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum	2
2.1. Projektleitung	2
2.2. Wissenschaftliche Leitung	3
2.3. Materialaufbereitung und Infrastrukturbeton	3
2.4. Rissneigungs- und CO₂-optimierter Recyclingbeton	17
2.5. Bewehrungsmix und 3D-Basaltbewehrung.....	31
2.6. Numerische und experimentelle Untersuchungen.....	35
3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten.....	55
4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit	55

1. Zielerreichung und Projektstatus

Die im Projektantrag definierten Ziele, insbesondere die Entwicklung eines CO₂-reduzierten Recyclingbetons mit hoher Dauerhaftigkeit sowie die Optimierung des Bewehrungsmixes, konnten im ersten Forschungsjahr planmäßig bearbeitet werden. Die Ziele bleiben weiterhin aktuell und realistisch, da sie eine wesentliche Grundlage für die nachhaltige Transformation des Tiefbaus darstellen.

Im Bereich der Materialaufbereitung wurde erfolgreich eine großtechnische Aufbereitung von rund 140 t Betonabbruchmaterial durchgeführt. Die Kombination aus Backenbrecher, Prallmühle und Nassklassierung ermöglichte die Herstellung einer rezyklierten Gesteinskörnung mit hoher Kornrohichte, optimaler Kornform und reduzierter Wasseraufnahme. Damit wurde eine zentrale Zielvorgabe erreicht: die Qualität der rezyklierten Zuschläge so zu verbessern, dass sie für anspruchsvolle Infrastrukturbetone geeignet sind.

Die Charakterisierung der Gesteinskörnung bestätigte ihre Eignung für Betonbauteile mit hohen Dauerhaftigkeitsanforderungen. Alle relevanten Parameter (LA-Wert, Shape Index, Wasseraufnahme, Druckfestigkeit) lagen im geforderten Bereich. Das Ziel, rezyklierte Zuschläge aus Infrastrukturabbruchmaterial qualitätsgesichert nutzbar zu machen, wurde somit erreicht.

Im Bereich der Betonentwicklung wurden Betone mit Ersatzraten bis 100 % untersucht. Für die Zielersatzquote von 50 % konnten zufriedenstellende Frischbetoneigenschaften und eine hohe Druckfestigkeit erzielt werden. Mit steigendem Ersatzanteil erhöhte sich der Fließmittelbedarf, jedoch wurden durch Rezepturanpassungen alle geforderten Konsistenzklassen erreicht. Die Betone erreichten Wassereindringtiefen unterhalb der geforderten Grenzwerte (7 bar), weitere Versuche bei 10 bar erfolgen im zweiten Projektjahr. Damit wurde das Ziel der Entwicklung von Betonen mit hohem Recyclinganteil und geringer Wasserdurchlässigkeit weitgehend erreicht.

Für die CO₂-reduzierte Bindemitteloptimierung wurden performancebasierte Konzepte mit emissionsarmen C3A-freien Zementen und Kalksteinmehlen entwickelt. Es zeigte sich, dass moderate Substitutionen von Kalksteinmehl (12,5 %) eine verbesserte Verarbeitbarkeit bei minimalem Festigkeitsverlust ermöglichen. Die umfassenden Mörtelversuche bildeten die Grundlage für die geplante Betonoptimierung im zweiten Jahr. Somit wurde das Ziel, CO₂-reduzierte Bindemittelkombinationen zu identifizieren, erfüllt.

Hinsichtlich des innovativen Bewehrungsmixes wurden Untersuchungen zur Kombination von Stahlfasern und Basaltfasern sowie zur Entwicklung einer dreidimensionalen Basaltbewehrung gestartet. Erste Analysen zur Machbarkeit, Verbundeigenschaften und Herstellbarkeit der Basaltstrickbewehrung zeigen hohes Potential, wenngleich experimentelle Charakterisierungen und Bemessungsansätze im zweiten Projektjahr vertieft werden müssen. Das Projektziel, eine innovative Bewehrung zur Reduktion des Stahlanteils zu entwickeln, bleibt aktuell und realistisch.

Im Bereich der Zwangbeanspruchung und Rissneigung wurden Referenzmischungen geprüft und ein Zwangrahmenversuch erfolgreich durchgeführt. Die gewonnenen Temperatur- und Spannungsverläufe validierten das Materialmodell, wodurch eine wichtige Grundlage für die Bemessung CO₂-optimierter Betone unter Zwang geschaffen wurde.

Highlights des ersten Jahres sind:

- erfolgreiche großtechnische Aufbereitung rezyklierter Zuschläge mit optimierter Kornqualität
- Herstellung von Recyclingbetonen mit bis zu 100 % Ersatzanteil und hoher Dauerhaftigkeit
- Entwicklung CO₂-reduzierter Bindemittelkonzepte unter Beibehaltung der Ziel-Festigkeiten
- erster Zwangrahmenversuch zur Validierung der Materialmodelle

Aufgetretene Probleme betrafen vor allem die Verarbeitbarkeit bei hohen Ersatzraten sowie die Blutneigung bei einzelnen CO₂-reduzierten Mischungen. Hierfür sind weitere Optimierungen der Fließmittel und Bindemittelkombinationen im kommenden Projektjahr vorgesehen.

Insgesamt befindet sich das Projekt auf Kurs, die gesetzten Ziele zu erreichen. Alle Arbeitspakete konnten planmäßig bearbeitet werden, und die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass die angestrebte Entwicklung eines nachhaltigen, CO₂-optimierten Recyclingbetonsystems für massive Infrastrukturbauteile realistisch und technisch umsetzbar ist.

Danksagung

Wir danken den wissenschaftlichen Partnern – **Universität für Bodenkultur, Technische Universität Graz, Montanuniversität Leoben und Smart Minerals GmbH** – für ihre engagierte Forschungsarbeit und fachliche Begleitung.

Ebenso gilt unser Dank allen Wirtschaftspartnern für ihre aktive Mitwirkung und Unterstützung: **ÖBB-Infrastruktur AG, ASFINAG Bau Management GmbH, Wiener Linien GmbH & Co KG, Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie VÖZ, STRABAG AG, PORR Bau GmbH, Implemia Österreich GmbH, SWIETELSKY Tunnelbau GmbH & Co KG, Leyrer + Graf Baugesellschaft m.b.H., HABAU GROUP, Fiber Elements GmbH, Wopfinger Transportbeton GmbH, NV Bekaert SA, Kirchdorfer Fertigteilverteilung GmbH, Master Builders Solutions GmbH, Hengl Mineral GmbH.**

Ein besonderer Dank gilt darüber hinaus den **Wiener Linien GmbH & Co KG, der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie VÖZ, der Wopfinger Transportbeton GmbH, der Kirchdorfer Fertigteilverteilung GmbH und der Fiber Elements GmbH**, die durch über die ursprünglichen Zusagen hinausgehende InKind-Leistungen einen wesentlichen Beitrag zur Sicherstellung des Projektfortschritts geleistet haben.

2. Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum

2.1. Projektleitung

Fertigstellungsgrad: 100%

Neben der Vertretung gegenüber der FFG umfasste die Projektleitung im Berichtszeitraum auch die **terminliche und kaufmännische Projektkoordination**, die Organisation von Projektmeetings, die Koordination der Kommunikation zwischen den Projektpartner:innen sowie das Vertrags- und Kostenmanagement. Zusätzlich wurden administrative Aufgaben der Projektorganisation übernommen, wie die Abstimmung von Arbeitsplänen, die Erstellung von Zwischenberichten und die termingerechte Einholung von Partnerbeiträgen.

Im Zuge der praktischen Umsetzung des Arbeitsplans kam es jedoch zu einer unerwarteten Verzögerung im Bereich der Materialaufbereitung. Aufgrund eines ungeplanten Ausfalls zentraler Brech- und Klassieranlagen bei der Firma Hengl konnte die zeitgerechte Bereitstellung definierter rezyklierter Zuschlagsfraktionen nicht erfolgen. Da die Prüfarbeiten auf exakt spezifizierte Rezepturen und konstante Materialkennwerte

angewiesen sind, wurde in Abstimmung mit allen Projektpartnern entschieden, die betreffenden Prüfleistungen in das zweite Forschungsjahr zu verschieben.

Zur Sicherstellung des Projektfortschritts konnte die Firma Wopfinger kurzfristig einspringen und einen Teil der Aufbereitungsarbeiten übernehmen. Dadurch konnte die Materialverfügbarkeit für die weiteren Forschungsschritte sukzessive gewährleistet werden. Parallel dazu wurden einzelne wissenschaftliche Arbeitspakete, insbesondere an der Universität für Bodenkultur (BOKU), vorgezogen, um die zeitliche Verschiebung methodisch und inhaltlich zu kompensieren.

Abgesehen von dieser terminlichen Umstrukturierung gab es keine weiteren wesentlichen Abweichungen oder Veränderungen im Projektablauf. Die Finanzierung bleibt unberührt, da die verschobenen Leistungen im geplanten Leistungsumfang im zweiten Forschungsjahr nachgeholt und im Rahmen des bestehenden Budgets abgerechnet werden.

Der Projektfortschritt liegt mit **33 % im Plan**, bezogen auf die Gesamtprojektlaufzeit.

2.2. Wissenschaftliche Leitung

Fertigstellungsgrad: 100%

Die wissenschaftliche Leitung des Projekts erfolgte im Berichtszeitraum in enger Abstimmung zwischen Konrad Bergmeister (IKI), Robert Galler (MUL), Dirk Schlicke (TU Graz), Joachim Juhart (TU Graz), Stefan Krispel (Smart Minerals) sowie den weiteren beteiligten Forschungspartnern. Alle wissenschaftlichen Arbeitspakete wurden methodisch strukturiert bearbeitet und planmäßig vorangetrieben.

Zur Sicherstellung einer kontinuierlichen fachlichen Steuerung fanden regelmäßig strukturierte Besprechungen statt, in denen Fortschritte und Zwischenergebnisse diskutiert wurden. Zusätzlich wurden die Ergebnisse semestral in größeren Runden präsentiert und evaluiert. Regelmäßige Online-Treffen ermöglichten eine enge Abstimmung der Arbeitsmethoden und sicherten die wissenschaftliche Qualität.

Die Verzögerung bei der Materialaufbereitung, wie schon in der Projektleitung beschrieben, hatte auch Auswirkungen auf einzelne nachfolgende Arbeitspakete. Durch die kurzfristige Übernahme eines Teils der Aufbereitungsarbeiten durch die Firma Wopfinger sowie das Vorziehen einzelner wissenschaftlicher Arbeitspakete – insbesondere an der BOKU – konnte der Projektfortschritt dennoch sichergestellt werden.

Abgesehen von dieser Umstrukturierung verliefen die wissenschaftlichen Arbeiten ohne wesentliche Abweichungen.

Der Projektfortschritt liegt mit **33 % im Plan**, bezogen auf die Gesamtprojektlaufzeit.

2.3. Materialaufbereitung und Infrastrukturbeton

Fertigstellungsgrad: 100%

2.3.1. Optimierung des Aufbereitungsvorganges

Im Projekt wurde rund 140 t Betonabbruchmaterial aus dem Infrastrukturbau großtechnisch aufbereitet, um hochwertige rezyklierte Gesteinskörnung für den Einsatz in nachhaltigem Infrastrukturbeton bereitzustellen.

Durchgeführte Arbeiten:

- Das Abbruchmaterial wurde mit einem Backenbrecher grob vorzerkleinert, um große Brocken auf eine verarbeitbare Größe zu reduzieren.
- Anschließend erfolgte eine weitere Zerkleinerung in einer Prallmühle. Dadurch wurden die Kornform verbessert und Mörtelanhaftungen abgelöst, was die Kornfestigkeit erhöhte.
- In der nachfolgenden Nassaufbereitung wurden Feinstoffe entfernt, um den Feinteilgehalt zu reduzieren und die Kornform weiter zu optimieren.
- Die Gesteinskörnung wurde anschließend in drei Fraktionen getrennt (0/4 mm, 4/16 mm, 16/32 mm), gewaschen und die Fraktionen GK 8 und GK 16 für die Betonherstellung zusammengeführt.

- Nach der Aufbereitung wurde das Material in Bigbags abgefüllt und für weitere Laboruntersuchungen sowie Prototypenbetonagen eingelagert.

Erkenntnisse:

Die Kombination aus Prallmühle und Nassaufbereitung erwies sich als optimale Aufbereitungsmethode. Sie ermöglichte eine deutliche Verbesserung der Kornrohdichte, eine günstigere Kornform sowie eine Reduktion der Wasseraufnahme, wodurch die Verarbeitbarkeit und Dauerhaftigkeit der späteren Betone gesteigert werden.

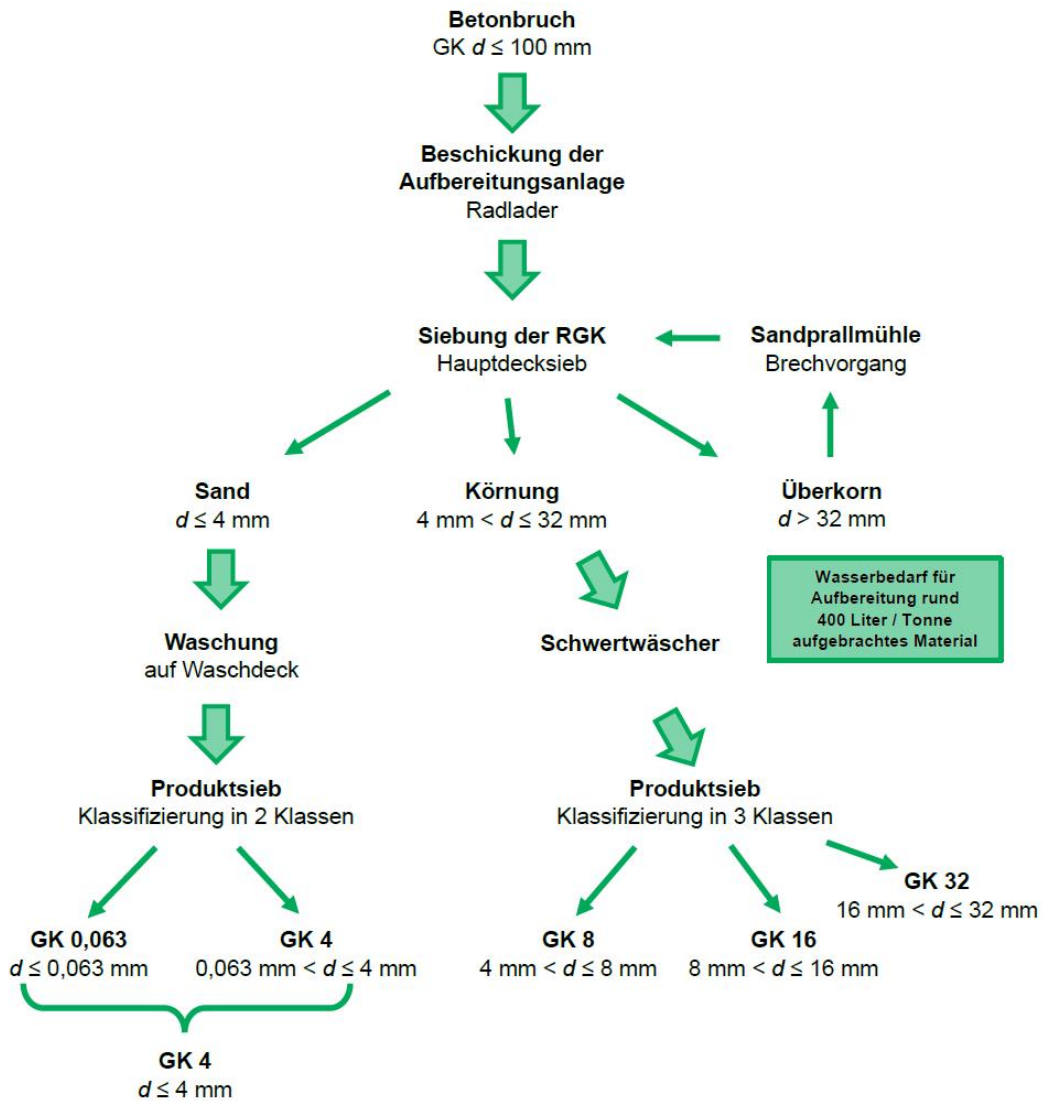


Abbildung 2.3.1: Schematische Darstellung des Aufbereitungsvorganges

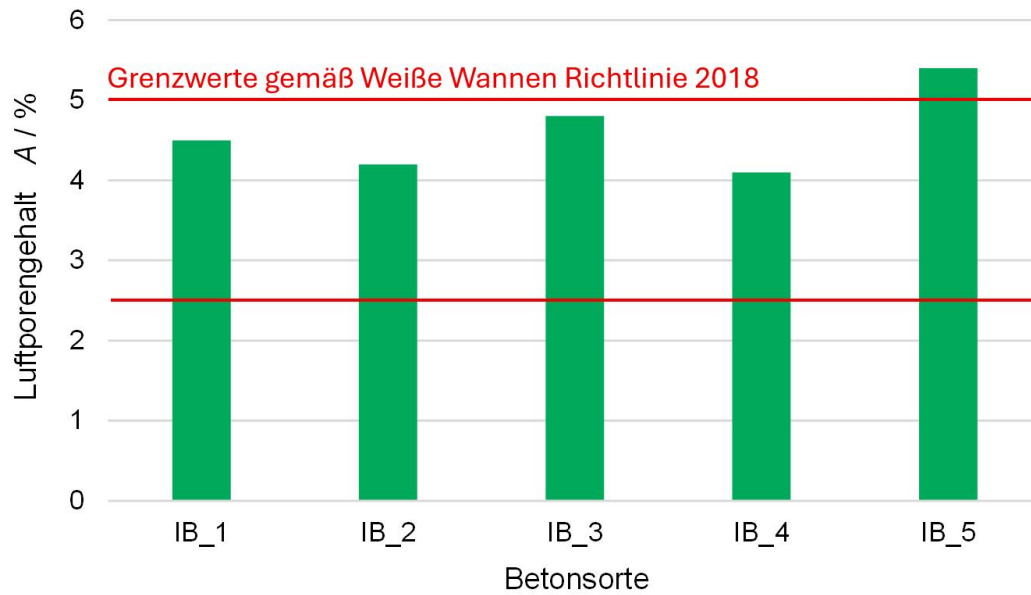


Abbildung 2.3.2: Luftporengehalt der einzelnen Betonsorten: IB_1 = Referenzbeton; IB_2 = Austauschrate 50% > 4 mm; IB_3 = Austauschrate 100% > 4 mm; IB_4 = Austauschrate 100% > 4 mm und 50% < 4 mm; IB_5 = Austauschrate 100% gesamte Körnung



Abbildung 2.3.3: Ausgangsmaterial am Lagerplatz in Großwilfersdorf



Abbildung 2.3.4: Abbruchvorgang des Widerlagers



Abbildung 2.3.5: Absieben des Überkorns $d > 32 \text{ mm}$



Abbildung 2.3.6: aufbereitete Gesteinskörnung GK 16

2.3.3. Charakterisierung Recycling-Gesteinskörnung

Durchgeführte Arbeiten:

- Sieblinienbestimmung: Die Korngrößenverteilungen der aufbereiteten Gesteinskörnungen (0/4 mm, 4/16 mm, 16/32 mm) wurden ermittelt und lagen alle innerhalb der Grenzsieblinien gemäß ÖNORM B 4710-1.
- Wasseraufnahmefähigkeit: Für alle Fraktionen wurden signifikant höhere Wasseraufnahmen im Vergleich zu natürlicher Gesteinskörnung festgestellt, mit Werten zwischen 3,2 % und 8,2 %.
- Kornrohichte: Eine durchschnittliche Dichte von 2330 kg/m³ wurde gemessen.
- Shape Index: Die Kornform wurde mit Werten zwischen 23 und 32 in die Klasse SI40 eingestuft, was eine ausreichende Kompaktheit der Körnung für Betonbauzwecke sicherstellt.
- Betondruckfestigkeit (Punktlastversuch): Eine Druckfestigkeit von 36,5 N/mm² bestätigte die hohe Qualität des Ausgangsbetons.
- LA-Wert: Ein Wert von 28 wurde ermittelt, was der Klasse LA30 entspricht und eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen Zerkleinerung garantiert.

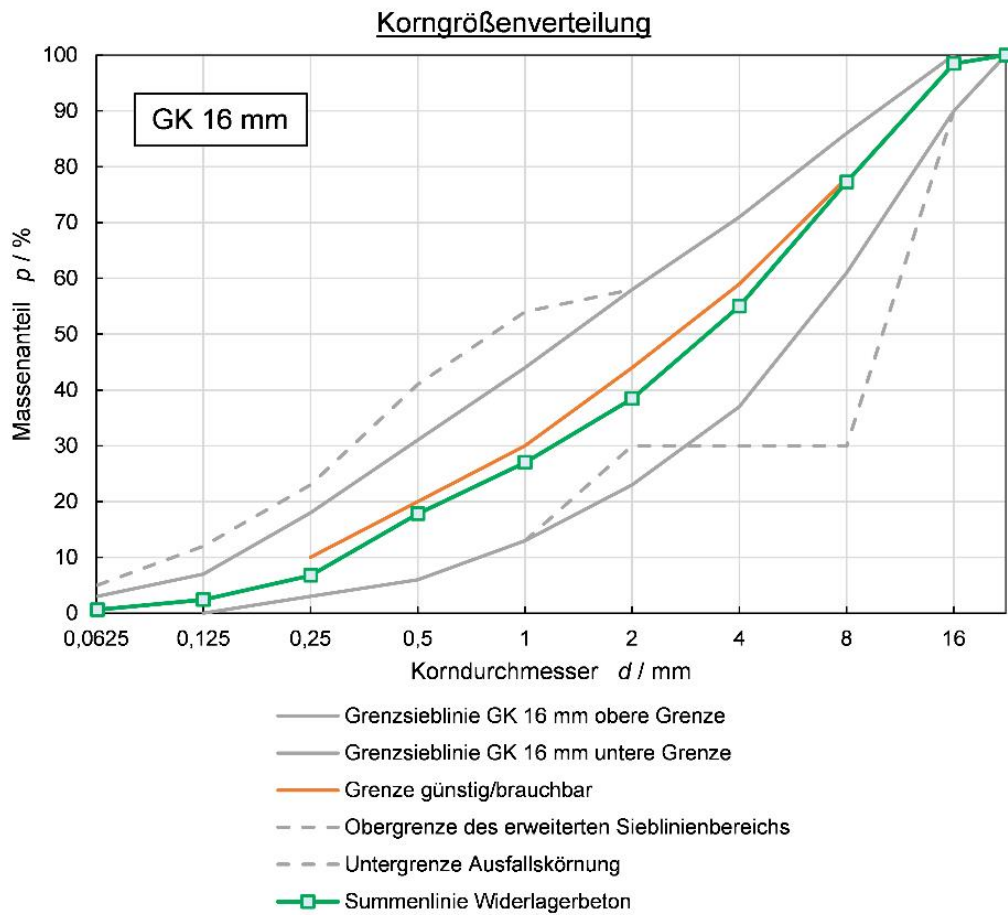


Abbildung 2.3.7: Zusammengestellte Summenlinie bis zum Größtkorn 16 mm

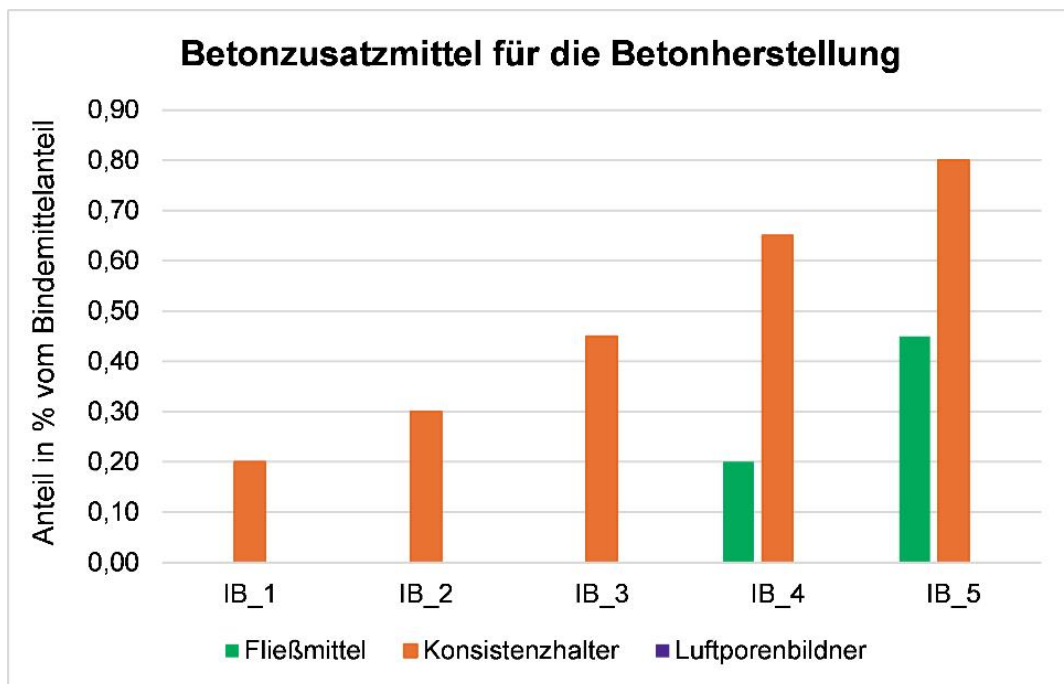


Abbildung 2.3.8: Anspruch an Betonzusatzmitteln für die herzustellenden Betonsorten. IB_1 = Referenzbeton; IB_2 = Austauschrate 50% > 4 mm; IB_3 = Austauschrate 100% > 4 mm; IB_4 = Austauschrate 100% > 4 mm und 50% < 4 mm; IB_5 = Austauschrate 100% gesamte Körnung

Tab. 1: Wasseraufnahmefähigkeit je Kornklasse

Kornklasse	$WA_{10min} / \%$	$WA_{24h} / \%$
$d \leq 4 \text{ mm}$	7,2	8,2
$4 \text{ mm} < d \leq 16 \text{ mm}$	4,2	5,0
$16 \text{ mm} < d \leq 32 \text{ mm}$	3,2	5,3

Tab. 2: Shape Index je Kornklasse

Kornklasse	SI	SI -Klasse
$d \leq 4 \text{ mm}$	32	SI_{40}
$8 \text{ mm} < d \leq 16 \text{ mm}$	29	SI_{40}
$16 \text{ mm} < d \leq 32 \text{ mm}$	23	SI_{40}

Erkenntnisse:

Die optimierte Nassaufbereitung lieferte eine hochwertige rezyklierte Gesteinskörnung mit allen erforderlichen geometrischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften für dauerhaften Beton.

2.3.4. Maximierung des Anteiles rezyklierter Gesteinskörnungen und Verbesserung der Nachhaltigkeit durch emissionsarme Bindemittel

Durchgeführte Arbeiten:

- Herstellung von fünf Betonsorten mit unterschiedlichen Ersatzraten an rezyklierter Gesteinskörnung (0–100 %), um den Einfluss auf Frisch- und Festbetoneigenschaften zu bewerten.
- Untersuchung des Fließmittelbedarfs: Mit steigendem Ersatzanteil wurde ein höherer Bedarf an Fließmittel und Konsistenzhaltemittel festgestellt.
- Messung des Ausbreitmaßes über 120 Minuten: Die Mischungen IB_1 bis IB_3 erfüllten die Anforderungen der Klasse F52, während IB_4 und IB_5 eine Konsistenzabnahme zeigten.
- Bestimmung des Luftporengehalts: Für IB_1 bis IB_4 lagen die Werte im Sollbereich von 2,5–5,0 %, während bei IB_5 mit 100% Austauschrate der Wert leicht überschritten wurde.
- Ermittlung der Frischbetonrohichte: Diese sank mit steigendem Ersatzanteil aufgrund der geringeren Dichte der rezyklierten Gesteinskörnung.
- Die rezyklierte Gesteinskörnung wurde vor der Verwendung im Betonmischer vorgesättigt, um negative Effekte des hohen Saugvermögens auf den effektiven W/B-Wert zu vermeiden.

Tab. 3: Untersuchungsumfang an Betonsorten: IB_1 = Referenzbeton; IB_2 = Austauschrate 50% > 4 mm; IB_3 = Austauschrate 100% > 4 mm; IB_4 = Austauschrate 100% > 4 mm und 50% < 4 mm; IB_5 = Austauschrate 100% gesamte Körnung

Bezeichnung der Betonsorte	Anteil an natürlicher Gesteinskörnung	Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung
IB_1	100 % über gesamte Sieblinie	0 %

IB_2	$d \leq 4 \text{ mm } 100 \%, d > 4 \text{ mm } 50 \%$	$d > 4 \text{ mm } 50 \%$
IB_3	$d \leq 4 \text{ mm } 100 \%$	$d > 4 \text{ mm } 100 \%$
IB_4	$d \leq 4 \text{ mm } 50 \%$	$d > 4 \text{ mm } 100 \%, d \leq 4 \text{ mm } 50 \%$
IB_5	0 %	100 % über gesamte Sieblinie

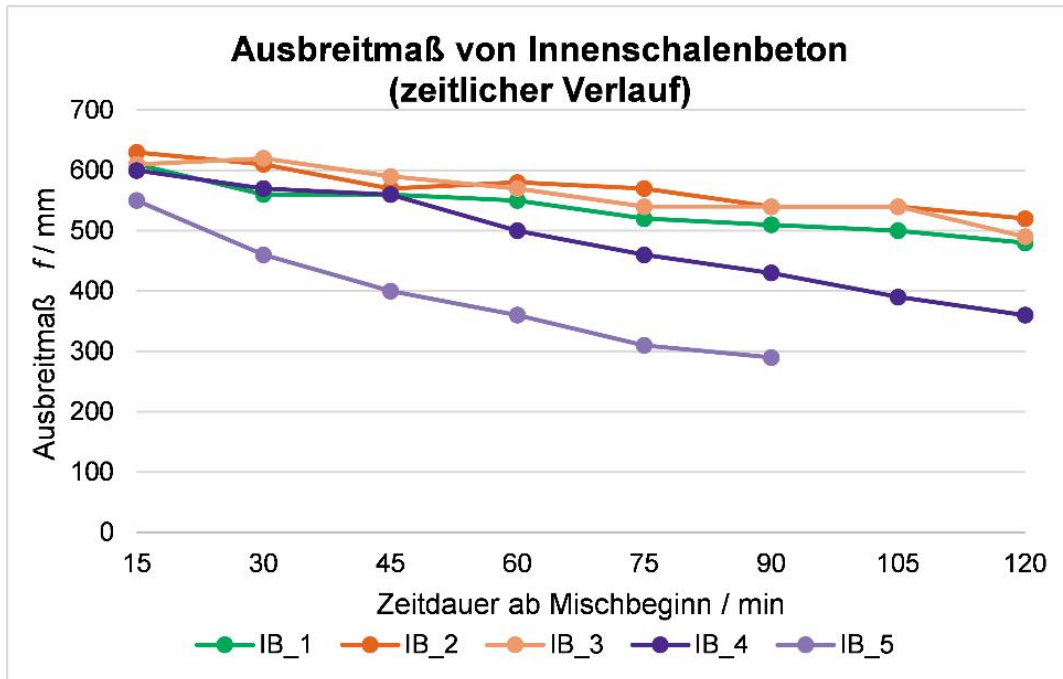


Abbildung 2.3.9: Ausbreitmaß der Betonmischungen im Verlauf von 120 min.

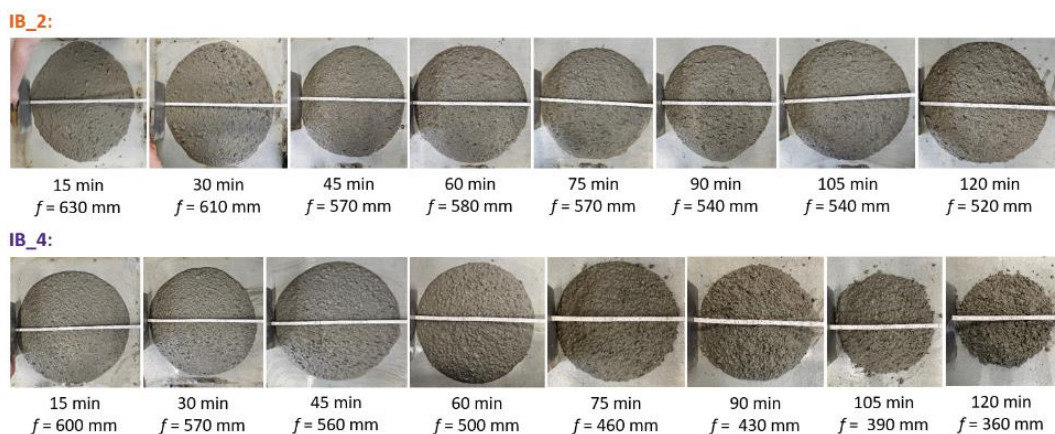


Abbildung 2.3.10: Bilddokumentation des Ausbreitmaßes von IB_2 und IB_4 über Zeitdauer von 120 min

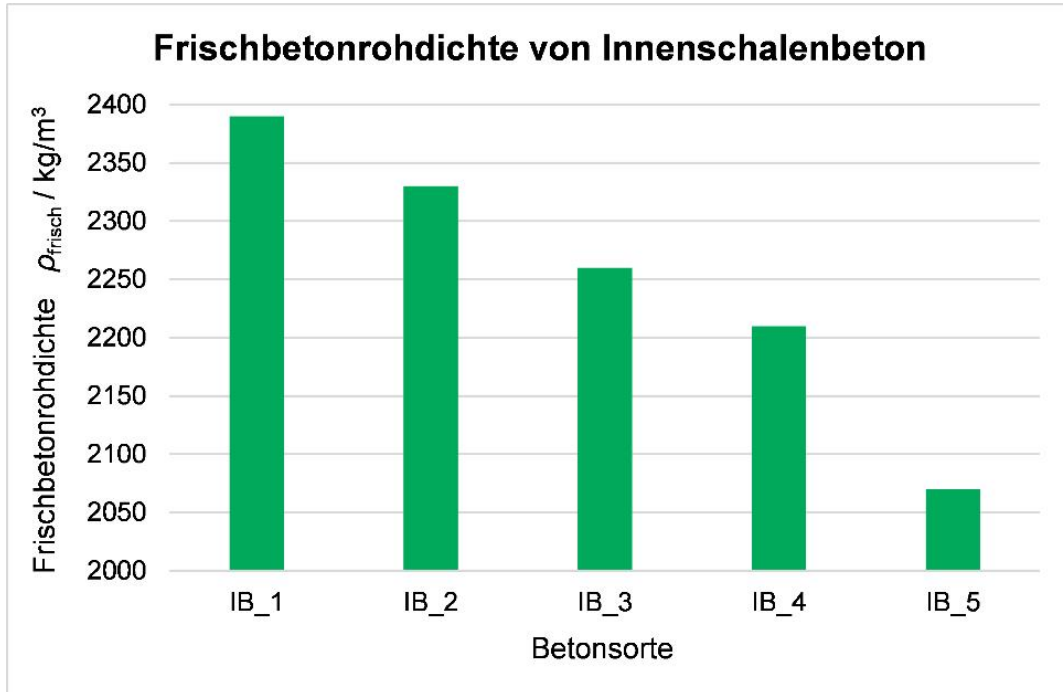


Abbildung 2.3.11: Frischbetonrohddichte der einzelnen Betonsorten. IB_1 = Referenzbeton; IB_2 = Austauschrate 50% > 4 mm; IB_3 = Austauschrate 100% > 4 mm; IB_4 = Austauschrate 100% > 4 mm und 50% < 4 mm; IB_5 = Austauschrate 100% gesamte Körnung

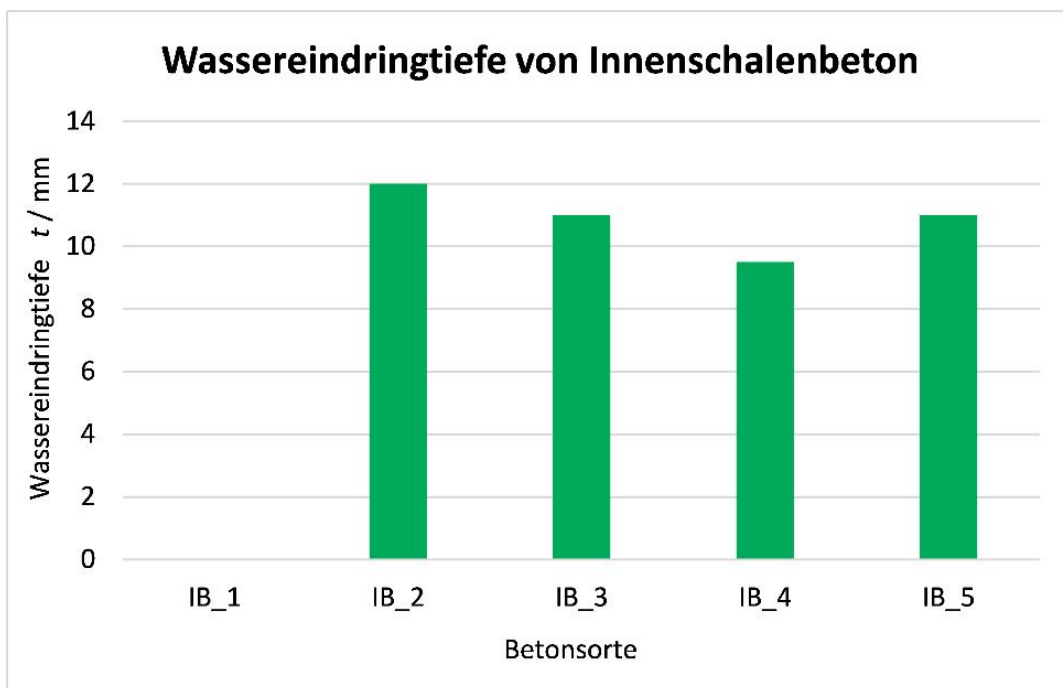


Abbildung 2.3.12: Wassereindringtiefe in die Betonprobekörper, ermittelt gemäß ÖNORM B 4710-3. IB_1 = Referenzbeton; IB_2 = Austauschrate 50% > 4 mm; IB_3 = Austauschrate 100% > 4 mm; IB_4 = Austauschrate 100% > 4 mm und 50% < 4 mm; IB_5 = Austauschrate 100% gesamte Körnung

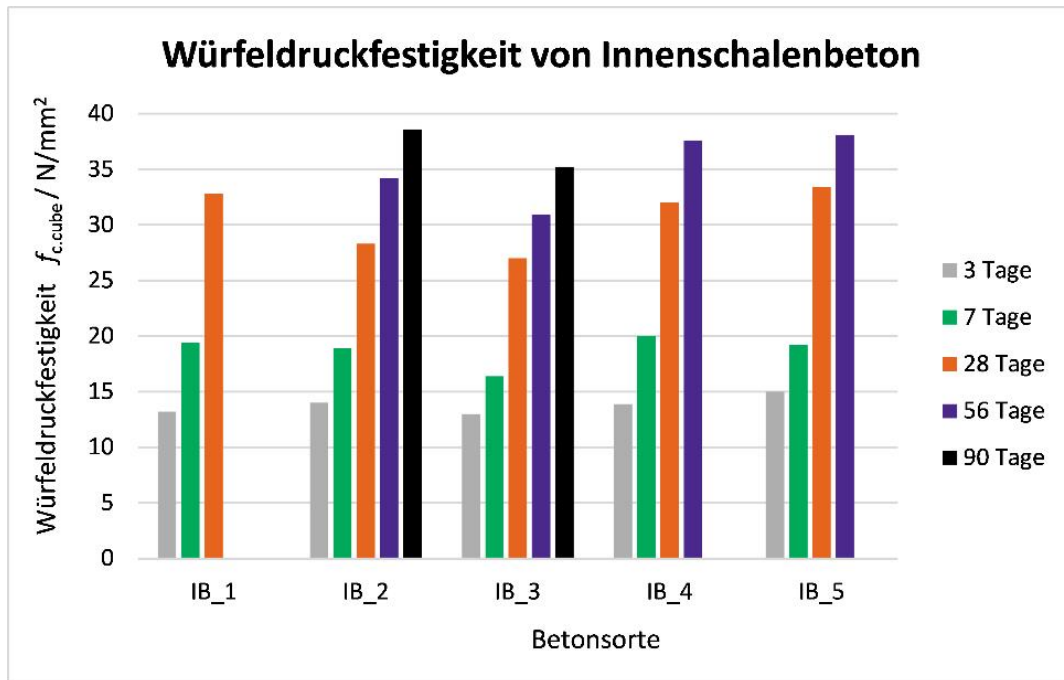


Abbildung 2.3.13: Betondruckfestigkeit von verschiedenen Betonmischungen für Innenschalenbeton. IB_1 = Referenzbeton; IB_2 = Austauschrate 50% > 4 mm; IB_3 = Austauschrate 100% > 4 mm; IB_4 = Austauschrate 100% > 4 mm und 50% < 4 mm; IB_5 = Austauschrate 100% gesamte Körnung

Erkenntnisse:

Für eine Ersatzquote von 50 % konnten Betone mit zufriedenstellenden Frischbetoneigenschaften hergestellt werden. Höhere Ersatzraten sind technisch möglich, erfordern jedoch weitere Rezepturoptimierungen, um die langfristige Verarbeitbarkeit sicherzustellen.

70 %, weitere Optimierungen der Bindemittelkombinationen und Zusatzmittel sind im zweiten Projektjahr vorgesehen.

2.3.5. Optimierung der Betonmischung für einen Wasserdruck bis 10 bar

Durchgeführte Arbeiten:

- Wasserdurchlässigkeitsprüfungen wurden bei 7 bar durchgeführt. Alle Mischungen lagen unterhalb des Grenzwertes von 20 mm Eindringtiefe.
- Mit steigendem Ersatzanteil wurde eine tendenzielle Reduktion der Wassereindringtiefe beobachtet, was auf die verbesserte Packung der rezyklierten Gesteinskörnung zurückzuführen ist.
- Für IB_5 wurde aufgrund der Verarbeitungsparameter eine höhere Eindringtiefe festgestellt.

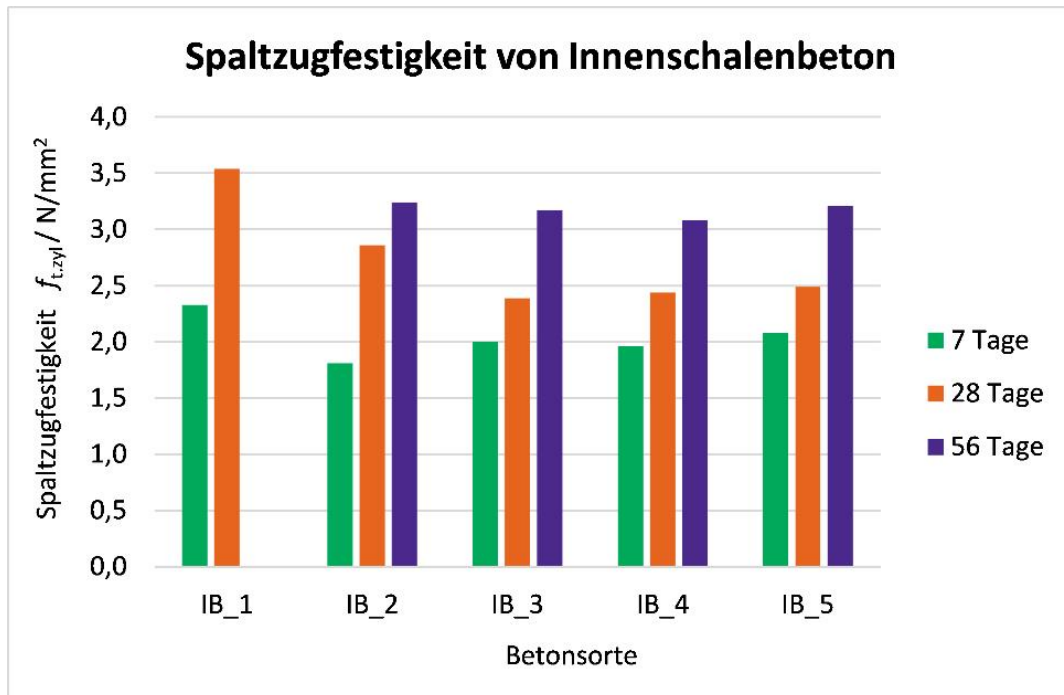


Abbildung 2.3.14: Spaltzugfestigkeit von verschiedenen Betonmischungen für Innenschalenbeton. IB_1 = Referenzbeton; IB_2 = Austauschrate 50% > 4 mm; IB_3 = Austauschrate 100% > 4 mm; IB_4 = Austauschrate 100% > 4 mm und 50% < 4 mm; IB_5 = Austauschrate 100% gesamte Körnung

Geplante Arbeiten:

Im zweiten Projektjahr erfolgen Prüfungen bei 10 bar, beginnend mit IB_1 (Referenz) und IB_2 (präferierte Mischung).

Erkenntnisse:

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass Betone mit hohen Ersatzraten bei angepasster Rezeptur dichte Gefüge und eine geringe Wasserdurchlässigkeiten erreichen können.

2.3.6. Charakterisierung der mechanischen, physikalischen und chemischen Betoneigenschaften

Durchgeführte Arbeiten:

- Druckfestigkeit: Für alle Betonsorten wurden stabile bis leicht steigende Druckfestigkeiten mit steigendem Ersatzanteil gemessen.
- Spaltzugfestigkeit: Bei steigendem Ersatzanteil sank die Spaltzugfestigkeit leicht ab, stabilisierte sich jedoch bei höheren Ersatzraten.
- E-Modul: Ein Rückgang des E-Moduls wurde bei höheren Ersatzraten festgestellt, was auf eine höhere Verformbarkeit hinweist.
- Bruchenergie: Mit steigendem Ersatzanteil sank die Bruchenergie (natürliche GK: 86 N/mm²; 100 % Recycling: 63 N/mm²).
- Wasserdurchlässigkeit: Alle Mischungen lagen unterhalb des Grenzwertes bei 7 bar; weitere Prüfungen bei 10 bar erfolgen im zweiten Projektjahr.

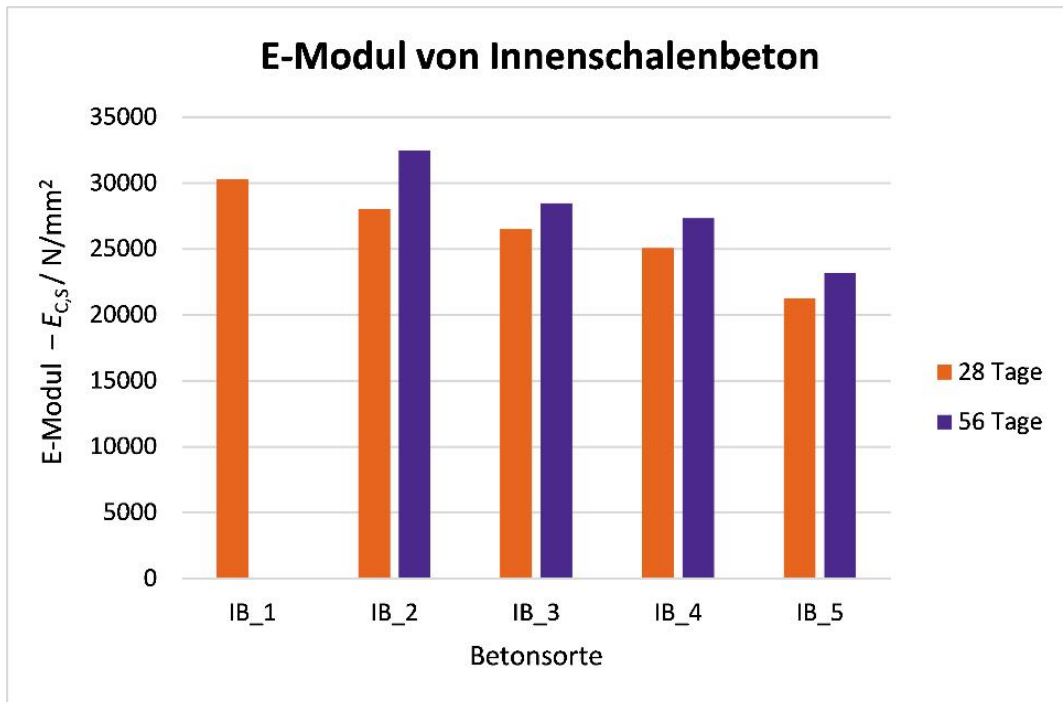


Abbildung 2.3.15: E-Modul von verschiedenen Betonmischungen für Innenschalenbeton. IB_1 = Referenzbeton; IB_2 = Austauschrate 50% > 4 mm; IB_3 = Austauschrate 100% > 4 mm; IB_4 = Austauschrate 100% > 4 mm und 50% < 4 mm; IB_5 = Austauschrate 100% gesamte Körnung

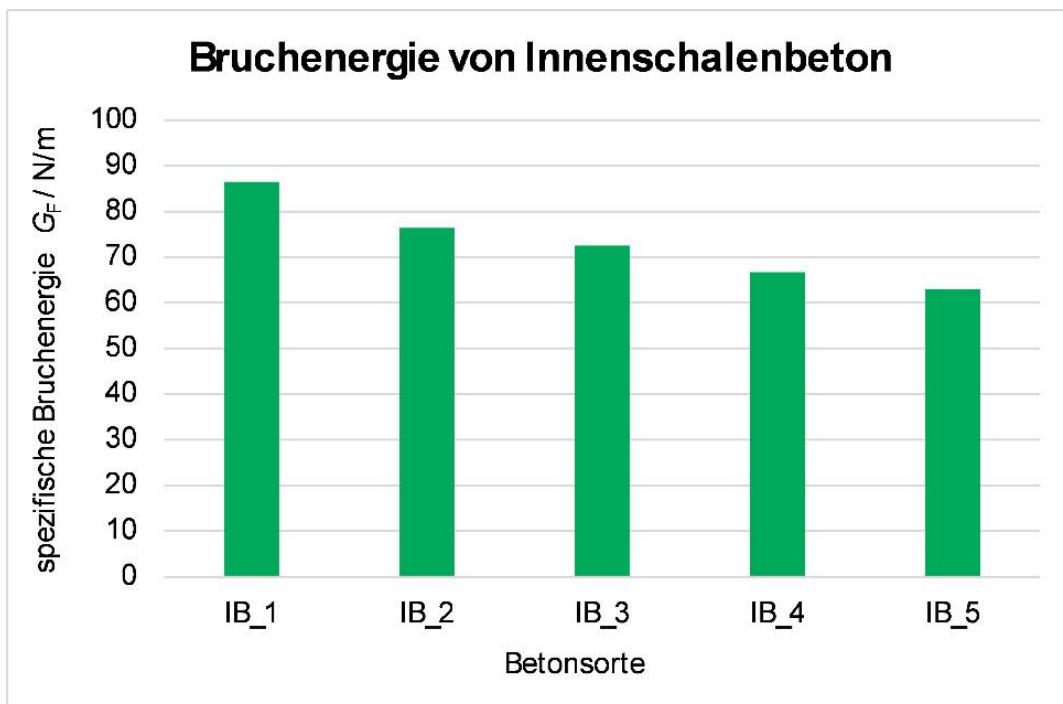


Abbildung 2.3.16: Spezifische Bruchenergie von verschiedenen Betonmischungen für Innenschalenbeton. IB_1 = Referenzbeton; IB_2 = Austauschrate 50% > 4 mm; IB_3 = Austauschrate 100% > 4 mm; IB_4 = Austauschrate 100% > 4 mm und 50% < 4 mm; IB_5 = Austauschrate 100% gesamte Körnung



Abbildung 2.3.17: Detailansicht eines Betonbrockens

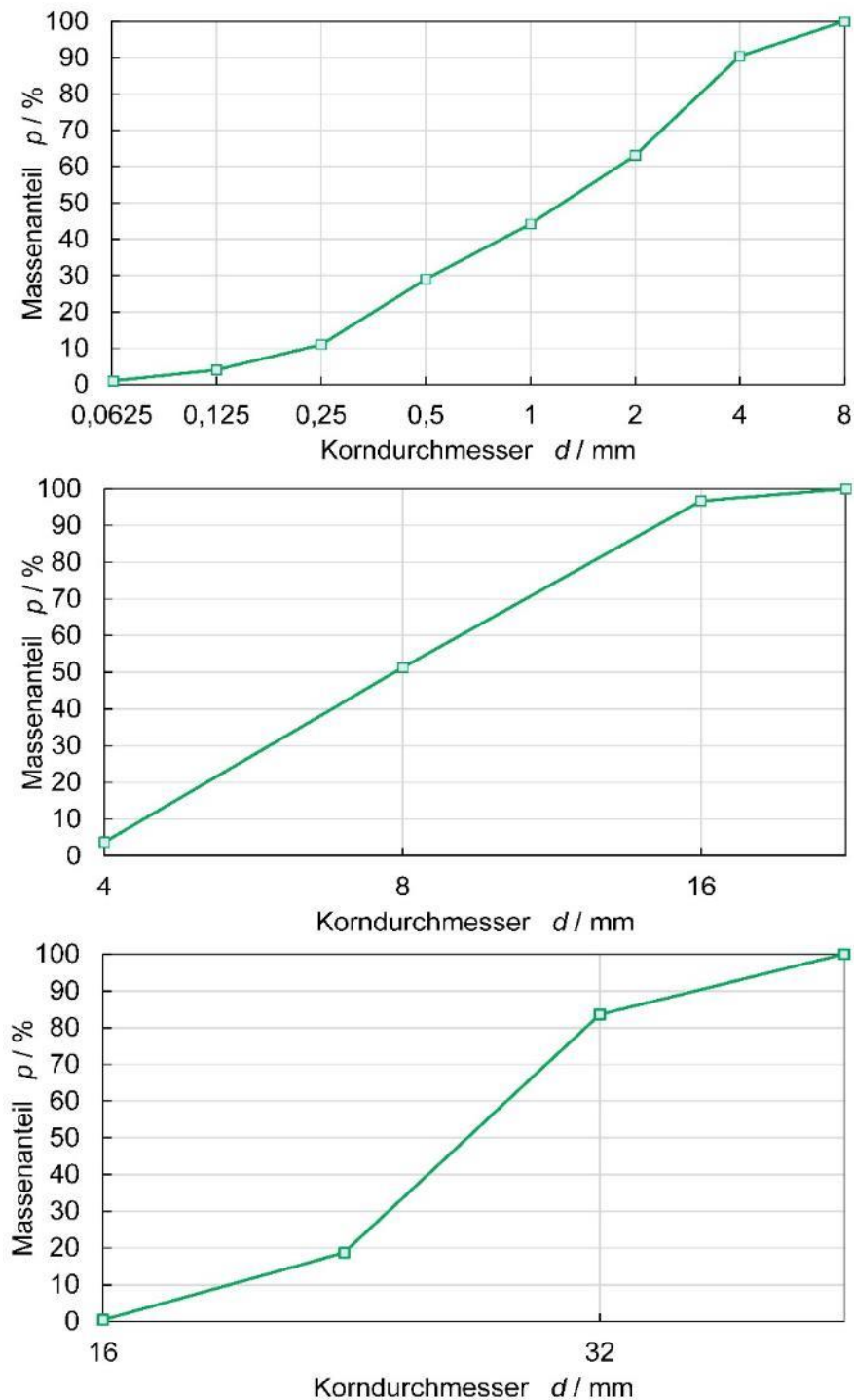


Abbildung 2.3.18: oben: Summenlinie $d = 4$ mm, Mitte: Summenlinie $4 \text{ mm} < d = 16$ mm, unten: Summenlinie $16 \text{ mm} < d = 32$ mm

Erkenntnisse:

Die Ergebnisse zeigen, dass Recyclingbetone mit angepasster Rezeptur vergleichbare oder bessere Druckfestigkeiten als Referenzbetone erreichen können, bei gleichzeitig leicht reduzierter Steifigkeit und Bruchenergie, was sich positiv auf die Duktilität auswirkt. Weitere chemische Prüfungen und Dauerhaftigkeitsanalysen erfolgen im zweiten Projektjahr.

Der Projektfortschritt liegt mit **45 % im Plan**, bezogen auf die Gesamtprojektlaufzeit.

2.4. Rissneigungs- und CO₂-optimierter Recyclingbeton

Fertigstellungsgrad: 100%

2.4.1. Optimierung des Feinstoffleims für Beton & Betonkonzepte

Im Projekt wurde ein Teil der Tunnelinnenschale prototypisch mit einem emissionsarmen Recyclingbeton („CO₂red-RC“) nach einem performancebasierten Konzept entwickelt. Die Anforderungen an den Beton umfassten die Gleichwertigkeit zu einem Referenzbeton C25/30 (90)/BS1/XW2/XAT-B/XF/XC2, eine Pumpbarkeit von mindestens zwei Stunden sowie eine Konsistenzklasse F52 mit hoher Sedimentationsstabilität für den Einsatz in mehrgeschossigen unterirdischen Bauwerken.

Hierfür wurde ein emissionsarmes Bindemittelkonzept mit C3A-freiem Zement und Zusatzstoffen entwickelt. Der rezyklierte Gesteinskörnungsanteil wurde projektweit mit 50 % in der Fraktion ≥ 4 mm festgelegt. Das Treibhauspotenzial (GWP) der eingesetzten Materialien wurde auf Basis der Lebenszyklusphase A1 gemäß ÖNORM EN 15804 bewertet.

Die Partikelgrößenverteilungen der Feinstoffe und die Sieblinien der Gesteinskörnungen wurden charakterisiert, um die Mischungsentwicklung gezielt steuern zu können.

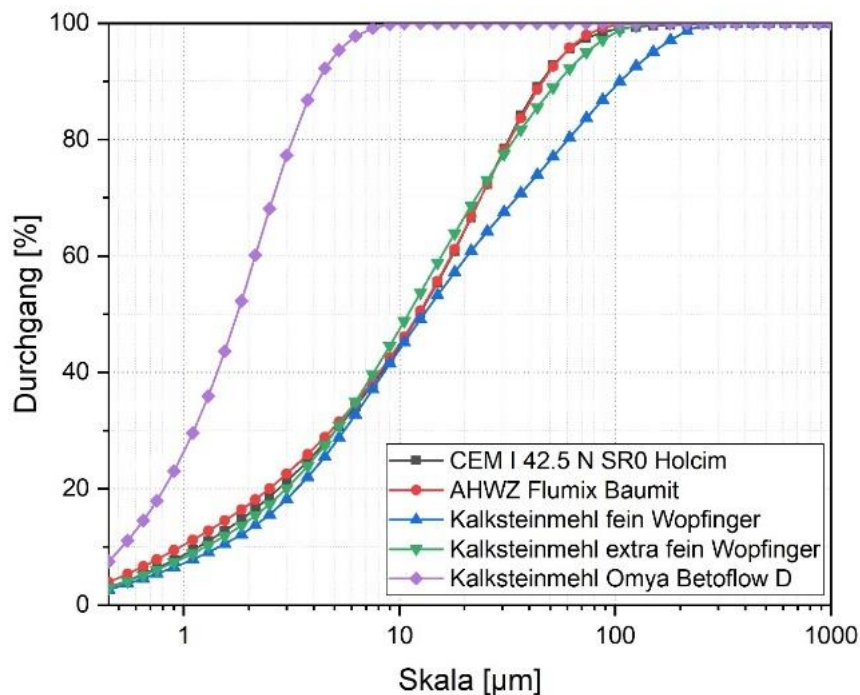


Abbildung 2.4.1: Partikelgrößenanalyse der Feinstoffe

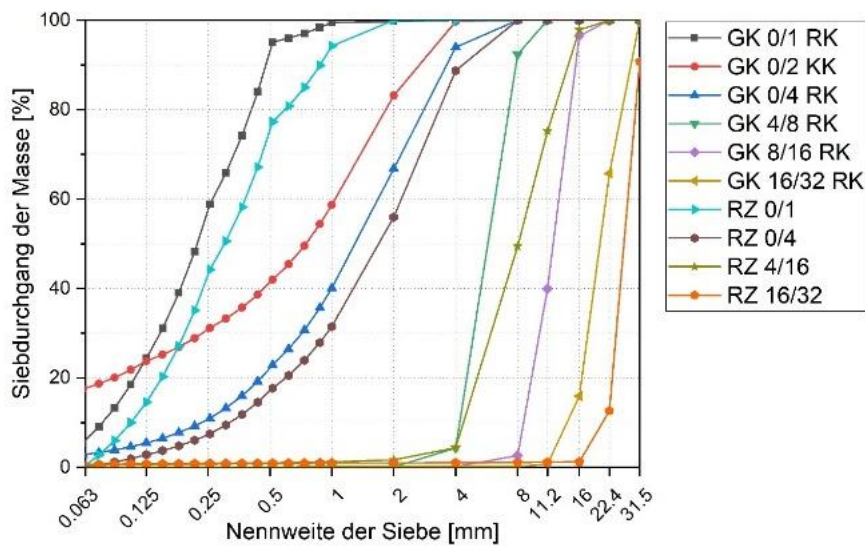


Abbildung 2.4.2: Sieblinie der Gesteinskörnungen

Zur Optimierung des Feinstoffleims wurden Mörtelversuche durchgeführt, bei denen Kalksteinmehle zu 5 %, 12,5 % und 25 % den Zement ersetzt. Die Versuche zeigten, dass Kalksteinmehl die Verarbeitbarkeit verbessert, insbesondere Betoflow D bei einer Substitution von 12,5 %, bei der trotz reduzierter Fließmittelmenge nur geringe Festigkeitsverluste (~7–8 %) festgestellt wurden.

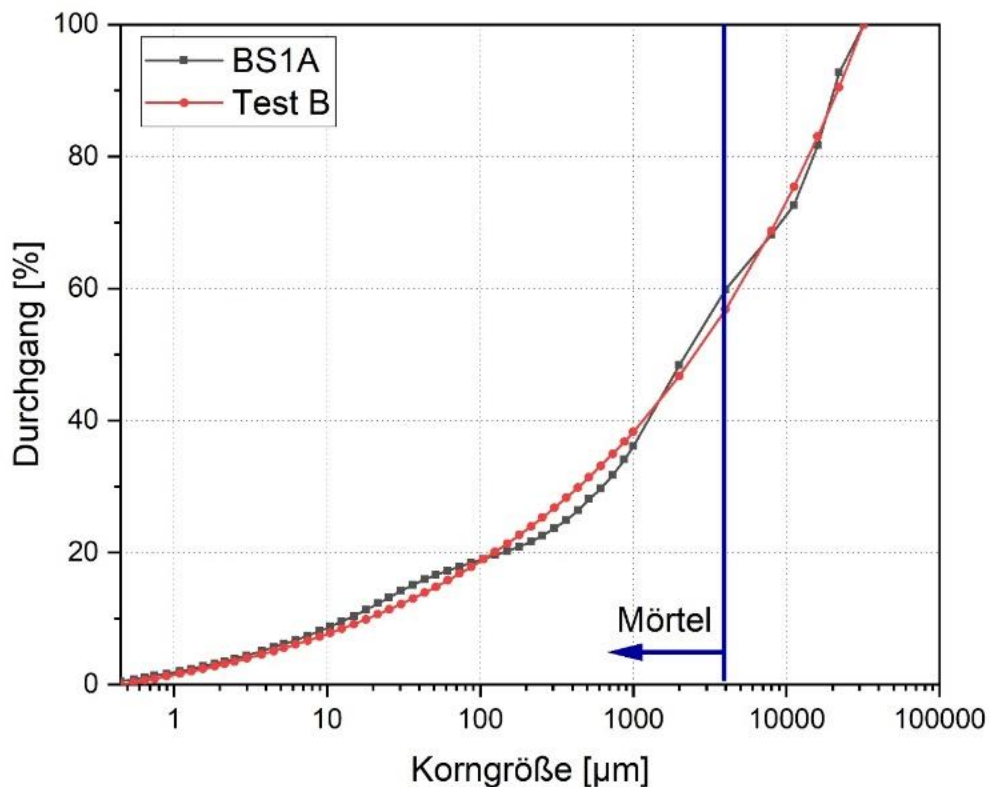


Abbildung 2.4.3: Gesamtsiebliniendarstellung mit der Kennzeichnung des Mörtelanteils für Voruntersuchungen

Auf Basis der Ergebnisse wurden Bindemittelkombinationen weiter optimiert. Dazu wurde die Gesamtsieblinie des Betons gemäß Funk-Dinger angepasst, um eine ideale Packungsdichte zu erreichen. Für die Voruntersuchungen wurden äquivalente Mörtelmischungen hergestellt und geprüft.

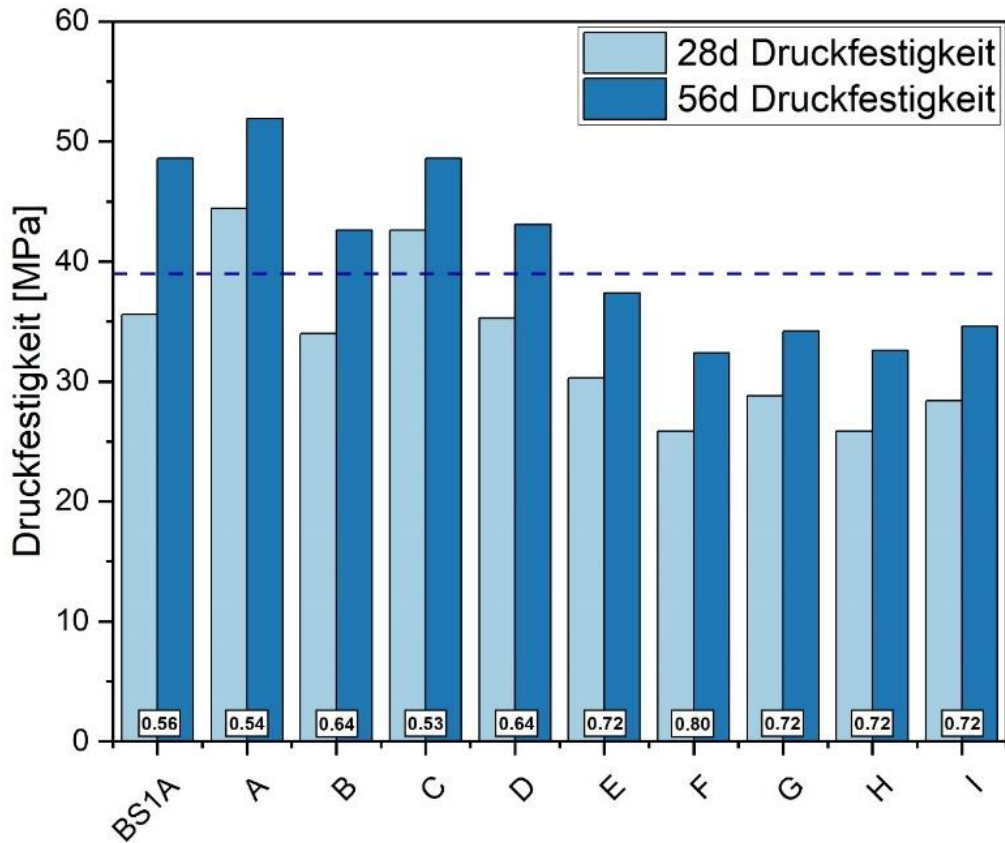


Abbildung 2.4.4: Druckfestigkeit der untersuchten Mörtelmischungen, inklusive Angaben des W/Ba-Wertes

Die Druckfestigkeitsprüfungen zeigten, dass ein W/Ba-Wert von maximal 0,68 ausreichend ist, um die Ziel-Festigkeit von 39 MPa zu erreichen.

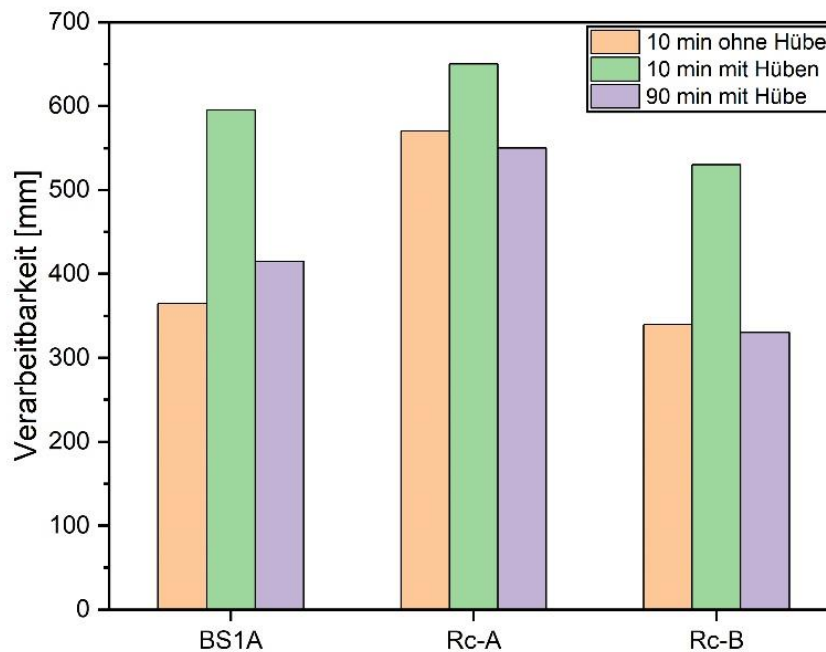


Abbildung 2.4.5: Ausbreitmaß der Mischungen

2.4.2. CO₂-red. Recyclingbetonkonzeptionierung

Aufbauend auf den Mörtelversuchen wurden zwei CO₂-reduzierte Recyclingbeton-mischungen entwickelt (Rc-A und Rc-B), beide mit 50 % rezyklierter Gesteinskörnung ≥ 4 mm und unterschiedlichen Zugabewassermengen (140 l/m³ bzw. 150 l/m³).

Die Ausbreitmaßprüfungen zeigten, dass beide Mischungen nach 10 Minuten eine zufriedenstellende Verarbeitbarkeit aufwiesen.

Nach 90 Minuten erreichte jedoch nur Rc-A die geforderte Konsistenzklasse, zeigte aber eine starke Blutneigung, während Rc-B die geforderte Klasse nicht erreichte.



Abbildung 2.4.6: Ausbreitmaß

Eine Anpassung des Fließmittelgehalts wurde als zielführende Maßnahme identifiziert, um die Blutneigung zu verringern und die Verarbeitbarkeit über 90 Minuten zu sichern.

Die entwickelte CO₂-reduzierte Betonrezeptur zeigte eine CO₂-Reduktion von bis zu 22 % (Phase A1) bei gleichzeitig über 50 % Recyclinganteil ≥ 4 mm.

Tab. 5: Entwickelte Rezeptur für CO₂-armen Recyclingbeton („RB-CO₂red“)

Stoffkategorie	Masse [kg/m ³]	Stoffkategorie	Masse [kg/m ³]
CEM I 42,5 N C ₃ A-frei	130–160	GK 0/1 (Quarzsand)	240
AHWZ	80–160	GK 0/4	730
Betoflow	30	GK 4/8	145
Kalksteinmehl	30–100	GK 8/16	105
(alternativ: AHWZ + Makrofüller)			
	GK 16/32	230	
Zugabewasser	150	Rezyk. GK 4/16	250
W/B	$\leq 0,65$	Rezyk. GK 16/32	230
Fließmittel	2,0 (tbd)		
Luftporenmittel	tbd		

Tab. 6: GWP des Betons

GWP (A1) [kg CO₂/m³]

Recyclinganteil ≥ 4 mm

BS1-Ref	155		0
RB-CO2red	~ 120	-22%	50%

2.4.3. Referenzmischung und Zwangrahmenbetonage

Zur Validierung der Materialmodelle wurde der Referenzbeton BS1A-Ref mit angepasstem Fließ- und Luftporenmittelgehalt hergestellt und im Zwangrahmenversuch geprüft. Dabei wurden umfangreiche Materialkennwerte wie Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, E-Modul, autogenes und Trocknungsschwinden sowie Wassereindringtiefe bestimmt.

Tab. 7: Prüfprogramm

Prüfart	Probekörpergröße bzw. Maß	Prüfalter In Tagen	Anzahl Probekörper
Druckfestigkeit	150 mm cube	2-7-14-28-90-99	2 pro Alter
Druckfestigkeit	Ø100 × 200 mm cylinder	2-7-28	3 pro Alter
Statischer E-Modul	Ø100 × 200 mm cylinder	2-7-28	3 pro Alter
Spaltzugfestigkeit	100 mm cube	7-28	3 pro Alter
Autogenes & Trocknungsschwinden	Ø150 mm × 300 mm cylinder	120	2 gesamt
Wassereindringtiefe (WU)	200 × 200 × 120 prism	28	3 gesamt
Temperaturentwicklung	200x200x200 isoliert		
Frischbeton ÖN B 4710-3	Ausbreitmaß 10 und 90 Minuten Luftgehalt, FB-Dichte, Frischbetontemperatur		
Pumpfähigkeit	Gleitrohr-Rheometer (SLIPER)		

Für das autogene Schwinden wurde ein versiegelter Zylinder verwendet, während das Trocknungsschwinden an einem unversiegelten Zylinder bei 20 °C und 50 % r. F. gemessen wurde.

Die Frischbetonprüfungen ergaben einen Luftgehalt von 2,7 % nach 10 min und 3,2 % nach 90 min sowie eine Frischbetontemperatur von 24,4 °C. Die Temperaturentwicklung und Ergebnisse der Sliper-Tests wurden ebenfalls dokumentiert.



Abbildung 2.4.7: Schwindversuchskörper

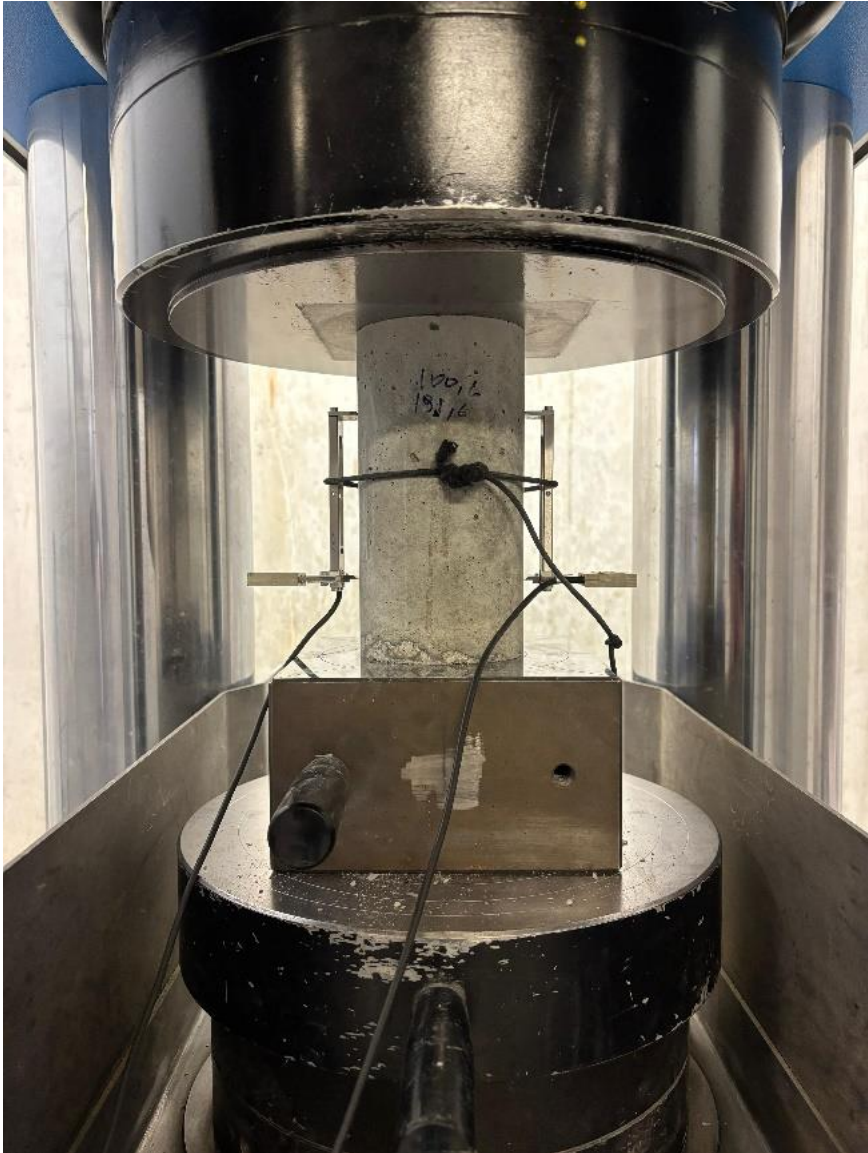


Abbildung 2.4.8: E-Modul-Test

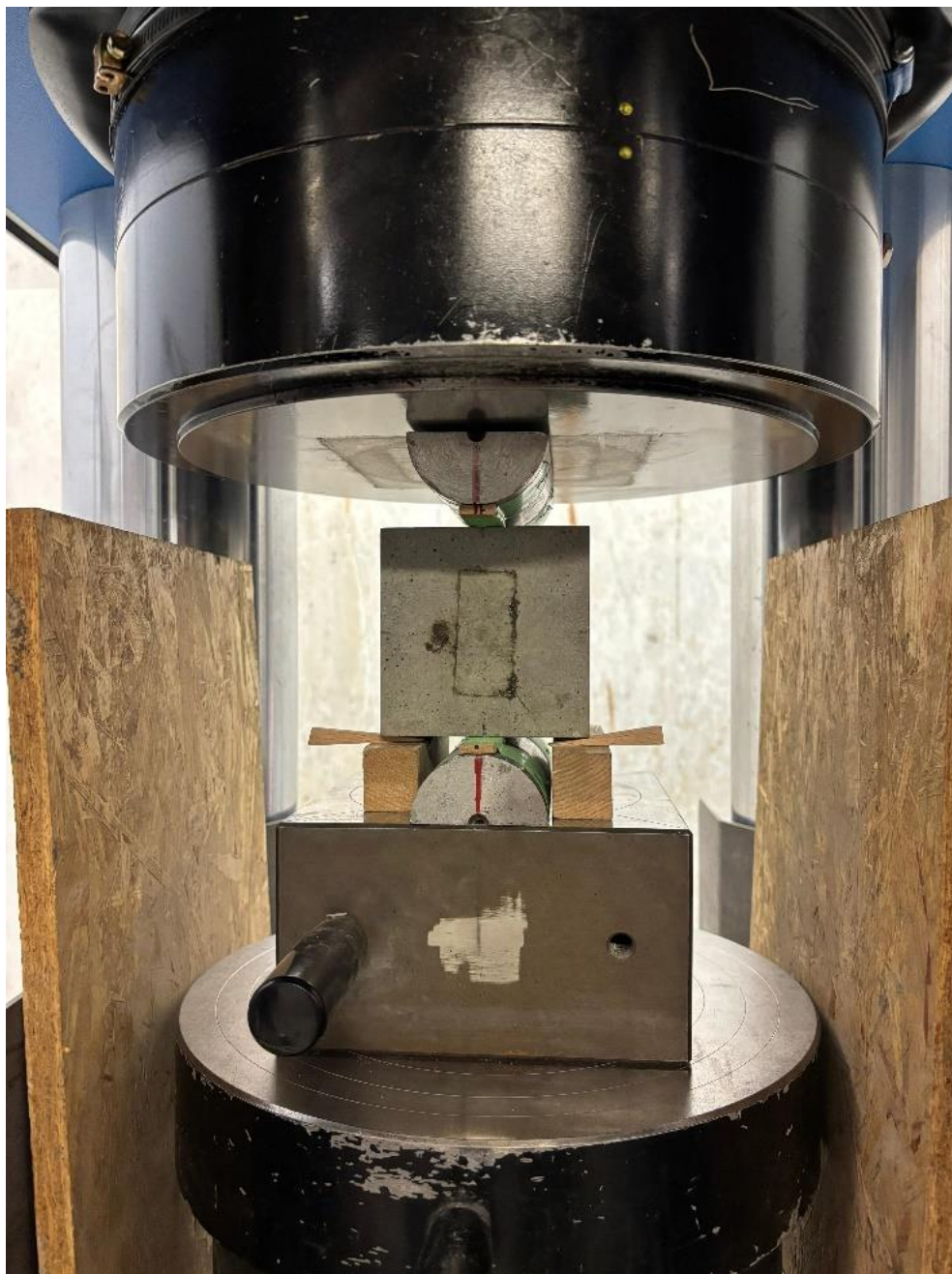


Abbildung 2.4.9: Spaltzugfestigkeitstest

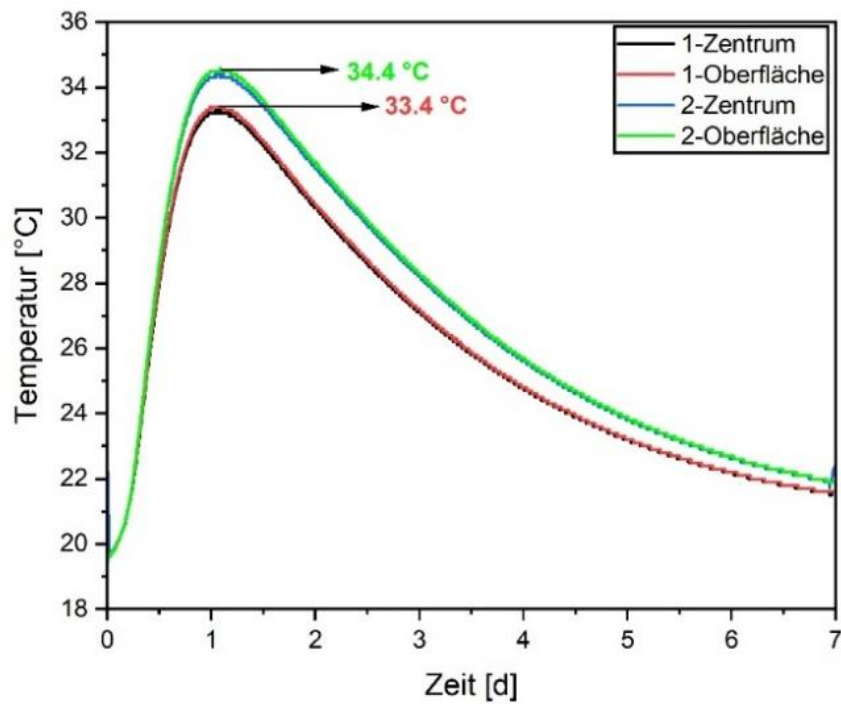


Abbildung 2.4.10: Kurve der Temperaturentwicklung



Abbildung 2.4.11: Filterpresse

Der Luftgehalt betrug nach 10 min 2,7% und nach 90 min 3,2 %, die Frischbetontemperatur 24,4 °C. Die Ergebnisse der Wärmeentwicklung und des Sliper Tests sind in Abb. 23 und Abb. 24 ablesbar.

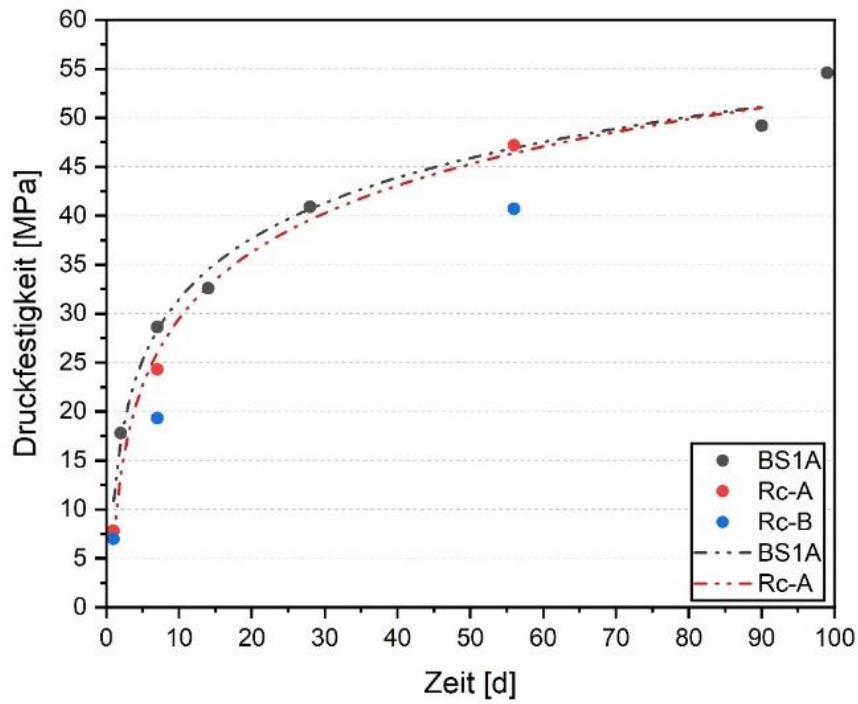


Abbildung 2.4.12: Druckfestigkeitswerte

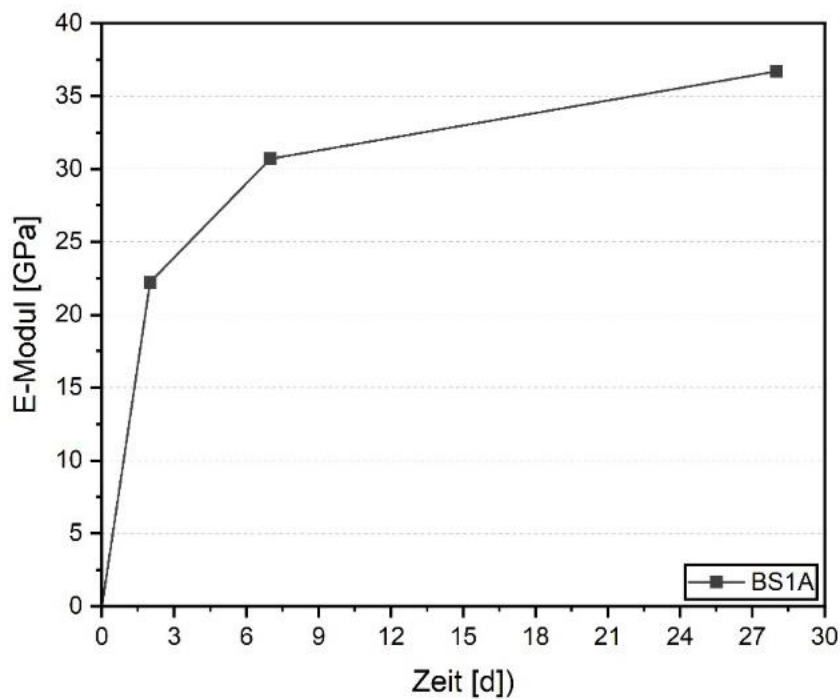


Abbildung 2.4.13: Statischer E-Modul

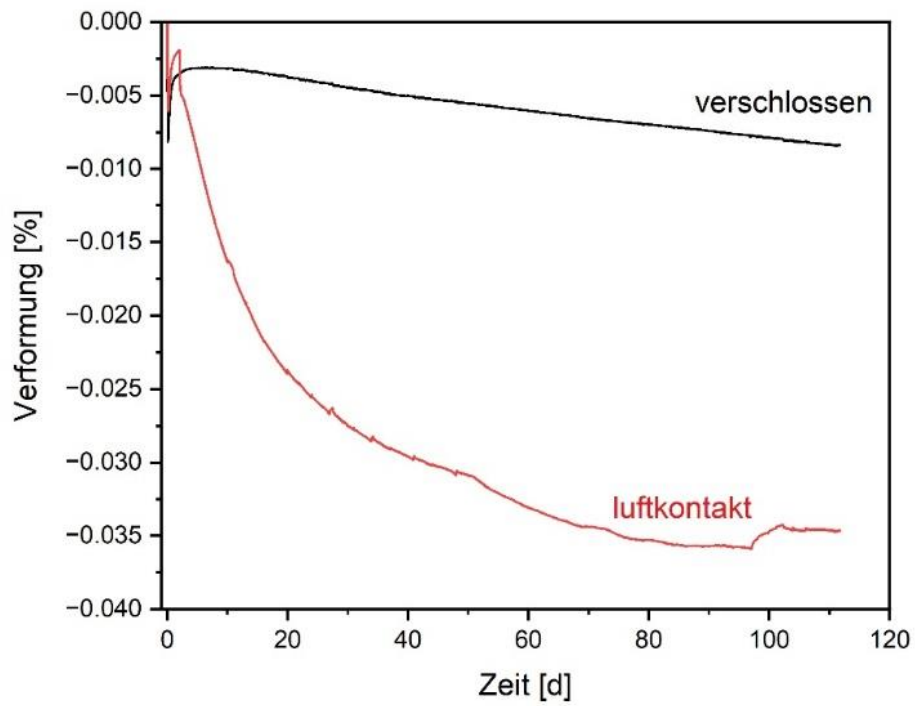


Abbildung 2.4.14: Schwindverhalten

Die Druckfestigkeit und der statische E-Modul zeigten stabile Ergebnisse, während das Schwindverhalten den zu erwartenden Verlauf aufwies.



Abbildung 2.4.15: Zwangrahmenversuch Kalibrierung



Abbildung 2.4.16: Zwangrahmenversuch Befüllung



Abbildung 2.4.17: Zwangrahmenversuch, Isolierung nach dem Einbau

Die Wassereindringtiefe lag nach 28 Tagen bei 27 mm und wird voraussichtlich im Bemessungsalter von 90 Tagen den Zielwert (<20 mm) erfüllen.

2.4.4. Bestimmung der erhärtungsbedingten Zwangbeanspruchung auf Bauteilebene

Im ersten Jahr wurde ein Zwangrahmenversuch mit dem Referenzbeton BS1-A durchgeführt. Der Versuchsaufbau und einige Eindrücke zur Herstellung sind in Abb. 28 (a)–(c) gezeigt. Als Ergebnisgrößen liefert der Versuch eine zusammenhängende Erfassung der Temperatur- und Spannungsgeschichte unter definierten thermischen Randbedingungen und einer definierten Behinderungssituation. Darüber hinaus wurden die Messergebnisse bereits mit dem angepassten Materialmodell nachgerechnet. Diese Ergebnisse sind in Abb. 28 (d)–(f) gezeigt.

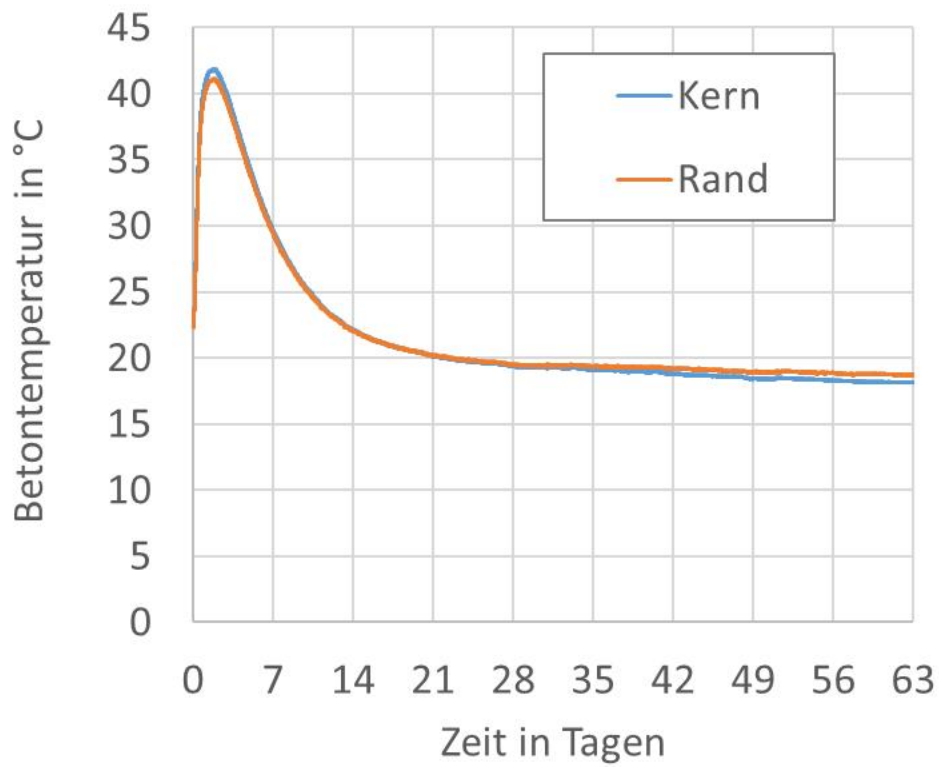


Abbildung 2.4.18: Temperaturmessung

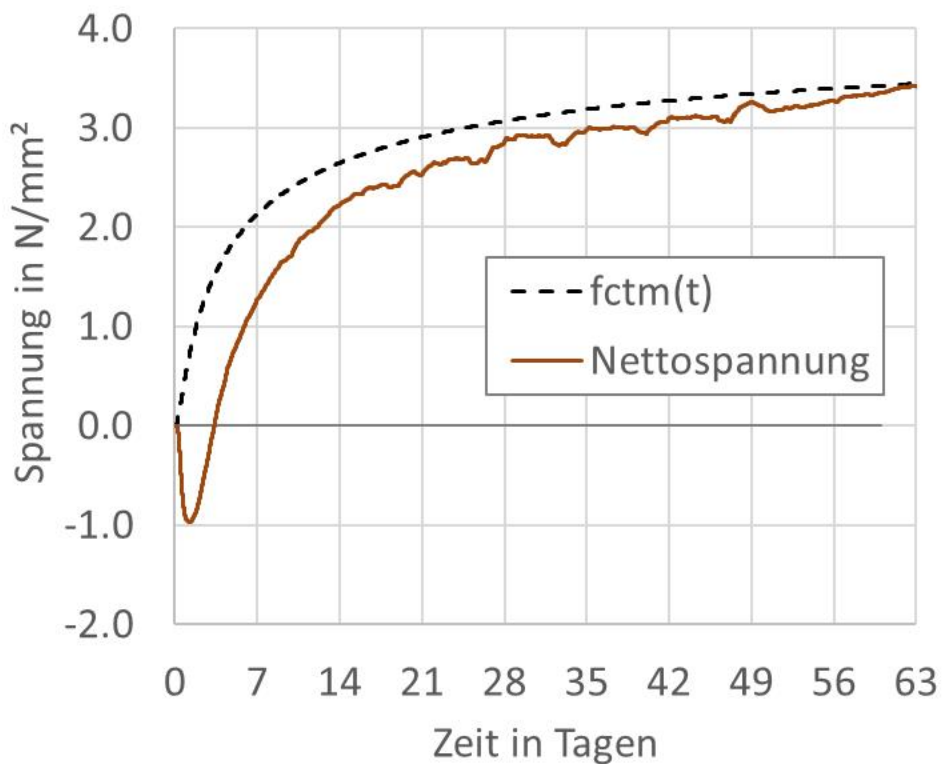


Abbildung 2.4.19: Betonspannung und Zugfestigkeit

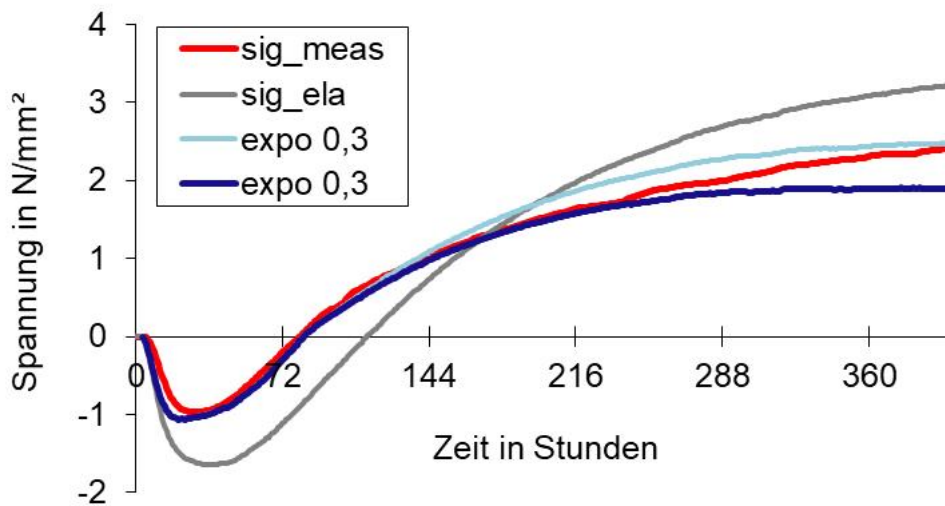


Abbildung 2.4.20: Zwangrahmenversuch:(a): Kalibrieren, (b): Befüllen, (c): Isolierung nach dem Einbau, (d): Temperaturmessung, (e): Betonspannung und Zugfestigkeit, (f): Nachrechnung der Spannung

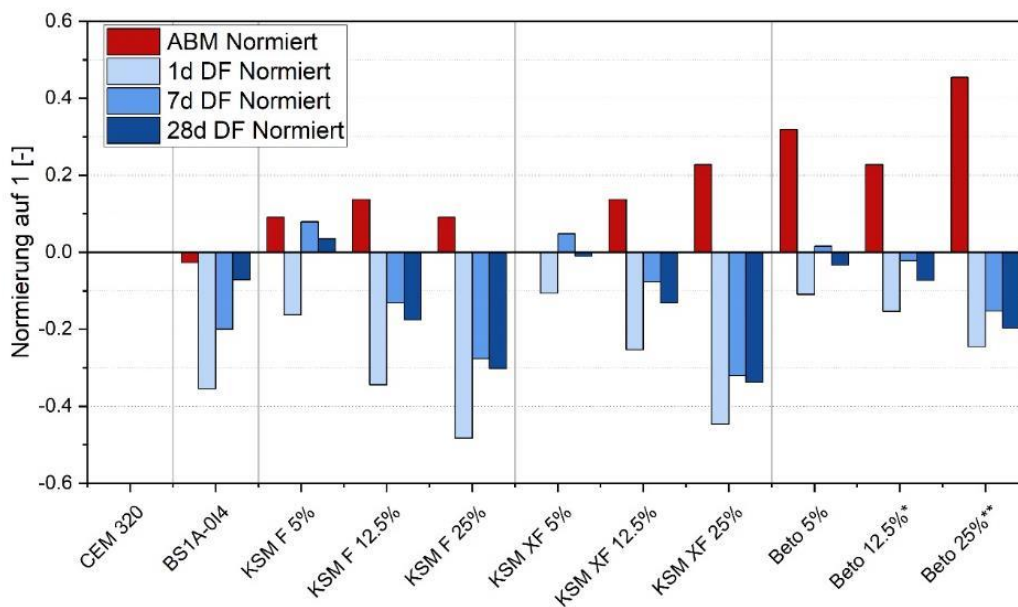


Abbildung 2.4.21: Ausbreitmaß ABM und Druckfestigkeit DF der Mischungen mit CEM+AHWZ (BS1-A), Kalksteinmehlen (KSM) und Zement (CEM) (*nur 50 % Fließmittel; ** gar kein Fließmittel)



Abbildung 2.4.22: Temperaturmessung im isolierten Würfel



Abbildung 2.4.23: Sliper Test

Der Projektfortschritt liegt mit **98 % im Plan**, bezogen auf die Gesamtprojektlaufzeit.

2.5. Bewehrungsmix und 3D-Basaltbewehrung

Fertigstellungsgrad: 100%

2.5.1. Bewehrungsmix für Tübbinge

Im Projekt wurde die Entwicklung eines Fasercocktails aus Stahl- und Basaltfasern zur Bewehrung von Tübbingen untersucht. Ziel war es, den Anteil der Stahlfaserbewehrung zu reduzieren und teilweise durch Basaltfasern zu ersetzen, um die Nachhaltigkeit der Bewehrung zu erhöhen, ohne negative Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften.

Durchgeführte Arbeiten:

- Der Fokus lag auf Tübbingsegmenten, die als Fertigteile im Schildvortrieb eingesetzt werden und traditionell mit Stahlbewehrung oder Stahlfasern verstärkt sind.

- Im experimentellen Teil wurden Vorversuche im kleinen Maßstab mit verschiedenen Betonrezepturen und Faserkombinationen durchgeführt. Die vielversprechendste Mischung soll im zweiten Projektjahr an 1:1 Tübbingsegmenten unter realitätsnahen Lasten getestet werden.
- Parallel dazu wurden in der analytischen Phase dreidimensionale Finite-Elemente-Modelle mit dem Concrete Damage Plasticity (CDP) Modell aufgebaut, um das Tragverhalten des faserverstärkten Betons unter Berücksichtigung der Rissbildung abzubilden.
- Die Kalibrierung der Simulationen erfolgt anhand der Ergebnisse aus 3-Punkt-Biegeversuchen an Prismen und Tübbing.

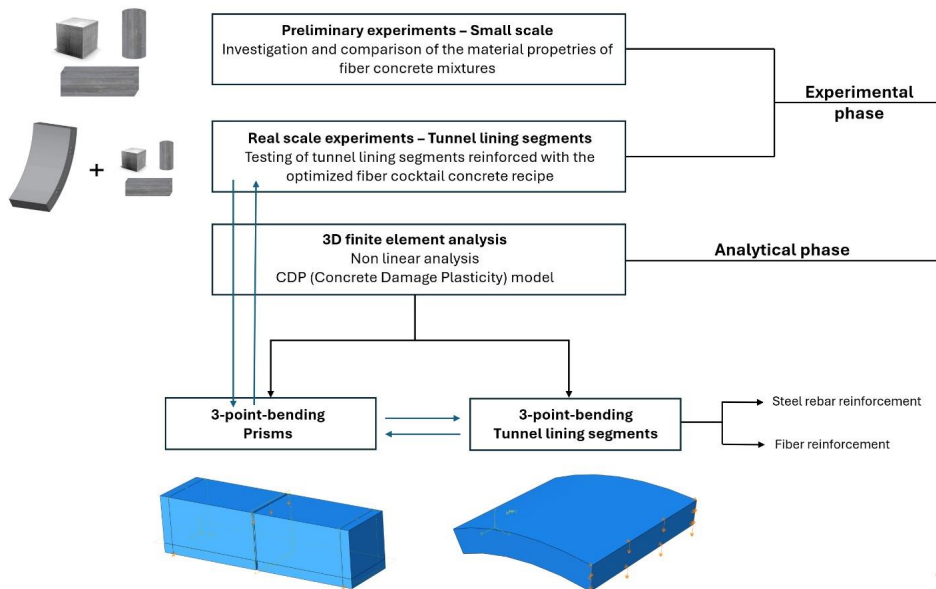


Abbildung 2.5.1: Forschungsverfahren zur Untersuchung Bewehrungsmix-verstärkter Betone für Tübbinge und Vergleich mit traditioneller Bewehrung

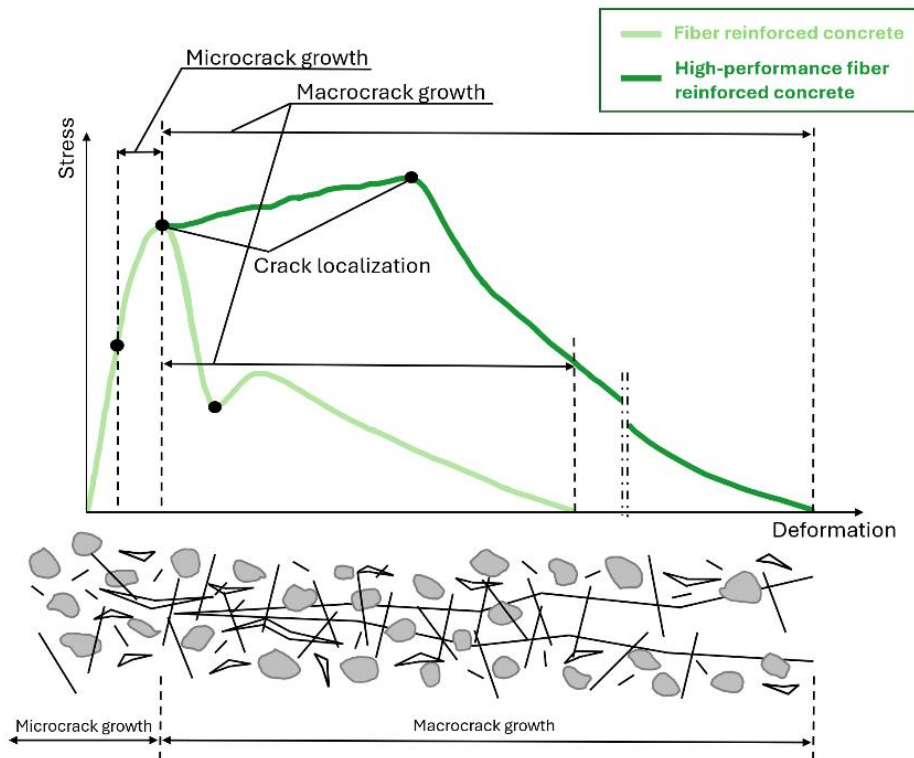


Abbildung 2.5.2: Spannungs-Dehnungs-Verhalten von faserverstärktem und hochleistungs-faserverstärktem Beton

Erkenntnisse:

- Basaltfasern verbessern die Risskontrolle in der Mikrorissphase und erhöhen die Zugkapazität, während Stahlfasern durch Bridging-Effekt die Duktilität nach Rissbildung verbessern.
- Die experimentellen Untersuchungen und die Strukturierung des Forschungsablaufs konnten wie geplant bearbeitet werden. Die Literaturrecherche zur mechanischen Wirkung von Basaltfasern und Tübbinganwendungen wurde umfassend durchgeführt.
- Geringfügige Verzögerungen traten bei der vertieften Literaturlauswertung zu numerischen Simulationen auf. Diese haben keine unmittelbaren Auswirkungen auf den Projektzeitplan, erfordern jedoch eine intensivere Einarbeitung in der nächsten Projektphase.

Fertigstellungsgrad: ca. 80 %, Literaturlauswertung und Strukturierung abgeschlossen, weitere Recherchen zu Simulationen und Materialmodellen erforderlich. Auch werden noch die Erkenntnisse einer Dissertation von Ktharina Zaydowicz an der Ruhr-Universität in Bochum über die gesteuerte Ausrichtung von Stahlfasern in die Arbeit integriert.

2.5.2. 3D-Basaltbewehrung für Tübbinge

Einleitung

In diesem Arbeitspaket wird die Entwicklung einer 3D-Basaltbewehrung als alternative Bewehrungslösung für Tübbinge untersucht. Ziel ist die Substitution von Stahl- durch Basaltbewehrung zur Verbesserung der Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit.

Durchgeführte Arbeiten:

- Literaturrecherche zu Basaltbewehrung, nachhaltigen Baustoffen und modernen Fertigungstechnologien wurde abgeschlossen.
- Es wurde ein Konzept für einen neuartigen 3D-Bewehrungsaufbau entwickelt, bei dem Basaltbewehrungsstäbe und Gewebe spannungsorientiert ausgelegt werden.

- Erste technische Grundlagen zur robotischen Herstellung der 3D-Bewehrung durch Fiber Elements GmbH wurden erarbeitet. Die praktische Umsetzung der Fertigung ist jedoch noch nicht erfolgt.

Erkenntnisse:

- Basaltbewehrung bietet hohe Festigkeit, Dauerhaftigkeit, Widerstandsfähigkeit gegenüber Chloridionen, ist nicht korrosiv, nicht magnetisch und umweltfreundlicher als Stahl.
- Die Entwicklung umfasst experimentelle Studien im Mikromaßstab, Finite-Elemente-Analysen und die Herstellung von 1:1-Prototypen.
- Verzögerungen traten bei der Einrichtung des Prüfaufbaus für mechanische Tests der Basaltroving auf. Die robotische Produktion der Bewehrung ist methodisch vorbereitet, muss jedoch noch praktisch abgestimmt und getestet werden.

Fertigstellungsgrad: ca. 80 %, Grundlagenarbeit abgeschlossen, experimentelle Umsetzung in Vorbereitung.

2.5.3. 3D-Basaltbewehrung für Innenschalenwände

Einleitung

Für die Herstellung einer Prototypenwand aus Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung und alternativer Basaltbewehrung wurde eine vorbereitete Wandöffnung an der Forschungsbaustelle der U2 (Wiener Linien) vorgesehen.

Durchgeführte Arbeiten:

- Erste Überlegungen zum Anschluss und zur Kraftübertragung zwischen Stahl- und Basaltbewehrung wurden getroffen. Die bautechnische Abstimmung mit den ausführenden Unternehmen läuft und eine finale Umsetzungsstrategie muss noch erarbeitet werden.
- Numerische Untersuchungen zur Bestimmung der Zugspannungstrajektorien wurden initiiert, um die Bewehrung spannungsorientiert auslegen zu können.
- Es wurde festgestellt, dass unregelmäßige Anschlussbewehrungen eine präzise Abstimmung der Basaltbewehrung erfordert. Die exakte Lage der Anschlussbewehrung muss vor der Fertigung der Basaltmatten bestimmt werden.
- Erste Fragen zur thermischen Beständigkeit der Basaltbewehrung bei Brandbeanspruchung wurden identifiziert und sind Gegenstand weiterer Untersuchungen.



Abbildung 2.5.3: Wandöffnung zur Herstellung der Prototypenwand in der Ebene –5 des Notausstiegs Quellenstraße beim Bauvorhaben U2 der Wiener Linien

Erkenntnisse:

Die genannten Herausforderungen wurden identifiziert und bilden die Grundlage für die weiteren

Forschungsschritte. Die ersten numerischen Untersuchungen mit einem geeigneten konstitutiven Modell werden derzeit durchgeführt.

Der Projektfortschritt liegt mit **10 % im Plan**, bezogen auf die Gesamtprojektlaufzeit.

2.6. Numerische und experimentelle Untersuchungen

Fertigstellungsgrad: 100%

2.6.1 Bewehrungsmix für Tübbinge

In diesem Arbeitspaket wurden sowohl Kleinprobekörper als auch Tübbinge im Realmaßstab mit unterschiedlichen Faserkombinationen hergestellt und untersucht, um den Einfluss eines hybriden Fasercocktails aus Stahl- und Basaltfasern auf das Tragverhalten zu bewerten.

Durchgeführte Arbeiten:

- Herstellung von drei Tübbingen mit 45 kg/m^3 Stahlfasern (StF T1–T3) sowie drei weiteren Tübbingen mit einem Fasercocktail aus 30 kg/m^3 Stahlfasern und $7,5 \text{ kg/m}^3$ Basaltfasern (StF+BF TB1–TB3).
- Herstellung der Tübbinge erfolgte bei der Katzenberger Fertigteilindustrie GmbH. Alle Probekörper wurden nach 28 Tagen geprüft.

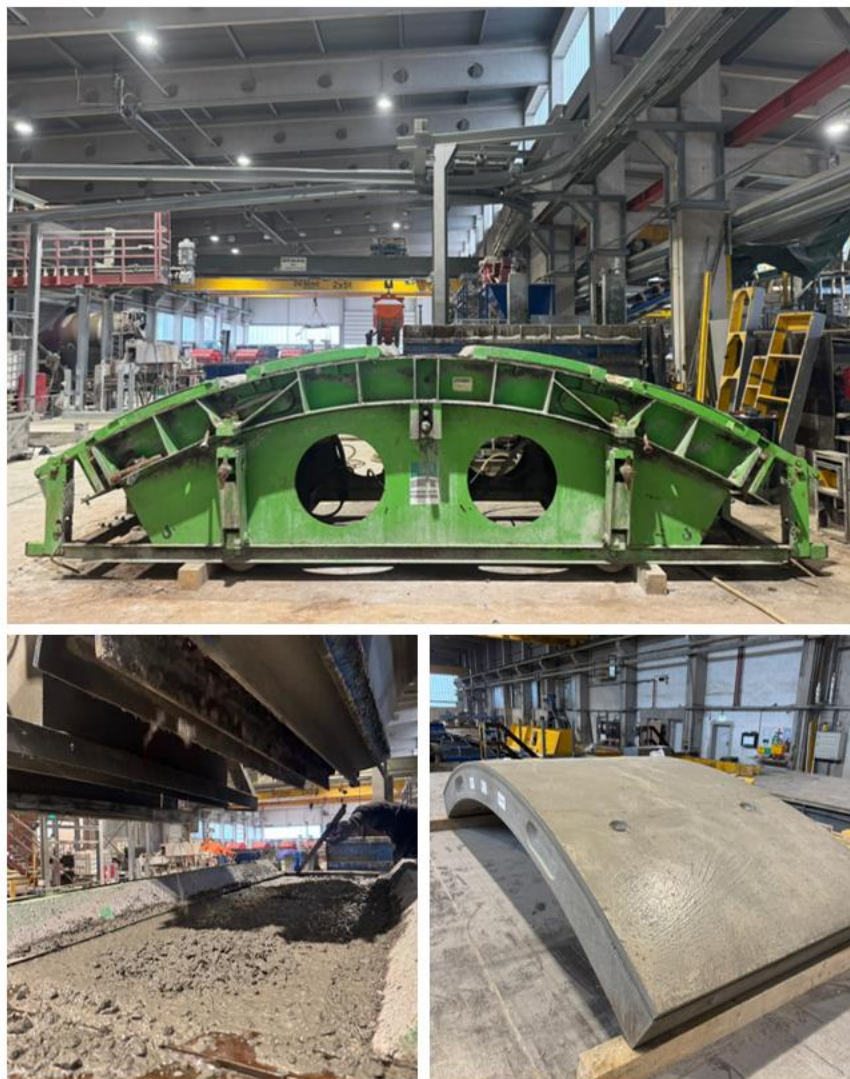


Abbildung 2.6.1: Herstellung der Tübbinge in der Fertigteilanlage der Firma Katzenberger in Wiesing – oben: Schalen, unten links: Betonieren, unten rechts: Tübbing nach Ausschalen

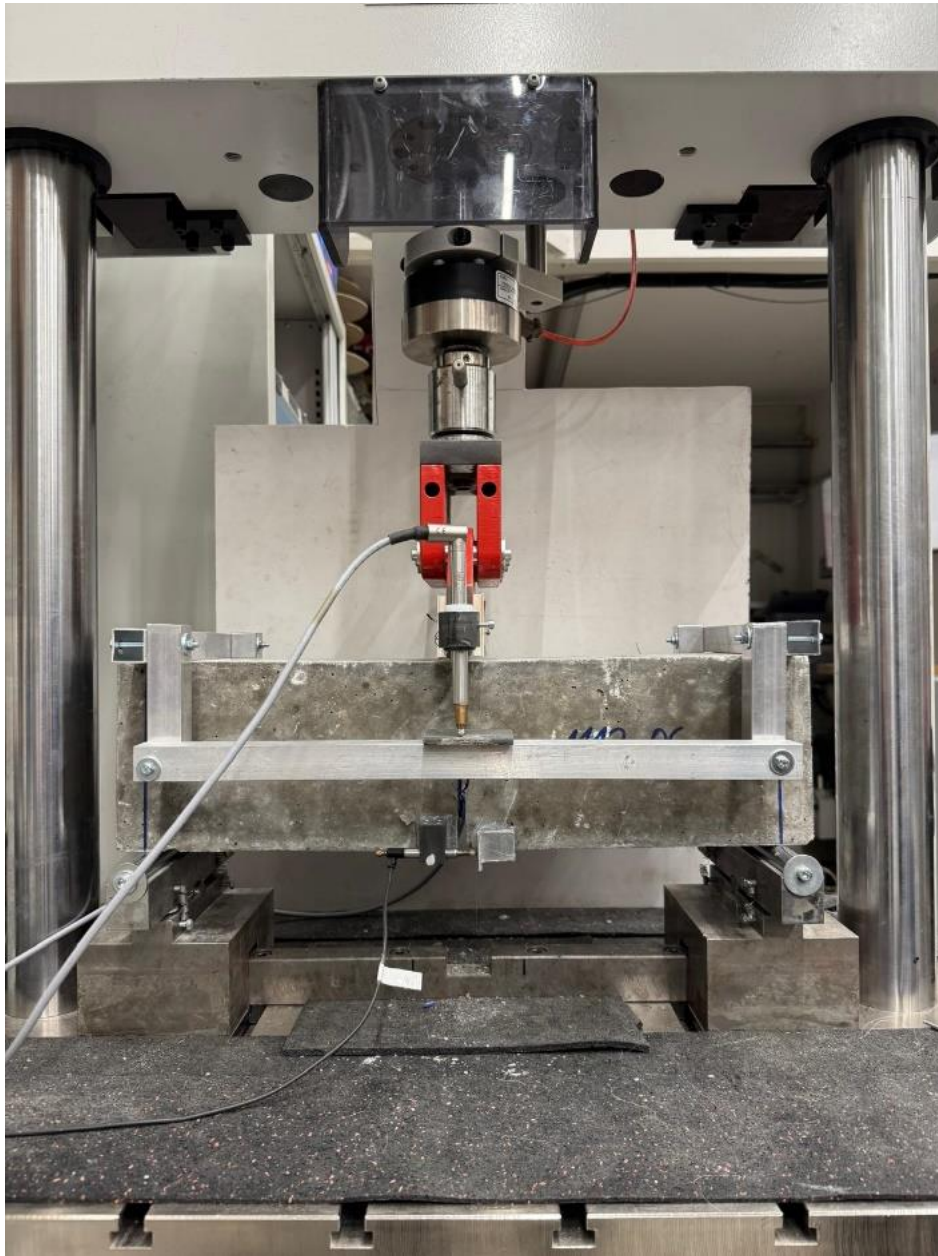


Abbildung 2.6.2: Versuchsaufbau für den 3-Punkt-Biegeversuch an prismatischen Kleinproben mit LVDT-Messung der Rissöffnung (CMOD) gemäß EN 14651

Ergebnisse Kleinproben:

- **Frischbetoneigenschaften:** Mischungen TB2 und TB3 zeigten gute Verarbeitbarkeit (Ausbreitmaße 360–370 mm), TB1 war aufgrund des geringen W/B-Wertes (0,39) zu steif.

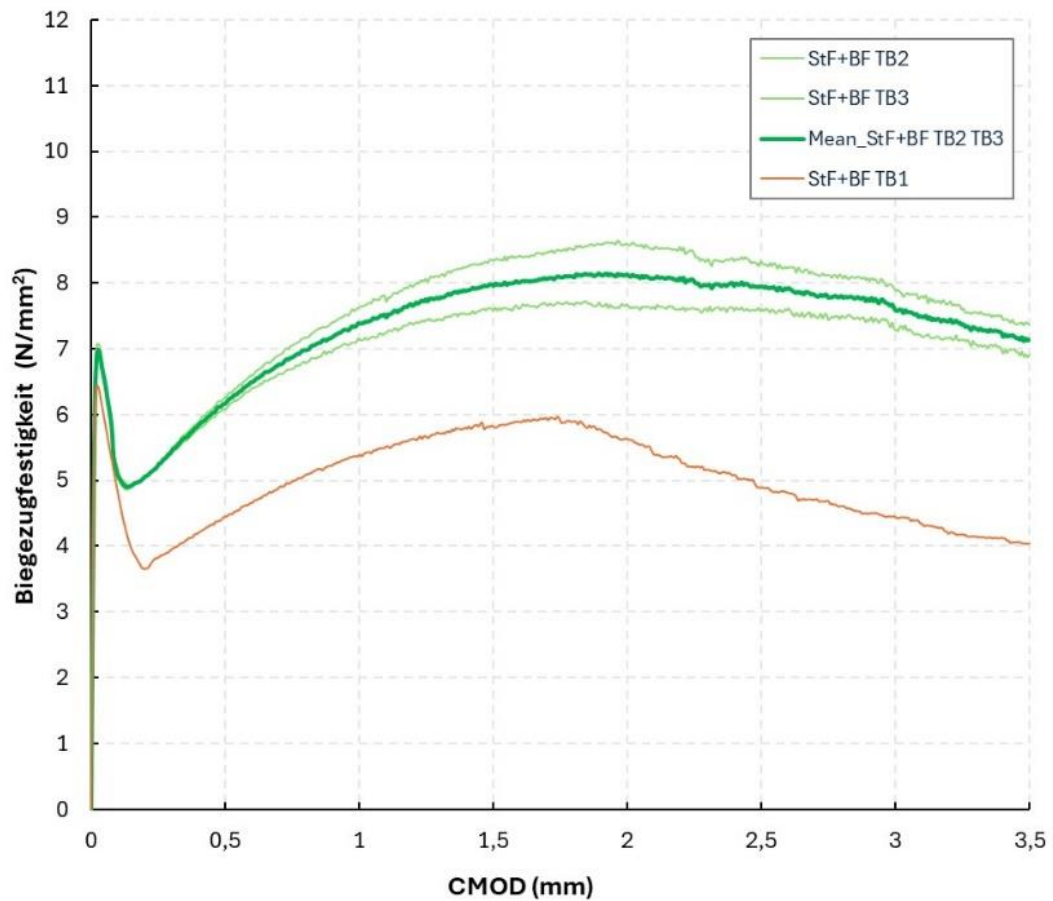


Abbildung 2.6.3: Biegezugfestigkeit (N/mm²)-CMOD (mm) Diagramme der 3-Punkt-Biegezugversuche für die Mischungen StF+BF

- **Druckfestigkeit:** TB1 erreichte höchste Werte (~110 N/mm²) aufgrund dichter Matrix; TB2 und TB3 lagen bei ~90 N/mm².



Abbildung 2.6.4: photogrammetrische Rissaufnahme am Tübbingscheitel

- **Spaltzugfestigkeit:** TB1 wies mit $6,6 \text{ N/mm}^2$ die höchsten Werte auf, was auf höhere Festigkeit und mögliche günstigere Faserorientierung zurückzuführen ist.

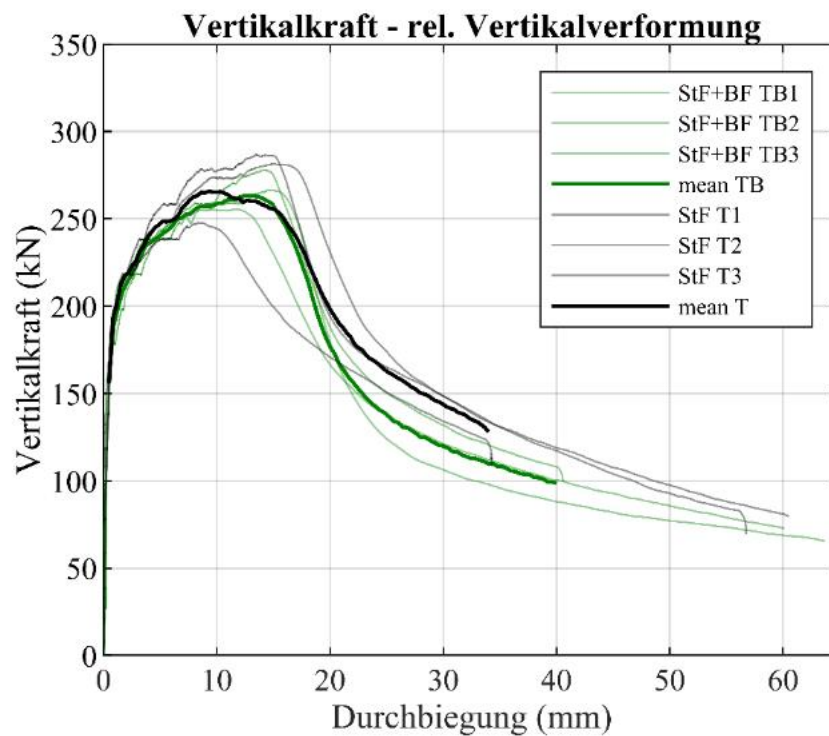


Abbildung 2.6.5: Ergebnis der Tragfähigkeitsuntersuchungen mit Basaltfaserbetontübbingem im Vergleich zu reinen Stahlfaserbetontübbingem hinsichtlich Biegung mit geringer Längskraft

- **Biegezugfestigkeit (3-Punkt-Biegeversuch):** Alle hybriden Mischungen zeigten stabiles Nachrissverhalten. TB2 und TB3 erzielten fr_3 -Werte nahe der Referenzmischung mit 45 kg/m^3 Stahlfasern.

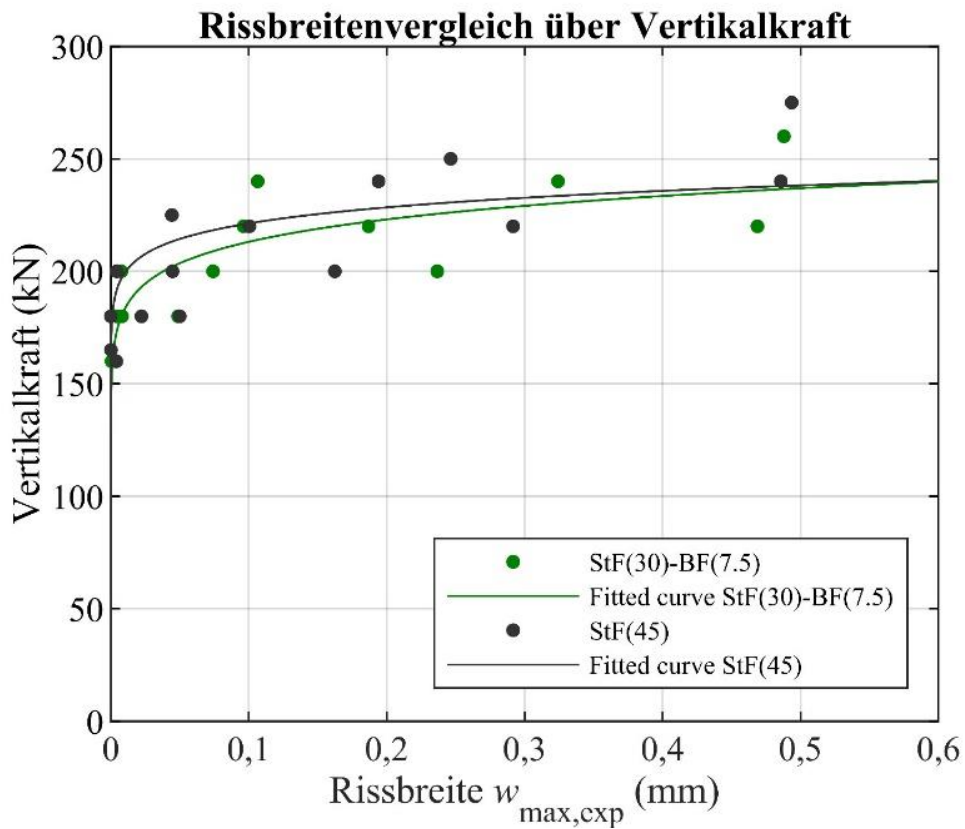


Abbildung 2.6.6: photogrammetrische Rissbreitenanalyse

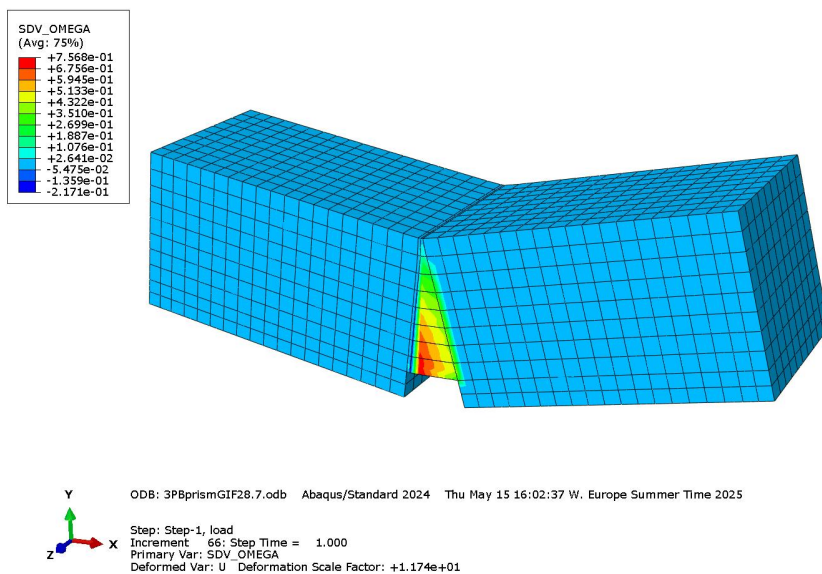


Abbildung 2.6.7: Numerisches Modell eines 3-Punkt-Biegeversuchs mit prismatischem Probekörper in Abaqus; Darstellung der Schädigungsvariable (SDV_OMEGA)

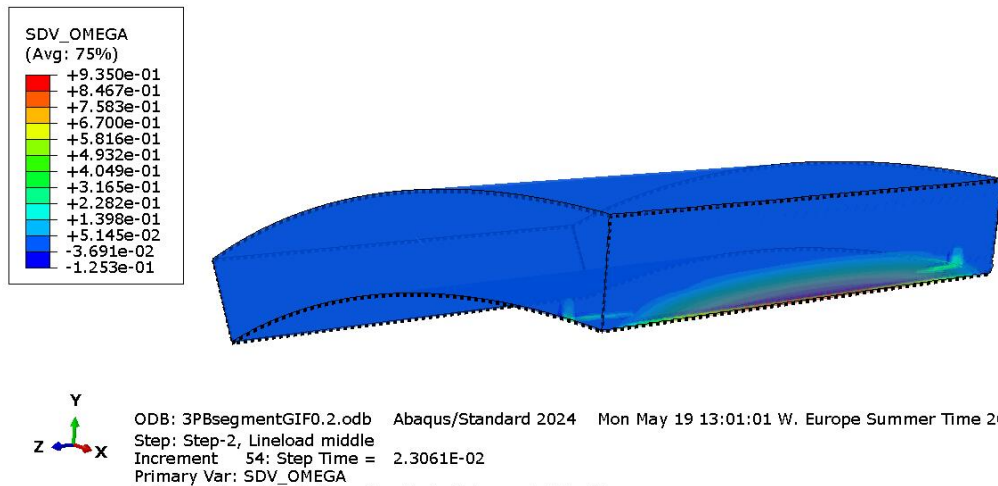


Abbildung 2.6.8: FE-Simulation eines Tübbings mit Darstellung der Schädigungsvariable (SDV_OMEGA).

Ergebnisse Realmaßstab (Tübbinge):

- Großversuche an Tübbingen mit dem hybriden Fasercocktail bestätigten eine nahezu identische Tragfähigkeit im Vergleich zu reinen Stahlfaserbetontübbingen, trotz Reduktion der Stahlfaserzugabe um ein Drittel.



Abbildung 2.6.9: Aufbau des Zugversuchs



Abbildung 2.6.10:) Klemmkeile und Verankerungsgehäuse

Abb. 40: photogrammetrische Rissaufnahme am Tübbingscheitel

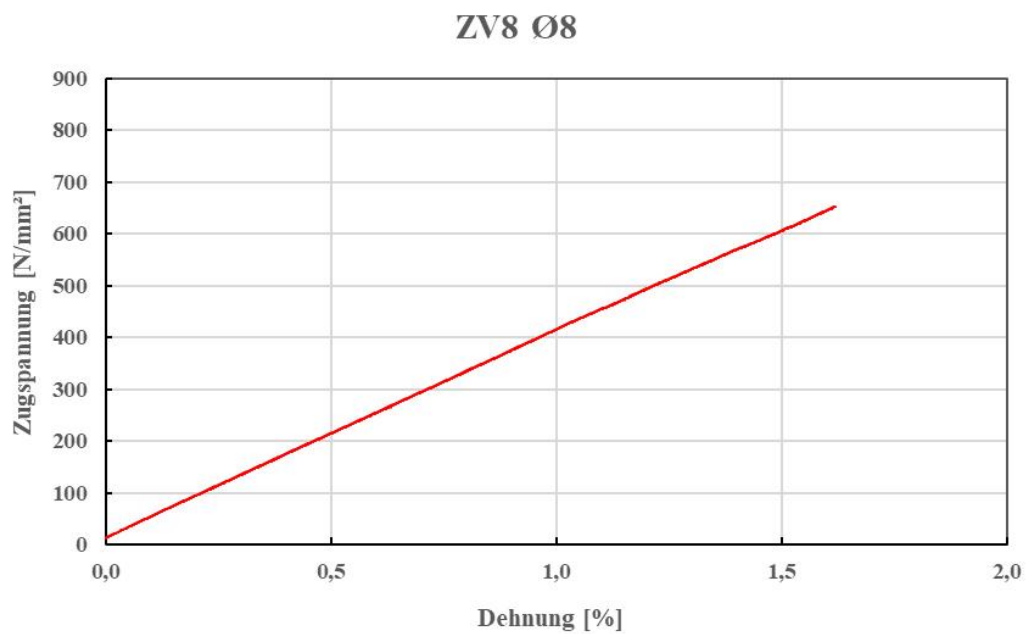


Abbildung 2.6.11: Zugprüfungsdiagramm für einen 8 mm-Stab

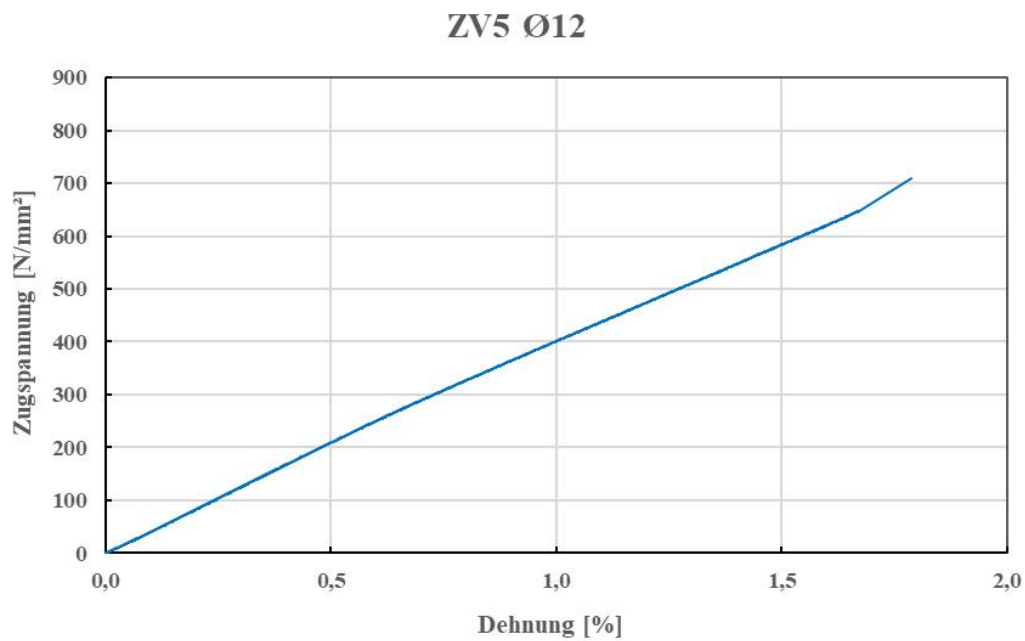


Abbildung 2.6.12: Zugprüfungdiagramm für einen 12 mm-Stab

Abb. 41: photogrammetrische Rissbreitenanalyse (unten)

Numerische Untersuchungen:

Erste FE-Analysen mit dem CDP-Modell (Concrete Damage Plasticity) wurden durchgeführt, zeigen erwartungsgemäß höchste Schädigungen im Kerbenbereich. Weitere Kalibrierungen sind geplant.

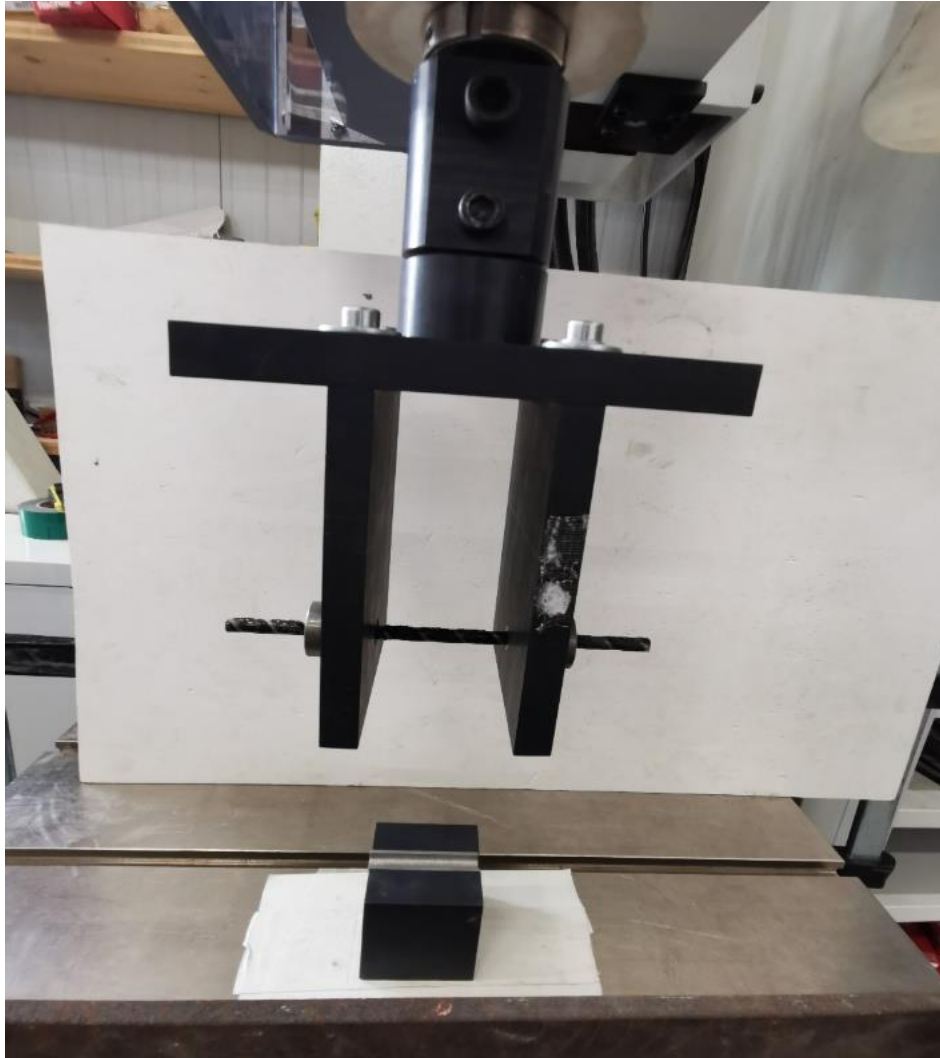


Abbildung 2.6.13: Aufbau der Scherprüfung

SV2 Ø8

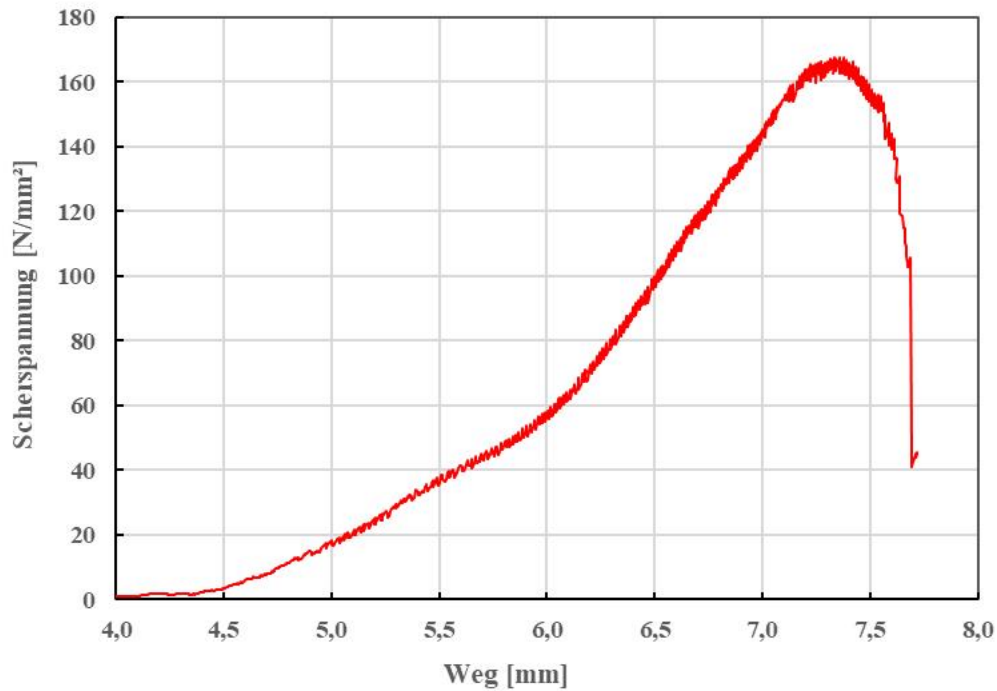


Abbildung 2.6.14: Scherprüfungsdiagramm (8 mm Stab).

Erkenntnisse:

Der Fasercocktail aus Stahl- und Basaltfasern bietet hohes Potenzial, um Stahlfaseranteile zu reduzieren und gleichzeitig mechanische Eigenschaften sowie Rissverhalten beizubehalten.

Fertigstellungsgrad: ca. 65 %, experimentelle Phase fast abgeschlossen, numerische Simulationen in Bearbeitung.

2.6.2. 3D-Basaltbewehrung für Tübbinge

Dieses Arbeitspaket untersucht Basaltbewehrung für Tübbinge in drei zentralen experimentellen Prüfkategorien: Zug-, Scher- und Pull-Out-Tests sowie ergänzende numerische Analysen.

Durchgeführte Arbeiten:

- **Zugversuche:** Basaltstäbe von zwei Herstellern (Deutsche Basalt Faser GmbH, Basalt Fibertec GmbH) mit Ø8 mm und Ø12 mm wurden getestet. Chinesische Stäbe zeigten höhere Festigkeit (Ø8 mm: ~1125 MPa) als deutsche (Ø8 mm: ~677 MPa).

SV1 Ø12

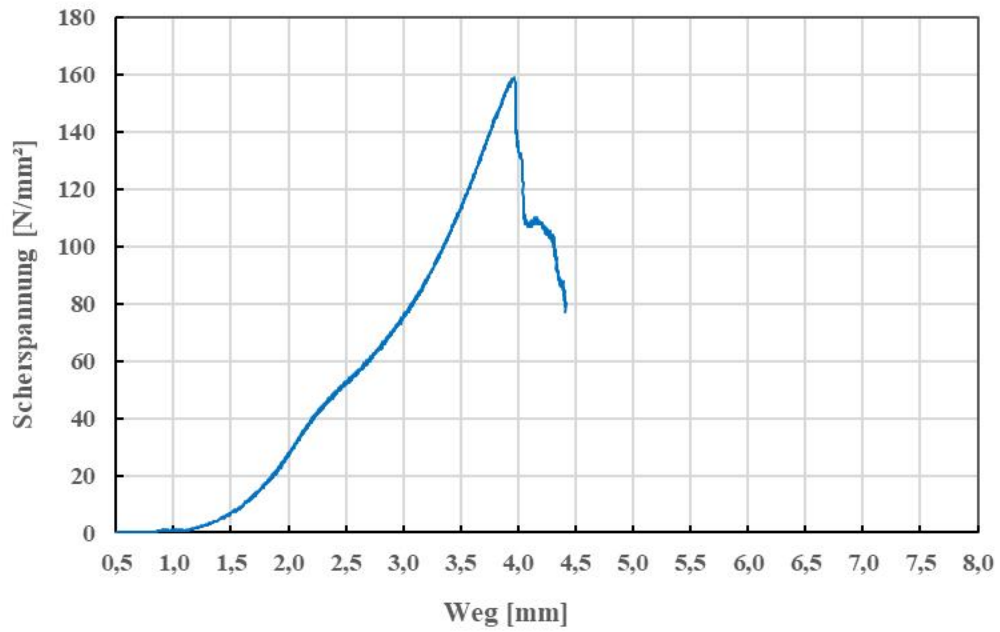


Abbildung 2.6.15: Scherprüfungsdiagramm (12 mm Stab)



Abbildung 2.6.16: Aufbau des Pull-out-Tests (1)



Abbildung 2.6.17: Aufbau des Pull-out-Tests (2)

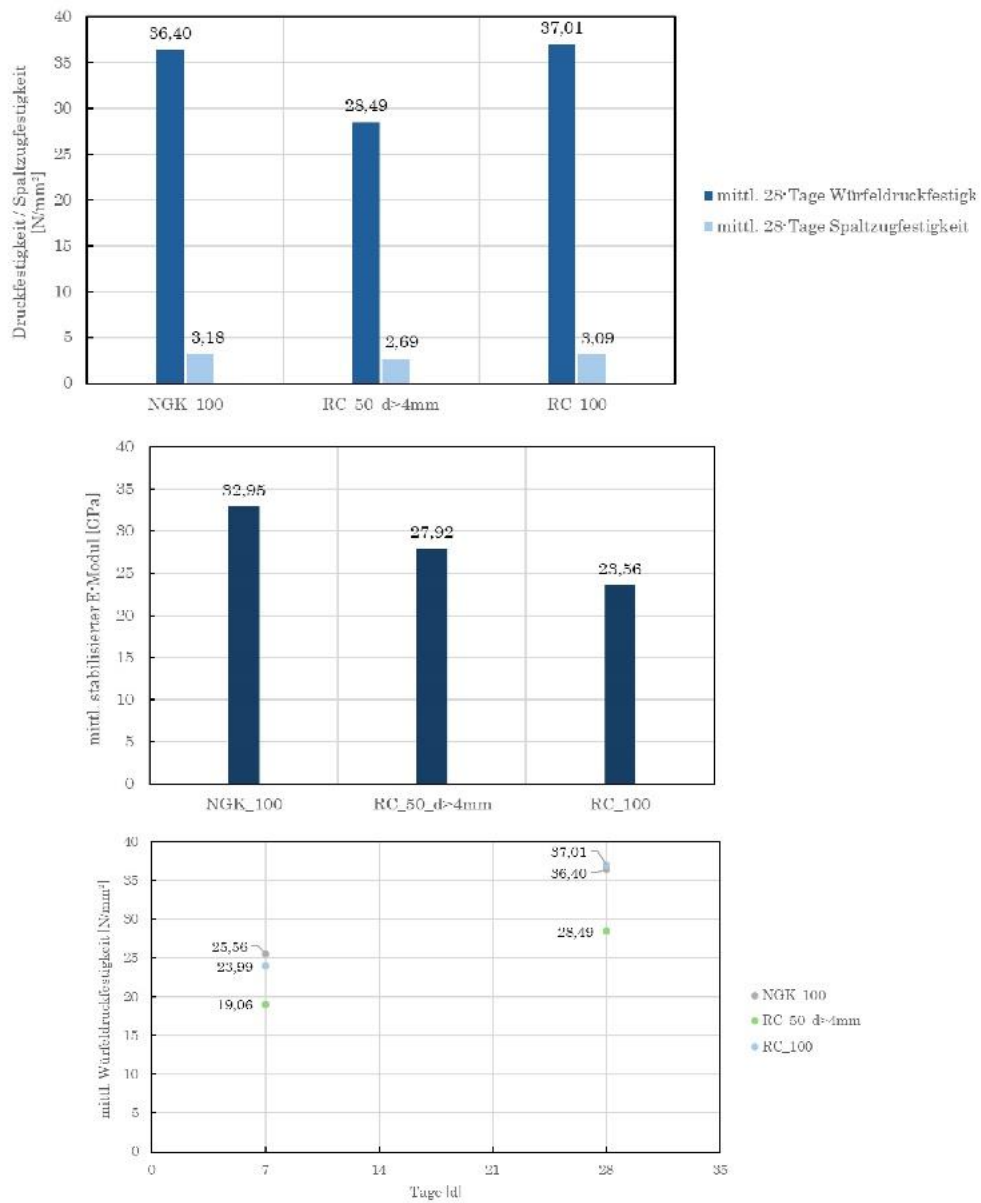


Abb. 53: Mechanische Eigenschaften des Betons

Abbildung 2.6.18: Mechanische Eigenschaften des Betons



Abbildung 2.6.19: ein gewickeltes „3D-Fachwerk“ aus Basaltbündel

- **Scherversuche:** Ø8 mm Stäbe zeigten mittlere Scherfestigkeit von 163 N/mm², Ø12 mm Stäbe geringere Festigkeit mit höherer Variabilität.

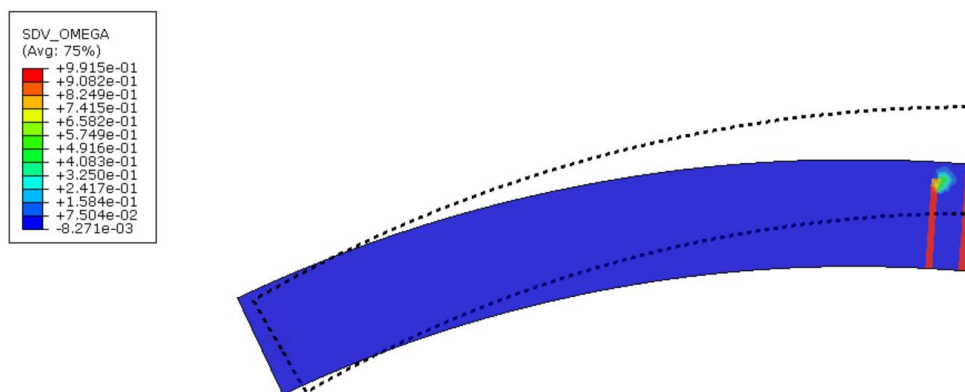


Abbildung 2.6.20: Visualisierung der Rissentwicklung für unbewehrte Segmente

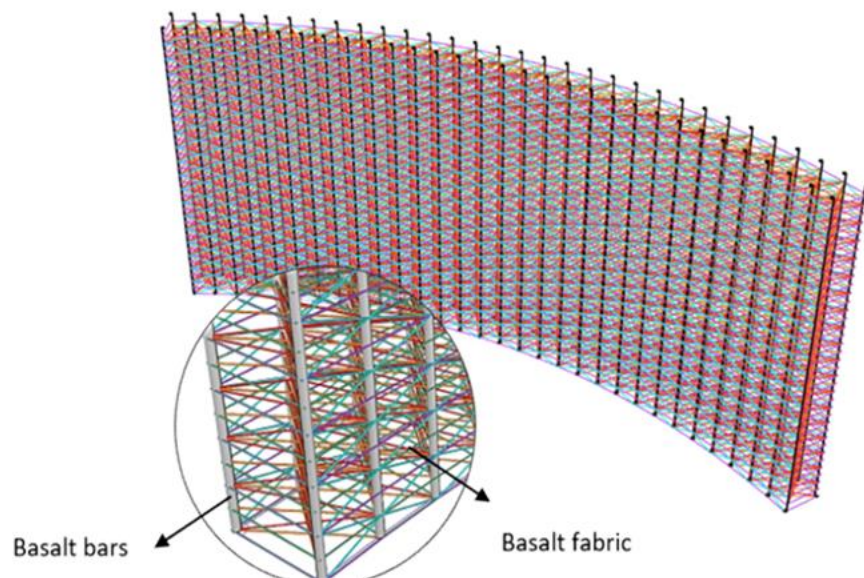


Abbildung 2.6.21: Konzeptionelle Entwicklung des 3D-Basaltbewehrungsmodells

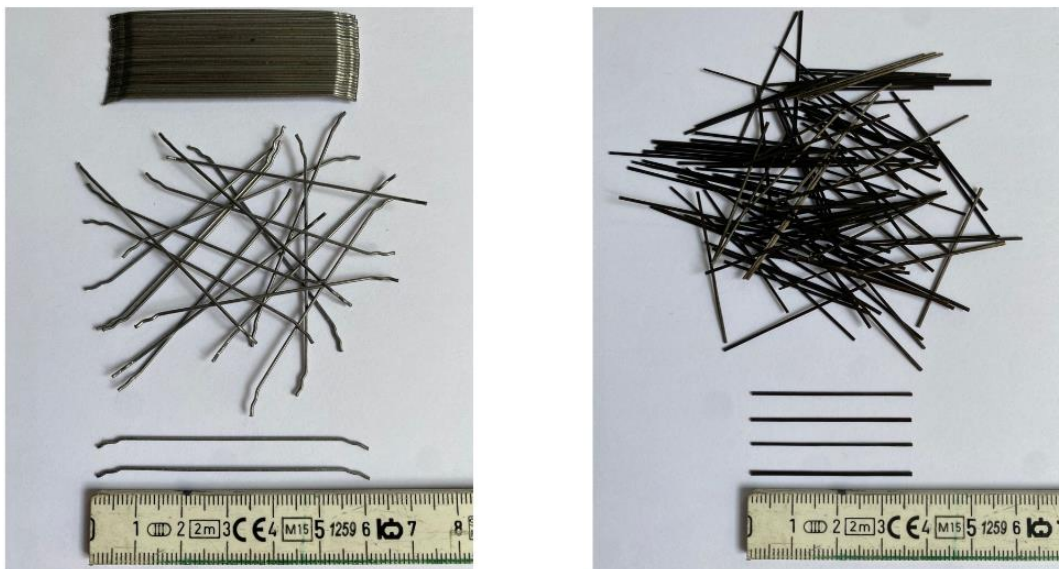


Abbildung 2.6.22: links: Stahlfasern, rechts: Basaltfasern – verwendet zur Herstellung von faserverstärktem Beton im Rahmen des Projekts

- **Pull-Out-Tests:** Verbundfestigkeit bei RC-Betonen lag bei ~70–75 % der Referenz (NGK_100).

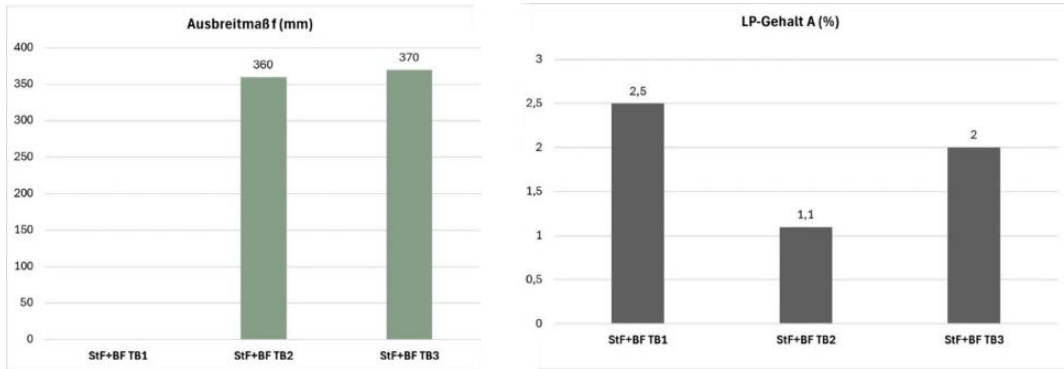


Abbildung 2.6.23: Frischbetoneigenschaften (Ausbreitmaß und Luftporengehalt) der Mischungen mit Stahl- und Basaltfasern (StF+BF TB1–TB3)

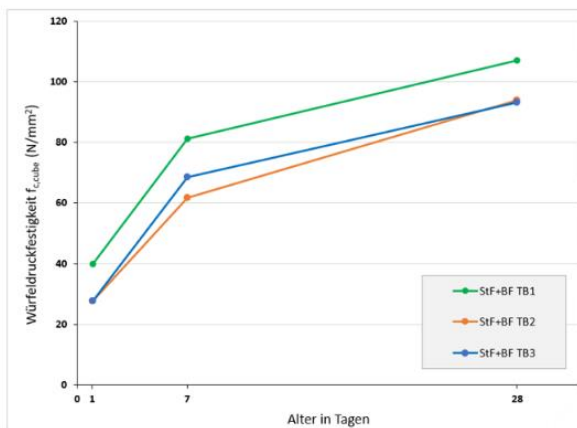


Abbildung 2.6.24: links: Druckfestigkeitsverläufe der Mischungen StF+BF TB1–TB3 nach 1, 7 und 28 Tagen, rechts: Bruchbild eines Würfels unter Druckbelastung

Abb. 51: Aufbau des Pull-out-Tests

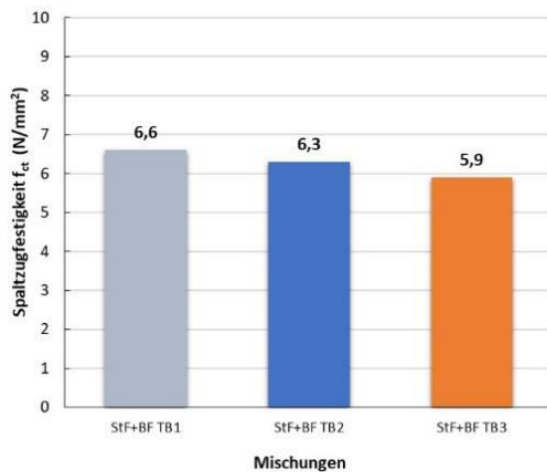


Abbildung 2.6.25: links: Mittelwerte der Spaltzugfestigkeiten der Mischungen StF+BF TB1–TB3 nach 28 Tagen, rechts: typisches Bruchbild eines Zylinders nach Spaltzugversuch

- **Betoncharakterisierung:** NGK_100 zeigte höchste Festigkeiten, RC_50 und RC_100 reduzierten Werte um ~20 %, blieben aber strukturell geeignet.

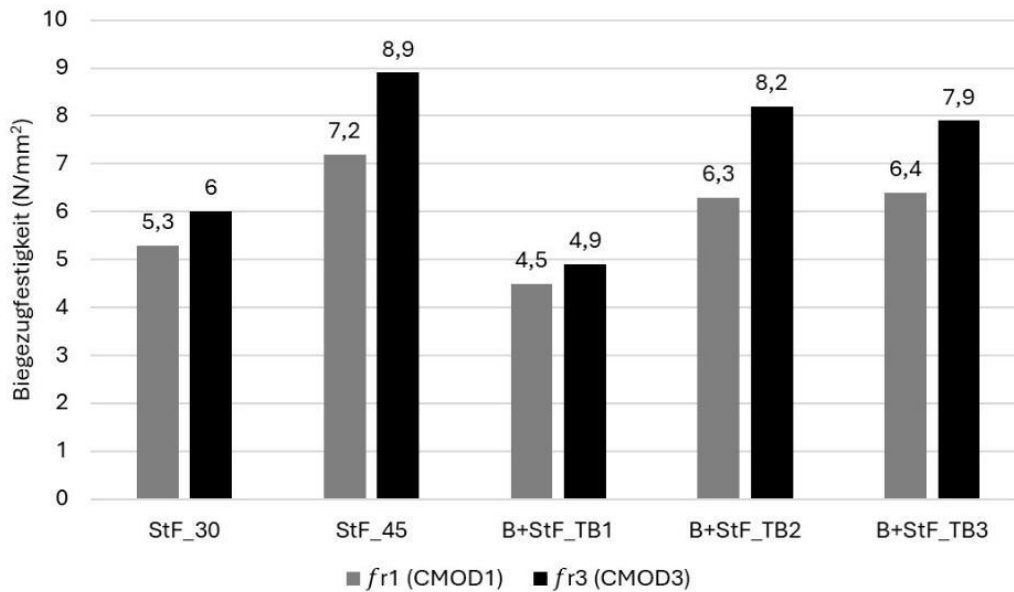


Abbildung 2.6.26: Mittelwerte der Biegezugfestigkeiten bei Rissöffnungen CMOD1 (fr1) 0.5 mm und CMOD3 (fr3) 2.5 mm für alle untersuchten Mischungen

Abb. 53: Mechanische Eigenschaften des Betons

- **Standardbiegebalkenversuche:** Wickelgeometrien von Endlosbasaltfasern wurden geprüft. Ergebnisse dienen der Korrelation zu Großversuchen.



Abbildung 2.6.27: Tübbingprüfstand der Montanuniversität Leoben und



Abbildung 2.6.28: Verankerung

- Numerische Simulationen: Modelle A (unbewehrt) und B (stahlbewehrt) abgeschlossen. Modell C (3D-Basaltbewehrung) in Entwicklung. TBM-Pressenlasten wurden simuliert.

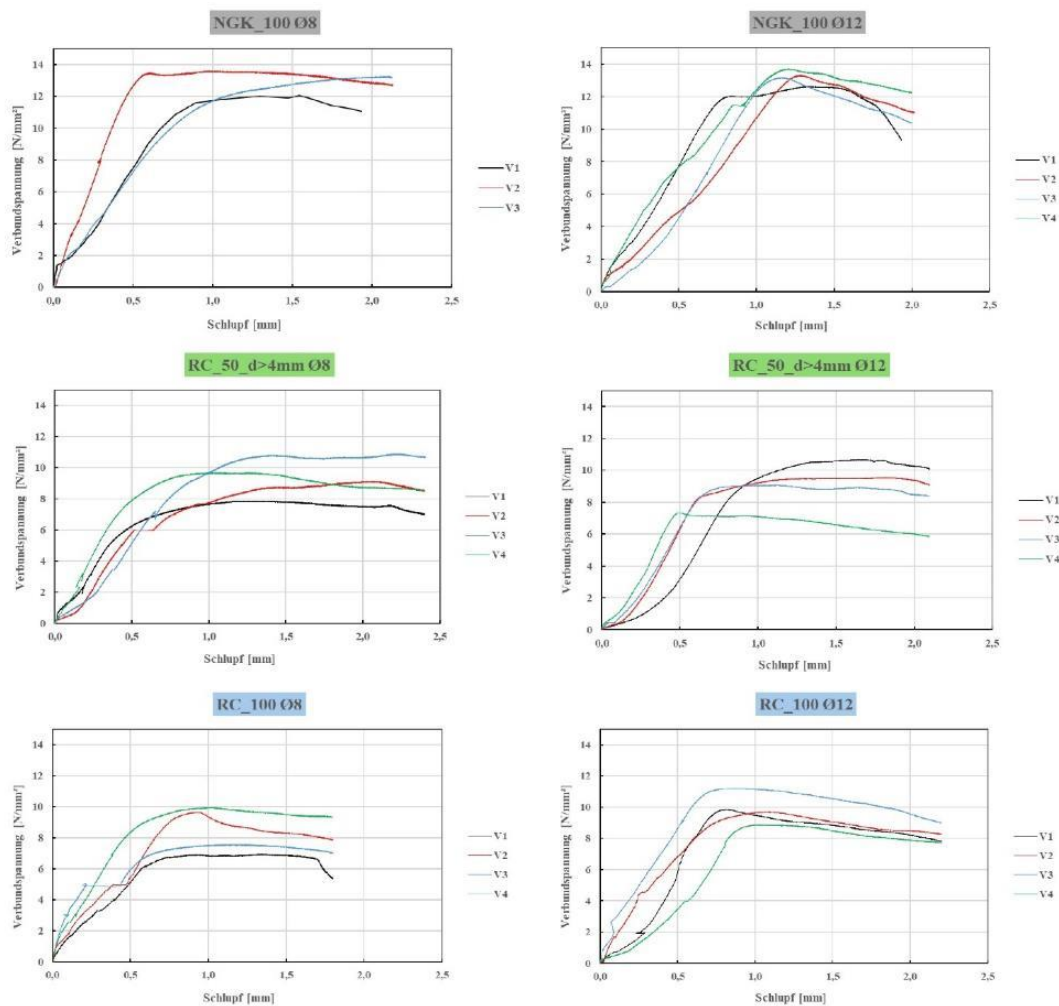


Abbildung 2.6.29: Diagramme der Ausziehversuche

Nr:	Art: 4 Punkt	Querschnitt	Seitliche Ansicht	Draufsicht
1	2 x Rebar (2 x \varnothing 8 mm)			
2	2 x GeoGrid (30 x 30 mm)			
3.1	3 x Wicklung gerade (16 x 4800 tex)			
3.2	1 x Wicklung gekr.			
3.3	2 x Wicklung Fachwerk unten (16 x 4800 tex)			
3.4	2 x 2D Wicklung Fachwerk (Brücke)			
3.5	3D Wicklung			

Abbildung 2.6.30: am Standardbiegebalken mit Basaltbewehrung

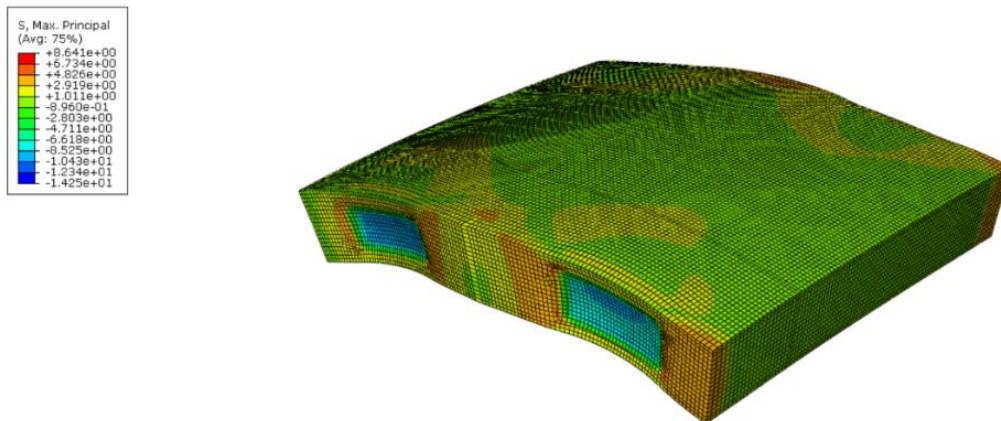


Abbildung 2.6.31: Visualisierung der Anwendungslasten von Tunnelbohrmaschinen.

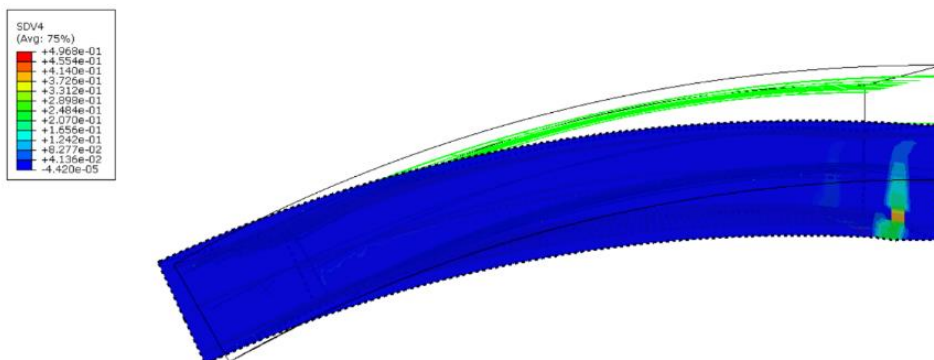


Abbildung 2.6.32: Visualisierung der Rissentwicklung für stahlbewehrte Segmente

{Abbildung 2.6.33}

Erkenntnisse:

Basaltstäbe besitzen Potenzial als Bewehrungsalternative, jedoch zeigen Herstellerabhängigkeit und Verankerungsprobleme Optimierungsbedarf. Numerische Ergebnisse unterstreichen Vorteile spannungsorientierter Bewehrungsanordnungen.

Fertigstellungsgrad: ca. 60 %, experimentelle Tests abgeschlossen, Modell C in Entwicklung, Prototypentests folgen.

2.6.3. 3D-Basaltbewehrung für Innenschalenwände

Für die geplante Prototypenwand mit rezyklierter Gesteinskörnung und Basaltbewehrung wurden erste numerische Untersuchungen und Themenfelder definiert.

Durchgeführte Arbeiten:

- Identifikation zentraler Forschungsthemen: Wasserundurchlässigkeit, Rissverhalten, Verhalten bei erhöhtem Wasserdruck bis 10 bar, Temperaturbeanspruchung bei Brandereignissen, mechanische Eigenschaften unter hoher Temperatur.
- Konzeption komplexer numerischer Mehrphasenmodelle zur Simulation von Beton, Wasser, Luft und Wärme. Erste Vorarbeiten an kleinen Probekörpern sind geplant.

Erkenntnisse:

Die Untersuchungen bilden die Grundlage für nachhaltige Betontechnologien im Tunnelbau mit Basaltbewehrung.

Der Projektfortschritt liegt mit **10 % im Plan**, bezogen auf die Gesamtprojektlaufzeit.

3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten

Im Zuge der praktischen Umsetzung des Arbeitsplans im ersten Projektjahr kam es zu unerwarteten Verzögerungen im Bereich der Materialaufbereitung, welche die planmäßige Durchführung der vorgesehenen Prüfleistungen durch Smart Minerals verhinderten. Ursächlich war ein ungeplanter Ausfall zentraler Brech- und Klassieranlagen bei der Firma Hengl, wodurch die zeitgerechte Bereitstellung definierter rezyklierter Zuschlagsfraktionen nicht möglich war. Da die Prüfarbeiten auf exakt spezifizierte Rezepturen und konstante Materialkennwerte angewiesen sind, wurde in Abstimmung mit allen Projektpartnern entschieden, die betreffenden Leistungen in das zweite Forschungsjahr zu verschieben.

Zur Sicherstellung des Projektfortschritts konnte die Firma Wopfinger kurzfristig einspringen und einen Teil der Aufbereitungsarbeiten übernehmen. Dadurch konnte die Materialverfügbarkeit für die weiteren Forschungsschritte sukzessive sichergestellt werden. Parallel dazu wurden einzelne wissenschaftliche Arbeitspakete – insbesondere an der Universität für Bodenkultur (BOKU) – vorgezogen, um die zeitliche Verschiebung methodisch und inhaltlich zu kompensieren.

Abgesehen von dieser zeitlichen Umstrukturierung ergeben sich keine Änderungen bei den Projektkosten oder der Finanzierung. Die ursprünglich für das erste Jahr vorgesehenen Arbeiten von Smart Minerals werden im geplanten Leistungsumfang im zweiten Forschungsjahr nachgeholt. Die Finanzierung erfolgt im Rahmen des bestehenden Budgets gemäß dem ursprünglichen Förderkonzept.

Die abweichenden Rechnungsdatum der Universität für Bodenkultur ergeben sich einerseits aufgrund einer Falschausstellung der ersten Rechnung und andererseits aufgrund bürokratischer Hürden in deren Rechnungsabteilung. Die Leistungen wurden jedenfalls im Projektzeitraum erbracht.

4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit

Das Projekt trägt wesentlich zu ökologischer, sozialer und wirtschaftlicher Nachhaltigkeit im Tiefbau bei.

Ökologische Nachhaltigkeit

Die Ziele, CO₂-Emissionen zu reduzieren, die Nutzungsdauer zu erhöhen und die Kreislaufwirtschaft zu fördern, wurden im ersten Projektjahr erfolgreich verfolgt:

- **CO₂-Reduktion:** CO₂-reduzierte Betone mit bis zu 22 % geringeren Emissionen (A1) wurden entwickelt. Das Gesamtziel, die CO₂-Emissionen um ein Drittel zu senken, bleibt realistisch.
- **Recyclingzuschläge:** Ersatzraten bis 50 % bei rezyklierter Gesteinskörnung zeigten gute Ergebnisse, wodurch Primärrohstoffe eingespart und Transportemissionen reduziert werden können.
- **Basaltbewehrung:** Erste Ergebnisse zeigen, dass durch Basaltfasern der Stahlanteil um bis zu 30–50 % reduziert werden kann, was weitere CO₂-Einsparungen ermöglicht.

Soziale Nachhaltigkeit

- **Förderung junger Wissenschaftlerinnen:** Drei Doktorandinnen werden in den Bereichen Basaltbewehrung, Bauteiloptimierung und Verbindungstechnologien unterstützt.
- **Gender- und Diversitätsmaßnahmen:** Alle Projektstellen wurden gendergerecht ausgeschrieben und Nachhaltigkeit wird in Lehre und Forschung integriert.

Wirtschaftliche Nachhaltigkeit

- **Reduzierter Ressourcenverbrauch:** Die Verwendung von Recyclingmaterial und Basaltbewehrung verringert die Abhängigkeit von Primärrohstoffen und reduziert Kostenrisiken durch CO₂-Bepreisung.
- **Erhöhung der Nutzungsdauer:** Korrosionsbeständige Basaltbewehrungen verlängern die Lebensdauer von Bauwerken und reduzieren Instandhaltungskosten.
- **Wirkung in fünf Jahren:** Erwartet wird ein Einsatz der Technologien bei 20 % aller Tunnelbauprojekte in Österreich, mit einer CO₂-Einsparung von jährlich 2.000–3.000 t und einer erheblichen Reduktion des Rohstoffverbrauchs.

Beitrag zum Klimaschutz

Das Projekt leistet einen direkten Beitrag zur **Abschwächung des Klimawandels** durch CO₂-Einsparung bei Bindemitteln und Bewehrung. Gleichzeitig wird die **Anpassung an klimabedingte Belastungen** durch langlebige, widerstandsfähige Bauwerke gefördert. Die Ergebnisse verbessern zudem das **Verständnis der Zusammenhänge zwischen Materialwahl, Bauteildesign und Klimawirkung**, was künftige Dekarbonisierungsstrategien unterstützt.