

Upcycling von Fahrbahnplatten mit CO2-Speicherung

1. Zielerreichung und Projektstatus	1
2. Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum	1
2.1. Projektleitung	1
2.2. Wissenschaftliche Leitung	1
2.3. Materialaufbereitung und Beton	2
2.4. Bewehrungsmix + Bemessung	4
2.5. Materiallogistik	4
3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten	5
4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit	5

1. Zielerreichung und Projektstatus

Sämtliche Ziele, die dieses Projekt betreffen sind sehr aktuell. Die wesentlichen Ergebnisse sind:

1. Erkenntnis: Mit dem Rückprallhammer kann der Bereich der vorhandenen Druckfestigkeit von ausgebauten Fertigteilplatten ausreichend genau ermittelt werden.
2. Erkenntnis: Eine Nassaufbereitung von Rezyklaten führt im Allgemeinen zu besseren Gesteinskörnungs-Eigenschaften; sie ist jedoch mit einem höheren Aufwand (Energie- und Wasserbedarf) sowie dem Anfall an Feinteilen im Zuge des Waschprozesses verbunden.
3. Erkenntnis: Die Brecherart ist entscheidend für Kornform und Korngrößenverteilung. Je intensiver die Aufbereitung, desto größer wird jedoch der Material- (Wasserverbrauch) und Energieaufwand.
4. Erkenntnis: Die Zwangskarbonatisierung der rezyklierten Gesteinskörnung führt neben einer Steigerung der Kornrohichte zu einer signifikanten Reduktion der Wasseraufnahme.
5. Erkenntnis: Die Zusammensetzung des Frischbetons mit rezyklierten Gesteinskörnungen muß aufgrund der Heterogenität der Ausgangsstoffe in Bezug auf die Wasseraufnahme und Verarbeitbarkeit mit den Zusatzmitteln abgestimmt werden.
6. Erkenntnis: Die Druckfestigkeiten von emissionsarmen Bindemitteln (CEM II/C) entwickeln sich im Vergleich mit Zementen CEM I langsamer. Daher soll neben der 28. Tage-Festigkeit auch die 56 Tage- bzw. 90 Tage-Festigkeit herangezogen werden.
7. Erkenntnis: Die Bruchenergie ist bei Betonen mit rezyklierten Gesteinskörnungen verhältnismäßig hoch. Diese Tendenz soll noch weiter wissenschaftlich vertieft werden. Sie ist in hohem Maße neben der Korngröße und Kornform vom W/B-Wert abhängig.

2. Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum

2.1. Projektleitung

Fertigstellungsgrad: 50%

Neben der Vertretung gegenüber der FFG wurden während der Projektlaufzeit die terminliche und kaufmännische Projektkoordination, die Organisation von Projektmeetings, die Koordination der Kommunikation zwischen den ProjektpartnerInnen, die Partnerkommunikation (Wirtschaft und Wissenschaft) sowie das Vertrags- und Kostenmanagement abgewickelt.

Die Arbeitsschritte konnten gemäß Plan erarbeitet werden.

Es gab keine wesentlichen Abweichungen oder Veränderungen.

Der Projektfortschritt liegt mit 50% im Plan, bezogen auf die Gesamtprojektlaufzeit.

2.2. Wissenschaftliche Leitung

Fertigstellungsgrad: 50%

Sämtliche Arbeitspakete für das 1. Forschungsjahr wurden abgearbeitet und die Forschungsergebnisse auch schon großteils veröffentlicht.

Es gab keine wesentlichen Abweichungen oder Veränderungen, weshalb auch die Planung nicht adaptiert werden muss.

In Bezug auf das Arbeitspaket 2.1 „terminliche Projektkoordination“ wurden strukturiert alle 2 Wochen Besprechungen durchgeführt und die semestral die Ergebnisse diskutiert und analysiert.

In Bezug auf das Arbeitspaket 2.2 „fachliche Projektkoordination“ gab es einen intensiven Austausch zwischen Prof. Konrad Bergmeister und Ass. Prof. Klaus Voit. Weiters wurden im Rahmen von periodischen Treffen (online) die Arbeitsmethoden und Zwischenergebnisse mit allen Projektpartnern diskutiert.

Der Projektfortschritt (AP 2.3) entspricht den gesetzten Zielen. Die Koordination mit der kaufmännischen Projektleitung war strukturiert und zielorientiert.

Auf europäischer Ebene flossen Ergebnisse aus diesem Forschungsprojekt durch Prof. Bergmeister in die wissenschaftliche Arbeitsgruppe „Decarbonisation of Transport Infrastructure Construction“ ein. Dabei wurden 24 Vorschläge für eine Verbesserung der Klimaverträglichkeit und Ressourceneffizienz von Infrastrukturen ausgearbeitet und der Bericht im April 2024 veröffentlicht.

Der insgesamt Fertigungsgrad kann mit 50% geschätzt werden.

2.3. Materialaufbereitung und Beton

Fertigungsgrad: 50%

Ziel des Forschungsprojektes ist es, hochwertige Betonfertigteile aus dem Infrastrukturbau (Großflächenplatten, Bahnsteigkanten, etc.) einer möglichst hochwertigen Verwertung zuzuführen (Recycling bzw. Upcycling der aus diesem Altbeton hergestellten Gesteinskörnungen) um im Sinne der Kreislaufwirtschaft Ressourcen zu schonen. Zusätzlich soll im Rahmen der Mischungsentwicklung durch Anpassung der Betonrezeptur (u.a. Zementgehalt, Zusatzmittel) und die Wahl eines möglichst klimafreundlichen Zements die Klimaverträglichkeit der entwickelten Betonrezepturen verbessert werden.

Für eine bestmögliche Performance des RC-Betons ist der Einsatz geeigneter Aufbereitungs- und Veredelungsverfahren (u.a. Waschen und Zwangskarbonatisierung der Gesteinskörnung) notwendig, um die Qualität der aus dem Altbeton hergestellten Gesteinskörnungen zu optimieren.

Die Anforderungen an die Betonsorte zur Herstellung der Gleisplatten sind hoch und mit C50/60/B7/XM2/GK11 definiert, wobei die Betonfestigkeit bei Übergabe der Platten bereits mindestens 28 N/mm² betragen muss.

Im ersten Forschungsjahr (April 2023 – März 2024) wurden Großflächenplatten der Wiener Linien betrachtet mit dem Ziel, aufbereiteten Altbeton aufrangierter Platten als Gesteinskörnung für Beton zur Herstellung neuer Großflächenplatten zu nutzen. Der Altbeton wurde dabei unterschiedlichen Aufbereitungsarten (trocken und nass bzw. gewaschen) unterzogen, die Eigenschaften der Gesteinskörnungen systematisch analysiert und zahlreiche Betonmischungen entwickelt und deren Frisch- und Festbetoneigenschaften ermittelt.

Als Ausgangsmaterial zur Herstellung der rezyklierten Gesteinskörnung dienten einerseits Großflächenplatten (Gleisplatten) der Wiener Linien, welche zwischen den Straßenbahngleisen als Betonfertigteile (in Splittbett verlegt) verbaut und im Zuge von Gleissanierungen entfernt wurden. Andererseits wurden hochwertige Betonfertigteile der ÖBB am Ende ihrer Nutzungsdauer aufbereitet.

Neben der umfangreichen Charakterisierung der Ausgangsmaterialien in Bezug auf:

- Druckfestigkeit der Ursprungsbetone (Bohrkerne, Rückprallhammer)
- Karbonatisierungszustand
- Chloridgehalt
- Aufbereitungsart (trocken, nass, unterschiedliche Brecharten)
- Sieblinie
- Kornform (shape index)
- LA-Wert
- Ziegelanteil
- Intensive Untersuchung der Wasseraufnahmefähigkeit (zentrale Bedeutung für Betonherstellung)

wurden aus der hergestellten RC-Körnung Betone mit unterschiedlich hohem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung erstellt und diese im Hinblick auf Frisch- und Festbetoneigenschaften untersucht.

Neben den Versuchen zur Herstellung von RC-Betonen wurde auch das Zwangskarbonatisierungspotential der vorliegenden Gesteinskörnung untersucht. Die CO₂-Speicherung im Rezyklat beruht dabei auf dem chemischen Prozess der Karbonatisierung, welcher die Mineralisierung von gasförmigem CO₂ in der Zementmatrix beschreibt. Im Zuge dieser Untersuchungen wurde ein eigens gebauter Laborreaktor errichtet, welcher die Möglichkeit bietet, bis zu 30 kg RC-Material in einem Batch mit CO₂ zu beaufschlagen. Im Zuge der Untersuchungen konnten folgende zentralen Erkenntnisse gewonnen werden:

- Durch ergänzende Versuche mit vergleichsweise jungem Beton war ein Einfluss des Alters der Betonfertigteile auf das Karbonisierungspotential feststellbar (junger Beton nimmt mehr auf)
- Die Qualität des Ursprungsbetons hat einen starken Einfluss! Insbesondere die Permeabilität des Zementsteins (Beton besserer Qualität nimmt unter Umständen weniger bzw. langsamer CO₂ auf)
- Die Korngröße hat einen maßgebenden Einfluss auf die relative CO₂-Aufnahme sowie die Geschwindigkeit des Karbonisierungsprozesses

In Bezug auf die Betonagen wurden umfangreiche Vorversuche mit trocken aufbereitetem Material (Backenbrecher) durchgeführt. Es wurden Betone mit Ersatzraten von 0, 25, 50 und 100% rezyklierter Gesteinskörnung hergestellt. An den hergestellten Betonagen wurden folgende Frischbetonprüfungen (entsprechend der jeweiligen Normen) durchgeführt:

- Bestimmung des Ausbreitmaßes
- Bestimmung des Luftporengehaltes im LP-Topf
- Bestimmung der Frischbetonrohddichte
- Bestimmung des Gesamtwassergehaltes

Im Nachgang wurden folgende Festbetonprüfungen durchgeführt:

- Bestimmung der Festbetonrohddichte
- Bestimmung der Würfeldruckfestigkeit
- Bestimmung der Spaltzugfestigkeit an Zylindern
- Bestimmung des stabilisierten E-Moduls an Zylindern
- Bestimmung der Bruchenergie mittels Keilspaltversuchen
- Betonmikroskopische Untersuchungen

Mit dem Zeitpunkt der Verfügbarkeit von nass aufbereiteter Gesteinskörnung wurden die Arbeitsschritte zur Abhandlung der oben angeführten Punkte eingeleitet und sind zum jetzigen Zeitpunkt teilweise erfolgt.

Eine umfassende Versuchsserie zur Bestimmung der oben angeführten Parameter an Betonagen mit nass aufbereiteter, karbonisierter rezyklierter Gesteinskörnung ist im Gange und zu 80% abgeschlossen.

Versuche zur Bestimmung der dauerhaftigkeitsrelevanten Parameter wurden bis zum jetzigen Zeitpunkt noch keine durchgeführt. Diese sollen im zweiten Projektjahr erfolgen.

Neben der Rezepturfindung (und -optimierung) sowie Bestimmung der mechanischen und dauerhaftigkeitsrelevanten Parameter an den untersuchten Betonagen, ist auch die Untersuchung zur Hydrationswärmeentwicklung und das Verhalten unter Zwangsbeanspruchung Teil des Arbeitspakets. Dieser Teil wird von den wissenschaftlichen Partnern der TU Graz erarbeitet. Insgesamt konnte das im bisherigen Projektverlauf angestrebte Ziel der Konzipierung sowie des Aufbaus eines umfangreichen (und ausreichenden) Versuchsprogramms zur Bestimmung der erhärtungsbedingten Temperatur- und Festigkeitsentwicklung inklusive des Schwindens erreicht werden. In Ergänzung dazu wurde bereits ein thermohygro-mechanisches Simulationsmodell für die rechnerischen Untersuchungen des Bauteilverhaltens erstellt. Dieses Berechnungsmodell wird nach Durchführung der Zwangsrahmenversuche anhand der Nachrechnung dieser Versuche validiert und im weiteren Projektverlauf dann für Parameterstudien zur Eingrenzung von akzeptablen Herstellungsbedingungen für die Gleitragplatten zur Anwendung gebracht.

Zum jetzigen Stand sind die Versuchsaufbauten konzipiert und baulich umgesetzt. Zusätzlich wird es begleitende Versuche zur Festigkeitsentwicklung und Schwindverhalten geben.

Die Materialverfügbarkeit ist für den weiteren Erfolg für dieses Forschungsprojekt von entscheidender Bedeutung. Daher wird dieser Themenbereich im 2. Forschungsjahr besonders verfolgt.

Der Fertigstellungsgrad der Arbeitspakete für die Materialaufbereitung und Beton ist wie folgt:

- AP 3.1 Bewertung und Optimierung von Brech- und Waschvorgang: 80%
- AP 3.2 CO₂ Beaufschlagung 90%
- AP 3.3 Hydrationswärmeentwicklung: 25%
- AP 3.4 Empfehlungen für die Praxis 10%

2.4. Bewehrungsmix + Bemessung

Fertigstellungsgrad: 50%

Im Zuge des ersten Forschungsjahres wurden die Möglichkeiten zur Ausbildung eines innovativen Bewehrungsmix aus Basaltfasern und Stahlfasern untersucht. Eine umfangreiche Literaturstudie zeigte unter Anderem die wesentlichen Vorteile von Basaltfasern im Vergleich zu anderen Faserbewehrungen auf, welche z.B. sind:

- Höhere Zugfestigkeit als Stahlfasern
- Höhere Bruchdehnung als Kohlenstofffasern
- Gute Beständigkeit gegen chemischen Angriff, Stoßbelastung und Brand
- Korrosionsbeständigkeit
- Niedrigstes GWP (Global Warming Potential [kg CO_{2,eq}/kg]) im Vergleich mit anderen Bewehrungsmaterialien. Dieses liegt im Bereich von 0,3-0,9 kg CO_{2,eq}/kg im Vergleich dazu liegen Glasfasern in einem Bereich von 1,4-2,5 und Kohlenstofffasern im Bereich von 4,5-29 kg CO_{2,eq}/kg.

Zur Bestimmung des Wirkverhaltens der Basaltfasern im Beton wurden Vorversuche durchgeführt mit Betonen welche zu 50% aus rezyklierter Gesteinskörnung hergestellt wurden. Dabei wurden 3kg Basaltfasern pro m³ Beton zugegeben. Die verwendeten Basaltfasern für die Vorversuche stammten von der Firma Master Builders und entsprachen dem Produkttyp *MasterFiber 050*

Der Drucktest wurde nach 28 Tagen Betonaushärtung durchgeführt. Bezüglich des Würfelbetondruckversuchs sind die Ergebnisse für alle untersuchten Mischungsfälle in der obigen Tabelle dargestellt. Die maximale Druckfestigkeit wird für die Proben mit Zusatz von 100 % natürlichen Zuschlagstoffen und ohne Basaltfasern beobachtet, mit einem Durchschnittswert der Proben von 40.6 MPa (Tabelle unten).

Folglich wird der Schluss gezogen, dass die Zugabe von recycelten Zuschlagstoffen die Druckfestigkeit von Beton verringert, was angesichts der vorhandenen Literatur, zu erwarten war. Bei der Zugabe von Basaltfasern zu den Mischungen ist die Faserrichtung von entscheidender Bedeutung. Liegen die Basaltfasern senkrecht zur Druckeinwirkung, nimmt die Druckfestigkeit des Betons ab. Werden die Fasern jedoch parallel zur Druckrichtung (also senkrecht zur Hauptzugspannung) eingebracht, erzeugen die Fasern eine rissichernde Wirkung. Das Bindungsverhalten zwischen Basaltgrenzfläche und Betonmatrix sowie die Wirkung der Faserrichtung werden derzeit noch untersucht.

Vergleicht man die Mischungen nur mit der Zugabe von Fasern, stellt man fest, dass die Proben mit 50 % Zusatz an recycelten Zuschlagstoffen eine höhere Druckfestigkeit aufweisen als diejenigen mit ausschließlich natürlichen Zuschlagstoffen. Diese Tatsache weist auf die gute Zusammenarbeit zwischen recycelten Zuschlagstoffen und Basaltfasern hin.

Insgesamt erwiesen sich die in den Vorversuchen verwendeten Basaltfasern als nicht ausreichend geeignet für den gewünschten Bewehrungseinsatz. Somit wurden Folgeversuche mit einem anderen Fasertyp (Hersteller DBF, Produkttyp: *Turbobuild Integral*) durchgeführt. Neben einer grundsätzlichen Charakterisierung der Fasern wurde ein Versuchsprogramm entworfen um den Einfluss der Basaltfasern auf das Tragverhalten der hergestellten RC-Betone zu bestimmen. Das Versuchsprogramm, welches

- Druckfestigkeitsprüfungen
- Spaltzugfestigkeitsprüfungen
- Prüfung der Biegezugfestigkeit,
- Direkte Zugfestigkeitsversuche sowie
- Untersuchungen zur Wirkung der Faserrichtung

enthält, befindet sich gerade in Abarbeitung. Zusätzlich zu den beschriebenen Versuchen an Betonen mit 50% RC-Anteil und unterschiedlichen Gehalten an Basaltfasern (5kg/m³ und 15 kg/m³) wird auch ein Fasercocktail mit 30kg/m³ Stahlfasern weiter untersucht.

Der insgesamte Fertigstellungsgrad kann mit 50% geschätzt werden.

2.5. Materiallogistik

Fertigstellungsgrad: 50%

Die Straßenbahntrassen in Wien werden in regelmäßigen Abständen inspiziert. Es wird der Zustand der Gleise sowie der Großflächenplatten erhoben. Vorwiegend haben die Gleise eine kürzere Nutzungsdauer als die Gleisplatten. Treten

Schäden an Gleisen wie Abnutzung oder Risse auf, so müssen diese getauscht werden. Neben den Gleisen werden auch die Gleisplatten auf Schäden untersucht. Beim Gleistausch werden die Großflächenplatten aus der Fahrbahn gehoben und bei eventuellen Schäden die betroffene Platte aussortiert. Schäden an Platten können Risse, Ausblühung durch Frost oder andere mechanische Beschädigungen sein.

Die Großflächenplatten, welche in einem Splittbett gelagert sind, werden mit einem Kran (auf LKW montiert) aus der Fahrfäche gehoben und auf den LKW verladen. Das Splittbett wird ebenso beseitigt und die Schienen mit Spreizen aus Stahl in ihrer Lage gehalten. Zwischen den beschädigten Platten kommt es immer wieder vor, dass noch nicht beschädigte Platten verbaut sind, diese werden meist einer Wiederverwendung (Reuse) unterzogen. Als Reuse werden Befestigungen für Lagerplätze, oder Fundamente für untergeordnete Bauwerke oder der Einsatz als Sauberkeitsschicht genannt. Derzeit ist es vertraglich so geregelt, dass Platten im Zuge des Ausbaues in das Eigentum des ausführenden Unternehmens übergehen. Aktuell gibt es noch keine Aufzeichnung darüber, welche Verwendung die Entsorgungsunternehmen für die Gleisplatten haben bzw. zu welchem Prozentsatz das Material hochwertig recycelt wird.

Ausblick: Zum einen soll der Materialstrom noch genauer betrachtet werden, wie viel Tonnen an Platten werden einer Wiederverwendung unterzogen, wie viel Tonnen an Platten fallen als „Abfall“ an und können recycelt werden. Für den Abtransport, die Lagerung oder auch den Anteil der Platten, welche hochwertig recycelt werden, d.h. wieder hochwertiger Beton gewonnen wird, sollen Daten erhoben werden. Des Weiteren soll der Weg, welcher von einer Platte vom Ausbauort bis zur Wiederverwendung des Materials (Reuse als Gleisplatten, Recycling der Platten und minderwertige Wiederverwendung des Materials als Unterbau für Straßen oder Feldwege oder hochwertige Verwertung als Gesteinskörnung für die Betonherstellung) betrachtet werden und wenn möglich dieser optimiert werden. Die Materialströme sollen als Flussdiagramm dargestellt werden und ein hochwertiges Materialrecycling sichergestellt werden.

Der insgesamte Fertigstellungsgrad kann mit 50% geschätzt werden.

3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten

In Bezug auf die Kosten gab es ein Unternehmen (Erich Slupetzky GesmbH, Lieferant von Basaltfasern), welches in Konkurs ging. Es gelang jedoch einen anderen Lieferanten für die Basaltfasern zu finden.

Weiters kam es auch bei den InKind-Leistungen zu leichten Änderungen und Leistungen der Neustark AG waren überhaupt nicht notwendig.

Die Kosten konnten jedoch kompensiert werden da die Angebotenen Leistungen der MA39 durch die BOKU durchgeführt wurden und die Kosten der HTL Camillo Sittte geringer als veranschlagt ausfielen.

Insgesamt konnten die Förderbedingungen eingehalten werden. Das Projekt wurde mit rund 31% Cash-Leistungen und rund 4% InKind-Leistungen aus der Wirtschaft finanziert.

4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit

Mit diesem Forschungsprojekt werden neben der Optimierung der Kreislaufwirtschaft gerade durch die Verwendung von emissionsarmen Zementen und die Zwangskarbonatisierung ganz wesentliche Untersuchungen zur Verbesserung der Nachhaltigkeit gestartet.

Gerade durch die wissenschaftliche Untersuchung der Aufbereitungsprozesse von sortenreinem Betonbruch und die Zwangskarbonatisierung sowie die sich abzeichnenden Verbesserungen auch einiger mechanischer Kennwerte ist in 5 Jahre ein großer „Skalingeffekt“ zu erwarten. Die Umsetzung hängt auch von der technologischen Entwicklung größerer (automatisierter) Anlagen ab

Dieses Projekt leistet einen großen Beitrag zum Klimaschutz, was sich bereits durch die aktive Mitarbeit und Koordination der wissenschaftlichen EU - Arbeitsgruppe DG Move (2024) zur „Decarbonisation of Transport Infrastructure Constructions“ von Prof. Bergmeister zeigte.