

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt
„ERESCON“
NEUE BETONE FÜR DEN INFRASTRUKTUR-BEREICH,
ENERGIE- UND RESSOURCENOPTIMIERT

Verkehrsinfrastrukturforschung VIF 2012
Berichtszeitraum 01.09.2013 - 30.11.2015
FFG Projektnummer 840516

Verfasser: Dr. techn. Joachim Juhart (Projektleiter),
Mag. Claudia Baldermann, DI G.-Alexandru David,
DI G. Fischer, Dr. Alexander Passer
Erreichbarkeit: joachim.juhart@tugraz.at, Tel.: 0316/873-7161

Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie TU-Graz
in Zusammenarbeit mit
Institut f. Angewandte Geowissenschaften TU-Graz

Mitarbeit:

J. Juhart, G.-A. David, C. Baldermann, G. Fischer, F. Mittermayr, Prof. J. Tritthart,
R. Panik, Ass.Prof. A. Passer, Prof. i.R. P. Maydl, Prof. M. Krüger
(Inst. für Baustofftechnologie und Materialprüfung)
Prof. D. Klammer (Institut für Angewandte Geowissenschaften)
W. Stumptner, M. Piller (RCPE, Partikelanalyse)

Graz, 26.12.2015

Neue Betone für den Infrastruktur-Bereich, Energie- und Ressourcenoptimiert

Kurzzusammenfassung

Mit dem Forschungsprojekt „ERESCON“ (Energy and Ressource Efficient Concrete for Infrastructure) im Rahmen der Verkehrsinfrastrukturforschung (2012-2015) wurde ein Beitrag zum Klimaschutz und zur nachhaltigen Entwicklung geleistet. Ziel des Projektes war es, die Zusammensetzung von Beton für Infrastrukturbauwerke grundlegend zu verbessern, sodass der an sich bewährte und dauerhafte Baustoff Beton noch umweltfreundlicher wird. Es wird gezeigt, dass durch innovative Betontechnologie ein wesentlicher Beitrag zur Reduktion von CO₂-Emissionen (bzw. des Global Warming Potential GWP) und zur Senkung des Primärenergiebedarfs (primary energy input PEI) beim Bau von Infrastruktur geleistet werden kann und trotzdem die Funktionalität des „Eco-Betons“ (im Hinblick auf Verarbeitbarkeit, Festigkeit und Dauerhaftigkeit) sichergestellt werden kann. Kernpunkte der innovativen Betontechnologie sind:

- Bewertung der Umweltwirkungen & Wirtschaftlichkeit der Ausgangsstoffe & Rezepturen
- Erhöhung der Packungsdichte der granularen Ausgangsstoffe und Senkung ihres Wasserbedarfs, vor allem der Feinststoffe (< 125 µm Partikeldurchmesser) durch Mikrofüller. Optimierte Zusammensetzung des Gemisches aus Gesteinskörnungen, Bindemitteln und Zusatzstoffen, sodass der Gehalt an Portland- bzw. Portlandkompositzement teilweise durch sog. „Eco-Füller“ (also Stoffe mit geringerer Umweltwirkung) ersetzt bzw. ergänzt werden kann
- Nachweis gleichwertiger Leistungsfähigkeit von neuen Eco-Betonen (nach dem equivalent concrete performance concept ECPC) mit Beton nach bisherigen Normen und Richtlinien trotz veränderter Rezepturkennwerte bei verringerten Umweltwirkungen (GWP und PEI)

Mit dem Projekt wurden die folgenden Ziele erreicht. Es wurden die massenmäßig in Österreich sehr stark eingesetzten Betonsorten C 30/37 „B5“ für Tragwerke und C 25/30 „IXAT-B“ für Tunnelinnenschalen bzw. Weiße Wannen Beton (BS1-A) als Referenzbetone nach Norm bzw. Richtlinien definiert und beispielhaft dementsprechende „Eco-Betone“ entwickelt. In umfangreichen Prüfungen wurde ihre Leistungsfähigkeit nachgewiesen. D.h. dass ihre Verarbeitbarkeit, Festigkeit und Dauerhaftigkeit dem Standard-Beton bei deutlich verringerten Umweltwirkungen zumindest gleichwertig (zum Teil besser!) ist. Die CO₂-Emissionen (GWP) wurden um 20% (in einzelnen Fällen um bis zu 30%) und der Primärenergiebedarf von Eco-Betonen um 10 bis zu 20% im Vergleich zu Standard- Betonen reduziert. In Bezug auf die Dauerhaftigkeit konnten einige Eco-Betone entwickelt werden, die wesentlich beständiger als der Standardbeton sind, zum Beispiel hinsichtlich chemisch lösendem Angriff XAL und treibendem Angriff XAT widerstandfähigere Tunnelinnenschalenbetone. Eine deutliche Verbesserung durch ein dichteres Betongefüge & spezielle Zusatzstoffe war möglich. Für optimierte Eco-Varianten werden etwa gleiche Kosten der Betonzusammensetzung wie für Standardbetone erwartet. Die Kosten sind aber stark von der zukünftigen Entwicklung der Preise der verwendeten Zusatzstoffe, der so genannten „Eco-Füller“ und Micro-Füller, sowie der Fließmittel abhängig. Die Kosten werden in einer Einführungsphase von einem erhöhten Prüfaufwand zur Qualitätssicherung beeinflusst werden. Erforderliche zukünftige Schritte, um die im Labor gewonnenen Ergebnisse in die Bau-Praxis umzusetzen, sind:

- Durchführung wissenschaftlich begleiteter Pilotprojekte hinsichtlich Ausführung unter praktischen Bedingungen & hinsichtlich des Nachweises der „equivalent concrete performance“ bei verbesserten Umweltwirkungen
- Ausarbeitung einer Richtlinie bzw. eines Leitfadens für „Ökobeton für die Infrastruktur“
- Weiterentwicklung der Methoden zur Prüfung der Performance und zur Bewertung umweltfreundlicher, dauerhafter Betone

Inhalt

1	<i>Einleitung und Motivation</i>	5
2	<i>Ziele und Arbeitsprogramm</i>	5
2.1	Ziele	5
2.2	Arbeitsprogramm	6
3	<i>Durchgeführte Arbeiten - Methodik und Ergebnisse</i>	7
3.1	Rahmenbedingungen, Anforderungsprofil an den Beton und Grundlagen	
	ökologischer Nachhaltigkeitsbewertung	7
3.1.1	Anforderungsprofil an den Beton	7
3.1.2	Grundlagen der ökologischen Nachhaltigkeitsbewertung von Beton und Betonausgangsstoffen	8
	Grundlagen zur Ökobilanzierung - (engl. Life Cycle Assessment – LCA)	8
	Definition der verwendeten Umweltindikatoren und der angewandten Ökobilanz - Methoden	9
	GWP 100 (Global Warming Potential) - Treibhauspotential	10
	PEI (Primary Energy Input) Primärenergiebedarf	10
	Ökobilanzielle Bewertung von Betonausgangsstoffe	11
	Gegenüberstellung der Umweltwirkungen unterschiedlicher Betonausgangsstoffe	14
	Zusammenfassung der Bewertung der Umweltwirkungen von Betonausgangsstoffen	15
3.2	Ausgangsstoffe - Prüfung und Bewertung	16
3.3	Packungsdichteoptimierung AP5	19
3.3.1	Theoretische Berechnung und Optimierung der Packungsdichte	20
3.3.2	Experimentelle Bestimmung und Optimierung der Packungsdichte	21
3.4	Grundlagen der Rezepturenentwicklung der Betone	23
3.4.1	Entwicklung geeigneter Feinstoffleime	23
3.4.2	Entwicklung ökologisch optimierter Betone	25
	Generelle Vorgangsweise am Beispiel optimierter Feinkornbetone GK 4mm	26
3.5	Betonentwicklung, Betonprüfung und Bewertung	28
	Kostenschätzung	28
3.5.1	Performance der Betone nach Zusammensetzung	29
	C 30/37 B5 GK16 F52 „Tragwerksbeton“	30
	C 25/30(56) GK16 Tunnelinnenschalenbeton	38
3.5.2	Nachweis der Dauerhaftigkeit	45
	Generelle Vorgangsweise – performance based durability design	45
	Übersicht durchgeführter Untersuchungen und Methoden	47
	Ergebnisse	52
	pH-Wert als Indikator zur Korrosionsbeständigkeit	58
3.6	Vergleichs-Studie zu Umweltwirkungen von Brückenentwürfen	59
3.6.1	Allgemeines zur Vergleichsrechnung an einem Bauwerk und Kosten	59
3.6.2	Gegenstand und Ziel eines Vergleichs an einem Beispiel	59
3.6.3	Systembeschreibung	60
3.6.4	Gegenüberstellung - Brückenbauwerke	61

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

3.6.5	Reduktionspotential der Umweltwirkungen	61
4	Zusammenfassung, Ergebnis und Ausblick.....	64
5	Literatur	66

1 Einleitung und Motivation

In Zeiten des Klimawandels ist es ein erstrebenswertes Ziel, durch Reduktion der Treibhausgasemissionen (GWP) und des Primärenergieverbrauchs (PEI) einen Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung zu leisten. Diese Zielsetzung erscheint vor dem Hintergrund besonders relevant, dass der an sich funktionale und dauerhafte und für unsere Infrastruktur unverzichtbare Baustoff Beton wesentlich zu den Treibhausgasemissionen in Österreich bzw. weltweit (> 5% der anthropogenen CO₂-Emissionen, vgl. [1], [2]) sowie zum Energie- und Ressourcenverbrauch beiträgt. Da dafür hauptsächlich der verwendete Klinker im Portlandzement (CEM I) bzw. Portlandkompositzement (CEM II) verantwortlich ist, vgl. u.a. [4], [10], wurde der Ansatz gewählt, neue Betone zu entwickeln, die im Vergleich zu bisher eingesetztem Standard Beton (bzw. Referenz-Beton nach gültigen Normen und Richtlinien) einen geringeren Portlandzementgehalt bzw. Portlandkompositzementgehalt bei gleichbleibender Funktionalität aufweisen¹.

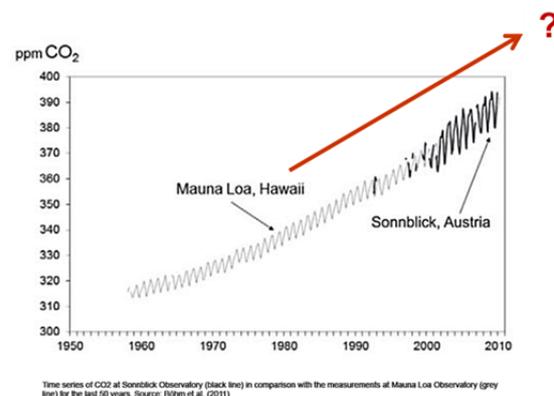


Abbildung 1: Entwicklung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre an einem Beispiel von Messdaten aus Österreich

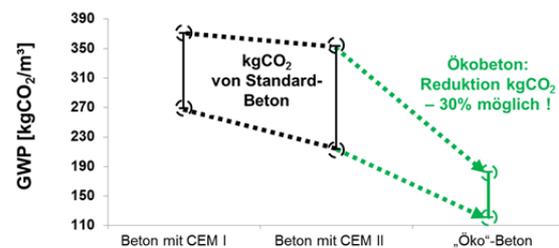


Abbildung 2: Potenzial zur Treibhausgasreduktion durch Entwicklung ökologisch optimierter Betone basierend auf [1]

2 Ziele und Arbeitsprogramm

2.1 Ziele

Übergeordnetes Ziel des F&E-Projektes war es, die Zusammensetzung von Normalbeton für den Infrastrukturbereich im Hinblick auf seine Umwelteinwirkungen grundlegend zu verbessern. Der Primärenergiebedarf (PEI) und das Treibhauspotenzial (GWP), also das CO₂-Äquivalent (kg CO₂/m³ Beton) des Baustoffes, sollten verringert werden und damit ein Beitrag zum Klimaschutz und zur nachhaltigen Entwicklung geleistet werden.

Konkret wurde angestrebt,

- den Bindemittelnutzungsgrad zu erhöhen;
- den Portlandzementklinker teilweise durch Zusatzstoffe mit geringerem Primärenergiebedarf und Treibhauspotenzial zu substituieren bzw. zu ergänzen;

¹ Auf die Entwicklung alternativer Bindemittel oder alternativer Zemente wurde wie im Forschungsantrag zum vorliegenden Projekt beschrieben bewusst verzichtet, vgl. auch [2], [3].

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

- die Funktionalität der Betone über die Nutzungs- und Lebensdauer beizubehalten.
- Als Ergebnis des Projekts soll nachgewiesen werden,
1. wie groß eine Reduktion des Energiebedarfs und Treibhauspotenzials von ressourcenoptimiertem Beton mit österreichischen Ausgangsstoffen verglichen mit derzeit in Österreich üblichem Beton (= definierte “Referenzbetonsorten“) sein kann;
 2. ob die Herstellungskosten des ressourcenoptimierten Betons verglichen mit derzeit üblichem Beton gleich hoch oder geringer zu erwarten sein werden;
 3. dass die Leistungsfähigkeit des ressourcenoptimierten Betons verglichen mit Beton nach derzeitigen Regelwerken (ÖNORM B 4710-1 bzw. Richtlinien) hinsichtlich Verarbeitbarkeit, Festigkeit und Dauerhaftigkeit gleichwertig ist.

Die angesprochene Verbesserung von Normalbeton für den Infrastrukturbereich konnte mit innovativer Betontechnologie wie im Folgenden beschrieben erreicht werden. Dafür wurde das folgend dargestellte Arbeitsprogramm erfüllt.

2.2 Arbeitsprogramm

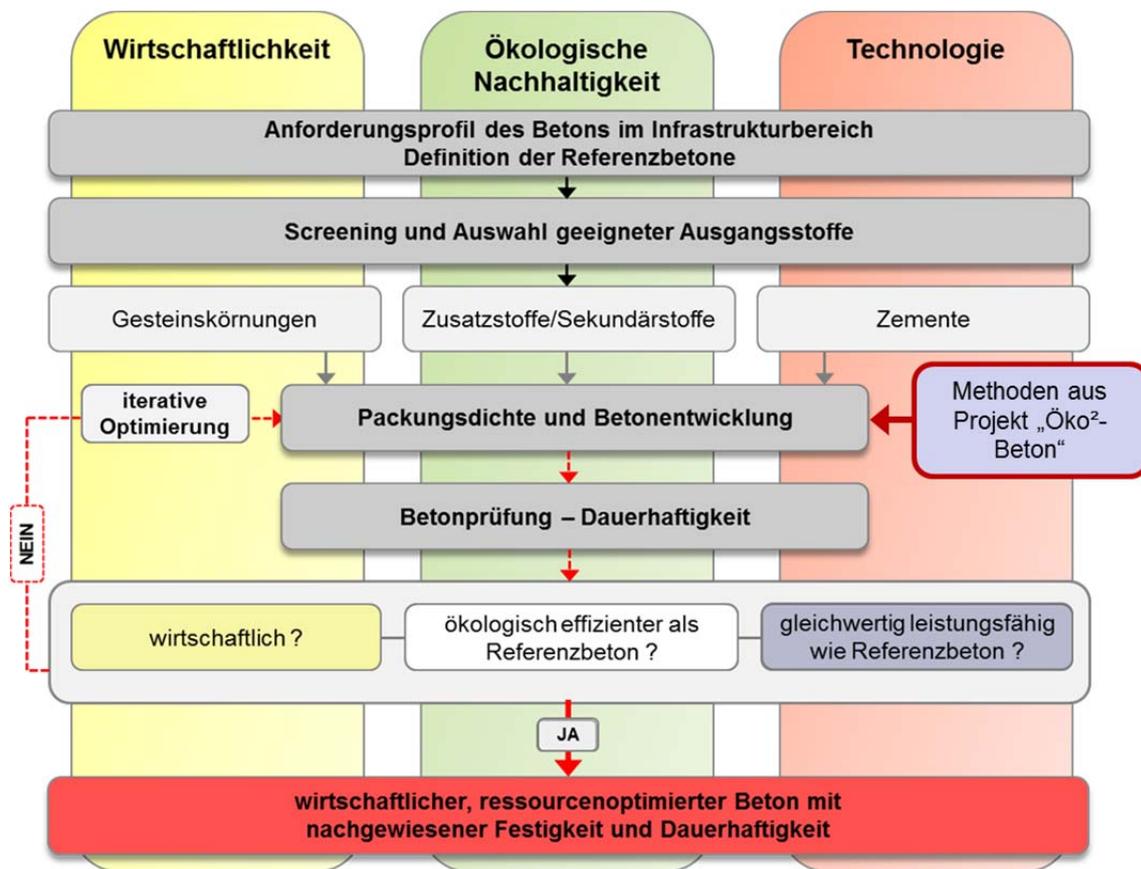


Abbildung 3: Arbeitsprogramm des Gesamtprojekts

In Abbildung 3 sind die Arbeitsschritte des gesamten Projektes und der Projektablauf dargestellt. Außerdem sind die Basiskriterien des Projektes („3 Säulen“) Ökonomie, Ökologie und Technolo-

gie sichtbar. Es wird auch gezeigt, dass Methoden, die im parallel laufenden Projekt „Öko²Beton“ (=Ressourcen-optimierter Beton für Fertigteile ¹) wie bereits im Projektantrag „Neue Betone für den Infrastrukturbereich, energie- und ressourcenoptimiert“ vom 11.10.2012 beschrieben zur Bearbeitung herangezogen werden.

3 Durchgeführte Arbeiten - Methodik und Ergebnisse

3.1 Rahmenbedingungen, Anforderungsprofil an den Beton und Grundlagen ökologischer Nachhaltigkeitsbewertung

3.1.1 Anforderungsprofil an den Beton

Zu Projektbeginn wurde mittels Fragebogen bei den Auftraggebern (ASFINAG, ÖBB) erhoben, welche Betonsorten entsprechend ihrer Anwendung im Infrastrukturbereich am häufigsten und/oder massenmäßig am stärksten verwendet werden. Die zu Projektbeginn erhobenen Daten wurden im kick-off-meeting vom 11.9.2013 diskutiert. Gemäß Angaben der Auftraggeber (ASFINAG, ÖBB) wurden zwei bis drei Betonsorten identifiziert, von denen auch angenommen werden konnte, dass sie ein großes Potenzial der ökologischen / ökobilanziellen Verbesserung und deren Umsetzung haben und eine Prioritätenreihung der 3 Betonsorten getroffen. Es wurden die wesentlichen Anforderungen an ihre Verarbeitbarkeit, Festigkeit und Beständigkeit gegenüber Umwelteinwirkungen (Expositionsklassen) festgehalten.

Dabei wurden folgende Referenzbetone festgelegt:

1. C 30/37 - B5 (Übereinstimmung ÖBB und ASFINAG bei Anwendung im Brückenbau)
2. C 25/30 – IXAT/C₃A-frei (sulfatbeständiger Tunnelinnenschalenbeton) und
3. C 25/30 – IG/IS (Tunnelinnenschalenbetone, nicht C₃A-frei)

Mit den Ergebnissen einer Optimierung soll auf weitere Betone extrapoliert werden, insbesondere auf den seitens der ÖBB genannten „Weiße Wanne Beton“.

Für diese Betone wurden 2 Referenzbetone definiert, die mit typischen Betonrezepten für einen (a) Tragwerksbeton C 30/37 - B5 (i.e. Expositionsklassen XC4/XD2/XF2/XA1L/SB nach ÖNORM B 4710-1 [26]) und einen (b) Innenschalenbeton C 25/30 (56) – IXAT-B (C₃A-frei) nach ÖBV Richtlinie [58] (mit Expositionsklassen XC4/XF3/XA2T/XA1L) im Zuge des Projekts hergestellt wurden. Die Rezepturbeispiele stammten von ÖBB (Tragwerksbeton) und ASFINAG (Innenschalenbeton). Mit der Rezeptur für Innenschalenbeton IXAT-B können auch die Anforderungen an weiße Wanne Betone nach ÖBV-Richtlinie Weiße Wannen [59] für den Betonstandard BS1-A abgedeckt werden.

Weitere Anforderungen sind: geringe Hydratationswärme, Verarbeitbarkeit F 52 und unterschiedliche Anforderungen an die chemische Beständigkeit gemäß ÖBV-Richtlinie Innenschalenbeton und gemäß ÖNORM B 4710-1.

¹ Ressourcen-optimierter Beton für Fertigteile; Projekt im Auftrag des Verband Österr. Beton- und Fertigteilwerke, FFG Projektnummern: 838791 (1.FJ), 845263 (2.Forschungsjahr), 851203 (3.FJ)

3.1.2 Grundlagen der ökologischen Nachhaltigkeitsbewertung von Beton und Betonausgangsstoffen

Mit dem Werkstoff Beton - welcher aufgrund seiner Beständigkeit, der langen Lebensdauer, seiner hohen Festigkeit, der Möglichkeit der freien Formgebung usw. den weltweit am häufigsten verwendeten Baustoff darstellt - sind wesentliche Umweltwirkungen verbunden. Dabei ist der größte Anteil am Treibhauspotential (GWP Global Warming Potential) und dem Primärenergiebedarf (PEI primary energy oder auch CED Cumulative Energy Demand) auf den Ausgangsstoff Zement bzw. den darin enthaltenen Portlandzementklinker (siehe Abbildung 4) zurückzuführen.

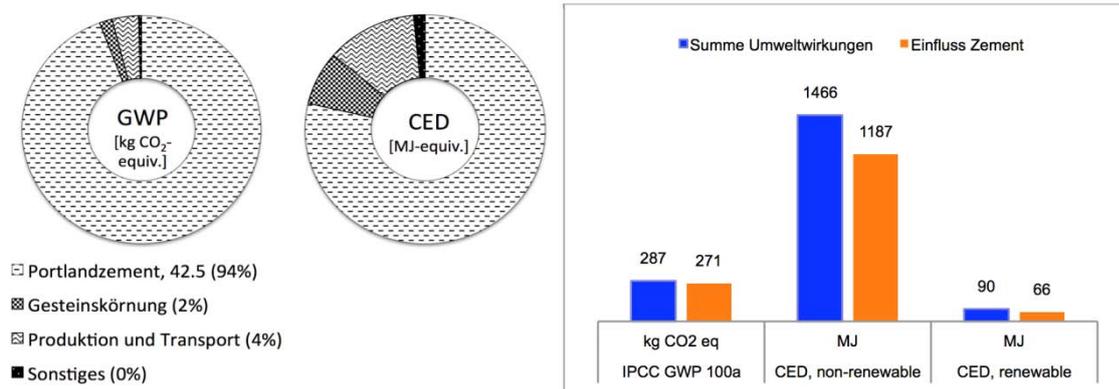


Abbildung 4: Anteile der Umweltwirkungen der Ausgangsstoffe an der gesamten Umweltwirkung von Beton für die Indikatoren GWP und CED aus [1]

In Abbildung 2, Seite 5, wurde bereits das mögliche Potential der Treibhausgasemissionsreduktion für einen Kubikmeter Beton im Prinzip dargestellt. In den nachfolgenden Absätzen wird auf die Thematik der CO₂ Reduktion durch die Verwendung von Zementergänzungstoffen¹ und den damit verbundenen Umweltwirkungen eingegangen.

Grundlagen zur Ökobilanzierung - (engl. Life Cycle Assessment – LCA)

Mit der Methode der Ökobilanzierung ist es möglich, die umweltbezogenen Qualitäten von Baustoffen und Bauprodukten anhand von ausgewählten Umwelt-Indikatoren (z.B. Treibhauspotential, Versauerungspotential, Primärenergiebedarf, etc...) quantitativ darzustellen. Damit ist es möglich, die umweltbezogenen Qualitäten als Kriterium bei der Auswahl von Bauprodukten objektiviert zu berücksichtigen.

In Abbildung 5 sind die Phasen der Erstellung einer Ökobilanz nach ÖNORM EN ISO 14040 [9] dargestellt.

¹ Der Begriff „Zementergänzungstoffe“ leitet sich vom englischen Begriff „supplementary cementitious materials SCM“ ab. Gemeint sind die in später näher definierten Füller bzw. Zusatzstoffe im Beton.

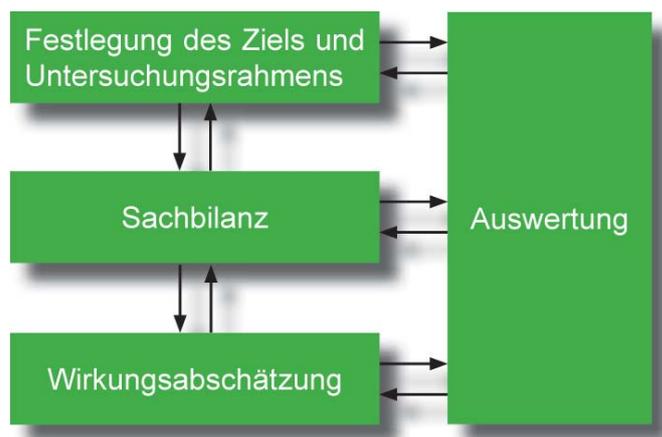


Abbildung 5: Bestandteile einer Ökobilanz [9]

Ziel und Untersuchungsrahmen

Die Erstellung einer Ökobilanz sieht nach [9] folgende Punkte vor:

1. Angabe bezüglich der beabsichtigten Anwendung der Ökobilanz
2. Definition der Zielgruppe
3. Angabe zu den Durchführungsgründen
4. Angabe, ob die Ergebnisse veröffentlicht werden sollen

Sachbilanz - (engl. Life Cycle Inventory – LCI)

Bei der Sachbilanz handelt es sich um eine Zusammenfassung der erhobenen Stoff – und Energieströme anhand von definierten Systemgrenzen sowie einer Quantifizierung der umweltbezogenen Qualität dieser Stoffe. Diese Betrachtung und Bewertung erfolgt über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes (Rohstoffgewinnung, Produktherstellung, Nutzung, Beseitigung) und den damit verbundenen Wechselbeziehungen mit der Umwelt [9].

Wirkungsabschätzung - (engl. Life Cycle Impact Assessment – LCIA)

In der Phase der Wirkungsabschätzung erfolgt die Festlegung der Wirkungskategorien sowie der Charakterisierungsmodelle, nach welchen die Sachbilanzergebnisse ausgewertet werden. Dabei erfolgt eine Klassifizierung der erhobenen Sachbilanzdaten als auch eine Berechnung der Wirkungsindikatoren anhand von festgelegten Charakterisierungsfaktoren [9].

Auswertung

Die Auswertungsphase umfasst eine umfassende und transparente Darstellung der zugrunde gelegten Daten, Methoden, Annahmen, Einschränkungen und Ergebnisse der Ökobilanzstudie. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen sind in Form eines Berichts auszuarbeiten und der Zielgruppe zugänglich zu machen [9].

Definition der verwendeten Umweltindikatoren und der angewandten Ökobilanz - Methoden

Für das Forschungsprojekt ERESCON wurden von der Arbeitsgruppe Nachhaltigkeitsbewertung des Instituts für Materialprüfung und Baustofftechnologie der TU Graz die Umweltwirkungen für

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

die unterschiedlichen Betonausgangsstoffe (insbesondere für Stoffe, welche als Zementergänzungsstoffe zur Anwendung kommen sollen) erhoben und verglichen.

Folgende Indikatoren bzw. Parameter wurden zur Darstellung der Umweltwirkungen und dem Verbrauch von energetischen Ressourcen berücksichtigt:

1. GWP Treibhauspotenzial (kg CO₂ äquiv.)
2. PEIn.r. / CED non. r.: Einsatz nicht erneuerbarer Primärenergie (MJ, unterer Heizwert)
3. PEIr. / CED r.: Einsatz erneuerbarer Primärenergie (MJ, unterer Heizwert)

GWP 100 (Global Warming Potential) - Treibhauspotential

Durch das Treibhauspotential wird der Beitrag von verschiedenen Spurengasen zur globalen Erwärmung als Relation zu Kohlendioxid beschrieben. Für das gegenständliche Forschungsprojekt wurde dabei ein Zeithorizont von 100 Jahren (GWP 100) für die Charakterisierung festgelegt. Das Treibhauspotential wird dabei in kg CO₂ äquiv. angegeben [5].

PEI (Primary Energy Input) Primärenergiebedarf

Unter Primärenergiebedarf fallen sämtliche zur Herstellung eines Produktes, sowie zur Durchführung einer Dienstleistung, notwendigen Aufwendungen von energetischen Ressourcen. Für das vorliegende Forschungsprojekt erfolgte eine Darstellung des kumulierten Energieaufwandes (Zusammenfassung Primärenergie erneuerbar und nicht erneuerbar) für die unterschiedlichen Stoffe. Unter diesen sogenannten Primärenergiebedarf oder Primärenergieinhalt (Primary Energy Input PEI) fallen sowohl energetisch genutzte als auch stofflich genutzte Ressourcen. Eine Darstellung des Primärenergieinhalts erfolgt unter Angabe in MJ des unteren Heizwertes der verwendeten Ressourcen [6].

Bei den Umweltindikatoren erfolgte letztlich die Betrachtung der Indikatoren Treibhauspotential GWP und Primärenergiebedarf PEI. Diese wurden als Energie- und Ressourcenindikatoren aus gesellschaftlicher, wirtschaftlicher und politischer Sicht in Zeiten des Klimawandels als besonders wesentlich erachtet (Handel mit Klimazertifikaten, Reduktion von Treibhausgasen, Senkung des Energiebedarfs, etc. ...).

Für die Wirkungsabschätzung der Umweltwirkungen wurde die CML – Methode 2001¹ [7] verwendet. Eine Adaptierung bzw. Modellierung der Stoffe erfolgte aufbauend auf den Grunddatensätzen der EcoInvent Datenbank V2.2 [8]. Unter Adaptierung ist eine Anpassung der Datensätze an den österreichischen Markt (Anpassung Energiedatensätze, Anpassung Klinkergehalt der Zemente CEM I und CEM II/A in Relation zueinander) und unter Modellierung eine Erweiterung der Datensätze durch zusätzliche Prozessschritte auf Sachbilanzebene zu verstehen (z.B. Integration zusätzlicher Prozessenergien und Prozessstoffe zur Modellbildung von Mahlprozessen, für die Herstellung von feinen Gesteinsmehlen).

¹ CML – „Centrum voor Milieukunde“ der Universität Leiden - Methode 2001: Methode zur Charakterisierung von Umweltwirkungen (siehe ecoinventReports/01 Overview and Methodology, 2007) [7]

Ökobilanzielle Bewertung von Betonausgangsstoffe

Für die Durchführung einer ökobilanziellen Bewertung von unterschiedlichen Betonrezepturen ist es notwendig, Umweltwirkungen für sämtliche, in einer Rezeptur enthaltenen Stoffe zu erheben. Im vorliegenden Forschungsprojekt wurden Kennwerte für Umweltwirkungen aus der Literatur [10][11][12][13][14] aus Datenbanken (EcoInvent V2.2 [8]) und aus eigenen Modellierungen [1], [40] verwendet.

Zwei wesentliche Ziele standen bei der Untersuchung der Stoffe im Vordergrund:

1. Datengrundlagen zu finden, welche zur Bewertung von Betonrezepturen (Ausgangsstoffen) verfügbar sind. Kennwerte für Umweltwirkungen sind in Tabelle 2 ersichtlich.
2. Modellierung und Gegenüberstellung der Umweltwirkungen verschiedener Betonrezepturen auf Grundlage der Kennwerte, welche im Zuge der Recherche erhoben wurden.

Im gegenständlichen Forschungsprojekt wurden die Stoffe primär auf den Datensätzen der EcoInvent V2.2 [8] Datensätze modelliert (siehe Tabelle 2), um eine konsistente Datengrundlage (gleiche Rahmenbedingungen) gewährleisten zu können. Eine Charakterisierung der Umweltwirkungen erfolgte unter Anwendung der CML – Methode.

Umweltwirkungen von Zement

Die Produktion von Portlandzementklinker ist mit sehr energieintensiven Prozessen verbunden. Im Jahr 2012 wurden laut [14] in Österreich 4,46 Millionen Tonnen Zement produziert und dabei ein CO₂- Ausstoß von 2,74 Millionen Tonnen verursacht. In diesem Zusammenhang gilt es anzumerken, dass ein Großteil der in der Zementproduktion verursachten CO₂ Emissionen nicht auf den Primär- Energiebedarf sondern auf die Entsäuerung des Kalksteins (Austreiben von CO₂ aus dem Calciumcarbonat) während des Brennvorgangs zurückzuführen ist [14].

Die Ergebnisse einer Literaturrecherche zeigen, dass für den Ausgangsstoff Zement wie auch für einige Zementergänzungsstoffe sehr unterschiedliche Kennwerte von Umweltwirkungen mit enormer Schwankungsbreite in den unterschiedlichen Datenbanken und Quellen vorhanden sind (siehe Abbildung 6 und [15]). Eine vergleichende Bewertung von Stoffen kann daher nur dann durchgeführt werden, wenn Hintergrund-Daten konsistent erhoben und die Berechnung der Umweltwirkungen mit einer einheitlichen, transparenten Methodik erfolgt. Nur unter Anwendung eines einheitlichen Grundlage (Systemgrenzen, Bewertungsgrundlagen, Abschneidekriterien) ist eine konsistente, nachvollziehbare und belastbare Bewertungsgrundlage gegeben. Für das ggst. Forschungsprojekt wurde deshalb nur eine anerkannte Datenbank und die darin zugrundeliegende Methodik der Bewertung – nämlich EcoInvent [8] – herangezogen.

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

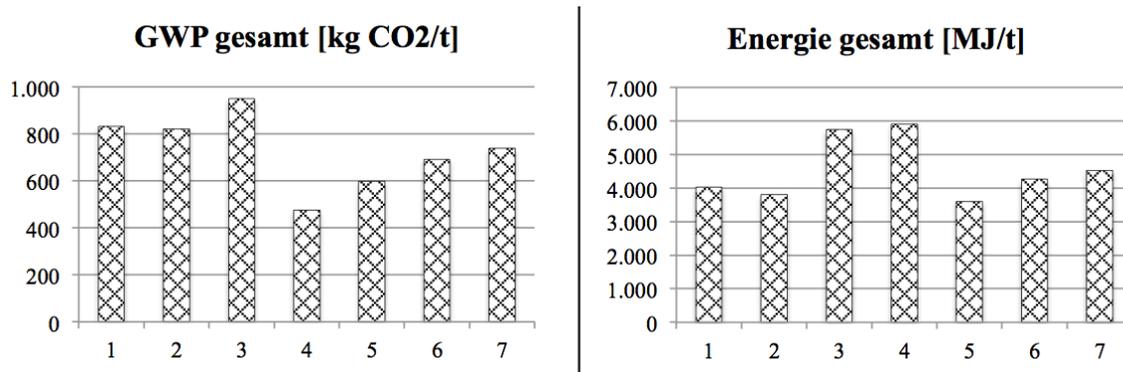


Abbildung 6: Darstellung der Spannweite von Umweltwirkungen von Zement zufolge unterschiedlicher Datenquellen (1 = Umweltwirkungen von CEM I auf Basis von [8] modelliert ;2 = Umweltwirkungen von CEM II auf Basis von [8] modelliert¹ ;3 = [16]; 4 = [16];5 = [17];6 = [18];7 = [19])

Umweltwirkungen von Zementergänzungstoffen

In einem ersten Schritt erfolgte eine Erhebung und Auswahl von möglichen Stoffen (Gesteinsmehlen), welche als Portlandzementklinkerersatz- bzw. Zementergänzungstoffe (siehe Fußnote 1, Seite Fehler! Textmarke nicht definiert.) verwendet werden können. Besonderer Wert wurde dabei auf eine regionale Verfügbarkeit der möglichen Ergänzungstoffe gelegt.

Aufgrund von Vorerhebungen zur Verfügbarkeit wurden aufbereitete Gesteinsmehle folgender Gesteinsarten als potentielle Zementergänzungstoffe für den österreichischen Markt identifiziert:

- Dolomit
- Kalkstein
- Quarz (bzw. diverses Hartgestein)

Bei Sekundärrohstoffen, welche ein Nebenprodukt bzw. einen „Abfall“ aus einer primären Produktion darstellen, wurden die Umweltauswirkungen mit Null angenommen. Dies entspricht der in [20] vorgegebenen Allokationsmöglichkeit.

Für das vorliegende Forschungsprojekt, sind folgende Stoffe von dieser Konvention betroffen:

- Flugaschen
- Hüttensand
- Filterstäube
- Gesteinsmehl-Schlempen
- Microsilica

Zementersatzstoffe sind im klassischen Sinne hydraulisch wirksame Zusatzstoffe wie Hüttensand und Flugasche, welche sowohl in Kompositzementen als sogenannte Zumahlstoffe zu Portlandklinker verwendet werden oder im Beton als Zusatzstoffe zugegeben werden können. Problematisch ist allerdings gemäß [21] die Verfügbarkeit dieser Zementersatzstoffe in Österreich. Von der österreichischen Zementindustrie wird bereits ein Großteil der verfügbaren Menge an Hüttensand,

¹ Die in [8] angegebenen Daten für CEM II weichen kaum von jenen des CEM I ab, was dem tatsächlichen Unterschied im Klinkergehalt (CEM I: 95% Portlandklinker; CEM II/A: 80-94% Klinker; CEM II/B: 65-79% Klinker gemäß EN 197-1 [22]) widerspricht. Deshalb wurde der in Österreich für Transportbeton am häufigsten verwendeten CEM II/A mit geringerem GWP und PEI modelliert, siehe Tabelle 2.

welcher bei der Roheisenproduktion entsteht, für die Zementproduktion eingesetzt [21]. Flugasche, welche aus Abgasfiltern von Kohlekraftwerken stammt, steht ebenfalls aufgrund des Auslaufens dieses Modells zur Stromerzeugung nur in begrenztem Maße zur Verfügung. Die technologische Eignung, sowie die ausreichende Verfügbarkeit von alternativen von hydraulisch wirkenden Zementersatzstoffen wie Flugaschen aus der Biomasse-Verbrennung wird u.a. in laufenden Projekten des Institutes für Materialprüfung und Baustofftechnologie der TU Graz geprüft.

Wie bereits oben erwähnt, können die Umweltwirkungen für Sekundärrohstoffe, welche nicht weiter aufbereitet werden müssen (z.B. Flugasche) mit Null angenommen, werden. Bei Sekundärrohstoffen, welche einer weiteren Aufbereitung (i.e. feines Aufmahlen bzw. Klassieren) unterzogen werden müssen, um als Zusatzstoffe verwendet zu werden, wird der Aufwand der Aufbereitung wie unten beschrieben bei den Umweltwirkungen berücksichtigt.

Gesteinsmehle, also inerte Zusatzstoffe für Beton, stellen eine regional gut verfügbare Alternative dar, wenn sie technologisch richtig eingesetzt werden, wie im vorliegenden Projektbericht beschrieben. Berechnete Kennwerte für die Umweltwirkungen dieser Zementergänzungstoffe sind Tabelle 2, Seite 16, zu entnehmen. Hierbei wurde vor allem der im folgenden beschriebene Einfluss der Feinheit der Stoffe berücksichtigt.

Umweltwirkungen zufolge von Mahlprozessen

Eine Unterscheidung der Stoffe nach ihrer Mahlfeinheit bildet eine wesentliche Grundlage für einen Vergleich der unterschiedlichen Ausgangsstoffe. In weiterer Folge sind Informationen zur Mahlfeinheit unumgänglich, da diese die Basis für die Modellierung der Umweltwirkungen aufgrund der notwendigen Energien für den Mahlprozess darstellen. Daten für den Energieaufwand der notwendigen Mahlprozesse in Abhängigkeit von der Feinheit und von der Härte des Ausgangsgesteins der unterschiedlichen Stoffe wurden von einem Industriebetrieb, welcher Gesteinsmehle produziert, sowie von einem Hersteller von Mahlwerken zur Verfügung gestellt und um Literaturwerte ergänzt, siehe auch [43]. In Tabelle 1 sind die notwendigen Energieaufwände für die Aufbereitung bzw. Mahlung der unterschiedlichen Ausgangsstoffe sowie für Zement in Abhängigkeit der Mahlfeinheit (Angabe des mittleren Durchmessers d_{50}) angegeben:

Tabelle 1: Energieaufwand für Mahlprozesse in Abhängigkeit der Mahlfeinheit angegeben als mittlerer Durchmesser d_{50} der Partikel nach [43]

Gestein	[kWh/t für 30 μm]	[kWh/t für 2 μm]
Dolomit	25	180
Kalkstein	28	190
Quarz	38	270
Zement	35	250

In Abhängigkeit von der gewünschten Mahlfeinheit ist eine unterschiedliche Anzahl an Prozessschritten notwendig, in welchen wiederholt gemahlen und ausreichend feines Material von noch zu grobem Material separiert (meist gesichtet) wird. Damit erklären sich die überproportional steigenden Energieaufwände für die feiner werdenden Mahlstufen. Des Weiteren ist der Energiebedarf für die Aufbereitung der Gesteinsmehle auch sehr stark von der Gesteinshärte abhängig, siehe Abbildung 7. Aus der Abbildung zeigt sich, dass der Energieaufwand mit sinkender Feinheit (bzw. steigendem mittleren Durchmesser d_{50}) der Stoffe exponentiell ansteigt.

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

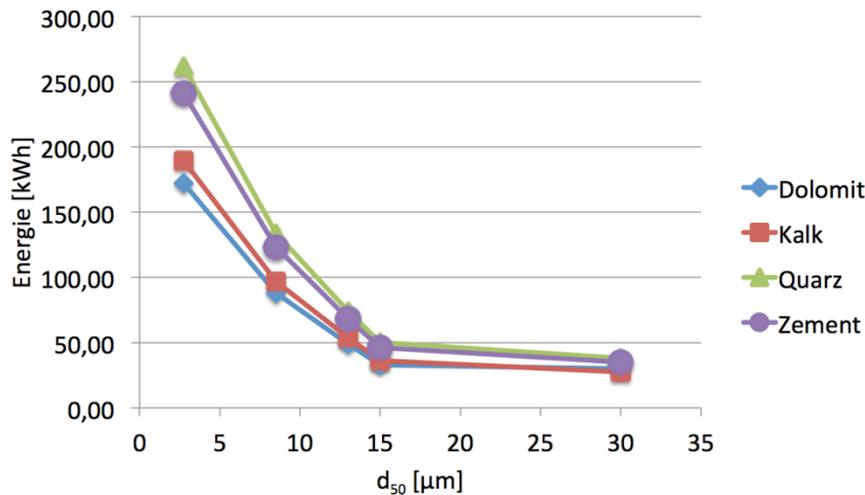


Abbildung 7: Energieaufwand für die Mahlung der Stoffe in Abhängigkeit ihrer Mahlfeinheit [43]

Umweltwirkungen von Betonzusatzmitteln

Um eine Reduktion von Zement bzw. Klinker im Beton durchführen zu können, ist neben der Optimierung der Partikelverteilung des Mehlkornanteils im Beton (Stoffe < 125 µm), die Anwendung von Fließmitteln möglich. Fließmittel dienen zur Sicherstellung der Verarbeitbarkeit des Betons, da aufgrund der Reduktion des Zementgehalts auch ein verminderter Einsatz von Anmachwasser gegeben sein kann. Üblicherweise werden hochwirksame Fließmittel auf Polycarboxylatether-Basis (PCE) in ökologisch optimierten Beton im Vergleich zum Normalbeton in wesentlich höherer Dosierung zum Einsatz gebracht, vgl. [10] [23]. Recherchen ergeben aber, dass die Produktion von Fließmitteln sehr energieintensiv ist, die Umweltwirkungen typischer Fließmittel sind Tabelle 2 zu entnehmen.

Gegenüberstellung der Umweltwirkungen unterschiedlicher Betonausgangsstoffe

In Abbildung 8 und Abbildung 9 sind die ermittelten Umweltwirkungen der verwendeten Stoffe für Beton im Vergleich dargestellt (Wasser wird dabei nicht bewertet, da es keine negativen Umweltwirkungen aufweist). Betreffend möglicher Ersatzstoffe für Zement wird ersichtlich, dass die Mahlprozesse (wiederholte Mahlung und Separation) im Herstellungsprozess von Zementersatzstoffen den energieintensivsten Prozessschritt darstellen. Jedoch ist aus den beiden Abbildungen auch deutlich zu erkennen, dass das Treibhauspotential und der Primärenergiebedarf fein gemahlener von Gesteinsmehlen und anderen Zusatzstoffen in Relation zu den Kennwerten von Portlandzement signifikant geringer sind. Grund dafür ist einerseits der hohe Energiebedarf im Zuge der Produktion des Zementklinkers und andererseits der Prozess-bedingte CO₂ – Ausstoß (Entsäuerung des Kalksteins). Auch die Energie für die notwendigen Mahlprozesse bei der Produktion von feinstem Gesteinsmehl ändert relativ wenig an der Dominanz des Zements. Es gilt aber zu beachten, dass mit zunehmender Feinheit und Härte eine überproportional hohe Umweltwirkung einhergeht (siehe Abbildung 7). Kennwerte für die Umweltwirkungen der Mahlprozesse der granularen Stoffe einschließlich der Zemente, die in Abhängigkeit der Mahlfeinheiten modelliert bzw. recherchiert wurden, sind in Tabelle 2 (siehe unten) angegeben. Für Zemente und Gesteinsmehle wurden die Umweltwirkungen auf Basis von [8] mit Anpassungen an die österr. Stromdamentalsätze und die Berücksichtigung des niedrigeren Klinkergehalts im CEM II/A im Vergleich zum CEM I modelliert.

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

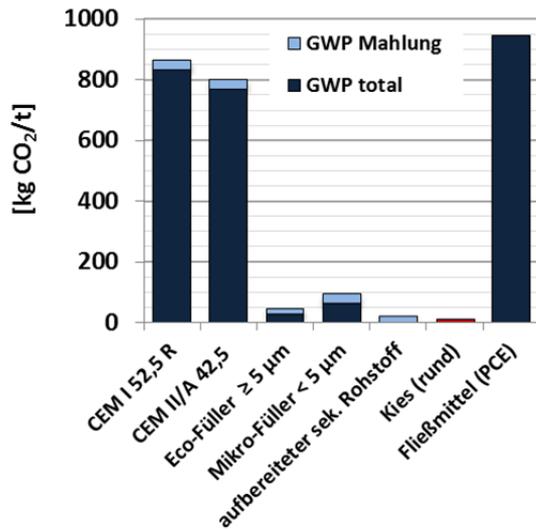


Abbildung 8: Treibhauspotenzial GWP verwendeter Ausgangsstoffe im Vergleich

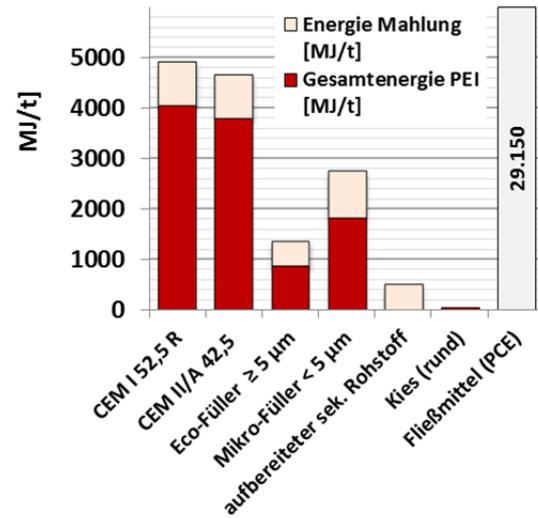


Abbildung 9: Primärenergieverbrauch PEI verwendeter Ausgangsstoffe

Zusammenfassung der Bewertung der Umweltwirkungen von Betonausgangsstoffen

Primär entsteht der hohe CO₂ – Ausstoß bei Portlandzement durch den Brennvorgang im Zuge der Klinkerproduktion, sowie der damit verbundenen Entsäuerung des Kalksteins. Im Bereich des Primärenergiebedarfs steht der Brennprozess im Vordergrund. Da der chemische Prozess der Entsäuerung einen Großteil der CO₂ – Emissionen bewirkt und ihre Reduktion prozessbedingt nicht möglich ist, stellt die Ergänzung bzw. Substitution des Portlandzements (bzw. des Klinkeranteils im Zement) durch Ersatz- bzw. Ergänzungsstoffe mit geringerer Umweltwirkung eine Möglichkeit der ökobilanziellen Verbesserung dar. Als ökobilanziell vorteilhafte Zementergänzungsstoffe bieten sich verbunden mit einer veränderten Betontechnologie (Packungsdichteoptimierung) vor allem Gesteinsmehle an, welche in Österreich praktisch in unbegrenztem Maße zur Verfügung stehen. Neben Gesteinsmehlen besteht auch die Möglichkeit Sekundärrohstoffe (Flugaschen, Filterstäube, Hüttensand) als Zementergänzungsstoff anzuwenden. Diese Stoffe werden ohne negative Umweltwirkungen bewertet, wenn sie als „Abfall“ aus einer Primärproduktion deklariert werden, ihre eingeschränkte Verfügbarkeit ist aber zu beachten

Es wurde zudem untersucht, welchen Einfluss das Aufmahlen und die Aufbereitung mikrofeiner Ergänzungsstoffe auf deren Umweltwirkung haben. Mit zunehmender Feinheit und Härte der Stoffe geht eine exponentiell steigende Umweltwirkung einher. Die für die Mahlprozesse nötigen Energien bei der Aufbereitung sind allerdings sowohl für feinstes Gesteinsmehl, als auch für Zementklinker in ähnlichem Maß erforderlich und es ändert sich wenig am Bild der Umweltwirkungen. Die Umweltwirkungen der Portlandzemente (CEM I und CEM II) sind wesentlich größer als jene der potentiellen Ergänzungsstoffe.

Aus den vorgestellten Untersuchungsergebnissen lässt sich ableiten, dass ein teilweiser Ersatz bzw. eine Ergänzung des Portlandzementes im Beton durch aufbereitete Gesteinsmehle und auch

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

durch Sekundärrohstoffe, soweit verfügbar, eine derzeit schon gut einsetzbare und äußerst effektive Möglichkeit¹ ist, Ressourcen und Energie zu schonen und Treibhausgase zu reduzieren.

Die Ergebnisse der erstellten Ökobilanz für die in Österreich am häufigsten verwendeten Zemente und der unterschiedlichen Ausgangsstoffe sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Kennwerte für Umweltwirkungen der unterschiedlichen Ausgangsstoffe

Ausgangsstoffe	GWP gesamt	Energie gesamt	GWP Mahlprozesse ***	Energie Mahlprozesse ***
	[kg CO ₂ /kg]	[MJ/kg]	[kg CO ₂ /kg]	[MJ/kg]
CEM I 52,5 R *	0,831	4,030	0,031	0,864
CEM II/A 42,5 **	0,769	3,786	0,031	0,864
Dolomit-/Kalksteinmehl Feinheit d ₅₀ ≥ 30µm (Eco-Füller, modelliert für d ₅₀ = 30µm) *	0,013	0,385	0,009	0,090
Dolomit-/Kalksteinmehl Feinheit 5 ≤ d ₅₀ < 30µm (Eco-Füller, modelliert für d ₅₀ = 8,5µm) *	0,025	0,717	0,012	0,331
Dolomit-/Kalksteinmehl Feinheit d ₅₀ < 5µm (Mikrofüller, modelliert für d ₅₀ = 2,75µm) *	0,035	1,005	0,022	0,648
Hartgesteinsmehl Quarz, Basalt, Granit) d ₅₀ ≥ 30µm (Eco-Füller, modelliert für d ₅₀ = 30µm) *	0,023	0,852	0,014	0,126
Hartgesteinsmehl Quarz, Basalt, Granit) 5 ≤ d ₅₀ < 30µm (Eco-Füller, modelliert für d ₅₀ = 8,5µm) *	0,041	1,338	0,017	0,486
Hartgesteinsmehl d ₅₀ < 5µm (Mikrofüller, modelliert für d ₅₀ = 2,75µm) *	0,057	1,788	0,034	0,936
Flugaschen (FA) ohne Aufbereitung (Sekundärrohstoff)	0,000	0,000	[-]	[-]
AHWZ (aufbereiteter Sek. rohstoff Hüttensand/gemahlene FA)	0,017	0,486	0,017	0,486
Filterstäube (Gesteinsmehl)	0,000	0,000	[-]	[-]
Quarzsand *	0,010	0,552	[-]	[-]
Gesteinskörnungen rund *	0,002	0,058	[-]	[-]
Gesteinskörnungen gebrochen *	0,004	0,140	[-]	[-]
Wasser ab Verbraucher *	0,000	0,010	[-]	[-]
Fließmittel PCE [Schiessl]	0,944	29,150	[-]	[-]
Verflüssiger [Schiessl]	0,739	16,000	[-]	[-]
Fließmittel und Verflüssiger inkl. PCE [Deutsche Bauchemie]	1,840	30,830	[-]	[-]

* Die Werte der Umweltwirkungen wurden auf Basis von [Ecoinvent] mit [SimaPro] modelliert
 ** Die Wert für CEM II/A wurden im Verhältnis der Klinkergehalte CEM I : CEM II/A-M vom Wert für CEM I der [Ecoinvent] abgeleitet
 *** Die Werte der Mahlprozesse wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit [Reinisch] aus der Literatur und Angaben von Herstellern modelliert

3.2 Ausgangsstoffe - Prüfung und Bewertung

Einen prinzipiellen Überblick über die für die Entwicklung der Ökobetone verwendeten granularen Stoffe gibt Abbildung 10. Die rot und gelb eingerahmten Stoffarten wurden für Mischungen im Projekt verwendet.

¹ Neben dem hier gewählten Ansatz, die Betonzusammensetzung durch Zusatzstoffe mit geringer Umweltwirkung zu optimieren, bestünde auch die Möglichkeit, das Bindemittel bzw. den Zement selbst zu verändern (i.e. erhöhter Anteil Zumahlstoffe und verringerter Klinkeranteil oder gänzlich alternative Bindemittel, vgl. [2][3]). Dieser Ansatz wird aus den im Antrag zum Projekt detailliert beschriebenen Gründen in diesem Projekt nicht verfolgt.

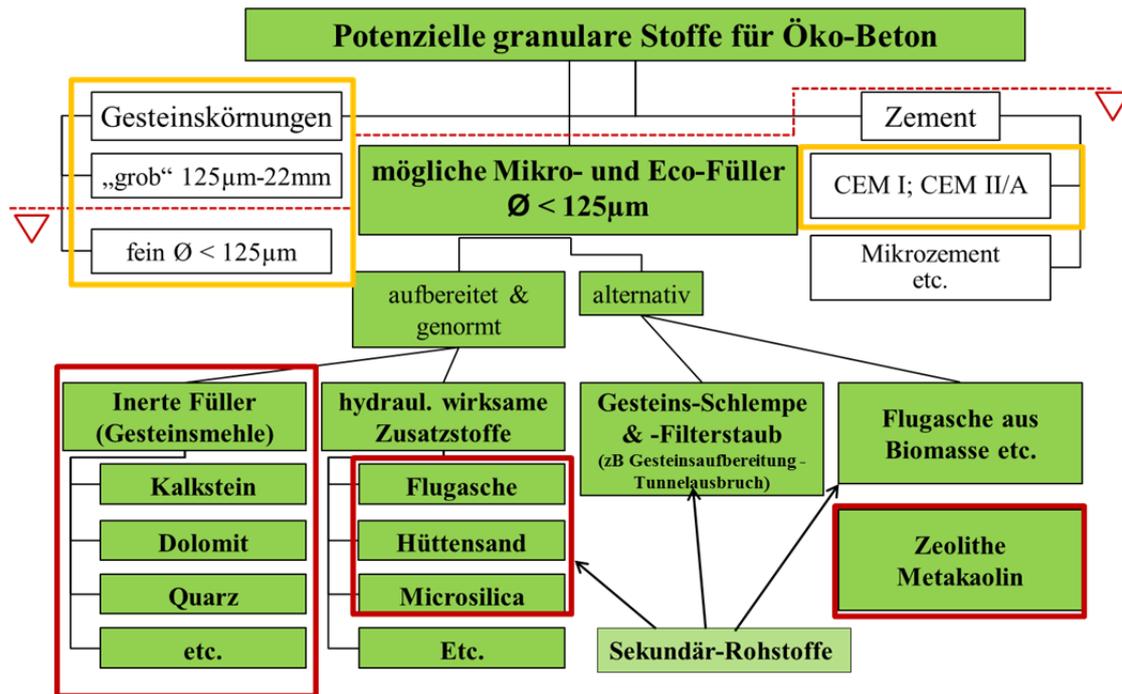


Abbildung 10: für Eco-Betone verwendete Stoffkategorien granularer Stoffe (rot bzw. gelb eingeraht)

Im ersten Schritt wurden in Österreich am Markt verfügbare, übliche Rohstoffe für Beton für den Infrastrukturbereich und auch mögliche alternative Ausgangsstoffe (insbesondere Sekundärrohstoffe) recherchiert. Deren Eigenschaften in Punkto Kosten, Verfügbarkeit, ökologischer Sinnhaftigkeit und technologischer Eignung wurden in einer Datenbank gesammelt und zusammengestellt („screening“).

Anschließend erfolgte eine Bewertung und Vor-Auswahl geeigneter und sinnvoller Ausgangsstoffe. Die in Frage kommenden Stoffe wurden hinsichtlich chemisch - physikalischer Eigenschaften charakterisiert, insbesondere wurden die Korngrößenverteilung der feinen Stoffe mittels Laserdiffraktometrie, die Kornform mittels fotooptischer Verfahren (High-Speed Kamera mit Bildauswertung) und die Kornrauigkeit stichprobenartig mittels Rasterelektronenmikroskopie analysiert. Zudem wurden BLAINE-Werte und BET-Werte bestimmt, die die spezifische Oberfläche [cm^2/g] nach Blaine bzw. EN 196-6) und inneren Oberfläche der Pulver [cm^2/g] nach dem Verfahren BET) kennzeichnen. Potenziell hydraulisch wirksame Zusatzstoffe wurden hinsichtlich ihres Aktivitätsindex nach ÖNORM B 3309 charakterisiert.

Es erfolgte eine Packungsdichtemessung und Messung des Wasseranspruches feiner Stoffe (bis zur Korngröße $125 \mu\text{m}$) zum Erreichen eines bestimmten Fließvermögens an Ausgangsstoffen mit einer neuen, selbst entwickelten Kombination von Methoden („MEM-ST“-Verfahren, siehe Kapitel 3.3.2) als Eingangsparameter für die Packungsdichteoptimierung. Die Entwicklung der Methodik war nicht Inhalt des vorliegenden Projekts, sondern wurde, wie im Förderansuchen beschrieben, im Projekt „Öko²Beton“ (Ressourcen optimierter Beton für Fertigteile) durchgeführt und floss in das Projekt ERESCON ein. Größere Stoffe (Gesteinskörnungen) wurden mittels Standard-Verfahren wie Siebanalysen, Messung der Dichte und Wasseraufnahme, Messung der Schüttdichte und des Hohlraumgehalts, charakterisiert. Es wurden insgesamt für das Projekt ER-

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

ESCON mehr als 50 Einzel-Stoffe charakterisiert und zusätzlich bereits vorliegende Ergebnisse der Charakterisierung von Feinstoffen berücksichtigt.

Durch den iterativen Entwicklungsprozess wurde eine endgültige Auswahl von Stoffen erst am Ende der Betonentwicklung und -prüfung getroffen. Die ausgewählten Feinstoffe, die in bestimmten optimalen Kombinationen eingesetzt wurden, finden sich in Tabelle 3. Darauf, wie diese Kombinationen gefunden wurden, wird in den folgenden Kapiteln zur Packungsdichteoptimierung und Betonentwicklung noch eingegangen und siehe auch [28].

Als feine Gesteinskörnungen 0 bis 1 mm wurden im ersten Schritt Quarzsande der Quarzwerke Melk eingesetzt („Versuche mit idealisierten Gesteinskörnungen“). In allen weiteren Schritten der Betonentwicklung wurden Gesteinskörnungen der Kiesunion aus Bad Fischau und aus Markgrafneusiedl verwendet (Fraktionen 0/1, 1/4, 4/8 und 8/16 in geeigneten Sieblinien nahe Regelsieblinie B laut ÖNORM B 4710-1), siehe Tabelle 4.

Tabelle 3: Verwendete Feinstoffe

Kategorie	Typ	Bezeichnung	Dichte ρ_k	d_{50}	n_w -Wasseranspruch	$V_{w,s}/V_p$ (MEV)	$V_{wf,160}/V_p$	Richtpreise inkl.
			[g/cm ³]	[µm]	[-]	[-]	[-]	[€/Tonne]
Zemente	CEM I 52,5 R	CEM I 52,5 R_67	3,14	7,5	0,480	0,92	1,65	100
	CEM II/A 42,5 R	CEM II/A 42,5 R_65	3,10	12,0	0,444	0,80	1,40	95
	CEM II/A 42,5 N	CEM II/A 42,5 N_102	3,06	11,0	0,457	0,84	1,50	95
	CEM I 42,5 R C ₃ A-frei	CEM I 42,5 R_99	3,24	10,0	0,441	0,79	1,34	100
Mikrofüller	Flugasche	Microsit H10	2,39	4,0	0,349	0,54	0,84	265
	Kalkmehl	Betoflow	2,73	2,2	0,380	0,61	0,65	250
	Mikrosilika	Silizium 75	2,29	2,4	0,392	0,64	1,20	615
	Mikrosilika	Silica Fume Füller Q1	2,20	-	0,426	0,74	0,75	1200
	Metakaolin	PowerPozz	2,68	3,0	0,650	1,88	2,40	-
	Zeolithe	Inzo 15/5	2,20	2,2	0,500	1,00	1,66	-
	Kalkmehl	Triton 20	2,70	2,3	0,430	0,75	1,18	80
	Kalkmehl	H 200 MP	2,70	4,1	0,434	0,77	1,22	55
	Quarzmehl	Microdorsilit 105	2,62	3,5	0,471	0,89	1,03	250
	Dolomitsteinmehl	Dolo 20	2,90	3,3	0,460	0,85	1,16	61
	Dolomitsteinmehl	Dolo 10	2,90	2,6	0,470	0,89	1,47	100
	Kalkmehl	Omyacarb Extra GU	2,72	1,2	0,523	1,10	2,27	615
Öko-Füller	Kalkmehl	H 100	2,70	9,0	0,370	0,59	0,94	40
	Kalkmehl	Steinmehl VSA	2,64	11,8	0,406	0,68	0,96	23
	AHWZ	Supermix C	2,65	12,6	0,424	0,74	1,02	65
	Quarzmehl	QM 16900	2,65	13,8	0,460	0,85	1,14	170
	AHWZ	Hüttensand	2,86	9,2	0,471	0,89	1,10	65

Tabelle 4: Im Projekt verwendete Gesteinskörnungen

Typ	Bezeichnung	Beschreibung	Verwendungs-Betonsorte	Richtpreise inkl. Transport
		[-]		[€/Tonne]
Feinsand	QS 0,1-0,4mm	Quarzsand	B5	43
Feinsand	QS 0,3-1,0 mm	Quarzsand	B5	43
Sand	RK 0/1 GF85 f10 F1 Bad Fischau	karbonatisch/quarzitisch	B5	12
Sand	RK 1/4 Gc85/20 f1,5 F1 Bad Fischau	karbonatisch/quarzitisch	B5	12
Sand	RK 0/4 GF85 f5 F1/II Markgrafneusiedl	vorwiegend quarzitisch (CO ₂ <15 %)	IXAT-B	12
Kies	RK 4/8 Gc85/20 SI40 f1,5 F1 Markgrafneusiedl	quarzitisch	B5, IXAT-B	12
Kies	RK 8/16 Gc85/20 SI40 f1,5 F1 Markgrafneusiedl	quarzitisch	B5, IXAT-B	12

Neben den granularen Ausgangsstoffen wurden eine Reihe von Zusatzmitteln - insbesondere verschiedene Fließmittel auf PCE-Basis - in Bezug auf ihre Wirkung im Eco- Beton untersucht, siehe

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

Tabelle 5. Haupt-Kriterium für die Fließmittelauswahl war, dass trotz sehr hohem Feinanteilgehalt im Wasser-Pulver-Gemisch eine ausreichend lange Konsistenzhaltung gegeben sein soll. Zudem soll eine möglichst geringe Klebrigkeit (bzw. Viskosität) gegeben sein. Tabelle 5 gibt eine Übersicht untersuchter Fließmittel und eingesetzter Luftporenbildner. Die Ergebnisse zu Untersuchungen der beobachteten Wirkungsweise (Interaktion mit den diversen feinen Pulvern) wurden in [57] publiziert. Begleitend zum Forschungsprojekt ERESCON und „Öko²Beton“ wurden eine Diplomarbeit und zwei Projektarbeiten am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie zum Thema der Fließmittelwirkung in Wasser-Feinstoffgemischen durchgeführt, vgl. [32][33][34]. Die Arbeiten befassen sich mit experimentellen Laboruntersuchungen zur Fließfähigkeit von Wasser/Pulver-Gemischen (Zemente und Gesteinsmehle unterschiedlicher Gesteinsarten und Feinheiten) für die Herstellung von Ressourcen optimiertem, nachhaltigem Beton.

Tabelle 5: Untersuchte Zusatzmittel (blau hervorgehoben=bevorzugt eingesetzt)

Typ	Bezeichnung	Anmerkung	Richtpreise inkl. Transport
		[-]	[€/Tonne]
PCE-Fließmittel	ViscoCrete-4030 Ultra	Konsistenzhaltung	1750
PCE-Fließmittel	ViscoCrete-20HE	hochwirksame Verflüssigung	1750
PCE-Fließmittel	Dynamon PC 30 ES	hochwirksame Verflüssigung	1750
PCE-Fließmittel	Dynamon VL...LZF	Konsistenzhaltung	1750
PCE-Fließmittel	Dynamon LZF	Konsistenzhaltung	1750
PCE-Fließmittel	Glenium ACE 430	hochwirksame Verflüssigung	1750
PCE-Fließmittel	Glenium Sky 519	Konsistenzhaltung	1750
PCE-Fließmittel	Glenium ACE 30	hochwirksame Verflüssigung	1750
PCE-Fließmittel	Fluid Premia 196	für feinste Kalkmehle	1750
PCE-Fließmittel	ViscoCrete 20 Gold	hochwirksame Verflüssigung	1750
PMA-Fließmittel	Master Glenium ACE 500	mittlere Verflüssigung	k.A.
Luftporenbildner	Micro Air 9060		650
Luftporenbildner	AER-200S		650

3.3 Packungsdichteoptimierung AP5

Der Schlüssel zum Erfolg der Ressourcen und Energie-Optimierung ist die Steigerung der Packungsdichte und Senkung des Wasserbedarfs des Gemisches aller granularen Bestandteile von Beton. Dadurch kann Zementklinker teilweise durch Stoffe ersetzt und ergänzt werden, die ein geringeres Treibhauspotenzial und geringeren Primärenergiebedarf haben.

Speziell wird die Zusammensetzung des Feinstoffbereichs optimiert, indem geeignete „Mikro-Füller“ eingebracht werden, das sind Stoffe, die noch feiner als Zement sind und eine physikalische Füllerwirkung zwischen den größeren Partikeln entfalten, wie in Abbildung 11 sichtbar wird. Zudem ersetzen „Eco-Füller“ den Portlandzement teilweise. Diese Füller weisen etwa Zementfeinheit auf oder können noch gröber sein und sollten einen geringen Wasserbedarf als Zement haben. Es muss mit einer geeigneten Korngrößenverteilung des gesamten Gemisches an granularen Ausgangstoffen (Zement, Mikro- und Eco-Füller sowie Gesteinskörnungen) gearbeitet werden. Zusätzlich kann mit Fließmitteln gearbeitet werden, um den Wasserbedarf sehr stark zu senken bzw. die Verarbeitbarkeit (Fließvermögen und Konsistenzhaltung) zu steuern.

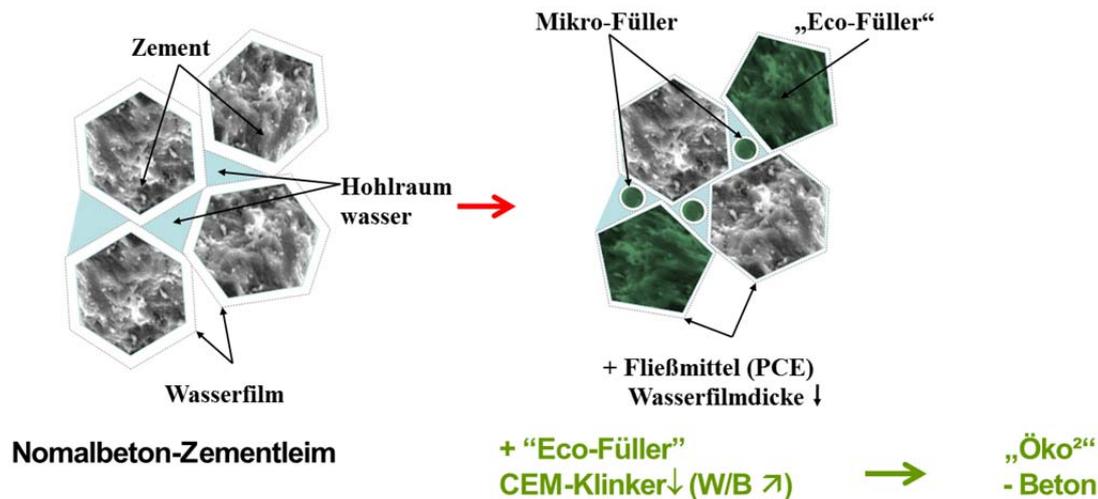


Abbildung 11: Prinzip-Darstellung der Packungsdichte-Optimierung (für UHPC und Öko-Beton) sowie dadurch möglicher Portlandzementsubstitution (Öko-Beton)

Die Vorgangsweise der theoretischen und experimentellen Packungsdichteoptimierung und der Rezepturenentwicklung nach dem „Mikro-Füller/Eco-Füller-Prinzip“ ist in [28][29][30][31] und [62] detailliert beschrieben.

3.3.1 Theoretische Berechnung und Optimierung der Packungsdichte

Das im Projekt Öko²Beton entwickelte software-tool zur Packungsdichte-Optimierung und Berechnung optimaler Feinstoff-Mischungen mit minimalem Wasserbedarf wurde auch im Projekt ERESCON angewandt. Dabei wird das Modell CIPM (compaction interaction modell) nach *Fennis* [51], das von Fennis speziell für den Entwurf von ökologisch optimiertem Beton entwickelt wurde, in einem software tool umgesetzt, siehe [31]¹. Als Eingangsparameter für die theoretische Berechnung der Packungsdichte² bzw. des Hohlraumgehaltes von Korngemischen werden folgende Stoff-Kenngrößen der einzelnen Stoffe benötigt: Rohdichte, Korngrößenverteilung, partielle Packungsdichten der Einzelstoffe und Kompaktierungsindex³. Die Kenntnis der Kornform und chemisch-mineralogischen Zusammensetzung der Stoffe ist von Vorteil, um zusätzliche Effekte

¹ Abweichend von der Planung im Förderansuchen stellte sich heraus, dass ein vorhandenes software tool nach dem Modell von Schwanda [30], das im ersten Schritt zur theoretischen Packungsdichteoptimierung eingesetzt wurde, unrealistische Ergebnisse lieferte, die einer experimentellen Überprüfung nicht standhielten.

² Die Packungsdichte PD entspricht dem Verhältnis von Feststoffvolumen zu Gesamtvolumen eines Korngemisches (ist eine dimensionslose Verhältniszahl) und hängt mit dem Hohlraumgehalt H direkt zusammen: $PD = 1 - H$

³ Der Kompaktierungsindex K wird auch als Kompressionsbeiwert bezeichnet und gibt an, in welcher Form und wie stark das Gemisch verdichtet wird. Z. Bsp. beträgt $K=12,2$ für die Verdichtung von Feinstoffen unter Wasserzugabe und 4,1 für das Verdichten eines trockenen Schüttgutes durch Schütten. K von Beton ist gleich 9.

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

einschätzen zu können. Die Kenngrößen wurden für alle im Projekt angewandten Stoffen ermittelt¹. Insbesondere wurden die Wasseransprüche bzw. Hohlraumgehalte nach einer im Projekt eigens entwickelten experimentellen Methode „MEM-ST“ bestimmt, auf die im nächsten Abschnitt kurz eingegangen wird.

Mit dem software-tool kann ermittelt werden, welche Mengenanteile der Einzelstoffe im Gemisch verwendet werden müssen um eine maximale Packungsdichte (=minimaler Hohlraumgehalt) zu erhalten. Somit werden also theoretisch optimale Zusammensetzungen von Feinstoffgemischen bzw. Korngemischen für Beton mit minimalem Hohlraumgehalt und minimalem Wasseranspruch gefunden, siehe auch [31].

Es sei noch erwähnt, dass die Modelle in erster Linie auf den Feinstoffbereich (Korndurchmesser < 125 µm; pulverförmige Stoffe) angewandt werden. Für die Optimierung der Kornverteilung des gesamten Korngrößenbereichs von Beton wird zusätzlich die bekannte Methode der möglichst guten Annäherung der Korngrößenverteilung an die kontinuierliche Kornverteilungskurve nach Fuller bzw. nach Dinger-Funk² angewandt. In der Regel wurde im Bereich der Gesteinskörnungen die Soll-Sieblinie „B“ nach ÖNORM B 4710 angenähert.

3.3.2 Experimentelle Bestimmung und Optimierung der Packungsdichte

Zusätzlich zur Anwendung theoretischer Modellrechnungen ist es erforderlich, die Packungsdichteoptimierung praktisch durchzuführen. Erstens werden damit wie schon oben erwähnt die sogenannten „partiellen“ Packungsdichten, also Stoffkennwerte der Einzelstoffe, nach einer eigens entwickelten Methodenkombination „MEM-ST“ bestimmt. Zweitens werden die Mengenanteile von Zwei- und Dreistoffgemischen aus Zement und Zusatzstoffen (da sind „Mikro- und Eco-Füller“) solange variiert, bis ein hinsichtlich minimalem Wasseranspruch und ausreichender Festigkeit optimales Mengenverhältnis der Stoffe experimentell gefunden wird, vgl. [62].

Die angewandte Methode ist eine Kombination des „Mischenergieverfahrens“ [36] und des Verfahrens nach Okamura [35] (mixing energy method & spread flow test, bezeichnet als „MEM-ST“). Sie kann zur Charakterisierung eines einzelnen Stoffs und für eine Mischung aus pulverförmigen Stoffen verwendet werden. Im ersten Schritt wird eine bestimmte Menge des trockenen pulverförmigen Stoffes in einen Mischer, der in der Lage ist, Änderungen des Mischenergieein-

¹ Korngrößenverteilung und Kornform der Feinstoffe wurden im Labor RCPE des Institutes für Prozess- und Partikeltechnik ermittelt, chemisch-mineralogische Zusammensetzung am Institut für angewandte Geowissenschaften. Alle anderen Analysen wurden am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie der TU Graz durchgeführt.

² Annäherung an Soll-Sieblinien, die gemäß der Formel von Dinger-Funk [37]

$$D(d) = \frac{d^n - d_{\min}^n}{d_{\max}^n - d_{\min}^n} \cdot 100 \quad \text{gefunden werden.}$$

D..... kumulierter Volumenanteil feiner als *d* [%]

d..... Korndurchmesser

*d*_{min}..... Kleinstkorndurchmesser

*d*_{max}..... Größtkorndurchmesser

n..... Verteilungsmodul, Hochzahl i.d.r. *n*=0,37

Die in einschlägigen Normen festgelegten Regel-Sieblinien der Gesteinskörnungen für Normalbeton (0,063 bis 22 mm) werden nach diesem Prinzip ermittelt.

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

trages zu erfassen, gegeben. Zusätzlich wird die Menge an zugegebenem Wasser kontinuierlich mit Hilfe eines Durchflussmessers gemessen. Im nächsten Schritt wird der Sättigungspunkt bei Mischen mit konstanter Geschwindigkeit und kontinuierlicher Zugabe des Wassers, an jener Stelle, an der das Maximum des Mischenergieeintrages auftritt, bestimmt. An dieser Stelle, unmittelbar vor der Sättigung, verursachen die Kapillarkräfte zwischen den Partikeln den maximalen Scherwiderstand und damit die maximale Leistungsaufnahme des Mixers (siehe Abbildung 12). Der so ermittelte Wasserbedarf am Sättigungspunkt ($V_{w,s}/V_p$) führt zum minimalen Hohlraumgehalt bzw. der maximalen Packungsdichte. In der folgenden Phase wird zusätzliches Wasser stufenweise zugegeben. Bei jedem Schritt der Wasserzugabe wird das Setzfließmaß nach Okamura - wie bereits oben beschrieben - bestimmt. Der Wassergehalt im Gemisch kann zugehörig zu jedem Setzfließmaß angegeben werden. Er ist ein Maß für das Fließvermögen des Stoffes.



Abbildung 12 Versuchsaufbau „MEM-ST“ und Versuchsablauf: Stoff in pulverförmigem (1), gesättigtem (2) und fließfähigem Zustand (3,4). Links unten: Diagramm des Mischenergieeintrages und der Wasserzugabe während der Mischzeit

Abbildung 12 zeigt unterschiedliche Wasser/Pulver Verhältnisse ($V_{w,f,i}/V_p$) als Funktion ihrer mittleren Setzfließmaße für drei verschiedene im Rahmen der Arbeiten eingesetzten pulverförmigen Stoffe. Geeignete Pulver mit hoher Packungsdichte und mit einem niedrigen Wasserbedarf für eine bestimmte Fließfähigkeit (z.B.: Setzfließmaß $f_i=160$ mm) können mit Hilfe dieser Methode ausgewählt werden.

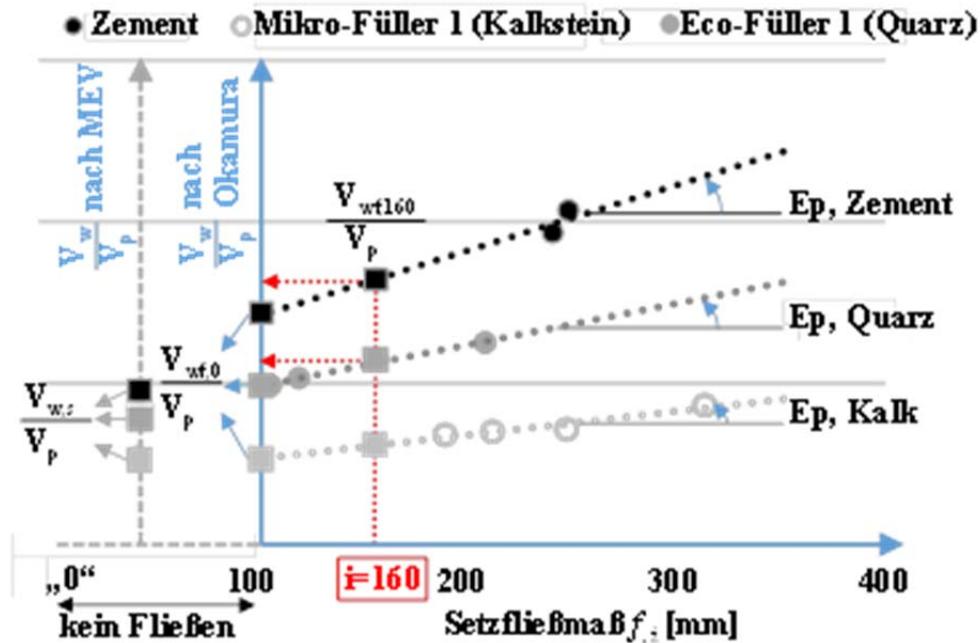


Abbildung 13: Drei Beispiele für ermittelte Stoffeigenschaften nach der Methode „MEM-ST“

Die Methode „MEM-ST“ dient zunächst dazu, für die Stoffauswahl und die Anwendung der Berechnungsmodelle entscheidende Kenngrößen der Einzelstoffe – Ihren Hohlraumgehalt und ihren Wasserbedarf für ein bestimmtes Fließvermögen - zu finden. In weiterer Folge wird die Methode angewandt, um das optimale Mischungsverhältnis von Zement, „Eco-Füllern“ und Mikrofüllern in Feinstoffleimen für Ressourcen optimierten Beton zu finden. Dabei geht es darum in Versuchsreihen zu ermitteln, welche Gemische eine maximale Packungsdichte, das angestrebte Fließvermögen (für ausreichende Verarbeitbarkeit) und ausreichende Festigkeit in erhärtetem Zustand bei möglichst hohem Grad an Portlandzementsubstitution erreichen. Die Vorgangsweise ist in [28] [62] und [64] als „Mikro-Füller – Eco-Füller-Konzept“ ausführlich erklärt. Diese Schriften sind auf Wunsch beim Verfasser erhältlich.

3.4 Grundlagen der Rezepturentwicklung der Betone

In der Rezepturentwicklung wird von der Zusammensetzung der Referenzbetone, also der typischen Standard-Betone nach den Angaben der Auftraggeber (siehe Kapitel 3.1.1), mit bekannten Eigenschaften ausgegangen und diese Zusammensetzung schrittweise ökologisch optimiert. Die Entwicklung erfolgte in zwei Phasen.

3.4.1 Entwicklung geeigneter Feinstoffleime

In der ersten Phase wurden geeignete Feinst-Stoffgemische nach dem oben beschriebenen Konzept der Packungsdichteoptimierung entwickelt, die die Mehlkorn-Bestandteile (Zement, Eco- und Mikrofüller), Wasser und gegebenenfalls entsprechende Fließmittel enthalten. Aus der großen Zahl möglicher, vielversprechender Ausgangsstoffe bzw. möglicher Kombinationen von Zement, Füller und Mikrofüllern - vgl. Tabelle 3 - wurden für die B5 Betone letztlich 13 Kombinationen ausgewählt, da entweder ihre technische Leistungsfähigkeit optimal war (z. B. Kombination I)

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

oder die Zusammensetzungen sehr wirtschaftlich waren (z.B. Kombi II, XI, XL). Alle diese Kombinationen enthalten entweder CEM II/A-S 42,5 R oder CEM I 52,5 R. Im Falle von Innenschalenbetonen - die als gegen chemischen Angriff besonders beständige Betone entwickelt wurden - wurden insgesamt 13 Öko-Kombinationen untersucht, die CEM I 42,5 R WT 33 C₃A-frei und CEM I 52,5 R enthalten. Als Eco- und Micro-Füller wurden bei der Entwicklung der Innenschalenbetone inerte (Kalkmehle, Quarzmehl) und auch hydraulisch wirksame (Hüttensand, Metakaolin, Mikrosilika und Zeolith¹) Stoffe verwendet. Die Kosten für die Öko-Betone, die „teure“ Mikrofüller (Mikrosilika, Zeolith, Quarzmehl und Kalksteinmehl) enthalten, konnten durch die Leimoptimierung und die Verwendung von Kalksteinmehl und Hüttensand bei etwa gleichen Fließmittelverbrauch im Vergleich zum Referenz-Beton gleich hoch gehalten bzw. gesenkt werden. Zusätzlich sind bei allen Öko-Betonen die Frisch- und Festbetoneigenschaften gleichwertig bzw. „besser“ als bei den Referenzbetonen.

¹ Alle Mikrofüller wiesen einen hohen Aktivitätsindex, geprüft gemäß ÖNORM B 3309 nach 28 Tagen, von >1,0 im Vergleich zum Referenz-Mörtel mit Einheitszement auf. Die Mikrofüller Metakaolin, Zeolith und Mikrosilika wurden mit einem Aktivitätsindex bzw. k-Wert von 1,0 berücksichtigt). Für AHWZ nach Norm (=Supermix C und Hüttensand) hingegen wurde mit einem k-Wert von 0,8 in der Rezeptur gerechnet.

Tabelle 6: Überblick Feinstoffleime mit optimierter Packungsdichte

Var. Nr.	Zementart	Eco-Füller (AHWZ)	Eco-Füller	Microfüller	Microfüller (AHWZ)
I	CEM I 52,5 R	-	QM 16900	Betoflow D	-
II	CEM I 52,5 R	-	H100	Dolo 20	-
III	CEM I 52,5 R	-	QM 16900	-	Microsit H10
IV	CEM I 52,5 R	-	H100	-	-
V	CEM III/A 42,5 R	-	QM 16900	Betoflow D	-
VI	CEM III/A 42,5 R	-	QM 16900	-	Microsit H10
VII	CEM III/A 42,5 R	-	H100	Dolo 20	-
VIII	CEM I 52,5 R	-	H100	Betoflow D	-
IX	CEM I 52,5 R	-	QM 16900	Microdorsilit 105	-
X	CEM III/A 42,5 R	-	H100	Betoflow D	-
XI	CEM III/A 42,5 R	-	H100	-	-
XII	CEM I 42,5 R C3A-frei	Hüttensand	-	H200MP	-
XIII	CEM I 42,5 R C3A-frei	Hüttensand	-	Betoflow D	-
XIV	CEM I 42,5 R C3A-frei	Hüttensand	-	Microdorsilit 105	-
XV	CEM I 52,5 R	Hüttensand	-	Microdorsilit 105	-
XVI	CEM I 42,5 R C3A-frei	Hüttensand	H100	H200MP	-
XVIII	CEM I 52,5 R	Hüttensand	H100	-	RW Füller Q1
XXI	CEM I 42,5 R C3A-frei	Hüttensand	H100	Microdorsilit 105	-
XXII	CEM I 52,5 R	Hüttensand	H100	Microdorsilit 105	-
XXIII	CEM I 42,5 R C3A-frei	Hüttensand	H100	Omyacarb-Extra-GU	-
XXIV	CEM I 52,5 R	Hüttensand	H100	Omyacarb-Extra-GU	-
XXV	CEM I 52,5 R	Hüttensand	-	Omyacarb-Extra-GU	-
XXVI	CEM I 52,5 R	Hüttensand	H100	-	Inzeo 15/5
XXVII	CEM I 52,5 R	Hüttensand	H100	-	Metakaolin Power Pozz
XXXIX	CEM I 52,5 R	-	H100	Dolo 10	-
XL	CEM I 52,5 R	Hüttensand	H100	Dolo 10	-

B5-Betone

Innenschalenbetone

3.4.2 Entwicklung ökologisch optimierter Betone

Mit den genannten Feinstoff-Kombinationen, Gesteinskörnungen sowie ausgewählten Fließmitteln und mit Luftporenbildnern, wo erforderlich, (siehe Tabelle 3 bis Tabelle 6) wurden „Ökobetone“ für die definierten Anforderungen (siehe Referenzbetone Kapitel 3.1.1) hergestellt. Es ergab sich wiederum eine Vielzahl von Variationsmöglichkeiten. Alle Öko-Mischungen wurden unter der Voraussetzung der Beibehaltung der Konsistenz (Verarbeitbarkeit) des zugehörigen Referenzbetons konzipiert, in der Regel F52. Die Referenzbetone entsprechen den in ÖNORM B 4710-1

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

[26] bzw. der ÖBV-Richtlinie Innenschalenbeton [58] und ÖBV-Richtlinie für Weiße Wannen [59] definierten Betonsorten. Im Kapitel 3.5.1 sind alle entwickelten Öko-Betone und die zugehörigen Referenzbetone tabellarisch gelistet.

Generelle Vorgangsweise am Beispiel optimierter Feinkornbetone GK 4mm

Das Prinzip der Betonentwicklung wurde zunächst an Betonen mit GK 4 mm („ER-Mörtel“) erarbeitet. Diese Feinkornbetone bzw. Mörtel wurde gemäß dem Konzept des „Beton äquivalenten Mörtels“ so entworfen, dass Ihre Fließeigenschaften und W/Z-Wert jenem eines Beton C 30/37 B5 mit GK 16mm mit Konsistenz F52¹ entsprechen. Die Konsistenz wurde durch das Ausbreitmaß gemäß Mörtelprüfung nach EN 1015-3 (Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel) bestimmt und konnte mit 1 Ausnahme wie geplant nahezu konstant gehalten werden. Die Druckfestigkeit wurde an den Hälften von Prismen 40/40/160 mm nach ÖN EN 196-1 geprüft, die Lagerung der Proben erfolgte gemäß den Vorgaben für Beton (7 Tage unter Wasser, bei Raumbedingungen bis 28d). Als Indikatoren für die Dauerhaftigkeit wurde die offene Porosität (hauptsächlich Kapillarporenanteil) gemessen. Die offene Porosität spiegelt die Aufnahmefähigkeit des erhärteten Mörtels für Wasser und darin gelöste Stoffe wider. Je geringer die offene Porosität, desto höher die Dichtigkeit des Gefüges und damit die zu erwartende Beständigkeit gegen aggressive Umwelteinwirkungen.

Tabelle 7 gibt die Zusammensetzung und die Eigenschaften der Betone mit GK 4 mm wieder.

Tabelle 7: Zusammensetzung und Eigenschaften ökologisch optimierte Feinkornbetone GK 4mm

		Ref C30/37 B5 GK 4	ER-MI-A	ER-MII-A	ER-MIII-A	ER-MIII-B	ER-MIII-C	ER-MIV-B
Zement (CEM II/A 42,5)	kg/m ³	484	296	328	293	347	347	309
Zement (CEM II/A 42,5)	M% Mehlkorn	100%	40%	50%	45%	55%	55%	47,5%
Eco-Füller ≥ 5µm	M% Mehlkorn	0%	45%	45%	45%	35%	35%	47,5%
Mikro-Füller < 5µm	M% Mehlkorn	0%	15%	5%	10%	10%	10%	5%
Gesteinsmehl-Art Eco-Füller/ Mikro-Füller MF			Kalkstein/ Kalkstein	Quarz/ Flugasche	Quarz/ Kalkstein	Quarz/ Kalkstein	Quarz/ Kalkstein	Kalkstein/ Dolomit
Fließmittel			PCE 1	PCE 1	PCE 2	PCE 1	PCE 2	PCE 1
W/Z-Wert	-	0,48	0,54	0,57*	0,60	0,55	0,54	0,55
Wasser/Pulver-Wert (vol.)	-	1,28	0,63	0,80	0,74	0,83	0,83	0,72
Ausbreitmaß	mm	180	175	175	260	190	170	180
Druckfestigkeit 28 d	N/mm ²	68,3	75,4	75,4	77,3	79,3	78,9	80,9
Offene Porosität	%	18,5	15,2	17,3	-	15,7	-	13,9
GWP	kg CO ₂ /m ³	416,3	267	295	265	309	310	278
PEI	MJ/m ³	2568,0	2028	2240	2066	2277	2283	2088
			* Flugasche ohne Anrechnung					

In der folgenden Abbildung 14 wird gezeigt, wie sich die Rezepturkennwerte Zementanteil, W/Z-Wert (in unserem Fall ist das gleichbedeutend dem W/B-Wert, da nur Wasser/Portlandzement vorhanden ist und keine anderen hydraulisch wirksamen Stoffe im Bindemittel) und W/P_v-Wert (volumetrisch angegebener Wasser/Pulver-Wert) im Zuge der Eco-Optimierung an Betonvarianten entwickeln. Es ist zu erkennen, dass der Zementanteil (Z, hier: CEM II/A) im Zuge der ökologischen Optimierung stark sinkt, der W/Z-Wert hingegen etwas ansteigt oder gleich bleibt, der

¹ Der Referenzbeton RB5, GK 16 weist ein Ausbreitmaß von 55 cm (F52) auf, das dem Ausbreitmaß eines äquivalenten Mörtels BAMRB5 GK 4 von 185mm entspricht

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

Wasser/Pulver-Wert (Pulver=Mehlkorn= alle granularen Bestandteile < 125µm im Beton) aber jedenfalls stark sinkt, die Packungsdichte im Zuge der Optimierung also erhöht wird.

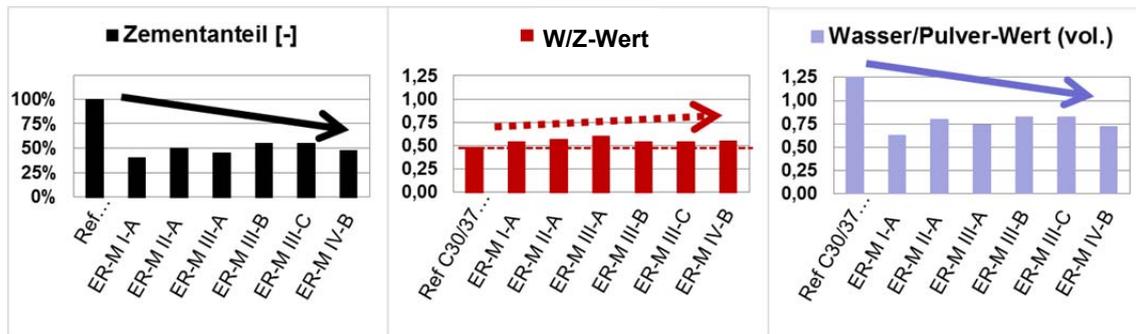


Abbildung 14: Veränderung der Rezepturkennwerte bei der Eco-Optimierung

Die meisten Betone wurden so entworfen, dass die gewünschte Konsistenz mit etwa der gleichen Menge an Fließmittel wie beim Referenzbeton erreicht werden konnte. Die erforderliche Menge an Wasser in der Mischung entspricht dem Wert des Wasserbedarfs für ein bestimmtes Fließvermögen (=Fließvermögen des Zementleims des Referenzbetons), der aus den oben beschriebenen Versuchen zur Feinstkornzusammensetzung „MEM-ST“ direkt gewonnen wurde. Bei einigen Betonen wurden auch größere Mengen an Fließmittel eingesetzt, um den Wasser/Pulver¹-Wert gegenüber dem Referenzbeton stark zu senken und trotzdem seine Konsistenz zu erreichen (siehe Tabellen mit der Zusammensetzung der entwickelten Betone in Kapitel 3.5.1). Die Ergebnisse der Bewertung der Ökobetone bzw. ihrer „Performance“ im Vergleich zum Referenzbeton am Beispiel der „ER-Mörtel“ sind nicht nur in der Tabelle 7, sondern auch in der folgenden Abbildung bezogen auf den Referenzbeton (Kennwerte Referenzbeton = 100%) dargestellt. Es wird sichtbar, dass die Öko-Betone in Punkto Verarbeitbarkeit, Festigkeit und offener Porosität dem Standardbeton zumindest gleichwertig sind, während sie ein deutlich verringertes Treibhauspotenzial (GWP) und einen niedrigeren Primärenergiebedarf (PEI) haben.

¹ Als „Pulver“ bzw. „powder“ wird hier das Mehlkorn im Beton, also alle Bestandteile <125µm Korn-durchmesser, verstanden

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

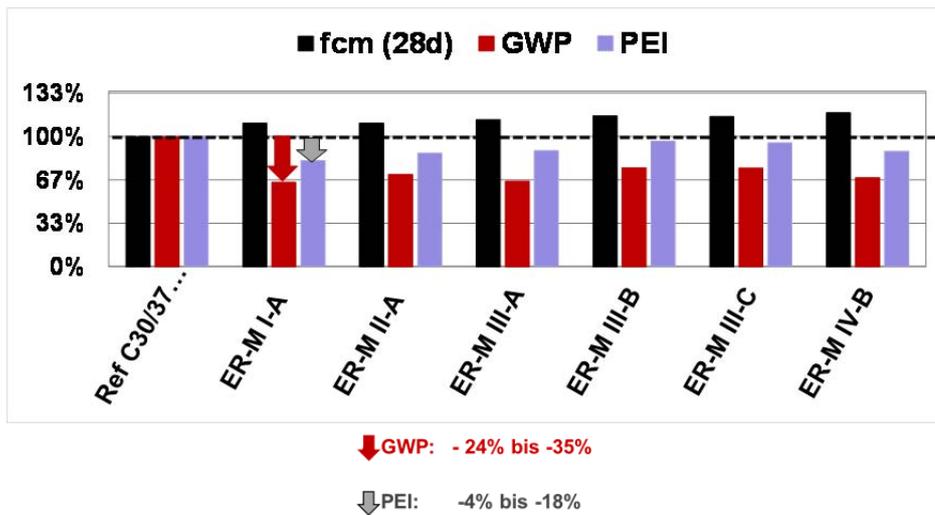


Abbildung 15: Veränderung der Rezepturkennwerte bei der Eco-Optimierung

Um die Verarbeitbarkeit zu steuern, wurde in der weiteren Betonentwicklung auch das Leimvolumen der Mischungen variiert. Dabei fällt auf, dass Mischungen mit geringem Leimvolumen und ausreichender Verarbeitbarkeit wirtschaftlicher und auch ökologischer (!) als Mischungen mit größerem Leimvolumen sind. Es kommt also darauf an, einen an sich sehr gut fließfähigen Leim aus Wasser, Feinstoffen und geeignetem Fließmittel als Basis der jeweiligen Rezeptur zu verwenden.

3.5 Betonentwicklung, Betonprüfung und Bewertung

Um nachzuweisen, dass die Ökobetone den Referenzbetonen (nach Norm) in technologischer Sicht gleichwertig leistungsfähig sind, wurden im ersten Schritt die **Verarbeitbarkeit, Festigkeitsentwicklung¹ und offene Porosität²** (als 1.Dauerhaftigkeitsindikator) vergleichend geprüft. Zudem wurde die **ökologische und ökonomische „performance“** beurteilt. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen des folgenden Abschnitts dargestellt. Die ökologische Bewertung wurde für jede Rezeptur durchgeführt, indem die Summe der Umweltwirkungen GWP und PEI für die einzelnen Ausgangsstoffe (siehe Kapitel 3.1.2, Tabelle 2) pro m³ Beton gebildet wurde.

Kostenschätzung

Für jedes Rezept wurden Kosten abgeschätzt, indem die von den unterschiedlichen Herstellern von Zementen, Zusatzstoffen bzw. Gesteinsmehlen und Zusatzmitteln angegebenen Richtpreise inklusive eines Anteils für Transportkosten³ zu einem fiktiven zentralen Standort in Österreich

¹ Es wurden Frischbetonprüfungen gemäß ONR 23303 und Druckfestigkeitsprüfungen zu mehreren Zeitpunkten und jedenfalls nach 28d gemäß ONR 23303 an Würfeln 150 mm durchgeführt

² Die offene Porosität der Betone wurde gemäß ÖN EN 1936:2007 „Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität“ bestimmt.

³ In der Regel wurden für pulverförmige Stoffe (Zemente, Gesteinsmehle, AHWZ) Transportkosten von €15/t im Silo-LKW für eine durchschnittliche Transportentfernung in Österreich angenommen. Für spezielle Feinstoffe, die nicht flächendeckend verfügbar sind oder aus dem benachbarten Ausland kommen

eingesetzt wurden. Es zeigten sich große Unterschiede der angegebenen Preise von vergleichbaren Gesteinsmehlen von verschiedenen Herstellern. Die angesetzten Richtpreise sind in Tabelle 3, Tabelle 4 und Tabelle 5 zu finden. Von vielen Herstellern wurde angegeben, dass die Preise nicht feststehen, sondern letztlich von der nachgefragten Menge abhängen werden. Es handelt sich also um eine grobe Preisabschätzung.

3.5.1 Performance der Betone nach Zusammensetzung

Mit der in der Tabelle 6 genannten Feinstoff-Kombinationen, Gesteinskörnungen sowie ausgewählten Fließmitteln und mit Luftporenbildnern, wurden „Ökobetone“ hergestellt. Alle Öko-Mischungen wurden unter der Voraussetzung der Beibehaltung der Konsistenz (Verarbeitbarkeit) und des Luftgehaltes, des zugehörigen Referenzbetons konzipiert, in der Regel F52 und Frischbetonluftgehalt 3 bis 5% (GK 16 mind. 3% XF3 und XF4). Alle Betone wurden mit einem Größtkorn GK 16 mm hergestellt.

Ein Teil der Tunnelinnenschalenbetone „IXAT“ wurden so entworfen, dass die gewünschte Konsistenz mit der gleichen Menge an Fließmittel wie beim Referenzbeton erreicht werden konnte, d.h. etwa 0,5% bezogen auf die Zementmasse des Referenzbetons. Im Gegensatz dazu wurden für die Tragwerksbetone „B5“ und für die Tunnelinnenschalenbetone mit einem sehr hohen Zement-Ergänzungs-Grad größere Mengen an Fließmittel eingesetzt, um den Wasser/Pulver-Wert gegenüber dem Referenzbeton stark zu senken und trotzdem seine Konsistenz zu erreichen.

Es wurden bei B5-Betonen zwischen 35% und rd. 50% des CEM II/A-S durch umweltfreundliche inerte Eco- und Mikro-Füller bzw. auch, bei einigen Betonen, teilweise durch hydraulisch wirksame Zusatzstoffe (Flugasche, Hüttensand AHWZ) ergänzt. Einige B5-Öko-Betone, wie in der Tabelle 6 zu sehen, wurden im Gegensatz zum Referenz-Beton nicht mit CEM II/A, sondern mit CEM I 52,5 R und inerten Eco- und Mikro-Füllern bzw. AHWZ (Hüttensand) oder Flugasche hergestellt. Der Grad des Anteils an Füllern im Feinstoffgemisch aus Zement, AHWZ und inerten Eco- bzw. Mikrofüllern liegt bei den Innenschalenbetonen zwischen 18% (= Referenzbeton laut Richtlinie, der bereits 18% AHWZ im Bindemittelgemisch entsprechend der von der ASFINAG zur Verfügung gestellten Referenzrezeptur enthält) und 60% (= Ökobetone). Der Zement CEM I 42,5 R C₃A-frei wird dabei wiederum durch inerte und hydraulisch wirksame Eco- und Mikro-Füller teilweise ersetzt bzw. ergänzt. Ein Teil der Öko-Betone wurden im Vergleich zum Referenz-Beton nicht mit CEM I 42,5 R C₃A-frei, wie die Richtlinien für Innenschalen und für Weiße Wannen vorgibt, sondern mit CEM I 52,5 R und inerten und hydraulisch wirksamen Eco- und Mikro-Füllern in optimalem Mengenverhältnis hergestellt.

Die angegebene Frisch- und Festbetoneigenschaften wurden gemäß ONR 23303 [38] im Sinne einer Erstprüfung für Beton bestimmt. Ihre Konsistenz beträgt jeweils mindestens F52 nach einer Zeit von in der Regel 15 min nach Wasserzugabe (~„Mischende“; es wurde in Etappen mit Mischpausen gemischt). Es wurde zusätzlich zum Ausbreitmaß nach Mischende A15 auch das Ausbreitmaß nach 45 min (A45) und in den ersten Versuchen der Serie nach 90 min nach der Wasserzugabe (A90) geprüft. Nach Auswahl eines geeigneten Fließmittels wurde festgestellt, dass die Konsistenz sowohl des Referenz-Betons als auch der Öko-Betone zwischen 45 und 90 min nur unwesentlich zurück geht (in einzelnen Fällen sogar steigt). Um Zeit bei der umfangreichen Betonentwicklung zu sparen wurde entschieden, nur mehr den Verhältniswert A45min/

wurden entsprechend höhere Transportkosten angenommen.

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

A15min als Kennwert der „Konsistenzhaltung“ zu prüfen. Die Druckfestigkeit wurde an Würfeln (150 mm, Durchschnitt von n=3 oder mindestens 2 Würfeln) nach ONR 23303 geprüft, die Lagerung der Proben erfolgte gemäß den Vorgaben für Beton (7 Tage unter Wasser, bei Raumbedingungen bis 28d bzw. Tag der Prüfung). Als Indikatoren für die Dauerhaftigkeit wurden die offene Porosität (Prüfung nach EN 1936 an aus Würfeln mit 100 mm herausgesägten Würfeln mit etwa 45 mm Kantenlänge, Lagerung bis zur Prüfung unter Wasser) im Alter ca. 28 Tagen gemessen. Die offene Porosität spiegelt die Gefügedichte des erhärteten Betons wieder. Auf die Prüfungen von Dauerhaftigkeitseigenschaften bzw. der Beständigkeit gegen die für die jeweiligen Betonsorten geforderten Expositionen wird in Kapitel 3.5.2 eingegangen. Alle hergestellten Probekörper wurden gemäß den Regeln der ONR 23303 hergestellt bzw. gelagert (wenn nicht ausdrücklich anders angegeben). Die Ergebnisse der Prüfung der Betoneigenschaften, sowie der Bewertung der Umweltwirkungen und die Kostenschätzung werden einerseits tabellarisch angegeben und andererseits werden die Leistungsindikatoren Festigkeit, offene Porosität sowie GWP und PEI für alle Mischungen, jeweils normiert auf den Wert des Referenzbetons, grafisch angegeben.

C 30/37 B5 GK16 F52 „Tragwerksbeton“

Im Folgenden wird auf die Ergebnisse der Entwicklung von Öko-Betonen für Tragwerke (Brücken etc.) eingegangen. Die Rezepturkennwerte möglicher Zusammensetzungen sind in Tabelle 8 und Tabelle 10 angegeben. In der ersten Serie wurde mit einer als „idealisiert-aufbereitet“ bezeichneten Zusammensetzung der Gesteinskörnungen gearbeitet. Die Bezeichnung wurde gewählt, da in dieser Serie nur Fraktionen von quarzitischem Sand mit einem sehr geringen, vernachlässigbaren Feinanteilgehalt $< 125\mu\text{m}$ verwendet wurden und so die Gesteinskörnungen von 0,1 mm bis 4 mm (3 Sandfraktionen) die entwickelten, Packungsdichte-optimierten Feinstoffgemische $< 125\mu\text{m}$ in Ihrer Kornverteilung kaum beeinflussten. Die 2. Serie hingegen wurde mit für die Betonproduktion üblicherweise verwendeten quarzitischem Sand 0/4 mm bzw. karbonatisch-quarzitischem Sand 0/1 plus 1/4 mm hergestellt, so genannten „natürlichen“ Gesteinskörnungen. Der Feinanteilgehalt ($< 125\mu\text{m}$) dieser Mischungen beeinflusst die Packungsdichte und den Wasseranspruch des Gemisches aus Zement, Eco- und Mikrofüllern merklich. Es wurde festgestellt, dass das dazu führt, dass ein mehrfach größerer Bedarf an Fließmitteln vorliegt, um dieselbe Konsistenz wie beim vergleichbaren Beton mit „idealisiert—aufbereiteten“ Gesteinskörnungen zu erreichen. Die Festigkeit verringert sich in der Regel leicht, was aber durch einen etwas geringeren W/B-Wert bei größerem Fließmitteleinsatz kompensiert werden kann.

Die Ergebnisse der Prüfung der Betone mit GK 16 mm (idealisierte Gesteinskörnungen) sind in Tabelle 9 sowie Abbildung 16 und Abbildung 17 zu sehen. In Abbildung 16 und Abbildung 17 sind die Leistungsindikatoren Festigkeit, offene Porosität sowie GWP und PEI für alle Mischungen, jeweils normiert auf den Wert des Referenzbetons angegeben. Das Ziel der Verringerung der Umweltwirkungen (vermindertes GWP und PEI) bei gleichbleibender Festigkeit und offener Porosität auf dem Niveau des Referenz-Betons oder geringer wurde zumindest erreicht der sogar überschritten. Es ist bemerkenswert, dass eine ökologische Optimierung durch die Einführung von Öko-Füll- und Mikro-Füllstoffe bereits mit geringen Mengen von Fließmittel erreicht werden konnte.

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

Tabelle 8: Rezepturkennwerte der Varianten eines C 30/37 B5 GK 16 mit ideal. Gesteinskörnungen

Bezeichnung Auswertung	Rezept	CEM II/A-S 42,5 R	CEM	Eco-Füller	Mikro-Füller	Makro-Füller	Fließmittel	FM-Gehalt	W/B	W/Pm	Leimvolumen
		kg/m ³	%	%	%	kg/m ³		kg/m ³	[-]	[-]	l/m ³
"idealisiert-aufbereitete GeK"											
RB5-002	RB5-002	420**)	90	10*)	0	0	Sky 519	2,2	0,48	0,41	362
RB5-002	RB5-003	420**)	90	10*)	0	0	VC 4030	0,5	0,48	0,41	362
OB5-V-003	OB5A-002-M3	290	55	35	10	0	VC 4030	4,7	0,55	0,29	348
OB5-V-003	OB5A-002-M4	290	55	35	10	0	VC 4030	3,8	0,55	0,29	348
OB5-VI-001	OB5B-001-M1	275	52	43	5	0	VC 4030	6,1	0,52	0,28	346
OB5-VI-001	OB5B-001-M2	275	52	43	5	0	VC 4030	6,1	0,52	0,28	346
OB5-V-002	OB5A-005-M1	356	65	25	10	0	VC 4030	3,7	0,48	0,30	365
OB5-V-002	OB5A-005-M2	356	65	25	10	0	VC 4030	4,0	0,48	0,30	365
OB5-V-002	OB5A-005-M3	356	65	25	10	0	VC 4030	3,8	0,48	0,30	365
RB5-003	RB5-004	390	65	11*)	0	-	Sika VC 4030	2,3	0,48	0,4	340
OB5-V-001	OB5-V-001	323	65	25	10	-	Sika VC 4030	2,9	0,52	0,3	344

**)) mit CEM II/A 42,5 N

*) Mehlkornanteil "idealisierter Gesteinskörnungen"

Tabelle 9: Eigenschaften der Varianten eines C 30/37 B5 GK 16 mit ideal. Gesteinskörnungen

Bezeichnung Auswertung	Rezept	LP-Gehalt, 45min	Konsistenzhaltung	fcm,24h	fcm,7d	fcm,28d	Offene Porosität	GWP	PEI	Kosten relativ
		%	[-]	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	[%]	[kgCO ₂ /m ³]	[MJ/m ³]	[-]
"idealisiert-aufbereitete GeK"										
RB5-002	RB5-002	6,5	1,0	9,5	41,0	54,3	19,2	334,9	2063,3	1,00
RB5-002	RB5-003	3,6	1,0	-	-	59,7	15,3	335,6	2062,7	1,00
OB5-V-003	OB5A-002-M3	4,0	1,2	24,4	47,4	73,0	-	245,6	1918,2	1,43
OB5-V-003	OB5A-002-M4	3,6	0,9	-	-	73,0	12,1	245,6	1918,2	1,43
OB5-VI-001	OB5B-001-M1	2,8	1,3	25,5	54,2	73,9	12,1	232,5	1828,1	1,38
OB5-VI-001	OB5B-001-M2	2,5	1,3	-	-	78,3	-	232,5	1828,1	1,38
OB5-V-002	OB5A-005-M1	2,4	1,0	-	-	74,5	-	293,3	2052,5	1,36
OB5-V-002	OB5A-005-M2	2,9	1,1	28,5	57,4	75,1	11,7	293,3	2055,0	1,38
OB5-V-002	OB5A-005-M3	5,1	1,0	-	-	68,8	14,4	293,3	2052,9	1,39
RB5-003	RB5-004	8,5	1,0	16,5	-	45,8	-	313,4	1997,6	1,04
OB5-V-001	OB5-V-001	5,7	1,1	22,5	-	62,7	-	265,8	1879,0	1,27

Die Sieblinie der Gesteinskörnungen entspricht generell einer Sieblinie nahe B mit Größtkorn 16 mm gemäß ÖNORM B 4710-1 und das Leimvolumen von Öko- und Referenz-Betone variiert zwischen 340 und 360 l pro m³. Im Falle von Referenz-Betonen wurde 10% vom Quarzmehl von der gesamten Pulvermasse als Mehlkorn-, „ersatz“-anteil der idealisierten Gesteinskörnungen zugegeben. Im Falle von Beton OB5-V-001 war die Menge an Fließmittel etwa gleich derjenigen des Referenz-Betons bei gleicher Konsistenz. Bei anderen Öko-Betonen mit reduziertem Wassergehalt hatte die Menge der PCEs erhöht werden müssen. Im Rahmen der Rezepturentwicklung von Öko-Betonen mit idealisierten Gesteinskörnungen OB5-V-003 und OB5-VI-001 wurde am Anfang versucht, mit einem sehr hohen Substitutionsgrad von Zement (etwa 45%) zu arbeiten. Die Ziele für die Frisch- und Festbetoneigenschaften wurden auch bei solchen „extremen“ Mischungen erreicht, mit der Anmerkung, dass die Zähigkeit der Mischung 45 Minuten nach der Wasserzugabe höher als jene des Referenz-Betons war (die Konsistenzhaltung hingegen war sogar teilweise „besser“, also > 1.0). In einer weiteren Folge wurde der hohe Substitutionsgrad von Zement von etwa 45% auf 35% gesenkt.

C 30/37+ B5 ideale GeK

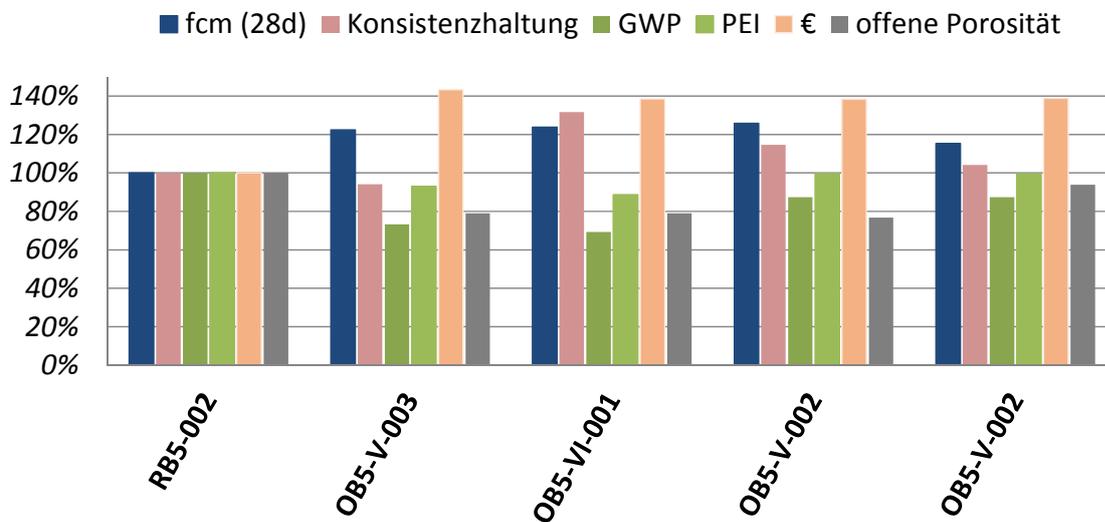


Abbildung 16: Vergleich der Ergebnisse von Varianten eines C 30/37 B5 GK 16 mit ideal. GeK.

C 30/37+ B5 ideale GeK

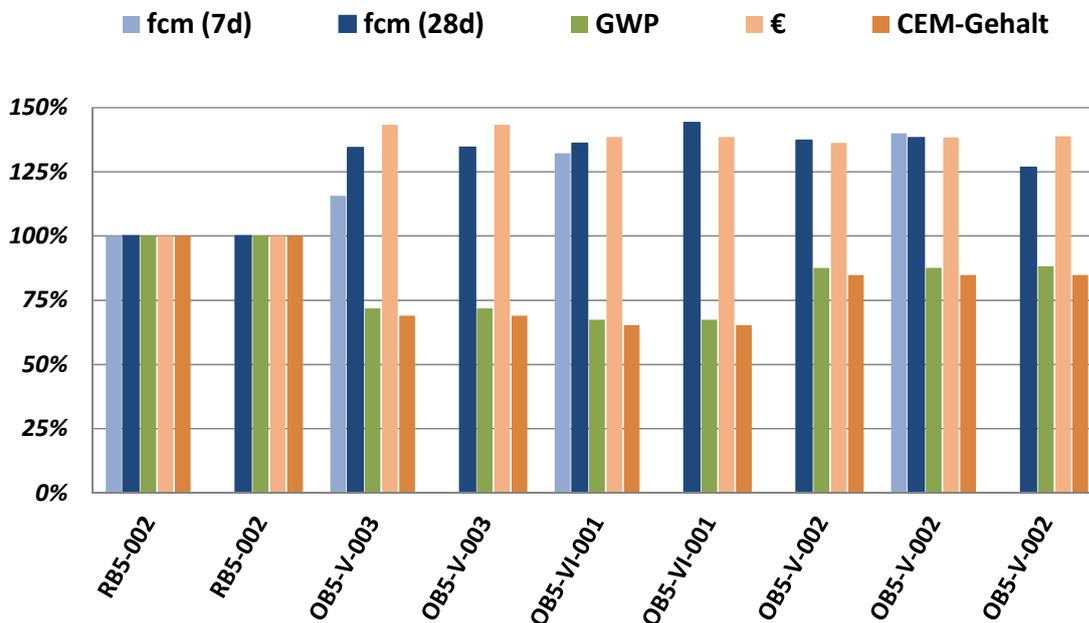


Abbildung 17: Vergleich der Ergebnisse von Varianten eines C 30/37 B5 GK 16 mit ideal. GeK.

Das GWP konnte um bis zu 29% und das PEI konnte um 12 % (z.B. Öko-Beton OB5-VI-001) reduziert werden. Wegen der hohen Fließmittel- Dosierungen konnte PEI nicht im gleichen Maße wie GWP (z.B. Öko-Beton OB5-V-002: PEI Reduktion nur 0,5%) reduziert werden. Die offene

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

Porosität des Referenzbetons (15,3%) ist höher als jener der Öko-Betone (Referenz -3,3%/-0,9%). Die hohen Kosten von allen Öko-Betonen sind vor allem stark abhängig von den verwendeten (laut bisher verfügbaren Kostenschätzungen teuren) Mikro- und Eco -Füllern verbunden mit dem hohen Substitutionsgrad von Zement. Dazu kommt der höhere Fließmittelbedarf zum Erreichen der gleichwertigen Frischbetoneigenschaften im Vergleich zum Referenz-Beton. Allerdings liegen die 28 Tag-Druckfestigkeiten der Öko-Betonen zwischen 25% und 45% höher als jene des Referenz-Betons., was bedeutet, dass „über das Ziel hinaus geschossen wurde“.

Als Anforderungen an die Ausschal-Festigkeit der Tragwerksbetone C 30/37 wurde ein Richtwert von rd. 33 N/mm² nach 12 Tagen angenommen. Die Druckfestigkeitsentwicklung bis zum 12. Tag wird in Abbildung 18 angegeben. Wie aus der Abbildung 18 zu entnehmen ist, sind die 1 Tages-Druckfestigkeiten der entworfenen Öko-Betone mit geringerem Wasser/Pulver-Wert deutlich höher als jene des Referenz-Betons RB5-002. Die Ökobetone (mit einem CEM II/ A 42,5 R) entwickeln die Festigkeit trotz geringerem Zementgehalts also sogar etwas schneller als der Referenzbeton mit CEM II/A-S 42,5 N. Für die Betonsorte C30/37 mit einem CEM 42,5 R kann die Festigkeitsentwicklung gemäß Model Code 2010 (Final draft Volume 1, entspricht EC2) berechnet werden. Man sieht, dass die Prognose für diesen Beton der Entwicklung der Ökobetone entspricht.

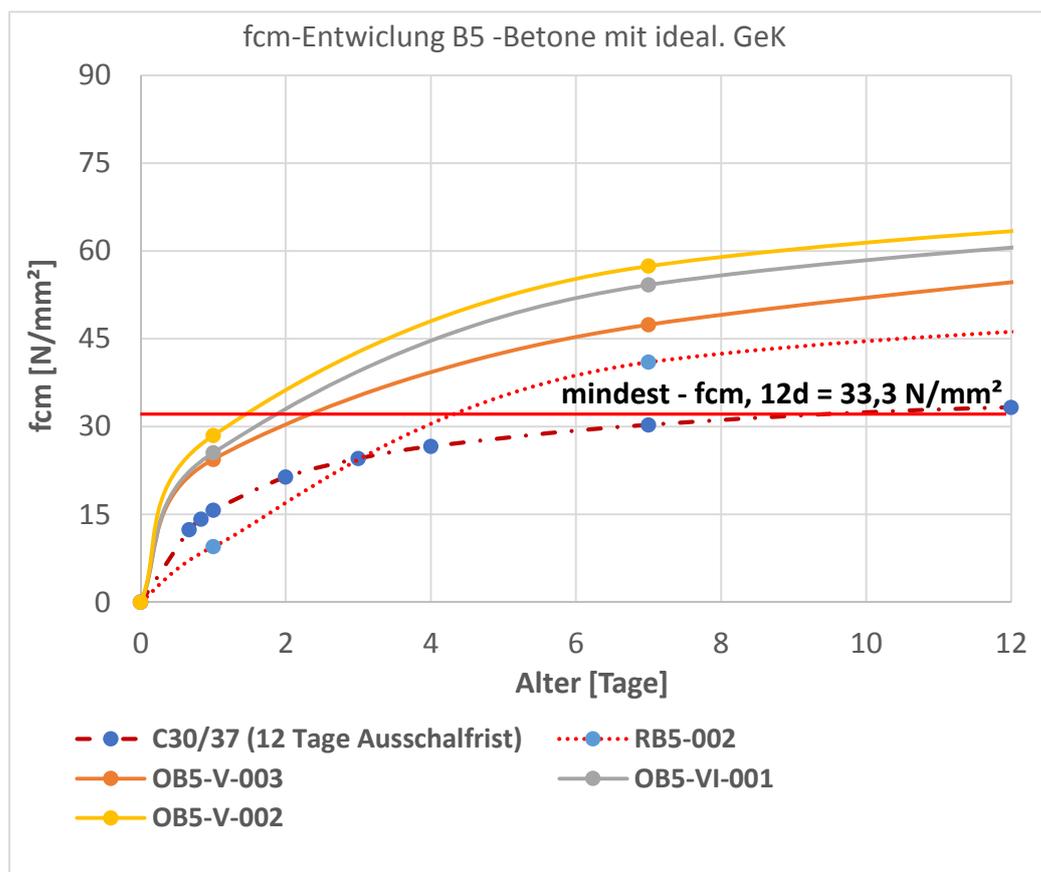


Abbildung 18: Festigkeitsentwicklung von Varianten eines C 30/37+ B5 GK 16 mit ideal. Gek.

Tragwerksbetone mit „natürlichen Gesteinskörnungen (GeK)“

Analog zur besprochenen Bewertung des Betons C 30/37 B5 GK 16 mit idealisierten Gesteinskörnungen werden in den folgenden Abschnitten die weiteren entwickelten Betone mit „natürli-

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

chen“, also relativ feinteilreichen Gesteinskörnungen (GeK) wie sie üblicherweise im Betonbau verwendet werden dargestellt (siehe auch Tabelle 4). Alle Ökobetone zeichnen sich wiederum durch einen niedrigen Wassergehalt und sehr niedrigen W/P-Wert (Wasser/Pulver-Wert) bei relativ hohen W/Z-Werten aus, die zum Teil die in der ÖNORM B 4710-1 angegebenen Grenzen überschreiten. Es werden hochwirksame Fließmittel (PCE) in 1 bis 3-facher Menge im Vergleich zum Referenzbeton eingesetzt. Es musste darauf geachtet werden, dass die Betone eine ausreichend lange Verarbeitungszeit und möglichst geringe Klebrigkeit/Zähigkeit aufweisen. Bei der Entwicklung der Öko-Betone mit natürlichen Gesteinskörnungen werden im Gegensatz zu den Betonen mit „idealisiert-aufbereiteten“ Gesteinskörnungen sowohl kostengünstigere pulverförmige Stoffe (Miko- und Eco-Füller) als auch ein etwas geringerer Substitutionsgrad an Zement verwendet, was den Fließmittelverbrauch deutlich beeinflusst (indirekt senkt). Im Rahmen der Dauerhaftigkeitsprüfungen (z.B. CDF-Test, siehe unten) zeigte sich - wie es zu erwarten war - dass ein ausreichender Klinkergehalt vorhanden sein muss, wenn nur mit inerten Füllern zur Zementsubstitution gearbeitet wird (nicht mehr als 40% inerte Füller im Gemisch aus CEM II/A:Eco-Füller:Mikrofüller möglich) oder dass das Gefüge durch hydraulisch wirksame Zusatzstoffe (AHWZ o. glw.) zu verdichten ist. Es gibt ein großes Potential, die Dauerhaftigkeit von Standard- und Ökobetonen, abhängig vom Klinkergehalt durch die Kombination mit hydraulisch wirksamen Zusatzstoffen zu verbessern, siehe auch das Kapitel 3.5.2 zur Dauerhaftigkeit bei chemischem Angriff XAL und XAT. Dazu besteht weiterer Forschungsbedarf auf Basis der vorgelegten Grundlagen.

Tabelle 10: Rezepturkennwerte der Varianten von C 30/37 B5 GK 16 mit „natürlichen“ Gest.K..

Bezeichnung Auswertung	Rezept	CEM I / CEM II	CEM	Eco-Füller (AHWZ)	Eco- Füller	Mikro- Füller	Fließmittel	FM-Gehalt	W/B	W/Pm	Leim- volumen
		kg/m ³	%	%		%		kg/m ³	[-]	[-]	l/m ³
"natürlich-reale GeK"											
RB5-004	RB5-005	397	100	-	-	-	Sika VC 4030	1.9	0.48	0.42	339
OB5-XI-002	OB5-XI-002	306	65	-	35	-	Sika VC 4030	5.3	0.52	0.30	343
OB5-VII-004	OB5-VII-004	308	65	-	30	5	Sika VC 4030	4.7	0.52	0.30	343
OB5-VII-005	OB5-VII-005	269	65	-	30	5	FM Sika VC 4030	3.2	0.58	0.34	346
OB5-II-001	OB5-II-001	269	60	-	35	5	FM Sika VC 4030	2.5	0.63	0.34	342
OB5-II-002	OB5-II-002	292	60	-	35	5	FM Sika VC 4030	3.4	0.58	0.34	342
OB5-II-002	OB5-II-002	294	60	-	35	5	FM Sika VC 4030	3.4	0.58	0.34	336
RB5-004	RB5-006	397	100	-	-	-	FM Sika VC 4030	2.4	0.48	0.42	340
RB5-004	RB5-007	397	100	-	-	-	FM Sika VC 4030	2.4	0.48	0.42	340
OB5-VII-007	OB5-VII-007	297	65	-	30	5	FM Sika VC 4030	4.3	0.55	0.32	341
OB5-VII-007	OB5-VII-008	297	65	-	30	5	FM Sika VC 4030	4.3	0.55	0.32	341
OB5-II-002	OB5-II-003	292	65	-	30	5	FM Sika VC 4030	3.3	0.58	0.34	342
OB5-VII-006	OB5-VII-006	305	65	-	30	5	FM Sika VC 4030	5.2	0.52	0.30	340
Ref. RB5-004	RB5-008	397	100	-	-	-	FM Sika 4030	2.7	0.48	0.42	340
Ref. RB5-004	RB5-009	397	100	-	-	-	FM Sika 4030	1.5	0.48	0.42	339
OB5-XXXIX-001	OB5-XXXIV-001	303	65	-	30	5	FM Sika 4030	4.1	0.54	0.31	342
OB5-XL-001	OB5-XXXV-001	289	65	15	-	5	FM Sika 4030	2.0	0.54	0.39	346
OB5-XXXIX-001	OB5-XXXIV-002	303	65	-	30	5	FM Sika 4030	4.3	0.54	0.31	342
OB5-XL-001	OB5-XXXV-002	289	65	15	15	5	FM Sika 4030	2.0	0.54	0.39	346
OB5-XL-003	OB5-XXXV-003	294	65	15	10	10	FM Sika 4030	2.4	0.54	0.41	345

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

Tabelle 11: Eigenschaften der Varianten eines C 30/37 B5 GK 16 mit natürlichen Gest.körnungen

Bezeichnung Auswertung	Rezept	LP-Gehalt, 45min	Konsistenz 45 Min	Konsistenzhaltung	fcm,24h	fcm,7d	fcm,28d	Offene Porosität	GWP	PEI	Kosten relativ
		%	[cm]	[-]	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	[%]	[kgCO ₂ /m ³]	[MJ/m ³]	[-]
"natürlich-reale GeK"											
RBS-004	RBS-005	5.9	45.0	1.0	18.5	-	55.8	-	311.2	1662.7	0.99
OBS-XI-002	OBS-XI-002	3.5	43.0	1.0	22.4	-	66.3	-	246.7	1535.0	0.79
OBS-VII-004	OBS-VII-004	3.4	49.0	1.1	22.5	-	69.2	-	248.4	1542.1	0.79
OBS-VII-005	OBS-VII-005	7.4	45.0	1.0	18.3	-	54.7	-	236.9	1440.4	0.74
OBS-II-001	OBS-II-001	6.5	45.0	1.0	20.7	-	51.5	-	233.0	1401.0	0.72
OBS-II-002	OBS-II-002	-	-	-	-	-	-	-	252.5	1498.0	0.76
OBS-II-002	OBS-II-002	6.2	43.0	1.0	28.1	42.6	59.2	-	254.9	1511.8	0.77
RBS-004	RBS-006	7.0	49.5	1.0	20.1	45.9	54.6	13.2	311.7	1681.5	1.00
RBS-004	RBS-007	6.2	49.0	1.0	-	-	60.5	-	311.7	1682.2	1.00
OBS-VII-007	OBS-VII-007	4.5	48.0	1.0	22.1	44.8	60.2	15.0	239.6	1478.3	1.01
OBS-VII-007	OBS-VII-008	4.9	48.5	1.0	-	-	-	-	239.6	1478.3	1.01
OBS-II-002	OBS-II-003	5.1	46.0	0.9	28.1	42.6	57.2	13.5	252.6	1499.6	0.99
OBS-VII-006	OBS-VII-006	3.0	49.0	1.0	21.1	46.8	67.4	11.6	246.6	1536.2	1.05
Ref. RBS-004	RBS-008	6.5	52.0	0.9	-	-	-	-	311.8	1683.5	1.00
Ref. RBS-004	RBS-009	3.8	41.0	1.0	20.1	-	54.0	14.9	310.8	1650.6	1.00
OBS-XXXIX-001	OBS-XXXIV-001	4.4	42.0	1.0	-	-	-	-	262.4	1567.7	1.07
OBS-XI-001	OBS-XXXV-001	4.8	45.0	1.0	-	-	63.5	12.9	248.9	1406.9	1.02
OBS-XXXIX-001	OBS-XXXIV-002	5.0	48.0	1.1	30.6	-	63.1	12.9	262.5	1572.8	1.07
OBS-XI-001	OBS-XXXV-002	4.0	45.0	1.0	21.5	-	63.5	-	249.0	1408.1	1.02
OBS-XI-003	OBS-XXXV-003	4.0	47.0	1.1	23.0	-	69.2	14.3	253.2	1426.7	1.03

C 30/37+ B5 nat. GeK

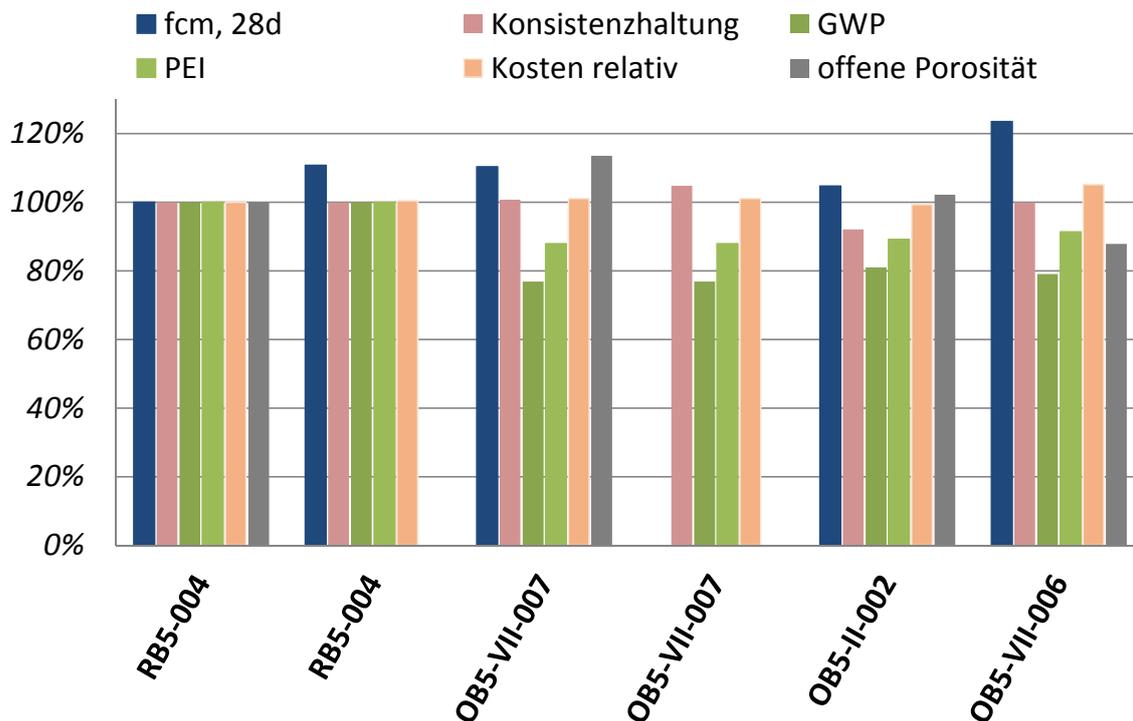


Abbildung 19: Vergleich der Ergebnisse mehrerer Varianten eines C 30/37 B5 GK 16 mit nat. GeK.

Die Konsistenzhaltung A15/A45 bei Öko-Betonen mit natürlichen GeK ist geringer als bei Öko-Betonen mit „idealisierten“ GeK aber sonst identischer Zusammensetzung, aber ausreichend im Vergleich zum entsprechenden Referenzbeton. Bei Öko-Betonen mit stark reduziertem Wassergehalt ist die Menge des Fließmittels (max. 2,5 fach) erhöht worden. Somit konnte GWP um bis

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

zu 25%, PEI allerdings nur um 12% (Öko-Beton OB5-VII-007) reduziert werden. Im Falle von Beton OB5-XL-001 war die Menge an Fließmittel sogar etwa gleich derjenigen des Referenzbetons bei gleicher Konsistenz. So konnte GWP um bis zu 20% und PEI um 15 % (Öko-Beton OB5-VII-007) reduziert werden.

Die Öko-Betone weisen eine im Vergleich zum Referenzbeton (2 Mischungen: 13,2% und 14,9%) etwa gleichwertige offene Porosität auf. Es konnte im Rahmen der Rezepturenentwicklung von Öko-Betonen mit natürlichen Gesteinskörnungen gezeigt werden, dass sowohl mit CEM II/A-M (S-L) 42,5 R (OB5-VII-006 mit M%-Verhältnis 65:30:5 CEM II/A:Eco-Füller:Mikrofüller), als auch mit CEM I 52,5 R (OB5-II-002 mit M%-Verhältnis 60:35:5 CEM I:Eco-Füller:Mikrofüller im Feinstoffgemisch und OB5-XL-001 mit 65:15:10:5 CEM I/AHWZ-Hüttensand:Eco-Füller:Mikrofüller) ein Ökobeton hergestellt werden kann, der dem Referenz Beton RB5-004 technologisch zumindest gleichwertig ist (siehe Abbildung 20).

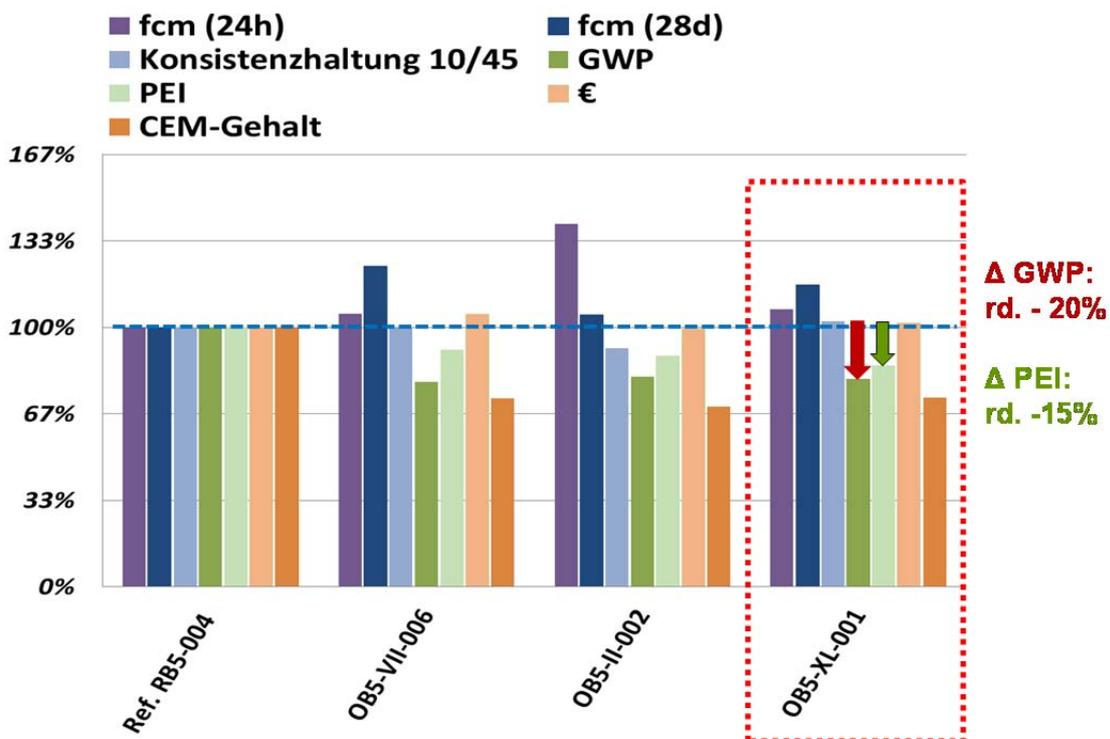


Abbildung 20: Vergleich der Ergebnisse und Auswahl Öko-Betone C 30/37 B5 GK 16 mit nat. Gek.

Wie in Abbildung 21 und Abbildung 20 ersichtlich ist, sind die Frühfestigkeiten (1-Tages-Druckfestigkeiten) von Öko-Betonen trotz reduziertem Zementgehalt gleich oder höher als vom Referenzbeton (mit CEM II/A-M(S-L) 42,5 N). Im Fall von Ökobeton OB5-II-002 mit einem CEM I 52,5 sind sie im Vergleich zum Referenz-Beton RB5-004 höher, im Fall von Ökobeton OB5-VII-006/007 mit einem CEM II/A-M(S-L) 42,5 R sind sie etwa gleich wie die Referenz..

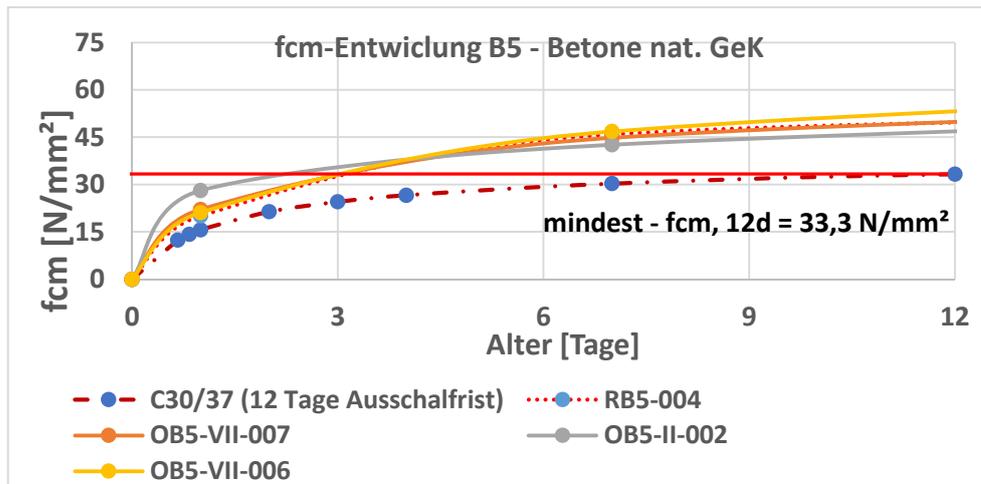


Abbildung 21: Festigkeitsentwicklung von Varianten eines C 30/37 B5 GK 16 mit ideal. Gek.

Tragwerksbeton Rezepturvorschlag

Die *Tabelle 12* zeigt die Rezepturzusammensetzung und Kennwerte wie Frisch- und Festbetoneigenschaften, ökologische Indikatoren (GWP und PEI) und abgeschätzte Kosten des Referenz-Betons RB5-004 im Vergleich zum Öko-Beton OB5-XL-001, der für eine zukünftige Ausführung vorgeschlagen werden kann. Es wurde neben der oben gezeigten gleichwertigen oder „besseren“ technologischen Performance des Öko-Betons OB5-XL-001 im Vergleich zum Standard-Beton auch die Dauerhaftigkeit wie im Kapitel 3.5.2 ausgeführt mit beschleunigten Verfahren geprüft. Die im Rahmen des Projektes ERESCON definierten Anforderungen, insbesondere auch an die Beständigkeit gemäß der Expositionsklassen für einen Beton B5, werden von den vorgeschlagenen Beton OB5-XL-001 voll abgedeckt.

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

Tabelle 12: Vorschlag einer Rezeptur für Tragwerksbeton C 30/37 B5 Eco und deren Kennwerte im Vergleich zum „Standard“-Beton nach ÖNORM B 4710

		„Standard“- Beton RB5-004	Eco-Beton OB5-XL-001
CEM : EF1 : EF2 : MF1	M %	100:0:0:0	65:15:15:5
CEM II/A 42,5 R * bzw. CEM I 52,5 R **	kg/m ³	396,7*	289,1**
Eco-Füller 1 (AHWZ-HÜS)		-	66,8
Eco-Füller 2 (Kalksteinmehl)		-	66,7
Mikro-Füller 1 (Dolomitsteinm.)		-	22,4
Sand 0/1		453,2	446,5
Sand 1/4		696,7	686,3
Kies 4/8		332,1	327,1
Kies 8/16		347,4	329,4
Gesamtwasser		189,8	185,1 (RS)
Fließmittel (PCE)		1,50	1,99
Luftporenbildner		0,066	0,090
W/B (massenbezogen)	-	0,48	0,54
V _W /V _P Wasser/Pulver (vol.)	-	1,27	1,10
Ausbreitmaß	cm	54	53
Druckfestigkeit 28 d	N/mm ²	54,0	63,5
offene Porosität	%	14,9	12,9
GWP	kgCO ₂ /m ³	310,8	249,8
PEI	MJ/m ³	1650,6	1430,7
Kosten	€/m ³	62,3	63,3

C 25/30(56) GK16 Tunnelinnenschalenbeton

In Tabelle 13 sind die Anforderungen gemäß der ÖBV Richtlinien für Tunnelinnenschalen [58] und Weiße Wannen [59] zusammenfassend dargestellt. Für dieses Projekt wurde als Anforderungsprofil (siehe 3.1.1) Beton C 25/30 (56) IXAT-B mit den Expositionsklassen XC4, XF3, XAT2 und XA1L definiert (sulfatbeständiger Tunnelinnenschalenbeton gemäß Angaben ASFI-NAG). Dies geschieht in Hinblick darauf, dass Rezepturen für diesen Beton auch Anforderungen an Innenschalenbetone IG und IXAL-B sowie Weiße Wanne BS1 A abdecken kann (siehe Tabelle 13, rot gestrichelte Kästchen).

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

Tabelle 13: Festlegung für IXAT-B (GK 16) und zugehörige Anforderungen gemäß ÖVBB RiLi

Kurzbezeichnung	Weisse Wanne		Innenschalenbeton (GK16)		
	BS 1 A	BS 1 B	IG	IXAT-B	IXAL-B
Anwendungen	Wände und Platten, alle Wasserdruck ≤ 10 m	dicke Wände und Platten, alle Wasserdrücke	Gewölbebeton	Regelbeton Sulfatangriff SO ₄ ²⁻ 400-2000 mg/l	lösender Angriff
Festigkeitsklassen	C20/25(56) C25/30(56)	C20/25(56) C25/30(90)	C20/25(56), (90) C25/30(56), (90)	C25/30 (56), (90)	C25/30 (56), (90)
Expositionsklasse abgedeckt	XC2/XC3/ XD2/XF3 XA1T/XA1L/SB	XC2/XC3/ XD2/XF3 XA1T/XA1L/SB	XC3/ XF3/XA1L	XC4/ XF3/XA2T/XA1L	XC4/ XF3/XA1L
Anrechenbarer Mindestbindemittelgehalt kg/m ³	260	260	260	260	260
max. W/B-Wert	0,7	0,7	0,67 (Gewölbe); 0,70 (Sohle)	0,67 (Gewölbe); 0,70 (Sohle)	0,67 (Gewölbe); 0,70 (Sohle)
Sonstige Anforderungen mit BS 1 abgedeckt	RRS	RRS	RS	RRS	RS
Zement C3A-frei	vorgeschrieben	vorgeschrieben	empfohlen	vorgeschrieben	empfohlen
Zement gemäß ONB 3327-1	WT33 C3A-frei	WT33 C3A-frei	WT 38, WT 42	WT27 C ₃ A-frei, WT33 C3A-frei , WT 38 C3A-frei	WT 38, WT 42
Max. Temperaturanstieg im Beton	21K	≤ 17K	≤ 22K	≤ 20K	≤ 24K
Luftgehalt	2,5-5,0%	2,5-5,0%	2,5-5,0%	2,5-5,0%	2,5-5,0%
Gesamtwassergehalt	≤ 170 l/m ³	≤ 170 l/m ³	≤ 190+5 (GK16) l/m ³	≤ 170 +5 (GK16) l/m ³	≤ 190 +5 (GK16) l/m ³
Mikroprozessor- Steuerung gem. ONB4710-1	vorgeschrieben	vorgeschrieben	ja	ja	ja
Frischbetontemperatur an der Einbaustelle	≤ 22 °C	≤ 22 °C	≤ 27 °C	≤ 27 °C (bei uns ≤ 22 °C)	≤ 27 °C
Max. zulässige Bauteiltemp.	45 °C	45 °C	45 °C	45 °C	50 °C
Erstprüfungsnachweis am Festbeton	XC3, XF3, L300	XC3, XF3, L300	XC3 (XF3)	Wassereindringtiefe Erstprg. 20mm, XF3, L300	Wassereindringtiefe, L300
Konformitäts-, Identitätsnachweis am Festbeton	XC3, L300	XC3, L300	XC3 (L300)	Wassereindringtiefe, L300	Wassereindringtiefe, L300
Ausschallfrist	≥ 36 Stunden	≥ 36 Stunden	12 Stunden	12 Stunden	12 Stunden
Konsistenzklasse	mind. F45	mind. F45	F52 (Pumpbeton für unbewehrte Gewölbebetone), F52 (bewehrte Innenschalen-Sohle)	F52 (Pumpbeton für unbewehrte Gewölbebetone), F52 (bewehrte Innenschalen-Sohle)	F52 (Pumpbeton für unbewehrte Gewölbebetone), F52 (bewehrte Innenschalen-Sohle)
Mindestfestigkeit zum Ausschallzeitpunkt			2,0 N/mm ²	2,0 N/mm ²	2,0 N/mm ²
Nachbehandlung	vorgeschrieben	vorgeschrieben	vorgeschrieben	vorgeschrieben	vorgeschrieben

Für IXAT-B Betone wurde eine umfangreiche Versuchsreihe mit unterschiedlichen Zusatzstoff-Kombinationen durchgeführt¹. Einerseits wurden Zement (CEM I 42,5 R WT 33 C₃A-frei) und Zusatzstoffe (AHWZ) kombiniert wie sie in der Richtlinie für Innenschalenbetone vorgesehen sind. Darüber hinaus wurden neue Stoffe (z.B.: aufbereitete Zeolith-Mehle und feinste Metakaoline sowie Gesteinsmehle) und bisher nicht vorgesehene Kombinationen von Feinst-Stoffen (z.B.: CEM I 52,5 R + AHWZ Hüttensand + Mikrofüller aus Kalksteinmehl und/oder Mikrosilika usw.) in geeigneter Weise nach dem oben beschriebenen Prinzip der Packungsdichteoptimierung kombiniert. Als Eco-füller wurden also Kalkmehle, Quarzmehle und Hüttensand (AHWZ) und als Micro-Füller (inerte) Kalkmehle, Quarzmehle und auch hydraulisch wirksame Stoffe wie Metakaolin, Mikrosilika und Zeolith verwendet. Zum Nachweis der chemischen Beständigkeit wurden Prüfungen der Säurebeständigkeit (XA1L) sowie der Beständigkeit gegen treibenden Angriff (Sulfat-Beständigkeit) durchgeführt, siehe Kapitel 3.5.2. An geeigneten Mischungen wurden Nachweise am Festbeton, wie in der Richtlinie für Innenschalen gefordert (Wassereindringtiefe, XF3, Luftporengehalt) durchgeführt.

In Tabelle 13 und Tabelle 14 sind die Rezepturzusammensetzungen, Rezepturkennwerte, Frisch- und Festbetoneigenschaften, ökologische Indikatoren (GWP und PEI) und abgeschätzte Kosten des Referenz-Betons und der entwickelten Öko-Betone dargestellt. In der Tabelle finden sich auch sogenannte „Vergleichsbetone“, die keine Zusatzstoffe sondern nur Zement in der Feinststoffzusammensetzung enthalten und lediglich zum wissenschaftlichen Vergleich dienen (siehe [60]).

¹ Die über diesen Bericht hinausgehende Dokumentation und Auswertung der Versuche findet sich in [60]

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

Die geprüften Frisch- und Festbetoneigenschaften aller entwickelten Öko-Betone sind gleichwertig bzw. „besser“ als jene des Referenzbetons. Allerdings weisen Ökobetone mit extrem hohen Zusatzstoffgehalt (>60% im Feinstkorngemisch) und niedrigem W/P-Wert (Wasser-Pulver-Verhältnis) eine höhere Zähigkeit auf. Die Kosten für die Öko-Betone, die mit den vorläufigen Richtpreisen für „teure“ Mikrofüller (Mikrosilika, Zeolith, Quarzmehl und Kalksteinmehl) geschätzt wurden, konnten durch die Leimoptimierung und die Verwendung vom üblichen Kalksteinmehl und Hüttensand bei etwa gleichem Fließmittelverbrauch im Vergleich zum Referenzbeton gleich hoch gehalten bzw. sogar gesenkt werden. Die Dauerhaftigkeit konnte mit einigen ungewöhnlichen Kombinationen zudem stark verbessert werden, siehe Kapitel 3.5.2.

Tabelle 14: Rezepturkennwerte der Varianten eines C 20/25 (56) Tunnelinnenschalenbetone GK 16

Bezeichnung Auswertung	Rezept	CEM I	CEM I	Eco-Füller (AHWZ)	Eco- Füller	Mikro-Füller	Fließmittel	FM- Gehalt	W/B	W/Pm	Leim- volumen
		kg/m ³	%	%	%	kg/m ³		kg/m ³	[-]	[-]	
"natürlich-reale Gek"											
Ref. IXAT-B-002	IXAT-B-002	275	82	18	-	-	FM Sika VC 4030	1,4	0,54	0,45	303,0
Ref. IXAT-B-002	IXAT-B-003	275	82	18	-	-	FM Sika VC 4030	1,6	0,54	0,45	303,0
IXAT-B-XII-001	IXAT-B-XII-001	220	60	30	-	10	FM Sika VC 4030	3,0	0,53	0,38	303,0
IXAT-B-XIII-001	IXAT-B-XIII-001	220	60	30	-	10	FM Sika VC 4030	2,7	0,53	0,38	303,0
IXAT-B-XIII-002	IXAT-B-XIII-002	153	35	40	-	25	FM Sika VC 4030	2,9	0,44	0,26	297,0
IXAT-B-XII-001	IXAT-B-XII-002	220	60	30	-	10	FM Sika VC 4030	2,3	0,52	0,38	303,0
IXAT-B-XIII-001	IXAT-B-XIII-003	220	60	30	-	10	FM Sika VC 4030	1,9	0,52	0,38	302,0
IXAT-B-XIV-001	IXAT-B-XIV-001	220	60	35	-	5	FM Sika VC 4030	1,9	0,52	0,38	302,0
IXAT-B-XV-001	IXAT-B-XV-001	179	50	45	-	5	FM Sika VC 4030	2,4	0,53	0,39	302,0
Ref. IXAT-B-004	IXAT-B-004a	275	82	18	-	-	FM Sika VC 4030	2,7	0,54	0,46	299,5
Ref. IXAT-B-004	IXAT-B-004b	275	82	18	-	-	FM Sika VC 4030	3,1	0,54	0,46	299,6
Vgl. IXAT-B-005	IXAT-B-005	275	100	-	-	-	FM Sika VC 4030	2,1	0,54	0,48	304,7
IXAT-B-XIV-002	IXAT-B-XIV-002	219	60	33	-	5	FM Sika VC 4030	2,3	0,54	0,41	305,1
IXAT-B-XXV-001	IXAT-B-XXV-001	218	60	32	-	8	FM Sika VC 4030	2,4	0,55	0,42	306,0
Vgl. IXAT-B-006	IXAT-B-006a	335	100	-	-	-	FM Sika VC 4030	2,0	0,54	0,48	305,0
Vgl. IXAT-B-006	IXAT-B-006b	335	100	-	-	-	FM Sika VC 4030	2,6	0,54	0,48	305,0
Vgl. IXAT-B-006	IXAT-B-006c	335	100	-	-	-	FM Sika VC 4030	2,6	0,54	0,48	305,0
IXAT-B-XXV-002	IXAT-B-XXV-002	185	50	42	-	8	FM Sika VC 4030	3,0	0,53	0,40	306,0
IXAT-B-XVIII-002	IXAT-B-XVIII-002	154	40	42	10	8	FM Sika VC 4030	3,2	0,53	0,35	307,0
IXAT-B-XIV-003	IXAT-B-XIV-003	218	60	33	-	8	FM Sika VC 4030	2,6	0,54	0,42	305,2
IXAT-B-XXIV-003	IXAT-B-XXIV-003a	154	40	43	10	8	FM Sika VC 4030	3,4	0,54	0,35	305,1
IXAT-B-XXIV-003	IXAT-B-XXV-003a	196	50	33	10	8	FM Sika VC 4030	3,6	0,53	0,35	306,7
IXAT-B-XXVI-001	IXAT-B-XXVI-001	149	40	43	10	8	FM Sika VC 4030	4,0	0,47	0,37	303,9
IXAT-B-XXIV-003	IXAT-B-XXIV-003b	154	40	43	10	8	FM Sika VC 4030	3,4	0,54	0,35	305,1
IXAT-B-XXV-003	IXAT-B-XXV-003b	196	50	33	10	8	FM Sika VC 4030	3,6	0,53	0,35	306,7
Vgl. IXAT-B-006	IXAT-B-006d	335	100	-	-	-	FM Sika VC 4030	2,6	0,54	0,48	304,7
IXAT-B-XXVI-001	IXAT-B-XXVI-002	149	40	43	10	8	FM Sika VC 4030	4,9	0,47	0,37	304,2
IXAT-B-XV-003	IXAT-B-XV-003	185	50	43	-	8	FM Sika VC 4030	2,2	0,53	0,40	306,2
IXAT-B-XXVII-001	IXAT-B-XXVII-001	146	40	43	10	8	FM Sika VC 4030	4,3	0,54	0,37	304,7
Ref. IXAT-B-004	IXAT-004c	275	82	18	-	-	FM Sika VC 4030	3,1	0,54	0,46	299,6
Vgl. IXAT-B-008	IXAT-B-008	385	100	-	-	-	FM Sika VC 4030	4,0	0,44	0,40	306,2
IXAT-B-XIV-003	IXAT-B-XIV-003b	218	60	33	-	8	FM Sika VC 4030	2,6	0,54	0,42	305,2
IXAT-B-XXV-003	IXAT-B-XXV-003c	196	50	33	10	8	FM Sika VC 4030	3,6	0,53	0,35	306,7
IXAT-B-XV-003	IXAT-B-XV-003a	185	43	43	-	8	FM Sika VC 4030	2,2	0,53	0,40	306,0
Vgl. IXAT-B-006	IXAT-B-007	392	100	-	-	-	FM Sika VC 4030	5,5	0,42	0,38	308,0
IXAT-B-XXIV-003	IXAT-B-XXIV-003c	154	40	43	10	8	FM Sika VC 4030	3,4	0,54	0,35	305,1

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

Tabelle 15: Eigenschaften der Varianten eines C 30/37 B5GK 16 mit ideal. Gesteinskörnungen

Bezeichnung Auswertung	Rezept	AM 15 Min	Konsistenzhaltung	LP-Gehalt, 45 min	Temperaturanstieg	Offene Porosität	fcm,16h	fcm,24h	fcm,56d	GWP	PEI	Kosten relativ
		[cm]	[-]	[%]	[°C]		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	[kgCO ₂ /m ³]	[MJ/m ³]	[-]
"natürlich-reale Gek"												
Ref. IXAT-B-002	IXAT-B-002	49	1,00	3,4	17,9	-	7,4	11,2	60,4	218,4	1226,0	1,00
Ref. IXAT-B-002	IXAT-B-003	45	1,09	-	-	13,7	-	14,5	64,9	218,5	1234,8	1,01
IXAT-B-XII-001	IXAT-B-XII-001	52	0,92	2,7	-	-	-	-	-	179,8	1128,2	1,06
IXAT-B-XIII-001	IXAT-B-XIII-001	-	-	-	-	-	-	-	-	179,5	1118,4	1,15
IXAT-B-XIII-002	IXAT-B-XIII-002	-	-	-	-	-	-	-	-	131,5	974,1	1,42
IXAT-B-XII-001	IXAT-B-XII-002	54	0,93	6,0	-	13,0	5,7	8,8	74,2	179,3	1108,6	1,02
IXAT-B-XIII-001	IXAT-B-XIII-003	55	1,07	3,6	-	13,8	4,5	8,1	69,5	178,8	1094,8	1,10
IXAT-B-XIV-001	IXAT-B-XIV-001	51	0,88	5,6	12,7	12,0	6,4	10,3	60,6	179,5	1118,2	1,08
IXAT-B-XV-001	IXAT-B-XV-001	56	0,80	5,1	17,8	12,8	7,0	12,8	80,1	159,2	1015,2	1,04
Ref. IXAT-B-004	IXAT-B-004a	-	-	6,6	-	-	-	-	-	236,7	1332,2	1,07
Ref. IXAT-B-004	IXAT-B-004b	46	1,36	3,4	17,9	10,0	7,4	13,6	57,3	237,0	1341,3	1,00
Vgl. IXAT-B-005	IXAT-B-005	50	1,21	5,6	-	-	-	-	56,5	287,2	1535,6	1,01
IXAT-B-XIV-002	IXAT-B-XIV-002	49	1,33	10,5	-	-	-	-	-	192,0	1168,0	1,06
IXAT-B-XXV-001	IXAT-B-XXV-001	49	1,23	5,8	-	10,1	-	-	61,4	191,3	1147,6	1,01
Vgl. IXAT-B-006	IXAT-B-006a	52	1,34	10,0	-	-	-	-	-	284,9	1522,3	1,00
Vgl. IXAT-B-006	IXAT-B-006b	50	1,28	7,5	-	10,6	-	-	44,1	285,3	1538,0	1,02
Vgl. IXAT-B-006	IXAT-B-006c	49	1,23	5,4	-	9,9	-	-	55,4	285,3	1536,4	1,01
IXAT-B-XXV-002	IXAT-B-XXV-002	51	1,17	2,7	-	9,8	-	-	82,6	165,8	1073,0	1,02
IXAT-B-XVII-002	IXAT-B-XVII-002	49	1,21	5,4	-	7,7	-	-	65,0	139,5	944,2	1,53
IXAT-B-XIV-003	IXAT-B-XIV-003	38	1,22	7,5	3,5	10,8	5,9	-	61,2	192,3	1175,6	1,06
IXAT-B-XXIV-003	IXAT-B-XXIV-003a	51	1,13	4,7	-	11,2	-	-	77,4	141,3	980,7	1,03
IXAT-B-XXIV-003	IXAT-B-XXIV-003a	55	1,23	3,5	-	11,5	11,3	14,8	79,9	175,1	1135,7	1,07
IXAT-B-XXVI-001	IXAT-B-XXVI-001	52	1,17	4,0	-	9,7	-	-	74,0	136,2	944,8	1,11
IXAT-B-XXIV-003	IXAT-B-XXIV-003b	56	1,16	4,2	14,8	-	-	-	54,6	141,3	980,7	1,03
IXAT-B-XXV-003	IXAT-B-XXV-003b	57	1,26	3,8	14,0	-	11,3	14,8	74,8	175,1	1135,7	1,07
Vgl. IXAT-B-006	IXAT-B-006d	54	1,36	5,4	-	-	14,8	-	56,9	285,3	1538,1	1,00
IXAT-B-XXVI-001	IXAT-B-XXVI-002	56	1,40	2,7	-	-	9,1	13,7	76,2	137,0	970,5	1,12
IXAT-B-XV-003	IXAT-B-XV-003	52	1,16	5,4	-	12,6	10,3	-	70,2	165,1	1050,4	1,04
IXAT-B-XXVII-001	IXAT-B-XXVII-001	55	1,18	3,2	-	12,5	6,9	10,3	-	133,7	939,9	1,08
Ref. IXAT-B-004	IXAT-004c	56	1,31	3,6	-	-	-	-	59,1	236,9	1339,9	1,00
Vgl. IXAT-B-008	IXAT-B-008	51	1,41	4,2	-	11,3	-	-	71,1	328,4	1779,6	1,14
IXAT-B-XIV-003	IXAT-B-XIV-003b	62	1,32	2,9	-	-	-	-	74,6	192,3	1175,6	1,06
IXAT-B-XXV-003	IXAT-B-XXV-003c	56	1,33	3,6	-	-	-	-	-	175,1	1135,7	1,07
IXAT-B-XV-003	IXAT-B-XV-003a	51	1,09	5,0	-	-	-	-	-	165,1	1050,4	1,04
Vgl. IXAT-B-006	IXAT-B-007	50	1,35	3,9	-	-	-	-	-	335,6	1852,1	1,19
IXAT-B-XXIV-003	IXAT-B-XXIV-003c	61	1,25	4,3	-	-	-	77,4	141,3	141,3	980,7	1,03

In der folgenden Abbildung 22 werden Eigenschaften einiger ausgewählter Tunnelinnenschalenbetone im Vergleich zum Referenzbeton dargestellt.

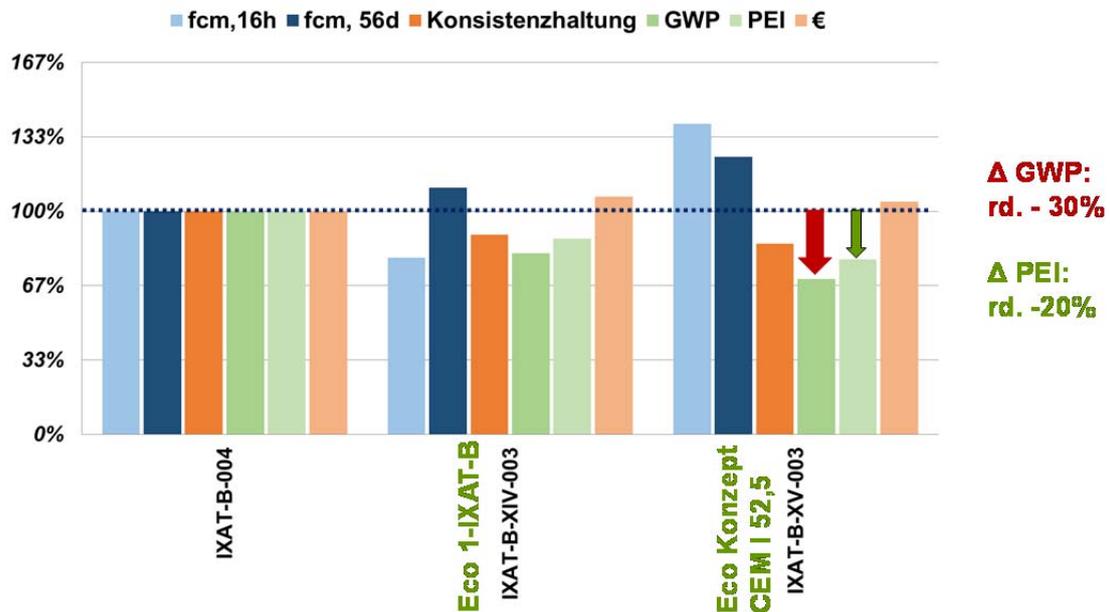


Abbildung 22: Vergleich von Varianten eines C 25/30 (56) Innenschalenbetons GK 16

Temperaturentwicklung – Tunnelinnenschalenbetone

Um die wichtige Anforderung einer moderaten Temperaturentwicklung einzuhalten, wurde diese an ausgewählten Mischungen überprüft. Dafür werden die Proben nach der Herstellung in wär-

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

megeädämmte Schalungen (Abbildung 23) mit einem mittigen Temperaturfühler eingebaut und die Temperatur am Frischbeton und im Zuge der Erhärtung laufend gemessen. Beurteilungsgrundlage nach ONR 23303:2010 [38] ist der Temperaturanstieg, der sich aus der Differenz zwischen der höchsten Betontemperatur und der Frischbetontemperatur errechnet.

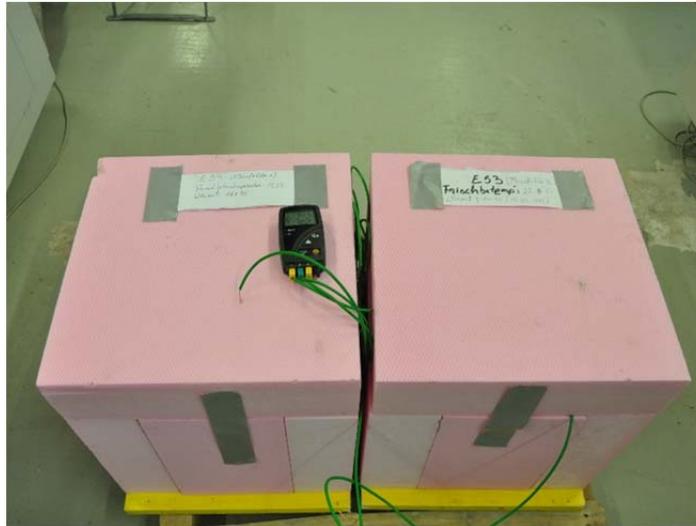


Abbildung 23: Versuchsaufbau für die Messung des Temperaturanstiegs im Beton

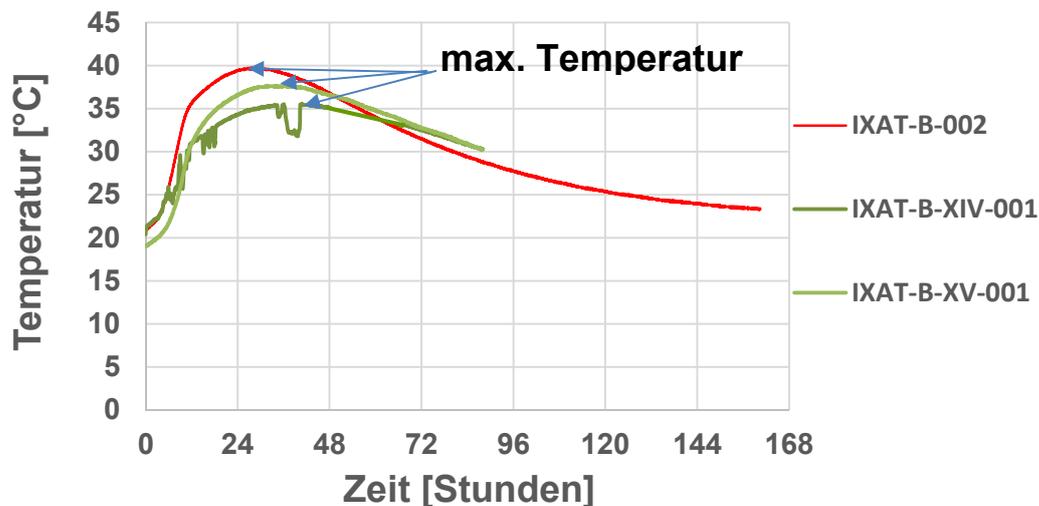


Abbildung 24: Temperaturverlauf in den untersuchten Tunnelinnenschalenbetonen

Der Temperaturverlauf des Referenzbetons (rot in Abbildung 24) und von 2 verschiedenen Ökobetonen (jeweils grün in Abbildung 24) und der maximale Anstieg sind Abbildung 24 und Abbildung 25 zu entnehmen. Es ist erkennbar, dass der Referenzbeton einen höheren Temperaturanstieg als die beiden Ökobetone hat, aber alle unter der Anforderung für IXAT-B ($\leq 27K$) und auch BS1-A ($\leq 21 K$) bleiben. Zusätzlich ist auch ersichtlich, dass sich der Zeitpunkt der maximalen Temperatur der Ökobeton Probekörper verschiebt und die maximale Temperatur später erreicht wird als beim Referenzbeton.

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

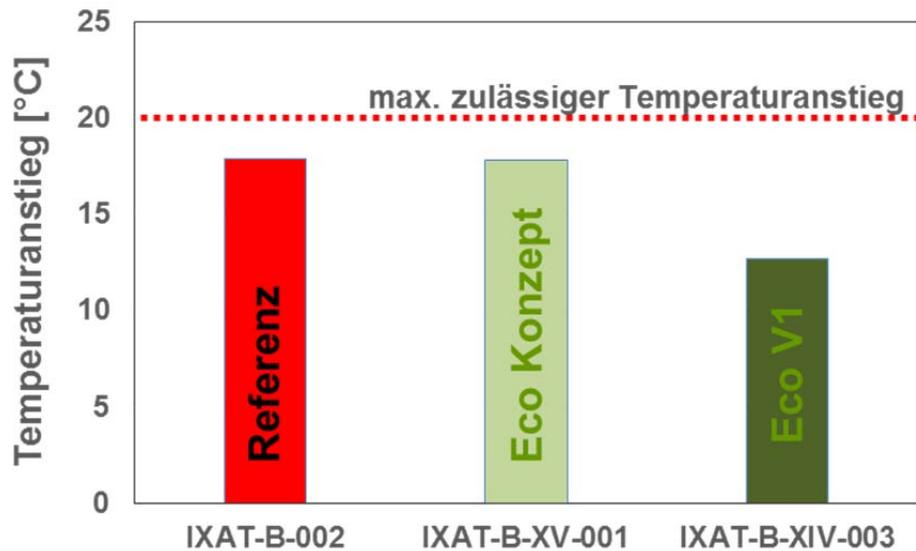


Abbildung 25: Temperatureinstieg in den untersuchten Tunnelinnenschalenbetonen

Somit zeigt der Ökobeton (IXAT-B-XIV-003) bestehend aus C₃A-freiem Zement (60%), AHWZ (33%) und feinstem Quarzmehl (7,5%) ein deutlich geringeres Temperaturmaximum als der Referenzbeton (AHWZ 18%). Interessant ist, dass ein Ökobeton (IXAT-B-XV-001) aus CEM I 52,5 R (50%) mit einem hohen Zusatzstoffanteil (AHWZ 43%) und feinstem Quarzmehl (7,5%) den gleichen Temperaturanstieg aufweist wie der Referenzbeton.

In Abbildung 26 wird gezeigt, dass die definierten Mindest-Ausschalfestigkeiten von (2 bis) 3 N/mm² nach 12 Stunden sowohl vom Referenz- Beton (IXAT-B-004) als auch von Öko-Betonen (IXAT-B-XIV-003 und IXAT-B-XXVII) eingehalten werden. Auch alle anderen Öko-Betone, die im Rahmen der Tunnelinnenschalen-Betonentwicklung untersucht wurden, weisen nach 16 Stunden ausreichend hohe Druckfestigkeiten auf, um die Ziel -12h-Stunden -Druckfestigkeiten zu erreichen.

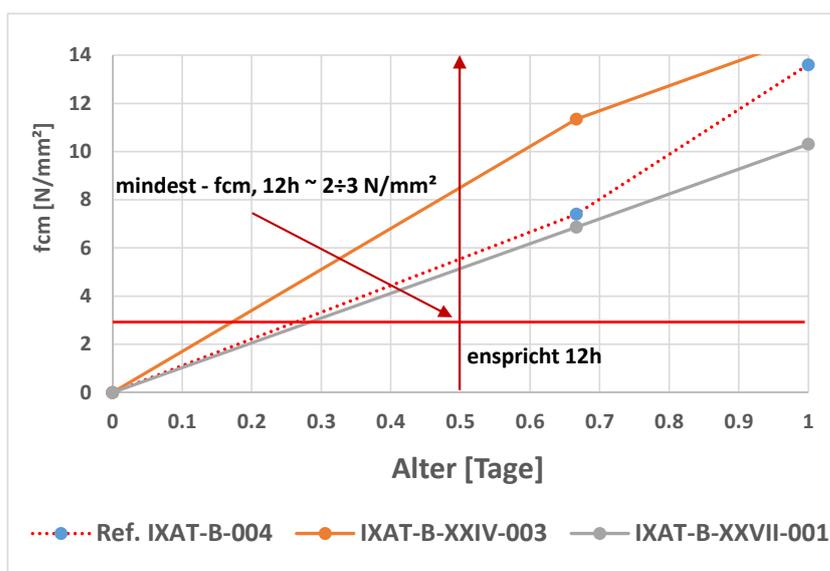


Abbildung 26: Festigkeitsentwicklung von Varianten eines C 25/30 + Tunnelinnenschalenbetons

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

Schwinden und E-Modul

Abbildung 27 zeigt den Mess-Aufbau und den Verlauf der Schwinddehnungen der untersuchten Innenschalenbetone. Das Schwinden wurde gemäß ONR 23303 an Prismen 100/100/400 mm bis zu einem Alter von knapp 6 Monaten gemessen [38].

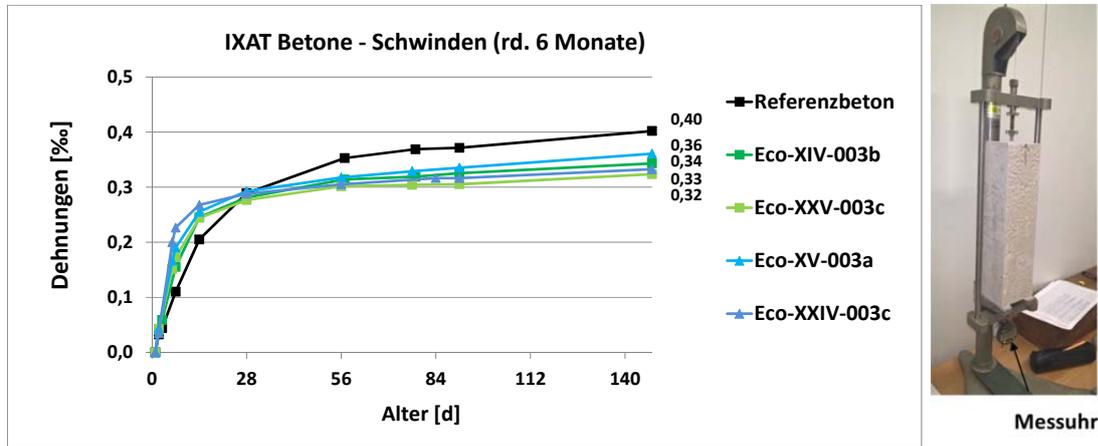


Abbildung 27: Verlauf der Schwinddehnungen der untersuchten Innenschalenbetone

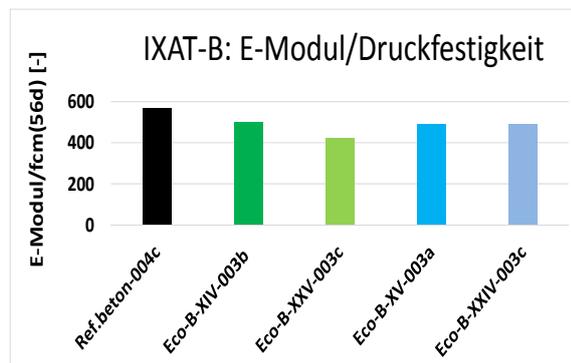
Öko-Betone schwinden in den ersten Tagen schneller (was auf den niedrigeren Wasser/Pulver-Wert zurückzuführen sein dürfte), bereits am 28. Tag etwas weniger und nach rund 6 Monaten deutlich weniger als der Referenzbeton IXAT-B-004c.

An denselben Prismen wurde nach Beendigung der Schwindmessungen der E-Modul an n=2 Proben je Variante ebenfalls gemäß ONR 23303 geprüft. Tabelle 16 und Abbildung 28 zeigen die Ergebnisse. Es wurde auch das Verhältnis von E-Modul zur Druckfestigkeit der Betone nach 56d ermittelt, um ein normiertes Maß für die Rissneigung der Betone im Vergleich erhalten zu können. ES zeigt sich, dass dieses Verhältnis bei den Ökobetonen geringer ist als beim Referenzbeton, was auf eine verminderte Rissneigung schließen lässt.

Tabelle 16: E-Modul und Verhältnis E-Modul/f_{cm}(56d) der Tunnelinnenschalenbetone

Beton (rd. 6 Monate)	E-Modul Mittelwert (n=2) N/mm ²	E-Modul/f _{cm,c} (56d) [-]
Ref.beton-004c	34560	566,2
Eco-B-XIV-003b	37443	500,4
Eco-B-XXV-003c	40379	421,6
Eco-B-XV-003a	38115	489,2
Eco-B-XXIV-003c	43017	490,5

Abbildung 28: Verhältnis E-Modul/56 Tage Druckfestigkeit der Tunnelinnenschalenbetone



Innenschalenbeton Rezepturvorschlag

Die Tabelle 17 zeigt die Zusammensetzungen, Rezepturkennwerte, Frisch- und Festbetoneigenschaften, ökologische Indikatoren (GWP und PEI) und abgeschätzte Kosten des Referenz-Tunnelinnenschalenbetons und einer vorgeschlagenen Variante eines Öko-Betons IXAT-B.

Tabelle 17: Vorschlag Rezeptur Tunnelinnenschalenbeton C 25/30 (56) Eco und deren Kennwerte

		„Standard“- Beton IXAT-B-004	Öko-Beton IXAT-B-XIV- 003
CEM : EF1 : MF1	M %	100:00:00	60:32,5:7,5
Cem I 42,5 R WT 33 C ₃ A frei	kg/m ³	274,3	218,5
Eco-Füller 1 (AHWZ) Supermix C* bzw. Hüttensand**		61,1*	118,3**
Mikro-Füller 1 (Quarz)		-	27,3
Sand (quarzitisch) 0/4		989,8	981,9
Kies (quarzitisch) 4/8		574,8	570,2
Kies (quarzitisch) 8/16		366,5	363,5
Gesamtwasser		175,0	169,6 (RRS)
Fließmittel (PCE) (Sika VC 4030)		3,06	2,64
Luftporenbildner Sika AER 200 S	-	0,063	0,035
W/B	-	0,54	0,54
V _w /V _p Wasser/Pulver (vol.)	-	1,41	1,255
Ausbreitmaß	mm	460	520
Druckfestigkeit 56 d	N/mm ²	62,7	69,3
offene Porosität	%	13,9/10,1	10,8
GWP	kg CO ₂ /m ³	237,0	192,3
PEI	MJ/m ³	1341,3	1175,6
Kosten	€/m ³	60,2	64,0

3.5.2 Nachweis der Dauerhaftigkeit

Generelle Vorgangsweise – performance based durability design

Das sogenannte „Equivalent Concrete Performance Concept (ECPC)“ wird genutzt, um nachzuweisen, dass ressourceneffizienter, ökologisch optimierter Beton oder „Eco-Beton“ mit reduziertem Klinkergehalt einem Referenzbeton nach deskriptiver Norm in Hinblick auf seine Dauerhaftigkeit gleichwertig ist¹. Das Konzept sieht vor, für die Expositionsklassen relevante Dauerhaftig-

¹ Das in der neuen EN 206-1: 2014 vorgesehene Konzept für die Betonleistungsfähigkeit lässt prinzipiell zu, dass vom deskriptiven Ansatz mit der Vorgabe der Betonzusammensetzung - wie zum Beispiel des maximal zulässigen W/B-Wertes oder des Mindestzementgehalts – abgegangen wird. Für Betone mit nicht dementsprechender Zusammensetzung kann die Leistungsfähigkeit durch vergleichende Prüfungen mit Betonen, die nach dem deskriptiven (alten) Konzept der Norm zusammengesetzt sind („Referenzbetone“), nachgewiesen werden. Das bedeutet, dass insbesondere die Dauerhaftigkeit durch das „performance based durability design“ nachgewiesen wird. Verfahren zum Nachweis der Betonleistungsfähigkeit finden sich einerseits bereits jetzt in den ÖBV-Richtlinien, deren Betonzusammensetzungen ja auch zum Teil von den

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

keitsindikatoren mit geeigneten Prüfverfahren im Vergleich der Betone zu prüfen. In Abbildung 29 wird das Konzept des Nachweises und die durchzuführenden Untersuchungen gezeigt.

Zunächst wird das Anforderungsprofil an den ressourceneffizienten Beton (REB; Prüfbeton) festgelegt und entschieden, für welche Expositionsklasse er angewendet werden soll. Nach der Rezeptentwicklung wird der Prüfbeton im Vergleich zum Referenzbeton hinsichtlich der Frischbetoneigenschaften und Druckfestigkeiten nach 28 Tagen geprüft, siehe Kapitel 3.5.1. Zeigt der Prüfbeton vergleichbare oder bessere Ergebnisse, wird im direkten Prüfverfahren die gleichwertige Leistung in Bezug auf die Beständigkeit für die jeweilige Expositionsklasse getestet. In weiterführenden Arbeiten am Institut wird untersucht, ob auch indirekte Prüfverfahren, wie die Messung der Porosität, zur hinreichenden Beurteilung der Dauerhaftigkeit herangezogen werden können¹.

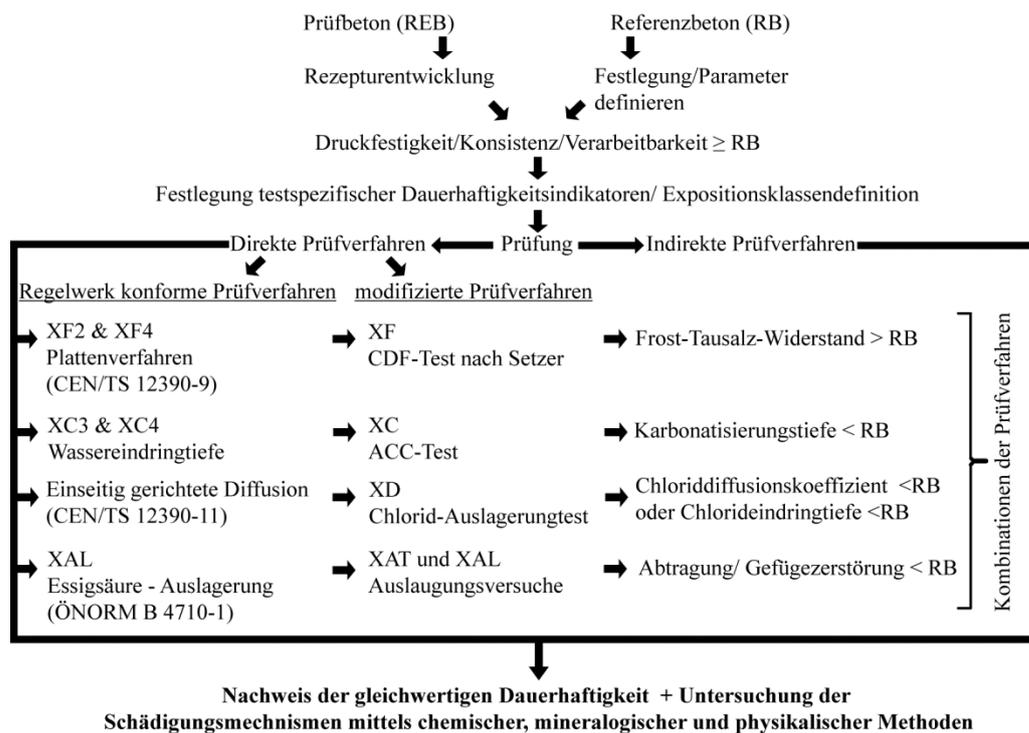


Abbildung 29: Schema zur Bestimmung der Dauerhaftigkeit eines Ressourcen-optimierten Betons

Vorgaben der ÖNORM B 4710-1 (nationale Anwendung der EN 206-1 in Österreich) abweichen, und auch in anderen europäischen Ländern. Die europäische Normung bemüht sich aktuell um einheitliche Festlegungen für das ECPC.

¹ Für ein besseres Verständnis sollen neben den Anwendungen der beschriebenen Prüfverfahren in einer geplanten weiterführenden Arbeit (Dissertation) die grundlegenden Schädigungsmechanismen mittels verschiedener Analysemethoden untersucht werden. Dazu zählen sowohl einfache Analysen durch die Verwendung von Indikatorlösungen als auch aufwändige Methoden wie die Elektronenstrahl-Mikrosonde und andere chemisch-mineralogische Untersuchungen. Damit könnten chemisch-physikalische Indikatoren identifiziert werden, die maßgebend für die Dauerhaftigkeit sind. Auf Basis dieser Ergebnisse wird es möglich sein, die Aussagekraft möglicher „übergeordneter“ Dauerhaftigkeitsindikatoren zu bewerten sowie die direkten Prüfverfahren zu kombinieren.

Übersicht durchgeführter Untersuchungen und Methoden

In Tabelle 18 sind alle Prüfverfahren aufgezeigt, die im Rahmen des Nachweises der Dauerhaftigkeit durchgeführt werden. Es handelt sich um direkte und teilweise beschleunigte Prüfverfahren in Bezug auf die Beständigkeit für die jeweilige Expositionsklasse, die in einem kurzen Projektzeitraum von 2 Jahren durchgeführt werden konnten.

Tabelle 18: Übersichtsdarstellung der durchgeführten Dauerhaftigkeitsprüfungen (Anzahl n der untersuchten Betone/Rezepte in Klammer)

Prüfung		Tragwerksbeton „B5“	Innenschalenbeton „IXAT-B“
Frostbeständigkeit	CDF-Test	X (n = 12)	-
	XF2	X (n = 8)	-
	XF3	-	X (n = 4)
Karbonatisierung - Wassereindringtiefe	XC4 (neu XW)	X (n = 12)	X (n = 4)
Karbonatisierung - ACC-Test	XC4 (28 Tage)	X (n = 12)	X (n = 1)
	Langzeitlagerung	X (n = 12)	X (n = 1)
Chlorideindringung	XD	X (n = 3 in Arbeit)	-
chemische Bestän- digkeit	XAT (Sulfatangriff)	-	X (n = 13)
	XAL (Kohlensäureangriff)		X (n = 3 in Arbeit)
	XAL (pH _{stat} = 3,5 < 4,0)		X (n = 13)
Porosität	Offene und Gesamtporosität	X (n = 13)	X (n = 18)
	L300 und AF	X (n = 7)	X (n = 1)

Für eine statistische Auswertung der Daten werden in den einzelnen Prüfverfahren 3-5 Probekörper geprüft. Eine Regelung mit 5 zu untersuchenden Probekörpern ist nur für den CDF-Test nach Setzer [46] vorgesehen. Für die Prüfung der Porosität nach ÖN EN 1936 sind jeweils 4 Probekörper vorgesehen. Bei allen anderen Prüfverfahren werden wie in ONR 23303 [38] üblich - 3 Probekörper herangezogen. Streuungen werden für die jeweilige Anzahl von Probekörpern ermittelt. In den folgenden Abschnitten sind die Methoden der Durchführung der einzelnen Verfahren beschrieben. Es folgt die Methodenbeschreibung jedes einzelnen Verfahrens und dann die Darstellung der Ergebnisse.

Exposition XC (Dichtheit des Gefüges und Karbonatisierung)

Für die Bestimmung der Karbonatisierung werden zwei Verfahren angewendet. Zum einem die indirekte Prüfung der Wassereindringtiefe und zum anderen die direkte Prüfung der beschleunigten Karbonatisierung nach dem ACC-Test [44].

Die Bestimmung der Wassereindringtiefe wird gemäß ONR 23303:2010 [38] durchgeführt. Dabei wird Wasser unter definiertem Druck auf die Oberfläche des Probekörpers aufgebracht, nach 14 Tagen wird der Probekörper gespalten und die mittlere Wassereindringtiefe gemessen.

Für die direkte Prüfung wird der sogenannte ACC-Test (*accelerated carbonation test*) verwendet, der im „Model code for Service Life Design“ [44] beschrieben wird. Bei diesem ACC-Test werden der Prüfbeton und der Referenzbeton in eine Klimakammer bei 20°C, 65% Luftfeuchtigkeit und bei einer hohen CO₂-Konzentration von 2% gelagert. Nach 28 Tagen werden die Prüfkörper gespalten und die Karbonatisierungstiefe wird mit einer Indikatorlösung (Phenolphthalein) bestimmt (Abbildung 30). Zusätzlich zu den im „Model code for Service Life Design“ [44] regulär

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

vorgesehenen 28 Tagen Auslagerungsdauer in der CO₂-Kammer, werden die gespaltenen Probekörperhälften wieder zurück in die CO₂-Kammer gegeben und es wird die Karbonatisierungstiefe fallweise noch nach 56, 84, 112, 140, 168 und 196 Tagen bestimmt.

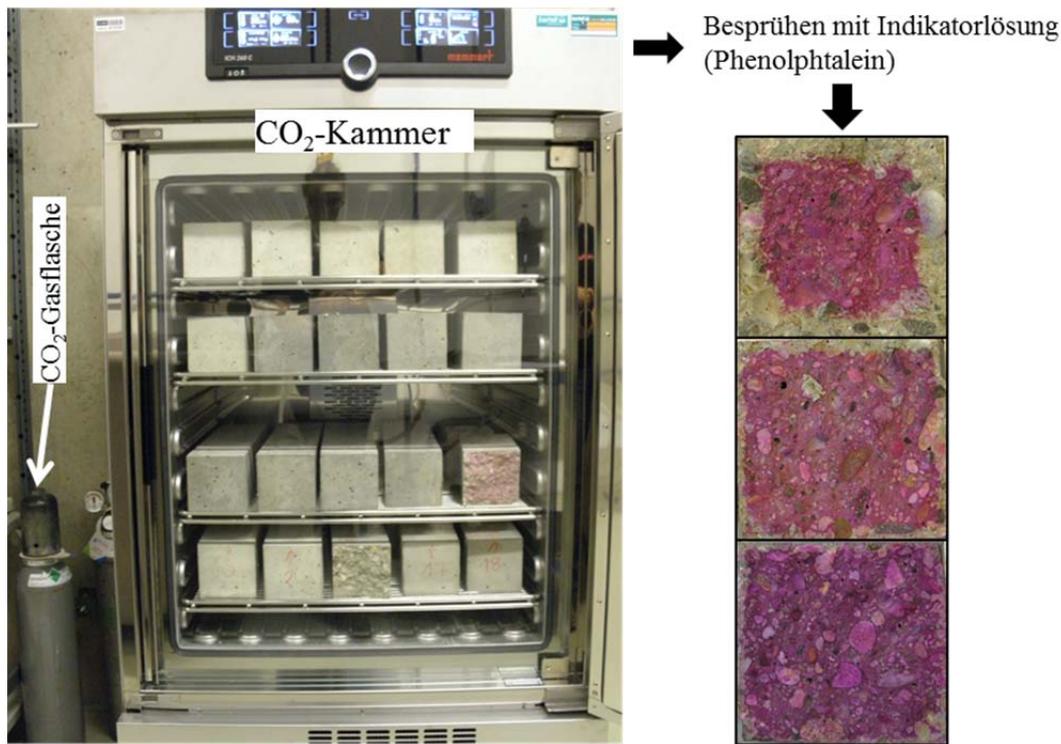


Abbildung 30: Zur Methode zur Bestimmung der Karbonatisierung nach dem ACC-Test

Exposition XF (Frostbeständigkeit)

Die **Frostbeständigkeit** der ressourceneffizienten Betone im Vergleich zu einem Referenzbeton kann prinzipiell für die Expositionsklasse XF1 mittels des Würfelprüfverfahrens der ONR 23303 [38] und für die Expositionsklasse XF3 mittels der Balkenprüfung der ONR 23303 [38] nachgewiesen. Bei dem Würfelprüfverfahren werden die Probekörper in entionisiertes Wasser getaucht und durchlaufen 56 Frost-Tau-Wechsel zu je 24 h. Dabei werden Maxima von +20°C und Minima von -15°C durchlaufen. Das Beurteilungskriterium ist die Abwitterungsmasse nach 56 Tagen [38]. Die Balkenprüfung dauert 28 Tage, mit 56 Frost-Tau-Wechseln zu je 12 Stunden. Die Extrem-Temperaturen von +20°C bis auf -20°C werden durchlaufen. Nach Ende der Frost-Tau-Wechsel wird die innere Gefügeschädigung mittels Messung der Schalllaufzeit bzw. Resonanzfrequenz und zusätzlich des Masseverlustes bestimmt [38].

Für den Nachweis der **Frost-Taumittel Beständigkeit** werden im Rahmen des Projektes vergleichend 2 Prüfverfahren angewandt. Zum einen das Plattenprüfverfahren gemäß ONR 23303:2010 [38] für die Expositionsklassen XF2 und XF4 und zum anderen der wesentlich beschleunigte CDF-Test (*Cappillary Suction of De-Icing Solution and Freeze-Thaw Test*) gemäß Setzer [46] und [47], der voraussichtlich für Prüfungen nach dem ECPC (equivalent concrete performance

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

concept) empfohlen werden wird¹. Bei dem Plattenprüfverfahren durchläuft der Beton 56 Frost-Tau-Wechsel, die je 24 Stunden dauern. Die 3%ige NaCl-Lösung befindet sich dabei oben auf der Prüffläche des Betons. Die Beurteilung der Frost-Tau Beständigkeit erfolgt über die Ermittlung der Abwitterungsmasse [38]². Beim CDF-Test unterliegt der Beton ebenfalls einer Beanspruchung durch eine 3%ige NaCl-Lösung. Bei dieser Prüfung steht jedoch die Prüffläche in der Lösung, sodass die Lösung kapillar von unten aufgesaugt werden muss. Sie wird in einem Klimaschrank 28 Frost-Tau-Zyklen von je 12 Stunden ausgesetzt, [46]. Dabei werden die Probekörper Temperaturen von +20°C bis -20°C unterzogen. Die Ermittlung der Frost-Taumittel-Beständigkeit erfolgt über die Bestimmung der Abwitterungsmasse und muss unter einem festen Grenzwert von 1500 g/m² für die Frostbeständigkeit gemäß Expositionsklasse XF4 liegen. Für die Expositionsklasse XF2 ist beim CDF Verfahren kein Grenzwert festgelegt, für einen Vergleich zwischen Referenzbeton und Prüfbeton (Ökobeton) kann das Verfahren aber trotzdem gut herangezogen werden.

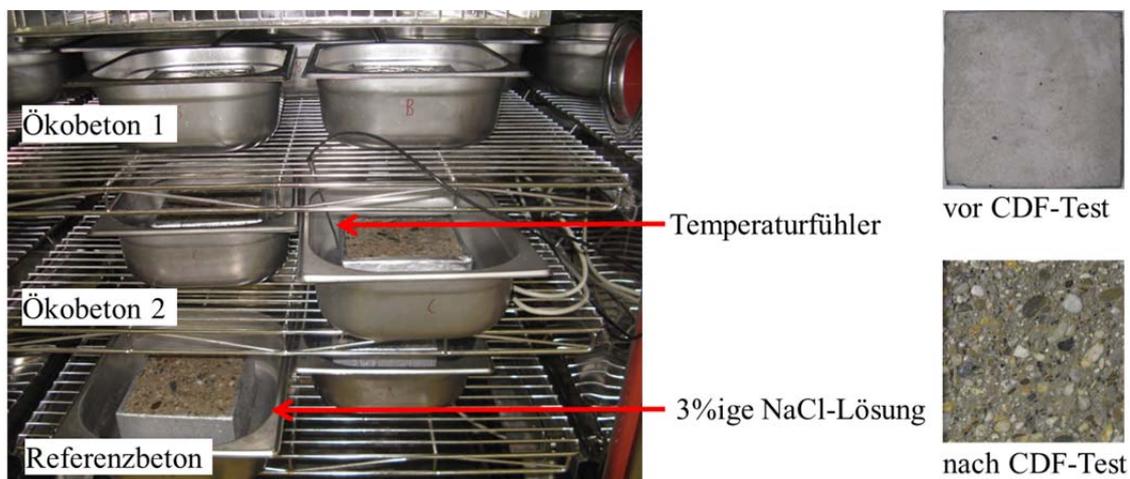


Abbildung 31: Klimaanlage mit Ökobetonen und dem entsprechenden Referenzbeton. Die Proben werden für den CDF-Test in einer 3%igen NaCl-Lösung gelagert.

Exposition XD (Eindringung von Chloriden)

Für den Nachweis der Expositionsklasse XD werden die Ökobetonen und Referenzbetone zwischen 6 bis 12 Monate in einer 3%igen NaCl-Lösung gelagert und miteinander verglichen. Alle zwei bis vier Wochen wird ein Lösungsaustausch durchgeführt, damit ein dauerhaft und konstant starker Angriff simuliert wird. Des Weiteren werden laufend Flüssig- und Feststoffproben entnommen und mit verschiedenen Analysemethoden untersucht.

Die erste, grobe Beurteilung der Chlorideindringung im Vergleich der Probekörper erfolgt durch Aufsprühen einer Indikatorlösung (Silbernitrat) auf die frischgebrochene Oberfläche [48]. Für eine genaue Bestimmung der Chlorideindringung in den Beton wird von einem zylindrischen Probekörper in mehreren Tiefen Bohrmehl genommen und auf den Chlorid Gehalt hin untersucht. Es werden Doppelbestimmungen an je 2 gleich alterierten Zylindern gemacht und so Chlorid-

¹ Gemäß CEN/TR 16563: Principles of the equivalent durability procedure (unveröffentlicht, in Arbeit)

² Gemäß ONR 23303 wird die Abwitterung des Prüfbetons mit jener eines nach in der Norm vorgegebener Zusammensetzung hergestellten „Nullbetons“ verglichen. Es gibt unterschiedliche Nullbetonzusammensetzung für die Klasse XF2 und für die Klasse XF4.

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

Tiefenprofile aufgenommen. Aus diesen Tiefenprofilen ist es möglich, den Chloriddiffusionskoeffizienten zu ermitteln mit dem die Leistungsfähigkeit bzw. der Widerstand von Betonen über Jahre hinweg beurteilt werden kann. Für ein detailliertes Prozessverständnis und um die Chlorideindringtiefe sehr genau festzustellen, werden in weiterführenden Arbeiten ausgewählte Proben mit der Elektronenstrahl-Mikrosonde untersucht.

Zusätzlich wird im Rahmen einer weiterführenden Masterarbeit [61] am Institut an einer Serie geprüft, ob der Chloriddiffusionskoeffizient auch direkt aus der Angriffslösung in Kontakt mit dem Prüfbeton in einem Schnellverfahren bestimmt werden kann. Basierend auf der Arbeit von Park et al. [69] wird in den ersten 14 Tagen die Lösung aus den luftdichtverschlossenen Behältern entnommen und auf den Chlorid Gehalt mit der Ionenchromatografie hin untersucht. Aus der daraus resultierenden Kurve, die den abnehmenden Chloridgehalt über die Zeit zeigt, wird laut Park et al. [69] der Chloriddiffusionskoeffizient bestimmt. Diese Ergebnisse werden mit den Ergebnissen aus der Langzeitauslagerung verglichen. Für zukünftige Nachweise der Dauerhaftigkeit umweltfreundlicher Betone (bzw. von Betonen generell) sollten Prüfmethoden nach Möglichkeit kombiniert werden. So wird in der Masterarbeit [61] untersucht werden, ob der CDF-Test für eine kombinierte Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes und des Widerstandes gegen das Eindringen von Chlorid-Ionen angewendet werden kann. Hierfür werden die Probekörper zum Nachweis der Expositionsklasse XD auch dem CDF-Test unterzogen¹

Exposition XAL (chemisch lösender Angriff)

Angriff mittels Essigsäure (Prüfverfahren nach ÖNORM B 4710-1; Anhang K)

Für die Simulation des lösenden Angriffes wird ein Prüfverfahren aufbauend auf dem Prismen-Verfahren aus der ÖNORM B 4710-1:2007, Anhang K [26] leicht modifiziert verwendet. Hierfür werden nach 56 Tagen 8 Probekörper (40 x 40 x 150 mm) abgeschliffen, abgemessen, gewogen und fotografiert. Bei Start der Prüfung werden vier Probekörper jeder Serie in Kunststoffbehälter gelegt. In diesen Behältern befinden sich ein Magnetrührer und die Angriffslösung, bestehend aus Wasser homogenisiert mit 10% einer 80%igen Essigsäure. Zur Beurteilung des genauen Verbrauchs der Essigsäure und zur Aufzeichnung des pH-Wertes wird für jede Box ein Titrator verwendet. Durch das laufende automatische Titrieren von 80%iger Essigsäure kann sichergestellt werden, dass der pH-Wert über den gesamten Versuchszeitraum von 21 Tagen konstant bei 3,5 liegt. Der Aufbau ist in Abbildung 32 dargestellt. Parallel lagern vier Probekörper jeder Serie in Leitungswasser und dienen als Vergleichsbetone. Nach Versuchsende werden alle acht Prüfkörper entnommen und die losen Teile durch Bürsten entfernt. Die Beurteilung erfolgt über die Bestimmung des Massenverlustes, die Biegezugbruchlast, den theoretischen Bruchquerschnitt, den Querschnittsverlust bzw. den ungeschädigten Querschnitt mittels Besprühen mit einer Phenolphthalein-Lösung.

¹ . Zudem wurde mit einer gegenüber der Prüfvorschrift von [25] erhöhten NaCl-Lösungskonzentration (10% statt 3%) gearbeitet und die Chlorideindringtiefe sollte mit und ohne Frost-Tauwechselbeanspruchung vergleichend bestimmt werden. Die ersten Ergebnisse zeigten aber, dass aufgrund des stark abgesenkten Gefrierpunkts der 10%igen NaCl-Lösung gegenüber der 3% NaCl-Lösung mit tieferen Temperaturen als in der Prüfvorschrift für 3% vorgesehen gearbeitet werden müsste um die Lösung während des Frostens beim CDF-Test vollständig zu frieren. Ein direkter Vergleich zwischen 3%iger und 10%iger NaCl Lösung im CDF Verfahren ist deshalb nicht möglich.

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

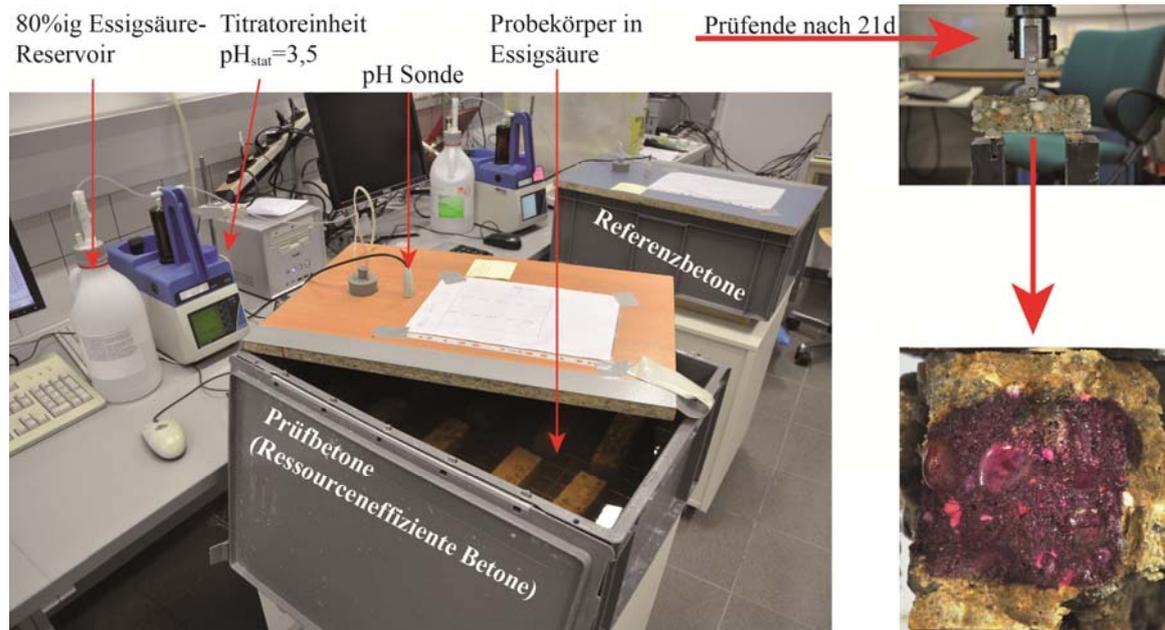


Abbildung 32: experimenteller Aufbau zum Nachweis des lösenden Angriffes mittels des modifizierten Prismen-Verfahrens nach ÖNORM B 4710-1:2007; Anhang K [26]

Exposition XAT

Für die Simulation des treibenden Angriffes XAT wird das vom „Deutschen Ausschuss für Stahlbeton“ vorgeschlagene „SVA“-Verfahren angewandt [49]. Bei der Anwendung des SVA-Verfahrens werden kleinere Modifikationen (=Verbesserungen) vorgenommen. So werden statt Flachprismen als Probekörper aus größeren Körpern erbohrte Zylinder mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Höhe von 160 mm Abbildung 33 verwendet. Dadurch erfolgt der Angriff auf einen Prüfkörper ohne Randeinflüsse (bzw. auf von der Schalung beeinflusste Inhomogenität der Zusammensetzung) und weitgehend axialsymmetrisch.

Die Probekörper werden nach 56 Tagen Vorbehandlung, gemäß dem SVA-Verfahren, für 14 Tage in einer gesättigten $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung gelagert bevor die Probekörper anschließend in 3 Gruppen geteilt werden. Gruppe 1 dient als Referenzprobe und lagert über den Versuchszeitraum weiter in einer $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung, während Gruppe 2 bei 20°C und Gruppe 3 bei 5°C in 5% Na_2SO_4 lagert. Diese dem beschriebenen SVA-Verfahren gegenüber erhöhte Sulfatkonzentration (5% statt 4,4%) spiegelt einen deutlich stärkeren Angriff wieder. Für ein möglichst starkes Angebot an Sulfationen wird in einem 2-4 wöchigem Rhythmus die Angriffslösung ausgetauscht. Über den kompletten Versuchszeitraum hinweg werden zyklisch der pH-Wert und die Leitfähigkeit gemessen.

Gemäß dem SVA-Verfahren ist der entscheidende Indikator zur Beurteilung der Sulfatbeständigkeit die Längenänderung nach 91 Tagen. Demnach wird die Dehnungsdifferenz zwischen den Probekörpern in der Sulfatlösung und jenen in der $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung bestimmt. Ist diese Dehnungsdifferenz $< 0,5 \text{ mm/m}$, ist ausreichender Sulfatwiderstand gegeben [49]. Um zu verfolgen, wie sich die Länge über die Versuchszeit ändert, werden in unserem Fall die Längenänderungen bei allen Probekörpern etwa alle zwei Wochen gemessen. (Ab dem 56ten Tag wird die Längenänderung öfter bestimmt, um plötzliche Änderungen rechtzeitig bemerken zu können). Falls bis zum 91 Tag keine signifikanten Längenzunahmen (=Treiberscheinungen) festgestellt werden, wird die Versuchsreihe auf unbestimmte Zeit erweitert.

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

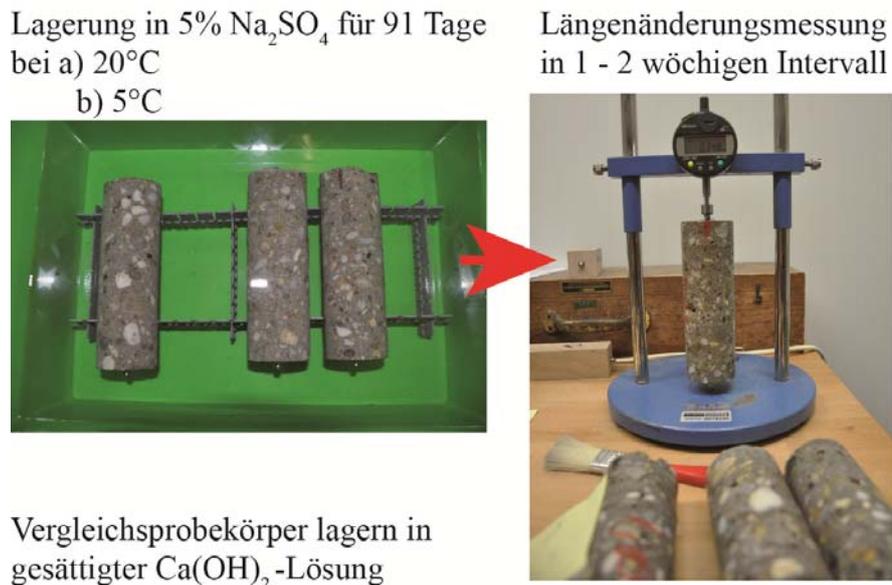


Abbildung 33: Methode zum Nachweis des treibendem Angriffes nach dem SVA-Verfahren; links: Lagerung; rechts: Messung der Längenänderung [49]

Ergebnisse

Exposition XC

In Abbildung 34 sind die Ergebnisse der Wassereindringtiefe einschließlich ihrer Standardabweichung für die Tragwerksbetone B5 mit natürlicher Gesteinskörnung zu sehen. Aus der Abbildung geht hervor, dass die Ökobetone gleichwertig sind bzw. im Fall von OB5-XXXIX-001 (Feinstkornzusammensetzung M%: CEM I 52,5R (65%), Kalkstein (30%), Dolomitmehl (5%)) und OB5-XL-001 (CEM I 52,5R (65%), AHWZ (15%), Kalkstein (15%), Dolomitmehl (5%)) eine deutlich geringere Wassereindringung haben als der Referenzbeton (CEM II 42,5 R (100%)). Zusätzlich erfüllen die Referenzbetone und Ökobetone die Anforderungen der ÖNORM B 4710-1 [2] und liegen deutlich innerhalb der Grenze von maximal 25 mm.

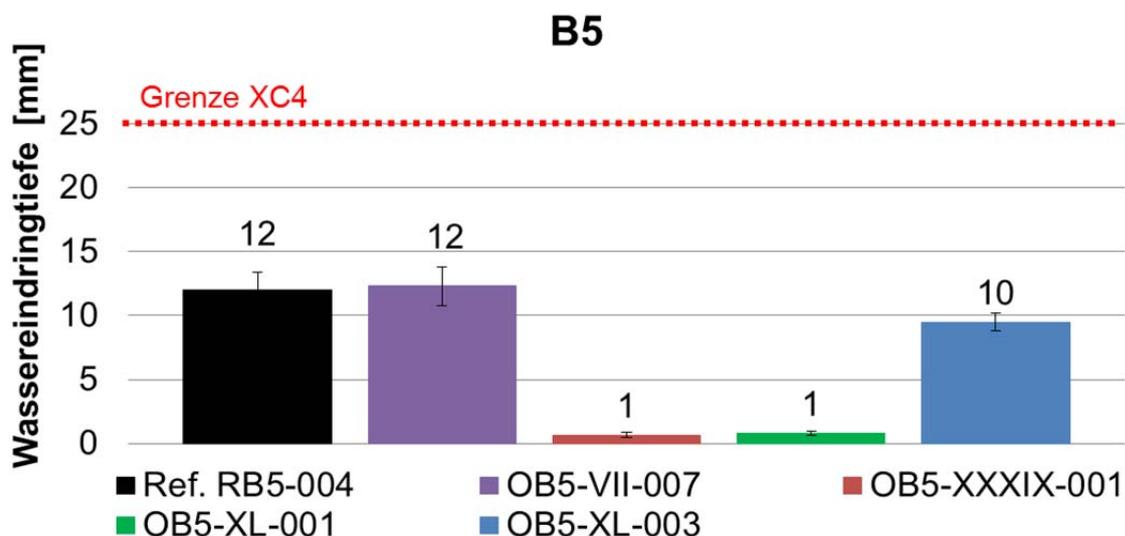


Abbildung 34: Wassereindringtiefen von B5 Betonen mit natürlicher Gesteinskörnung

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

Die Ergebnisse der Wassereindringprüfung (Abbildung 35) der Innenschalenbetone IXAT-B zeigen deutlich, dass die Eindringtiefen den Anforderungen der ÖBV-Richtlinie entsprechen, und unter der maximalen Grenze für die Erstprüfung von 20 mm liegen. Zusätzlich ist zu erkennen, dass die Ökobetone mit einer maximalen Eindringung von 1 mm eine deutlich geringere Eindringtiefe im Vergleich zum Referenzbeton (16 mm) haben.

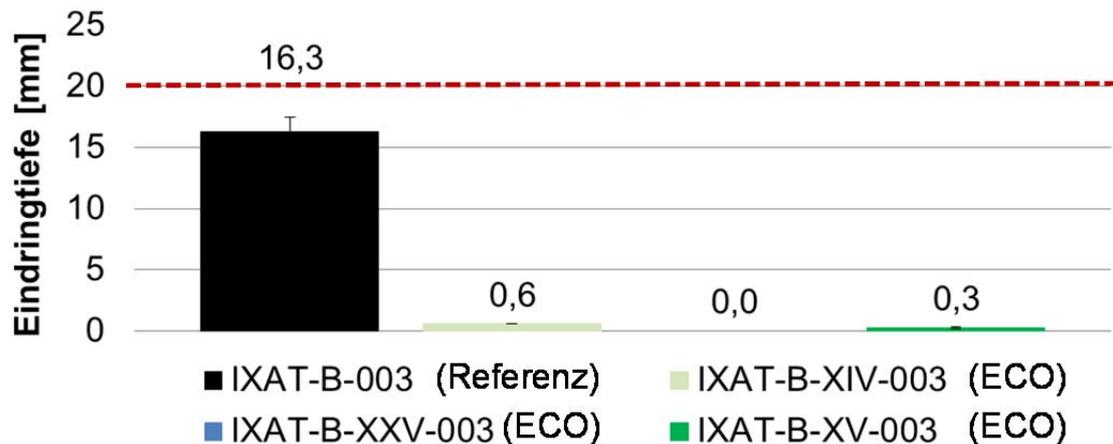


Abbildung 35: Wassereindringtiefen von den IXAT-B Betonen mit natürlicher Gesteinskörnung

Im Vergleich zu den Ergebnissen der Wassereindringtiefe wird auch die beschleunigte Karbonatisierung (ACC-Test) nach dem „Model Code for Service Life Design“ [44] an den B5 Betonen geprüft. Die Ergebnisse die in Abbildung 36 zusammenfassend dargestellt sind zeigen, dass 2 verschiedene Varianten an den Proben getestet wurden. Zum einem wurden die Referenz- und Ökobetone in zwei Serien geteilt, die sich durch einen unterschiedlichen Luftgehalt unterscheiden und zum anderen wurden die Proben länger als 28 Tage wie in [44] festgelegt bei 2% CO₂ gelagert und in regelmäßigen Abständen auf die Karbonatisierungstiefe hin geprüft.

Die Prüfung der Proben mit 2% CO₂ im Zeitraum der regulären 28 Tage zeigt, dass die Ökobetone gleichwertig bzw. deutlich besser sind als der Referenzbeton. Bei genauer Betrachtung der Referenzbetone (RB5-004) ist zu erkennen, dass die Ergebnisse kaum durch den Luftgehalt beeinflusst werden. Zudem zeigt sich an zwei zu unterschiedlichen Zeiten hergestellten Referenzbetonen (jeweils RB4-004 in Abbildung 36), dass durch den ACC-Test prinzipiell reproduzierbare Ergebnisse erhalten werden können.

Zusätzlich zur Prüfdauer in der Richtlinie [44] werden die Proben länger als 28 Tage bei 2% CO₂ gelagert. Dabei zeigen sich große Schwankungen am Beispiel des Verlaufs des Referenzbetons über die Zeit hinweg, aber auch die für die Karbonatisierung charakteristische Verlangsamung der Karbonatisierungsgeschwindigkeit mit der Zeit¹. An den aufgetragenen Standardabweichungen ist deutlich zu sehen, dass das Messen der Karbonatisierungstiefe an einer Stelle der Karbonatisierungsfrent je Seite mit einem relativ hohen Ablesefehler einhergeht. Um diese große Messunsicherheit zu verringern sollte zukünftig an einer Verfahrensverbesserung wie zum Beispiel mittels digitaler Bildauswertung gearbeitet werden.

¹ Dieser Trend verdeutlicht die Bildung einer inaktiven Korrosionszone während des Prüfverfahrens, welche die progressive Eindringung von CO₂ durch Reduzierung der Permeabilität und Porosität verlangsamt.

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

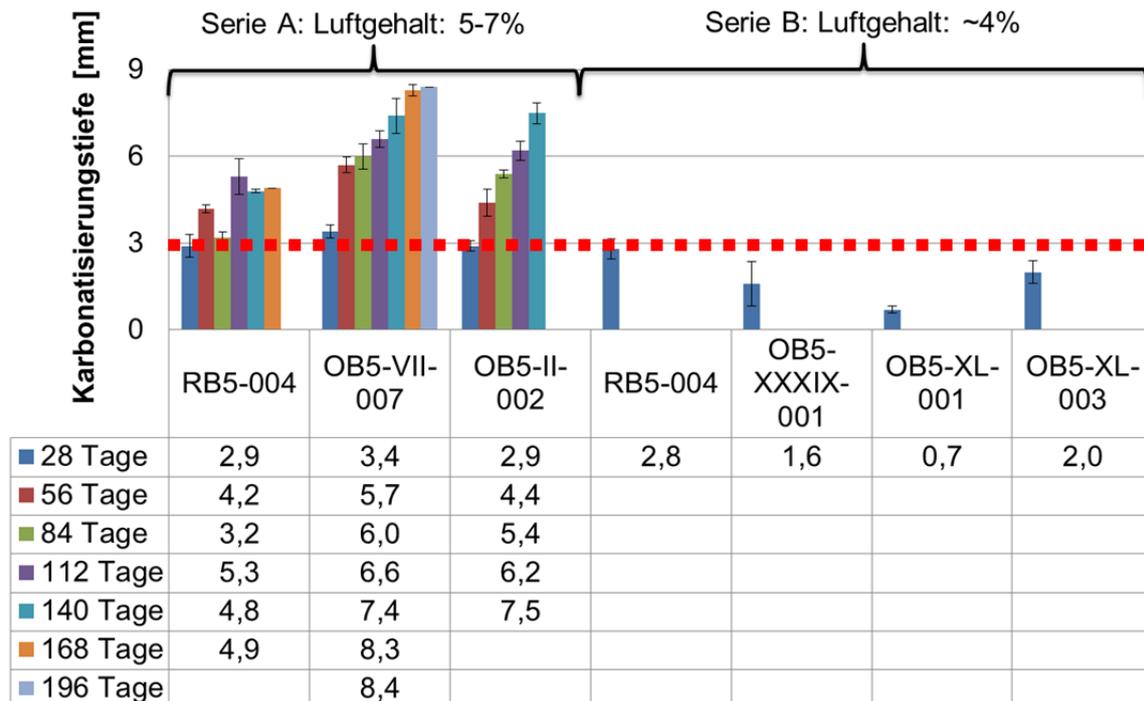
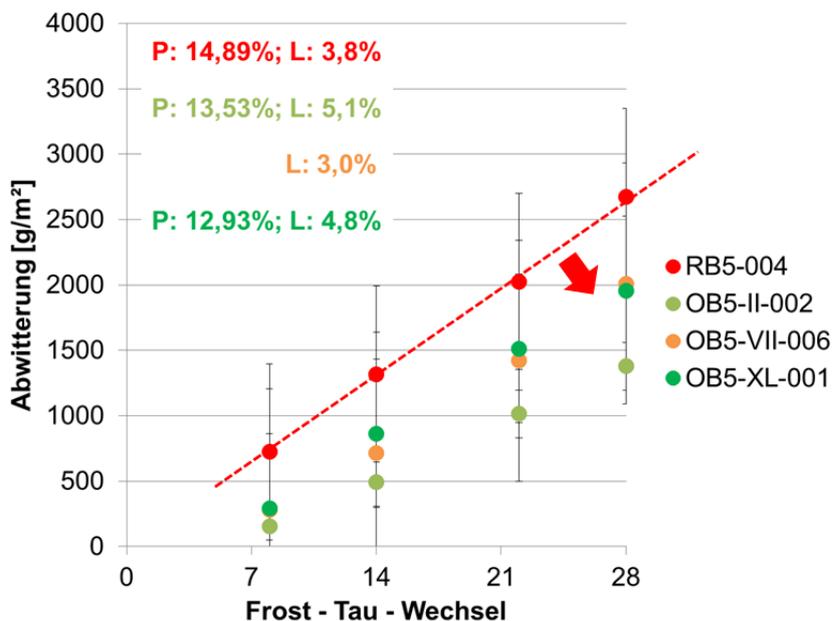


Abbildung 36: Karbonatisierungstiefe der B5 Betone bei 2% CO₂ Lagerung gemäß ACC-Test [44]

Exposition XF

Die durch den CDF-Test bestimmten Abwitterungsmassen der B5 Betone sind in Abbildung 37 aufgetragen. Bei diesen Proben wurde versucht einen annähernd gleichen Luftgehalt von rund 4% einzustellen. Dabei ist erkennbar, dass die Ökobetone eine zwischen 27% und 50% geringere Abwitterungsmasse haben als der Referenzbeton. Bei einigen Betonen wurden auch die XF2-Prüfung nach dem Plattenprüfverfahren nach ONR 23303:2010 [38] durchgeführt, die zu gleichwertigen Ergebnissen im Vergleich zum CDF-Test führten.



Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

Abbildung 37: Ergebnisse des CDF-Tests geprüft an den B5 Betonen

Zum Nachweis der Expositionsklasse XF3 wurde an den IXAT-B Betonen die Balkenprüfung (XF3 - Schalllaufzeitprüfung) [38] durchgeführt. In der Abbildung 38 ist zu erkennen, dass sowohl der Referenzbeton als auch der Ökobeton deutlich unter der Nachweisgrenze, die durch den Nullbeton nach ONR 23303:2010 [38] festgelegt wird, liegen. Zusätzlich zeigt der Ökobeton eine leicht bessere Performance als der Referenzbeton.

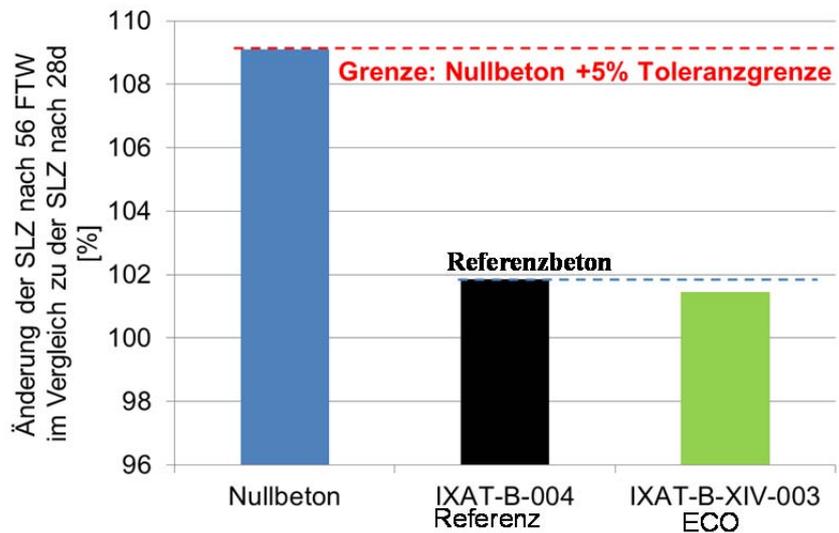


Abbildung 38: XF3 Ergebnisse der IXAT-Betone im Vergleich zum Nullbeton, der als Grenze nach ONR 23303:2010 [38] festgelegt ist

Exposition XD

Die Prüfung der Beständigkeit gegen Eindringen von Chlorid wurde an einem B5 Referenzbeton und zwei B5 Ökobetonen (OB5-XXXIX-001 und OB5-XL-001) in Kombination mit der CDF-Prüfung durchgeführt. Nach dem CDF Test wurden die B5 Proben gepaltes und mit Silbernitrat besprüht. Das Ergebnis in Abbildung 39 zeigt, dass die Chlorideindringung bei allen Proben etwa gleichwertig zum Referenzbeton ist. In weiterführenden Untersuchungen im Rahmen der bereits oben angesprochenen Masterarbeit [61] wird an diesen Proben auch Bohrmehl entnommen. Weiters wird parallel ein Diffusionstest durchgeführt.

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

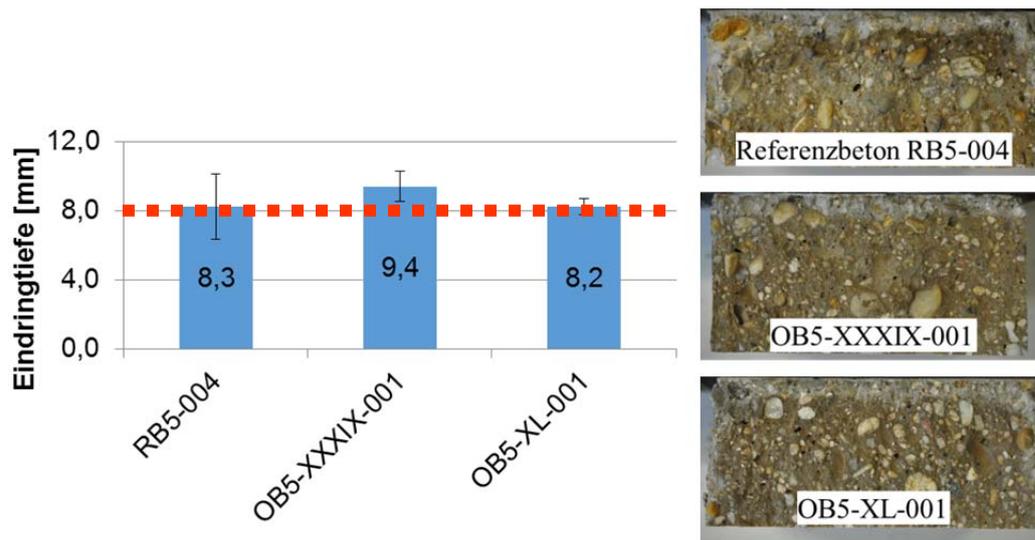


Abbildung 39: Ergebnisse vom Besprühen der gebrochenen CDF-Test Proben mit Silbernitrat

Exposition XAL

Angriff mittels Essigsäure (Prüfverfahren nach ÖNORM B 4710-1 [26])

Für die Prüfung des Widerstandes gegen den lösenden Angriff wird das Prismen-Verfahren nach ÖNORM B 4710-1 [26] verwendet. Für die Beurteilung werden dabei der Masseverlust, die Errechnung des theoretischen Bruchquerschnittes, der Tragfähigkeit (hier Tragfähigkeitsverlust) und des Querschnittsverlusts in % herangezogen. Dabei zeigen die Ergebnisse (Abbildung 40), dass die Rezeptur IXAT-B-XIV-003 mit 60% C₃A-freien Zement, 32,5% AHWZ und 7,5% Quarzmehl eine um ~11% bessere Leistung, im Vergleich zum Referenzbeton IXAT-B-004, aufweist. Zusätzlich wurde auch ein nicht Richtlinien-konformer Ökobeton „Eco-Konzept“ mit 50% CEM I 52,5R und 42,5% AHWZ Hüttensand und 7,5% Quarzmehl als Mikrofüller geprüft und gezeigt, dass bei diesem erhöhten Substitutionsgrad eine besonders verbesserte ökologische Performance im Vergleich zum Referenzbeton und sehr gute Beständigkeit gegen chemischen Angriff möglich ist (siehe Abbildung 22). Zum direkten Vergleich wurde auch ein „negativ Beton“ mit 100% CEM I 52,5R geprüft der damit aufzeigt, dass die Verwendung von reinem CEM I 52,5R anstelle von C₃A-freien Zement ohne AHWZ und Packungsdichteoptimierung mit einem Mikrofüller zu einer starken Verschlechterung der Beständigkeit im Vergleich zum Referenzbeton mit AHWZ (IXAT-B-004) führt. Somit kann ein positiver Einfluss der Zusatzstoffe bei optimierter Packungsdichte gezeigt werden¹. Eine weiterführende Arbeit dazu wird mit einer Masterarbeit am Institut vorgelegt werden [60].

¹ Anmerkung: Für ein besseres Verständnis des Einflusses der Zusatzstoffe während der Auslaugung bei geringem pH-Wert (<6) sollten weiterführende Analysen durchgeführt werden.

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

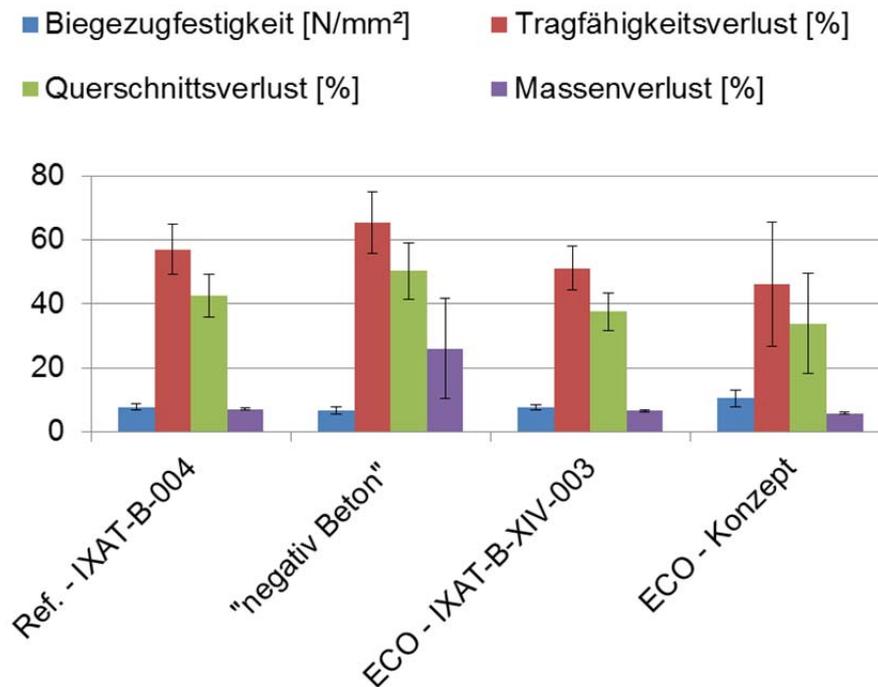


Abbildung 40: Ergebnisse zur Prüfung des Widerstandes gegen lösenden Angriff für Betone IXAT-B

In der folgenden Abbildung 41 sind Beispiele für Probekörper (Prismen 40/40/160mm) des Referenzbetons und im Vergleich dazu der ökologisch und hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit optimierten Eco-Betone IXAT-B-XIV-003 und „Eco-Konzept“ (IXAT-B XV-003) nach 3 wöchiger Lagerung in Essigsäure gezeigt.

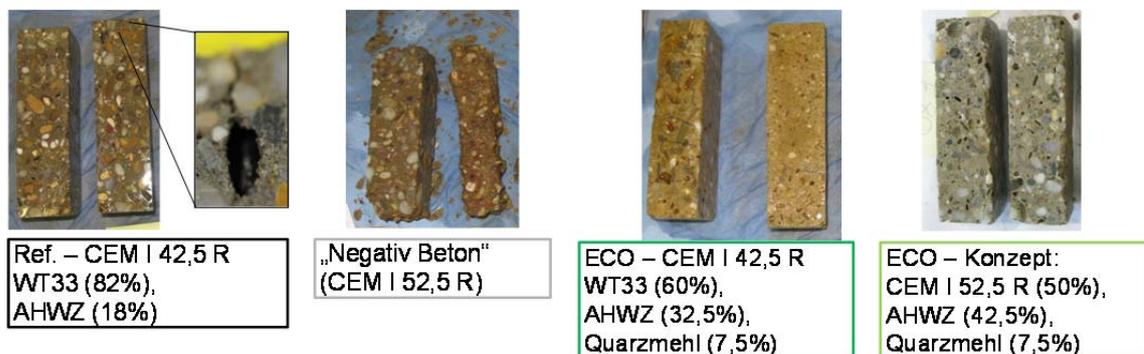


Abbildung 41: Betonproben nach 3 wöchiger Essigsäurelagerung. Am Referenzbeton sind Schäden in Form von Rissen in der Detailaufnahme erkennbar

Exposition XAT

Seit 1. Juli 2015 sind Probekörper für Innenschalenbetone in Natriumsulfat-Lösung bei 5°C und 20°C eingelagert. Es zeigten sich nach mehr als 91 Tagen noch keine signifikanten Längenänderungen weder an den Referenzbetonen bzw. Vergleichsbetonen noch Ökobetonen. Einzig am „negativ Beton“ mit 100% CEM I 52,5R zeigten sich nach 126 Tagen wie zu erwarten war erste Treiberscheinungen (Abbildung 42) bei 5°C Lagerung, die jedoch auch noch nicht die nach [49]

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

festgelegten Grenze von 0,5 mm/m überschreiten¹. Weiterführende Auswertungen dazu werden mit einer Masterarbeit am Institut vorgelegt werden [60].

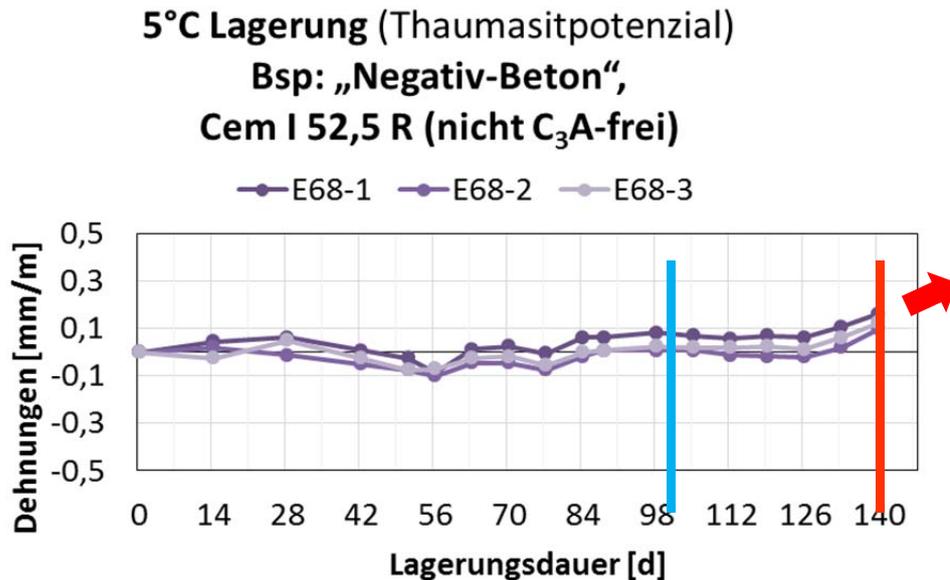


Abbildung 42: Beispiel einer Dehnungsmessung eines Betons in Natriumsulfat-Lagerung bei 5°C

pH-Wert als Indikator zur Korrosionsbeständigkeit

Ein hoher pH-Wert der Porenlösung des Betons (>11,5 bis 12) ist Voraussetzung für den Schutz von Bewehrungsstahl im Beton (zur Passivierung des Betonstahls). Um nachzuweisen, dass durch teilweise Substitution von Portlandzementklinker der pH-Wert der Ökobetone nicht unter einen kritischen pH-Wert gesenkt wird, wurde der pH-Wert der Porenlösung exemplarisch von 3 Betonen gemessen. Dabei wurden der B5 Referenzbeton und die zwei B5 Ökobetone (OB5-XXXIX-001 & OB5-XL-001) auf Analysenfeinheit zerkleinert und in destilliertem Wasser 24h kontinuierlich gemischt und damit vollständig ausgelaugt. Danach wurde der pH-Wert und die Leitfähigkeit der Betone gemessen und die Ergebnisse in Abbildung 43 zusammengetragen. Dabei ist ersichtlich, dass sich der pH-Wert der beiden Ökobetone nicht von jenem des Referenzbetons unterscheidet (pH=12,7). Einzig bei der Leitfähigkeit sind aufgrund der unterschiedlichen Ionen-Zusammensetzung der Lösung geringfügige Unterschiede zu erkennen, die jedoch keinen Einfluss auf die Passivierung haben.

¹ Anmerkung: Für ein besseres Verständnis des Einflusses der Zusatzstoffe während der Auslaugung bei geringem pH-Wert (<6) sollten weiterführende Analysen durchgeführt werden.

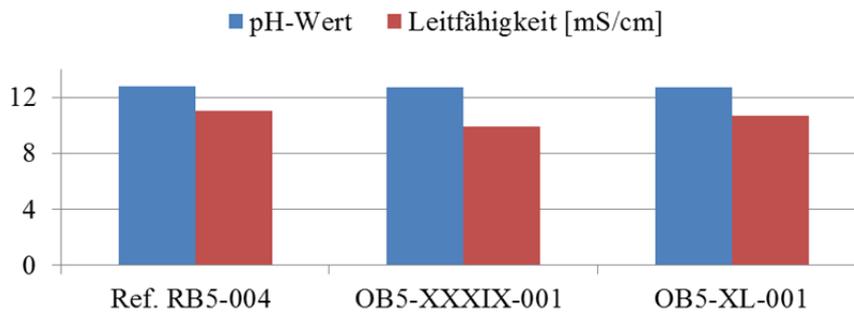


Abbildung 43: Ergebnisse der pH-Wert und Leitfähigkeitsmessungen der B5 Betone

3.6 Vergleichs-Studie zu Umweltwirkungen von Brückenentwürfen

3.6.1 Allgemeines zur Vergleichsrechnung an einem Bauwerk und Kosten

Zu Projektbeginn wurde gemäß Forschungsauftrag vorgesehen, eine Vergleichsrechnung an einem Bauwerk anzustellen. Im Projekt-Zwischen meeting vom 27.02.2014 wurde hingegen von Auftraggeber und Auftragnehmer gemeinsam beschlossen, dass eine Vergleichsrechnung an einem Bauwerk nicht sinnvoll erscheint. Es fehlen generell noch Voraussetzungen für eine Ausschreibung von Öko-Betonen (Stichwort: Verankerung von Nachhaltigkeitskriterien in einer Ausschreibung). Anstelle der Vergleichsrechnung am Bauwerk wurden die entwickelten Eco-Betonsorten für die Anwendungsfälle Brücken und Tunnel im Vergleich zu den Referenzbetonen in Bezug auf Kosten und Nachhaltigkeitsbewertung pro funktionaler Einheit „m³-Beton verglichen.

Auf die Frage, inwieweit sich der Aufwand und die Kosten (zusätzlich zu den Kosten als Summe der Kosten der Ausgangsstoffe an sich) bei der Ausführung eines Bauwerks mit Öko-Betonen im Vergleich zu derzeit üblichen Normalbetonen ändern, können nur sehr allgemeine Antworten gegeben werden: Da die Verarbeitbarkeit und das Frischbetonverhalten von Ökobeton und Standardbeton im Wesentlichen äquivalent ist, sollten sich keine erhöhten Kosten daraus ergeben. Ebenso erscheint der Aufwand für Nachbehandlung äquivalent. In der ersten Phase der Einführung von Ökobetonen, ist mit einer gewissen Umstellung zu rechnen, die vor allem die Logistik betrifft. Für die Eco- und Mikrofülle werden wenigstens 2 zusätzliche Lagerbehälter (Silos o.ä.) gebraucht, oder aber die Hersteller mischen diese Stoffe schon vor oder im Zuge der Anlieferung in geeigneter Weise zusammen. Dafür sind noch Entwicklungen erforderlich. Es ist mit einem erhöhten Aufwand für Prüfungen der Leistungsfähigkeit („performance“), insbesondere für die Prüfung von Dauerhaftigkeitseigenschaften am Festbeton, zu rechnen (nach den oben angeführten Methoden entsprechend der geforderten Expositionsklassen, zumindest in Bezug auf Prüfungen der Dichtigkeit des Gefüges). Zudem erscheinen zukünftige Pilotprojekte von Bauwerken sinnvoll, um Erfahrungen mit der praktischen Umsetzbarkeit zu sammeln, nachdem jetzt im Labor prinzipiell nachgewiesen wurde, wie Ökobetone hergestellt werden können, die in Bezug auf ihre technische performance und Kosten den Standardbetonen mindestens gleichwertig sein können, in Bezug auf ihre Umweltwirkungen aber deutlich besser.

3.6.2 Gegenstand und Ziel eines Vergleichs an einem Beispiel

Im Jahr 2015 ergab sich aufgrund einer Anfrage der ÖBB unerwartet die Möglichkeit, die Umweltwirkungen von Ökobeton im Vergleich zu Standardbeton an einem konkreten Beispiel zu

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

berechnen. Die Arbeitsgruppe Nachhaltigkeitsbewertung des Instituts für Materialprüfung und Baustofftechnologie wurde mit der Erstellung einer vergleichenden CO₂-Bilanzierung (im Sinne einer „Screening-LCA“) unterschiedlicher Brückenbauwerke (Spannbeton Tragwerk (TW) und Verbund TW) beauftragt. Im Zuge dessen wurden – sozusagen als Zusatzleistung – alle Tragwerksvarianten (Spannbeton und Verbund TW) auch so berechnet, als würden entsprechende Ökobeton-Rezepte für die ausgeschriebenen Betonsorten angewandt werden. Die Rezepte wurden im Zuge des Projektes ERESCON erstellt. Die Berechnungen der Umweltwirkungen wurden mittels einer Ökobilanzstudie (engl. LCA – Life Cycle Assessment) in Anlehnung an die ÖNORM EN ISO 14040 [9] bzw. an die prEN 15643-5 durchgeführt. Die Bilanzierung erfolgte auf Basis der Massenermittlung der einzusetzenden Baustoffe, welche auf Grundlage der geplanten Vorprojekte (Spannbeton TW und Verbund TW) durch ein Ingenieurbüro zur Verfügung gestellt wurden. Sämtliche Konventionen und Definitionen erfolgten dabei einstimmig im Projektkonsortium.

Ziel der Studie war es, mittels einer vergleichenden CO₂-Bilanzierung zweier unterschiedlicher Brückenentwürfe (Spannbeton TW und Verbund TW) anhand generischer Ökobilanzdaten (EcoInvent V2.2 [8]) deren Unterschiede zu identifizieren. Die Ergebnisse wurden anhand einer Sensitivitäts- und Dominanzanalyse ausgewertet. Basierend auf der Dominanzanalyse soll festgestellt werden, welches Bauwerk geringere Umweltwirkungen (CO₂-Bilanzierung) aufweist. Im Zuge der Vergleichsrechnungen wurde in weiterer Folge auch das Optimierungspotential durch die Anwendung von ökologisch optimiertem Beton für die jeweiligen Tragwerke untersucht und ausgewertet.

3.6.3 Systembeschreibung

Im Zuge der Erweiterung eines Eisenbahnabschnittes muss eine neue 84 m lange Brücke über die errichtet werden. Dafür wurden zwei unterschiedliche Brückenvarianten (Spannbeton TW und Verbund TW) durch ein Ingenieurbüro geplant. Durch das funktionale Äquivalent werden die geforderten technischen Eigenschaften, sowie die Funktionen der Brückenbauwerke beschrieben. Dies dient dazu eine einheitliche und vergleichbare Bewertungsgrundlage als Basis zu schaffen. Folgende Parameter nach ÖNORM EN 15978 [56] wurden für das funktionale Äquivalent festgelegt:

- Bauwerk: Brückenbauwerke mit einer Spannweite von 84 m
- Nutzungstyp: Eisenbahnbrücke (gem. technischer Anforderungen)
- Geplante Nutzungsdauer: 120 Jahre

Die technischen Anforderungen an die Brückenbauwerke wurden durch das Projektteam (ÖBB) gesondert festgelegt. Laut Angaben der planenden Firma entsprechen beide Brückenvarianten den durch den Auftraggeber gestellten technischen Anforderungen und können aus dieser Sicht als technisch gleichwertig („technisches Äquivalent“) bezeichnet werden.

Als Vergleichseinheit („funktionales Äquivalent“) wird das jeweilige (fertiggestellte) Brückenbauwerk definiert. Folglich werden sämtliche Input- und Outputflüsse sowie die daraus berechneten potentiellen Umweltwirkungen auf das „funktionale Äquivalent“ bezogen.

3.6.4 Gegenüberstellung - Brückenbauwerke

Abbildung 44 zeigt eine Gegenüberstellung der Umweltwirkungen für die beiden Brückenvarianten welche mit „normalen Betonrezepturen“ modelliert wurden. Der Maximalwert in der jeweiligen Kategorie wurde mit 100% als Referenz gewählt. Die Ergebnisse der Ökobilanzstudie für den gewählten Bezugsstudienzeitraum von 120 Jahren ergeben für den zu untersuchenden Wirkungssindikator Treibhauspotential (GWP) einen Unterschied von ca. 19 % zwischen den beiden Varianten „Spannbeton-“ und „Verbundtragwerk“. Für die zusätzlich untersuchten Wirkungsindikatoren Versauerung (AP), Eutrophierung (EP), photochemischer Ozonabbau (POCP), Bildung von bodennahem Ozon (ODP) sowie für den Einsatz von nicht erneuerbarer Primärenergie (CED non. r.) und erneuerbarer Primärenergie (CED r.) ergeben sich ein Delta von 1 % - 22 % in Abhängigkeit des jeweiligen Umweltindikators.

Es ist eindeutig festzustellen, dass auf Basis der getroffenen Annahmen und der zur Verfügung stehenden Daten in allen untersuchten Szenarien die geringsten Umweltwirkungen durch das Verbundtragwerk entstehen.

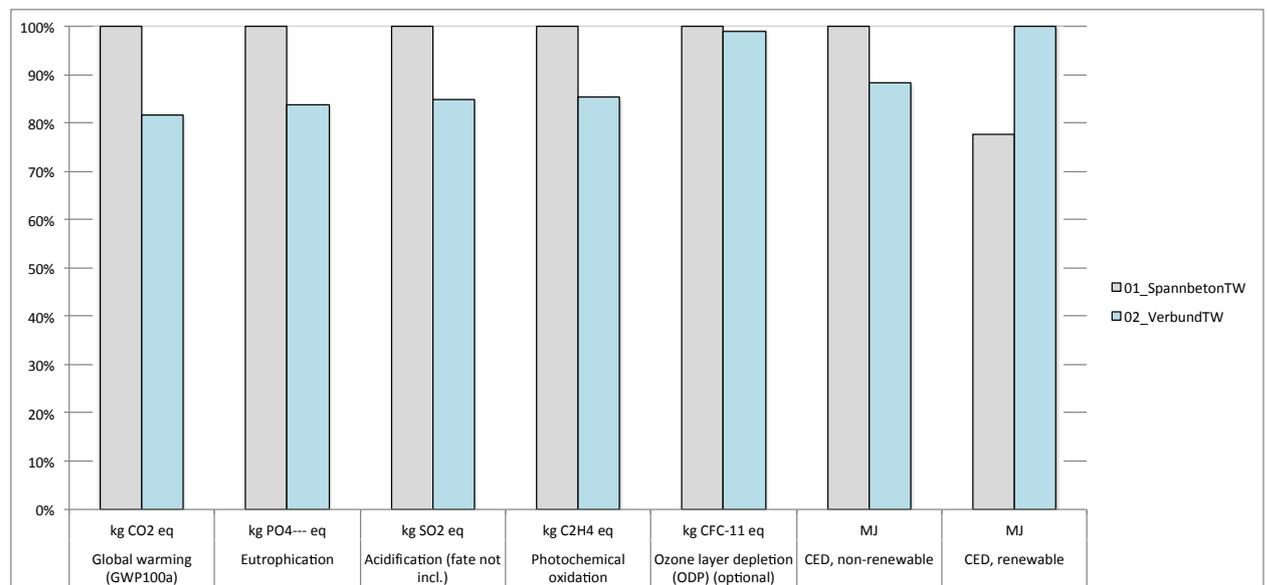


Abbildung 44: Gegenüberstellung der Umweltwirkungen für die Brückenvarianten Spannbeton TW und Verbund TW

3.6.5 Reduktionspotential der Umweltwirkungen

Die Gegenüberstellung in Abbildung 45 zeigt einen Vergleich der Umweltwirkungen (Treibhauspotential, Primärenergiebedarf gesamt) für einen Normalbeton (Tragwerksbeton C35/45/45) und eine gleichwertige ökologische Betonrezeptur. Durch die Anwendung eines ökologisch optimierten Betons geht ein Reduktionspotential von rund 20% auf Seiten des Treibhauspotentials sowie -15% bis -20% für den Primärenergiebedarf hervor. Dies zeigt eindeutig, dass durch die Anwendung von „ÖkoBeton“ ein hohes Optimierungspotential für die Umweltwirkungen gegeben ist.

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

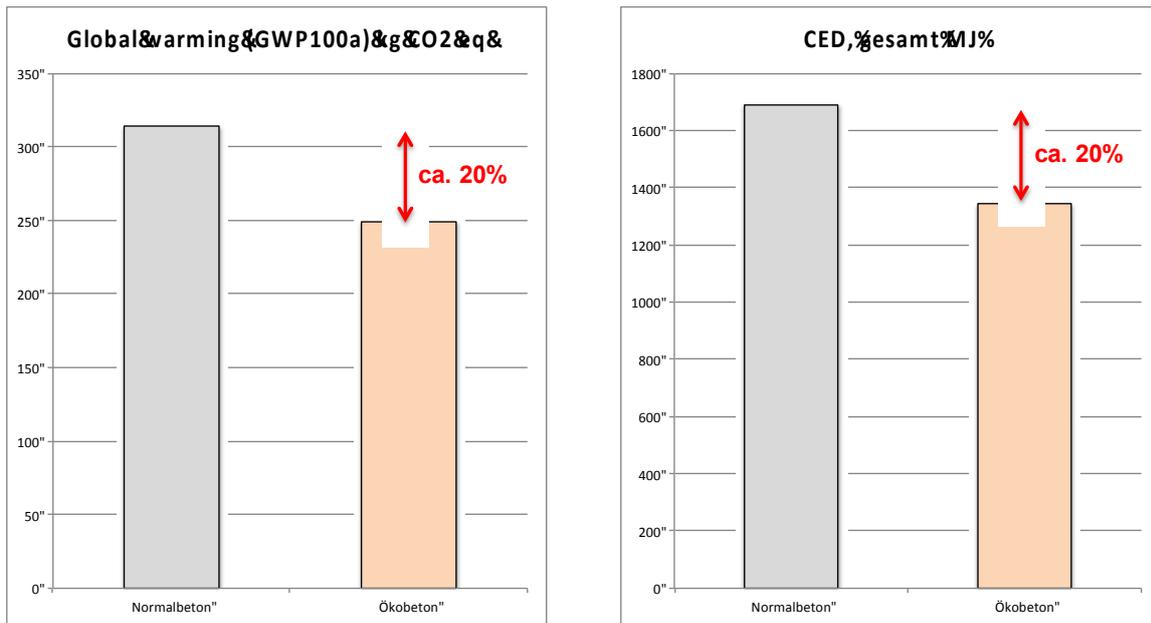


Abbildung 45: Vergleich „ÖkoBeton“ und Standardbeton am Beispiel „Tragwerksbeton C35/45/B5“

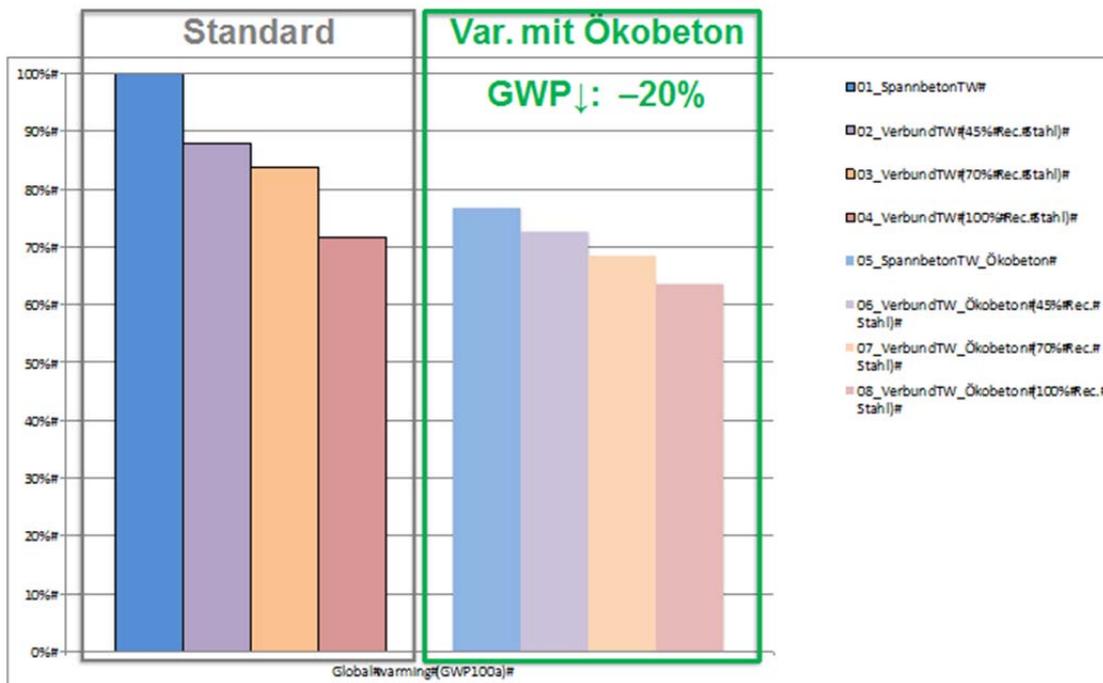


Abbildung 46: Reduktionspotential für das Treibhauspotential durch den Einsatz von „ÖkoBeton“ beim Brückenbau in allen Varianten

Für die Bauleistungen „Beton-, Stahlbeton- und Mauerungsarbeiten“ wurde mittels der im Rahmen des Forschungsprojektes „ERESCON“ entwickelten Betonrezepturen eine Abschätzung der Umweltwirkungen durchgeführt. Für die Bauleistungen „Stahlbau“ wurde zusätzlich eine Variante mit einer Änderung der Basisdaten mit höherem Anteil an Primärstahl gerechnet, was zu einem Anstieg der Treibhausgasemissionen führt. Diese Variante weist aber noch immer gegenüber der ursprünglichen Variante Spannbeton-TW geringere Treibhausgasemissionen auf und verändert daher die Reihung ebenfalls nicht.

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

Die Ergebnisse in Abbildung 46 zeigen ein deutliches Reduktionpotential (15%-25%) für das Treibhauspotential durch Einsatz von Ökobeton für sämtliche untersuchten Varianten. Zusammenfassend ist festzustellen, dass auf Basis der getroffenen Annahmen und der zur Verfügung stehenden Daten in allen untersuchten Szenarien eine betontechnologische Optimierung zu einer signifikanten Minimierung der Umweltwirkungen beiträgt.

4 Zusammenfassung, Ergebnis und Ausblick

Ziel des Forschungsprojektes „ERESCON“ war es, neue Betone für den Infrastrukturbereich zu entwickeln, die einen geringeren Primärenergiebedarf (primary energy input PEI) und verringerte Treibhausgasemissionen (Global Warming Potential GWP) als derzeit übliche Betonsorten aufweisen und damit einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung und zum Klimaschutz zu leisten. Die Zielsetzung erscheint vor dem Hintergrund besonders relevant, dass der an sich funktionale und dauerhafte und für unsere Infrastruktur unverzichtbare Baustoff Beton wesentlich zu den Treibhausgasemissionen in Österreich bzw. weltweit (> 5% der anthropogenen CO₂-Emissionen, vgl. [1], [2]) sowie zum Energie- und Ressourcenverbrauch beiträgt. Da dafür hauptsächlich der verwendete Klinker im Portlandzement bzw. Portlandkompositzement verantwortlich ist, wurde der Ansatz gewählt, neue Betone zu entwickeln, die im Vergleich zu bisher eingesetztem Standard Beton (bzw. Referenz-Beton nach gültigen Normen und Richtlinien) einen geringeren Portlandzementgehalt (CEM I) bzw. Portlandkompositzementgehalt (CEM II/A) bei gleichbleibender Funktionalität aufweisen.

Ergebnisse

Gemeinsam mit den Auftraggebern ASFINAG und ÖBB wurden in der ersten Phase „Referenzbetone“ definiert, die massenmäßig stark eingesetzt werden und auch für eine Umsetzung von ökologisch verbessertem Beton vorrangig geeignet erschienen. Deshalb wurden energie- und ressourcenoptimierte Betone, sogenannte „Eco-Betone“ für die folgenden Anwendungsgebiete beispielhaft entwickelt:

Tragwerksbetone C30/37 B5 Eco entsprechend den funktionalen Anforderungen an Betone B5 der ÖNORM B 4710-1:2007 als Referenz (Richtrezeptur siehe Kapitel 3.5.1: Tragwerksbeton „Rezepturvorschlag“) – und

Innenschalenbetone C25/30 IXAT-B Eco (\cong weiße Wanne BS 1 A Eco) entsprechend den funktionalen Anforderungen der ÖBV Richtlinie für Innenschalenbeton (2012) als Referenz (Richtrezeptur siehe Kapitel 3.5.1: Innenschalenbeton „Rezepturvorschlag“)

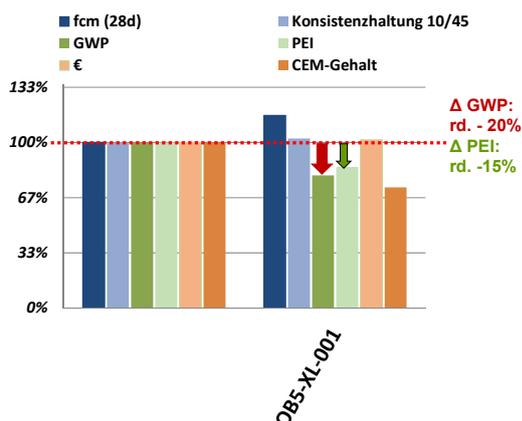


Abbildung 47: Kennwerte einer ausgewählten Eco-Rezeptur C 30/37 B5 (XL-001) im Vergleich zum Standardbeton C 30/37 B5 für Tragwerke

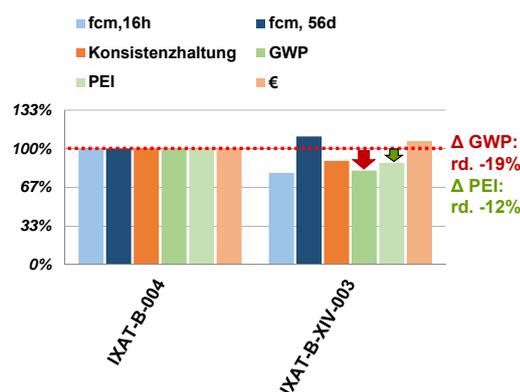


Abbildung 48: Kennwerte einer ausgewählten Eco-Rezeptur C 25/30 IXAT-B Eco (XIV-003) im Vergleich zum Standardbeton IXAT-B (RB-004) für Tunnelinnenschalen

Es ist im Projekt gelungen zu zeigen, dass das GWP (kg CO₂ äquiv.) um bis zu 30% und der Primärenergiebedarf um -20% gesenkt werden kann, wenn ausgesuchte Zusatzstoffe, sogenannte

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

„Eco- und Mikrofüller“ sowie geeignete Zusatzmittel eingesetzt werden. Bei kostengünstigeren und damit wohl eher praxis-tauglichen Varianten wurde GWP um -20% und PEI der Eco-Betone im Vergleich zu der derzeit gebräuchlichen Standard Ausführung um -10 bis -15% gesenkt. Dabei wurde darauf geachtet, dass diese Betone in Bezug auf ihre Zusammensetzung maximal etwa gleich viel kosten wie die Standardbetone. Es wurde eine Methode aufgezeigt, mit der es möglich ist, Zement durch Zusatzstoffe mit geringerer Umweltwirkung teilweise zu substituieren bzw. zu ergänzen und damit die Klinker- oder Bindemittelleffizienz zu steigern, indem die Packungsdichte der Feinstkornzusammensetzung (= Mehlkorn im Beton der „Pulver“ < 125 µm) erhöht und ihr Wasserbedarf gesenkt wird.

Kernpunkte der innovativen Betontechnologie sind:

- Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit & Wirtschaftlichkeit der Ausgangsstoffe sowie der Rezepturen
- Erhöhung der Packungsdichte der granularen Ausgangsstoffe und Senkung ihres Wasserbedarfs, vor allem der Feinststoffe (< 125 µm Partikeldurchmesser) durch Mikrofüller. Optimierte Zusammensetzung des Gemisches aus Gesteinskörnungen, Bindemitteln und Zusatzstoffen, sodass der Gehalt an Portland- bzw. Portlandkompositzement teilweise durch sog. „Eco-Füller“ (also Stoffe mit geringerer Umweltwirkung) ersetzt bzw. ergänzt werden kann (verwendete Methode „MEM-ST“, vgl. Kapitel 3.4.1 und [28], [62]).
- Nachweis gleichwertiger Leistungsfähigkeit (nach dem equivalent concrete performance concept ECPC) von neuen Öko-betonen mit Beton nach bisherigen Normen und Richtlinien trotz veränderter Rezepturkennwerte bei verringerten Umweltwirkungen (GWP und PEI), vgl. Kapitel 3.5 und [63].

Es konnte nachgewiesen werden, dass ausgewählte Eco-Betone hinsichtlich Verarbeitbarkeit, Festigkeit und Dauerhaftigkeit den Standardbetonen bei verringerten Umweltwirkungen gleichwertig sind. Die Kosten der Betone sind stark vom zukünftigen Preis der verwendeten Zusatzstoffe, der so genannten „Eco-Füller“ und Mikro-Füller, sowie der Fließmittel abhängig. Da es noch keinen Markt für solche Eco- und Mikrofüller gibt, können die Kosten nur grob abgeschätzt werden. Die Leistungsfähigkeit oder „performance“ der ausgewählten Eco-Betone ist im Vgl. zu Standard-Beton (nach Norm bzw. RiLi) in Hinblick auf Verarbeitung und Festigkeit äquivalent, in Bezug auf Dauerhaftigkeitseigenschaften bzw. gemäß den definierten Expositionsklassen wie

- Porosität: äquivalent oder besser
- XC4 (Wassereindringtiefe & Karbonatisierung): äquivalent
- XF (Frostprüfungen, Ultraschall-XF3, CDF-XF4) : äquivalent
- XD2, XAL: äquivalent oder besser

In Bezug auf die Dauerhaftigkeit konnten einige Eco-Betone entwickelt werden, die wesentlich beständiger als die Referenzbetone (Standardbeton) sind, zum Beispiel Tunnelinnenschalenbeton, der gegen chemisch lösenden Angriff XAL und treibenden Angriff (XAT) widerstandsfähiger als der Referenzbeton ist. Eine deutliche Verbesserung durch ein dichteres Betongefüge & spezielle Zusatzstoffe war möglich.

Ausblick

Erforderliche zukünftige Schritte, um die im Labor gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse in der Bau-Praxis umzusetzen, sind:

- Durchführung wissenschaftlich begleiteter Pilotprojekte hinsichtlich Ausführung unter praktischen Bedingungen & hinsichtlich des Nachweises der „equivalent concrete performance“ bei verbesserten Umweltwirkungen

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

- Ausarbeitung einer Richtlinie für „Ökobeton für die Infrastruktur“
- Weiterentwicklung der Methoden der Prüfung und Bewertung umweltfreundlicher, dauerhafter Betone

In Bezug auf die Prüfung und Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Ökobetonen sind weitere Forschung & Entwicklung und das Sammeln praktischer Erfahrung zu empfehlen. Wissenschaftlich begleitete Pilotanwendungen sollten Erfahrung in der Praxis bringen, um die im Labor gewonnenen Ergebnisse in der Bau-Praxis umzusetzen. Es wird vorgeschlagen, Methoden weiterzuentwickeln, um den Prüfaufwand nach dem „equivalent concrete performance concept“ zu reduzieren. Es sollte auch weitere Grundlagenforschung betrieben werden, um „übergeordnete“ auf physikalisch-chemischen Eigenschaften der Betone (wie zum Beispiel Porosität, Permeabilität, Zusammensetzung der Porenlösung) basierte Kennwerte zu finden, die anstelle von Einzelprüfungen zum Nachweis der Expositionsklassen gemäß Normen und Richtlinien geprüft werden können. Eine Überarbeitung der geltenden Betonnormen (insbesondere ÖNORM B 4710-1:2007) in Hinblick auf die Einführung eines „performance based design“ Konzeptes, das auch die Umweltwirkungen der Betone berücksichtigt, ist zu empfehlen. Eine Ausarbeitung einer Richtlinie bzw. eines Leitfadens für „Ökobeton für die Infrastruktur“ ist zukünftig erstrebenswert.

5 Literatur

- [1] Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ): Nachhaltigkeitsbericht 2010, VÖZ 2011, http://www.zement.at/downloads/nachhaltigkeitsbericht_2010.pdf
- [2] Ludwig, H. M.: Zukünftige Zemente und ihre Eigenschaften, Beton, Heft 5, 2012, p. 158–165
- [3] Tritthart, J., Neunteufel, L., Juhart, J.: Low Carbon Cements And Concrete: An Overview And Practical Approach, Proc. of UKIERI Concrete Congress “Innovations in Concrete Construction”, 5-8 März 2013, Jalandhar Punjab India
- [4] Passer A., Klammer G., Fischer G., Juhart J.: Review of LCA for concrete and its applicability to Austria, SB13 Graz, FULL Papers of the International conference on Sustainable Buildings - Construction Products & Technologies, S. 317-322.
- [5] Intergovernmental panel on climate change:
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html
- [6] ÖNORM EN 15804 / 2012-04-01: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen — Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte, Österreichisches Normungsinstitut 2012
- [7] Frischknecht, R. et al.: Overview and Methodology , ecoinvent report No. 1; 2007
- [8] Ecoinvent Centre: life cycle inventory (LCI) data, database ecoinvent data.
<http://www.ecoinvent.org/database/>
- [9] International Organisation for Standardization (ISO), Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework, Umweltmanagement – Ökobilanz, Grundsätze und Rahmenbedingungen, ÖNORM EN ISO 14040:2006
- [10] Graubner, C. A., Garrecht, H., Proske T. et al.: Ökobetone zur Herstellung von Stahlbetonbauteilen, in: BWI - Beton Werk International, No. 5&6, 2011
- [11] Haist, M., Müller, H.: Nachhaltiger Beton - Betontechnologie im Spannungsfeld zwischen Ökobilanz und Leistungsfähigkeit, in: Nachhaltiger Beton - Werkstoff, Konstruktion und Nutzung, Scientific Publishing, Karlsruhe, 2012, pp. 29–52.
- [12] Deutsche Bauchemie e.V. (DBC), 'Umwelt-Produktdeklaration - Betonzusatzmittel - Wirkungsgruppe Betonverflüssiger und Fließmittel' (IBU – Institut Bauen und Umwelt e.V., 2014) abrufbar online <http://www.bau-umwelt.de>

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

- [13] Schiessl, P.; Srengel, T.: Nachhaltige Kreislaufführung mineralischer Baustoffe. Forschungsbericht der Technischen Universität München, Abteilung Baustoffe, München, 2006.
- [14] G. Mauschwitz, „Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie Berichtsjahr 2012,“ Technische Universität Wien, Wien, 2013.
- [15] Haist, M., Moffatt, J., Breiner, R., Müller, H.S., 'Entwicklungsprinzipien und technische Grenzen der Herstellung zementarmer Betone', Beton- und Stahlbetonbau 109 (3) (2014) 202–215.
- [16] Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V.: Green Building Challenge Handbuch. <http://www.ziegel.at/gbc-ziegelhandbuch/default.htm>.
- [17] Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie: 'Umwelt-Produktdeklaration - Zement' (IBU – Institut Bauen und Umwelt e.V., 2014) abrufbar online <http://www.bau-umwelt.de>
- [18] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: 'Umwelt-Produktdeklaration - Zement' (IBU – Institut Bauen und Umwelt e.V., 2012) abrufbar online <http://www.bau-umwelt.de>
- [19] Informationsportal Nachhaltiges Bauen des BMVBS: Datensatz 1.1.01 Zement (Durchschnitt; de); abrufbar online <http://www.nachhaltigesbauen.de/oekobaodat/>
- [20] International Organisation for Standardization (ISO), Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen, ÖNORM EN ISO 14044:2006
- [21] Vereinigung der österreichischen Zementindustrie, „www.zement.at,“ [Online]. Available: <http://www.zement.at/zement/zement/ressourcen-und-umweltschutz>. [Zugriff Oktober 2013]
- [22] ÖNORM EN 197-1:2011: Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement, Austrian Standards
- [23] Juhart, J., - David G.A., Nickel C., Fischer G., Mittermayr F., Maydl P. l.: Durable eco-crete in Austria: Materials and mix design methods, in: Tagungsband des Int. Symposium on Sustainability: Eco-Crete 2014, 11.-15.08.2014, Reykjavik
- [24] Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V.: Green Building Challenge Handbuch. <http://www.ziegel.at/gbc-ziegelhandbuch/default.htm>.
- [25] Informationsportal Nachhaltiges Bauen des BMVBS: Datensatz 1.1.01 Zement (Durchschnitt; de); abrufbar online <http://www.nachhaltigesbauen.de/oekobaodat/>
- [26] ÖNORM B 4710-1: 2007. *Beton - Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis*
- [27] EN 206:2014. *Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*, Ausgabe 1.12.2014
- [28] Juhart, J., David, G., Nickel, C., Fischer, G., Mittermayr, F.: *Ökologisch optimierter Beton: Stoffauswahl und Methoden der Rezepturenentwicklung*, in: Proc. 2. Grazer Betonkolloquium, TU Graz, 2014, p. 221-229.
- [29] David, G. , Juhart J.: *Evaluierung von Methoden zur Messung der Packungsdichte und des Wasseranspruchs pulverförmiger Stoffe für ressourceneffizienten Beton*. 2. Grazer Betonkolloquium, TU Graz, 2014, p. 9-24.
- [30] Trninic, D. *Berechnungsmodell und Software zur Optimierung der Packungsdichte von Korngemischen für ressourceneffizienten Beton*, Master-Arbeit, Institut für Materialprüfung TU Graz, Graz, 2013.
- [31] Mustafa, N. *Optimierung von Korngemischen für Ressourcen-effizienten Beton mit Hilfe eines computerunterstützten Modells*, Master-Arbeit, Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, TU Graz, 2015

Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt „ERESCON“

- [32] Borovina, D.: *Die Wirkung unterschiedlicher Fließmittel auf die Fließfähigkeit von Wasser/Pulver-Gemischen für Ressourcen-optimierten, nachhaltigen Beton*, Master-Arbeit, Institut für Materialprüfung TU Graz, Graz, 2014.
- [33] Schönauer, A.: *Die Wirkung von Fließmittel (PCEs) auf das Fließvermögen von Stoffgemischen für Ressourcen – effizienten Beton und deren zeitliche Abhängigkeit*, Bachelor-Projektarbeit, Institut für Materialprüfung TU Graz, Graz, 2015 (in Arbeit)
- [34] Maier, C.: *Untersuchungen zur Wirkung von PCE-Fließmitteln auf Stoffe für Ressourcen optimierten Beton*, Master-Projektarbeit, Institut für Materialprüfung TU Graz, Graz, 2015 (in Arbeit)
- [35] Okamura, H., und Ouchi, M.: *Self-compacting concrete*. Journal of Advanced Concrete Technology, Japan Concrete Institute, Vol. 1, No. 1 P 5-15, 2003, S.7
- [36] Marquardt, I.: *Ein Mischungskonzept für selbstverdichtenden Beton auf der Basis der Volumenkonstanten und Wasseransprüche der Ausgangsstoffe*, Dissertation, Rostocker Berichte aus dem Fachbereich Bauingenieurwesen, N° 7, Rostock, 2002
- [37] Dinger, D. R.: *Particle Packing and Pore Size Distributions* Ceramic Processing E-zine by Dinger Ceramic Consulting Services, vol. 1, N° 9, 2003. Online: <http://www.dingerceramics.com/CeramicProcessingE-zine> vom 04.08.2014,
- [38] ONR 23303: 2010: Prüfverfahren Beton (PVB) - Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe
- [39] Nickel, C., Juhart, J., Mittermayr, F., Tritthart, J., Klammer, D.: *Nachweis der Dauerhaftigkeit von Beton nach dem Konzept der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit*, Tagungsband des 2. Grazer Betonkolloquiums, TU Graz, 2014, p. 205-212.
- [40] Fischer, G., Juhart, J.: *Umweltwirkungen von Zusatzstoffen und Zusatzmitteln für ökologisch optimierten Beton*, Tagungsband des 2. Grazer Betonkolloquiums, 2014
- [41] SimaPro, *Software für Ökobilanzierung*: <http://www.simapro.de/SimaPro-Software.67.0.html>, [Zugriff Juni 2014]
- [42] Ecoinvent Centre: *life cycle inventory (LCI) data, database ecoinvent data*. <http://www.ecoinvent.org/database/>
- [43] Reinisch, J.; Scholz, S.N.: *Aspekte der ökologischen Bewertung der Ausgangsstoffe von Beton, Einfluss der Mahlfeinheit von Zusatzstoffen auf deren ökologische Bewertung*, Bachelor Projektarbeit, Institut für Materialprüfung TU Graz, Graz, 01/2014
- [44] Fib Bulletin 34: *Model Code for Service Life Design*, prepared by fib Task Group 5.6, 2006
- [45] Torgal, F.P., Miraldo, S., Labrincha, J.A., De Brito, J.: *An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: Evaluation, use SCMs and/or RAC*, in: Construction and Building Materials; No. 36; pp. 141-150, 2012
- [46] Setzer, M.J., Fagerlund, G., Janssen, D.J.: *CDF-Test – Prüfverfahren des Frost-Tau-Widerstands von Beton – Prüfung mit Taumittel-Lösung (CDF)*, RILEM Recommendation, in Materials and Structures; No 29 (193), pp. 523-528 (in Beton + Fertigteil-Technik, 1997 in dt. Übersetzung)
- [47] ONR CEN/TS 12390-9: *Prüfung von Festbeton – Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand – Abwitterung*, 2006
- [48] Baroghel-Bouny, V., Belin, P.: *AgNO₃ spray tests: advantages, weaknesses, and various applications to quantify chloride ingress into concrete. Part 2: Non-steady-state migration tests and chloride diffusion coefficients*, Materials and Structures, No. 40, pp. 783-799, 2007

- [49] Breitenbücher, R., Heinz, D., Lipus, K., Paschke, J., Thielen, G., Urbonas, L., Wisotzky, F.: Sachbestandbericht, *Sulfatangriff auf Beton*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Beuth, No. 554, pp.64, 2006
- [50] Schwanda, F., *Das rechnerische Verfahren zur Bestimmung des Hohlraumes und Zementleimanspruches von Zuschlägen und seine Bedeutung für Spannbetonbau*, in: Zement und Beton, 1966, Vol. 37, p 8–17
- [51] Fennis-Huijben, S.: *Design of ecological concrete by particle packing optimization*, dissertation, TU Delft 2010, (online abrufbar im repository.tudelft.nl)
- [52] HOLCIM Schweiz: <http://www.holcim.ch/nachhaltige-entwicklung/umwelt/zement.html>
- [53] International Organisation for Standardization (ISO), Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework, Umweltmanagement – Ökobilanz, Grundsätze und Rahmenbedingungen, ÖNORM EN ISO 14040:2006
- [54] Park, B., Jang, S.Y., Cho, Jae-Yeol, Kim, J.Y.: *A novel short-term immersion test to determine the chloride ion diffusion coefficient of cementitious materials*, Construction and Building Materials, No. 57, pp. 169-178, 2014
- [55] Sustainability of construction works - CEN/TC 350, Framework for sustainability assessment of civil engineering work, WD prEN 15643-5:2015
- [56] European Committee for Standardization (CEN), Sustainability of construction works — Assessment of environmental performance of buildings — Calculation method, EN 15978:2012
- [57] Juhart J., Nickel C., Tritthart J.. Effect of PCE-Superplasticizers on Powders for Eco-Concrete, In: 24.. Conference and Workshop Rheology of Building Materials at Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, 11. und 12. März 2015; Proc. And presentation available online, URL:
http://www.schleibinger.com/cmsimple/?Aktuelles:Veranstaltungen:24_Workshop_und_Kolloquium_Rheologische_Messungen_an_Baustoffen%2C_11._und_12._März_2015%2C_Regensburg
- [58] ÖBV (Österr. Bautechnik Vereinigung), *Richtlinie "Innenschalenbeton"*, 2012
- [59] ÖBV (Österr. Bautechnik Vereinigung), *Richtlinie "Wasserundurchlässige Betonbauwerke - Weiße Wannen"*, 2009
- [60] Ljajic, R.: *Chemische Beständigkeit von ökologisch optimiertem Beton im Vergleich mit Standardbeton*, Masterarbeit am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, TU Graz, in Arbeit- Abschluss 2016
- [61] Lality. R.: *Untersuchungen zur Kombination des „CDF“-und Chloriddiffusionstests zum Nachweis der Expositionsklassen XD und XF2*, Masterarbeit am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, TU Graz, in Arbeit- Abschluss 2016
- [62] Juhart, J., David, G.A., Nickel, C., Fischer, G., Mittermayer, F.: *A new combined filler concept for eco-concrete*, in: Proc. of 14th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC 2015) 2015 Beijing
- [63] Juhart, J., David, G.A., Baldermann, C., Mittermayer, F.: *Performance based design od eco-concrete in Austria*, in: ÖBV: Tagungsband 11. CCC Congress HAINBURG 2015
- [64] Juhart, J., David, G.A., Nickel, C., Fischer, G., Mittermayer, F. : *Ökologische Optimierung von Beton mit inerten Mikro- und Eco-Füllern* , in: Tagungband zur ibausil 2015, Weimar
- [65] Nickel, C. (Baldermann, C.), Juhart, J., Mittermayr, F., Klammer, D.: *Nachweis der Dauerhaftigkeit von umweltfreundlichem Beton* in: Tagungband zur ibausil 2015, Weimar