

Upcycling von Fahrbahnplatten mit CO₂-Speicherung

1. Zielerreichung und Projektstatus	1
2. Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum	2
2.1. Projektleitung	2
2.2. Wissenschaftliche Leitung	2
2.3. Materialaufbereitung und Beton	3
2.4. Bewehrungsmix + Bemessung	11
2.5. Materiallogistik	25
3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten	32
4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit	32

1. Zielerreichung und Projektstatus

Das im Projekt angestrebte Ziel der Verknüpfung einer CO₂-Reduktion bei höchstmöglichem Niveau des Recyclings von Fertigbetonteilen konnten im laufenden Forschungsjahr erfolgreich durchgeführt werden. Finales Schlüsselement im Projekt war die Integration der Erkenntnisse aus Kleinkörper-Laborversuchen im Zuge der Herstellung von insgesamt 7 Großflächenplattentypen mit rezykliertem und teilweise zwangskarbonatisierter Recyclinggesteinskörnung sowie teilweise alternativer Bewehrung (Stahl-Basalt-Bewehrungsmix).

Im **Bereich Materialaufbereitung und Beton** wurden folgende Tätigkeiten erfolgreich durchgeführt und finalisiert:

Die **optimierte Aufbereitung** von Altbeton aus Betonfertigteilen, die Erforschung geeigneter Betonrezepturen sowie die Optimierung der Frischbetoneigenschaften waren bereits Inhalt in vorangegangenen Forschungsjahren. Hierbei konnten Rezepturen mit geeigneter Verarbeitbarkeit bei hohen Ersatzraten durch richtige Auswahl und optimale Dosierung verschiedener Betonzusatzmittel gefunden werden.

Weitergehend vertieft untersucht wurde der Prozess der **Zwangskarbonatisierung** der aus dem Altbeton hergestellten Gesteinskörnungen durch CO₂-Beaufschlagung. Dabei wurde im ggst. Forschungsjahr neben der CO₂-Aufnahmekapazität der Fokus auf die materialtechnologischen Eigenschaften von Frisch- und v.a. Festbeton gelegt, welcher mit karbonatisierter Gesteinskörnung hergestellt wurde.

In ggst. Forschungsjahr lag der **Schwerpunkt auf den Festbetoneigenschaften**, wobei neben der Betonfestigkeit besonders die **Dauerhaftigkeit** der hergestellten Betone untersucht wurde. Ziel war der Nachweis der für Großflächenplatten geforderten Frostbeständigkeit unter Anwesenheit von Taumitteln (XF4), der mechanischen Abriebfestigkeit (XM2) sowie einer kompakten und dichten Betonmikrostruktur (betonmikroskopische Darstellung des jeweiligen Betonmikrogefüges), welche sich über eine geringe maximale Wassereindringtiefe (geringe Eindringtiefe der Karbonatisierungsfrent, XC4) auszeichnet.

Zum **praxisnahen Nachweis** der Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit der entwickelten RC-Beton wurden **7 Großflächenplattentypen** mit unterschiedlichen Recyclinganteil im Fertigteilbetonwerk hergestellt und unter realitätsnahen Expositionsbedingungen ausgelagert, um die Performance der entwickelten Recyclingbeton-Mischungen im Laufe der nächsten Jahre im Praxistest zu erforschen.

Aus den kalorimetrischen Temperaturmessungen wurden Prognosemodelle hinsichtlich der erhärtungsbedingten **Temperatur- und Spannungsentwicklung** in Fertigteilplatten aus rezykliertem Gesteinskörnung abgeleitet und ein Konzept betr. die optimierte Nachbehandlung zur Rissvermeidung erstellt.

Hinsichtlich **Bewehrungsmix und Bemessung** wurden Untersuchungen zur Kombination von Stahlfasern und Basaltfasern durchgeführt und erfolgreich an Großflächenplatten angewandt. Darüber hinaus wurde ein

numerisches Modell zur Abbildung des Tragverhaltens von Großflächenflächenplatten unter Anwendung eines Bewehrungsmix erstellt.

In Bezug auf die **Materiallogistik**: wurde bereits in vorangehenden Forschungsjahren ein Vergleich bzw. die Optimierung des Aufbereitungsprozesses (trocken vs. nass, Verwendung unterschiedlicher Brechertypen, etc.) durchgeführt. In ggst. Forschungsjahr lag der Fokus auf der Beurteilung und Optimierung der Verfahrensabläufe hinsichtlich Plattenausbau, Aufbereitung und Wiedereinbau. Hierfür wurde eine Lifecycle-Analyse auf Grundlage von Betonrezepturen und Annahmen betr. Aufbereitungsort (Transportdistanzen) durchgeführt, um optimale Szenarien hinsichtlich der Arbeitsabläufe zu entwickeln.

Zusammenfassend können folgende **Meilensteine** des ggst. Forschungsjahres genannt werden:

- Erfolgreiche Zwangskarbonatisierung unterschiedlicher Recyclingbeton-Fractionen und deren Anwendung bei der Betonherstellung
- Herstellung von RC-Betonen mit bis zu 100 % Ersatzanteil, tw. karbonatisiert und tw. mit alternativer Faserbewehrung mit hoher Festigkeit und Dauerhaftigkeit sowohl im Labormaßstab, als auch im Werk im Maßstab 1:1 für Feldversuche
- Identifizierung von Schlüsselkomponenten in der Materiallogistik: was sind die wesentlichsten Energie- und Emissionstreiber

Alle Arbeitspakete konnten planmäßig bearbeitet und im Rahmen der Projektverlängerung erfolgreich finalisiert werden. Es konnte gezeigt werden, dass rezyklierte Gesteinskörnung aus Fertigteilbeton erneut zu hochwertigen Betonfertigteilen verarbeitet werden kann und dass gerade CO₂-optimierte Recyclingbeton-Gesteinskörnung für Fertigbetonteile aus dem Infrastrukturbereich – auch bei höheren Austauschraten – realistisch und technisch einsetzbar sind. Der entwickelte Stahl- und Basaltfasermix zeigt sowohl hinsichtlich Frisch-, als auch für Festbeton eine sehr gute Anwendbarkeit und wirkt sich ebenfalls positiv auf dessen Ökobilanz aus. Durch die Durchführung einer Lebenszyklusanalyse ggst. Recyclingbetone ist es möglich weitere Stellschrauben zur Emissionsverringerung zu identifizieren.

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 Zwischen- bzw. Endberichtenberichten und die termingerechte Einholung von Partnerbeiträgen.

Im Zuge der praktischen Umsetzung des Arbeitsplans kam es zu organisationsbedingten Verzögerungen im finalen Projektteil der Großflächenplatten-Herstellung, weshalb die Projektlaufzeit kostenneutral verlängert wurde. In der Verlängerung konnten auch diese Arbeiten erfolgreich abgeschlossen werden.

Der Projektfortschritt liegt bei **100 %**.

2.2. Wissenschaftliche Leitung

Fertigstellungsgrad: 100%

Die wissenschaftliche Leitung des Projekts erfolgte im Berichtszeitraum in enger Abstimmung zwischen Projektleiter und 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 ohne wesentliche Abweichungen. Der Projektfortschritt liegt bei **100 %**.

2.3. Materialaufbereitung und Beton

Fertigstellungsgrad: 100%

2.3.1 Ermittlung der mechanischen + physikalischen Parameter des Altbetons

Die geometrischen, mechanischen, chemischen und optischen Eigenschaften der für die Betonageversuche verwendeten Gesteinskörnungen wurden in den vorherigen Projektjahren umfassend erhoben. Veränderliche Parameter wie der Wassergehalt der RC-Gesteinskörnung wurden jedoch regelmäßig bzw. unmittelbar vor den Versuchsbetonagen bestimmt.

2.3.2 Maximierung des Anteiles rezyklierter Gesteinskörnungen

Im Forschungsprojekt wurden Betonrezepturen mit verschiedenen Ersatzraten natürlicher Gesteinskörnung durch RC-Material sowie unterschiedlichen Aufbereitungsarten (Trocken- und Nassaufbereitung) entwickelt und deren Frisch- und Festbetoneigenschaften optimiert. Für die optimierten Rezepturen mit nass aufbereiteter RC-Gesteinskörnung wurden bei unterschiedlichen Austauschraten die zentralen mechanischen und dauerhaftigkeitsrelevanten Eigenschaften sowie die Frischbetoneigenschaften untersucht.

2.3.2.1 Frischbetoneigenschaften

Es wurden Ausbreitmaß, Luftporengehalt und Frischbetonrohndicht bestimmt. Es ist festzuhalten, dass mit einer höheren Austauschrate ein erhöhter Einsatz von Betonchemie zu verzeichnen ist, um die geforderten Frischbetoneigenschaften einhalten zu können.

2.3.2.2 Festbetoneigenschaften

- Druckfestigkeit

Es wurde die Druckfestigkeit nach 3, 7, 28, 56 und 90 Tagen (Abb. 1) untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass der Festigkeitsunterschied zwischen CEM II/C und CEM II/B bei gleicher Austauschrate nur gering ausfällt. Mit steigender Austauschrate konnte zudem eine erhöhte Betondruckfestigkeit festgestellt werden.

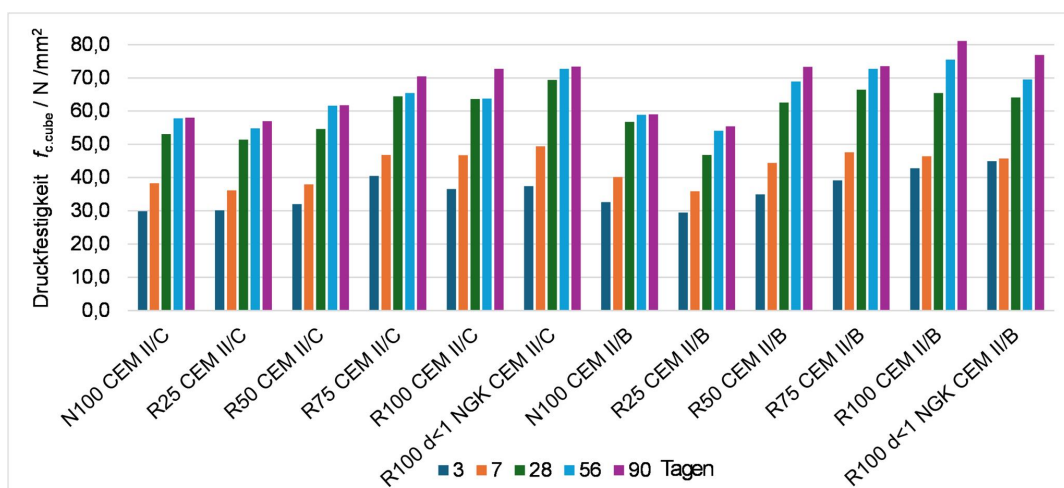


Abbildung 2.3.1: Abb.1 Druckfestigkeit der unterschiedlichen Betonsorten nach verschiedenen Zeiträumen

- Spaltzugfestigkeit

Bei der Spaltzugfestigkeit zeigen sich gleiche Tendenzen wie bei der Druckfestigkeit (Abb. 2).

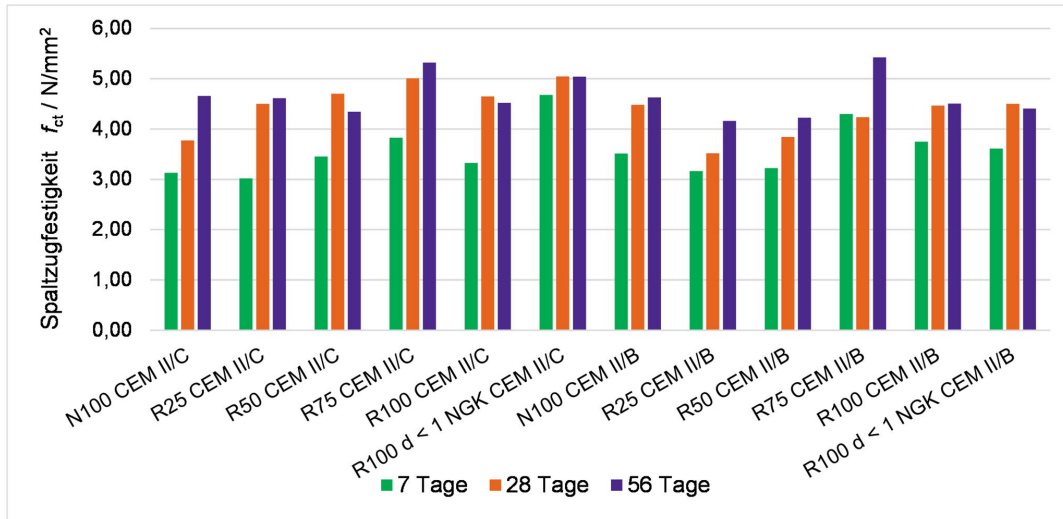


Abbildung 2.3.2: Abb. 2 Spaltzugfestigkeit der unterschiedlichen Betonsorten nach verschiedenen Zeiträumen

2.3.2.3 Dauerhaftigkeitseigenschaften

- Abriebswiderstand

Der Abriebswiderstand wurde nach dem Verfahren von Böhme bestimmt. Alle Betonsorten halten den max. Abriebswiderstand (15 cm³/50cm²) für XM 2 ein (Abb. 3).

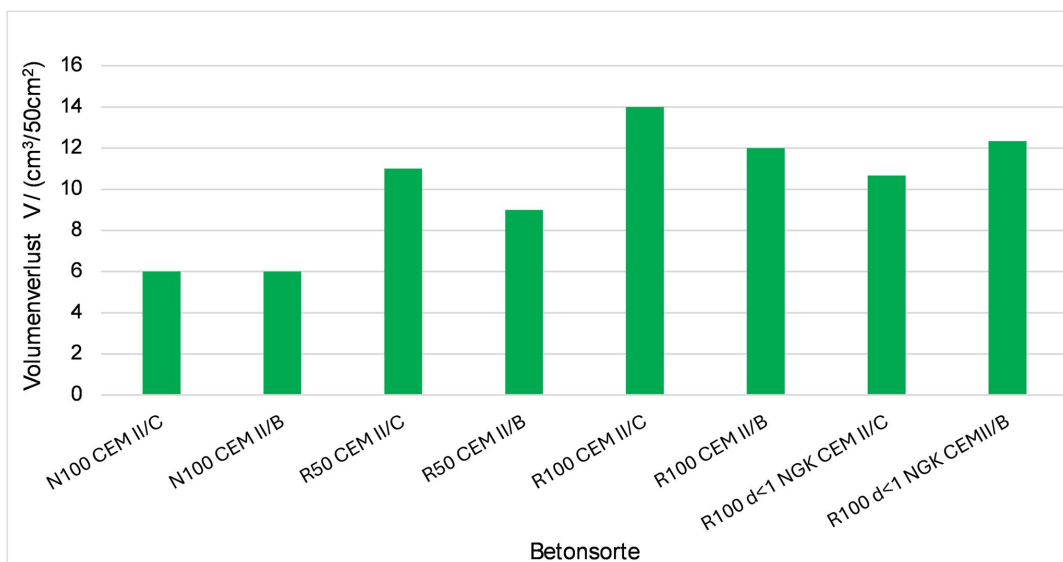


Abbildung 2.3.3: Abb. 3 Abriebswiderstand nach Böhme der verschiedenen Betonsorten

- Wassereindringtiefe

Es werden Wassereindringtiefen von unter 20 mm erreicht, dies entspricht einer Expositionsklasse von XW 2 (Abb. 4).

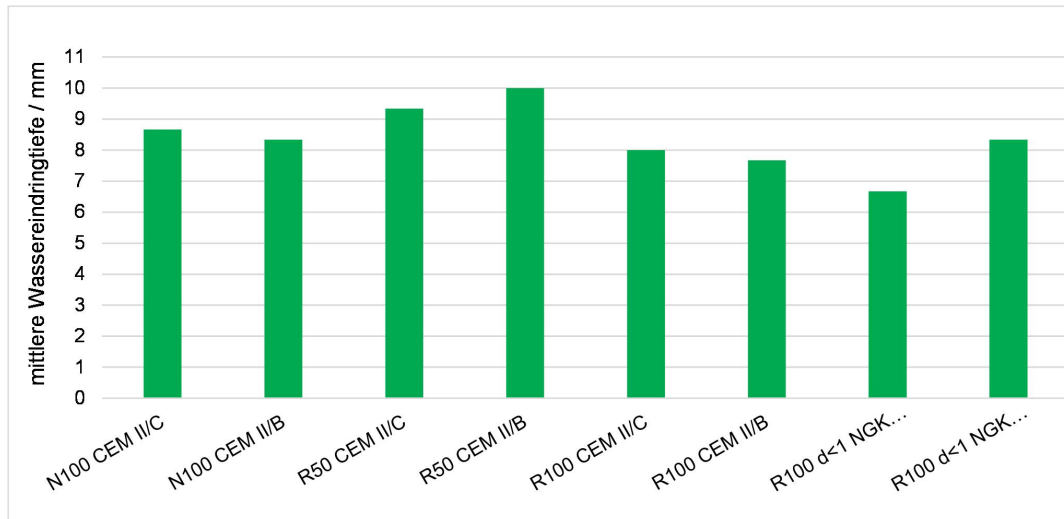


Abbildung 2.3.4: Abb. 4 Wassereindringtiefen der verschiedenen Betonsorten

2.3.3 Bewertung/Optimierung des Brech- und Waschvorganges

Die Qualität von RC-Gesteinskörnungen hängt sowohl vom Ausgangsbeton als auch von der gewählten Aufbereitungsart ab. Während die Brecherart Kornform und -verteilung beeinflusst, entfernt eine Nassaufbereitung zusätzlich Stör- und Feinteile. Sie verbessert die Kornform, reduziert die Wasseraufnahme, erhöht den Abriebwiderstand und senkt den Störstoffanteil, erfordert jedoch mehr Energie und Wasser und erzeugt zusätzliche Feinteile. Der Vergleich von RC-Gesteinskörnungen aus Fertigteilbeton der Wiener Linien und der ÖBB zeigt insgesamt Vorteile der Nassaufbereitung. Die resultierenden Materialeigenschaften erhöhen die Verarbeitbarkeit des Betons und wirken sich positiv auf die Festbetoneigenschaften aus.

2.3.4 CO₂-Beaufschlagung

Aufbauend auf die Untersuchungen der CO₂-Speicherkapazität der rezyklierten Gesteinskörnung im ersten Forschungsjahr, wurden die Effekte der Zwangskarbonatisierung auf die Gesteinskörnung und daraus hergestellte Betone sowohl auf Frisch- als auch auf Festbetonebene untersucht. Die Ergebnisse wurden in der Zeitschrift Beton und Stahlbetonbau unter folgendem Titel veröffentlicht:

Hron, J. et al. (2025) *Effekte einer Zwangskarbonatisierung auf rezyklierte Gesteinskörnung aus Beton und daraus hergestellte Betone* in: Beton- und Stahlbetonbau. <https://doi.org/10.1002/best.70022>

2.3.4 Optimierung des Betoniervorganges unter Berücksichtigung der kalorimetrischen Temperaturmessungen und der Nachbehandlung

Der Beton wurde hinsichtlich seiner erhärtungsbedingten Temperatur-, Festigkeits- und Steifigkeitsentwicklung sowie dem Schwinden und der zu erwartenden Zwangspannungsentwicklung unter verformungsbehinderter Lagerung untersucht. Hierzu wurde folgendes Versuchsprogramm durchgeführt:

1. Probestonage im kleinskaligen Maßstab zur Eignungsprüfung der Rezeptur und der Herstellungsanweisung für den Großversuch
2. Vorbereitung des Begleitprogramms für den Großversuch folgenden Umfangs:

2 Thermowürfel

2 Schwindzylinder

15 Würfel 150 mm für Druckfestigkeitsprüfungen (3, 7, 14, 28 u. 56 d)

15 Würfel 150 mm für Spaltzugfestigkeitsprüfungen (3, 7, 14, 28 u. 56 d)

12 Zylinder 150 x 300 mm für E-Modulprüfungen (3, 7, 14 u. 28 d)

3 Kriechzylinder für Zugkriechversuche mit unterschiedlicher Belastungsgeschichte

1. Vorbereitung des Zwangrahmens
2. Vorbereitung der Mischung
3. Betonmischung am Großmischer (ca. 500 L)
4. Frischbetonprüfungen
5. Betoneinbau in die jeweiligen Schalungen für die unterschiedlichen Versuchskörper
6. Einzelprüfungen gemäß Protokoll und Dauermonitoring Zwangrahmen
7. Aufbringen der Lastgeschichte in die Zugkriechzylinder
8. Ergebnisauswertung und Erarbeitung von Schlussfolgerungen

Die Arbeiten sind in Abb. 5 dargestellt.



Abbildung 2.3.5: Abb. 5 Arbeitsschritte Betonage

Als Ergebnisgrößen wurden die genannten Kenngrößen zur Temperatur-, Festigkeits- und Steifigkeitsentwicklung sowie dem Schwinden während der Betonerhärtung, die Temperatur- und Spannungsgeschichte im Zwangrahmen und das Zugkriechen ermittelt. Anhand dieser Ergebnisgrößen wurden anschließend die Eingangsgrößen für die Materialmodelle zur thermomechanischen Simulation abgeleitet Abb. 6.

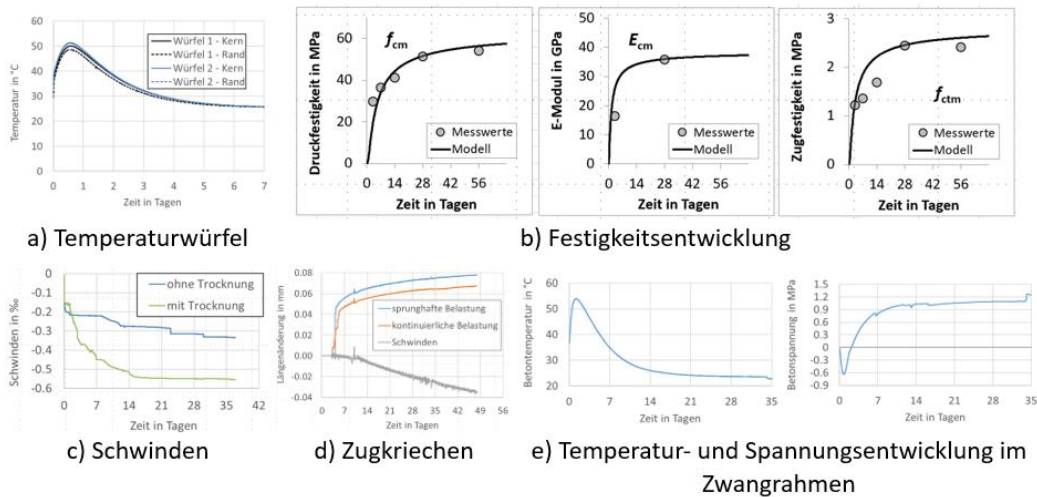


Abbildung 2.3.6: Abb. 6 Ergebnisse der thermodynamischen Simulation

Aus der Durchführung des Großversuchs konnten wichtige Erkenntnisse für zukünftige Großversuche mit Recyclingbeton gewonnen werden. Konkret geht es um Großversuche mit planmäßigem Vornässen der Zuschlagstoffe im Mischer unter leichtem Drehen. Bei großen Volumina führt dies zu erheblicher Temperaturzunahme des Frischbetons infolge Reibung der Zuschlagstoffe mit negativen Auswirkungen auf die Sicherstellung der Verarbeitbarkeit und eines ausreichenden Verarbeitungsfensters. Das Vornässen sollte daher nicht im Mischer, sondern vorab durch Lagerung in Fässern mit Drehen erfolgen.

Anschließend wurden thermohygro-mechanische Simulationen zur Analyse der Temperatur- und Spannungsentwicklung auf Bauteilebene durchgeführt. Das Berechnungsmodell zeigt Abb. 7.

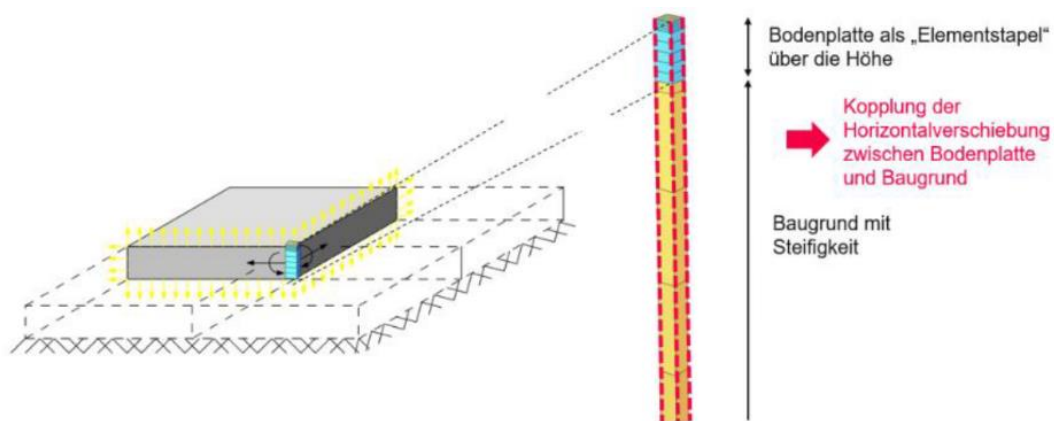
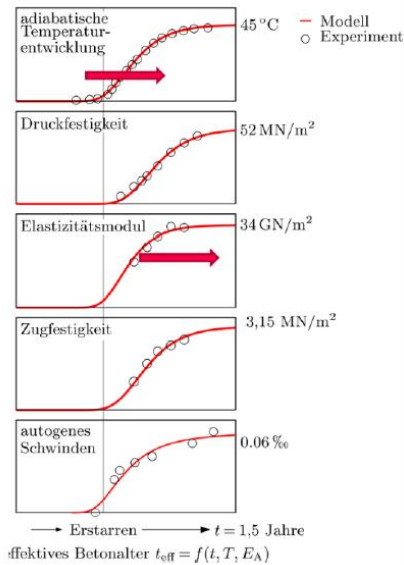


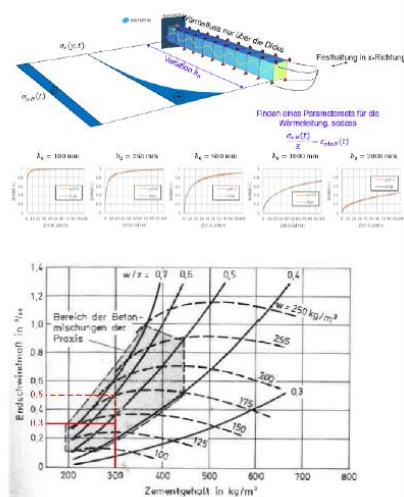
Abbildung 2.3.7: Abb. 7 Berechnungsmodell

Als Ergebnisgrößen dieser Simulation wurden Temperaturen und Spannungen ohne und mit Eigenspannungen im Zeitverlauf ausgewertet. Hierbei zeigt sich, dass die erhärtungsbedingte Temperatur- und Spannungsentwicklung im Vergleich zu den Verformungseinwirkungen im Nutzungszeitraum infolge Trocknungsschwindens von untergeordneter Bedeutung sind. Die Funktionsweise des Modells veranschaulicht Abb. 8.

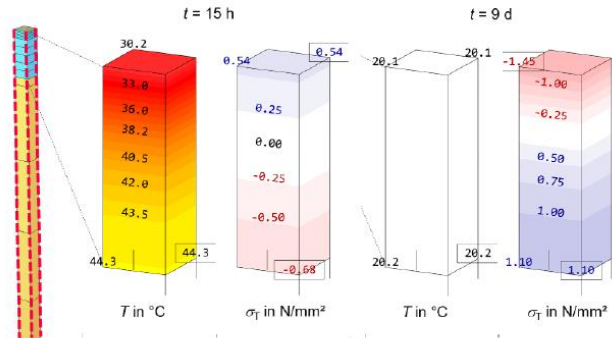
zeitliches Materialverhalten infolge Hydratation:



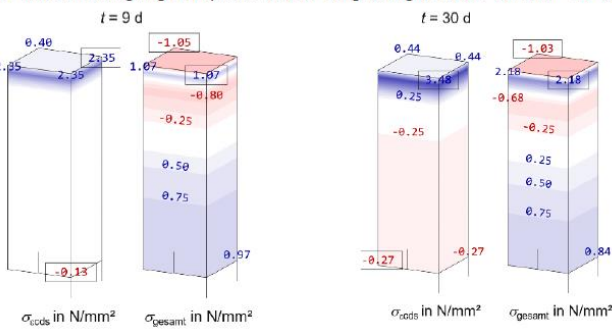
zeit- und ortsdiskrete Simulation des Trocknungsschwindens gemäß Leimgehalt, w/b-Wert und RH:



Berechnungsergebnisse für Temperaturgeschichte infolge Betonerhärtung und Grundschrindens:



Berechnungsergebnisse in Kombination mit Trocknungsschwinden für eine für Außenbedingungen repräsentative Umgebungsfuchte von RH = 80 %:



Berechnungsergebnisse für Temperaturgeschichte infolge Betonerhärtung in Kombination mit Grund- und Trocknungsschwinden sowie Kriechen:

Spannungsgeschichte $\sigma_c(t)$ unter kombinierter Betrachtung aller Verformungseinwirkungen und der Steifigkeitsentwicklung:

- Temperatur $\alpha_T \Delta T$
- Schwindens $\epsilon_{cs}(t)$ und
- Kriechens $\epsilon_{cc}(t)$

$$\sigma_c(t) = \int_0^t (-\alpha \cdot \Delta T + \Delta \epsilon_{cs}(t) + \Delta \epsilon_{cc}(t)) \cdot E(t) dt$$

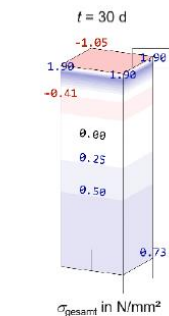


Abbildung 2.3.8: Abb. 8 Funktionsweise des Modells

2.3.5 Herstellung von Großflächenplatten aus RC-Gesteinskörnung

Nach erfolgreicher Beprobung der Recyclingbetone im Labormaßstab sollten Großversuche folgen. Dazu wurden von der MABA Fertigteilindustrie GmbH die in Tab. 1 beschriebenen 7 Plattentypen hergestellt.

Typ Nr.	Beschreibung Plattentyp	Anzahl hergestellter Platten
1	Referenzplatte	1
2	30 % Gleisschotter $d > 2$ mm + bisherige Stahlbewehrung	2
3	30 % RC-GK $d > 2$ mm der MABA + bisherige Stahlbewehrung	2
4	50 % RC-GK $d > 2$ mm der MABA + bisherige Stahlbewehrung	2
5	50 % karbonatisierte RC-GK $d > 2$ mm der MABA + bisherige Stahlbewehrung	1
6	50 % RC-GK $d > 2$ mm der MABA + Fasercocktail (Stahl- + Basaltfasern = $30 \text{ kg/m}^3 + 5 \text{ kg/m}^3$)	2
7	100 % RC-GK + bisherige Stahlbewehrung	2

Abbildung 2.3.9: Tab. 1 Übersicht über die hergestellten Plattentypen

Die Herstellung der Großflächenplatten fand im Fertigteilwerk in Wöllersdorf mit von der Fa. MABA zur Verfügung gestellter RC-GK statt. Die Frischbetoneigenschaften wurden von Mitarbeitern der MABA dokumentiert. Die Festbetoneigenschaften nach 28 Tagen wurden an der BOKU untersucht. In Abb. 9 sind die erhobenen Messwerte für Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, E-Modul und Abriebswiderstand für die einzelnen Betonsorten dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit steigender Austauschrate (natürliche GK ersetzt durch rezyklierte GK) die Druckfestigkeit sinkt, beim E-Modul ist selbiges zu beobachten. Die Spaltzugfestigkeit vermindert sich ebenso bei steigender Austauschrate, wobei Typ 5 und 6 hier Ausnahmen bilden, diese befinden sich auf einem Niveau mit Typ 3. Mit steigender Austauschrate ist eine Erhöhung des Abriebs beim Prüfverfahren nach Böhme zu verzeichnen. Lediglich Typ 1 schafft die Expositionsklasse XM 2 einzuhalten. XM 1 kann von allen Plattentypen eingehalten werden. Von Typ 2 wurden keine Messwerte erhoben, diese Platten wurden von der MABA bereits vor längerer Zeit hergestellt.

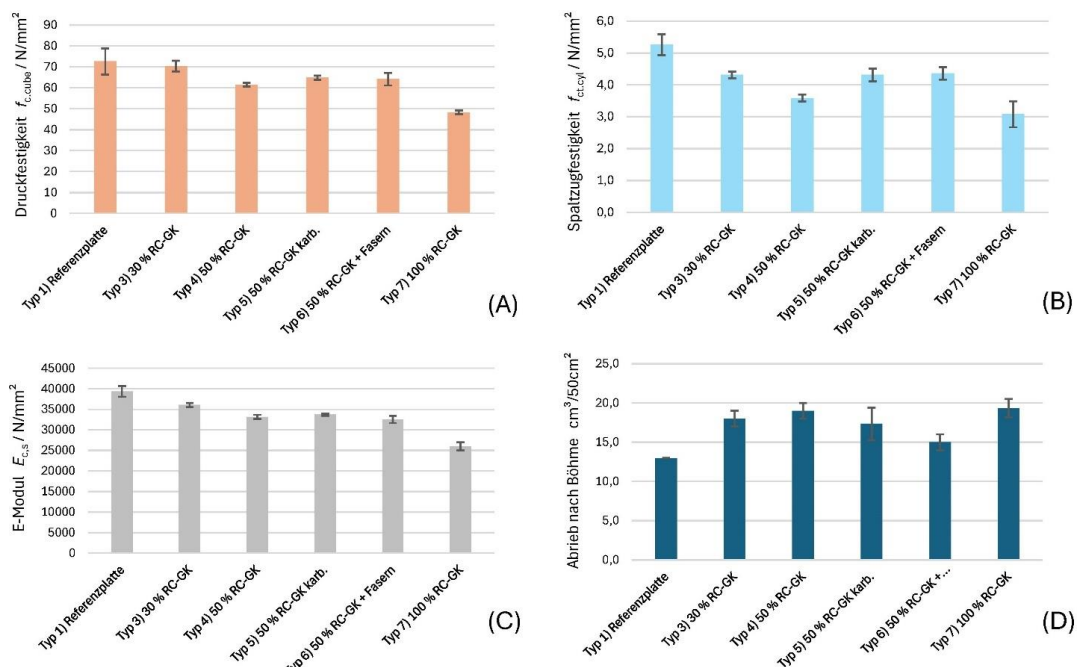


Abbildung 2.3.10: Abb. 9 (A) Druckfestigkeit, (B) Spaltzugfestigkeit, (C) E-Modul (D) Abriebswiderstand der untersuchten Betonsorten 28 Tage nach Betonagedatum

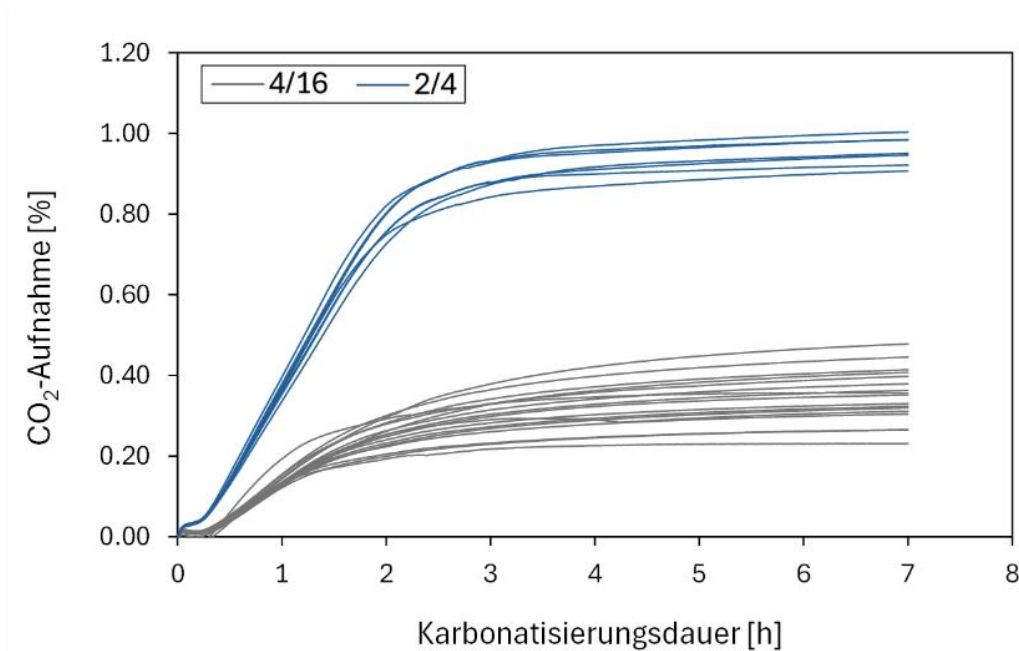


Abbildung 2.3.11: Abb. 10 Ergebnisse der Versuche zur Karbonatisierung der RC-GK der Fa. MABA

Für die Herstellung des Plattentyps Nr. 5 wurden insgesamt ca. 1 t RC-GK in den Fraktionen 2/4 und 4/16 mit CO₂ beaufschlagt. Die Ergebnisse der Ermittlung der CO₂-Speicherung der beiden Fraktionen sind in Abb. 10 dargestellt:

Großflächenplatte	Plattentyp
1	Typ 3
2	Typ 3
3	Typ 6
4	Typ 6
5	Typ 4
6	Typ 4
7	Typ 7
8	Typ 7
9	Typ 1
10	Typ 5

Abbildung 2.3.12: Tab. 2 Verweis Auslagerungsposition zu Plattentyp

Die Großflächenplatten wurden am Betriebsgelände der Hauptwerkstätte der Wiener Linien ausgelagert. In Abb. 11 ist die Anordnung der Platten veranschaulicht. **Die alten Platten wurden über diesen Abschnitt ausgebaut und werden nach Ende des Projekts oder bei Versagen der Versuchsplatten wieder eingebaut oder durch neuwertige Großflächenplatten ersetzt.** In Tab. 2 wird ein Verweis zu der in Abb.

11 dargestellten Anordnung der Platten gestellt. Während einer Zeitdauer von einem Jahr werden die atmosphärischen Bedingungen aufgezeichnet. Nach einem Jahr sollen Kernbohrungen der Platten genommen und das Mikrogefüge der Platten untersucht werden.

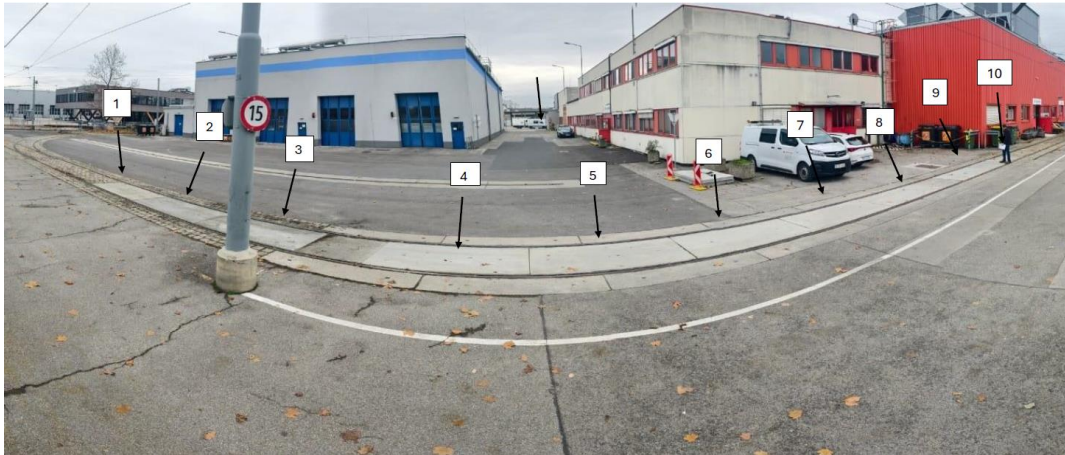


Abbildung 2.3.13: Abb. 11 Auslagerung der Versuchsplatten am Werksgelände der Wiener Linien

Der Projektfortschritt von Arbeitspaket „Materialaufbereitung und Beton“ liegt bei **100 %**.

2.4. Bewehrungsmix + Bemessung

Fertigstellungsgrad: 100%

2.4.1 Allgemein

Dieses Arbeitspaket untersucht ein Betonkonzept mit natürlichen und rezyklierten Gesteinskörnungen sowie einem Fasercocktail aus Stahl- und Basaltfasern zur Reduktion konventioneller Bewehrung.

Ziel dieses Arbeitspakets ist die Untersuchung und Entwicklung eines Betonkonzepts mit innovativem Fasercocktail für Fahrbahnplatten im Straßenbahnbereich, das natürliche und rezyklierte Gesteinskörnungen nutzt und den Bedarf an konventioneller Stahlbewehrung reduziert. Basaltfasern werden aufgrund ihrer hohen Zugfestigkeit und ihrer Wirkung auf Mikrorisse im elastischen Bereich eingesetzt, während Stahlfasern durch den Bridging-Effekt die Nachrisstragfähigkeit und Duktilität erhöhen. Die Methodik umfasst Materialuntersuchungen mit variierenden Faserlängen und Dosierungen sowie Druck-, Zug- und Biegeversuche zur Ableitung der maßgebenden Bemessungskennwerte. Die Faserwirkung ist in Abb. 12 dargestellt.

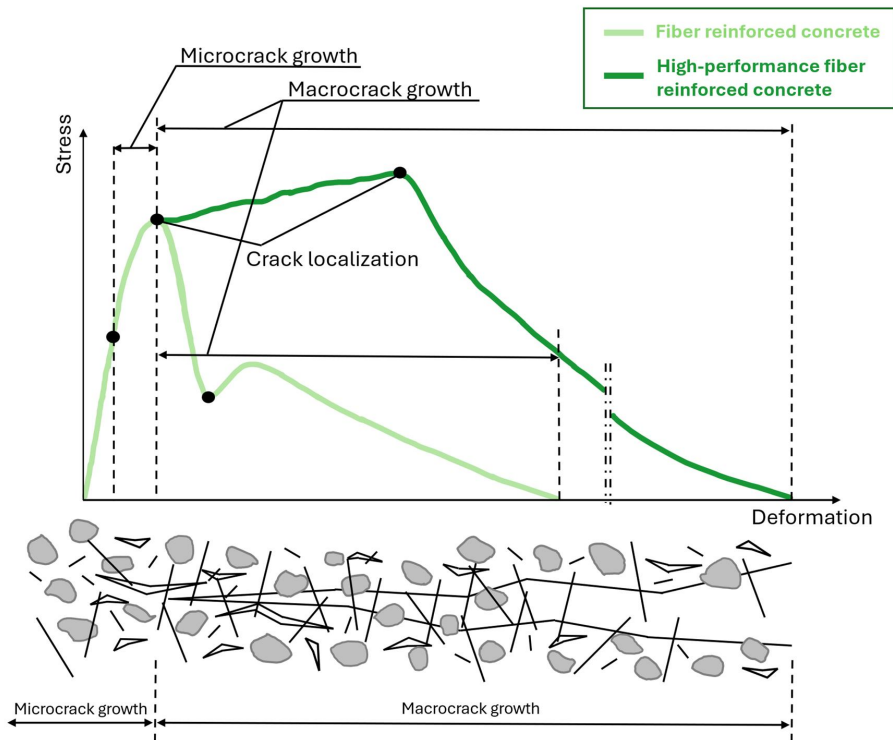


Abbildung 2.4.1: Abb. 12 Spannungs-Dehnungs-Verhalten von faserverstärktem und hochleistungs-faserverstärktem Beton.

2.4.2 Experimentelle Untersuchungen

Im Rahmen der Untersuchungen wird ein innovativer Fasercocktail aus Stahl- und Basaltfasern in Kombination mit CO₂-reduziertem Zement und teilweise rezyklierten Gesteinskörnungen bewertet. Ziel ist die Optimierung der Mischung hinsichtlich Verarbeitbarkeit, Faserverteilung und Tragverhalten. Untersucht werden dazu unterschiedliche Faserlängen und Dosierungen sowie deren Einfluss auf Frischbeton- und Festbetoneigenschaften.



Abbildung 2.4.2: Abb. 13 Basaltfasern (Länge: 12, 24, 36 mm). Rechts: Stahlfasern (Länge: 60 mm) – verwendet zur Herstellung von faserverstärktem Beton im Rahmen des Projekts.

2.4.2.1 Frischbetoneigenschaften

Die Frischbetoneigenschaften der hergestellten Mischungen wurden anhand von Ausbreitmaß- und Luftporengehaltsversuchen bewertet (Abb. 14–Abb. 16). Die Tab. 3 und Tab. 4 verdeutlichen die unterschiedlichen Mischungsverhältnisse sowie die Variation der Fasergehalte.



Abbildung 2.4.3: Abb. 14 Ausbreitmaßversuch der Fasercocktail-Mischung. Rechts: Luftporengehaltsversuch der Stahlfasermischung.

Mischung	Verhältnis von		Zement (kg/m ³)	Wasser (kg/m ³)	NG (kg/m ³)	RG (kg/m ³)	Stahl fasern (kg/m ³)	Basalt Fasern (kg/m ³)
	Wasser zu Bindemittel (%)							
PC	0.45		300	135	998	998	-	-
SF30	0.45		300	135	998	998	30	-
BF5	0.45		300	135	998	998	-	5
BF15	0.45		300	135	998	998	-	15
FC5-30	0.45		300	135	998	998	30	5

Abbildung 2.4.4: Tab. 4 Betonmischungen der Serie 1 mit variierenden Anteilen an Stahl- und Basaltfasern.

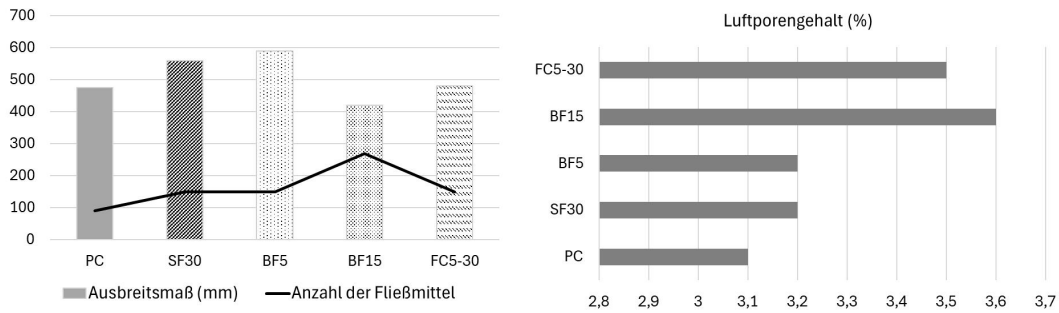


Abbildung 2.4.5: Abb. 15 Ausbreitmaß und benötigte Menge an Fließmittel. Rechts: Luftporengehalt (%) der jeweiligen Mischungen.

Mischung	Verhältnis von		Zement (kg/m ³)	Wasser (kg/m ³)	NG (kg/m ³)	RG (kg/m ³)	Stahl fasern (kg/m ³)	Basalt Fasern (kg/m ³)	Basalt Fasern Länge (mm)
	Wasser zu Bindemittel (%)								
PC	0.45		300	135	973	973	-	-	-
SF30BF-5-12	0.45		300	135	973	973	30	5	12
SF30BF-5-24	0.45		300	135	973	973	30	5	24
SF30BF-7-12	0.45		300	135	973	973	30	7	12
SF30BF-7-24	0.45		300	135	973	973	30	7	24

Abbildung 2.4.6: Tab 5. Betonmischungen der Serie 2 mit variierenden Anteilen an Stahl- und Basaltfasern.

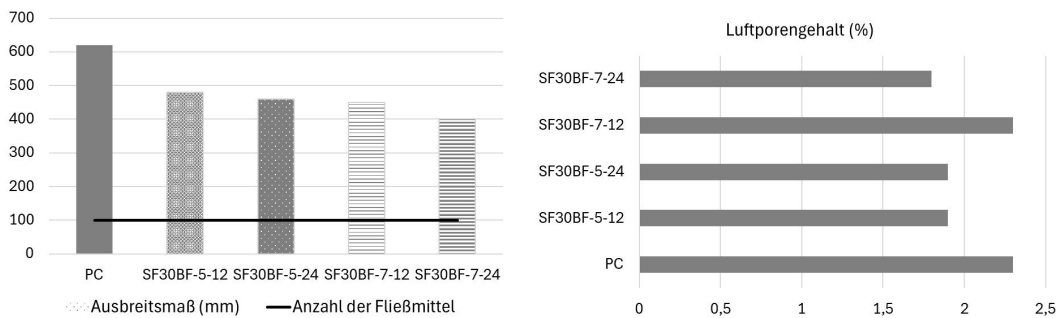


Abbildung 2.4.7: Abb. 16 Frischbetoneigenschaften der Mischungen der Serie 2. Links: Ausbreitmaß und benötigte Menge an Fließmittel. Rechts: Luftporengehalt (%) der jeweiligen Mischungen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Zugabe von Basalt- und Stahlfasern die Verarbeitbarkeit reduziert, was sich in geringeren Ausbreitmaßen und einem erhöhten Bedarf an Fließmittel widerspiegelt. Gleichzeitig steigt mit zunehmender Faserzugabe, insbesondere bei höheren Basaltfaserlängen, der Luftporengehalt moderat an. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse, dass der Fasercocktail einen spürbaren Einfluss auf Konsistenz, Luftporenbildung und Mischenergie hat, wobei dennoch eine ausreichend homogene Verteilung und verarbeitbare Konsistenz erreicht werden konnte.

2.4.2.2 Festbetoneigenschaften

Abb. 17 zeigt die verwendeten Prüfaufbauten zur Bestimmung der Druck-, Spaltzug- und Biegezugfestigkeit. Der 4-Punkt-Biegeversuch wurde gemäß ÖVBB-Richtlinie Faserbeton durchgeführt. Die Versuche ermöglichen eine umfassende Charakterisierung des Tragverhaltens der Mischungen.

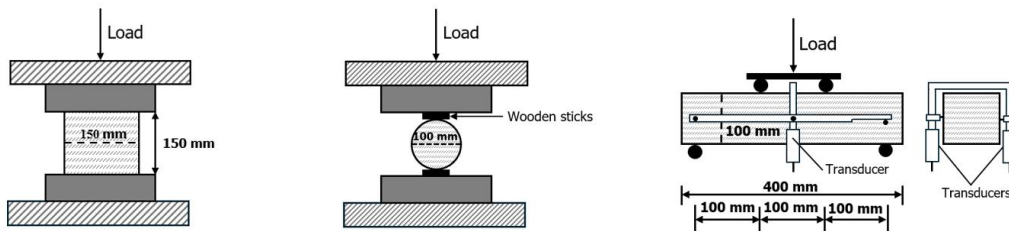


Abbildung 2.4.8: Abb. 17 Versuchsaufbauten und Abmessungen. Links: Druckversuch. Mitte: Spaltzugversuch (Brazilian Test). Rechts: Vier-Punkt-Biegeversuch.

Mischung	Druckfestigkeit	Spaltzugfestigkeit	Erste-Riss-Biegezugfestigkeit	Max. Biegezugfestigkeit	Bruchenergie
	f_{cm} (N/mm ²)	$f_{ctm,sp}$ (N/mm ²)	f_{a1} (N/mm ²)	f_{max} (N/mm ²)	$G_{f(0-3.5mm)}$ (N/mm)
PC	33,3	3	1,8	1,8	0,04
SF30	32,7	3,5	1,3	2,6	7,37
BF5	29,4	2,6	2,1	2,1	0,44
BF15	31,3	2,5	3,1	3,1	0,58
FC5-30	30,9	2,7	3,3	4,2	12,8

Abbildung 2.4.9: Tab.6 Mechanische Eigenschaften der Serie 1: Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, Erste-Riss-Biegezugfestigkeit, maximale Biegezugfestigkeit und Bruchenergie (jeweils Mittelwerte der geprüften Proben).

Tab. 6 Mechanische Eigenschaften der Serie 1: Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, Erste-Riss-Biegezugfestigkeit, maximale Biegezugfestigkeit und Bruchenergie (jeweils Mittelwerte der geprüften Proben).

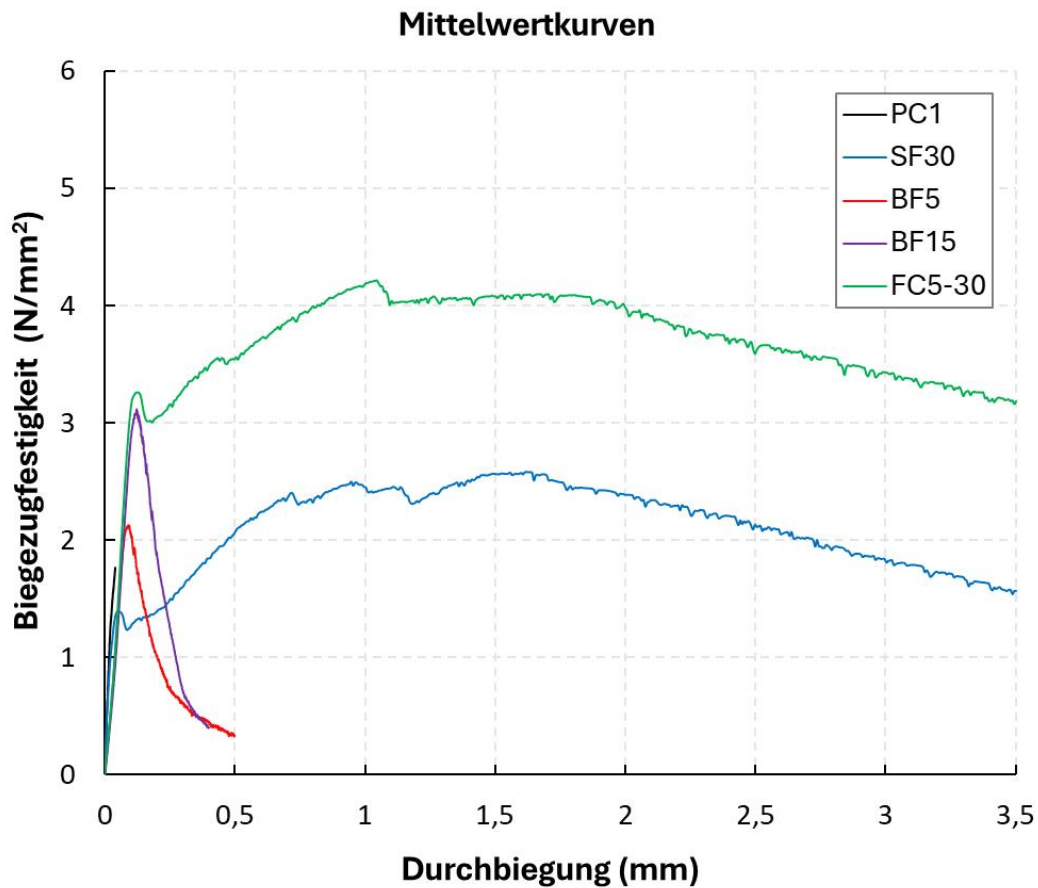


Abbildung 2.4.10: Abb. 18 Biegezugfestigkeit–CMOD-Diagramme (4-Punkt-Biegezugversuch) der Serie 1.

Tab. 5 und Abb. 18 zeigen die Ergebnisse der Serie 1. Die reine Betonmischung PC erreicht die höchsten Druckfestigkeiten, während die Fasern vor allem das Biegeverhalten beeinflussen. Mit steigendem Basaltfasergehalt verbessert sich die Erste-Riss-Biegezugfestigkeit deutlich. Die FC5-30-Mischung zeigt das ausgeprägteste duktil-elastische Verhalten und die höchste Bruchenergie.

Mischung	Druckfestigkeit	Spaltzugfestigkeit	Erste-Riss-Biegezugfestigkeit	Max. Biegezugfestigkeit	Bruchenergie $G_{f(0-3.5\text{ mm})}$ (N/mm)
	f_{cm} (N/mm ²)	$f_{ctm,sp}$ (N/mm ²)	f_{a1} (N/mm ²)	f_{max} (N/mm ²)	
PC	23,3	2,0	1,5	1,5	0,04
SF30BF-5-12	19,8	2,1	2,4	2,9	8,10
SF30BF-5-24	16,5	2,0	2,6	2,6	7,00
SF30BF-7-12	20,3	2,3	2,7	2,7	7,50
SF30BF-7-24	19,7	2,1	2,6	2,8	8,70

Abbildung 2.4.11: Tab. 7 Mechanische Eigenschaften der Serie 2: Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, Erste-Riss-Biegezugfestigkeit, maximale Biegezugfestigkeit und Bruchenergie (jeweils Mittelwerte der geprüften Proben).

Tab. 7 Mechanische Eigenschaften der Serie 2: Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, Erste-Riss-Biegezugfestigkeit, maximale Biegezugfestigkeit und Bruchenergie (jeweils Mittelwerte der geprüften Proben).

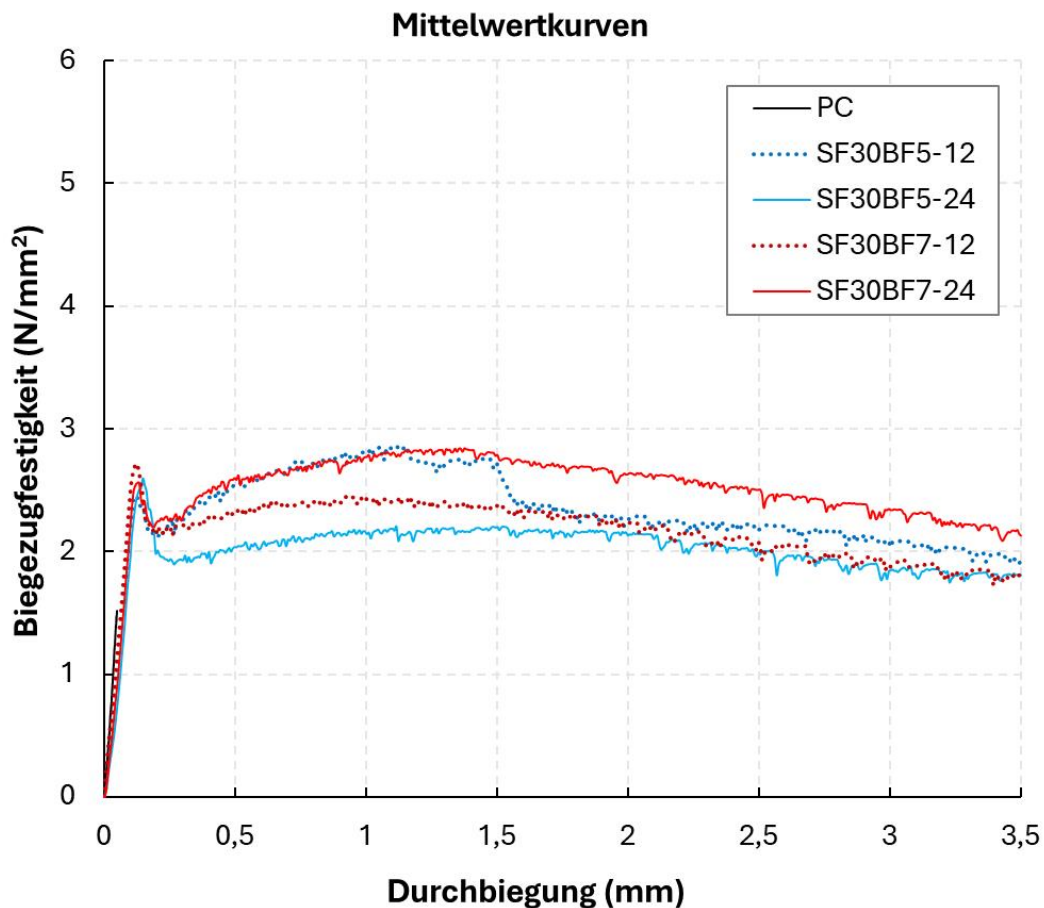


Abbildung 2.4.12: Abb. 19 Biegezugfestigkeit–CMOD-Diagramme (4-Punkt-Biegezugversuch) der Serie 2.

Tab. 6 und Abb. 19 zeigen die Ergebnisse der Serie 2. Die Kombination aus Stahl- und Basaltfasern verbessert vor allem die Erste-Riss-Biegezugfestigkeit und die Bruchenergie. Zwischen den Basaltfaserlängen 12–24 mm und Dosierungen von 5–7 kg/m³ ist nur ein geringer Einfluss erkennbar. Die höchste Bruchenergie wurde jedoch bei der Mischung SF30BF7-24 mit dem höchsten Fasergehalt und der größten Faserlänge erreicht.

2.4.3 Numerische Untersuchungen

Für die numerischen Untersuchungen wurde die Referenzplatte unter den Verkehrslasten nach Eurocode und einer elastischen Bettung modelliert (Abb. 20 und Abb. 21). Zunächst erfolgte eine parametrische elastische Analyse (Abb. 22), um das ungünstigste Lastmodell zu identifizieren. Anschließend wurde eine nichtlineare CDP-Analyse (Abb. 23) nach Grassl (2006) durchgeführt, um Rissbildung und Schädigung im Beton abzubilden. Die Ergebnisse in den Abbildungen zeigen sowohl die Belastungsszenarien als auch die berechneten Risszonen. Das Modell bietet Potenzial für weiterführende Untersuchungen.



Abbildung 2.4.13: Abb. 20 Zerstörende Freilegung der Bewehrung zur Ermittlung der Stabdurchmesser, Abstände und Anordnung als Grundlage für das numerische Modell.

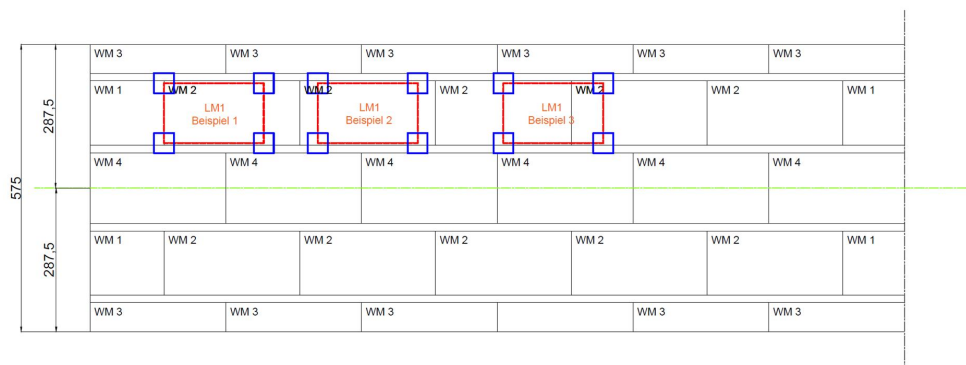


Abbildung 2.4.14: Abb. 21 Lastanordnung der Untersuchungsplatte WM2 gemäß EN 1991-2.

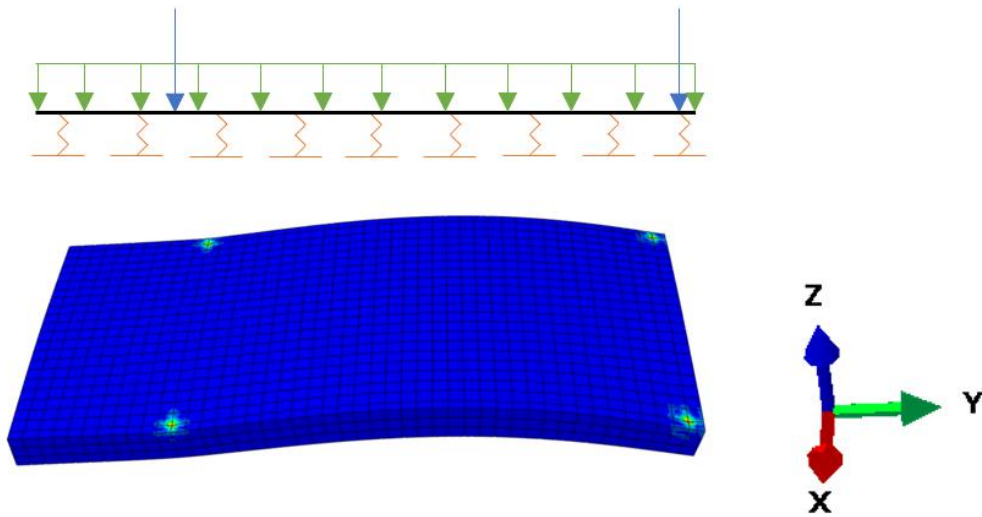


Abbildung 2.4.15: Abb. 22 Finite-Elemente-Modell der Fahrbahnplatte mit definierten Lagerbedingungen und Verkehrslasten; Verformungsdarstellung unter charakteristischer Belastung (Elastische Analyse).

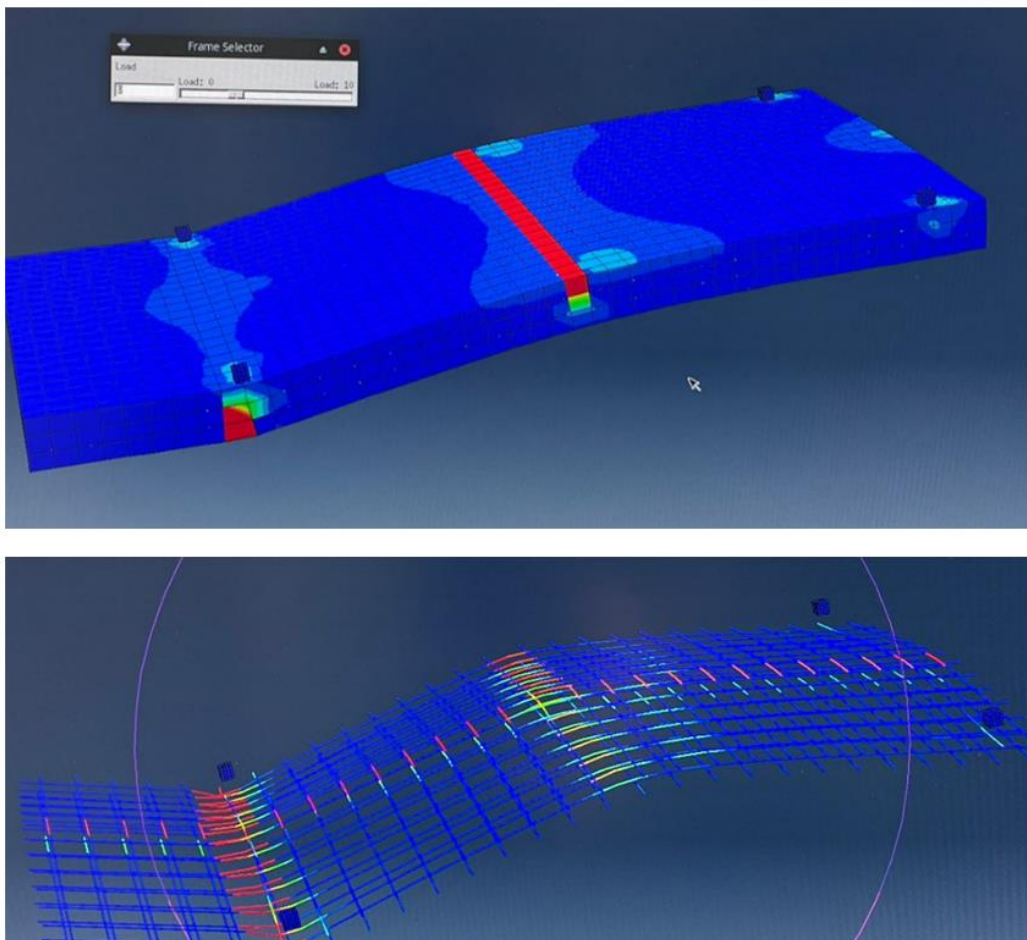


Abbildung 2.4.16: Abb. 23 Darstellung der Schadensvariable zur Lokalisierung der Risszonen im Beton sowie der zugehörigen Bewehrungsanordnung (Nichtlineare Analyse mit dem CDP-Modell).

2.4.4 Bemessung

Für die Referenzplatte WM2 wurde die Biegemomenttragfähigkeit im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) mit konventioneller Stahlbewehrung gemäß EC2 ermittelt. Zusätzlich wurde die Tragfähigkeit eines vollständig unbewehrten Querschnitts aus Fasercocktail-Beton mithilfe der Bemessungsansätze des *fib Model Code 2010* berechnet. Da diese Formulierungen primär für stahlfaserbewehrten Beton entwickelt wurden, stellen die auf Basalt-Stahl-Fasern übertragenen Werte eine konservative Abschätzung dar. Der Vergleich zeigt, dass der Fasercocktail die konventionelle Bewehrung potenziell ersetzen könnte.

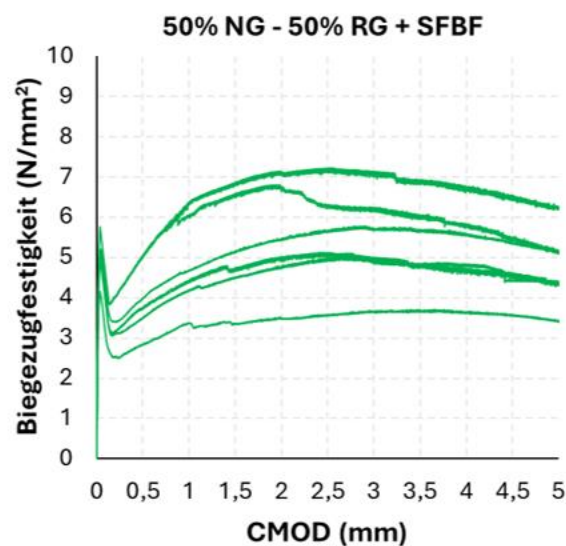


Abbildung 2.4.17: Abb. 24 Biegezugfestigkeit–CMOD-Diagramme der Mischung 50 % NG – 50 % RG mit Fasercocktail (SF+BF).

Probekörper	50% NG - 50% RG + SFBF		Proportionalitätsgrenze		Resttragfähigkeit	
	F_L (kN)	$f_{ct,L}$ (N/mm ²)	$f_{R,1}$ (N/mm ²)	$f_{R,2}$ (N/mm ²)	$f_{R,3}$ (N/mm ²)	$f_{R,4}$ (N/mm ²)
1	18,0	5,8	5,0	6,9	7,2	6,9
2	16,3	5,2	5,0	6,6	6,3	6,0
3	16,1	5,1	3,7	4,7	5,1	4,8
4	15,3	4,9	3,5	4,5	5,0	4,8
5	13,0	4,2	2,8	3,4	3,6	3,7
6	16,0	5,1	4,0	5,1	5,6	5,6
Mean	15,8	5,0	4,0	5,2	5,5	5,3

Abbildung 2.4.18: Tab. 8 Proportionalitätsgrenze und Resttragfähigkeiten der Fasercocktail-Mischung (50 % NG – 50 % RG + SF/BF) gemäß EN 14651.

	Symbol	Einheit	Annahme	Stahlbeton	Faserbeton (FRC)
GEOMETRIE					
Plattendicke	h	mm	Vorgabe	150	150
Plattenbreite	b	mm	Vorgabe	1285	1285
Betondeckung	c_{nom}	mm	Vorgabe	47,5	47,5
Stabdurchmesser	φ	mm	Vorgabe	5	–
wirksame Höhe	d	mm	$h - c_{nom} - \varphi/2$	100	100
BETON					
Betonfestigkeitsklasse	-	-	Vorgabe	C50/60	C50/60
Zylinderdruckfestigkeit	f_{ck}	MPa	Vorgabe	50	50
Faktor Langzeiteffekte	α_{cc}	-	Vorgabe	0,85	0,85
Teilsicherheitsbeiwert Beton	γ_c	-	Vorgabe	1,50	1,50
Bemessungsdruckfestigkeit	f_{cd}	MPa	$\alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c$	28,33	28,33
Druckblockparameter	λ, η	-	EC2 / fib MC2010	$\lambda = 0,8; \eta = 1,0$	$\lambda = 0,8; \eta = 1,0$

Abbildung 2.4.19: Tab. 9 Bemessungsparameter und Tragfähigkeitsvergleich für Stahlbeton und Faserbeton.

	Symbol	Einheit	Annahme	Stahlbeton	Faserbeton (FRC)
STAHLBEWEHRUNG					
Streckgrenze charakteristisch	f_{yk}	MPa	Vorgabe	550	–
Teilsicherheitsbeiwert Stahl	γ_s	-	Vorgabe	1,15	–
Bemessungsstreckgrenze	f_{yd}	MPa	f_{yk} / γ_s	478,26	–
Stababstand	s	mm	Vorgabe	100	–
Anzahl Ø5 in 1,285 m	-	-	1285 / 100	12	–
Fläche eines Ø5-Stabes	-	mm ²	$\pi \cdot \varphi^2 / 4$	19,63	–
Gesamtstahlfläche	A_s	mm ²	$12 \cdot 19,63$	235,6	–
Stahlzugkraft	T_s	kN	$A_s \cdot f_{yd} / 10^3$	112,7	–
Lage der Neutralachse	x	mm	$A_s \cdot f_{yd} = \lambda \cdot \eta \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x$	3,87	–
Hebelarm	z	mm	$d - 0,4 \cdot x$	98,45	–
FASERBETON					
Restzugfestigkeit 1 (char.)	$f_{R1,k}$	MPa	EN 14651 – Versuch	–	4,0
Restzugfestigkeit 3 (char.)	$f_{R3,k}$	MPa	EN 14651 – Versuch	–	5,5
Teilsicherheitsbeiwert Fasern	γ_F	-	Annahme	–	1,50
Bemessungswert f_{R1}	$f_{R1,d}$	MPa	$f_{R1,k} / \gamma_F$	–	2,67
Bemessungswert f_{R3}	$f_{R3,d}$	MPa	$f_{R3,k} / \gamma_F$	–	3,67
äquiv. Zugspannung SLS	$f_{Fts,eq}$	MPa	$0,45 \cdot f_{R1,d}$	–	1,20
äquiv. Zugspannung ULS	$f_{Ftu,eq}$	MPa	$0,45 \cdot f_{R3,d}$	–	1,65
FASERBETON – QUERSCHNITTSWERTE (ULS)					
Neutralachse	x	mm	$f_{Ftu,eq} \cdot (h - x) = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot x$	–	9,62
Zugzonenhöhe	h_t	mm	$h - x$	–	140,38
Zugkraft Fasern	T_F	kN	$b \cdot f_{Ftu,eq} \cdot h_t / 10^3$	–	297,8
BIEGEMOMENTTRAGFÄHIGKEIT (ULS)					
Momenttragfähigkeit Stahl	$M_{Rd,Stahl}$	kNm	$A_s \cdot f_{yd} \cdot z / 10^6$	11,09	–
Momenttragfähigkeit Faserbeton	$M_{Rd,FRC}$	kNm	$b \cdot f_{Ftu,eq} \cdot h_t^2 / (2 \cdot 10^6)$	–	20,89
BIEGEMOMENTTRAGFÄHIGKEIT (ULS, pro m)					
Moment Stahl pro m	$M_{Rd,Stahl}^{\wedge} (1\text{ m})$	kNm/m	$M_{Rd,Stahl} / 1,285$	8,63	–
Moment Faserbeton pro m	$M_{Rd,FRC}^{\wedge} (1\text{ m})$	kNm/m	$M_{Rd,FRC} / 1,285$	–	16,26

Abbildung 2.4.20: Tab. 10 Bemessungsparameter und Tragfähigkeitsvergleich für Stahlbeton und Faserbeton.

2.4.5 Versuche an Rezepturen für ausgelagerte Großflächenplatten

Im Rahmen dieser Versuchsreihe wurden die Biegezugfestigkeit sowie die Resttragfähigkeiten der Fasercocktail-Mischung untersucht. Die Prüfungen erfolgten gemäß EN 14651, und der entsprechende Versuchsaufbau ist in Abb. 25 dargestellt. Die zugehörigen Last–CMOD-Diagramme in Abb. 26 verdeutlichen das unterschiedliche Trag- und Rissverhalten der Mischungen. Beim Vergleich der

unbewehrten Betone zeigt sich, dass sich das Verhalten mit steigendem Anteil rezyklierter Gesteinskörnungen deutlich verändert. In den Mischungen 100 % NG, 70 % NG – 30 % RG und 50 % NG – 50 % RG (karb.) wurden die höchsten Biegezugfestigkeiten erreicht, allerdings mit einem abrupten Abfall der Tragfähigkeit nach Erreichen des Maximums, was zu einem spröden Versagen führte. Dagegen zeigten die Mischungen 50 % NG – 50 % RG und 100 % RG, trotz geringerer Biegezugfestigkeiten, ein weniger abruptes Versagen und damit höhere Bruchenergien.

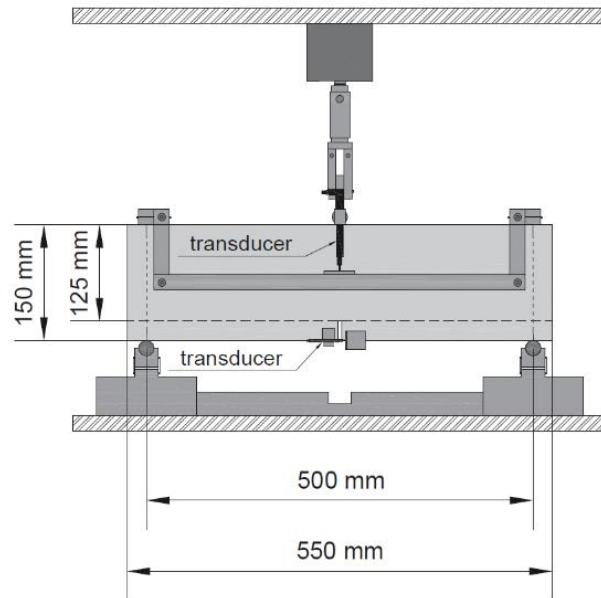
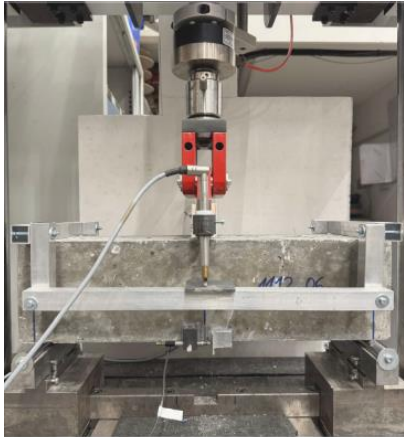


Abbildung 2.4.21: Abb. 25 Versuchsaufbau des Dreipunktbiegeversuchs zur Ermittlung der Biegezug- und Nachrissparameter gemäß EN 14651.

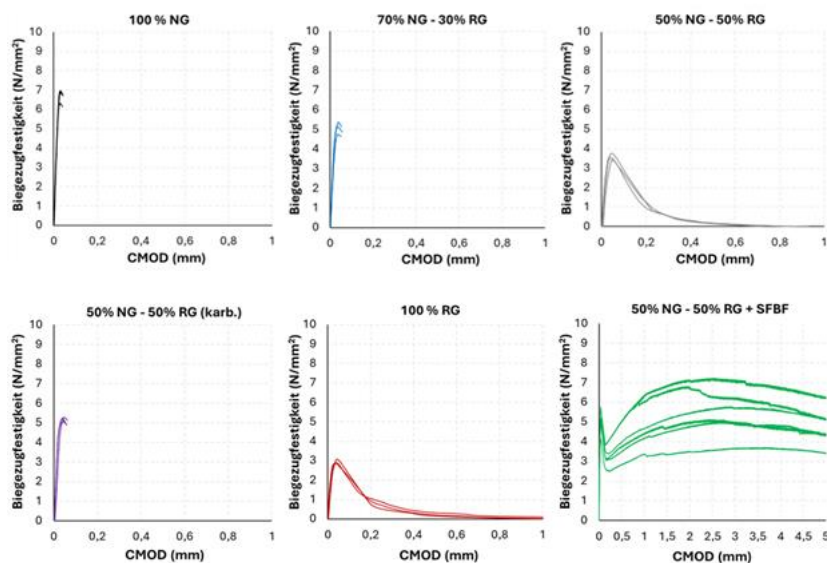


Abbildung 2.4.22: Abb. 26 Biegezugfestigkeit–CMOD-Diagramme aus Dreipunktbiegeversuchen für Mischungen mit variierenden Anteilen natürlicher und rezyklerte Gesteinskörnungen sowie einer Fasercoktail-Mischung.

Bei der Fasercocktail-Mischung ist eine deutliche Verbesserung im elastischen Bereich erkennbar: Die Biegezugfestigkeit steigt im Vergleich zur Mischung 50 % NG – 50 % RG von 3,6 auf 5,0 N/mm², was auf den Einsatz von Basaltfasern zurückzuführen ist. Zusätzlich erhöhen die Fasern die Duktilität und Bruchenergie, wie im Diagramm in Abb. 26 ersichtlich. Die detaillierten Ergebnisse für die unbewehrten Mischungen sowie die Fasercocktail-Mischung sind in **Tab. 11** dargestellt.

Mischung	Probekörper	Max. Kraft (kN)	Max. Biegezugfestigkeit f_{max} (N/mm ²)	Bruchenergie G_f (N/mm)
100 % NG	1	19,8	6,3	0,029
	2	21,8	7,0	0,068
	3	21,6	6,9	0,066
	Mean	21,0	6,7	0,054
70% NG – 30%RG	1	16,1	5,1	0,088
	2	16,8	5,4	0,040
	3	14,8	4,7	0,058
	Mean	15,9	5,1	0,062
50% NG – 50%RG	1	10,8	3,4	0,583
	2	11,8	3,8	0,668
	3	11,1	3,6	0,633
	Mean	11,2	3,6	0,628
50% NG – 50%RG (karb.)	1	16,4	5,2	0,090
	2	16,8	5,4	0,065
	3	15,9	5,1	0,092
	Mean	16,4	5,2	0,082
100 % RG	1	9,0	2,9	0,612
	2	9,0	2,9	0,574
	3	9,6	3,1	0,532
	Mean	9,2	3,0	0,573

Abbildung 2.4.23: Tab. 11 Ergebnisse der Dreipunktbiegeversuche: maximale Kraft, Biegezugfestigkeit und Bruchenergie der Referenz- und RC-Mischungen.

50% NG - 50% RG + SFBF	Proportionalitäts- grenze		Resttragfähigkeit			
	Probekörper	F_L (kN)	$f_{ct,L}$ (N/mm ²)	$f_{R,1}$ (N/mm ²)	$f_{R,2}$ (N/mm ²)	$f_{R,3}$ (N/mm ²)
1	18,0	5,8	5,0	6,9	7,2	6,9
2	16,3	5,2	5,0	6,6	6,3	6,0
3	16,1	5,1	3,7	4,7	5,1	4,8
4	15,3	4,9	3,5	4,5	5,0	4,8
5	13,0	4,2	2,8	3,4	3,6	3,7
6	16,0	5,1	4,0	5,1	5,6	5,6
Mean	15,8	5,0	4,0	5,2	5,5	5,3

Abbildung 2.4.24: Tab. 12 Proportionalitätsgrenze und Resttragfähigkeit der Fasercocktail-Mischung gemäß EN 14651.

1. Konnten die Arbeitsschritte gemäß Plan erarbeitet werden?

Ja, die Arbeitsschritte konnten wie geplant umgesetzt werden. Die Platten mit ca. 40 kg/m³ Stahlbewehrung sowie die Fasercocktail-Platten mit 30 kg/m³ Stahl- und 5 kg/m³ Basaltfasern wurden vollständig hergestellt. Insgesamt konnte der Stahlbedarf deutlich reduziert werden.

1. Gab es wesentliche Abweichungen oder Veränderungen?

Es gab nur eine kleinere Änderung durch den Wechsel des Basaltfaser-Lieferanten.

Welche Auswirkungen haben diese?

Die Auswirkungen auf den Ablauf waren minimal.

Wie muss die Planung adaptiert werden?

Die Planung wurde nur geringfügig angepasst, da mit den neuen Basaltfasern eine zusätzliche Prüfreihe durchgeführt werden musste.

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

Der Projektfortschritt von Arbeitspaket „Bewehrungsmix + Bemessung“ liegt bei 100 %.

2.5. Materiallogistik

Fertigstellungsgrad: 100%

2.5.1 Allgemein

Ziel des ggst. Arbeitspaketes war die Betrachtung und Optimierung der Verfahrensabläufe vom Ausbau der Großflächenplatten über die Aufbereitung bis zum Wiedereinbau. Weiters sollte mittels Lebenszyklusanalyse von ausgewählten Fertigbetonteilen die Bewertung von Bauprozessen beim Ersatz der Gleistragplatten sowie die Ausarbeitung optimierter Logistikkonzepte für mögliche Streckenabschnitte erfolgen.

Die Prozessabläufe im Zuge einer Gleissanierung der Straßenbahn stellen sich wie folgt dar:

1. Großflächenplatten am Ende ihrer Lebensdauer (entspr. ihrer Belastung nach rund 25 Jahren) müssen getauscht und durch neue Platten oder Ortbetonbauweise ersetzt werden.

2. Die Platten werden aus dem Splittbett gehoben und einer Verwertung in einer Aufbereitungsanlage zugeführt.
3. In der Aufbereitungsanlage werden die Platten gebrochen und zu rezyklierter Gesteinskörnung –mittels Nassaufbereitungsprozess – verarbeitet.
4. Die hergestellte Gesteinskörnung wird zur Produktion neuer Großflächenplatten verwendet und dafür in ein Betonfertigteilwerk gebracht.
5. Im Fertigteilwerk werden die Platten hergestellt und nach mind. 28 Tagen an der Baustelle verbaut.

Um den oben beschriebenen Prozessablauf bei der Gleissanierung zu optimieren, sollten kurze Transportdistanzen zwischen dem Plattenausbauort und der Aufbereitungsanlage sowie dem Betonfertigteilwerk gewählt werden. Hierbei wäre eine möglichst stadtnahe Aufbereitung der Großflächenplatten und ein Fertigteilwerk zur Herstellung dieser wünschenswert.

Die Nachhaltigkeitsbewertung der Logistikkette und der CO₂-optimierten Fertigteilplatten (unter Berücksichtigung der künstlichen Karbonatisierung) wurde von der Ressourcen Management Agentur RMA durchgeführt.

In diesem Projekt wurden die Möglichkeiten und Grenzen des Recyclingprozess am Beispiel von Großflächenplatten in der Infrastruktur der Stadt Wien untersucht und ein ökologischer Vergleich zwischen Primär- und Recyclingbeton (RC-Beton) gemacht. Dazu wurden Betonrezepturen mit RC-Gesteinskörnung, CO₂-armen Zement (CEM II/C) und eine innovative Bewehrung (Stahl- und Basaltfaser) entwickelt.

2.5.2 Methodik- Systemanalyse

Die Verwendung von RC-Gesteinskörnungen in Betonrezepturen ist in der DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620 geregelt.

Das untersuchte System umfasst den Lebenszyklus der Großflächenplatten von der Gewinnung und Aufbereitung der Rohstoffe einschließlich der Vorketten über die Betonherstellung bis hin zur Verlegung der Großflächenplatten auf der Baustelle. Dabei werden alle relevanten Prozessschritte sowie sämtliche Transportprozesse berücksichtigt. In die Betonherstellung fließen alle benötigten Rohstoffe ein, darunter rezyklierte Gesteinskörnung, Kies, Zement (CEM), Wasser sowie verschiedene Zusatzmittel wie Fließmittel und Luftporenbildner. Zudem wird das erforderliche Bewehrungsmaterial im Referenzszenario Stahl und in den Szenarien Kombinationen aus Stahl- und Basaltfasern berücksichtigt.

Weiters werden sämtliche Transporte, von der Anlieferung der Rohstoffe für deren Herstellung über die Lieferung der Rohstoffe zur Betonproduktion bis hin zum Transport der fertigen Großflächenplatten zur Baustelle, in die Systembetrachtung einbezogen.

Es wird Karbonatisierung über die gesamte Lebensdauer des Betons berücksichtigt. Zudem wird eine künstliche Karbonatisierung von RC-GK, wobei CO₂ gezielt in den Beton eingebracht wird, betrachtet.

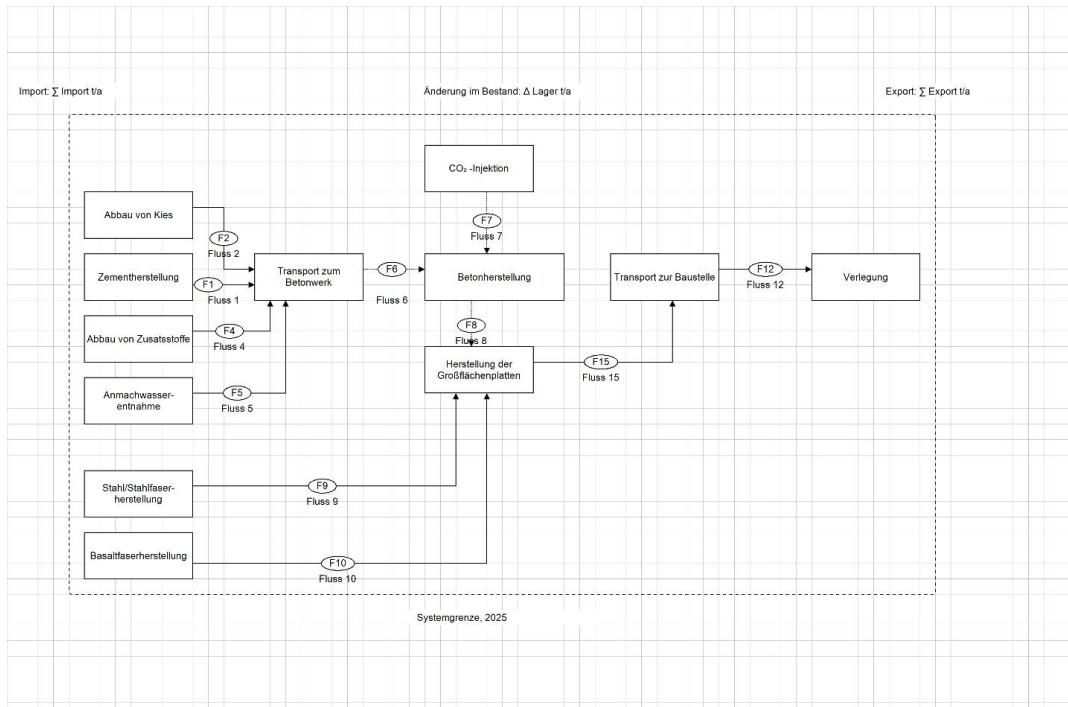


Abbildung 2.5.1: Abb. 27. Systemanalyse; Herstellung von Großflächenplatten aus Beton

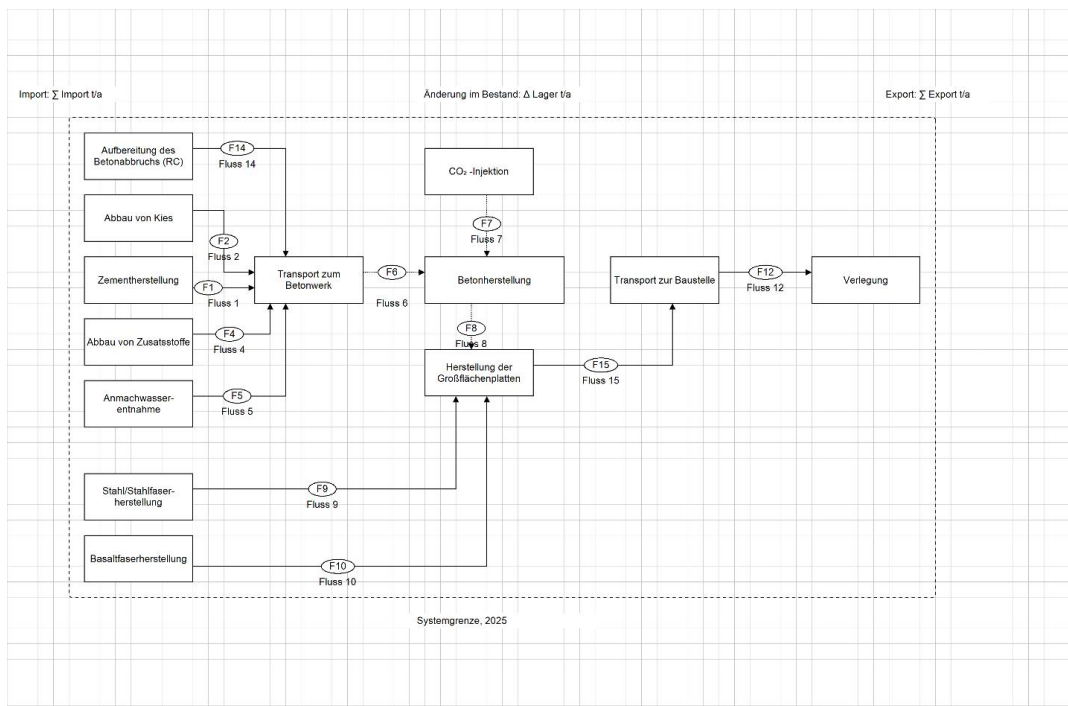


Abbildung 2.5.2: Abb. 28. Systemanalyse; Herstellung Großflächenplatten aus Beton mit aufbereiteter Gesteinskörnung

2.5.3 Datenerhebung

Das Institut für Konstruktiven Ingenieurbau (IKI), an der Universität für Bodenkultur führte Versuche mit verschiedenen Testbetonen durch, die sich in Zusammensetzung und Materialkombination unterschieden. Diese Varianten bilden die untersuchten Szenarien ab.

Das IKI gab die Hersteller der Rohstoffe bekannt. Diese wurden daraufhin kontaktiert. Es wurden die Zusammensetzungen der einzelnen Rohstoffe und deren Herkunft abgefragt, sodass die individuellen Transportdistanzen ermittelt werden konnten. Dies war die Grundlage, um die Transportdistanzen zwischen dem geografischen Mittelpunkt der jeweiligen Herkunftsländer der Rohstoffe und den Unternehmensstandorten zu ermitteln.

Die Großflächenplatten werden am Ort der Betonherstellung hergestellt. Die innerbetrieblichen Transporte werden vernachlässigt. Als Zielprozess der Verlegung der Großflächenplatten wird die Stadtmitte der Stadt Wien angenommen.

Es werden insgesamt 8 Szenarien und das Referenzszenario (sce. 0) untersucht. Der Anteil der rezyklierten Gesteinskörnung variiert in den einzelnen Szenarien, wobei die Zementmenge in allen Szenarien gleichbleibt. Weiters wurde in den letzten beiden Szenarien (7 und 8) eine künstliche Karbonatisierung des Materials berücksichtigt.

Szenario (Masseanteil)	Volumenanteil	Verwendete Zementart
0 (0% rec.)	0%	CEM II A-S (42,5 R)
1 (0% rec.)	0%	N100_CEM II B
2 (43% rec.)	50%	R50_CEM II B
3 (100% rec.)	100%	R100_CEM II B
4 (0% rec.)	0%	N100_CEM II C
5 (43% rec.)	50%	R50_CEM II C
6 (100% rec.)	100%	R100_CEM II C
7 (49,5% rec.)	50%	R50_CEM II C carb.
8 (100% rec.)	100%	R100_CEM II C carb.

Abbildung 2.5.3: Tab. 12: Anteil der rezyklierten Gesteinskörnung

Für die Berechnung der Ökobilanz wurde der GVTB GWP-Rechner V1.0 des Güteverbands Transportbeton verwendet. Der Rechner dient zur normgerechten Ermittlung des Treibhauspotenzials (GWP) von Beton gemäß ÖNORM EN 15804:2022 und berücksichtigt die Lebenszyklusphasen A1 bis A4 (Rohstoffherstellung, Rohstofftransport, Betonherstellung und optional Betontransport). Zudem wird die theoretisch maximale Karbonatisierung des Betons berechnet, die jedoch nicht in die GWP-Bilanz einfließt.

Die Szenarien unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung und Materialkombination. Zur Bereitstellung dieser Daten übermittelten die RMA dem IKI eine Datenabfrage in Form einer Tabelle, die von dem IKI ausgefüllt und mit relevanten Informationen zu den einzelnen Betonsorten ergänzt wurde. Diese umfassten die Zementsorte, die verwendeten Betonzusatzmittel (wie Fließmittel und luftporenbildende Mittel), die Art und Zusammensetzung der Gesteinskörnung sowie den Anteil des Anmachwassers. Diese Daten bildeten die Basis für die weiteren Analysen und Bewertungen im Rahmen des Forschungsprojekts. Zusätzlich wurden ergänzende Informationen zu den einzelnen Rohstofflieferanten des Betons, einschließlich Produktblättern und technischen Daten, übermittelt.

2.5.4 Ergebnisse

2.5.4.1 Sachbilanz Betonherstellung

Rohstoffe	sce.0	sce.1	sce.2	sce.3	sce.4	sce.5	sce.6	sce.7	sce.8	Einheit [kg/m ³]
Zement										
CEMII/A	460									
CEMII/B		420	420	420						kg/m ³
CEMII/C					420	420	420	420	420	kg/m ³
Gesteinskörnung										
Gesteinskörnung, rund	1.278	1.631	797		1.631	797		816		kg/m ³
Gesteinskörnung, gebrochen	570									
Gesteinskörnung, rezykliert			611	1.555		611	1.555	799	1.559	kg/m ³
<i>Gesteinskörnung gesamt</i>	1.848	1.631	1.408	1.555	1.631	1.408	1.555	1.615	1.559	kg/m ³
Betonzusatzmittel										
Fließmittel	5,5	4,20	4,54	5,97	3,57	4,62	5,80	3,11	4,62	kg/m ³
Luftporenbildner	1,4	4,62	1,47	2,10	4,20	1,68	2,10	1,13	2,02	kg/m ³
<i>Betonzusatzmittel gesamt</i>	6,9	8,82	6,01	8,07	7,77	6,30	7,90	4,24	6,64	kg/m ³
Gesamtwasser										
<i>Anmachwasser gesamt</i>	133,3	133,3	141,1	165,6	132,8	150	165,5	152,4	163,6	kg/m ³
<i>Summe</i>	2.448	2.193	1.975	2.149	2.192	1.983	2.148	2.192	2.149	kg/m ³

Abbildung 2.5.4: Tab. 13 Massenflüsse des Referenzszenarios (sce.0) und von acht Szenarien

Frischbeton-Transport zur Einbaustelle										
Transportdistanz Frischbeton (Straße)										Einheit [km]
Fahrmischer 3-Achser	50	50	50	50	50	50	50	50	50	km
Zement										
CEMII/A	52									km
CEMII/B		52	52	52						km
CEM III/C					10	10	10	10	10	km
Transportdistanzen Rohstoffe ("einfache Transportstrecke")										
Transporte Betonzusatzstoffe										
AHWZ	155,5	155,5	155,5	155,5	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	km
Hüttensand	30,24	30,24	30,24	30,24	31,25	31,25	31,25	31	31	km
Kalksteinmehl										
Silikastaub										
Transporte Gesteinskörnung										
Gesteinskörnung, rund	15	45	45		45	45		45		km
Gesteinskörnung, gebrochen	2,6									
Gesteinskörnung, rezykliert			44	44		44	44	44	44	km
Transporte Betonzusatzmittel										
Luftporenbildner	15	179,4	179,4	179,4	179,4	179,4	179,4	179,4	179,4	km
Fließmittel										
Straße	15	139,5	147,1	147,1	139,5	147,1	147,1	147,1	147,1	km
Bahn		168	126	126	168	126	126	126	126	km
Schiff		2.468	1.851	1.851	2.468	1.851	1.851	1.851	1.851	km

Abbildung 2.5.5: Tab. 14 Transportdistanzen des Referenzszenarios (sce.0) und von acht Szenarien

Alle Rohstoffe werden mit demselben Transportmittel (LKW) transportiert, mit Ausnahme der Fließmittel. Diese legen ihren Transportweg über Schiff, Bahn und LKW zurück. Der Luftporenbildner stammt in allen Szenarien vom selben Hersteller, sodass sich an den Transportdistanzen nichts ändert. Lediglich die zugesetzte Menge und der Anteil der rezyklierten Gesteinskörnung variiert je nach Szenario. Die Zementmenge (420 kg/m³) wird nicht verändert, mit Ausnahme des Referenzszenarios.

2.5.4.2 Sachbilanz Großflächenplatten

Rohstoffe	sce.0	sce.1	sce.2	sce.3	sce.4	sce.5	sce.6	sce.7	sce.8	Einheit [kg/m ³]
Summe Beton	2.448	2.193	1.975	2.149	2.192	1.983	2.148	2.192	2.149	kg/m³
Stahl	39,7									kg/m³
Stahlfaser		30	30	30	30	30	30	30	30	kg/m³
Basaltfaser		5	5	5	5	5	5	5	5	kg/m³
Bewehrung gesamt	39,7	35	35	35	35	35	35	35	35	kg/m³
Masse gesamt	2.488	2.228	2.010	2.84	2.227	2.018	2.183	2.227	2.184	kg/m³

Abbildung 2.5.6: Tab. 15: Sachbilanz der Großflächenplatten

ei der Herstellung der Großflächenplatten wird dem Beton ein Zusatzstoff beigemischt. Im Referenzszenario handelt es sich dabei um Baustahl. In den Szenarien 1–8 wird hingegen eine Kombination aus Basaltfasern- und Stahlfasern eingesetzt (Verhältnis 1:6).

2.5.4.3 CO₂-Bilanz der Betonherstellung A1-A3

Einheit (kg CO ₂ äq)	A1	A2	A3	A1-A3
sce.0 (CEM II A-S (42,5 R)	274	8	1,6	284
sce1 (N100 CEM II B)	214	18	1,6	234
sce2 (R50 CEM II B)	213	16	1,6	231
sce.3 (R100 CEM II B)	216	17	1,6	235
sce.4 (N100 CEM II C)	179	15	1,6	195
sce.5 (R50 CEM II C)	179	13	1,6	194
sce.6 (R100 CEM II C)	182	14	1,6	198
sce.7 (R50 CEM II carb.)	161	14	1,6	177
sce.8 (R100 CEM II C carb.)	164	14	1,6	179

Abbildung 2.5.7: Tab. 16: CO₂-Emissionen der Betonherstellung in kg CO₂äq/m³

Die Bewertung bezieht sich auf 1 m³ Beton und betrachtet das globale Erwärmungspotenzial (GWP) in kg CO₂-Äquivalent. Der größte Anteil von 90–95 % der Emissionen entfällt auf die Zementherstellung in der Rohstoffbereitstellung (A1).

2.5.4.4 CO₂ Bilanz der Herstellung und Verlegung der Großflächenplatten und Karbonatisierung

Einheit (kg CO _{2äq} /m ³)	A1	A2	A3	A1- A3	A4	künstliche Karbona- tisierung	Stahl	Stahl- faser	Basalt- faser	Summe	Hochrechnung Platten (1 mio. m ³) in Mio.kg CO _{2äq}
sce.0 (CEM II A-S (42,5 R))	274	8	1,6	284	9,42		94,6			388	388
sce1 (N100 CEM II B)	214	18	1,6	234	8,3			71,46	0,084	314	314
sce2 (R50 CEM II B)	213	16	1,6	231	7,2			71,46	0,084	310	310
sce.3 (R100 CEM II B)	216	17	1,6	235	7,9			71,46	0,084	314	314
sce.4 (N100 CEM II C)	179	15	1,6	195	8,3			71,46	0,084	275	275
sce.5 (R50 CEM II C)	179	13	1,6	194	7,2			71,46	0,084	273	273
sce.6 (R100 CEM II C)	182	14	1,6	198	7,9			71,46	0,084	277	277
sce.7 (R50 CEM II carb.)	161	14	1,6	177	8,2	5,43		71,46	0,084	257	257
sce.8 (R100 CEM II C carb.)	164	14	1,6	179	8,2	10,85		71,46	0,084	259	259

Abbildung 2.5.8: Tab. 17: CO₂-Emissionen der Herstellung und Verlegung der Großflächenplatten und Hochrechnung in kg CO_{2äq}/m³

Die Hochrechnung auf die Gesamtfläche der verlegten Großflächenplatten zeigt sich, dass die heute verlegten Platten rund 388 Mio. kg CO_{2äq} bei Herstellung und Verlegung verursachen. Würde hingegen Szenario 7 umgesetzt, ließe sich dieser Wert auf etwa 257 Mio. kg CO_{2äq} senken. Damit könnten insgesamt rund 131 Mio. kg CO_{2äq} eingespart werden. Dies verdeutlicht das erhebliche Reduktionspotenzial, das sich durch die Umstellung auf das nachhaltigere Szenario 7 ergeben würde.

Es wurden folgende Schlussfolgerungen gezogen:

Die CO₂-Emissionen bei der Herstellung der Rohstoffe des Betons (zwischen 164 kg CO_{2äq}/m³ und 274 kg CO_{2äq}/m³) haben einen Anteil von ca. 80 % an den Gesamtemissionen, wobei diese zum überwiegenden Teil auf den Zement entfallen. Sie entscheiden wesentlich über die Höhe der Gesamtemissionen.

Die künstliche Karbonatisierung kann einen relevanten Beitrag zur Reduktion der gesamten CO₂-Emissionen bei der Herstellung von Beton leisten. Mit Hilfe der künstlichen Karbonatisierung können zwischen 38 % und 48 % der CO₂-Emissionen bei der Betonherstellung kompensiert werden.

Der Einsatz von CO₂-reduziertem Zement kann die Gesamtemissionen der Herstellung von Beton um 25 % bis 45 % reduzieren.

Der wichtigste Beitrag des Einsatzes von RC-Beton liegt in der Schonung der Primärressource Kies, er leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Ressourcenschonung und Kreislaufwirtschaft. Durch die Nutzung von aufbereitetem Betonabbruch können pro m³ Beton zwischen 611 kg – 1.559 kg wieder in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden.

Der gesamte Austausch der in Wien verlegten Großflächenplatten, durch Recyclingbetonplatten würde insgesamt rund 131 Mio. kg CO₂ einsparen. Gegenwärtig befinden sich etwa 600.000 Betonplatten im Einsatz, die eine Fläche von rund 1 Mio. m² abdecken und ein Gesamtgewicht von etwa 375.000 t aufweisen. Die Nutzungsdauer beträgt rund 30 Jahre. Durch die Hochrechnung auf die Gesamtfläche zeigt sich, dass die heute verlegten Platten rund 388 Mio. kg CO₂ verursachen. Würde hingegen Szenario 7 umgesetzt, ließe sich dieser Wert auf etwa 257 Mio. kg CO₂ senken. Damit könnten insgesamt rund 131 Mio. kg CO₂ eingespart werden. Die Hochrechnung verdeutlicht das erhebliche Reduktionspotenzial, das durch die Umstellung auf RC-Beton erreicht werden kann.

Der Projektfortschritt von Arbeitspaket „Materiallogistik“ liegt bei **100 %**.

3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten

Abgesehen von der o.a. kostenneutralen Verlängerung der Projektlaufzeit aufgrund von Verzögerungen bei der Großversuchskörper-Herstellung ergeben sich keine Änderungen bei den Projektkosten oder der Finanzierung.

4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit

Die Inhalte des Projekts tragen zur ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Nachhaltigkeit im Tiefbau bei. Neben dem Aspekt der Ressourcenschonung durch Verwendung optimierter Betone RC-GK lassen sich durch Zwangskarbonatisierung von Altbeton sowie Einsparungen von Transportweiten auch klimaschonende Effekte erzielen. Eine Aufbereitung von bereits vorhandenen Materialien im Idealfall vor Ort kann sich durch Einsparung von Transport, Materialneuzukauf und Entsorgung von Rückbaustoffen monetär positiv auswirken.

Ökologische Nachhaltigkeit

Die Ziele – durch die Verwendung hochwertiger Recyclingbetone die Kreislaufwirtschaft zu fördern, durch Zwangskarbonatisierung, die Verwendung alternativer Basaltbewehrung und Optimierung der Materiallogistik CO₂-Emissionen zu reduzieren, durch Optimierung von Betonfestigkeit und -dauerhaftigkeit die Nutzungsdauer zu erhöhen und damit wiederum die Ökobilanz zu verbessern – wurden über die gesamte Projektlaufzeit erfolgreich verfolgt:

1. **Recyclinggesteinskörnung:** Ersatzraten bis 100 % durch rezyklierte Gesteinskörnung aus Fertigteilbeton zeigten gute Ergebnisse, wodurch Primärrohstoffe eingespart und Transportemissionen reduziert werden können.
2. **CO₂-Reduktion:** CO₂-reduzierte Betone mit karbonatisierter bzw. CO₂-beaufschlagter Gesteinskörnung wurden entwickelt.
3. **Basaltbewehrung:** Durch die Anwendung von Basaltfasern bzw. einem Basalt-Stahlfaser-Mix konnte der Stahlanteil reduziert werden, was deutliche CO₂-Einsparungen ermöglicht.

Wirtschaftliche Nachhaltigkeit

1. **Reduzierter Ressourcenverbrauch:** Die Verwendung von Recyclingmaterial und Basaltbewehrung verringert die Abhängigkeit von Primärrohstoffen und reduziert Kostenrisiken durch CO₂-Bepreisung.
2. **Erhöhung der Nutzungsdauer:** Korrosionsbeständige Basaltbewehrungen verlängern die Lebensdauer von Bauwerken und reduzieren Instandhaltungskosten.
3. **Wirkung in fünf Jahren:** Erwartet wird eine deutlich intensivierte Nutzung von Recyclingbeton für hochwertige Anwendungen und ein Einsatz der Technologien bei 30-50 % des hochwertigen Altbetons in Österreich, mit einer erheblichen CO₂-Einsparung und einer erheblichen Reduktion des Rohstoffverbrauchs.

Soziale Nachhaltigkeit

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

Beitrag zum Klimaschutz

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