

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 CO ₂ -optimierter Recyclingbeton	6
2.5. Bewehrungsmix und 3D-Basaltbewehrung	15
2.6. Numerische und experimentelle Untersuchungen	24
3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten	31
4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit	31

1. Zielerreichung und Projektstatus

Das im Projektantrag für ggst. die Förderperiode definierte **Kernziel der konkreten Umsetzung eines CO₂-reduzierten Recyclingbetons mit optimiertem Bewehrungsmix**, welcher für eine erhöhte Dauerhaftigkeit für Anwendungen im Tiefbau konzipiert wurde, konnte erfolgreich umgesetzt werden.

Für die Zielerreichung war das konstruktive Zusammenspiel mehrerer Fachdisziplinen erforderlich:

- Betontechnologie zur Entwicklung eines performance-basierten Mischungsansatzes unter der Berücksichtigung von CO₂-Einsparung und Langlebigkeit des Betons mit Fokus auf die Optimierung der Frisch- und Festbetoneigenschaften
- Altbeton-Aufbereitung zur Herstellung einer hochwertigen rezyklierten Gesteinskörnung aus Abbruchbeton von einer Wiener Linien-Baustelle
- Entwicklung eines Bewehrungsmix mit 3D-Basaltbewehrung mit numerischer Modellbildung und Bemessung
- Spannungs-Modellierung mittels thermohygrometrischer Simulationen zur Abbildung der Bauwerksverformungen bzw. der Beherrschung der daraus resultierenden Zwangsspannungen zur Rissvermeidung bzw. -minimierung.

Nach einer Großversuch-Betonage am 4. März 2026 im Betonmischwerk Seibersdorf mit der Herstellung von 9 m³ CO₂-reduzierten Recyclingbeton mit finaler Mischungsrezeptur zur Charakterisierung der mechanischen, physikalischen und chemischen Betoneigenschaften erfolgte am 18. März 2026 die Betonage einer ca. 8 x 4,5 m² großen und ca. 1,4 m mächtigen Betonwand an der Basis des Schachtbauwerks Quellenstraße (ca. 50 m³ Frischbeton aus 6 Fahrmischern). Die Ausführung erfolgte via Pumpbeton mit der Überwindung von etwa 35 m Höhendifferenz sowie ca. 15 m horizontaler Distanz.

Aufbauend auf die erfolgreiche Betonage und die sehr zufriedenstellende, rissfreie Festbetonqualität bleiben die verbleibenden Projektziele weiterhin aktuell und realistisch, da sie eine wesentliche Grundlage für die nachhaltige Transformation des Tiefbaus darstellen.

Im Bereich der Materialaufbereitung wurde eine großtechnische Aufbereitung von rund 140 t Betonabbruchmaterial durchgeführt. Die Qualität der rezyklierten Gesteinskörnungen wurde durch Nassaufbereitungs-Techniken derart verbessert, dass diese für Infrastrukturbetone geeignet sind. Das war eine wesentliche Voraussetzung zur Umsetzung des CO₂-reduzierten Recyclingbetons.

Im Bereich der Betonentwicklung wurden Betone mit Ersatzraten bis 100 % untersucht, wobei für die Zielsatzquote von 50 % ≥ 4 mm zufriedenstellende Frischbetoneigenschaften, eine hohe Druckfestigkeit sowie sehr gute Dauerhaftigkeitseigenschaften erzielt werden. Die Betone erreichten Wassereindringtiefen unterhalb der geforderten Grenzwerte (7 bar), welche auch bei weiteren Versuchen mit 10 bar Wasserdruck

eingehalten werden konnten. Damit konnte das Ziel der Entwicklung von Betonen mit hohem Recyclinganteil und emissionsarmen Bindemitteln für den Infrastrukturbereich sogar mit geringer Wasserdurchlässigkeit erreicht werden.

Für die CO₂-reduzierte Bindemitteloptimierung wurden performancebasierte Konzepte mit emissionsarmen C3A-freien Zementen und Kalksteinmehlen zur Herstellung von CO₂-optimierten Weißen Wannen und Tunnelinnenschalen entwickelt. Endprodukt ist ein CO₂-reduziertes Bindemittel mit 50 % rezyklierter Gesteinskörnung ≥ 4 mm und einem Klinkeranteil von < 50 %, was einem CEM VI-äquivalent entspricht. Durch die erfolgreiche Versuchsбетonage wurde das Ziel, CO₂-reduzierte Bindemittelkombinationen unter Einsatz von Recycling-Gesteinskörnung anwendertauglich herzustellen, erfüllt.

Hinsichtlich des innovativen Bewehrungsmixes wurden Untersuchungen zur Kombination von Stahlfasern und Basaltfasern sowie zur Entwicklung einer dreidimensionalen Basaltbewehrung durchgeführt. Bei der Versuchsбетonage erfolgte die Verwendung einer Kombination aus innovativer Basaltbewehrung aus Stäben, welche mit der Stahlbewehrung im Verbund steht.

Das Projektziel der Entwicklung einer innovativen Bewehrung zur Reduktion des Stahlanteils konnte damit erfolgreich durchgeführt werden. Die Verbundeigenschaften wurden im Laufe des Forschungsjahres bereits im Zuge von Laborversuchen nachgewiesen, weitere Versuche dazu folgen an Klein-Versuchskörpern, welche im Rahmen der Großбетonage hergestellt wurden.

Im Bereich der Zwangbeanspruchung und Rissneigung konnten die thermohygro-mechanischen Nachweise an realen Spannungs- und Temperaturverläufen durchgeführt und in die bestehenden Materialmodelle übergeführt werden.

Highlights des zweiten Jahres sind:

- Herstellung von Recyclingbetonen mit bis zu 100 % Ersatzanteil und hoher Dauerhaftigkeit
- Entwicklung CO₂-reduzierter Bindemittelkonzepte unter Beibehaltung der Ziel-Festigkeiten
- Zwangrahmenversuch mit Recyclingbeton zur Validierung der Materialmodelle
- Monitoring der Versuchswand

Insgesamt befindet sich das Projekt auf Kurs; die bis dato gesetzten Ziele wurden erreicht. Alle Arbeitspakete konnten planmäßig bearbeitet werden. Die praktische Umsetzung eines Betonteils auf der Baustelle zeigt, dass die angestrebte Entwicklung eines nachhaltigen, CO₂-optimierten

Recyclingbetonsystems für massive Infrastrukturbauteile realistisch und technisch umsetzbar ist. Dies alles konnte nur durch eine sehr wertschätzende und hoch professionelle Zusammenarbeit zwischen allen Partnern erreicht werden.

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 ggst. Forschungsjahr gab es keine nennenswerten Abweichungen oder Veränderungen im Projektablauf. Der Projektfortschritt liegt mit **66 % im Plan**, bezogen auf die Gesamtprojektlaufzeit; es wurden alle Arbeitsschritte gemäß Plan erarbeitet. Es wurden keine wesentlichen Änderungen vorgenommen.

2.2. Wissenschaftliche Leitung

Fertigstellungsgrad: 100%

Die wissenschaftliche Leitung des Projekts erfolgte im Berichtszeitraum in enger Abstimmung zwischen Konrad Bergmeister (BOKU), 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 wissenschaftlichen Arbeiten verliefen insgesamt in ggst. Forschungsjahr ohne wesentliche Abweichungen. Der Projektfortschritt liegt mit **66 % im Plan**, bezogen auf die Gesamtprojektlaufzeit. Alle Arbeitsschritte wurden gemäß Plan erarbeitet. Es wurden keine wesentlichen Änderungen vorgenommen.

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. Dieses Material diente sowohl zur Durchführung der Versuchsbetonagen im Labormaßstab, als auch zur Herstellung des CO₂-reduzierten Recyclingbetons mit optimiertem Bewehrungsmix im Schachtbauwerk der Wiener Linien.

2.3.2. Charakterisierung Recycling-Gesteinskörnung im Festbeton

Im vorangegangenen Forschungsjahr erfolgte bereits die Charakterisierung der RC-Gesteinskörnung selbst sowie deren Einfluss auf die Frischbetoneigenschaften.

In ggst. Forschungsjahr konzentrierten sich die Arbeiten auf die Festbetoneigenschaften von Beton mit unterschiedlichen Austauschraten (Austausch natürliche Gesteinskörnung durch Betonrecycling gemäß Abbildung 2.3.1). Diese Untersuchungen wurden von der BOKU Wien sowie der Smart Minerals GmbH durchgeführt.

Bezeichnung der Betonsorte	Anteil an natürlicher Gesteinskörnung	Anteil an <u>rezyklierter</u> 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 2.3.1: 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

Durchgeführte Arbeiten:

- Untersuchung von fünf Betonsorten mit unterschiedlichen Ersatzraten an rezyklierter Gesteinskörnung (0–100 %) und deren Einfluss auf die Festbetoneigenschaften
- Wasserundurchlässigkeit der Betonsorten IB_1 bis IB_5 gemäß ÖNORM B 4710-1
- Wasserdurchlässigkeitsprüfungen bei erhöhtem Wasserdruck von 10 bar wurden für die Betonsorten IB_1 und IB_2 durchgeführt. Auch hier konnte ein Maximalwert für XW2 von 20 mm unterschritten werden.

- Erfassung der Gaspermeabilität (Gasdurchlässigkeit) der o.a. Betonsorten und Vergleich mit den ermittelten Wasserdurchlässigkeiten.
- Folgende ergänzende, speziellere Versuche zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit der entwickelten Recyclingbetone wurden von der Smart Minerals GmbH durchgeführt und in die Baustoffbeurteilung miteinbezogen:
 - Abschätzung der Lebensdauer gemäß SIA 262/1
 - Prüfung des Karbonatisierungswiderstandes gemäß ÖNORM EN 12390-12
 - Bestimmung des Chloridwiderstandes von Beton gemäß ÖNORM EN 12390-11
 - Prüfung zur Beurteilung eines lösenden Angriffs auf Beton (Expositionsklasse XA1L) gemäß ÖNORM B 4710-3
 - Prüfung des Sulfatwiderstands von Beton gemäß SIA 262/1
 - Prüfung zur Beurteilung einer gleichwertigen Beständigkeit für die Frostklasse XF3 gemäß ÖNORM B 4710-3
 - Beurteilung der Frostklasse für die Eignung als Beton der Expositionsklasse XF4 gemäß ÖNORM B 4710-3

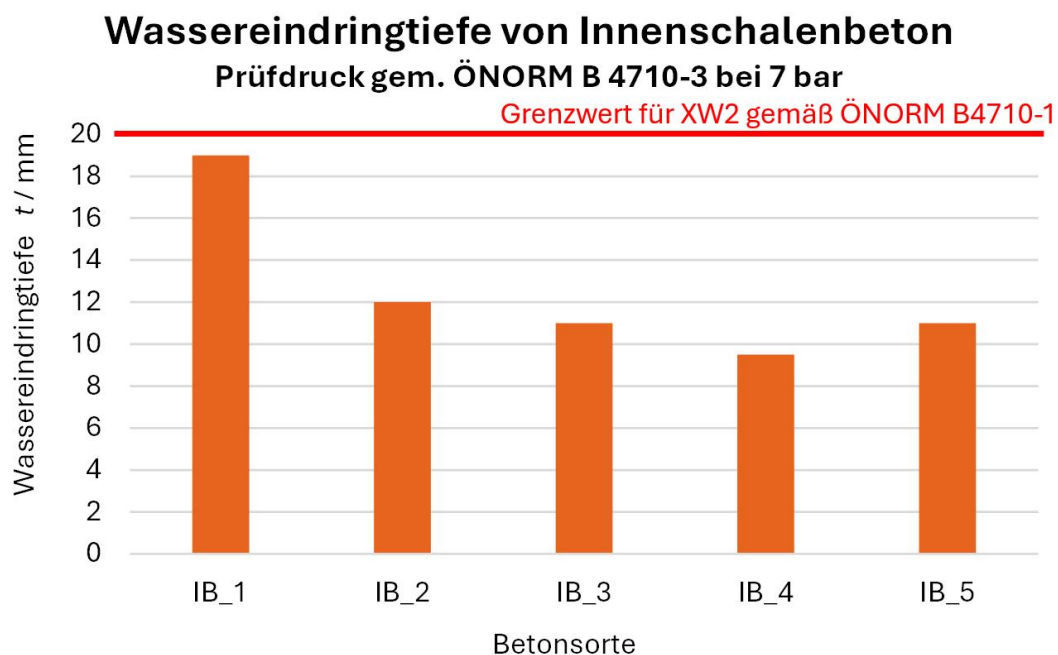


Abbildung 2.3.2: Wassereindringtiefe der einzelnen Betonsorten bei 7 bar Wasserdruck Gaspermeabilität der hergestellten Betonsorten

Erkenntnisse:

- Alle Mischungen lagen unterhalb des Grenzwertes der Wassereindringtiefe von 20 mm.
- Mit steigender Ersatzrate steigt konträr dazu die Gasdurchlässigkeit geringfügig an.

2.3.3. Monitoring der Versuchswand (Wiener Linien Quellenstraße)

Die in Punkt 2.4 beschriebene Prototypenwand wurde von mit einem Temperaturmonitoringsystem ausgestattet. Ziel war es, die Temperaturentwicklung im Beton feststellen zu können, um die Rissgefahr während des Aushärtvorgangs zu kontrollieren und um die thermo-hydro-mechanische Simulation zu verifizieren. In Abbildung 3 ist der Temperaturverlauf während des Aushärtvorganges dargestellt. Es wurden 7 Temperaturfühler eingebaut.

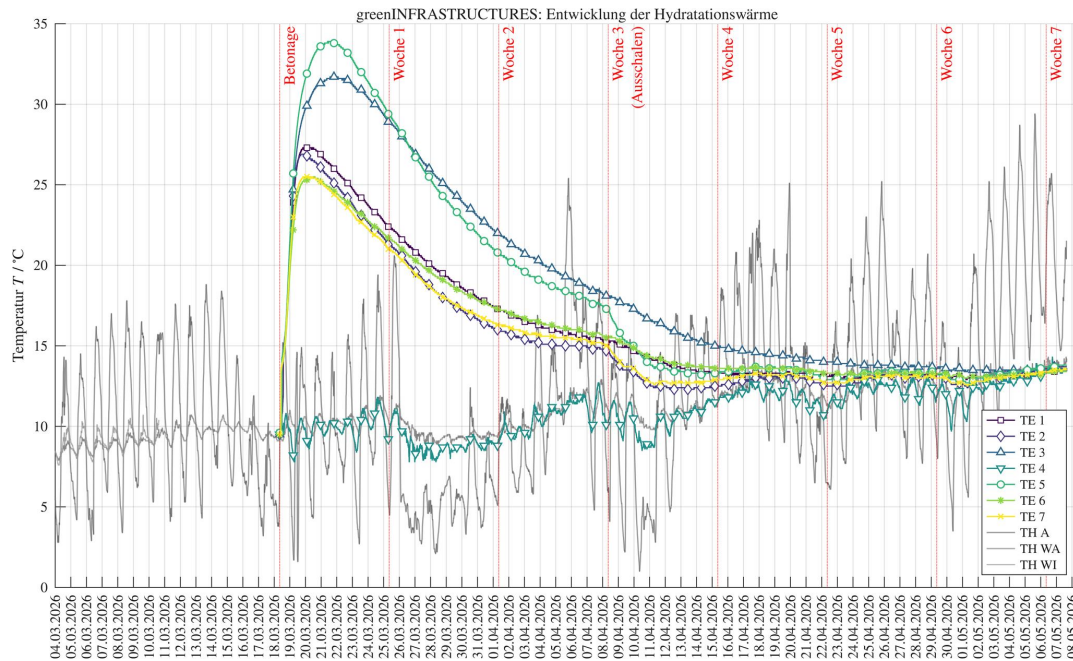


Abbildung 2.3.4: Temperaturverlauf während des Aushärtvorganges der Prototypenwand

Neben dem Temperaturmonitoring wurden Permeabilitätsmessungen durchgeführt.

In Abbildung 4 werden die Messergebnisse dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Prototypenwand ein dichteres Gefüge (geringerer kT -Wert) aufweist als die nebenstehenden Wände (höherer kT -Wert). Die Werte wurden 28 Tage nach Betonage gemessen. Eine weitere Messung soll 90 Tage nach der Betonage durchgeführt werden.

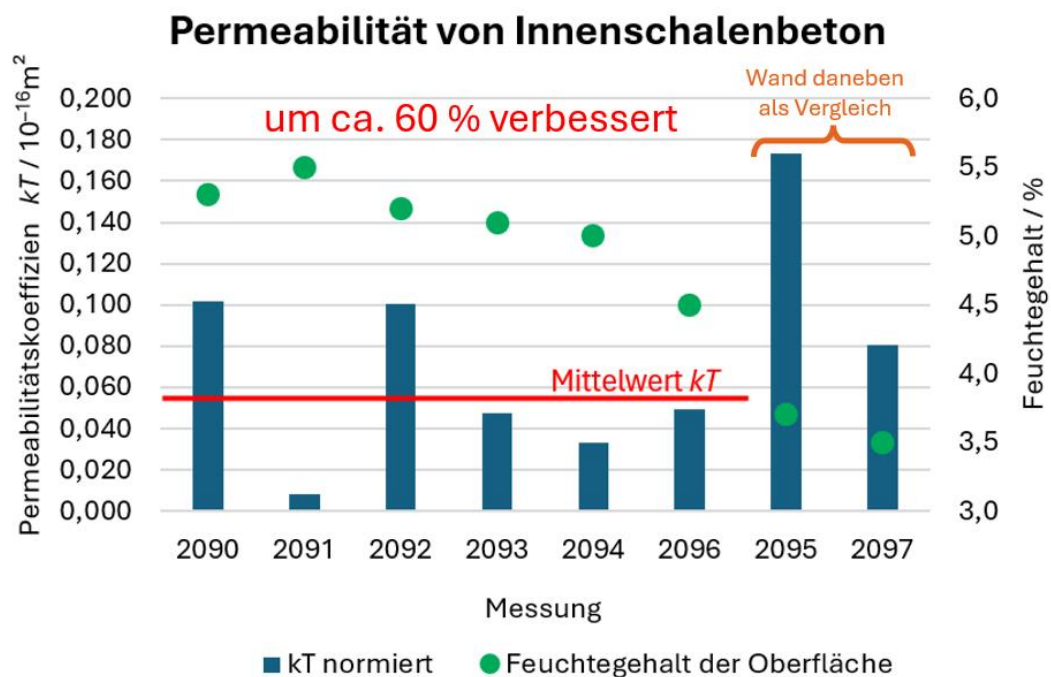


Abbildung 2.3.5: Permeabilität der Versuchswand

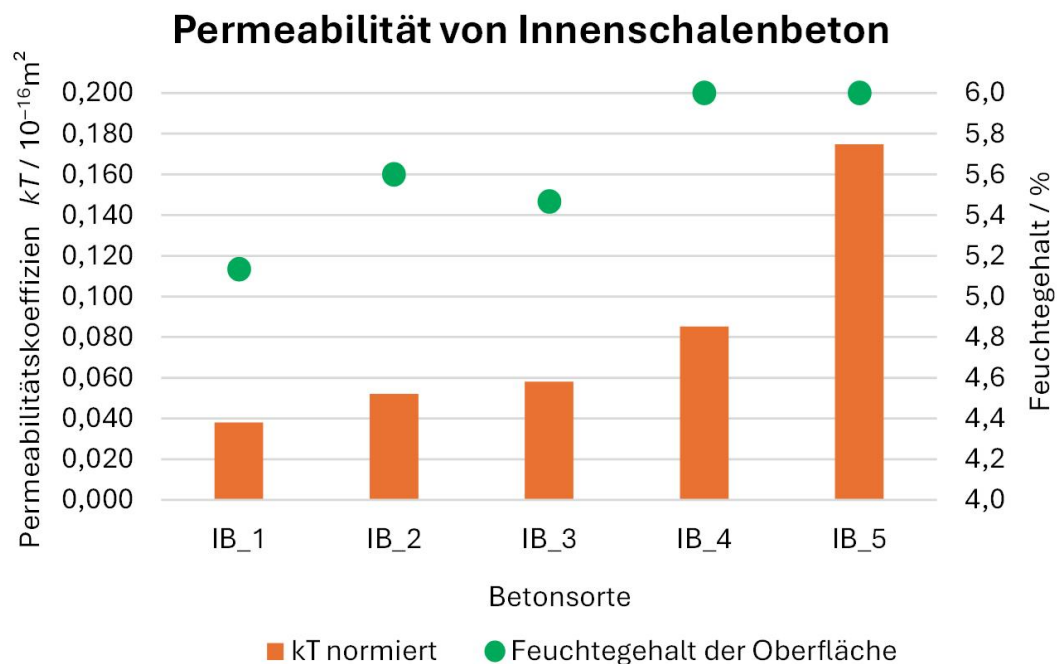


Abbildung 2.3.3: Gaspermeabilität der hergestellten Betonsorten

Erkenntnisse:

Die Ergebnisse zeigen, dass Recyclingbetone mit angepasster Rezeptur ein ausgesprochen dichtes Gefüge zeigen und damit eine vergleichbare oder geringere Wasserdurchlässigkeit aufweisen, was auf eine hohe Dauerhaftigkeit der untersuchten Betonsorten mit hoher Austauschrate schließen lässt. Was die Gaspermeabilität betrifft, so liegen alle untersuchten Rezepturen unter den max. Werte zur Eignung als XF2 bzw. XF4 Beton (Grenzwert $kT = 0,5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$).

Der Projektfortschritt dieses Arbeitspaketes liegt mit **100 % im Plan**, bezogen auf die Gesamtprojektlaufzeit.

2.4. Rissneigungs- und CO₂-optimierter Recyclingbeton

Fertigstellungsgrad: 100%

Optimierung des Feinstoffleims & Betonkonzepte (2. FJ)

Die Optimierung des Bindemittelleims und des CO₂-optimierten Recyclingbetons („CO₂r-RB“) baut auf Vorgangsweise und Ergebnissen des 1. Forschungsjahrs auf. Im 2. Jahr wurde der CO₂r-RB (i) im großmaßstäblichen Zwangsrahmen an der TU Graz hinsichtlich Rissrisiko untersucht und materialtechnisch charakterisiert sowie (ii) prototypisch im Werk Seibersdorf der Wopfinger Transportbeton GmbH (WTB) produziert, geprüft und bei der U2-Erweiterung der Wiener Linien (Notausstieg Quellenstraße) eingebaut.

Erreicht wurde:

(1) Der CO₂r-RB erfüllt alle funktionalen Grundanforderungen an einen Infrastrukturbeton C25/30 (90)

BS1/XW2/XAT-B/XF/XC2 F52: ausreichende Verarbeitbarkeit (Konsistenz, Pumpbarkeit), Design-Festigkeit von mind. 39 N/mm² nach 90 d sowie Dauerhaftigkeitsindikatoren, insbesondere Wassereindringtiefe < 20 mm.

(2) Für zwangsbeanspruchte Tunnelbauteile liegen die maßgebenden Materialparameter vor: zeitliche Entwicklung von Druck- und Zugfestigkeit, E-Modul, Schwinddehnungen sowie Temperaturverlauf während der Erhärtung. Verglichen wurde mit dem im 1. Jahr charakterisierten Standardbeton BS1A gemäß ÖBV-Richtlinie „Innenschalenbeton“ („REF-BS1A“).

(3) Das Treibhauspotenzial (GWP) wurde gegenüber REF-BS1A für Tunnelinnenschalen um rund 25 % reduziert. Zudem sank der Primärrohstoffverbrauch, da 50 % der groben natürlichen Gesteinskörnung (ca. 25 % der gesamten Gesteinskörnung) durch rezykliertes Material ersetzt wurden.

Betonrezepturen und Kennwerte

Tabelle 1 vergleicht REF-BS1A mit dem CO₂r-RB in zwei Varianten. Der Beton enthält 50 % rezyklierte grobe Gesteinskörnung RB-A1 bezogen auf 4–32 mm. Diese wurde aus Abbruchmaterial eines Tunnelwiderlagers der Fa. WTB nass aufbereitet. An der TU Graz wurde CO₂r-RB-TUG mit klinkerreduziertem Bindemittel nach dem „Mikro-Füller/Eco-Füller“-Konzept entwickelt [1].

CEM I SR0 wurde durch AHWZ sowie abgestufte Kalksteinmehle (KSM) ersetzt; die Gesamtsieblinie wurde zusätzlich mit Feinsanden optimiert. Das Bindemittel weist einen Klinkeranteil < 50 % auf („CEM VI-äquivalent“). Tabelle 2 enthält die Referenzmischung BS1A, die an der TU Graz entwickelte Ausgangsmischung und die für WTB angepasste Mischung.

Bezeichnung	REF-BS1A	CO ₂ r-RB-TUG	CO ₂ r-RB-WTB Beton für VV und U2
	kg/m ³		
CEM I 42.5 N SR0	240	160	180
AHWZ	80	120	120
KSM F		40	
KSM D (Betoflow D)		30	
KSM HP (Betocarb HP)			70
GK 0/1 rund		240	230
GK 0/2 kantig	350		
GK 0/4 rund	715	685	695
GK 4/8 rund	154	135	135
GK 8/16 rund	232	100	110
GK 16/32 rund	480	220	225
RCA 4/16 gebrochen		235	225
RCA 16/32 gebrochen		220	205
FM WTB Plast 100/3(S)	1.40		
FM WTB Prime 100		0.14	0.74
FM WTB Evo 200		0.85	0.56
LP WTB Air 102	0.7	0.65	0.65
WTB Verzögerer			0.56
Zugabewasser inkl. NCA-	170	150	163.5
Oberflächenfeuchte			
Kernfeuchte in RCA		23.4	19.5
W/B-Wert [-]	0.56	0.59	0.60
(k-Werte ÖN B 4710-1)			
W/P _{Mehlkorn} -Wert [-]	0.38	0.34	0.35
(W=Zugabewasser)			
GWP (A1) [kg CO ₂ -äq/m ³]	144	105	116
GWP (A1-A3) laut WTB	155	123	135
[kg CO ₂ -äq/m ³]			
GWR-Klasse (ÖBV-	GWR3	GWR4	GWR4
Merkblatt)			

Abbildung 2.4.1: Zusammensetzung Referenzmischung BS1A, die an der TU Graz entwickelte Ausgangsmischung und die durch WTB angepasste Mischung.

In Vorversuchen (VV) im Werk Seibersdorf und bei der Prototypen-Betonage der U2-Wand passte WTB die Rezeptur an (CO₂r-RB-WTB), um höhere Konsistenz (F59), längere Verarbeitungszeit (mit Verzögerer) und ausreichende Festigkeit zu erreichen.

Die gemäß Tabelle 3 ermittelten Frisch- und Festbetonkennwerte sind in den Abbildungen dargestellt. Neben REF-BS1A und CO₂r-RB-TUG aus den Zwangsrahmenversuchen werden Ergebnisse des WTB-Betons aus den Vorversuchen (CO₂r-RB-WTB-VV) und dem U2-Bauvorhaben (CO₂r-RB-WTB-U2) gezeigt.

Die Prototypenwand erforderte sechs Fahrmischerlieferungen zu je 9 m³.

Prüfung	Kurzbeschreibung	Probekörper	Prüfalter	Anzahl
	bzw. Verweis auf Norm	[mm]	[d]	
Druckfestigkeit	ÖN EN 12390-3	Würfel 150	2-5-14-28-56-90	je 2 Stk.
Spaltzugfestigkeit	ÖN EN 12390-6	Würfel 100	2-5-14-28-56	je 3 Stk.
Statischer E-Modul	ÖN EN 12390-13	Zylinder Ø100 × 200	2-5-14-28	je 3 Stk.
Trocknungsschwinden	Messung der Längenänderung vertikal stehender Proben mittels induktiver Wegaufnehmer bei 50% R.F. und 20°C ab dem 2d nach Herstellung	Zylinder Ø100 × 300	kontinuierliche Messung	je 1 Stk.
Temperaturanstieg des Betons durch Hydratationswärme	ÖN B 4710-3 Messung der Kerntemperaturentwicklung zufolge Hydratation wärmegeämmter Proben	Würfel 200 (in 100 mm XPS)	kontinuierlich bis etwa 14d	je 2 Stk.
Wassereindringtiefe	ÖN B 4710-3	200×200×120	90	je 3 Stk.

Abbildung 2.4.2: Durchgeführte Prüfungen

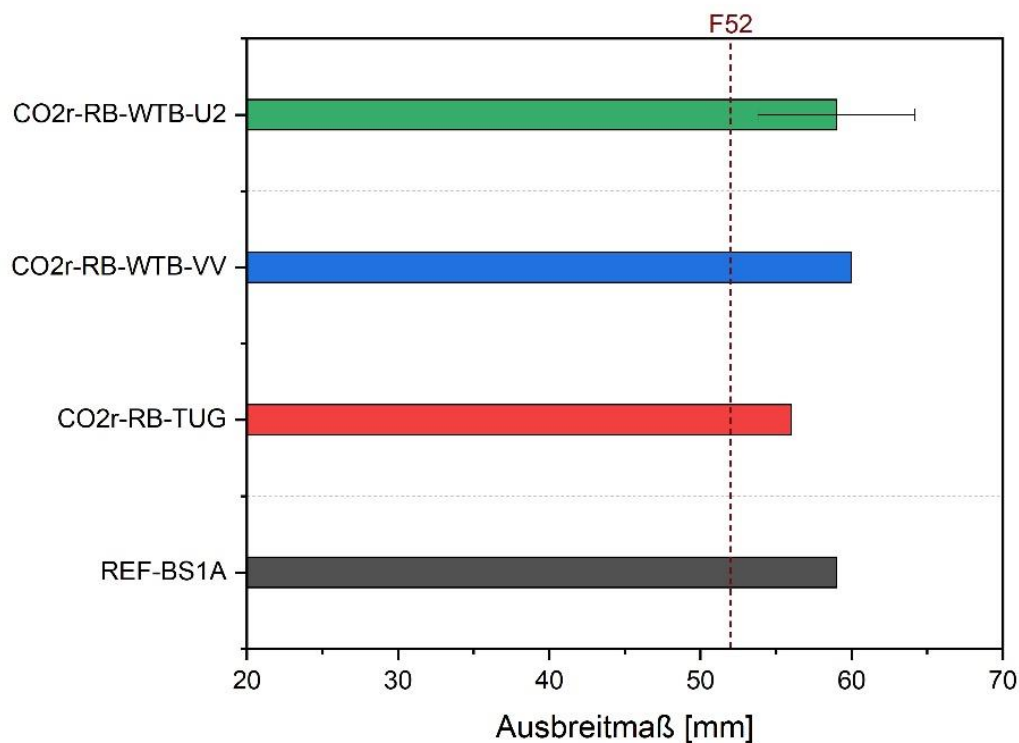


Abbildung 2.4.3: Ausbreitmaß einschließlich Standardabweichung für die U2-Betonage aus sechs Fahrmischern.

Alle Mischungen erreichten F52 (Abbildung 5), die U2-Mischungen darüber hinaus teilweise F59. Die Verzögerung ermöglichte eine Verarbeitungszeit > 2 h; eine Erhärtung wurde im Knetbeutel erst nach rund 5 h festgestellt. Die Pumpbarkeit über die ca. 55 m lange, abwärts in den Schacht führende Leitung war laut Pumpenbediener sehr gut. Bei 30 % Maximalleistung (10 Hube/min) lagen die Pumpendrucke mit 60 bis max. 110 bar. Abbildung 6 zeigt die Pumpprognosen mit dem Sliding Pipe Rheometer „Sliper“.

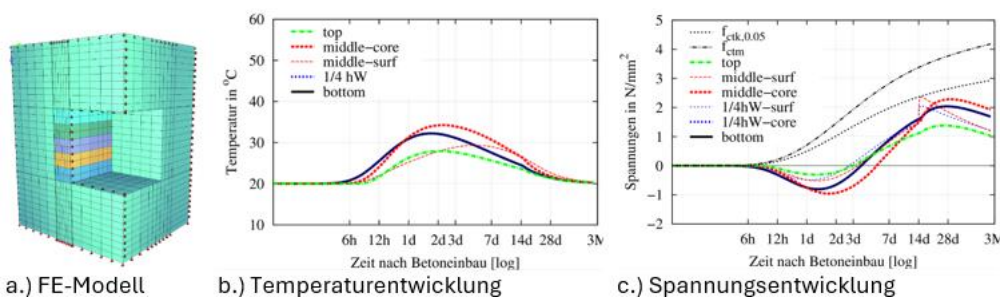


Abbildung 2.4.11: Vorausberechnung der zu erwartenden Temperatur- und Spannungsentwicklung im Bauteil infolge Hydratation.

Die im Sliper-Test nach Secieru et al. [2] bestimmten Kennwerte „Fließgrenze a“ und „Viskosität b“ der Gleitschicht dienen als Indikatoren für das Pumpverhalten. Eine allgemein gültige Klassifizierung der Pumpfähigkeit ist weiterhin Forschungsgegenstand. I

m Vergleich mit dem realen Pumpvorgang sind alle U2-Mischungen als äußerst leicht pumpbar einzustufen; auch REF-BS1A und CO₂r-RB-TUG weisen nur unwesentlich höhere Sliper-Fließgrenzen und -Viskositäten auf.

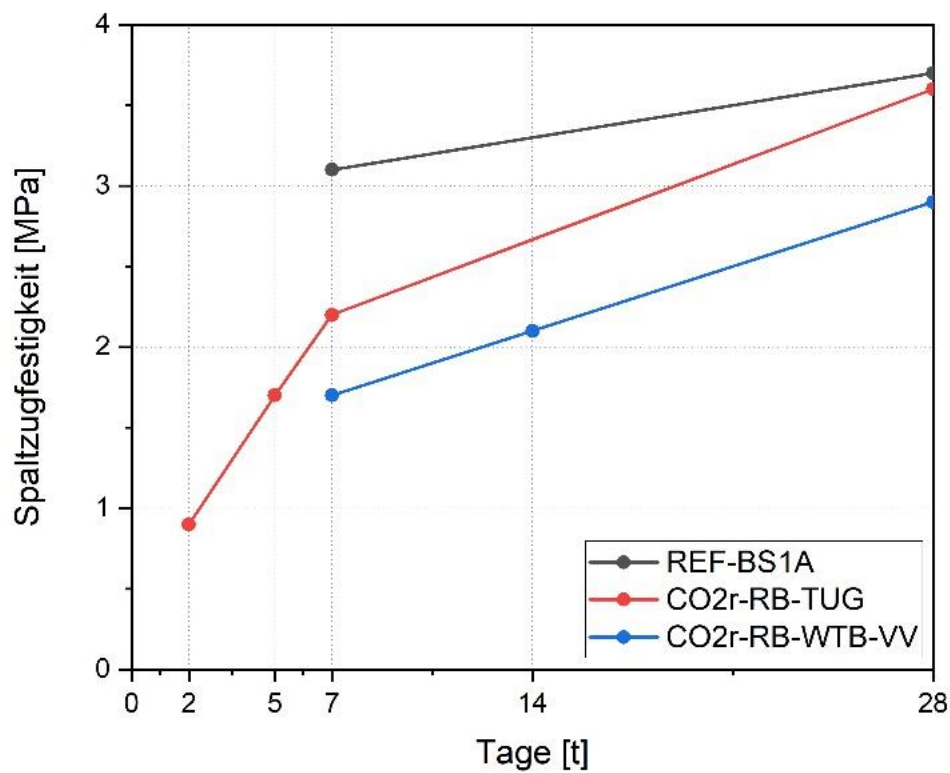


Abbildung 2.4.6: Mittlere Spaltzugfestigkeitsentwicklung.

Die CO₂-optimierten Betone entwickeln Festigkeit langsamer als REF-BS1A (Abbildung 7) und erreichten die maximalen Druckfestigkeit > 39 N/mm² etwas später.

Für CO₂r-RB-WTB liegen noch nicht alle Ergebnisse vor; der Trend zeigt jedoch, dass die geforderte 90-d-Festigkeit erreichbar ist.

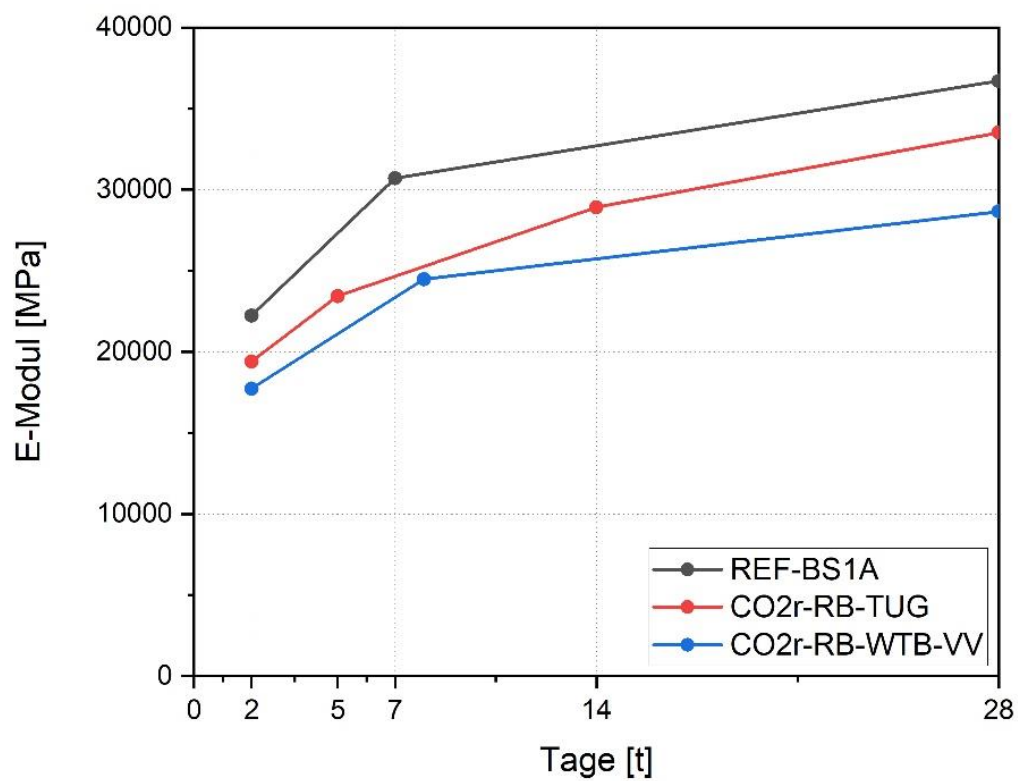


Abbildung 2.4.7: Entwicklung der mittleren Elastizitätsmoduln der untersuchten Betone.

REF-BS1A weist nach 7 d überraschend hohe Werte auf. Die CO₂-optimierten Betone entwickeln sich langsamer (Abbildung 8), erreichen nach 28 d jedoch Werte gleicher Größenordnung. CO₂r-RB-WTB liegt unter CO₂r-RB-TUG. Ähnlich verhält sich der E-Modul (Abbildung 9). REF-BS1A ist steifer als die CO₂-optimierten Betone mit RCA-Material.

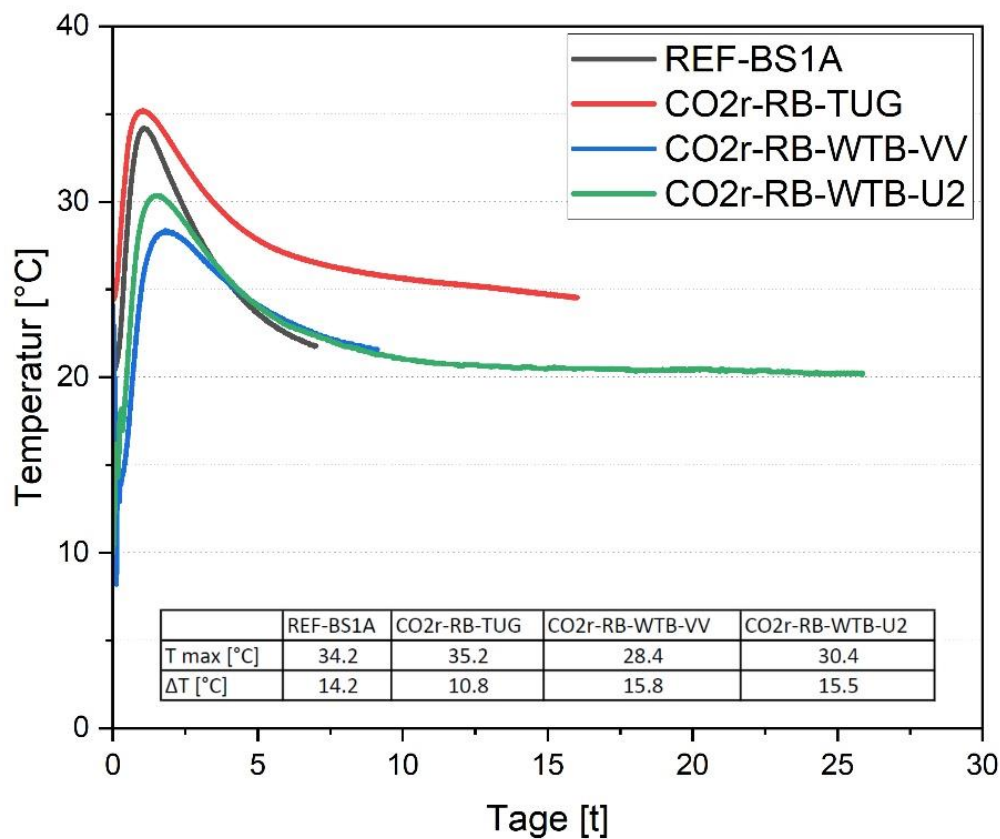


Abbildung 2.4.8: Temperaturentwicklung der Betone.

Die Temperaturentwicklung (Abbildung 10) umfasst maximale Betontemperatur und Temperaturanstieg ΔT gegenüber der Frischbetontemperatur; ΔT liegt zwischen 11 und 16 °C. CO₂-reduzierte Betone zeigen eine moderate Temperaturerhöhung in der frühen Hydratationsphase und sind damit günstig zur Verringerung der Rissneigung, wobei CO₂r-RB-WTB ungünstiger liegt als CO₂r-RB-TUG.

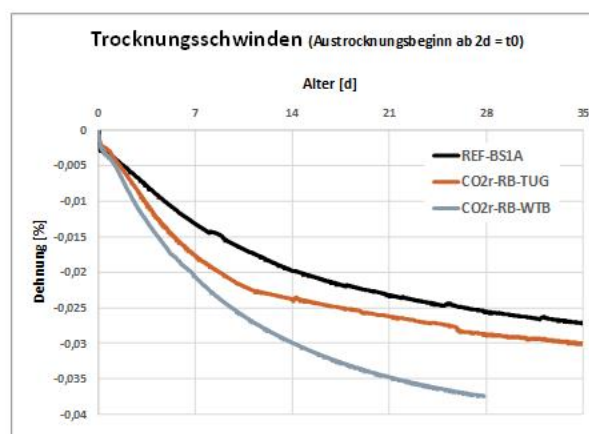


Abbildung 2.4.9: Schwindmessungen: Set-Up und Ergebnisse des Trocknungsschwindens

Die Wassereindringtiefe beträgt 9 mm für CO₂r-RB-TUG und 10 mm für REF-B51A und liegt damit deutlich unter 20 mm. Für CO₂r-RB-WTB liegen noch keine Ergebnisse vor.

Zwangbeanspruchung - Materialcharakterisierung

Die begleitende Materialcharakterisierung erfolgte am CO₂r-RB-TUG analog zum 1. Forschungsjahr. Die Ergebnisse sind oben im Vergleich zu CO₂r-RB-WTB dokumentiert. Zusätzlich wurden Schwindmessungen durchgeführt. Abbildung 11 zeigt für CO₂r-RB gegenüber REF-BS1A ein etwas ungünstigeres Trocknungsschwindverhalten.

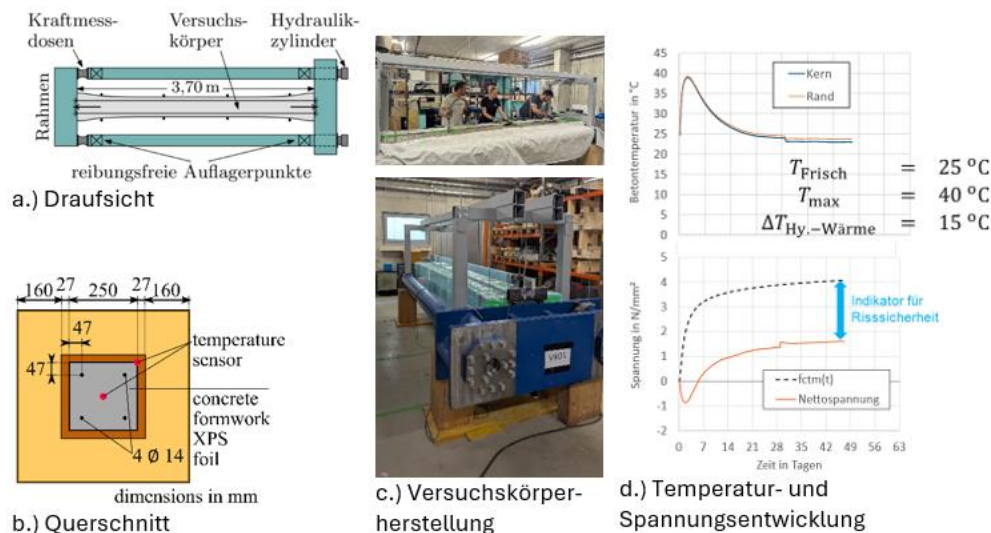


Abbildung 2.4.10: Zwangrahmenversuch CO₂r-RB-TUG

- [1] J. Juhart, M. Autischer, M. Sakoparnig, M. Krüger, The Realization of Clinker-Reduced, Performance-Based Sustainable Concrete by the Micro-Filler, Eco-Filler Concept, Materials 14 (2021) 4958.
- [2] E. Secieru, S. Fataei, C. Schröfl, V. Mechtcherine, Study on concrete pumpability combining different laboratory tools and linkage to rheology, Constr. Build. Mater. 144 (2017) 451–461.

Bestimmung der erhärtungsbedingten Zwangbeanspruchung auf Bauteilebene

Zur Bestimmung der erhärtungsbedingten Zwangbeanspruchung und Rissgefahr wurden im zweiten Jahr ein neuer Zwangrahmenversuch mit dem CO₂-optimierten Recyclingbetons („CO₂r-RB“) sowie thermomechanische Simulationen zum Verhalten dieses Betons in einer konkreten Bauteilsituation der Versuchswand der Wiener Linien durchgeführt.

In Abbildung 12 sind der Versuchsaufbau sowie die Temperatur- und Spannungsentwicklung des CO₂r-RB-TUG dargestellt.

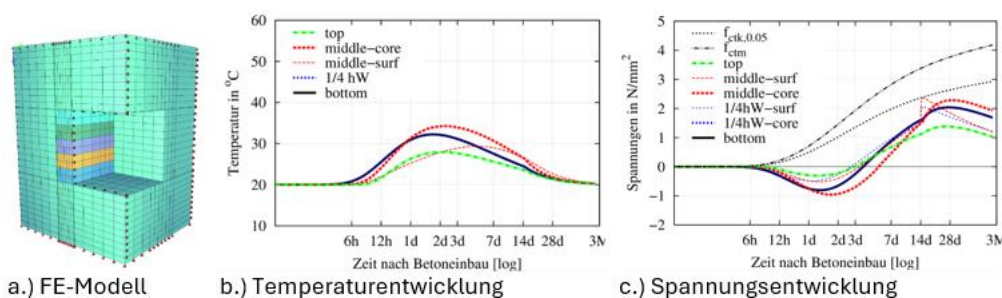


Abbildung 2.4.11: Vorausberechnung der zu erwartenden Temperatur- und Spannungsentwicklung im Bauteil infolge Hydratation.

In weiterer Folge wurden gekoppelte thermohygromechanische Materialmodelle anhand der Versuchsergebnisse kalibriert bzw. validiert, welche anschließend für die quantitative Bewertung der Rissgefahr der Probewand in der U2 verwendet wurden.

Abbildung 13 zeigt das Berechnungsmodell und beispielhaft die Temperatur- und Spannungsentwicklung infolge der Hydrationswärme ohne weitere Einflüsse aus Frischbetontemperatur und Umgebungstemperaturänderungen.

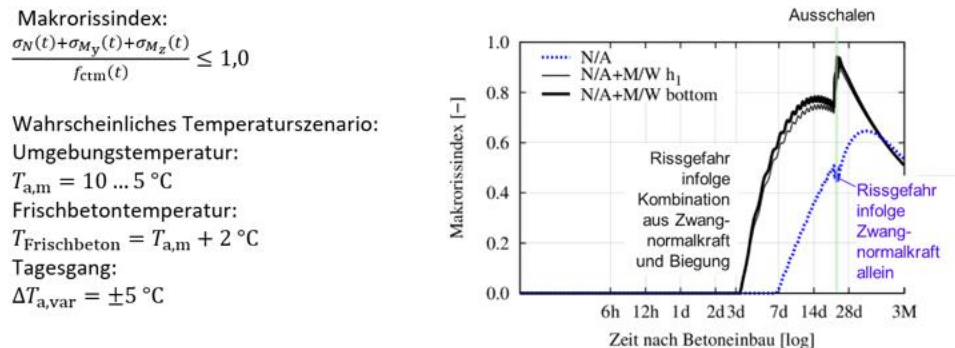


Abbildung 2.4.12: Auswertung Rissgefahr für ein wahrscheinliches Temperaturszenario.

Zur quantitativen Bewertung der Rissgefahr wird aus diesen Spannungsergebnissen der sogenannte Makrorissindex berechnet, welcher ausschließlich die aus Zwangsnormalkraft resultierenden Spannungen berücksichtigt.

Für ein wahrscheinliches Temperaturszenario werden die in Abbildung 14 angeführte Frischbeton- und Umgebungsbedingungen zugrunde gelegt.

{Abbildung 2.4.13}

Die Auswertung des Makrorissindex ergibt, dass sich die maßgebende Zwangsspannung aus einer Kombination von Zwangsnormalkraft und Biegezug über die Wanddicke zusammensetzt. Der Biegeanteil ergibt sich aus der Temperaturgradienten über die Bauteildicke, welche infolge der wärmespeichernden Wirkung des dahinterliegenden Erdkörpers entsteht.

Diese Temperaturgradienten baut sich mit abnehmender Bauteiltemperatur wieder ab, wodurch für die Vermeidung der erhärtungsbedingten Rissbildung in der Wand ein Ausschalzeitpunkt nach 21 Tagen als zielführend erachtet wurde. Zusätzlich ist für die Rissvermeidung darauf zu achten, dass die Frischbetontemperatur nur um $+2^\circ\text{C}$ über der mittleren Tagestemperatur liegt. Es hat sich jedoch beim Versuch gezeigt, dass diese Ausschalzeit unterschritten werden kann, sofern die Temperaturgradienten bestimmte Werte nicht überschreitet.

Rissgefahr Nachrechnung

Der Vergleich der im Labor entwickelten Rezeptur $\text{CO}_2\text{r-RB-TUG}$ mit der zur Ausführung kommenden Rezeptur $\text{CO}_2\text{r-RB-WTB}$ zeigt, dass der Zementanteil um rund 12 % erhöht wurde. Dadurch stieg auch die Hydrationswärme im Thermowürfel um rund 30 %. Die in der Vorausberechnung angesetzte Hydrationswärme wurde somit zu optimistisch angenommen, wodurch die Rissgefahr auf der Baustelle bei gleichen Umgebungstemperaturen aliquot ansteigt. Gleichzeitig zeigten Temperaturmessungen der BOKU, dass die tatsächlichen Umgebungsbedingungen günstiger waren als in der Vorausberechnung angenommen.

Ungünstig veränderte sich hingegen die Frischbetontemperatur, die 5°C über der mittleren Tagestemperatur lag statt der angesetzten 2°C . Zudem wies der $\text{CO}_2\text{r-RB-WTB}$ einen geringeren Elastizitätsmodul und eine geringere Spaltzugfestigkeit auf. (siehe Abbildung 4 und 5) Das gegenläufige Zusammenwirken ungünstiger Randbedingungen, insbesondere erhöhte Frischbetontemperatur und erhöhte Hydrationswärme, mit

günstigen Umgebungsbedingungen sowie ein annähernd gleichbleibendes Verhältnis von ($\sim 0.1\%$) ermöglichten insgesamt eine Erhärtung ohne Rissbildung.

Der Projektfortschritt liegt mit **100 % im Plan**, bezogen auf die Gesamtprojektlaufzeit.

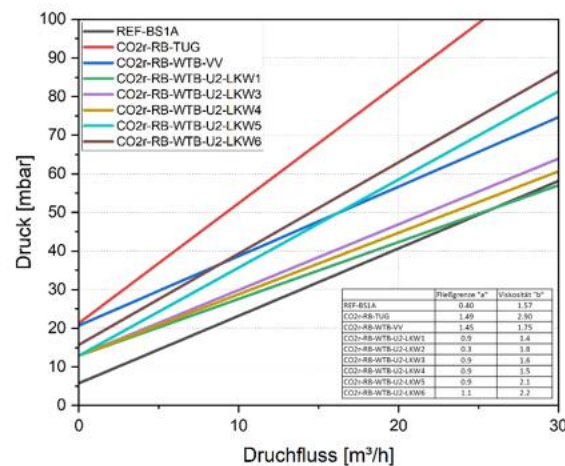


Abbildung 2.4.4: Ergebnisvergleich der untersuchten Betonvarianten im Sliding Pipe Rheometer „Sliper“ und Test set up.

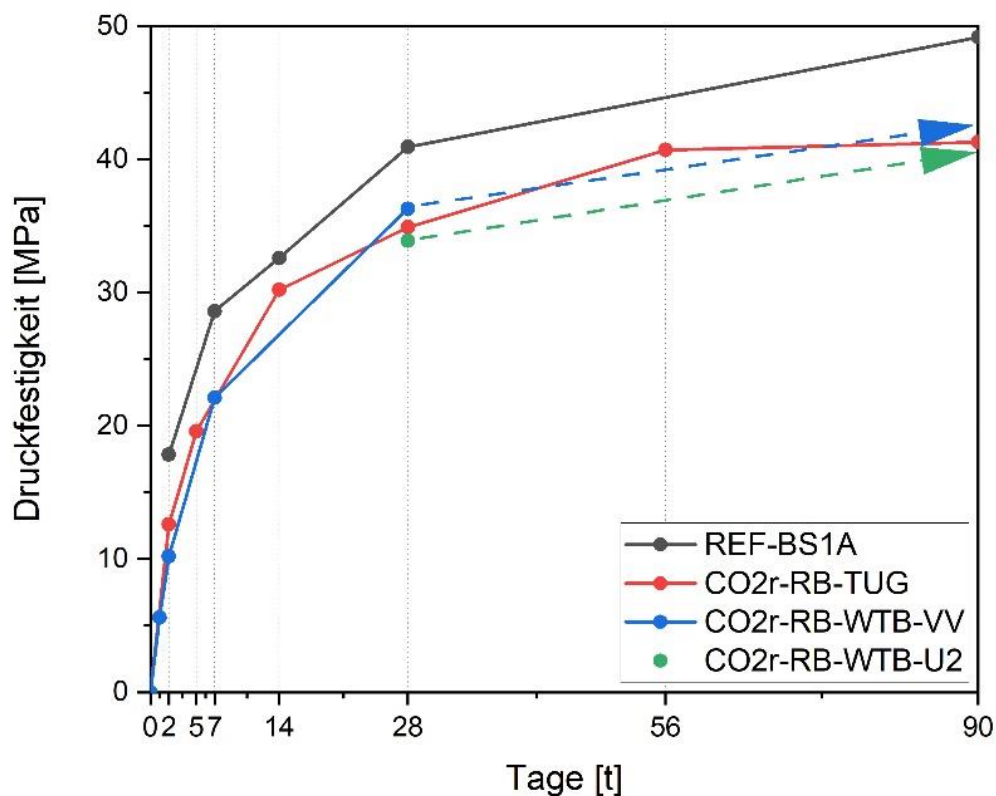


Abbildung 2.4.5: Mittlere Druckfestigkeitsentwicklung.

2.5. Bewehrungsmix und 3D-Basaltbewehrung

Fertigstellungsgrad: 100%

Einleitung

Diese Forschungsinitiative kombiniert mehrere methodische Ansätze: experimentelle Untersuchungen im Kleinmaßstab, Finite-Elemente-Analysen (FEA) sowie die Entwicklung großmaßstäblicher Prototypen. Die Kleinmaßstab-Experimente liefern zentrale Erkenntnisse zu mechanischen Eigenschaften, Dauerhaftigkeit und weiteren leistungsrelevanten Merkmalen der eingesetzten Werkstoffe und bilden damit eine wichtige Grundlage für den Entwicklungsprozess. Ergänzend dazu ermöglicht die FEA die Simulation und Prognose des Material- und Strukturverhaltens unter unterschiedlichen Randbedingungen.

Mithilfe numerischer Modelle werden unter anderem strukturelle Integrität, Verformungen, Hauptzugspannungen und weitere kritische Parameter bewertet. Zusätzlich werden derzeit probabilistische Analysen durchgeführt, um die Lebensdauer zu verbessern sowie Bemessungswerte und Teilsicherheitsbeiwerte festzulegen. Der Bau von Prototypen im Maßstab 1:1 dient schließlich dazu, die praktische Umsetzbarkeit und Wirksamkeit der vorgeschlagenen Lösungen zu überprüfen und daraus Erkenntnisse für weitere Optimierungen abzuleiten.

Ziele und Methodik

Zu den Zielen des Projekts gehören:

- Substitution von Materialien: Bewertung der mechanischen Eigenschaften von basaltfaserverstärkten Kunststoffen (BFVK) als Bewehrung, um ihre Eignung als Alternative zu herkömmlicher Stahlbewehrung in Beton zu bestimmen.
- Nachhaltigkeit: Integration von Basaltbewehrung mit kohlenstoffarmem Zement und teilweise rezyklierten Zuschlagstoffen, um den gesamten ökologischen Fußabdruck von Betonstrukturen zu reduzieren. Dies steht im Einklang mit den Zielen der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen.
- Strukturelle Optimierung: Entwicklung von Bewehrungsanordnungen, die nicht auf herkömmliche 2D-Raster beschränkt sind, sondern stattdessen dem Verlauf der Zugspannungstrajektorien innerhalb der Struktur folgen. Dabei wird der Einsatz von 3D-Basaltbewehrung berücksichtigt, um eine räumlich optimierte Lastabtragung zu ermöglichen. Ergänzend dazu wird ein innovativer Faser-Cocktail aus Basalt- und Stahlfasern untersucht, der die mechanische Leistungsfähigkeit, Risskontrolle und Dauerhaftigkeit verbessern soll. Ziel ist es, die strukturelle Effizienz zu steigern und gleichzeitig den Materialverbrauch zu reduzieren.
- Standardisierungsvorbereitung: Generierung von Daten zur Unterstützung der künftigen Aufnahme von Basaltbewehrung in Bemessungsnormen, einschließlich probabilistischer Sicherheitsfaktoren und Lebensdauerprognosen.

Tübbinge mit Bewehrungsmix

Der Zweck der Kombination von Stahl- und Basaltfasern besteht darin, den Anteil an Stahlfasern zu reduzieren und gleichzeitig das Betonverhalten über verschiedene Rissgrößen sowie insgesamt bei gleichbleibender Tragfähigkeit die Nachhaltigkeit zu verbessern.

Das Diagramm in Abbildung 15 zeigt, dass Basaltfasern vor allem im frühen Mikrorissbereich wirken, indem sie kleine Risse überbrücken, die Spannungsübertragung verbessern und die Lokalisierung einzelner Risse verzögern. Dadurch wird der Übergang vom linear-elastischen Verhalten zum Nachrissbereich geglättet und die erste Rissbildung besser kontrolliert. Bei größeren Rissöffnungen verlieren die kurzen Basaltfasern jedoch zunehmend ihre Wirksamkeit, da sie herausgezogen werden. Stahlfasern werden dagegen erst bei größeren Makrorissen vollständig aktiviert und übernehmen dann die Rissüberbrückung, wodurch die Resttragfähigkeit und Duktilität im Makrorissbereich verbessert werden. Im hybriden Basalt-Stahl-Fasersystem ergänzen sich beide Mechanismen: Basaltfasern kontrollieren die frühe Mikrorissbildung, während Stahlfasern die Tragfähigkeit bei größeren Verformungen sichern.

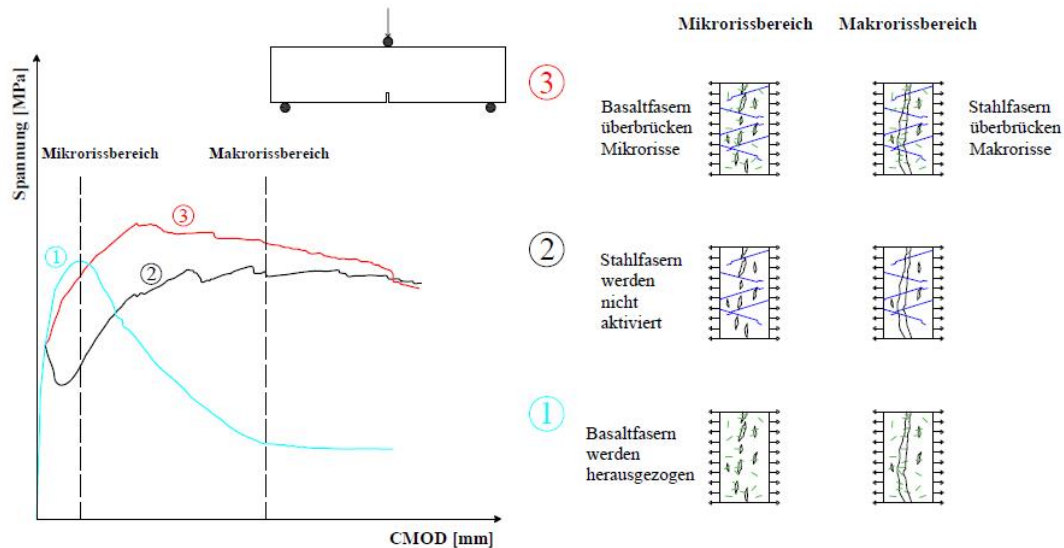


Abbildung 2.5.1: Spannungs-CMOD-Reaktion von Beton, der mit (1) Basaltfasern, (2) Stahlfasern und (3) einem hybriden Basalt-Stahl-Fasersystem unter Dreipunktbiegebeanspruchung verstärkt ist.

Tübbing mit 3D-Basaltbewehrung

Aufgrund fix montierter Anbauteilen an der Unterseite in der Tübbingschalung bedarf es einer entsprechenden Bewehrungsführung. Die Bewehrungsskizze in Abbildung 16 zeigt die Biegebewehrung an der Tübbingaußenfläche sowie einen Längs- und Querschnitt. Die erforderliche Auswechslung im Bewehrungskorb müsste lediglich an der Unterseite vorgesehen werden; diese wurde zur Vereinfachung auch an der Tübbingoberseite angeordnet.

Für den Lagerhalt der Basaltstäbe wurde von der Fiber Elements GmbH eine Art Bügelbewehrung aus beharzten Basaltfaserbündeln mit 9.600 tex (Basaltnettofläche ca. 3,6 mm²) entwickelt. Darin wurden gezielt ringförmige Öffnungen in den festgelegten Basaltstababständen konstruiert, in welche die Basaltstäbe für den Zusammenbau der 3D Struktur durchgeführt werden konnten. Zur Verbindung der Stäbe innerhalb dieser Öffnungen wurden von der Fiber Elements GmbH entwickelte Klipse verwendet.

Mit dem beschriebenen Stecksystem ließ sich einfach und schnell aus den gewickelten 2D-Basaltbügeln und den einzelnen Basaltstäben eine stabile 3D-Struktur zusammenbauen. Der Vorteil hierbei liegt maßgeblich auch in der Transportfähigkeit des Systems, da die einzelnen Elemente nur geringen Platz in Anspruch nehmen.

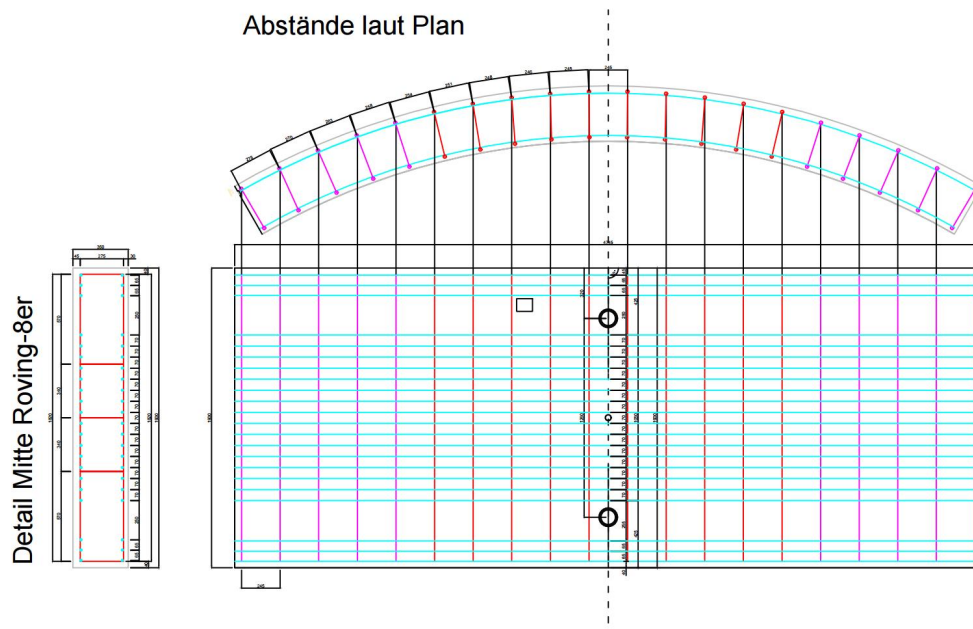


Abbildung 2.5.2: Bewehrungsskizze der Tübbinge mit Basaltstäben und gewickelten Basaltbügeln

Abbildung 17 zeigt einen fertiggestellten Bewehrungskorb mit Basaltbewehrung und Abbildung 18 zeigt die Basaltbewehrung in der Tübbingschalung unmittelbar vor der Betonage. Das Ausschalen der Basalttübbinge erfolgte jeweils am Folgetag.

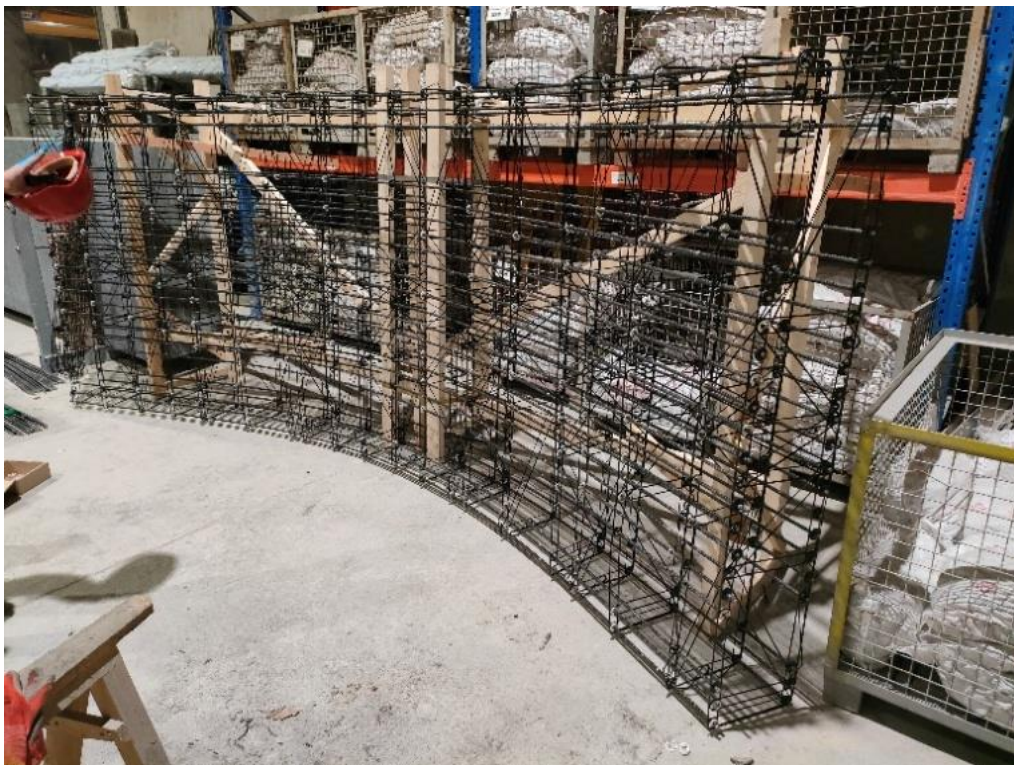


Abbildung 2.5.3: Fertiggestellter Basaltbewehrungskorb im Fertigteilwerk in Wiesing.

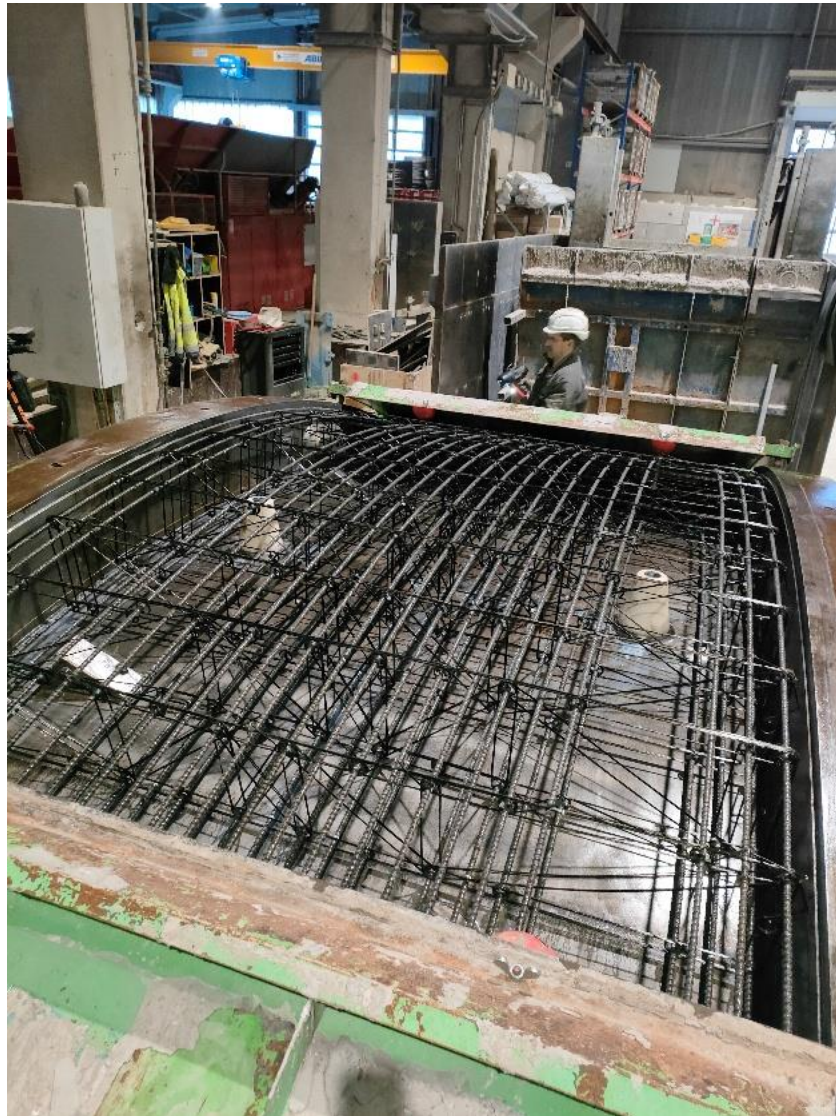


Abbildung 2.5.4: Basaltbewehrung in der Tübbingschalung.

Abbildung 19 zeigt einen ausgeschalteten Basalttübbing am Lagerplatz des Fertigteilwerks in Wiesing. Es wurden insgesamt drei Tübbinge hergestellt, welche anschließend zum Tübbingprüfstand der Montanuniversität Leoben in Niklasdorf transportiert wurden.



Abbildung 2.5.5: Erster ausgeschalter Basaltbetontübbing.

Aufgrund der für das Gesamtprojekt relevanten Änderung der Gesteinskörnung durch einen Anteil von 50 % rezyklierten Zuschlagsstoffen konnte der Wassergehalt der aktuell angelieferten Charge nur probenweise bestimmt werden. Dies führte zu einer Überschätzung des Wassergehaltes und folglich zu einem steifen Beton der ersten Betoncharge. Pro Tübbing erfolgten zwei Betonchargen, bereits ab der zweiten Charge konnte der Wassergehalt etwas angeglichen werden, womit die weiteren drei Tübbinge in identer Rezeptur ausgeführt werden konnten.



Abbildung 2.5.6: Erste Charge mit geringerem Wassergehalt, gehinderte Betonverteilung in der Schalung.

Durch die steife Konsistenz der ersten Charge, konnte sich der Beton trotz Rütteln nicht vollständig und gleichmäßig ausbreiten. Besonders an den gewickelten Bügelbewehrungen blieben gröbere Zuschläge hängen und verhinderten die weitere Ausbreitung.

Abbildung 20 zeigt die entstandene Fehlstelle am erste Basalttübbling. Aufgrund des geschlossenen Schalungsdeckels konnte diese erst nach dem Ausschalen festgestellt werden. Da die Lasteinleitung am

Tübbingprüfstand in der Mitte des Tübbings stattfindet, wurde diese Fehlstelle am Rand als unwesentlich für das Prüfergebn erachtet und innerhalb der Versuchsserie inkludiert.

Innenschalenwand mit Basaltbewehrung

Als Beitrag zur Nachhaltigkeit im Infrastrukturbau lag im Zuge des Projektes ein weiterer Schwerpunkt auf der Herstellung einer wasserdichten Innenschalenwand mit nicht-metallischer Bewehrung in Kombination mit einem ressourceneffizienten Recyclingbeton.

Die Ausgangssituation der herzustellenden Wand ist in Abbildung 21 zu sehen. Es wurde im Zuge der Erweiterung des U-Bahn-Netzes der Wiener Linien im Schachtbauwerk des Notausstiegs Quellenstraße eine Öffnung in der Innenschale zur Realisierung der Prototypenwand bereitgestellt.



Abbildung 2.5.7: Bereitgestellte Öffnung im Notausstieg Quellenstraße zur Realisierung der Prototypenwand

Eine Variantenstudie zu möglichen Bewehrungslayouts und -formen resultierte in der Verwendung ausschließlich von Stabbewehrung in orthogonaler Anordnung. Dies begründet sich in der baupraktischen Herstellbarkeit, Stabilität des Bewehrungsnetzes und der besseren Kenntnis von experimentell bestimmten Materialparametern. Auf Basis von numerischer Untersuchung, Bemessung der Innenschalenwand nach den anzuwendenden Einwirkungskombinationen sowie thermo-hygro-mechanischer Simulationen zur Erfassung von möglicher Trennrissbildung und -vermeidung, wurde ein Bewehrungskonzept entwickelt.

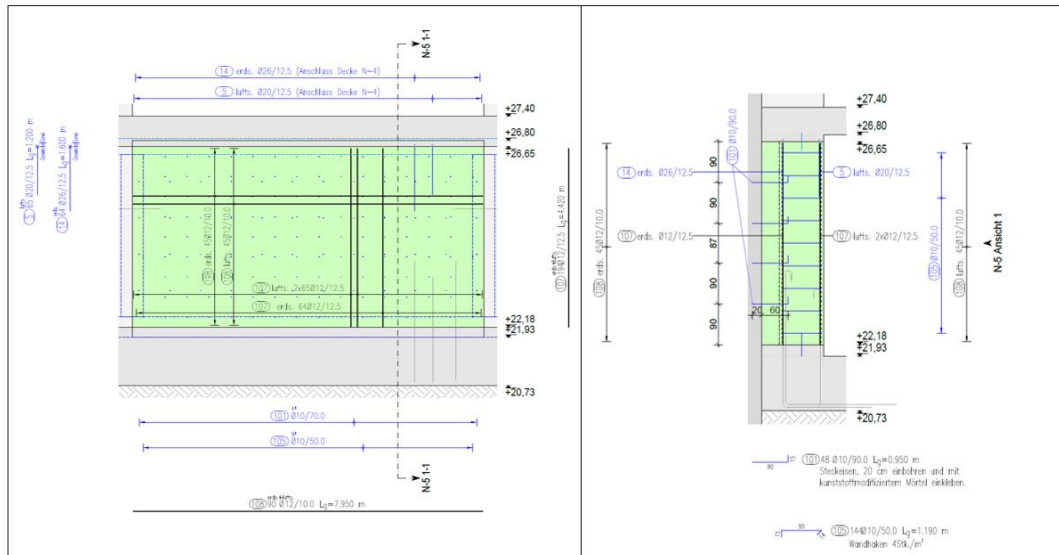


Abbildung 2.5.8: Auszug aus Bewehrungsplan mit Ansicht (links) und Schnitt (rechts) für die Prototypenwand

Der Bewehrungseinbau erfolgte schlussendlich am 18.03.2026 und Auszüge davon sind in Abbildung 23 zu sehen.

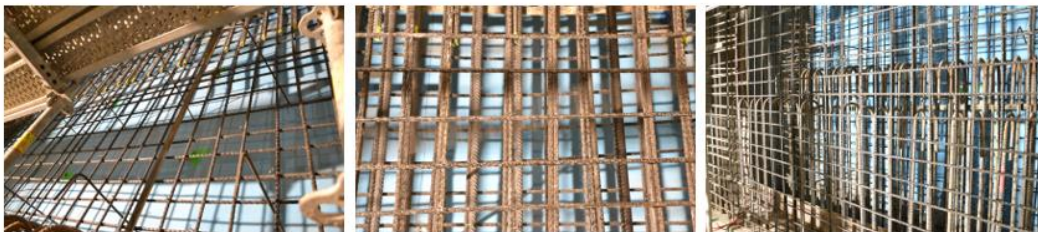


Abbildung 2.5.9: Bewehrungseinbau in der vorgesehenen Öffnung mit erdseitiger (links) und luftseitiger BFVK-Bewehrung (mittig) sowie Anschlussbereich (rechts)

Zusammenfassung

Konnten die Arbeitsschritte gemäß Plan erarbeitet werden?

Ja.

Die Literaturrecherche, kleinmaßstäblichen Versuche, numerischen Simulationen für das erste großmaßstäbliche Segment sowie die Herstellung und Prüfung von drei basaltbewehrten Segmenten wurden abgeschlossen. Eine basaltbewehrte Innenschalenwand wurde erfolgreich hergestellt. Gab es wesentliche Abweichungen oder Veränderungen?

Ja.

Bei einem Segment entstand aufgrund einer zu steifen Betonmischung eine Fehlstelle am Rand. Zudem stehen die Bruchenergieversuche für diese Rezeptur noch aus. Welche Auswirkungen haben diese?

Die Auswirkungen sind begrenzt. Die Fehlstelle lag außerhalb des maßgebenden Prüfbereichs. Die fehlenden Bruchenergiewerte werden nachträglich bestimmt und in die numerische Modellierung integriert. Wie muss die Planung angepasst werden?

Derzeit sind keine wesentlichen Änderungen an der Gesamtplanung erforderlich.

Fertigstellungsgrad

Die Materialcharakterisierung, die ersten Prototypsegmente sowie die zugehörigen numerischen Untersuchungen sind abgeschlossen. Der finale Bewehrungsentwurf der Tübbinge befindet sich weiterhin in Bearbeitung.

Im Fokus stehen dabei ein materialeffizientes Layout der 3D-Basaltbewehrung, eine reduzierte Betondeckung sowie die gezielte Anordnung von Rovings und Stäben entlang der Hauptzugspannungen. Der Projektfortschritt liegt mit **95 % im Plan**, bezogen auf die Gesamtprojektlaufzeit.

2.6. Numerische und experimentelle Untersuchungen

Fertigstellungsgrad: 100%

Tübbinge mit Bewehrungsmix aus Stahl- und Basaltfasern

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden drei Tübbinge mit hybrider Faserbewehrung (StF+BF) hergestellt und geprüft. Die Mischung enthielt $7,5 \text{ kg/m}^3$ Basaltfasern und 30 kg/m^3 Stahlfasern. Ziel war es, die Leistungsfähigkeit dieser Kombination zu bewerten und zu zeigen, ob durch den Einsatz von Basaltfasern der Stahlfasergehalt (45 kg/m^3) reduziert werden kann, ohne die Tragfähigkeit zu verringern. Die Prüfungen wurden an der Montanuniversität Leoben durchgeführt.

Abbildung 24 zeigt die Ergebnisse der Prismenversuche nach EN 14651 im 3-Punkt-Biegeversuch. Abbildung 25 zeigt, dass die Tübbinge mit hybrider Basalt-Stahl-Faserbewehrung trotz reduziertem Stahlfaseranteil ein vergleichbares Tragverhalten wie reine Stahlfaserbetone erreichen.

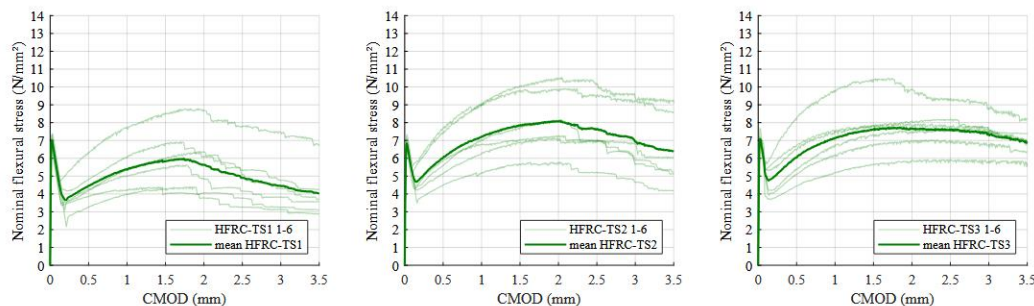


Abbildung 2.6.1: Biegezugfestigkeit-CMOD Diagramme der 3-Punkt-Biegezugversuche für die Mischungen StF+BF

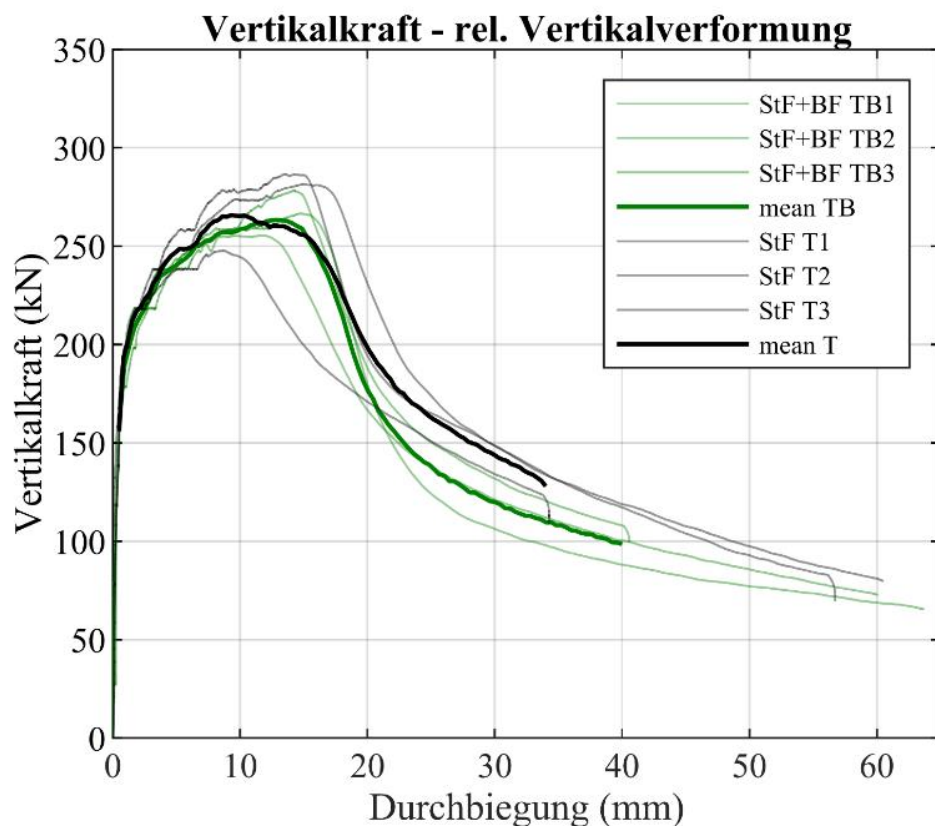


Abbildung 2.6.2: Ergebnis der Tragfähigkeitsuntersuchungen mit Basaltfaserbetontübbing (StF+BF) im Vergleich zu reinen Stahlfaserbetontübbing (StF)

In Zusammenarbeit mit Prof. Matthias Neuner und Dr. Thomas Mader an der BOKU wurde eine automatisierte Methode entwickelt, um die Stahl- und Basaltfasern explizit in der FE-Software *ABAQUS* zu modellieren. Das Modell wurde zunächst anhand der Versuchsergebnisse kalibriert und validiert und zeigte eine sehr gute Übereinstimmung. Damit kann die Methode nun auf Tübbinge angewendet werden, um den Einfluss von Winkeln, Faserorientierung und Verteilung numerisch zu untersuchen.

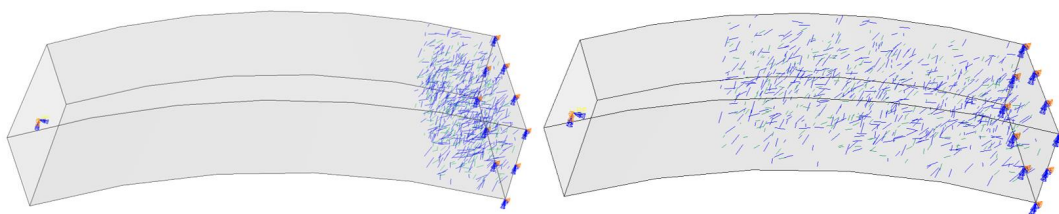


Abbildung 2.6.3: Numerisch generierte ABAQUS-Modelle zur Untersuchung des Einflusses der Faserorientierung auf das Bauteilverhalten; dargestellt sind zwei Varianten mit Faserwinkeln von 5° und 20° relativ zur vertikalen Achse

Tübbinge mit 3D-Basaltbewehrung

Im Rahmen der kleinmaßstäblichen Untersuchungen wurden vor der Prüfung der Tübbingsegmente zunächst die wesentlichen Material- und Verbundeigenschaften charakterisiert. Dazu gehörten Zug-, Scher- und Elastizitätsmodulversuche an verschiedenen Basaltstäben sowie Untersuchungen der Betonkennwerte.

Zur Untersuchung des Verbundverhaltens zwischen Basaltbewehrung und Beton wurden Pull-Out Versuche mit drei unterschiedlichen Betonrezepturen und zwei Stabdurchmessern durchgeführt. Die untersuchten

Betonmischungen umfassten einen Referenzbeton mit natürlicher Gesteinskörnung (NA_{100}), eine Mischung mit 50 % rezyklierter Gesteinskörnung für in die Fraktion 4/16 (RC_{50}) sowie eine Mischung mit 100 % rezyklierter Gesteinskörnung (RC_{100}). Verwendet wurden BFVK-Stäbe mit $\varnothing 8$ und $\varnothing 12$. Die Ergebnisse zeigten (Abbildung 27), dass bei NA_{100} die höchsten Verbundspannungen erreicht wurden. Mit zunehmendem Anteil rezyklierter Gesteinskörnung nahm die Verbundtragfähigkeit ab.

Gegenüber dem Referenzbeton reduzierte sich die maximale Verbundspannung bei RC_{50} um etwa 25 % bis 30 % und bei RC_{100} um etwa 30 % bis 35 %. In allen Versuchen wurde ein Pull-Out-Versagen mit gradueller Entfestigung beobachtet, ohne spröden Verbundverlust.

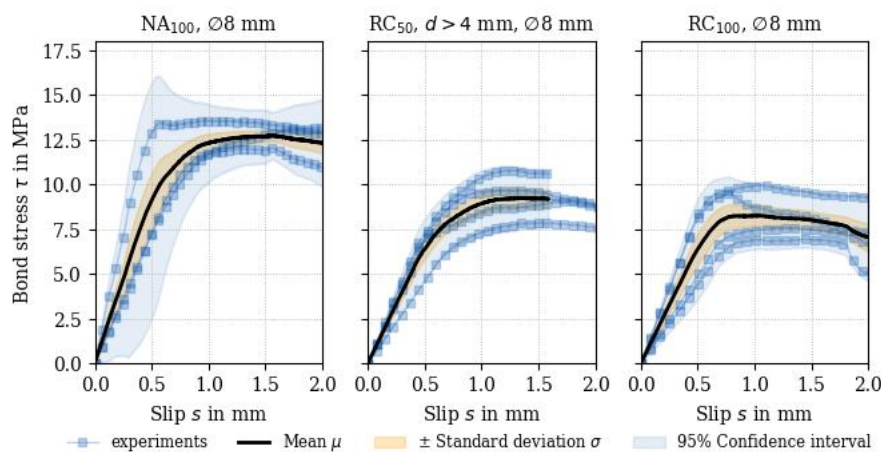


Abbildung 2.6.4: Ergebnisse der Pull-Out-Versuche

Die Betonprüfungen zeigten, dass die Druckfestigkeiten nach 28 Tagen grundsätzlich im Bereich der Zielklasse C25/30 lagen. Der Referenzbeton NA_{100} erreichte eine mittlere Würfeldruckfestigkeit von 36,4 MPa, die Mischung RC_{100} von 37,0 MPa und die Mischung RC_{50} von 28,5 MPa. Der Elastizitätsmodul nahm mit steigendem Recyclinganteil deutlich ab, von 32,9 GPa bei NA_{100} auf 27,9 GPa bzw. 23,6 GPa bei den Recyclingmischungen. Auch die Spaltzugfestigkeiten lagen mit 2,7 MPa bis 3,2 MPa in einem vergleichbaren Bereich.

Die numerischen Simulationen umfassten drei Varianten (3-Punkt-Biegeversuch):

- unbewehrte Tübbinge
- stahlbewehrte Tübbinge
- basaltbewehrte Tübbinge

Nach der Auswertung der Simulationsergebnisse wurde die Bewehrungsanordnung der basaltbewehrten Tübbinge so ausgelegt, dass ein direkter Tragfähigkeitsvergleich mit den konventionellen Stahlbetontübbingen möglich ist.

Die Betontage der Prototypsegmente wurde in Wiesing durchgeführt. Die verwendete Betonrezeptur orientierte sich an jener konventioneller Stahlbetontübbinge. Ein wesentlicher Bestandteil war der Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung: In der Fraktion 4/16 wurden 50 % rezykliertes Material eingesetzt. Die dargestellte Rezeptur bezieht sich jeweils auf ein Halbsegment (Abbildung 28). Insgesamt wurden drei vollständige basaltbewehrte Segmente hergestellt und anschließend im experimentellen Programm geprüft.

Einwaagen

Bezeichnung	Rohm.	Dos	Silo	Sollwert	Istwert	Toleranz	+ / -	Feuchte	W-Gehalt [kg]	W-Absorb. [kg]	Trocken
0/16 Recycling BO	110	1	4	732 kg	730 kg	25 kg	-2	3,7 % M	26,05	9,15kg	703,95 kg
0/4 KK Starkenbac	109	1	1	1791 kg	1790 kg	54 kg	-1	4,5 %	77,08	0,00	1712,92 kg
4/8 RK Lang	105	1	5	338 kg	340 kg	25 kg	2	2,5 % M	8,29	0,00	331,71 kg
8/16KK Gubert	102	1	2	499 kg	500 kg	25 kg	1	0,5 % M	2,49	0,00	497,51 kg
CEMI 52,5R	31	2	1	700 kg	700 kg	21 kg				0,00	700,00 kg
Warmwasser	302	3	2	165 kg	166 kg	5 kg	1		166,00	0,00	0,00 kg
Frischwasser	301	3	1			5 kg				0,00	
DYNAMON NRG 1	413	4	7	7,00kg	7,00 kg	0,35 kg				0,00	7,00 kg
Spülwasser	461	4	11	1,00kg	1,00 kg	0,50 kg			1,00	0,00	
Handwasser	502	5	1		20 kg	5 kg	20		20,00	0,00	

Berechnungen

	[kg]	[kg/m³]
Ges. Zement	700,00 kg	400,00 kg
Ges. Zuschlag (trocken)	3246,09 kg	1854,91 kg
Gesamtwasser	300,91 kg	171,95 kg
Wasserabsorption	9,15 kg	5,23 kg
Wirksames Wasser	291,76 kg	166,72 kg
Gesamtgewicht	4254,00 kg	2430,86 kg

W/Z	0,42
W/Z eq	0,42

Messwerte

Mischzeit [s]	180,0
Ist - Konsistenz	270KE
Betontemperatur [°C]	14
Hallentemperatur [°C]	13

Abbildung 2.6.5: Mischungsrezeptur je Halbsegment

Die aus den Zugversuchen an Basaltstäben gewonnenen charakteristischen Eigenschaften ergaben die Dimensionierung der Basaltstabbübbinge in folgender Ausführung in Tabelle 4. Zum Vergleich werden auch für die beim Tragfähigkeitsversuch am Tübbingprüfstand relevante Biegebewehrung mit den zusätzlichen Stahlstäben angegeben.

Bewehrungstyp	Position	Durchmesser / mm	Anzahl	Länge / mm
Basalt	Biegebewehrung oben	12	22	4850
Basalt	Biegebewehrung unten	12	22	4600
Stahl	Biegebewehrung oben	10	15	4850
Stahl	Biegebewehrung unten	10	15	4600

Abbildung 2.6.6: Tabelle 4: Vergleich der Biegebewehrung der Basalt- sowie Stahlstabbübbinge

Nach jeweils 28 Tagen erfolgte die Prüfung der Tübbinge auf Tragfähigkeit in Niklasdorf. Abbildung 29 zeigt bereits die Versuchsergebnisse in Form eines Kraft-Durchbiegungs-Diagrammes. In schwarz punktiert sind bereits vorhandene Versuchsergebnisse im Rahmen von Forschungsprojekten der Montanuniversität und beispielsweise der Dissertation Paul Gehwolf (2015) dargestellt. Die Mittelwertlinie ist in schwarz durchgezogen gekennzeichnet. Die drei Basalttübdinge sind jeweils in grün dargestellt.

Die vertikale Kraft entspricht der Scheiteldruckkraft in der Mitte des Tübbings, die angegebene Durchbiegung wurde mittels Seilzugsensoren an der Unterseite der Tübbingmitte aufgenommen.



Abbildung 2.6.8: Gleichmäßiges Rissbild eines Basaltbetontübbings, ähnlich jenem der Stahlbetontübbinge;
Rissabstände in Abhängigkeit der Position der Bügelbewehrung

Numerische Simulationen ergeben ähnliche Ergebnisse. Mit den Stahlbetontübbingen beginnend kann die Tragverhaltenskurve in drei lineare Bereiche eingeteilt werden. Im ersten Bereich bis etwa 180 kN ist die Betonfestigkeit maßgeblich, da noch keine Risse an der Tübbinginnenseite vorhanden sind. Ab dem Zeitpunkt des Erstrisses beginnt zunehmend der Stahl die Biegezugtragfähigkeit zu übernehmen. Am Übergang zum nächsten Bereich kommen bereits einzelne Stahlstäbe ins Fließen. In den Versuchen lag dieser Übergang ab etwa 460 kN Vertikalkraft.

Die Versuche der Basalttübbinge zeigen wie erwartet ein differentes Verhalten. Vorerst bleibt der erste Bereich kaum verändert, da dieser von der Betonfestigkeit dominiert und nur gering von der Bewehrung beeinflusst wird. Dennoch liegen die Werte vom Übergang in den nächsten Bereich bzw. jene vom Erstriss etwas niedriger zwischen 150 kN und 190 kN. Der zweite Bereich mit zunehmender Rissbildung verläuft weniger steil. Dies lässt sich mit dem geringeren E-Modul der Basaltstäbe im Vergleich zu Stahl begründen. Die maximale Zugfestigkeit der Basaltstäbe wurde dabei noch nicht erreicht. Da der maximale Zylinderweg erreicht war, bestehen noch Reserven in der Tragfähigkeit.



Abbildung 2.6.8: Gleichmäßiges Rissbild eines Basaltbetontübbings, ähnlich jenem der Stahlbetontübbinge; Rissabstände in Abhängigkeit der Position der Bügelbewehrung

Auch das Rissbild der Basaltbetontübbinge wurde mit jenem der Stahlbetontübbinge verglichen, dabei fällt die annähernd idente Bildung von zahlreichen Einzelrissen in nahezu regelmäßigen Abständen auf.

In beiden Fällen bilden sich diese Abstände in Abhängigkeit der Bügelbewehrung. Abbildung 30 zeigt das Rissbild um den Scheitelpunkt. Mit der Durchbiegung korrelierend führt auch die Rissbreite bei den Versuchen mit Basalt zu höheren Werten bei gleicher Belastung. Genauere Auswertungen mittels Photogrammetrie folgen noch. Parallel zu den Segmentversuchen wurden ergänzende Betonprüfungen durchgeführt, um die Materialkennwerte der verwendeten Rezeptur zu erfassen. Die Bruchenergieversuche stehen derzeit noch aus und werden für die weiterführende numerische Modellierung benötigt.

Innenschalenwand mit Basaltbewehrung

Zur Ermittlung der bemessungsrelevanten Schnittgrößen wurde ein numerisches Modell erstellt und an die vorherrschenden Randbedingungen angepasst. Die zu berücksichtigenden Einwirkungen (Eigengewicht, Erddruck und Wasserdruck) während des Bauzustandes und im Endzustand wurden am Modell als Belastung definiert und entsprechend ÖNORM EN 1990 als Einwirkungskombinationen für den Grenzzustand der Tragfähigkeit sowie der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit kombiniert. Damit konnten die Bemessungsschnittgrößen zur Nachweisführung ermittelt werden. Diese Schritte sind in Abbildung 31 von links nach rechts aufgeschlüsselt.

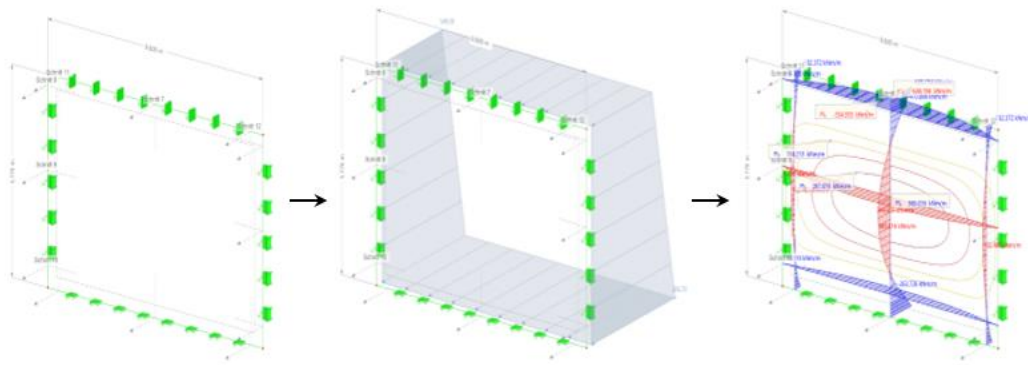


Abbildung 2.6.9: Numerisches Modell mit Festlegung der Randbedingungen (links), Aufbringen der Belastung und Lastkombination gemäß ÖNORM EN 1990 (mittig) und Extrahieren der maßgebenden Schnittgrößen (rechts)

Als Bemessungsgrundlagen wurden die DAfStb-Richtlinie „Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung“, die ÖNORM EN 1992-1-1 sowie die öbv-Richtlinie „Wasserundurchlässige Betonbauwerke – Weiße Wannen“ verwendet.

Zusammenfassung

Konnten die Arbeitsschritte gemäß Plan erarbeitet werden?

Ja, die geplanten Arbeitsschritte wurden im Wesentlichen umgesetzt.

Gab es wesentliche Abweichungen oder Veränderungen?

Nein, technisch konnten alle vorgesehenen Untersuchungen durchgeführt werden. Lediglich die Bruchenergieversuche stehen noch aus und sind geplant.

Welche Auswirkungen haben diese?

Die Auswirkungen sind gering. Die fehlenden Bruchenergiewerte werden für die weiterführende numerische Modellierung nachgereicht.

Wie muss die Planung adaptiert werden?

Die Bruchenergieversuche werden ergänzt. Parallel dazu wird die finale Auslegung des 3D-basaltbewehrten Tübbingsegments planmäßig weitergeführt.

Wie schätzen Sie den Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets ein (in %)?

Der Projektfortschritt liegt mit **100 % im Plan**, bezogen auf die Gesamtprojektlaufzeit.

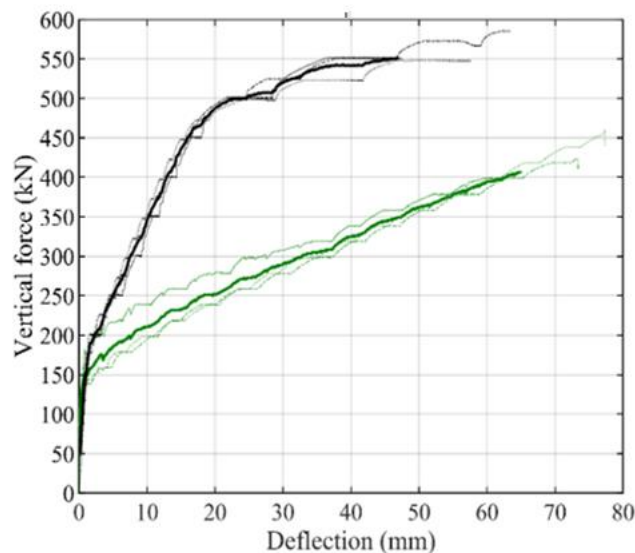


Abbildung 2.6.7: Versuchsergebnisse von Tragfähigkeitsuntersuchungen am Tübbingprüfstand der MUL der drei Basaltbetontübbinge im Vergleich vorhandener Stahlbetonversuchen (Dissertation Gehwolf 2015)

3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten

Abgesehen von zeitlichen Umstrukturierungen ergeben sich keine Änderungen bei den Projektkosten oder der Finanzierung. Die ursprünglich für das erste Jahr vorgesehenen Arbeiten von Smart Minerals wurden im geplanten Leistungsumfang im zweiten Forschungsjahr nachgeholt. Die Finanzierung erfolgt im Rahmen des bestehenden Budgets gemäß dem ursprünglichen Förderkonzept. Die InKind Leistungen der Unternehmen Hengl Mineral und Master Builder Solutions wurden auf die anderen Partnern aus der Wirtschaft aufgeteilt und von diesen erbracht.

4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit

Das Projekt trägt wesentlich zur ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Nachhaltigkeit im Tiefbau bzw. Infrastrukturbau bei.

Ökologie und Nachhaltigkeit

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

- **CO₂-Reduktion:** Herstellung eines CO₂-reduzierten Recyclingbetons mit ca. 20 % bis 25 % geringeren Emissionen (A1) aus dem Beton selbst wurden entwickelt und umgesetzt. Das Gesamtziel, die CO₂-Emissionen um ein Drittel zu senken, können bei zusätzlicher Optimierung der Bewehrung realistisch erreicht werden.
- **Recyclingzuschläge:** Ersatzraten von 50 % ≥ 4 mm bei rezyklierter Gesteinskörnung zeigten sehr gute Ergebnisse und konnten im Großversuch problemlos umgesetzt werden, wodurch Primärrohstoffe eingespart und Transportemissionen reduziert werden können. Es wurden auch Ersatzraten von 100 % mit rezyklierter Gesteinskörnung erfolgreich umgesetzt und es konnten daraus wertvolle Lehren für höhere Ersatzraten gewonnen werden.
- **Basaltbewehrung:** Durch die Verwendung von Basalt konnte der Stahlanteil um 30 % reduziert werden, was einer ungefähren CO₂-Einsparung von 25 % (A1–A3) entspricht.
- **Lebensdauererhöhung des Betons durch Rissminimierung:** Auf Basis thermohygro-mechanischer Simulationen konnte eine Rissminimierung im Beton erreicht werden, wodurch die Lebensdauer des Bauwerks erhöht werden kann.

Soziale Nachhaltigkeit

- **Förderung junger Wissenschaftler:innen:** Drei Doktorandinnen werden in den Bereichen Basaltbewehrung, Bauteiloptimierung und Verbindungstechnologien unterstützt.
- **Gender- und Diversitätsmaßnahmen:** Alle Projektstellen wurden gendergerecht ausgeschrieben und von 2 Doktorandinnen besetzt.
- **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, da sie nicht korrodiert und reduzieren damit wesentlich die 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 t bis 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.