

Implementierung von CO₂-reduzierten Betonen auf der Baustelle

RCC-Reduced Carbon Concrete

T. M. Romm, N. Summhammer,
T. Belazzi, M. Härtel, J. Horvath,
E. Größ, L. Kujawa, R. Hoch,
M. Marra, R. Pamminer,
M. Löffler, F. Denk, H.-J. Zeiler

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

30/2021

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

Implementierung von CO₂-reduzierten Betonen auf der Baustelle

RCC-Reduced Carbon Concrete

Arch. DI Thomas Matthias Romm, Nairi Summhammer
forschen planen bauen ZT

Dr. Thomas Belazzi
bauXund GmbH

DI Michael Härtel
Dr. Ronald Mischek ZT

DI Dr. Johannes Horvath
Sachverständiger Betontechnologie

DI Erwin Größ, DI Lukasz Kujawa, Bmst. Ing. Reinhard Hoch,
Ing. Marina Marra
STRABAG Real Estate, SRE

DI (FH) Reinhard Pamminger, DI Mario Löffler
Materialprüfanstalt Hartl

DI Dr. Franz Denk, DI Hans-Jürgen Zeiler
Qualitätsmanagement Wopfinger Transportbeton Ges.m.b.H.

Wien, Juli 2021

Ein Projektbericht im Rahmen einer Bund-Bundesländerkooperation
des BMK (Stadt der Zukunft) und der Stadt Wien



Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm Haus der Zukunft auf und hat die Intention Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung von allen betroffenen Bereichen wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMK publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	9
2	Abstract	11
3	Executive Summary	13
4	Ausgangslage	16
4.1	Zur Umweltrelevanz von Beton	16
4.2	Das Konzept der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit	17
4.2.1	Das Potenzial des Performance-Konzepts	17
4.3	Entwicklungen und Produkte zu CO ₂ -reduziertem Beton	19
4.3.1	Marktanalyse	20
5	Projekthalt	22
5.1	Methodischer Ansatz von RCC	22
5.2	Fallstudie und Versuchsanordnung	25
5.2.1	Casestudy <i>Taborama</i>	26
5.2.2	Versuchsreihen der Baustelle	27
5.3	Fertigteilwerk und Versuchsbauteile in Gerasdorf	31
5.4	Rechtliche Voraussetzungen für die Verwendung und den Einbau von RCC-Beton	33
5.4.1	Allgemeines	33
5.4.2	Relevante ÖNORMEN in Bezug zum Baustoff Beton	34
5.4.3	RCC – Reduced Carbon Concrete	35
6	Ergebnisse	38
6.1	Ergebnisse der empirischen Forschung in zwei Versuchsreihen	38
6.1.1	Sommerversuche	39
6.1.2	Winterversuche	41
7	Schlussfolgerungen	46
7.1	Maßnahmen der Nachbehandlung	46
7.2	Weiterentwicklung von RCC-Rezepturen	48
8	Ausblick und Empfehlungen	49
8.1	Perspektive für Performance-Beton	49
8.2	Forschungsfragen zur Erprobung und zur Grenze von Performance-Beton	49
8.2.1	1. Forschungsfrage: Kurze Schalzeit für rasche Nachbehandlung	50
8.2.2	2. Forschungsfrage: Wärmedämmende Schalung statt Nachbehandlung	50
8.2.3	3. Forschungsfrage: Grenze der CO ₂ -Reduktion	51
8.2.4	Umsetzung in Demonstrationsprojekten	52
8.3	Empfehlungen	53
9	Verzeichnisse	54

1 Kurzfassung

Beton- und Zementproduktion sind von erheblicher Umweltrelevanz, zugleich ist Beton weltweit der bei weitem verbreitetste Baustoff. Österreich hat eine jährliche Zementproduktion von 5,2 Mio. t Zement und emittiert für die Herstellung ca. 2,9 Mio. t CO₂ im Jahr (MAUSCHITZ, 2020, S. 7, 7a). Die Dekarbonisierung der Bauwirtschaft ist ein globales Thema. Das vorliegende Projekt soll dazu einen Beitrag leisten.

Forschungsziel ist der Einsatz von „Performance-Beton“ als CO₂-reduzierter Beton (RCC – „reduced carbon concrete“) mit geringerem Zementgehalt. Hierfür ist, anders als bei konventionellem Beton, der Nachweis technischer Gleichwertigkeit über die technischen Eigenschaften („Performance“) zu führen. Grundlage ist, neben der ÖNORM B 4710-1, die künftige ONR 23339 „Regeln für die Umsetzung des Konzepts der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit“. Dieses Regelwerk setzt Rahmenbedingungen, welche die verzögerte Frühfestigkeitsentwicklung eines RCC-Betons durch geeignete Nachbehandlungsmaßnahmen auf der Baustelle kompensieren.

In zwei Versuchsreihen wurden Bauteile, die nach einer RCC-Rezeptur mit durchschnittlich 25 % weniger CO₂ konzipiert wurden, mit konventionell ausgeführten Bauteilen gleicher Bauart verglichen. Diese empirische Forschung unter Praxisbedingungen auf der Baustelle unter Sommer- und Wintertemperaturen sowie in einem Betonfertigteilwerk, zielte auf Praxiserkenntnisse am „real crete“ und nicht am „lab crete“ ab.

RCC-Betone lassen sich genauso gut zu Wand- und Deckenelementen verarbeiten wie konventioneller Beton, wie Versuche für den Sommer- und Winterfall gezeigt haben. Das Fließverhalten in der Schalung war grundsätzlich gleich, wenn auch im Fertigteil der Beton aufgrund der Anlieferzeit nicht das gewünschte Fließverhalten hatte. Die Festigkeitskennwerte (Druckfestigkeit, E-Modul etc.) des Betons entsprachen nach 28 Tagen jenen konventioneller Betonrezepturen. Die Frühfestigkeit in den ersten 28 Tagen nahm bei Außentemperaturen unter 20°C zuerst geringfügig, zwischen 5-12°C, dann deutlich ab. Unter 0°C wird, ohne Sondermaßnahmen, von einem Einsatz abgeraten. Detaillierte Handlungsempfehlungen für Sommer- und Winterbaustellen wurden definiert. Ein weiteres Ergebnis war, dass ein rasches Ausschalen und Abdecken von RCC-Wänden besser für ein schnelles Aushärten ist, als eine längere Schalzeit. Und: Die Ergebnisse der Baustellenproben haben gut mit den Laborversuchen korrespondiert, welche im Vorfeld und parallel zu den in-situ-Versuchen durchgeführt wurden. Das Monitoring der Frühfestigkeitsentwicklung durch schalungsintegrierte Temperaturfühler war wesentlich für die Bestimmung der Betonreife, da die Aushärtungsgeschwindigkeiten über die Betonkern-Temperatur extrapoliert werden können.

In den untersuchten Szenarien am Wohnbauprojekt *Taborama* am Nordbahnhof Wien liegt das Potenzial einer CO₂-Reduktion durch RCC-Anwendung zwischen 13 % und 20 % – für das gesamte Gebäude mit ca. 200 Wohnungen. Das entspricht einer Einsparung von ca. 500 t CO₂-Äquivalente für das Objekt oder 2,5 t CO₂ pro Wohnung. Die Fallstudie zeigt, dass RCC-Betone für 50 % der Betonanwendungen gut geeignet sind. Die CO₂-Reduktion von 25 % bei der Hälfte des eingesetzten Betons würde die zementbedingten CO₂-Emissionen in Österreich um 12,5 % senken.

In Deutschland wird der Zementverbrauch per capita anhand des inländischen Zementversands berechnet. Laut dem Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) wurden im Jahr 2020 ca. 28 Mio. t Zement im Inland versandt. Dies ergibt einen Pro-Kopf-Verbrauch von 350 kg im Jahr.

Umgelegt auf Österreich beläuft sich bei einem inländischen Zementversand im Jahr 2020 von 4,8 Mio. t (VÖZ II, 2021) der Verbrauch pro Kopf auf 538 kg oder insgesamt 2,7 Mio. t CO₂. Mit RCC-Beton als Stand der Technik ließen sich die zementbedingten CO₂-Emissionen in Österreich um 340.000 t senken. Die Empfehlungen aus diesem Forschungsprojekt richten sich an die Bau- und die Betonbranche. In letzterer sollten schnellstmöglich gemeinsame Randbedingungen für das Performance-Konzept von RCC-Betonen als neuen Stand der Technik geschaffen werden.

2 Abstract

Concrete and cement production are of considerable environmental relevance; at the same time, concrete is by far the most widely used building material worldwide. Austria has an annual cement consumption of 5.2 million tons and emits approximately 2.9 million tons of CO₂ per year for its production (MAUSCHITZ, 2020, p. 7, 7a). Decarbonization of the construction industry is a global issue. The present project is intended to make a contribution to this.

The research objective is the use of "performance concrete" as CO₂-reduced concrete (RCC - "reduced carbon concrete") with a lower cement content. In contrast to conventional concretes, the technical equivalence has to be proven by the technical properties ("performance"). The basis, in addition to ÖNORM B 4710-1, is the future ONR 23339 "Rules for the implementation of the concept of equivalent concrete performance". This standard will set the framework, how to compensate the delayed early strength development of RCC concrete by suitable curing measures at the construction site.

In two series of tests, structural elements designed according to the RCC concept with a 25% reduction of CO₂ were compared with conventionally designed structural elements of the same design. This empirical research under practical conditions on a construction site under summer and winter temperatures and in a precast concrete plant aimed at practical findings on the "real crete" and not on the "lab crete".

RCC concretes can be processed into wall and floor elements just as well as conventional concrete, as tests for the summer and winter cases have shown. The flow behavior in the formwork was basically the same, although in the precast element the concrete did not have the desired flow behavior due to the delivery time. The strength characteristics (compressive strength, modulus of elasticity, etc.) of the concrete after 28 days corresponded to those of conventional concrete mixes. The early strength in the first 28 days decreased at first slightly at outdoor temperatures below 20°C, then significantly between 5-12°C. Below 0°C, use without special measures is not recommended. Detailed recommendations for summer and winter construction sites were defined. Another finding was that rapid stripping and covering of RCC walls is better for rapid curing than a longer forming time. And: the results of the site tests corresponded well with the laboratory tests, which were carried out in advance and in parallel with the in-situ tests. The monitoring of early strength development by integrated temperature sensors in the formwork was essential for estimating and determining concrete maturity, as curing rates can be extrapolated via concrete core temperature.

In the scenarios investigated at the *Taborama* residential project at Vienna's North Station, the potential for CO₂ reduction through RCC application is between 13% and 20% for the entire building with approximately 200 apartments. This corresponds to a saving of about 500 t CO₂ equivalent for the building or 2.5 t CO₂ per apartment. The case study shows that RCC concretes are easily suitable for 50% of concrete applications. A CO₂ reduction of 25% for half of the concrete used would reduce cement-related CO₂ emissions in Austria by 12.5%. In Germany, cement consumption per capita is calculated based on domestic cement shipments. According to the Association of the German Cement Industry (VDZ), approximately 28 million tons of cement were shipped domestically in 2020. This results in a per capita consumption of 350 kg per year. Applied to Austria, with domestic

cement shipments in 2020 of 4.8 million t (VÖZ II, 2021), per capita consumption amounts to 538 kg or a total of 2.7 million t CO₂. With RCC concrete as the state of the art, cement-related CO₂ emissions in Austria could be reduced by 340,000 tons.

The recommendations from this research project are addressed to the construction and concrete industries. In the latter, common boundary conditions for the performance concept of RCC concretes should be created as quickly as possible as the new state of the art.

3 Executive Summary

Beton- und Zementproduktion sind von erheblicher Umweltrelevanz, zugleich ist Beton weltweit der bei weitem verbreitetste Baustoff. Die Dekarbonisierung der Bauwirtschaft ist ein globales Thema, das in diesem Projekt zu CO₂-reduziertem Beton um einen kleinen Schritt weitergebracht wurde. In den untersuchten Szenarien am SRE-Projekt *Taborama* am Nordbahnhof Wien liegt das Potenzial einer CO₂-Reduktion durch Anwendung alternativer Betonrezepturen zwischen 13 % und 20 % für das gesamte Gebäude mit ca. 200 Wohnungen. Das ist eine Einsparung von ca. 500 t CO₂-Äquivalente für das Gebäude oder 2,5 t weniger pro Wohnung. Daraus lässt sich für den Wiener Wohnbau mit ca. 10.000 WE/a ein Reduktionspotenzial von ca. 25.000 t CO₂-Äquivalente pro Jahr ableiten. Österreich hat eine jährliche Zementproduktion von 5,2 Mio. t Zement und emittiert für die Herstellung ca. 2,9 Mio. t CO₂ im Jahr (MAUSCHITZ, 2020, S. 7, 7a). Die Fallstudie zeigt, dass „Reduced Carbon Concrete“ (RCC) für 50 % der Betonanwendungen gut geeignet ist. Mit RCC als Stand der Technik, d.h. einer CO₂-Reduktion von 25 % bei der Hälfte des Betons, sinken diese Emissionen um 340.000 t CO₂-Äquivalente im Jahr österreichweit.

Die Berechnungen zur CO₂-Reduktion beruhen auf Angaben über die Klinkeranteile je nach Expositionsklasse in kg/m³ in alternativen Betonen im Vergleich zu herkömmlichen Betonen. Dabei werden für den Klinker laut VÖZ Emissionsbericht 2020 CO₂-Emissionen von 771 kg/t (exkl. biogener Brennstoffanteile) zu Grunde gelegt (MAUSCHITZ, 2020, S. 22).

CEM II enthält laut ÖNORM einen Klinkeranteil von 65-94 % (ON EN 197-1, 2018). Für die hier zugrundeliegenden Berechnungen wird für CEM II von 77 % und für CEM I von 91 % Klinker ausgegangen. Übliche Zemente wie CEM II haben einen Klinkerersatzanteil bis 35 % (VÖZ, 2021). Die gegenständliche Rezeptur von RCC begrenzt den Klinkeranteil auf 50 %. Theoretisch würde der Einsatz von Hochofenzement sogar eine Klinkerreduktion auf bis zu 35 % (CEM III/A) bzw. 20 % (CEM III/B) erlauben (ON EN 197-1, 2018). Diese Zemente sind jedoch nicht in großem Umfang verfügbar und auch hinsichtlich der Anwendbarkeit gibt es normative und betontechnologische Einschränkungen.

Der Fokus auf die Innovation des Gleichwertigkeitsnachweises von Performance-Beton öffnet dagegen ein Zukunftsfeld. Die Entwicklung einer Strategie zum Einsatz von CO₂-reduziertem Beton muss dafür die branchenübliche Anwendung des deskriptiven Konzeptes gemäß ÖNORM B 4710-1 überwinden. Der deskriptive Ansatz pauschaliert für Betonfestigkeiten aus Erfahrungswerten einen Mindestbindemittelgehalt und einen W/B Wert, kurz *Design Konzept*. Ein CO₂-reduzierter Beton mit geringerem Klinkergehalt unterschreitet diesen Mindestbindemittelgehalt. Daher ist ein Nachweis über ein Konzept der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit (Equivalent Concrete Performance Concept - ECPC), kurz *Performance-Konzept*, zu führen (ON B 4710-1, 2018, S. 50). Grundlage hierfür bildet, neben der ÖNORM B 4710-1, die künftige ONR 23339 „Regeln für die Umsetzung des Konzepts der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit“.

In diesem Forschungsprojekt wurde erstmals ein solches Performance-Konzept für die Errichtung eines Gebäudes entwickelt (s. Anhang 1). Ein Konzept der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit muss die verzögerte Frühfestigkeitsentwicklung eines CO₂-reduzierten Betons durch geeignete Nachbehandlungsmaßnahmen auf der Baustelle kompensieren. Das Konzept beschreibt, mit welchen Maßnahmen je nach Bauteil, abhängig von der Außenluft- und Frischbetontemperatur,

Rissbildung verhindert oder die Erstarrungszeit beschleunigt werden soll. In zwei Versuchsreihen wurden Bauteile, die nach diesem Konzept konzipiert wurden, mit konventionell ausgeführten Bauteilen gleicher Bauart verglichen. Diese empirische Forschung unter Praxisbedingungen auf der Baustelle des *Taborama* und im Fertigteilwerk der *Mischek Systembau* in Gerasdorf zielte auf Erkenntnisse am „real crete“ und nicht am „lab crete“ ab. Zuzufolge dessen bilden die Erkenntnisse die Grundlage einer anwendungsorientierten Ausrichtung der ONR 23339 ab.

RCC lässt sich genauso gut zu Wand- und Deckenelementen verarbeiten wie konventioneller Beton. Dies haben die Versuche für den Sommer- und Winterfall gezeigt. Das Fließverhalten in der Schalung ist grundsätzlich gleich, auch wenn im Fertigteil der Beton aufgrund der Anlieferzeit nicht das gewünschte Fließverhalten hatte. Die Festigkeitskennwerte (Druckfestigkeit, E-Modul etc.) und sonstigen Eigenschaften bzgl. Dauerhaftigkeit des Betons entsprechen nach 28 Tagen jenen von konventionellen Betonrezepturen.

Die Frühfestigkeitsentwicklung unterscheidet sich innerhalb der ersten 28 Tage aufgrund des reduzierten Klinkeranteils, nämlich

- etwas langsamer bei 12- 20°C,
- deutlich verlangsamt zwischen 5° und 12°C,
- Verarbeitung unter 0°C wird ohne Sondermaßnahmen nicht empfohlen.

Wesentlich zum Erlangen der Gleichwertigkeit der Leistungsfähigkeit für RCC ist die Nachbehandlung:

- Sommerbaustelle: Schutz vor Austrocknung, da offenerporiger Beton zu „Frühschwinden“ neigt. Aufbringung von ausreichender Menge an Verdunstungsschutz zur Vermeidung von Rissbildung – besser ist eine zusätzliche Abdeckung mit Folien etc.
- Winterbaustelle: Schutz vor ungewollten Temperaturspannungen, welche zu Rissen führen können. Aufbringung eines Vlieses zur Minimierung der Auskühlung des Bauteils um raschere Frühfestigkeit und dadurch verkürzte Ausschalzeiten zu ermöglichen.
- Bei konzeptgetreuer Umsetzung der Nachbehandlung sind jene signifikanten Betonkennwerte (z.B. Carbonatisierung, Wasseraufnahme) vergleichbar mit konventionellem Beton.

Die Ergebnisse der Baustellenproben korrespondierten gut mit den Laborversuchen, welche im Vorfeld und parallel zu den in-situ-Versuchen durchgeführt wurden. Das Monitoring der Frühfestigkeitsentwicklung durch das System Concremote® von Doka war wesentlich für die Einschätzung und letztlich Bestimmung der Betonreife, da die Aushärtungsgeschwindigkeiten über die Betonkern-Temperatur extrapoliert werden können.

Aus den Auswertungen der Ergebnisse und den praktischen Erkenntnissen durch die Baustellenversuche entwickelte das Forschungskonsortium eine Maßnahmenmatrix für den Betoneinbau. Unterschieden wurde prinzipiell in Wand- und Deckenbauteile sowie Abstufungen der Temperaturbereiche. Die Dauer der Nachbehandlungsarten wurde methodisch auf Schalungsmaterial und Ausschalzeiten abgestimmt. Die Maßnahmen zur Nachbehandlung des Performance-Betons auf der Baustelle dienen einer optimierten Kompensation der verzögerten Frühfestigkeitsentwicklung von RCC entsprechend der Umgebungstemperatur.

Performance-Beton kommt mit dieser Matrix aus empirisch ermittelten Werten einer möglichen normierten Qualitätssicherung und Risikoeindämmung einen Schritt näher.

Die Wirksamkeit der Nachbehandlung im Winterversuch, insbesondere auch im Vergleich zur Wirkung der Schalzeit war markant. Zur Verdeutlichung: Die nach einem Tag ausgeschalte und mit Vlies abgedeckte Wand hat eine doppelt so hohe Temperatur wie das nach zwei Tagen ausgeschalte Element. Bei der verwendeten Rahmenschalung aus Aluminium hält das frühestmögliche Ausschalen nach 24 h und gleich anschließende Abdecken mit Vlies die Bauteiltemperatur nach 48 h bei 10°C. Dagegen fällt die Bauteiltemperatur der Wand nach 48 h in der Schalung bereits auf kritische 5°C. **Das bedeutet, dass ein rasches Ausschalen und Abdecken von RCC-Wänden besser für die Temperaturkonstanz im Bauteil und damit für die Frühfestigkeitsentwicklung ist als eine längere Schalzeit.**

Die Empfehlungen aus dem Forschungsprojekt richten sich an die Baubranche im Allgemeinen und die Betonbranche im Besonderen. Hier sollten schnellstmöglich gemeinsame Randbedingungen für das Performance-Konzept als neuen Stand der Technik geschaffen werden. Das geschieht mit dem Ziel, einen „vollen Wettbewerb“ zu haben, d.h. dass dieser Stand der Wissenschaft von allen in einer Branche tätigen Unternehmen erfüllt werden (können) soll. Andererseits soll dieser Wettbewerb durchaus zu einer Diversifizierung von Produkten führen, die entsprechend der jeweiligen Erfahrungen und Stärken eines Unternehmens das Bauen mit Beton umweltfreundlicher machen. Dieser Trend zeichnet sich bereits ab. Ein Wettbewerb diversifizierter Betonprodukte mit unterschiedlicher Umweltperformance bedarf allerdings auf Seiten der Leistungsbeschaffung neuer Strukturen und Methoden, um die Vorteile dieser Produkte zu gewichten. Das Ausschreiben von Festigkeits- und Expositionsclassen wird nicht mehr ausreichen; vielmehr wird hier künftig die Beurteilung der Effizienz der Tragstruktur die Umweltwirksamkeit einschließen müssen.

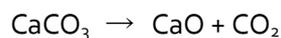
Dafür muss Wissen geteilt, über Unternehmensgrenzen hinaus kooperiert, ergebnisoffen geforscht und öffentlich gemacht werden, was das Bauen mit Beton umweltverträglicher macht. Diese Absicht liegt der Arbeit dieses Konsortiums und dem Bericht zu Grunde.

4 Ausgangslage

4.1 Zur Umweltrelevanz von Beton

Weltweit hat sich der Betonbedarf in den vergangenen 20 Jahren verdreifacht (PEDUZZI, 2014). Beton besteht aus Zement, Sand und Kies, chemischen Zusatzmitteln sowie Wasser. Die Produktion von Zement ist besonders CO₂-intensiv. Vergleicht man den gesamten CO₂-Ausstoß der globalen Zementherstellung (LEHNE, PRESTON, 2018) mit einzelnen nationalen Emissionen (CRIPPA et al. 2019), steht die Zementindustrie als fiktives Land nach USA und China an dritter Stelle.

Der Zementanteil macht ca. 90 % der CO₂-Emissionen im Beton aus. Zementklinker wird aus einem Kalk-Tongemisch gebrannt. Die Verbrennung verursacht allerdings nur ein Drittel der Emissionen. Die Prozessemissionen, also die Umwandlung von Kalkstein in Calciumoxid und Kohlendioxid emittiert doppelt soviel CO₂. Dieser Umwandlungsvorgang wird als *Entsäuerung* bezeichnet:



Kalkstein → Calciumoxid (Brannkalk) + Kohlendioxid

Eine Verbesserung der Umwelteinwirkung von Beton wird daher derzeit auf drei Ebenen weltweit vorangetrieben:

- Reduktion von Klinker im Zement,
- Reduktion von Zement im Beton,
- Alternative Bindemittel, im weitesten Sinn beinhaltet dies CO₂-Kreislaufprozesse oder Carbon Capture Programme.

Betonrezepturen enthalten derzeit ein hohes Maß an Sicherheitsfaktoren, um mögliche Fehler bei der Ausführung auf der Baustelle potenziell ausgleichen zu können. Vielfach werden die europaweit unterschiedlichen Umsetzungen der *EN 206 Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität* als Indikator für die Bandbreite dieser Redundanz gesehen. Kritisiert wird vor allem der große Einfluss der ZementherstellerInnen auf die Normierung.

Konventionelle Rezepturen enthalten Sicherheiten durch einen Mindestbindemittelanteil. Diese Redundanz führt zu hohem CO₂-Gehalt. Durch die Reduktion des Klinkergehalts bei RCC ergeben sich eine etwas langsamere Frühfestigkeitsentwicklung und ein höherer Nachbehandlungsbedarf. Die Reduktion des Bindemittelanteils erfordert ein höheres Ausmaß an Sorgfalt bei der Verarbeitung. Damit diese Notwendigkeiten bei der Baudurchführung entsprechend berücksichtigt werden können, ist ein Konzept für den Nachweis der gleichwertigen Leistungsfähigkeit von CO₂-reduzierten Betonen im Zuge der Baudurchführung erforderlich. Dieses Konzept wurde im vorliegenden Projekt *RCC-Reduced Carbon Concrete: Implementierung von CO₂-reduzierten Betonen auf der Baustelle* im Auftrag des BMK erstmals für ein Gebäude entwickelt.

Ein solcher Nachweis ermöglicht ein normkonformes Vorgehen. Entsprechende Vorgaben zur Nachbehandlung und Qualitätssicherung garantieren die Gleichwertigkeit der Leistungsfähigkeit des Betons trotz Abweichung vom anrechenbaren Mindestbindemittelhalt und W/B-Wert, wie sie

innerhalb des deskriptiven Nachweises der Norm ÖN B 4710-1, *Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton* gefordert werden.

4.2 Das Konzept der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit

Die Entwicklung einer Strategie zum Einsatz von CO₂-reduziertem Beton überwindet die branchenübliche Anwendung des deskriptiven Konzeptes gemäß ÖNORM B 4710-1. Der deskriptive Ansatz pauschaliert für Expositionsklassen aus Erfahrungswerten einen anrechenbaren Mindestbindemittelgehalt und einen W/B Wert, kurz *Design Konzept*. Dem gegenüber steht das Konzept der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit (Equivalent Concrete Performance Concept - ECPC), kurz *Performance-Konzept*. Grundlage hierfür bildete, neben der ÖNORM B 4710-1, die künftige ONR 23339 „Regeln für die Umsetzung des Konzepts der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit“. Diese Regeln werden derzeit u.a. in Anlehnung an die ÖBV-Richtlinie „Wasserundurchlässige Betonbauwerke – Weiße Wannen“ entwickelt. Auf Basis dieser Richtlinie wird bereits seit vielen Jahren Beton mit insgesamt geringem Klinkergehalt und erhöhtem Gehalt an Bindemittelzusatzstoffen eingesetzt. Mit „Weiße Wannen-Beton“ ist das Konzept von CO₂-reduziertem Beton indirekt bereits in Verwendung. Allerdings ist die Nachweisführung der gleichwertigen Leistungsfähigkeit bisher nicht zur Anwendung gekommen, da auch die ÖBV-Richtlinie einen Mindestbindemittelgehalt ausweist. Erst mit der Nachweisführung lt. ONR 23339, die mit dem vorliegenden Projekt in weiten Teilen vorweggenommen wird, ist ein anrechenbarer Mindestbindemittelgehalt durch den Nachweis der gleichwertigen Leistungsfähigkeit hinfällig. Allerdings hat man sich bereits im Vorfeld auf die ausschließliche Verwendung von zertifizierten Bindemittelzusatzstoffen für den Geltungsbereich der ONR 23339 „Regeln für die Umsetzung des Konzepts der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit“ geeinigt.

Die Intensivierung der Einbauqualität mit entsprechender Nachbehandlung auf der Baustelle kann somit redundante Sicherheitsreserven im Material kompensieren und damit die Umweltbilanz von Beton verbessern. Die Beigabe von Zement kann im Beton unter den Mindestbindemittelanteil der Norm gesenkt werden, sofern die erforderlichen Randbedingungen einer gleichwertigen Leistungsfähigkeit geschaffen werden. Diese Alternative zum Design-Konzept bieten die bestehenden Betonnormen EN 206 bzw. ÖNORM B 4710-1 in Form des Performance-Nachweises. Im Projekt wurde dieses Performance-Konzept für ein Bauvorhaben der STRABAG Real Estate (SRE) entwickelt. Es sollte daher der normkonforme Einsatz von CO₂-reduziertem Beton nach diesem Performance-Konzept auf der Baustelle erprobt werden.

4.2.1 Das Potenzial des Performance-Konzepts

Insgesamt geht es um nichts weniger als die Ökologisierung des Hauptbaustoffes der industrialisierten Welt. Betonproduktion mit geringeren CO₂-Äquivalenten ist technisch möglich und weitgehend bekannt, jedoch fehlen Erfahrung und Normen als Basis für Ausschreibungen. Um diese Produkte zum Stand der Technik zu machen, muss zunächst das Konzept des Performance-Betons in der Praxis etabliert werden. So selbstverständlich der Energieverbrauch im Gebäudebetrieb reglementiert ist, so wird in naher Zukunft die Reduktion von grauer Energie, die zur Herstellung eines Gebäudes notwendig ist, Planungsgegenstand sein. Daher sind Technologien zu reduziertem Primärenergiegehalt in Betongebäuden von großer Tragweite. Durch alternative

Anwendung bestehender Normen soll dafür bekanntes, aber bisher unbetretenes Terrain erschlossen werden. Es ist davon auszugehen, dass die Potenziale für RCC bei geeigneten Rahmenbedingungen, also bei Außenlufttemperaturen über 12°C Tagesmittelwert, langfristig kostenneutral verglichen zu Bauweisen mit herkömmlichen Betonrezepturen sind. Aber erst durch die Risikoanalyse in Versuchen mit Baustellenbedingungen ist die Einführung in die Praxis möglich. Das Projekt sollte die praktische Erprobung der notwendigen Aufwände im Grenzbereich der Temperaturen von 0°C bis 12°C ausloten. Diese Erkenntnis über die technisch wirtschaftlichen Grenzen der Anwendbarkeit des „Equivalent Concrete Performance Concept“ kann die Praxisrelevanz der ONR 23339 „Regeln für die Umsetzung des Konzepts der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit“ erheblich befördern.

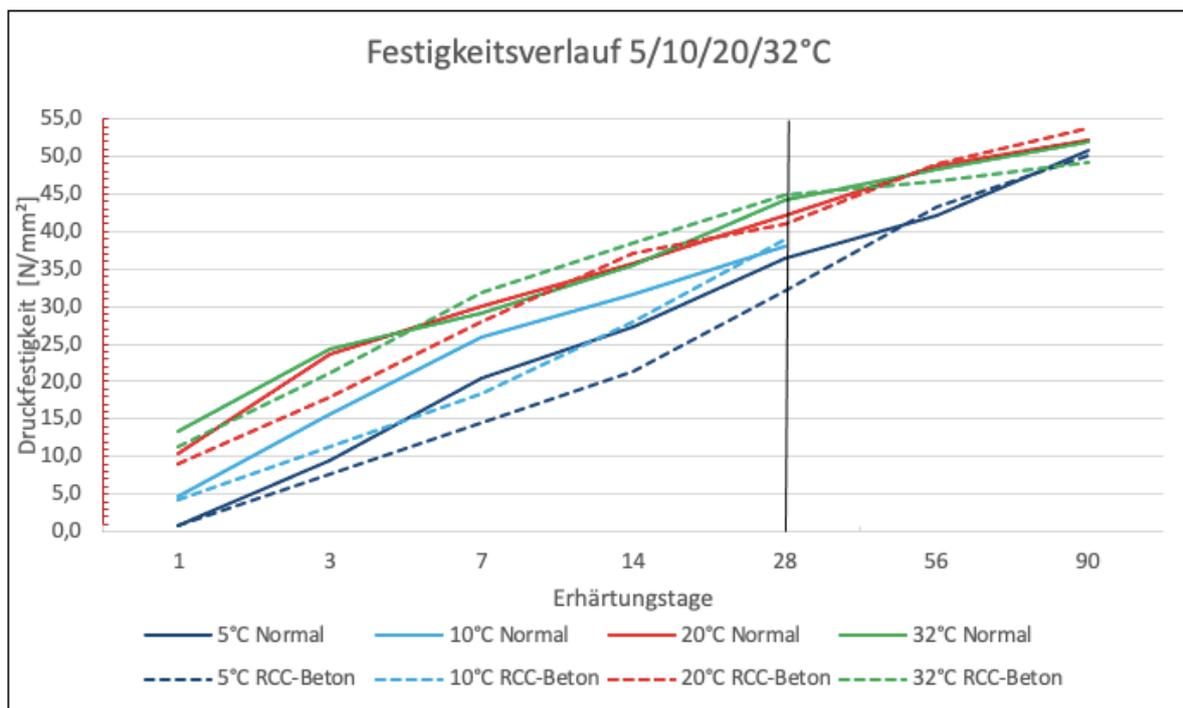


Abb. 1 Festigkeitsverlauf von Performance-Beton im Vergleich zu Normalbeton, e.E.

Das Ergebnis des Projekts ist die Erkenntnis, welche Maßnahmen die in Abb. 1 gut ablesbare, verzögerte Frühfestigkeitsentwicklung von Performance-Beton bei verschiedenen Temperaturbedingungen für einen reibungslosen Bauablauf erfordert. Die Aufwände zur Kompensation des Nachteils einer langsameren Frühfestigkeitsentwicklung im RCC sollen unter Praxisbedingungen den effektiven Umweltvorteilen eines verringerten Zementgehalts gegenübergestellt werden.

Die Motivation, das Konzept in einem praktischen Experiment auf der Baustelle umzusetzen, ist, die Umweltbilanz des Bauens mit Beton langfristig zu verbessern. Dafür müssen Schlüsselparameter für eine angepasste Art der Bauführung erprobt werden, um Bauvorhaben grundsätzlich CO₂-reduziert umsetzen zu können. Erst in der gelebten Baustellenerfahrung kann der Umgang mit neuen Werkstoffen erlernt und ein Sinn für die Erfordernisse angepasst werden. Die Qualität der Nachbehandlung, also die Arbeitsleistung von qualifiziertem Personal ist in der Lage Materialreserven und Sicherheitszuschläge adäquat zu ersetzen.

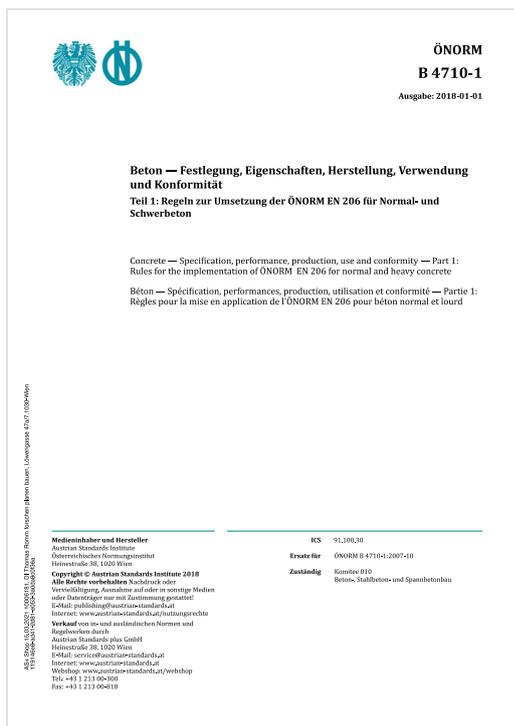


Abb. 2 Deckblatt der ÖNorm B 4710-1 für Beton

In die zeitnahe Veröffentlichung der ONR 23339, welche sich stark mit dem Nachweis der gleichwertigen Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Betone befasst, fließen bereits die maßgeblichen Ergebnisse dieses Projekts durch die ExpertInnen des Konsortiums mit ein. Dabei waren die Versuchs- und Messreihen auf der Baustelle von entscheidender Bedeutung. Die Demonstration des Nachweises in einem Bauvorhaben ist in Folge von besonderer Relevanz für die Verbreitung des Ansatzes im österreichischen Bauwesen und darüber hinaus.

Alle Verfahren, Technologien und Rezepturen, die vom anrechenbaren Mindestbindemittelgehalt des deskriptiven Ansatzes lt. ÖN B 4710-1 abweichen, bedürfen des Nachweises der Gleichwertigkeit der Leistungsfähigkeit des Betons. Bei einem Abgehen vom anrechenbaren Mindestbindemittelgehalt ist entsprechendes betontechnologisches Know-how erforderlich. Dieses Nachweiskonzept (ECPC) wurde in Österreich noch nicht in der Praxis erprobt.

4.3 Entwicklungen und Produkte zu CO₂-reduziertem Beton

Trotz einer Vielzahl an Entwicklungen, auf die im Anschluss noch eingegangen wird, gibt es bisher noch keine Produkte, die als Performance-Beton bezeichnet werden können. Dieser Mangel steht in Zusammenhang mit dem bisherigen Fehlen eines erfolgreich durchgeführten Nachweiskonzeptes zu Performance-Beton. Die Dienstleistung, ein Nachweiskonzept zu erstellen und die Klärung der Haftungsfragen, konnten im Projekt *RCC: Implementierung von CO₂-reduzierten Betonen auf der Baustelle* erarbeitet werden. Das Konsortium, das aus ausgewiesenen ExpertInnen zum Thema in Österreich besteht und in weiten Teilen an der Arbeitsgruppe der ONR 23339 „Regeln für die Umsetzung des Konzepts der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit“ beteiligt ist, zielt mit diesem

empirischen Forschungsprojekt durch die Integration aller an der Realisierung eines Bauvorhabens Beteiligten auf einen Beitrag zum Durchbruch und zur Etablierung des Performance-Konzepts.

4.3.1 Marktanalyse

Gerade das Fehlen der Erfahrungen mit dem Nachweis der gleichwertigen Leistungsfähigkeit des Betons lässt sich an Produkten im Projektbereich ablesen: Evopact und EvopactPLUS (mit rezyklierten Gesteinskörnungen) ist ein Produktkonzept der Schweizer Holcim, das als ressourcenschonender Beton mit einer Reduktion von 10 % -20 % CO₂ den geforderten anrechenbaren Mindestbindemittelanteil und damit den deskriptiven Ansatz nicht verlässt (LafargeHolcim Ltd., 2021).

Dies gilt auch für EOPact, einer Variante der Lafarge-Gruppe: EOPactZERO ist ein Produkt, das ähnlich wie Flugtarife über Kompensationsmodelle ein CO₂-neutrales Produkt anbietet (s. Abb. 3).



Abb. 3 Produktblätter zu CO₂-reduzierten Betonen (Quelle: LafargeHolcim Ltd., 2021)

Das derzeit in Ausarbeitung befindliche ECPC-Regelwerk, die ONR 23339 „Regeln für die Umsetzung des Konzepts der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit“, entsteht in Anlehnung an die ÖBV-Richtlinie „Wasserundurchlässige Betonbauwerke – Weiße Wannen“: In beiden Fällen geht es im Prinzip um dichten Beton mit geringer Porosität. In diesem Bereich hat Wopfinger Transportbeton die größte Branchenerfahrung. Wopfinger war insbesondere mit der Produktentwicklung von Slagstar, einem Dichtbeton auf Basis von Hüttensulfatzement, seiner Zeit voraus. Slagstar wurde

ursprünglich als Dichtbeton, der besonders resistent gegen chemische Angriffe ist, etwa für Kläranlagen entwickelt. Der Vorteil einer beträchtlichen CO₂-Einsparung steht dem Erfordernis einer sorgfältigeren Verarbeitung gegenüber. Wopfinger hat im Jahr 2011 im Zuge der Bauprodukteverordnung für Slagstar keine europäische Zulassung mehr beantragt und die Lizenzrechte nach Indien verkauft. Angesichts der aktuellen Klimaziele ist diese Themenführerschaft zu Performance-Beton international von großer Bedeutung. Es gibt eine Vielzahl an internationalen Initiativen in der Betontechnologie, Alternativen für CO₂-lastige Bindemittel zu entwickeln – bis hin zu vollkommen neuen chemischen Rezepturen, die sich zwischen den Ausgangsstoffen Brandkalk und Quarz bewegen.

Als Beispiel für die Entwicklung alternativer Bindemittel sei an dieser Stelle die deutsche Celitement GmbH genannt, die 2009 im Rahmen einer Kooperation zwischen Forschung (KIT) und Industrie (SCHWENK Zement KG) gegründet wurde. 2011 wurde ein Labor- und Verwaltungsgebäude mit Pilotanlage errichtet. In dieser Anlage wird Versuchsmaterial für praxisnahe Anwendungsversuche mit dem neuen Bindemittel produziert.

Anfang 2020 wurde die Celitement GmbH von der SCHWENK Zement KG, vollständig übernommen, um es zur Marktreife zu bringen. Dazu heißt es auf HerstellerInnenseite:

„Celitemente sind hochwertige hydraulische Bindemittel, die mittels eines patentierten energieeffizienten Prozesses hergestellt werden. Sie zeichnen sich, verglichen mit Portlandzementklinker, durch einen spezifisch geringeren Kalksteinverbrauch und niedrigere Prozesstemperaturen bei der Herstellung aus. Wir entwickeln und optimieren dieses neuartige hydraulische Bindemittel mit dem Ziel, marktfähige Produkte zu erhalten und damit einen Beitrag zur Verringerung der CO₂-Intensität der Zementherstellung zu leisten.“ (Celitement, 2021)

Jegliche Entwicklungen von neuen Betonrezepturen – Geopolymere eingeschlossen – sind auf eine erprobte Verfahrensweise zum Nachweis der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit angewiesen. Daher ist die Begleitung des Bauvorhabens zur Dokumentation der Kriterien für Planung, Leistungsbeschaffung und Zertifizierung von CO₂-reduziertem Performance-Beton von zentraler Bedeutung.

5 Projektinhalt

5.1 Methodischer Ansatz von RCC

Die STRABAG Real Estate hatte mit Beginn des Jahres 2020 Gespräche mit führenden Branchenvertretern zu einem Leuchtturmprojekt für CO₂-reduzierten Beton aufgenommen. Mit der Unterstützung von DI Dr. Johannes Horvath (Sachverständiger Betontechnologie) und DI (FH) Reinhard Pamminer (Prüfanstalt Hartl) unter der Leitung und Moderation von ROMM ZT/MISCHEK ZT und bauXund wurde ein Konsortium gegründet. Von Anfang an war der Einsatz einer Wopfinger-Betonrezeptur mit klinkerreduziertem Zement und der Reduktion von ca. 30 % CO₂-Äquivalente Gegenstand der Gespräche.

Derzeit werden im österreichischen Transportbeton vorrangig CEM II/A Zemente eingesetzt (enthalten zwischen 6 % und 21 % Klinkerersatzanteile), wobei diese typischerweise mit AHWZ gemischt werden. Die zulässigen Massenverhältnisse Zement zu AHWZ richten sich dabei nach Zementart und Zementfestigkeitsklasse, wobei der maximale Anteil an Klinkerersatzstoffen dieser Kombinationen bei rund 35 % liegt. Dies ist vergleichbar mit CEM II/B Zementen. Darüber hinaus lässt die österreichische Betonnorm nur zwei Zementarten mit höheren Klinkerersatzanteilen zu, nämlich CEM III/A (36-65 % Hüttensand) und CEM III/B (66-80 % Hüttensand). Beide Zementsorten sind aber nur in eingeschränktem Umfang am Markt vertreten. Dies liegt einerseits an den verfügbaren Hüttensandmengen, dem deutlich höheren Herstellungsaufwand sowie normativen und betontechnologischen Einschränkungen hinsichtlich der Anwendungen. Somit stellen 35 % Klinkerersatzstoffe derzeit eine Art Obergrenze für die meisten Bindemittelzusammensetzungen österreichischer Transportbetone dar.

Die Überlegungen von Wopfinger Transportbeton für RCC zielen auf alternative Beton-zusammensetzungen (CEM I + AHWZ-GS + AHWZ-GC) mit weitergehender Klinkerreduktion ab, sodass signifikante CO₂-Reduktionen möglich werden. Die Berechnung der CO₂-Reduktion erfolgt dabei durch einen direkten Vergleich der Klinkeranteile (kg/m³) mit konventionellem Beton, für Anwendungen in derselben Expositionsklasse. Dabei werden für den Klinker CO₂-Emissionen von 771 kg/t laut VÖZ Emissionsbericht 2018 (exkl. biogener CO₂-Emissionen) zugrunde gelegt (MAUSCHITZ, 2020, S. 22). Der Klinkergehalt für CEM II/A wird mit 77 % angenommen und für CEM I mit 91 %. Da der überwiegende Teil der CO₂-Emissionen des Betons dem Klinker zuzuordnen ist, kann mit dieser Methodik die absolute Menge an CO₂-Einsparung je Kubikmeter Beton in hinreichender Genauigkeit abgeschätzt werden.

Leider gibt es in Österreich bis dato keine frei zugänglichen Umweltproduktdeklarationen (EPD) für Transportbetone, mit denen die Menge an eingespartem CO₂ direkt in Bezug gesetzt werden könnte. Somit bleibt nur der Vergleich mit deutschen EPD-Daten, welche für durchschnittliche Betone unterschiedlicher Festigkeitsklassen ermittelt wurden (unter ibu-epd.com öffentlich zugänglich).

Festigkeitsklasse C25/30		
CO ₂ Einsparung bei Einsatz von C25/30 XC1 RCC im Vergleich zu konventionellem Beton (inkl. fossil. Brennstoffe bei Zementklinkerherstellung)	kg CO ₂ eq/m ³ Beton	34
GWP für durchschnittlichen C25/30 in Deutschland laut EPD der InformationsZentrum Beton GmbH (inkl. Verbrennung von Abfällen bei Zementklinkerherstellung)	kg CO ₂ eq/m ³ Beton	226
GWP für durchschnittlichen C25/30 in Deutschland laut EPD der InformationsZentrum Beton GmbH (exkl. Verbrennung von Abfällen bei Zementklinkerherstellung)	kg CO ₂ eq/m ³ Beton	197
Festigkeitsklasse C30/37		
CO ₂ Einsparung bei Einsatz von C30/37 XC1 RCC im Vergleich zu konventionellem Beton (inkl. fossil. Brennstoffe bei Zementklinkerherstellung)	kg CO ₂ eq/m ³ Beton	53
GWP für durchschnittlichen C30/37 in Deutschland laut EPD der InformationsZentrum Beton GmbH (inkl. Verbrennung von Abfällen bei Zementklinkerherstellung)	kg CO ₂ eq/m ³ Beton	252
GWP für durchschnittlichen C30/37 in Deutschland laut EPD der InformationsZentrum Beton GmbH (exkl. Verbrennung von Abfällen bei Zementklinkerherstellung)	kg CO ₂ eq/m ³ Beton	219

Tab. 1 Angaben der für die Berechnung verwendeten CO₂-Äquivalente (IBU I, IBU II, 2018)

Die Innovation des Gleichwertigkeitsnachweises von Performance-Beton wird das Zukunftsfeld der Anwendung von RCC öffnen. Die Vorarbeiten zur Implementierung von CO₂-reduziertem Beton auf der Baustelle konnten die rechtlichen und technischen Rahmenbedingungen klären, um Rezepturen für Performance-Beton unterhalb des anrechenbaren Mindestbindemittelgehalts des deskriptiven Ansatzes der ON B 4710-1 normkonform ausführbar zu machen.

Der Vorteil von Performance-Beton, gegenüber Anwendungen von neuen Betontechnologien mit völlig anderen chemischen Eigenschaften, liegt klar in seiner Normkonformität und der technischen Machbarkeit. Seine breite Einsetzbarkeit macht ihn zu einer Schwellentechnologie, die in weiterer Folge das Potenzial zusätzlicher Reduktion von CO₂ im Zement durch das vorhandene Nachweisverfahren für gleichwertige Betonleistungsfähigkeit (ECPC) befördert.

Das CO₂-Reduktionspotenzial von Performance-Beton ist mit am Markt verfügbaren Produkten technisch umsetzbar. Die dafür derzeit zulässigen Klinkerersatzstoffe entsprechen im Wesentlichen den bei Zement- und AHWZ-Herstellung eingesetzten Materialien. Da zukünftig jedoch nicht alle diese Materialien (z.B. Flugasche) in derselben Menge verfügbar sein werden, wird langfristig die Anwendung und Zulassung weiterer potenziell brauchbarer Klinkerersatzstoffe (sowohl hydraulisch aktive Materialien wie auch reine Füller) ebenfalls ein Thema werden, um letztendlich einen möglichst umfassenden Einsatz von RCC zu ermöglichen.

Performance-Beton ist der letzte Schritt im Reservat geltender Normen und zertifizierter Produkte im Bereich aufbereiteter hydraulisch wirksamer Zusatzstoffe, um Beton nachhaltiger zu machen. Es ist zugleich der erste Schritt, um das Terrain verlassen zu können, sobald neue Technologien den Nachweis einer gleichen Leistungsfähigkeit führen müssen. Die Umweltvorteile einer Zementreduktion lassen sich noch in vielen Bereichen für die Produkthanforderungen optimieren: Im Zuge des Projekts sind insbesondere die Potenziale der Betonfertigteileproduktion oder die Anwendung bei Halbfertigteilen sichtbar geworden. Allgemein erreicht die Umweltwirksamkeit von RCC verglichen mit Normalbeton ein im Bauteil gemessenes Reduktionspotenzial zwischen 20 % - 30 % CO₂. Im Vergleich zum Stand der Technik für Ortbetonwände und -decken haben die Rezepturen auf der Baustelle 23 % - 29 % weniger CO₂ (s.

Tab. 2).

Nr.	Wand C25/30 XC1 GK22 F52 PB				Decke C30/37 XC1 GK22 F52 PB				FT C30/37 XC3 GK16 PB F45				
	Normalbeton		RCC		Normalbeton		RCC		Normalbeton		RCC-LAB		RCC-Mische
	CEM II/A-L 42,5 N	CEM I 52,5 R	146	91	CEM II/A-L 42,5 N	CEM I 52,5 R	174	91	CEM II/A-M 42,5 N	CEM I 52,5 R	192	91	204
1	Zement	238			308				320				
2	Klinkeranteil [%]	77			77				77				
3	AHWZ [kg/m³]	53	58		40		70				51		54
4	AHWZ [kg/m³]	GS	87				104				77		82
5	AHWZ _{ges} [kg/m³]	53	145		40		174		0		128		136
6	max. AHZW	60	63		77		75		80		82		87
7	Anrechenb. BM	286	196		340		234		384		258		274
8	BM _{ges}	291	291		348		348		320		320		340
9	AHWZ _{ges} /Zement	22,3	99,3		13,0		100,0		0,0		66,7		66,7
10	Anteil AHWZ [%]	18,2	49,8		11,5		50,0		0,0		40,0		40,0
11	Wasser [kg/m³]	178	178		185		185		164		164		175
12	W/B-Wert	0,62	0,91		0,54		0,79		0,43		0,64		0,64
13	W/B _{gis} -Wert	0,61	0,61		0,53		0,53		0,51		0,51		0,51
14	CO ₂ /t Klinker fossil [kg/t]	771			771				771				
15	CO ₂ /t Zement [kg/t]	594	141		183		122		594		135		143
16	CO ₂ /t AHWZ [kg/t]	52	2,8		2,1		9,0		52		6,7		7,1
17	CO ₂ /m³ Beton fossil [kg/m³]	144,0	34,1		184,9		53,8		190,0		141,4		150,2
				Reduktion: 23,7%				Reduktion: 29,1%				Reduktion: 25,6%	Reduktion: 20,9%

Tab. 2 Rezepturen von Normalbeton und RCC im Vergleich für Wand, Decke und Fertigteil

5.2 Fallstudie und Versuchsanordnung

In den untersuchten Szenarien am STRABAG Real Estate-Projekt *Taborama* am Nordbahnhof Wien liegt das Potenzial einer CO₂-Reduktion zwischen 13 % und 20 % für das gesamte oberirdische

Gebäude mit einer BGF von 20.000 m². Das sind zwischen 400 t - 600 t CO₂-Äquivalente. Die Ausweitung der Anwendung von RCC auf die Herstellung der geplanten Betonfertigteile hätte ein weiteres Reduktionspotenzial von knapp 100 t CO₂-Äquivalente. In der Annahme, dass RCC für 50 % der Betonanwendungen geeignet ist, wie im *Taborama*, liegt das langfristige Potenzial – z.B. für den Wiener Wohnbaubedarf von derzeit ca. 10.000 WE/a – bei einer Reduktion von ca. 25.000 t CO₂-Äquivalente pro Jahr.

In Österreich beläuft sich bei einem inländischen Zementversand im Jahr 2020 von 4,8 Mio. t (VÖZ II, 2021) der Verbrauch pro Kopf auf 538 kg oder insgesamt 2,7 Mio. t CO₂. Mit RCC-Beton als Stand der Technik ließen sich die zementbedingten CO₂-Emissionen in Österreich um 340.000 t senken. Damit verbunden ist unweigerlich die entsprechende Schonung von Energie und Primärrohstoffen: Das mit Füllstoffen ersetzte Bindemittel muss nicht gebrannt werden und hat keine Prozess-emissionen (Entsäuerung). Füllstoffe sind derzeit noch überwiegend Produkte aus fossiler Energienutzung in Industrie und Kohleverbrennung. Langfristig zeigt sich hier allerdings eine wichtige Perspektive für Sekundärrohstoffe, wie Feianteile aus Baurestmassenaufbereitung. Das Performance-Konzept ist ganz allgemein die Voraussetzung für eine Öffnung des Baustoffes hin zu seiner weitreichenden Ökologisierung und Kreislauffähigkeit.

5.2.1 Casestudy *Taborama*

Der Gefahr technischer Probleme bei Umgebungstemperaturen unter 12°C muss durch zusätzliche Aufwände begegnet werden – wie z.B. mittels eines Monitorings der Festigkeitsentwicklung und Nachbehandlungsmaßnahmen oder durch das Abdecken der Oberflächen mit einem kaschierten Schutzvlies.

Die Nachbehandlung bei höheren Temperaturen ist in Analogie zum konventionellen Beton gemäß ÖNORM B 4710-1 auszuführen und aufgrund der modifizierten Hydratationseigenschaften auch wesentlich. Darunter fällt beispielsweise das Auftragen von Verdunstungsschutz oder das Abdecken mit Folien, um Rissbildungen zu vermeiden und eine den Anforderungen entsprechende Gefügestruktur zu erhalten. Denn diese Fröhschwindrisse sind nicht nur sichtbare Mängel. Die Schädigung des Gefüges an der Betonoberfläche durch Austrocknung bewirkt zudem eine Erhöhung der Eindringtiefe der Carbonatisierung und damit die Reduktion eines wesentlichen Dauerhaftigkeitsfaktors in Bezug auf die Expositionsklasse.

Grundsätzlich wurde die Ausführung des gesamten Bauwerks in Performance-Beton untersucht. In Folge wurde eine Risikoanalyse durchgeführt, um jedes Wagnis in der Anwendung aus wirtschaftlicher und statischer Sicht auszuschließen. Daher wurden die ausgewiesenen Potenziale für die Anwendung von Performance-Beton im Hochhaus auf XC₁-Betone, also alle nicht Außenluft exponierten Bauteile ab dem 4. OG, ausgerichtet. Damit wäre lt. Bauzeitplan der Einsatz von Performance-Beton ab Anfang Juni möglich, was witterungsbedingt eine günstige Voraussetzung für die Erprobung der Betonnachbehandlung bedeutet.

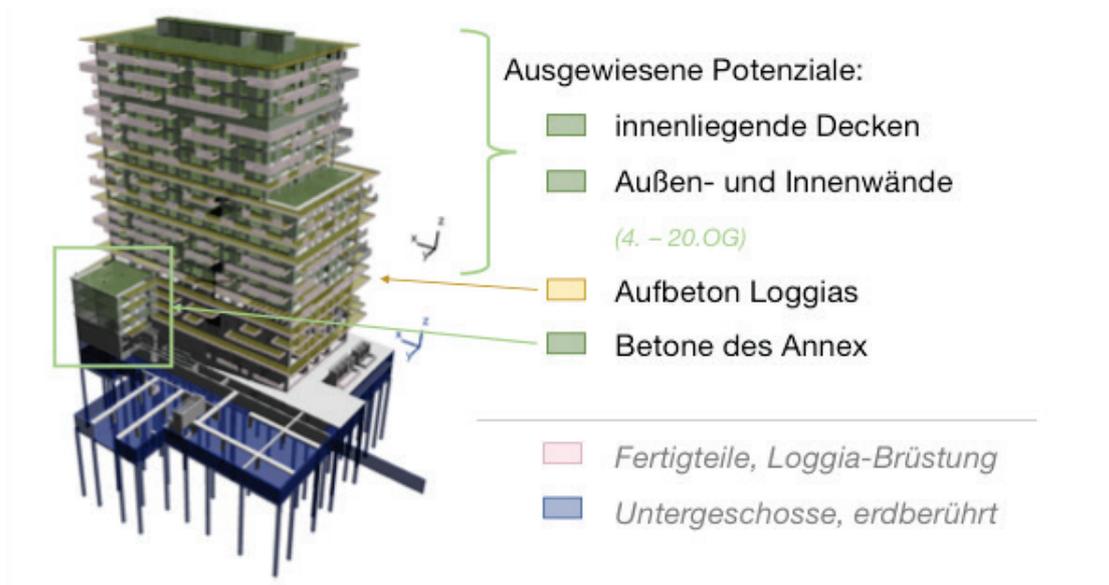


Abb. 4 Potenziale für Performance-Beton im BIM-Modell des *Taborama*, e.E.

Zum Ablauf der erforderlichen Nachbehandlungen gibt es noch keine Daten, um in der Arbeitsvorbereitung eine Taktung der Betonier- und Nachbehandlungsvorgänge mit der gewünschten Präzision und Kostensicherheit planen zu können.

5.2.2 Versuchsreihen der Baustelle

Um die Umsetzung mit RCC genauer planbar zu machen, hat das Konsortium zwei Experimentreihen mit Versuchsbauteilen auf der Baustelle konzipiert, veranlasst und durchgeführt, welche anhand von Messungen die Eigenschaften von konventionellem Beton und RCC unter sommerlichen sowie winterlichen Bedingungen vergleichen. Für die Erprobung auf der Baustelle wurden „Schritt-für-Schritt-Protokolle“ erstellt (s. Anhang 2, Formblatt zu Serie 0/1). Zusätzlich wurden sämtliche Prozesse mittels Foto- und Video-Dokumentation festgehalten.

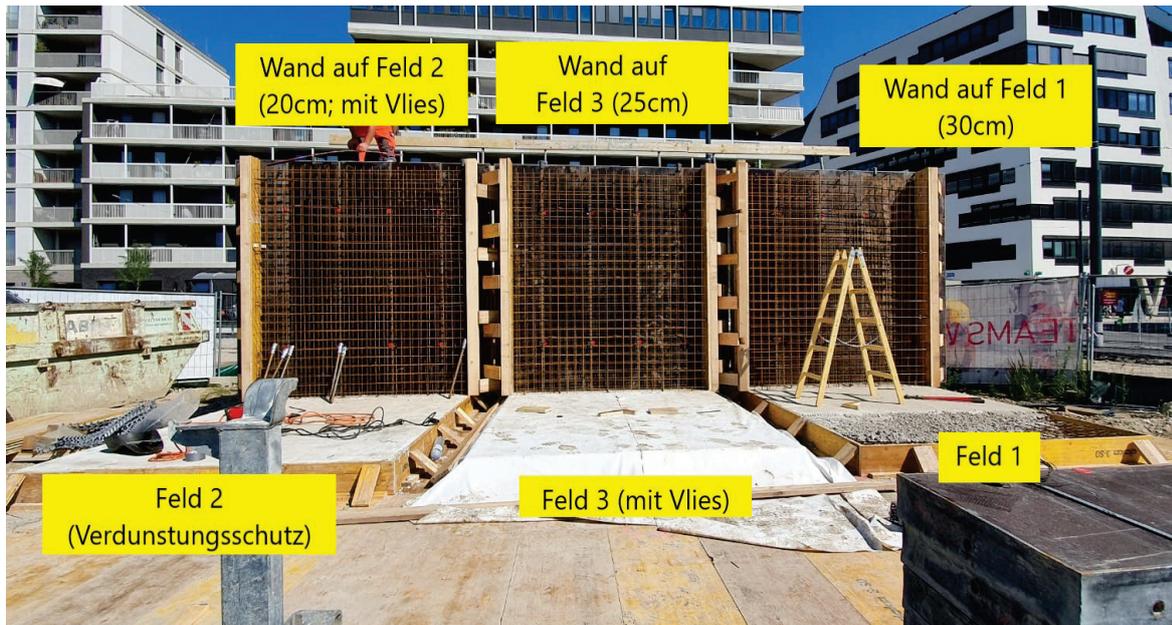


Abb. 5 Sommer-Versuchsbauteile mit RCC am Bauplatz des *Taborama*, e.E.

Serie 0/1

Die erste Versuchsreihe auf der Baustelle fand innerhalb einer Woche, von 7. bis 11.09.2020, statt und stellte mit einem Tagesmittel von 20-25°C ein Sommerszenario dar. Sie umfasste sechs Probeelemente – drei Wände und drei Decken – mit unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden (s. Abb. 5). Im Vorfeld der Serie 0/1 wurden Schalungspläne mit den genauen Maßen der Versuchsbauteile erstellt, welche an die tätige Mannschaft vor Ort weitergegeben wurden.

An Tag 1, 07.09.2020, wurden auf einer eigens neben den Bauarbeiten des *Taborama* hergerichteten Fläche drei Schalungen aus Holz für die Deckenplatten gefertigt und geölt. Im Anschluss wurden die vorgegebenen Bewehrungen sowie Temperaturmessgeräte zur späteren Feststellung des Festigkeitsverlaufs eingelegt.

An Tag 2, 08.09.2020, lieferte Wopfinger Transportbeton 8 m³ RCC an die Baustelle. Die Lieferung wurde seitens der Materialprüfanstalt Hartl, wie auch bei konventionellem Beton üblich, diversen Frischbetonprüfungen unterzogen. Nach Dokumentation der Frischbetonwerte wurde dieser in die vorbereiteten Deckenschalungen eingebracht und mittels Betonrüttler verdichtet und darauffolgend abgezogen. Im Anschluss wurden die unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden durchgeführt: Wie in Abb. 5 ersichtlich, wurde im linken Feld Verdunstungsschutz auf der Decke aufgebracht. Das mittlere Feld wurde mit Vlies abgedeckt und für vier Tage feuchtgehalten. Das rechte Feld erhielt keine Nachbehandlung, um im Vergleich dazu den Wirkungsgrad der beiden angewandten Nachbehandlungsmethoden festzustellen.

An Tag 3, 09.09.2020, wurden die Schalungen der drei Wandelemente, Aluminiumgerüste mit Holzschalung, aufgebaut. Verglichen zu den Decken hatten die Wandscheiben unterschiedliche Stärken (20, 25 und 30 cm), gewählt nach den häufigsten Wandstärken im *Taborama*. Die Wandschalungen wurden ebenfalls mit Bewehrung und Temperaturfühlern ausgestattet.

Tag 4, 10.09.2020, verlief analog zu Tag 2: Die Betonlieferung der Firma Wopfinger wurde geprüft und der Beton in Folge eingebracht. Hierzu wurde ein Krankübel mit Schlauch zum sicheren Einbringen in die Wandschalung verwendet. Die Verdichtung erfolgte schichtweise mit Betonrüttler während des Gießens und nachdem die Wände ausgefüllt waren.

Am 5. Tag, 11.09.2020, wurden die Wandelemente morgens ausgeschalt. Jene Wand mit einer mittleren Stärke von 25 cm auf dem linken Deckenfeld erhielt als einzige eine Nachbehandlung. Sie wurde mit Vlies bedeckt und dieses vier Tage lang stetig befeuchtet.

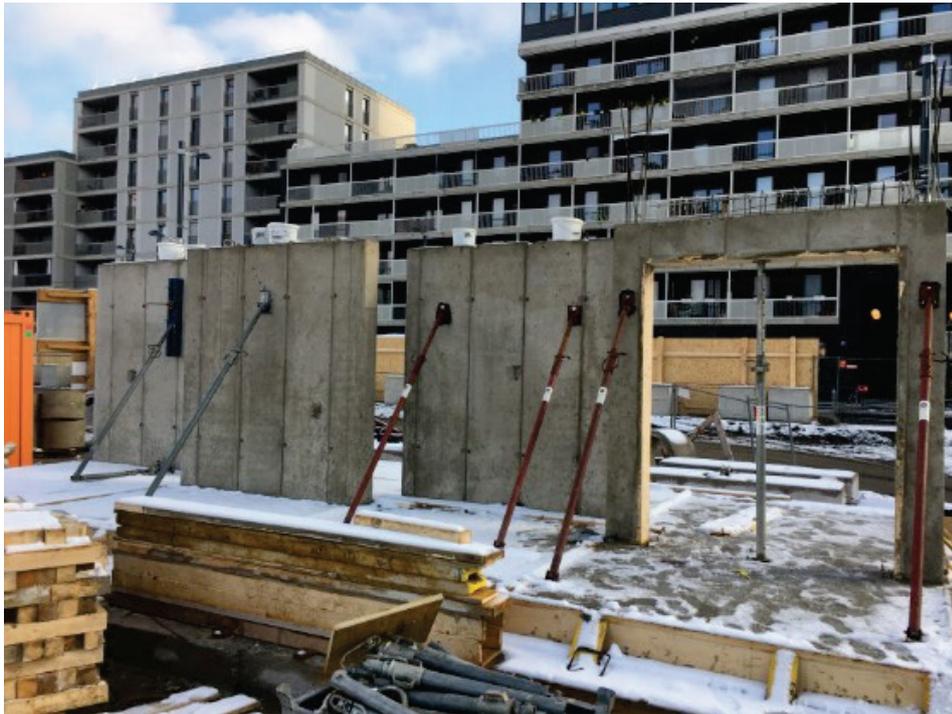


Abb. 6 Winter-Versuchsbauteile mit RCC am Bauplatz des *Taborama*, e.E.

Serie 2

Von 20. bis 27.11.2020 wurde der Versuch aus September unter winterlichen Temperaturen mit einem Tagesmittelwert von $3,3^{\circ}\text{C}$ wiederholt (s. Abb. 6 – sowie Anhang 3, Formblatt zu Serie 2). Zu drei Deckenplatten aus RCC kam ein viertes Deckenelement als Vergleichsbauteil aus konventionellem Beton sowie eine vierte Wand aus RCC als Portalelement dazu.

Um zu Wochenbeginn mit dem Betonieren beginnen zu können, wurde bereits am Freitag, 20.11.2020, die Schalung für die Decken hergestellt. Wie in Serie 0/1 handelte es sich dabei um geölte Holzschalungen, die mit Bewehrungsmatten ausgestattet wurden.

Wopfinger Transportbeton lieferte am Montag (Tag 2), 23.11.2020 sowohl den herkömmlichen als auch den CO_2 -reduzierten Beton an die Baustelle. Vor dem Einbringen wurden die Temperaturfühler eingelegt. Nach dem vollständigen Auffüllen der Felder wurden diese wie in der ersten Versuchsreihe mit Betonrüttlern verdichtet. Feld 1 und 4 – ersteres aus RCC, zweiteres aus einer gängigen $\text{C}_{30/37}$ -Rezeptur – erhielten keine Nachbehandlung. Das zweite Deckenelement wurde erneut mit Verdunstungsschutz bedeckt. Da in Serie 0/1 lt. Materialprüfanstalt Hartl nicht

ausreichend dick aufgesprüht wurde, wurde beim zweiten Durchgang im November, auf eine genaue Dokumentation und sattes Auftragen geachtet (abwiegen der Flasche vor und nach der Anwendung). Das dritte Deckenelement wurde mit einem Vlies bedeckt. Im Gegensatz zum Testlauf im September wurde im Winterversuch ein zweilagiges kaschiertes Vlies verwendet, welches sieben Tage auf der Decke verweilen sollte, um ganzheitlichen Schutz vor winterlichen Temperaturen zu bieten. Ein Feuchthalten war nicht nötig und wäre bei nächtlichem Frost kontraproduktiv gewesen.

Am dritten Tag der Versuchsreihe, 24.11.2020 (Dienstag), wurden die Wandschalungen wie in Serie o/1 auf den Deckenelementen hergerichtet und mit Bewehrungen und Temperaturfühlern ausgestattet. Das Vlies musste wie im Septemberversuch kurzfristig dafür abgenommen und nach Fertigstellung wieder aufgelegt werden. Die vierte Wand stellte durch die Portalausnehmung eine Neuerung dar. Zusätzlich war vorgesehen, alle Wandelemente 20 cm stark herzustellen, um die unterschiedlichen Nachbehandlungen ohne Einfluss der Bauteildicke vergleichen zu können. Trotz des entsprechenden Ausführungsplanes wurden die Elemente auf Grund mangelnder Kommunikation in gleicher Dimension wie in Serie o/1 mit den Stärken 20, 25 und 30 cm hergestellt. Das Portal erhielt eine Wandstärke von 25 cm.

An Tag 4, 25.11.2020, lieferte Wopfinger Transportbeton zweimal RCC. Mit der ersten Fuhre am Morgen wurden nach Prüfung des Frischbetons die Wandelemente 1, 2 und 4 hergestellt. Zu Mittag traf die zweite Fuhre RCC mit erhöhter Temperatur ein. Hiermit sollte festgestellt werden, ob eine Einbringtemperatur von ca. 15°C ein rascheres Erhärten bzw. eine stärkere Resilienz gegenüber winterlichen Außenlufttemperaturen darstellt und einen verbesserten Verlauf in der Festigkeitsentwicklung bewirkt. Während dem schichtweisen Einbringen des jeweiligen Betons und nach Fertigstellung wurde erneut durch Rütteln verdichtet.

An Tag 5, 26.11.2020, wurde Wand 3, jenes Element mit erhöhter Einbringtemperatur und einer Stärke von 30 cm, nach 24 Stunden ausgeschalt und mit kaschiertem Vlies zweilagig umhüllt.

Am Freitag, 27.11.2020 (Tag 6), wurden die restlichen Wandelemente ausgeschalt. Wand 2 und 4 wurden ebenfalls mit Vlies nachbehandelt.

Jedes Vlies wurde sieben Tage nach dessen Aufbringung abgenommen.

Diese beiden Wochen der Serie o/1 und 2 stellen den aktiven Versuchsprozess auf der Baustelle dar. In den folgenden Wochen wurden nach vorher festgelegten Terminen weitere Prüfungen durchgeführt (s. Anhang 6, Prüfprotokolle der Serien o/1, 2 und FT der MPA Hartl). Die Festigkeitswerte wurden mit dem Concremote® System von Doka in Verbindung mit den abgenommenen Betontemperaturen in den Probekörpern und Rückprallhammer-Messungen begleitend ermittelt. Parallel zu den errichteten Bauteilen wurden Druckfestigkeitswürfel aus den gleichen Betonfuhren hergestellt und auf der Baustelle gelagert, um unter den gleichen Temperaturbedingungen wie die Versuchselemente zu reifen.

Neben den Frischbetonprüfungen, der Kalibrierung der Bauteilfestigkeit anhand der Betontemperaturmessungen in Verbindung mit Concremote® und den Prüfungen an den Druckwürfelproben fanden nicht zerstörungsfreie Messungen z.B. an Bohrkernen statt. Die Bauteile konnten deshalb nicht im Gebäude verwendet werden, wurden aber von jener Mannschaft bauseits hergestellt, die mit der tatsächlichen Bauführung betraut ist. Dadurch sollen technische Probleme in der Ausführung von Performance-Beton im Gebäude minimiert werden.

Die Größe der Testelemente wurde in Abstimmung mit der Bauführung so gewählt, dass minimaler Materialeinsatz an Betonstahl, die Manipulationsmöglichkeit mit dem Kran und die Verwertung der Objekte nach der Beprobung als untergeordnete Abschalt- und Füllelemente unterhalb des Rampenbereiches gegeben waren.

5.3 Fertigteilwerk und Versuchsbauteile in Gerasdorf

Bereits zu Beginn des Forschungsprojekts wurde der Einsatz von RCC im Fertigteilsegment besprochen. Während des fortschreitenden Projektverlaufes wurde in Kooperation mit Mischek Systembau GmbH im Herbst 2020 eine Versuchsreihe, zugeschnitten auf das Werk in Gerasdorf bei Wien, konzipiert. Das Prüfkonzept von MPA Hartl wurde ebenfalls in Austausch mit dem Fertigteilwerk erstellt.

Die Produktion im Fertigteilwerk der Mischek Systembau GmbH ermöglicht die Herstellung von Fertigteilen in Umlaufprozessen und im Standwerk. Im Umlaufwerk werden plattenartige Bauteile entlang von Rollstraßen und über die Station einer Härtekammer gefertigt. In der Standhalle werden graduell komplexere Bauteile wie Stiegen oder Loggienplatten mit Gefälle produziert.

Die Versuchsreihe „FT“ fand von 23.11.2020 bis 27.11.2020 parallel zu Serie 2 statt. Wie in den Serien 0/1 und 2 wurde im Vorfeld ein Formblatt zum Protokollieren der Vorgehensweise erstellt (siehe Anhang 4, Formblatt der Serie FT).

Am 1. Tag, dem 23.11.2020, wurden Schalungen aus Holz und Stahl für zwei (Innen-)Wandscheiben im Umlaufwerk und für ein Winkelement im Standwerk hergestellt.

Wopfinger Transportbeton lieferte am Dienstag, dem 24.11.2020 (Tag 2), 4 m³ RCC mit 60 % CEM I aus eigener Herstellung ans Werk. Analog zur Durchführung auf der Baustelle wurden Frischbetonprüfungen durch MPA Hartl vorgenommen und Probedruckfestigkeitswürfel hergestellt, ehe der restliche Beton in die vorbereiteten Elementschalungen eingebracht und durch Rüttelflaschen verdichtet wurde.

Am Tag 3, 25.11.2020, wurden alle Elemente ausgeschalt, somit betrug die Ausschaltfrist 24 Stunden. Eine der beiden Wandscheiben aus dem Umlaufwerk und jenes Element aus dem Standwerk verblieben nach dem Ausschalen, bei konstanter Umgebungstemperatur von ca. 12°C in der Halle, während die andere im Freien gelagert wurde. Zur Feststellung der Festigkeitsentwicklung wurden mit dem werksinternen Rückprallhammer Beprobungen durchgeführt. Im Prüfprotokoll wurde zusätzlich die Entwicklung der Umgebungslufttemperatur in der Halle und im Freien festgehalten. Als Vergleichselemente wurden in der Serie FT zusätzlich Elemente aus konventionellem Beton am Tag 3 hergestellt und an den Folgetagen ebenfalls mittels Rückprallhammer gemessen.

Am Tag 4, dem 26.11.2020, wurde das Element aus konventionellem Beton nach 24 Stunden ausgeschalt. Rückprallhammermessungen wurden wie bei jenen Bauteilen aus RCC an drei Stellen durchgeführt.

Am fünften Tag, 27.11.2020, wurden die letzten Rückprallhammermessungen an den RCC-Probekörpern (Prüftermin nach 72 Stunden) und am Vergleichsbauteil (48 Stunden) vorgenommen.

Ursprünglich waren für die Fertigteile mit Nachbehandlung in der Erhärtungskammer und die dazugehörigen Würfel, Prüftermine nach 8, 24 und 48 Stunden vorgesehen. Nach einer ersten Beprobung der Prüfwürfel seitens MPA Hartl nach 8 Stunden wurde jedoch klar, dass die Elemente noch nicht die notwendige Festigkeit zum Ausschalen erreicht hatten. Ein Ausschalen nach 8 Stunden wäre somit bei RCC selbst durch Anwendung der Erhärtungskammer wie bei konventionellem Beton nur mit Beschleunigern möglich.

Nach den engmaschigeren Prüfterminen im Anschluss des Ausschalens fanden Bohrkernprüfungen nach 7, 14 und 28 Tagen statt. Die Versuchselemente wurden nach Herstellung und Nachbehandlung im Innenlagergestell des Fertigteilwerks für Probeentnahmen gelagert.



Abb. 7 Versuchsbauteile mit RCC im Mischek Systembau Fertigteilwerk Gerasdorf, e.E.

Die im Standwerk und im Umlaufwerk der Mischek-Systembau in Gerasdorf durchgeführten Versuche mit RCC-Beton waren überschattet von einer erschwerten Verarbeitbarkeit. Kritisiert wurde die mangelnde Fließfähigkeit des Betons, die sich in aufwendiger Verdichtungsarbeit manifestierte. Dieser Umstand ist der Lieferabfolge und den Abläufen der Versuchstage geschuldet und stellte kein dem RCC immanentes Problem dar. Das geprüfte Ausbreitmaß für RCC lag allerdings mit 54 cm über dem am Werksbeton festgestellten 51 cm.

In weiterer Folge ist es zu keinen Hindernissen beim „Aufstellen“ der Schaltische oder Bewegen (Verheben) der Fertigteile gekommen. Die gewählten Rezepturen haben sich leicht von denen der Baustelle unterschieden, da mit größeren Festigkeiten zum Zeitpunkt des Verhebens der Elemente gerechnet werden musste, wie es im Fertigteilbau grundsätzlich erforderlich ist.

5.4 Rechtliche Voraussetzungen für die Verwendung und den Einbau von RCC-Beton

5.4.1 Allgemeines

Gemäß Artikel 4 der Bauproduktenverordnung müssen Bauprodukte, die von einer harmonisierten Norm erfasst sind, mit einer Leistungserklärung versehen werden, wenn sie in Verkehr gebracht werden (Verordnung (EU) Nr. 305/2011, 2011). Dies betrifft jedes einzelne Bauprodukt, nicht nur einen neu eingeführten Produkttyp.

Für Bauprodukte, für die eine Europäische Technische Bewertung (ETB) ausgestellt wurde, gilt dies ebenfalls. Eine Verpflichtung, eine Europäische Technische Bewertung zu beantragen, besteht jedoch auch dann nicht, wenn ein europäisches Bewertungsdokument vorliegt. Damit ist die Europäische Technische Bewertung de facto freiwillig. Sie steht in Konkurrenz zu den weiterhin erlaubten nationalen Zulassungen.

Mit der CE-Kennzeichnung und der Leistungserklärung übernimmt die HerstellerIn die Verantwortung für die Konformität des Produktes mit der erklärten Leistung und für die Einhaltung aller sonstigen Bestimmungen der Bauproduktenverordnung und gegebenenfalls anderer relevanter Harmonisierungsrechtsvorschriften der EU.

Die österreichische Baustoffliste ÖA legt für Bauprodukte, die noch nicht der CE-Kennzeichnung unterliegen (nicht harmonisierte Normen), den in Österreich erforderlichen Nachweis der Verwendbarkeit fest (Verordnung OIB-095.1-011/19, 2015.). Optisch dokumentiert und damit für den Verwender der Baustoffe kenntlich, wird die Erfüllung dieser Anforderungen mit dem Einbauzeichen ÜA, welches an den Produkten in geeigneter Form anzubringen ist. Grundlage für die Anbringung des Einbauzeichens ÜA durch die HerstellerIn ist die Vorlage einer Registrierungsbescheinigung.

Es ist für jede Registrierungsbescheinigung von der HerstellerIn ein eigener Antrag bei den Registrierungsstellen der Länder zu stellen. Sie sind zur Ausstellung von Registrierungsbescheinigungen für jene Bauprodukte, für die in der „Baustoffliste ÖA“ die ÜA-Kennzeichnung vorgeschrieben ist, berechtigt.

Folgende Regelwerke sind in der „Baustoffliste ÖA“ angeführt:

- Normen und ON-Regeln
- RVS-Richtlinien
- Richtlinien der Österreichischen Bautechnik Vereinigung (OBV- Richtlinien)
- Verwendungsgrundsätze des Österreichischen Instituts für Bautechnik
- Bautechnische Zulassung (BTZ)

Für Bauprodukte, die von dem in der Baustoffliste ÖA angeführten nationalen Regelwerk wesentlich abweichen, können HerstellerInnen beim Österreichischen Institut für Bautechnik (OIB) eine Bautechnische Zulassung (BTZ) beantragen. Eine BTZ ist jedenfalls erforderlich, wenn dies in der Baustoffliste ÖA festgelegt ist.

5.4.2 Relevante ÖNORMEN in Bezug zum Baustoff Beton

Eine Norm ist generell ein Dokument, das mit Konsens erstellt und von einer anerkannten Institution, in Österreich das Austrian Standards Institute, angenommen wurde und das für die allgemeine und wiederkehrende Anwendung Regeln, Leitlinien oder Merkmale für Tätigkeiten oder deren Ergebnisse festlegt.

Gemäß der ÖNORM EN 1992-1-1 Ausgabe: 2015-02-15 und der nationalen Anwendung ÖNORM B 1992-1-1/2018-01-1 gelten u.a. folgende zusätzliche Anforderungen an die Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau zu den allgemein gültigen Annahmen der EN 1990:

1. Tragwerke werden von angemessen qualifizierten und erfahrenen Personen geplant.
2. Angemessene Überwachung und Qualitätskontrolle wird in Fabriken, Werken und auf der Baustelle erbracht.
3. Der Bau wird durch Personen ausgeführt, die angemessene Fertigkeiten und Erfahrungen haben.
4. Die Baustoffe und Bauprodukte werden entsprechend dieses Eurocodes oder entsprechend der maßgeblichen Material- oder Produktspezifikationen verwendet.
5. Das Tragwerk wird angemessen instandgehalten.
6. Das Tragwerk wird entsprechend den geplanten Anforderungen genutzt.
7. Die Anforderungen nach EN 13670 an die baubetriebliche und handwerkliche Ausführung werden erfüllt.

In der ÖNORM EN 1992-1-1 werden auch die Anforderungen und Nachweise zur Beurteilung der Dauerstandfestigkeit angegeben, wobei Langzeitauswirkungen auf die Betonfestigkeit, abhängig von der Art und Dauer der Bauteilbeanspruchung beurteilt werden.

Da der Betonbau in Europa unter verschiedenen klimatischen und geographischen Bedingungen, unter verschiedenen Schutzniveaus und unter unterschiedlich gut eingeführten regionalen Gepflogenheiten und Erfahrungen angewandt wird, wurde die ÖNORM EN 206 als europäische Rahmennorm entwickelt. Sind allgemeine Lösungen – wie z.B. die Einführung von Betonklassen – nicht möglich, lassen einschlägige Abschnitte ausdrücklich die Anwendung von nationalen Normen bzw. Regelungen zu, die am Ort der Verwendung des Betons gültig sind. Dadurch ermöglicht die ÖNORM EN 206 z.B. eine europäisch einheitliche Klassifizierung, überlässt jedoch die Festlegung der Anforderungen an den Beton nationalen Regelungen. Für die Herstellung und Verwendung von Beton in Österreich wurden daher die in dieser ÖNORM festgehaltenen nationalen Regelungen erarbeitet. Eine Betonherstellung, die ausschließlich auf ÖNORM EN 206 – ohne zusätzliche nationale Festlegungen – basiert, ist somit nicht möglich. Gemäß der Entscheidung BT 2/2012 werden nationale Inhalte zur Anwendung in Österreich in der ÖNORM B 4710 geregelt (ON B 4710-1, 2018, S. 6). D.h. die nationale Umsetzungsnorm in Österreich ist die ÖNORM B 4710-1.

Die ÖNORM B 4710-1/2018-01-01 (Beton — Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität; Teil 1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton) beinhaltet zwei Konzepte der Betonherstellung: zum einen das deskriptive Konzept (Tabelle 23) und zum anderen das Performance-Konzept.

Die beiden Konzepte zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Beton unterscheiden sich wie folgt:

5.4.2.1 Deskriptives Konzept

- Auf langjährigen Erfahrungen beruhende Beurteilung auf Basis von vorgegebenen max. W/B-Wert, anrechenbarer Mindestbindemittelgehalt, min. Luftgehalt, Bindemittelart, max. Zusatzstoff-Gehalt, k-Wert-Ansatz, Art und Eigenschaft der Gesteinskörnung.

5.4.2.2 Konzept gleicher Betonleistungsfähigkeit (ECPC)

- Die Grundsätze des Konzepts der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit erlauben Abweichungen von den Anforderungen an den Mindestzementgehalt und den höchstzulässigen Wassermenge, wenn ein oder mehrere festgelegte Betonzusatzstoffe und ein oder mehrere festgelegte Zemente verwendet werden, deren Herstellwerk und Eigenschaften klar ausgewiesen und dokumentiert sind.
- Dieses Konzept gilt nur für Zemente nach ÖNORM EN 197-1 zusammen mit einem oder mehreren Zusatzstoffen.
- In Übereinstimmung mit den Anforderungen an das deskriptive Konzept muss nachgewiesen werden, dass der Beton insbesondere hinsichtlich seines Verhaltens gegenüber den Einwirkungen aus der Umgebung eine gleichwertige Leistungsfähigkeit im Vergleich zu einem Referenzbeton hat, der den Anforderungen an die zugehörige Expositionsklasse genügt (gleiche Leistungsfähigkeit muss gegenüber einem Referenzbeton nachgewiesen werden).

In Punkt 12.1 (2) der ÖNORM B 4710-1 steht daher auch:

„Die tatsächlichen Umwelteinwirkungen sind in ihrer Auswirkung auf die Beständigkeit des Betons prüftechnisch nur sehr bedingt simulierbar. In 5.3.2 wird daher festgelegt, dass die Anforderungen über die in der ÖNORM geregelte Betonzusammensetzung (Frischbetonprüfung) nachzuweisen sind und nur dann über Festbetonprüfungen (z.B. Frostprüfung, Prüfung der Wassereindringtiefe), wenn dies vorab in der Ausschreibung vereinbart wurde. Ein Nachweis der Beständigkeit gegen Umwelteinwirkungen über Festbetonprüfungen an Betonzusammensetzungen, die nicht Tabelle 23 bzw. Tabelle 24 entsprechen, liegt daher im Verantwortungsbereich des Planers.“

In Österreich ist bis dato lediglich das deskriptive Konzept hinsichtlich der Anwendung in der ÖN B 4710-1 umgesetzt.

5.4.3 RCC – Reduced Carbon Concrete

Derzeit wird im ASI eine normative Anwendungsregel, die ONR 23339 „Regeln für die Umsetzung des Konzepts der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit“ ausgearbeitet. Mit dieser ONR 23339 sollen für die Anwendung des Konzeptes der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit in Österreich klare und einheitliche Festlegungen für die Qualitätssicherung definiert werden. Ein Beton, dessen gleichwertige Betonleistungsfähigkeit nach dieser ONR nachgewiesen wurde, gilt dann in weiterer Folge als ein Beton gemäß ÖNORM B 4710-1.

Gegenwärtig gibt es in Österreich keine ÖNORM-Regelung, in welcher die gleichwertige Leistungsfähigkeit beschrieben wird. Jedoch sei hier erwähnt, dass in Österreich bereits seit vielen

Jahren Umsetzungsregeln für spezielle Betonanwendungen existieren, auf deren Basis das Konzept der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit (ECPC) und damit auch indirekt das Konzept von CO₂-reduzierten Betonen in ähnlicher Art und Weise bereits erfolgreich umgesetzt wurde.

Diese Richtlinien, wie oben bereits erwähnt, sind in der Baustoffliste ÖA aufgenommen und unterliegen dem Einbauzeichen ÜA. Folgend diesem Prinzip wurde für RCC die ÖBV-Richtlinie – Weiße Wanne als Basis für die Erstellung eines Konzepts zur Anwendung herangezogen.

Von der BetonherstellerIn wurde ein Konzept der Betonherstellung inklusive der Qualitätssicherung erstellt. Die Ausgangsstoffe zur Betonherstellung sind, wie im deskriptiven Konzept, CE-gekennzeichnet. Für den Einbau sind Versuche (siehe Kap. 5.2.1, Seite 26) innerhalb dieses Forschungsprojekts durchgeführt worden, in welchen spezielle Anforderungen in Abhängigkeit des vorherrschenden Klimas besonders berücksichtigt wurden. Die Überwachung des Einbaus wird gemäß ÖNORM B 4704 mit der Überwachungsklasse 3 durchgeführt.

5.4.3.1 Bestätigung der Konformität

Dem Umstand geschuldet, dass dieser Beton weder der ÖNORM B 4710-1, noch einem Regelwerk in der Baustoffliste ÖA entspricht, kann derzeit noch keine Konformitätsbescheinigung ausgestellt werden.

Als Alternative dient folgende Herangehensweise:

1. Von der HerstellerIn kann eine Quasi-Leistungserklärung erstellt und unterfertigt werden.
2. Eine staatlich akkreditierte Prüfstelle kann die Prüfwerte bestätigen.
3. Der Nachweis der Dauerstandfestigkeit wird vom Planer als gleichwertig beurteilt, wenn die Über-Festigkeitsentwicklung tendenziell besser wäre (nachweisbar).

Um Haftungsansprüche auszuschließen und ein technisch korrektes Bauwerk zu realisieren, wird in der Baupraxis nach Normen gehandelt. Es ist allerdings nicht anzunehmen, dass Planende eine gleichwertige Dauerhaftigkeit und/oder Dauerstandfestigkeit bestätigen können. Erbringt die HerstellerIn verwendbare Äquivalenznachweise, z. B. Dauerlastversuche, bilden diese die Grundlage zum rechtlich abgesicherten Einsatz von RCC.

Daher sind folgende Voraussetzungen für die Markteinführung von RCC essentiell:

- Die Normung trifft Festlegungen als Planungsvorgaben, ähnlich wie man es im Zuge der Einführung der ÖNORM B 1992-1 erreicht hat. In diesem Falle hatte man die frühere Praxis zur Reduktion der Betondruckfestigkeit unter Langzeitbeanspruchungen mit der europäischen Empfehlung des EC2 (EN 1992-1) übernommen.
- Europäisch und/oder national muss damit geregelt werden, wie mit den Langzeitauswirkungen einerseits und den Umwelteinflüssen andererseits unter Langzeitbetrachtung der 50 (oder 75) Jahre Nutzungsdauer umzugehen ist.

5.4.3.2 Anmerkung

5.4.3.2.1 Stand der Wissenschaft

Der „Stand der Wissenschaft“ als höchste Techniklausel, die den aktuellen Forschungsstand in einem Fachgebiet darstellt, ist ein Wissensstand, der in wissenschaftlichen Publikationen beschrieben ist und dessen Anwendung höchste Sorgfalt fordert, da mit dem gegenständlichen

Produkt oder Verfahren noch keine Praxiserfahrungen vorliegen. Das höchste Anforderungsniveau wird daher nur in Fällen mit sehr hohem Anforderungs-, Gefährdungs- oder Risikopotenzial verwendet. Wirtschaftlichkeitsüberlegungen spielen (noch) keine Rolle. Die Analogie zu Vergabeverfahren ist das Verhandlungsverfahren mit einem „Bieter“.

5.4.3.2.2 Anerkannter Stand der Technik

Der anerkannte Stand der Technik ist jener Wissensstand, der in Normen beschrieben ist. Bei Anwendung des anerkannten Stands der Technik wird das Risiko auf das Restrisiko reduziert, auch weil bereits (langjährige) Praxiserfahrungen vorliegen. Es werden Wirtschaftlichkeitsüberlegungen angestellt, und es gibt einen „vollen Wettbewerb“, d.h. der anerkannte Stand der Technik sollte von allen in einer Branche tätigen Unternehmen erfüllt werden (können). Die Analogie zu Vergabeverfahren ist daher auch das offene Verfahren.

6 Ergebnisse

6.1 Ergebnisse der empirischen Forschung in zwei Versuchsreihen

Im Zuge des Forschungsprojekts wurden zwei Versuchsreihen mit CO₂-reduzierten Betonen auf der Baustelle durchgeführt, die der empirischen Ermittlung und Beurteilung der Erfordernisse an die Nachbehandlung des Materials in der Baustellenpraxis dienten. Die angewandten Rezepturen durchliefen im Vorfeld der in-situ-Testserien einige Laborversuche. Eine Erprobung des Reduced Carbon Concrete (RCC) bei unterschiedlichen Temperaturen wies auf eine langsamere Frühfestigkeitsentwicklung hin. Die Konsequenzen und deren Kompensationsmöglichkeiten dieser Laborerkenntnisse galt es unter Baustellenbedingungen zu überprüfen.

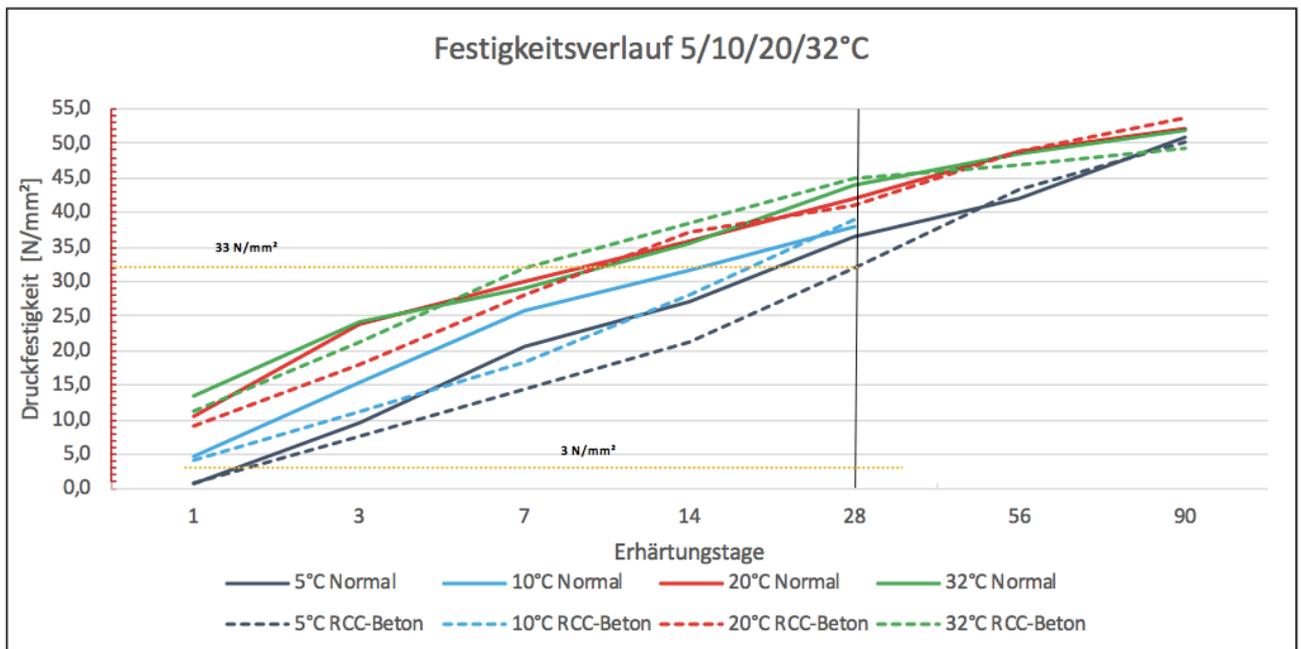


Abb. 8 Festigkeitsverlauf des RCC-Beton bei verschiedenen Temperaturen. Je kühler die Umgebungstemperatur, desto mehr verzögert sich die Festigkeitsentwicklung von RCC-Beton im Vergleich zu konventionellem Beton. e.E.

6.1.1 Sommerversuche

In Serie o/1 wurde ersichtlich, dass sämtliche Nachbehandlungsmethoden bei 12-20°C keinen Einfluss auf die Festigkeitsentwicklung nehmen (s. Abb. 10). Die Druckfestigkeit entwickelt sich parallel zum konventionellen Beton. Die Anwendung von Vliesen und Folien bei sommerlichen Temperaturen gilt in erster Linie dem Feuchthalten des Betons und somit der Vermeidung oberflächlichen Austrocknens und etwaiger Rissbildung. Die Untersuchungen der Sommerbauteile zeigen für RCC einen erhöhten Nachbehandlungsbedarf gegen Rissbildung, da der junge RCC durch eine höhere Offenporigkeit zu „Frühschwindrissen“ neigt. Wie die Versuche zeigen, kann mit dem Aufbringen von ausreichendem Verdunstungsschutz oder durch Abdecken mit Vlies ein „Frühschwinden“ effektiv verhindert werden.

Zusätzlich werden dadurch Tag-Nacht-Schwankungen der Betontemperatur abgeschwächt (siehe Abb. 10). Dabei wird die Amplitude halbiert und die Temperaturschwankung im Bauteil von 10°C auf 5°C gesenkt.

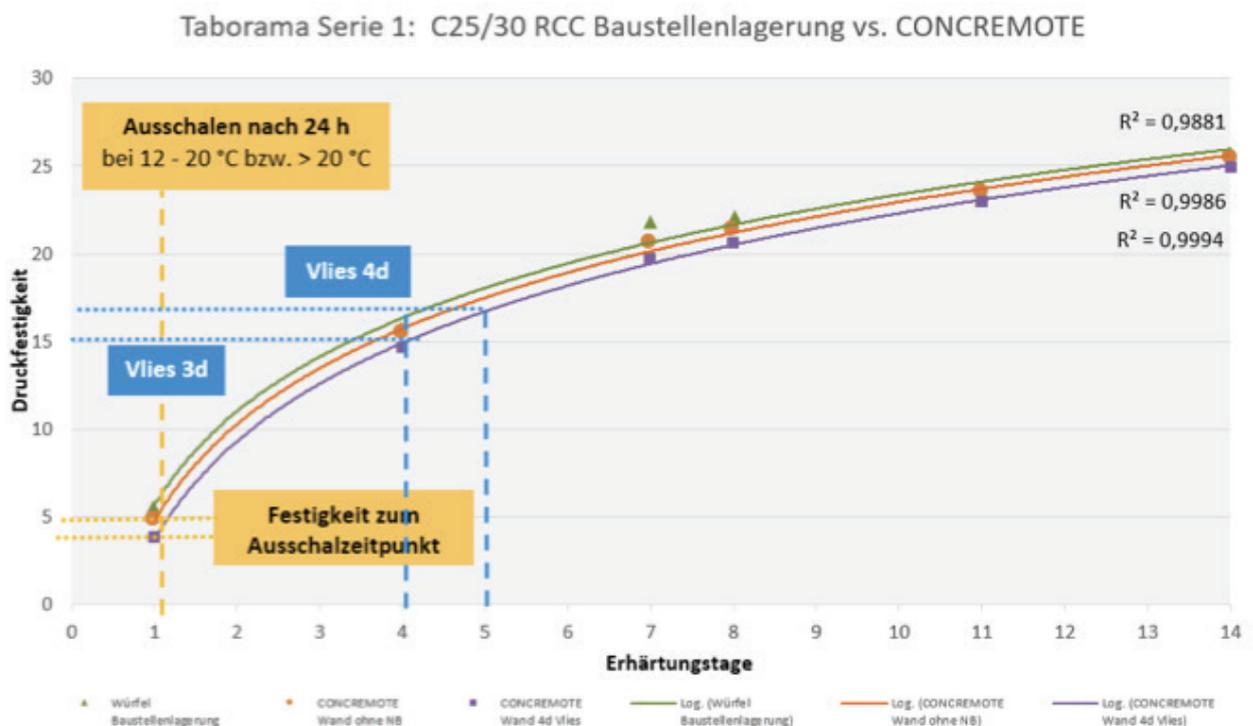
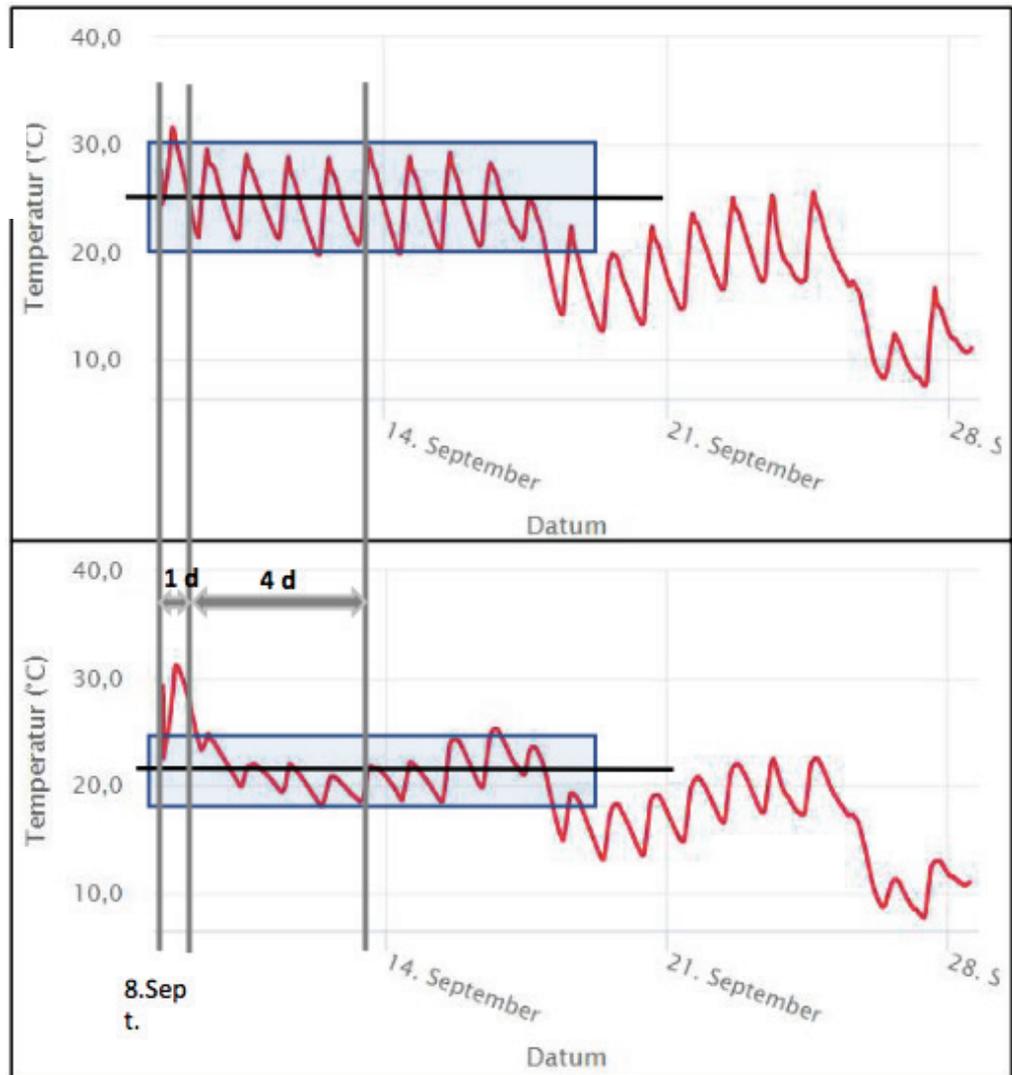


Abb. 9 Druckfestigkeitsverlauf bei C25/30 im Sommerversuch. Sommer-Versuchsbauteile entwickeln unabhängig der Nachbehandlung gleiche Festigkeitswerte. e.E.

Betontemperatur
Deckenelement
ohne Nachbe-
handlung



Betontemperatur
Deckenelement
mit Vliesabdeck-
ung für 4 Tage

Abb. 10 Abschwächung der Tag-Nacht-Schwankung durch Vlies im Sommersuch, Serie o/1. e.E.

6.1.2 Winterversuche

Die Durchführung des Versuchs in Serie 2 unter winterlichen Bedingungen stellte klar, dass ein verzögerter Abfall der Betontemperatur ausschlaggebend für die Festigkeitsentwicklung ist. Als kritische Temperaturschwelle wurde im Vorfeld 5°C festgelegt, um die Gefrierbeständigkeit des Betons jedenfalls zu gewährleisten.

Die Versuchselemente Wand 1 (20 cm stark) und Wand 2 (25 cm stark) hatten nach den vorgesehenen 48 h Schalfrist die normgemäß erforderlichen 3 N/mm² erreicht und konnten ausgeschalt werden. Wie der Versuch zeigte, war auch bereits nach 24 h das Ausschalen der Wand 3 mit 30 cm Stärke technisch möglich gewesen.

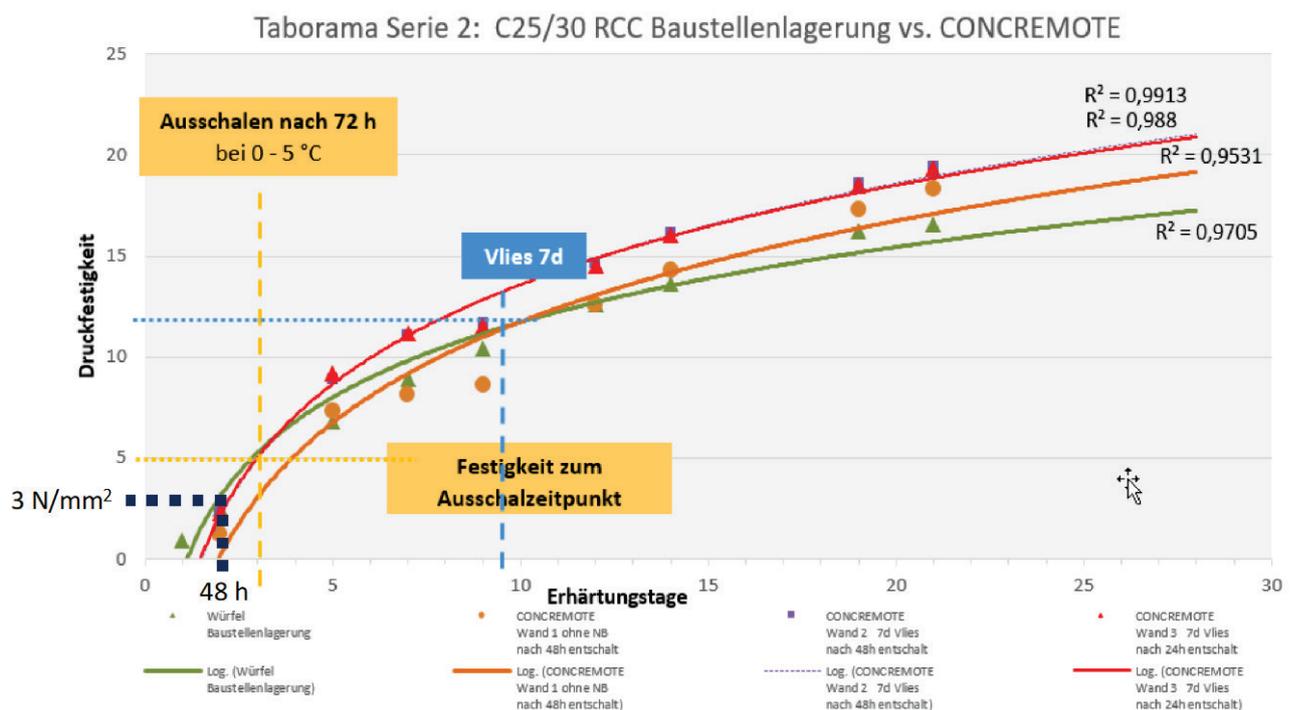


Abb. 11 Druckfestigkeitsverlauf bei C25/30 im Winterversuch. Winter-Versuchsbauteile entwickeln stark abhängig von der Nachbehandlung verschiedene Festigkeitswerte. e.E.

Methodisch erfolgten diese Experimente durch eine Kalibrierung, mit dem Bezug auf Referenzmessungen unter idealen Bedingungen mit sommerlichen Temperaturen und dem Monitoring der Festigkeitsentwicklung unter winterlichen Bedingungen auf der Baustelle. Die reale Tagesdurchschnittstemperatur während der Versuche mit 3°C entsprach dem gewünschten Untersuchungsgegenstand des Temperaturbereiches von 0-5°C. Die Ergebnisse der Versuche sind also valide, wenn auch bei ihrer Interpretation die verschiedenen Wanddicken zu berücksichtigen sind. Die direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist somit relativ; die Zuordnung der unterschiedlichen Wandstärken – z.B. keine Nachbehandlung für das schlankste Bauteil, das am schnellsten auskühlt – überzeichnen die Ergebnisse und machen die Wirkung daher noch sichtbarer.

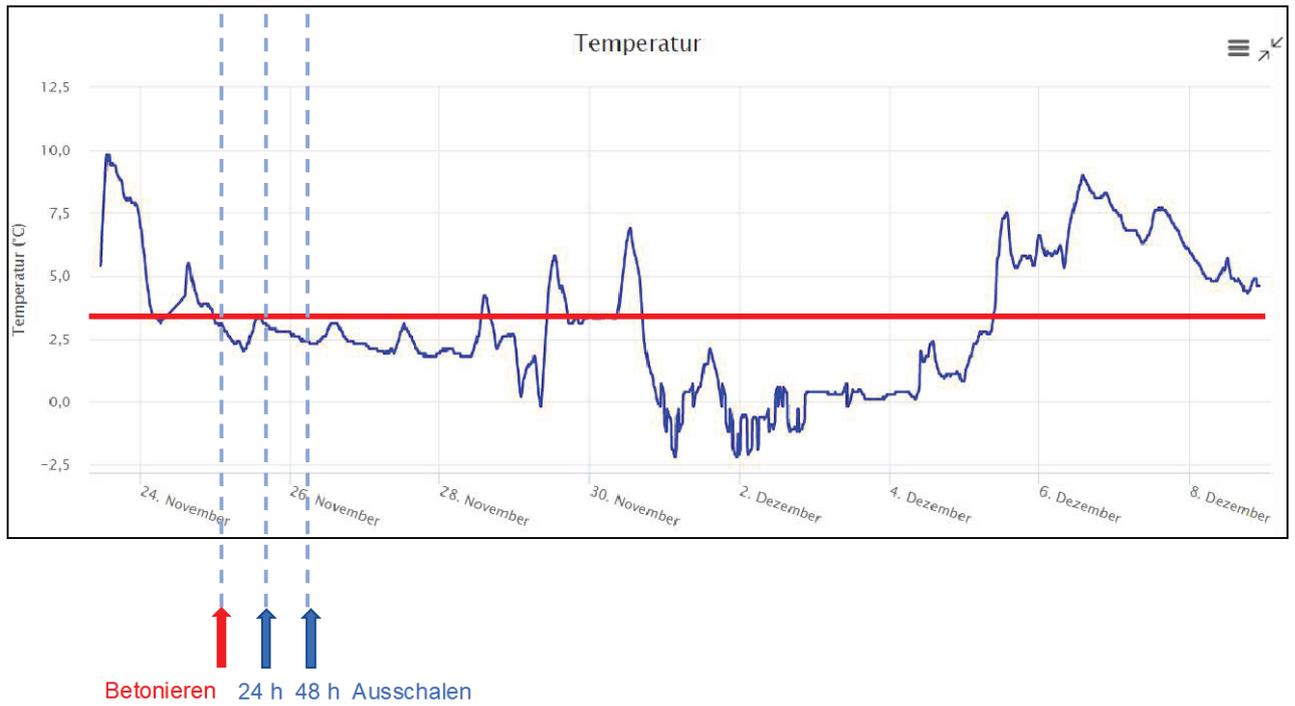


Abb. 12 Temperaturverlauf Serie 2: Die Außenlufttemperatur während der Versuchsserie 2 im Winter verläuft bei durchschnittlich 3°C. e.E.

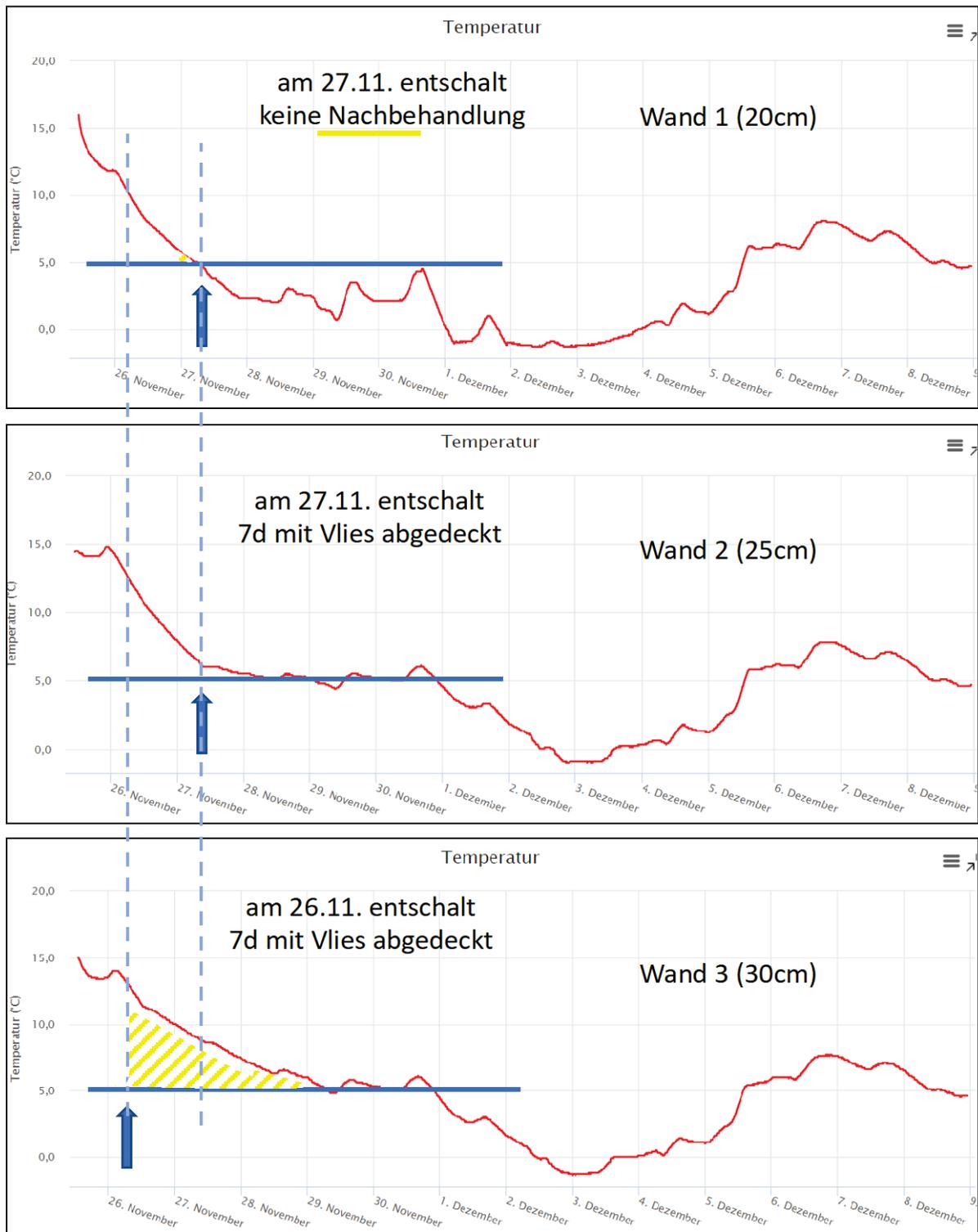


Abb. 13 Unterschiedliche Nachbehandlungsmethoden Serie 2 im Vergleich. Die Betontemperatur der Versuchsbauteil-Serie 2 mit RCC am Bauplatz des *Taborama*. Betontemperatur Wandelemente C25/30 XC1 GK22 F52 PB RCC. Die blauen Pfeile bezeichnen die Ausschaltzeit von 24 bzw. 48 h. Der blaue Balken markiert die kritische Temperaturgrenze von 5°C. e.E.

Jene Probekörper aus Serie 2, die als Nachbehandlung nach dem Ausschalen sieben Tage lang mit Vlies bedeckt waren, wiesen einen deutlich besseren Verlauf in der Festigkeitsentwicklung auf. Sie waren resistenter gegenüber Temperaturstürzen und Tag-Nacht-Schwankungen. Die Wand ohne Nachbehandlung bleibt über die gesamte Dauer konstant 2 N/mm^2 hinter der Festigkeitsentwicklung der nachbehandelten Bauteile zurück, auch noch nach 28 Tagen. Demgegenüber ist die Kurve der Festigkeitsentwicklung der beiden nachbehandelten Bauteile identisch, obwohl eine Wand nach 24 h und die andere nach 48 h ausgeschalt wurde und sie jeweils eine deutlich unterschiedliche Temperaturentwicklung im Bauteil ausweisen. Eine mögliche Erklärung für die gleiche Festigkeitsentwicklung ist die unterschiedliche Stärke der Bauteile. Die 30-cm-starke Wand weist eine höhere Gesamtenergie/m² auf und daher geringeren Temperaturabfall als jenes Element mit 25 cm Stärke, welches 24 h später ausgeschalt wurde.

6.1.2.1 Wirksamkeit der Nachbehandlung von RCC

So zeigt sich in Abb. 14 sehr gut die Wirksamkeit von Nachbehandlungsmethoden im Winterversuch, insbesondere auch im Vergleich zur Wirkung der Schalzeit. Die nach einem Tag ausgeschalte und sogleich mit Vlies abgedeckte Wand ($d=30 \text{ cm}$) hält eine für die Frühfestigkeit entscheidende, doppelt so hohe Temperatur aufrecht, wie das nach zwei Tagen ausgeschalte Element: Das frühestmögliche Ausschalen nach 24 h und sofort anschließende Abdecken mit Vlies hält die Bauteiltemperatur nach 48 h bei 10°C . Dagegen fällt die Bauteiltemperatur der Wand mit 25 cm Stärke nach 48 h in der Schalung bereits auf die kritischen 5°C . **Das bedeutet, dass ein rasches Ausschalen und Abdecken besser für die Temperaturkonstanz im Wandbauteil und damit für die Frühfestigkeitsentwicklung ist als eine längere Schalzeit.**

Aber auch die später ausgeschalte Wand hält nach der Abdeckung mit Vlies noch 7 Tage die Temperatur konstant um die erforderlichen 5°C im Bauteil. Die Temperatur der Wand ohne Nachbehandlung dagegen, folgt dem Verlauf der Außenlufttemperatur sogar unter 0°C , wobei zu berücksichtigen ist, dass es sich um das schlankste Bauteil der Versuchsreihe handelt. Besonders sichtbar wird dieser Sachverhalt, wenn man den Verlauf der Betonkerntemperatur in Bezug zum Verlauf der Außenlufttemperatur setzt: Bei konstant niedriger Umgebungstemperatur unter 3°C fällt die Betonkerntemperatur beinahe linear nach 72 h auf dieses Niveau.

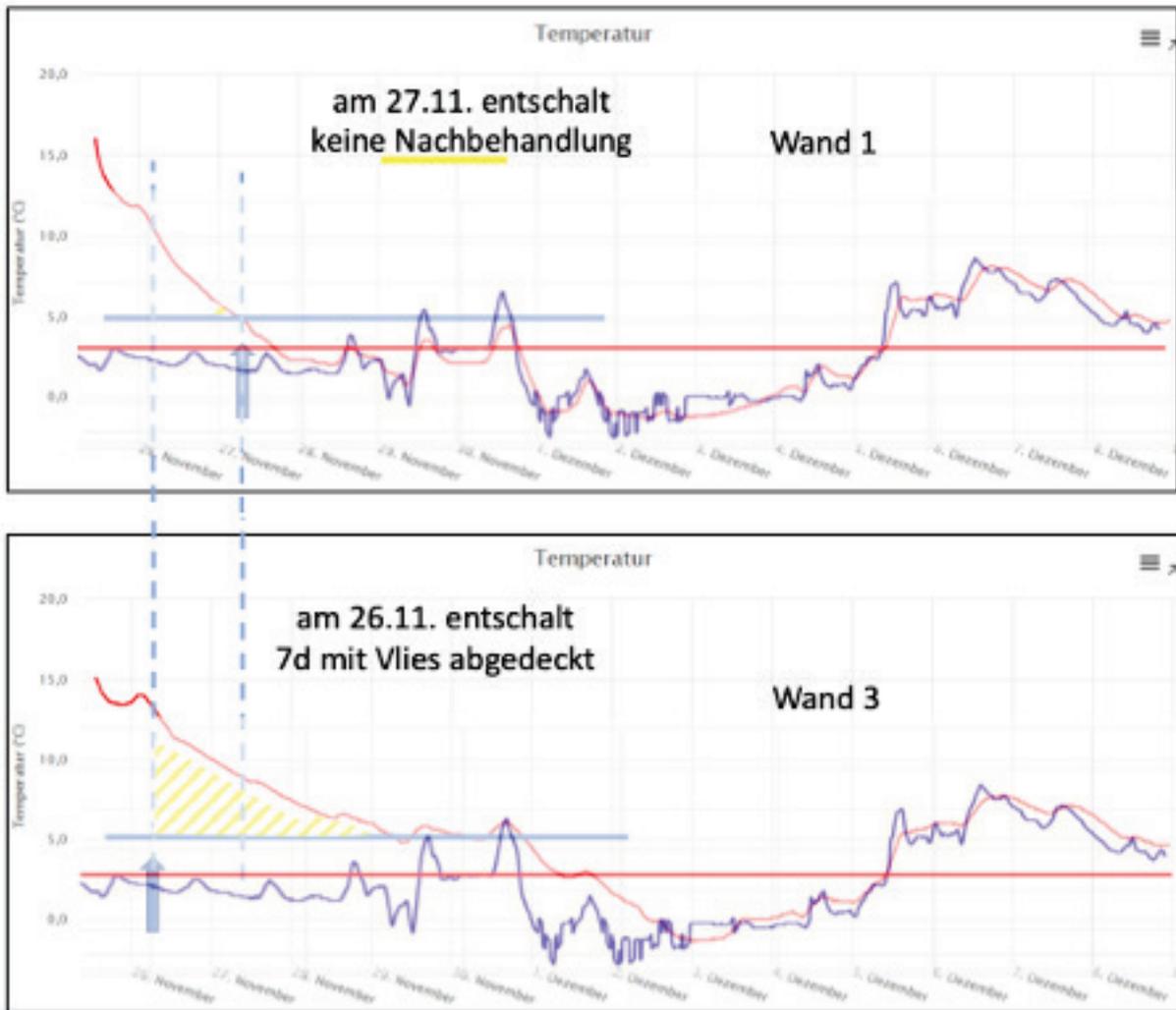


Abb. 14 Temperaturabfall im Beton in Abhängigkeit zu Schalfristen. Die Überlagerung der Betonkerntemperatur mit der Außenlufttemperatur zeigt deutlich, dass eine längere Schalzeit bei konventioneller Schalung ohne wärmedämmende Eigenschaften die Bauteiltemperatur bereits nach 48 h auf die kritische Grenze von 5°C absinken lässt. e.E.

7 Schlussfolgerungen

7.1 Maßnahmen der Nachbehandlung

Aus den Ergebnissen der Baustellenversuche entwickelte das Konsortium eine Maßnahmenmatrix für Wände und Decken zu Schalzeiten sowie zu Methode und Dauer der Nachbehandlungsarten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur. Diese technischen Maßnahmen zur Nachbehandlung des Performance-Betons auf der Baustelle dienen einer optimierten Kompensation der verzögerten Frühfestigkeitsentwicklung von RCC-Beton entsprechend der Umgebungstemperatur.

Performance-Beton kommt mit dieser Matrix aus empirisch ermittelten Werten einer möglichen normierten Qualitätssicherung und Risikoeindämmung einen Schritt näher (s. Tab. 3).

Mittlere Tages-temperatur	Nicht tragende Schalung				Tragende Schalung				
	vertikale Bauteile - Wände (C 25/30)				horizontale Bauteile - Decke (C 30/37)				
	Mindestanforderungen				Mindestanforderungen				
	Schalung	Ausschalen	Nachbehandlung (NB)	Dauer NB	Schalung	Ausschalen	Nachbehandlung (NB)	Dauer NB	
> 20°C	Holzschalung oder Stahlschalung	12 h	abdecken mit PE-Folie	3 d	sämtliche Schalungen	Zeitpunkt nach Angaben Messungen Concremote --> 80 % der fck Concremote Simulation für 28 N/mm²: 30°C = 5,9 d 25°C = 7,1 d 20°C = 8,5 d	(1) 1. Lage Verdunstungsschutz zeinahe auf den Bauteilabschnitt auftragen. (2) 2. Lage Verdunstungsschutz nach Fertigstellung auf das Bauteil auftragen.	-	
12 - 20°C	Holzschalung oder Stahlschalung	24 h	abdecken mit hellem kaschierten Vlies (kein Feuchthalten notwendig, situativ)	4 d	sämtliche Schalungen	Zeitpunkt nach Angaben Messungen Concremote --> 80 % der fck Concremote Simulation für 28 N/mm²: 20°C = 8,5 d 12°C = 12,8 d	(1) Verdunstungsschutz + (2) kaschiertes Vlies (kein Feuchthalten notwendig, situativ)	4 d	
5 - 12°C	Holzschalung	36 h	abdecken mit hellem kaschierten Vlies	6 d	sämtliche Schalungen	Zeitpunkt nach Angaben Messungen Concremote --> 80 % der fck Concremote Simulation für 28 N/mm²: 12°C = 12,8 d 5°C = 20,1 d	(1) Verdunstungsschutz + (2) abdecken mit hellem kaschierten Vlies	6 d	
0 - 5 °C ⁽¹⁾	Holzschalung	72 h	abdecken mit 2 Lagen kaschiertem Vlies	7 d	sämtliche Schalungen	Zeitpunkt nach Angaben Messungen Concremote --> 80 % der fck Concremote Simulation für 28 N/mm²: 5°C = 20,1 d	(1) Verdunstungsschutz + (2) abdecken mit 2 Lagen kaschiertem Vlies	7 d	
< 0 °C	keine Anwendung von RCC				keine Anwendung von RCC				
<small>Bei unterschreiten der angegebenen Ausschallfristen ist durch eine Erhärtungsprüfung nachzuweisen, dass der Beton eine Druckfestigkeit von mindestens 3,0 N/mm² erreicht hat. ⁽¹⁾ Abfall der Betontemperatur ≤ 0,3 °C/Std., gemessen im Bereich der geringsten Bauteilabmessung + Gradient der Betontemperatur < 0,7 K/cm.</small>					<small>Bei unterschreiten der angegebenen Ausschallfristen ist durch eine Erhärtungsprüfung nachzuweisen, dass der Beton eine Druckfestigkeit von mindestens 80 % von f_{ck} erreicht hat. Def.: Concremote Simulation: Bestimmung des Reifegrades im Betonbauteil</small>				
<small>Der Beton muss bei Lufttemperaturen an der Einbaustelle gleich oder größer +3 °C beim Einbringen eine Mindesttemperatur von +10°C aufweisen (Anmerkung: ÖNORM B 4710-1 +5 °C). Bei einer Lufttemperatur an der Einbaustelle von unter +3 °C muss der Beton beim Einbringen eine Mindesttemperatur von +15 °C haben (Anmerkung: ÖNORM B 4710-1 +10 °C).</small>					<small>Der Beton muss bei Lufttemperaturen an der Einbaustelle gleich oder größer +3 °C beim Einbringen eine Mindesttemperatur von +10°C aufweisen (Anmerkung: ÖNORM B 4710-1 +5 °C). Bei einer Lufttemperatur an der Einbaustelle von unter +3 °C muss der Beton beim Einbringen eine Mindesttemperatur von +15 °C haben (Anmerkung: ÖNORM B 4710-1 +10 °C).</small>				

Tab. 3: Maßnahmen-Matrix als Ergebnis der RCC-Baustellenversuche

Der Vergleich, insbesondere der Schalzeiten für RCC, mit den Vorgaben der ÖN B 4710-1 zeigt deutlich, dass die Abweichungen der Vorgaben für konventionellen Beton gering sind (s. Tab. 4).

Mittlere Tages-temperatur	Nicht tragende Schalung				Tragende Schalung			
	vertikale Bauteile - Wände (C 25/30)				horizontale Bauteile - Decke (C 30/37)			
	Mindestanforderungen				Mindestanforderungen			
	Schalung	Ausschalen	Nachbehandlung (NB)	Dauer NB	Schalung	Ausschalen	Nachbehandlung (NB)	Dauer NB
> 20°C	Holzschalung oder Stahlschalung	(12 h) 18,5 h *1,3 = 24 h	abdecken mit PE-Folie	3 d	sämtliche Schalungen	Concremote Simulation für 28 N/mm ² : 30°C = 5,9 d 25°C = 7,1 d 20°C = 8,5 d 7,7 d *1,3 = 10 Tage (ES)	(1) 1. Lage Verdunstungsschutz zeitnahe auf den Bauteilabschnitt auftragen. (2) 2. Lage Verdunstungsschutz nach Fertigstellung auf das Bauteil auftragen.	-
12 - 20°C	Holzschalung oder Stahlschalung	24 h 24 h	abdecken mit hellem kaschiertem Vlies (kein Feuchthalten notwendig, situativ)	4 d	sämtliche Schalungen	Concremote Simulation für 28 N/mm ² : 20°C = 8,5 d 12°C = 12,8 d 10 d (ES)	(1) Verdunstungsschutz + (2) kaschiertes Vlies (kein Feuchthalten notwendig, situativ)	4 d
5 - 12°C	Holzschalung	36 h 34,3h *0,7 = 24 h	abdecken mit hellem kaschiertem Vlies	6 d	sämtliche Schalungen	Concremote Simulation für 28 N/mm ² : 12°C = 12,8 d 5°C = 20,1 d 14,3 d *0,7 = 10 Tage (ES)	(1) Verdunstungsschutz + (2) abdecken mit hellem kaschiertem Vlies	6 d
0 - 5 °C ⁽¹⁾	Holzschalung	(72 h) 80 h *0,3 = 24 h	abdecken mit 2 Lagen kaschiertem Vlies	7 d	sämtliche Schalungen	Concremote Simulation für 28 N/mm ² : 20°C = 8,5 d 5°C = 20,1 d 33,3 d *0,3 = 10 Tage (ES)	(1) Verdunstungsschutz + (2) abdecken mit 2 Lagen kaschiertem Vlies	7 d
< 0 °C	keine Anwendung von RCC				keine Anwendung von RCC			

Bei unterschreiten der angegebenen Ausschallfristen ist durch eine Erhärtungsprüfung nachzuweisen, dass der Beton eine Druckfestigkeit von mindestens 3,0 N/mm² erreicht hat.
⁽¹⁾ Abfall der Betontemperatur ≤ 0,3 °C/Std., gemessen im Bereich der geringsten Bauteilabmessung + Gradient der Betontemperatur < 0,7 K/cm.

Bei unterschreiten der angegebenen Ausschallfristen ist durch eine Erhärtungsprüfung nachzuweisen, dass der Beton eine Druckfestigkeit von mindestens 80 % von f_{ck} erreicht hat.
Def.:
Concremote Simulation: Bestimmung des Reifegrades im Betonbauteil

Der Beton muss bei Lufttemperaturen an der Einbaustelle gleich oder größer +3 °C beim Einbringen eine Mindesttemperatur von +10°C aufweisen (Anmerkung: ÖNORM B 4710-1 +5 °C). Bei einer Lufttemperatur an der Einbaustelle von unter +3 °C muss der Beton beim Einbringen eine Mindesttemperatur von +15 °C haben (Anmerkung: ÖNORM B 4710-1 +10 °C).

Der Beton muss bei Lufttemperaturen an der Einbaustelle gleich oder größer +3 °C beim Einbringen eine Mindesttemperatur von +10°C aufweisen (Anmerkung: ÖNORM B 4710-1 +5 °C). Bei einer Lufttemperatur an der Einbaustelle von unter +3 °C muss der Beton beim Einbringen eine Mindesttemperatur von +15 °C haben (Anmerkung: ÖNORM B 4710-1 +10 °C).

Tab. 4: Vergleich der Schalfristen von RCC Werten (in Klammer) mit den Werten der ÖN B 4710-1 (fettgedruckt).

Zugleich muss festgehalten werden, dass die Ergebnisse der Forschung im Niedertemperaturbereich eine deutlichere Abweichung der Werte der Norm nahelegen. Insbesondere die bereits dargelegte Erkenntnis der Notwendigkeit einer kürzest möglichen Schalzeit (bei Standardschalung), um eine frühest mögliche Nachbehandlung zu ermöglichen, bringt eine starke Abweichung von der Norm mit sich.

Dafür müssen allerdings die Mindestfestigkeit von 3 N/mm² entsprechend schnell erreicht werden, was durch Vorgaben im Regelwerk abgedeckt werden sollte. Dabei wären Vorgaben zur Verwendung von Erhärtungs- bzw. Erstarrungsbeschleunigern, zur Mindesteinbringtemperatur oder zu Wärmedämmeigenschaften der Schalung u. ä. vorstellbar.

Alternativ zu einer möglichst raschen Nachbehandlung kann aber auch gefolgert werden, dass RCC in der Schalung auf einem optimalen Betonkerntemperaturbereich gehalten werden sollte, damit der hohe Nachbehandlungsbedarf bei kälteren klimatischen Umweltbedingungen geringer ausfallen kann. Eine Vliesabdeckung der Bauteile während der Schalfrist wäre ebenfalls denkbar.

Beide Ansätze – kurze Schalzeit für rasche Nachbehandlung vs. optimale Betonkerntemperatur in der Schalung statt Nachbehandlung – sind wirtschaftlich zu vergleichen und in der Praxis zu erproben.

7.2 Weiterentwicklung von RCC-Rezepturen

Die Festlegung der bei den Baustellenversuchen eingesetzten RCC-Rezepturen erfolgte zunächst unter der Zielsetzung einer möglichst umfassenden CO₂-Einsparung im Vergleich zu konventionellem Beton. Darüber hinaus bestand die Notwendigkeit, bisherige Laborversuche durch umfassende Untersuchungen unter realen Baustellenbedingungen zu ergänzen, um so praxisnahe Aussagen hinsichtlich Verarbeitbarkeit, Nachbehandlungsaufwand, Dauer von Ausschulfristen und Festigkeitsentwicklung bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen treffen zu können.

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts zeigen somit in sehr guter Weise die grundsätzlichen Charakteristiken von RCC anhand der eingesetzten Rezepturen auf, wobei evident ist, dass diese Varianten natürlich nicht die Gesamtheit aller möglichen CO₂-reduzierten Betone darstellen. Die vorliegenden Ergebnisse stellen somit einen ersten Status quo dar, von dem aus durch weiterführende Rezepturoptimierungen und -entwicklungen Verbesserungen hinsichtlich festgestellter Limitierungen (z.B. Frühfestigkeitsentwicklung) zu erarbeiten sind, idealerweise möglichst maßgeschneidert für das jeweilige Bauvorhaben. Letztendlich muss es das Ziel sein, ein Optimum zwischen notwendiger Betonperformance und der anzustrebenden CO₂-Einsparung zu erreichen.

8 Ausblick und Empfehlungen

8.1 Perspektive für Performance-Beton

Der Ansatz des Nachweises der gleichwertigen Leistungsfähigkeit ist bisher aus Gründen mangelnder Erfahrung nicht erprobt worden. Daher ist der Erfahrungsgewinn für die gesamte Branche ein Game-Changer. Der Vorteil im Vergleich zum Stand der Technik ist also im Erfolgsfall der Ausblick auf einen neuen Stand der Technik für die Betonanwendung.

Die technischen Vorteile von Performance-Beton liegen in der Anforderung an Beton klimafreundlicher werden zu müssen. Die technischen Nachteile, einer geringeren Festigkeitsentwicklung bei niedrigen Außenlufttemperaturen von unter 12°C, können in der Nachbehandlung mit der erforderlichen Sorgfalt ausgeglichen werden.

Der unbestreitbare Nachteil von höheren Kosten ist langfristig nicht unbedingt schlagend. Die derzeit seitens der HerstellerIn ausgewiesenen Mehrkosten des RCC von 10 % bis 14 % werden mit einem erhöhten Prüfaufwand und Laborbegleitung argumentiert, wobei das tatsächliche Ausmaß der zukünftigen Qualitätssicherung von der ONR 23339 abhängen wird, an welcher derzeit gearbeitet wird. Hinsichtlich der Kosten für Rohstoffe ist für Zement jedenfalls eine Steigerung zu erwarten, während die zukünftige Preisentwicklung der Klinkerersatzstoffe nicht gleichermaßen eindeutig erscheint. Einige dieser Materialien (z.B. Flugasche, Hüttensand) stammen aus industriellen Prozessen, sind somit von diesen abhängig, während Materialien natürlichen Ursprungs (z.B. Gesteinsmehle) anderen Marktmechanismen unterliegen. Neben all diesen Aspekten wird die zukünftige CO₂-Politik durch Festlegung von CO₂-Allokationsplänen und CO₂-Preisen weiteren erheblichen Einfluss auf die ökonomische Bewertung von RCC haben, d.h. je teurer CO₂ wird, desto wichtiger werden klinkerarme Alternativen zum konventionellen Beton.

Nach einer erfolgreichen Integration in die Lean-Prozesse, ist die Taktung der erforderlichen Nachbehandlung des Betons, abhängig von der mittleren Tagestemperatur, besser zu kalkulieren. Eine langfristige Anwendung wird auch die nötige Optimierung der Kosten von Nachbehandlungsverfahren ermöglichen. Der Einsatz von Erhärtungs- bzw. Erstarrungsbeschleunigern ist ebenfalls kostenwirksam, ein rasches Ausschalen ermöglicht eine frühestmögliche und daher besonders effiziente Nachbehandlung des Jungbetons.

8.2 Forschungsfragen zur Erprobung und zur Grenze von Performance-Beton

Mit den Erkenntnissen der Versuchsreihen und insbesondere mit der intensiven Diskussion um die technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der möglichen Realisierung im *Taborama*, ist das Performance-Konzept in die Baustellenpraxis eingetreten. Die unmittelbare Umsetzung im bereits in Bau befindlichen Realisierungsprojekt ist weder technisch noch wirtschaftlich in Frage gestellt, eine unmittelbare Umsetzung als Leuchtturmprojekt ist allein aus haftungsrechtlichen Gründen dem Vorliegen der ONR 23339 untergeordnet worden. Damit konnte zwar die detaillierte

Ausarbeitung der Fallstudie nicht direkt in die Praxis umgesetzt werden, andererseits kann nun aber in Folge wertvolle Zeit zur Klärung wesentlicher Parameter für die wirtschaftlich-technische Optimierung genutzt werden. Diese Klärung sollte dabei insbesondere an den folgenden drei offenen Forschungsfragen abgearbeitet werden.

8.2.1 1. Forschungsfrage: Kurze Schalzeit für rasche Nachbehandlung

Die Frage ist, wie eine Schalzeit von 24 h für eine rasche Nachbehandlung bei 0 bis 5 °C Umgebungstemperatur, also die Frühfestigkeitsentwicklung von RCC, optimal unterstützt werden kann. Für die geforderte Ausschalfestigkeit von 3 N/mm² stehen bei gleicher oder weiter optimierter Rezeptur eines CO₂-reduzierten Betons folgende technische Möglichkeiten zur Verfügung:

- Erhärtungsbeschleuniger
- Heizschalung
- Gedämmte Schalung
- Neue Schalmaterialien

Eine Kombination dieser Möglichkeiten schafft ein weites Spektrum wirtschaftlicher Optimierung, das in der Bauwirtschaft empirisch bestimmt werden muss.

8.2.2 2. Forschungsfrage: Wärmedämmende Schalung statt Nachbehandlung

Die Frage, ob im Temperaturbereich von 0 bis 5°C und tiefer, bei einer wärmegeprägten, beheizten oder innovativen Schalung mit hohem Wärmeübergangswiderstand nach einer Schalzeit von 48 h, ein Nachbehandlungsbedarf von RCC geringer ausfällt, ist von hoher Kostenrelevanz. Hier wäre in Folge mit einem Innovationsschub am Schalungssektor zu rechnen, der wesentlich zur Etablierung eines neuen Standes der Technik beitragen würde.

Der Einfluss einer solchen Schalungstechnik auf den Bedarf an Nachbehandlung wäre natürlich auch bei Normalbeton schlagend, die normgemäß bei 80 h liegt. Einschränkend sei bemerkt, dass die Nachbehandlungsdauer nicht nur auf Schutz vor Wärmeverlust, sondern auch auf Schutz vor Oberflächen austrocknung unter Windverhältnissen und trockener Luft im Winterfall abzielt.

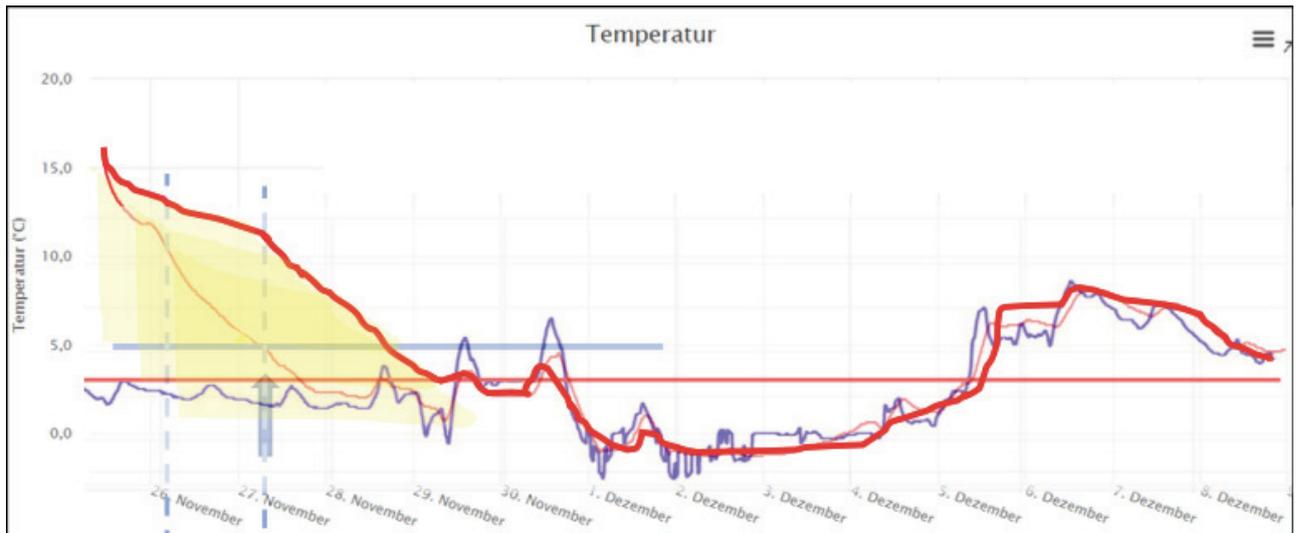


Abb. 15 Hypothetischer Temperaturverlauf nach 48h in „RCC-Schaltechnik“ ohne Nachbehandlung. e.E.



Abb. 16 Beispiel eines Holzproduktes mit wärmedämmenden Eigenschaften. Ähnliches könnte in der Schaltechnik angewandt werden

8.2.3 3. Forschungsfrage: Grenze der CO₂-Reduktion

Aus den vorangehenden Forschungsfragen ergibt sich die Möglichkeit, die Grenze der CO₂-Reduktion neu zu bewerten. Die Rezepturen der dargestellten Versuche waren an der Baustellenpraxis orientiert. Selbst im Fertigteilwerk wurde eine Rezeptur auf der „sicheren Seite“ gewählt. Diese CO₂-Reduktionswerte der Versuchsrezepturen lagen zwischen 25 – 30 %. Daher stellt sich die wesentliche Frage, ob die Reduktion auch auf 50 % ausgeweitet werden kann, wie dies beispielsweise in der dänisch-holländischen Initiative *SUSTAINABLE CONCRETE INITIATIVE, ROADMAP TOWARDS 2030, 50% REDUCTION OF CO₂ EMISSIONS FROM CONCRETE CONSTRUCTIONS* (NYHOLM THRANE, ANDERSEN, MATHIESEN, 2020) gefordert wird.

Unausweichlich ist die Frage, wie sich die Maßnahmen zur Schalzeitverkürzung in der ökologischen Gesamtbilanzierung niederschlagen. Die CO₂-Äquivalente von Heizschalung oder von Erstarrungsbeschleunigern müssen in die Bilanzierung integriert werden.

8.2.4 Umsetzung in Demonstrationsprojekten

Die Beurteilung der Kosten-Nutzen-Faktoren und damit die Einschätzung einer effizienten Integration in Standardabläufe auf der Baustelle, wurden auf Grundlage der Matrix zur Nachbehandlung diskutiert. Grundsätzlich wurden für tragende Schalungen die gemessenen Festigkeitsentwicklungen des RCC als ausreichend beurteilt. Eine Realisierung im möglichen Demonstrationsprojekt *Taborama* wurde innerhalb des bestehenden Schalkonzeptes der Geschossdecken ohne Änderungen als umsetzbar erachtet wie auch die Durchführung der vorgeschlagenen Nachbehandlung. Bedenken gab es bei den nichttragenden, seitlichen Schalungen: Längere Ausschalzeiten bedeuten massive Bauzeitverlängerungen und erhöhten Bedarf an Schalungsmaterial. Zur erforderlichen Nachbehandlung von Wänden durch Abdecken mit kaschiertem Vlies bestehen keine Standards. Trotz des Beiziehens von Lean-ExpertInnen konnte keine dynamische Bewertung der erforderlichen Taktungen bei den möglicherweise rasch wechselnden Anforderungen an die Nachbehandlung vertikaler Bauteile erfolgen. Hier fehlt es schlicht an Erfahrung mit „vertical curing“.

Experimentelle Versuchsreihen mit kalibrierten Messungen des Festigkeitsverlaufs bei Bauteilen alleine sind als Entscheidungsgrundlage zur Kostenbemessung nicht ausreichend. So wurden zwar Nachbildungen der Bauteile des *Taborama* für die experimentelle Prüfung der technischen Lösungsansätze hergestellt, um möglichst realitätsnahe Ergebnisse messen zu können. Dieses Vorgehen bleibt aber nur eine Annäherung an das Szenario eines Einsatzes im Bauvorhaben. Schließlich handelt es sich um eine Hochhaus-Baustelle in Nähe zum Gefahrenbereich der benachbarten Gleiskörper, wo ein Arbeitsübereinkommen mit der ÖBB zu besonderer Sorgfalt verpflichtet und ein sturmbedingtes Ablösen der Vliese von Wand und Decken fatale Folgen hätte.

Faktum ist, dass die experimentellen Baustellenversuche keine garantierten Rückschlüsse auf die Praxis und Kosten für die Ausführung des gesamten Hochhauses mit Performance-Beton zulassen. Die Herausforderung ist die technische Umsetzung einer großflächigen Nachbehandlung durch Verdunstungsschutz, Abdeckung und Einpacken im Rohbau des Hochhauses. Erst mit der Skalierung der Versuchsanordnung auf 20.000 m² BGF kann eine methodische Vorgehensweise entwickelt werden, um die technischen Probleme richtig einschätzen und für die Zukunft bewerten zu können. Ungeachtet dessen waren die identifizierten technischen und wirtschaftlichen Risiken nicht ausschlaggebend. Insbesondere scheint im Zusammenhang mit den angesprochenen Forschungsfragen die Wirtschaftlichkeit von Performance-Beton langfristig greifbar. Entscheidend für das Aussetzen der Realisierungsabsicht im *Taborama* ist, wie bereits dargelegt, dass die ONR 23339 als Garant für eine rechtlich eindeutige Grundlage zur Umsetzung des Performance-Konzepts frühestens mit Ende 2021 in Aussicht gestellt werden konnte.

8.3 Empfehlungen

Die Empfehlungen aus dem Forschungsprojekt richten sich an die Betonbranche als Ganzes. Hier sollten schnellstmöglich gemeinsame Randbedingungen für das Performance-Konzept als neuen Stand der Technik geschaffen werden. Dies geschieht mit dem Ziel – wie bereits in Kapitel 5.4, Seite 33 zu den rechtlichen Rahmenbedingungen erläutert – künftig einen „vollen Wettbewerb“ zu etablieren, d.h. alle Unternehmen einer Branche sollten den anerkannten Stand der Technik erfüllen (können).

Andererseits soll dieser Wettbewerb zu einer Diversifizierung von Produkten führen, die entsprechend der jeweiligen Erfahrungen und Stärken eines Unternehmens das Bauen mit Beton umweltfreundlicher machen. Dieser Trend zeichnet sich bereits ab. Der Wettbewerb diversifizierter Betonprodukte bedarf auf Seiten der Beschaffung neuer Strukturen und Methoden, welche die Umweltvorteile dieser Produkte gewichten. Das Ausschreiben von Festigkeits- und Expositions-klassen allein wird nicht mehr ausreichen. Hier ist eine neue Generation von Tragwerksingenieuren gefordert, die in die Beurteilung der Effizienz einer Tragstruktur die Umweltwirksamkeit integrieren. Dementsprechend bedarf es auch eines angepassten Honorarmodells für die Leistungen zur nachhaltigen Tragwerksoptimierung, damit diese seitens der AuftraggeberInnen auch standardisiert abgerufen werden können.

Dafür muss über Unternehmensgrenzen hinaus kooperiert, Wissen geteilt, ergebnisoffen geforscht und öffentlich gemacht werden, was das Bauen mit Beton umweltverträglicher macht. Diese Absicht liegt der Arbeit dieses Konsortiums und dem Bericht zu Grunde.

9 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Festigkeitsentwicklung von Performance-Beton im Vergleich zu Normalbeton, e.E.	18
Abb. 2	Deckblatt der ÖNorm B 4710-1 für Beton Österreichisches Normungsinstitut. 2018. <i>ÖNorm B 4710-1: Beton — Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität, Teil 1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton</i> . Austrian Standards International - Standardisierung und Innovation.	19
Abb. 3	Produktblätter zu CO ₂ -reduzierten Betonen: LafargeHolcim Ltd. 2021. <i>Holcim Broschüre Evopact und Evopact Plus</i> , zuletzt abgerufen am 21.07.2021 von https://www.holcimpartner.ch/api/holcimpartnernet/files/holcim_beton_broschuere_evopact_evopactplus_dep.pdf?fileId=1ea3-54c5-4dabf301-8111-0242ac110002&timestamp=2020-01-12T15:00:54.563Z&storageContext=direct&filename=Holcim_Beton_Broschuere_Evopact_EvopactPLUS_DE.pdf Aggregate Industries. 2021. <i>Ecopact Brochure</i> , zuletzt aufgerufen am 21.07.2021 von https://www.aggregate.com/ecopact	20
Abb. 4	Potenziale für Performance-Beton im BIM-Modell des <i>Taborama</i> , e.E.	26
Abb. 5	Sommer-Versuchsbauteile mit RCC am Bauplatz des <i>Taborama</i> , e.E.	27
Abb. 6	Winter-Versuchsbauteile mit RCC am Bauplatz des <i>Taborama</i> , e.E.	28
Abb. 7	Versuchsbauteile mit RCC im Mischek Systembau Fertigteilwerk Gerasdorf, e.E.	32
Abb. 8	Festigkeitsverlauf des RCC-Beton bei verschiedenen Temperaturen. Je kühler die Umgebungstemperatur, desto mehr verzögert sich die Festigkeitsentwicklung von RCC-Beton im Vergleich zu konventionellem Beton. e.E.	38
Abb. 9	Druckfestigkeitsverlauf bei C25/30 im Sommersversuch. Sommer-Versuchsbauteile entwickeln unabhängig der Nachbehandlung gleiche Festigkeitswerte, e.E.	39
Abb. 10	Abschwächung der Tag-Nacht-Schwankungen durch Vlies im Sommersversuch, Serie o/1. e.E.	40
Abb. 11	Druckfestigkeitsverlauf bei C25/30 im Winterversuch. Winter-Versuchsbauteile entwickeln stark abhängig von der Nachbehandlung verschiedene Festigkeitswerte. e.E.	41
Abb. 12	Temperaturverlauf Serie 2: Die Außenlufttemperatur während der Versuchsserie 2 im Winter verläuft bei durchschnittlich 3°C. e.E.	42
Abb. 13	Unterschiedliche Nachbehandlungsmethoden Serie 2 im Vergleich. Die Betontemperatur der Versuchsbauteil-Serie 2 mit RCC am Bauplatz des <i>Taborama</i> . e.E.	43
Abb. 14	Temperaturabfall im Beton in Abhängigkeit zu Schalfristen. Die Überlagerung der Betonkerntemperatur mit der Außenlufttemperatur zeigt deutlich, dass eine längere Schalzeit bei konventioneller Schalung ohne wärmedämmende	45

	Eigenschaften die Bauteiltemperatur bereits nach 48 h auf die kritische Grenze von 5 °C absinken lässt. e.E.	
Abb. 15	Hypothetischer Temperaturverlauf nach 48h in „RCC-Schaltechnik“ ohne Nachbehandlung. e.E.	51
Abb. 16	Beispiel eines Holzproduktes mit wärmedämmenden Eigenschaften Schubert + Kühn GmbH & Co. KG. 2019. <i>Natur pur: Bauen mit dem H.R.W. Vollholzwandsystem</i> , zuletzt aufgerufen am 08.06.2021 um 12:14 von https://www.schubert-kuehn.de/leistungen-holzbau/massivholzhaus.html	51

Alle Abbildungen mit der Abkürzung „e.E.“ (eigene Erzeugung) nach dem Bildtitel wurden selbstständig vom Projektkonsortium erstellt.

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Angaben der für die Berechnung verwendeten CO ₂ -Äquivalente Institut Bauen und Umwelt e.V. 2018. <i>Umwelt-Produktdeklaration für Beton der Druckfestigkeitsklasse C25/30</i> . InformationsZentrum Beton GmbH. Institut Bauen und Umwelt e.V. 2018. <i>Umwelt-Produktdeklaration für Beton der Druckfestigkeitsklasse C30/37</i> . InformationsZentrum Beton GmbH.	23
Tab. 2	Rezepturen von Normalbeton und RCC im Vergleich für Wand, Decke und Fertigteil	24
Tab. 3	Maßnahmen-Matrix als Ergebnis der RCC-Baustellenversuche	46
Tab. 4	Vergleich der Schalfristen von RCC (Werten in Klammer) mit den Werten der ÖN B 4710-1 (fettgedruckt).	47

Literaturverzeichnis

BIG BUYER INITIATIVE 2020	Die EU-Kommission hat innerhalb der Big Buyer Initiative einen klaren Schwerpunkt auf Zero Emission Construction und Circular Construction Material gesetzt. CO ₂ -reduzierter Beton steht dabei stark im Fokus. Big Buyers for Climate and Environment. 2020. <i>What is big buyers?</i> zuletzt aufgerufen am 08.06.2021 um 14:51 auf https://bigbuyers.eu/
CELITEMENT 2021	Celitement GmbH&Co.KG. 2021. <i>Über uns</i> . zuletzt aufgerufen am 08.06.2021 um 15:10 von https://celitement.de/ueber-uns/
CRIPPA et al. 2019	Crippa, M., Oreggioni, G., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Lo Vullo, E., Solazzo, E., Monforti-Ferrario, F., Olivier, J.G.J., Vignati, E. 2019. <i>Fossil CO₂ and GHG emissions of all world countries - 2019 Report</i> , S. 12. Publications Office of the European Union.

FAVIER et al. 2018	Favier, Aurélie; De Wolf, Catherine; Scrivener, Karen; Habert, Guillaume. 2018. <i>A Sustainable Future for the European Cement and Concrete Industry – Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050</i> . ETH Zürich.
GOLTERMANN et al. 2017	Goltermann, Per; Wargocki, Pawel; Dahl Hertz, Kristian; Ottosen, Lisbeth M.; Jensen, Pernille Erland; Rode, Carsten. 2017. <i>Klimavenlig beton. (Climate-friendly concrete)</i> . Technical University of Denmark (DTU).
IBU I 2018	Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) 2018. <i>Umwelt-Produktdeklaration für Beton der Druckfestigkeitsklasse C25/30</i> . InformationsZentrum Beton GmbH.
IBU II 2018	Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) 2018. <i>Umwelt-Produktdeklaration für Beton der Druckfestigkeitsklasse C30/37</i> . InformationsZentrum Beton GmbH.
KRAUSS 2016	Krauss, Hans-W. 2016. <i>CO₂-reduzierte Betone–Chancen und Herausforderungen für Forschung und Praxis</i> : 4. Jahrestagung und das 57. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton. Technische Universität Braunschweig.
LEHNE, PRESTON 2018	Lehne, Johanna; Preston, Felix. 2018. <i>Chatham House Report</i> , S. 5. The Royal Institute of International Affairs.
LafargeHolcim Ltd. 2021	LafargeHolcim Ltd. 2021. <i>Holcim Broschüre Evopact und Evopact Plus</i> , zuletzt abgerufen am 21.07.2021 von https://www.holcimpartner.ch/api/holcimpartnernet/files/holcim_beton_broschuere_evopact_evopactplus_dep.pdf?fileId=1ea3-54c5-4dabf301-8111-0242ac110002 &timestamp=2020-01-12T15:00:54.563Z&storageContext=direct&filename=Holcim_Beton_Broschuere_Evopact_EvopactPLUS_DE.pdf
MAUSCHITZ 2020	Mauschitz, Gerd. 2020. <i>Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie, Berichtsjahr 2020</i> . Technische Universität Wien.
NYHOLM et al. 2020	Nyholm Thrane, Lars, Andersen, Thomas Juul, and Mathiesen, Dorthe. 2020. <i>Roadmap Towards 2030 - 50 % REDUCTION OF CO₂ EMISSIONS FROM CONCRETE CONSTRUCTIONS</i> , Sustainable Concrete Initiative. zuletzt aufgerufen am 07.06.2021 von https://baeredygtigbeton.dk/media/42468/bbi_roadmap_uk_marts2020.pdf Es handelt sich um eine konzertierte Initiative zur Halbierung der Emissionen von Beton aus Skandinavien und den Niederlanden, die vor Kurzem in Dänemark als <i>Roadmap 2030</i> publiziert wurde.
ON B 4710-1 2018	Österreichisches Normungsinstitut. 2018. <i>ÖNorm B 4710-1: Beton — Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität, Teil 1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton</i> . Austrian Standards International - Standardisierung und Innovation.
ON EN 197-1 2018	Österreichisches Normungsinstitut. 2018. <i>ÖNORM EN 197-1: 2018 12 01</i> . Austrian Standards International - Standardisierung und Innovation.
PEDUZZI 2014	Peduzzi, Pascal. 2014. <i>Sand, rarer than one thinks</i> . In: <i>Environmental Development</i> , vol. 11, S. 208-218. zuletzt aufgerufen am 21.07.2021 von https://archive-ouverte.unige.ch/unige:75919

	Der Umweltorganisation der Vereinten Nationen (UNEP) liegen nicht für alle Regionen der Erde verlässliche Daten zu den Fördermengen von mineralischen Baustoffen vor. Jedoch leitet man dort den Bedarf indirekt von den Daten der Zementproduktion ab, der sich im Zeitraum von 1949 bis 2021 verdreifacht hat.
VDZ 2021	Verein Deutscher Zementwerke e. V. 2021. <i>Zementmärkte, regionale Märkte und internationales Umfeld</i> . zuletzt aufgerufen am 26.07.2021 von https://mitglieder.vdz-online.de/zementindustrie/branchenueberblick/zementmaerkte-und-umfeld/ sowie Verein Deutscher Zementwerke e. V. 2021. <i>Zementversand Inland 2020</i> . zuletzt aufgerufen am 26.07.2021 von https://mitglieder.vdz-online.de/zementindustrie/branchenueberblick/zementversand-monatsdaten/
Verordnung (EU) Nr. 305/2011, 2011	Europäische Union. 2011. <i>Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates</i> . zuletzt aufgerufen am 21.07.2021 von https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32011R0305
Verordnung OIB-095.1-011/19, 2015	Verordnung des OIB. 2015. <i>OIB-095.1-011/19: Konsolidierte Fassung der Liste der Bauprodukte und der Anlagen A und B der Baustoffliste ÖA</i> . zuletzt aufgerufen am 21.07.2021. von https://www.oib.or.at/de/baustofflisten/baustoffliste-%C3%B6-aktuell
VÖZ 2021	Verein der Österreichischen Zementindustrie. 2021. <i>Zementsorten, -bezeichnungen/Normen</i> . Tabelle „Zementsorten in Österreich“. zuletzt aufgerufen am 20.07.2021 von https://zement.at/der-baustoff/zement/zementsorten-bezeichnungen-normen
VÖZ II 2021	Verein der Österreichischen Zementindustrie. 2021. <i>Zementversand 2020 - Region Österreich (unveröffentlicht)</i> . D. Kowar, persönliche Korrespondenz. 26.07.2021.

Vortragsreihen mit Beteiligung des Forschungskonsortiums RCC: Implementierung von CO₂-reduziertem Betonen auf der Baustelle:

Acceleration Sustainable Construction Materials, Event IV

“Reducing CO₂ by half, in concrete. On the road, with the latest map.”

<https://bouwcirculair.nl/nieuws/webinar-reducing-co2/> (abgerufen am 2. April 2021; 14:56)

Abkürzungsverzeichnis

Abk.	Abkürzung
AHWZ	Aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe für die Betonherstellung
ASI	Austrian Standards International
BTZ	Bautechnische Zulassung
C25/30	Druckfestigkeitsklasse von Beton (Würfel-/Prismen-festigkeit nach 28 Tagen)
ECPC	Equivalent Concrete Performance Concept
e.E.	eigene Erzeugung
EPD	= UPD = Umwelt-Produkt-Deklaration
ETB	Europäische Technische Bewertung
GK	Größtkorn (größter Gesteinskorndurchmesser)
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
ÖA	Baustoffliste als Verordnung des OIB
ÖBV	Österreichische Bautechnik Vereinigung
OIB	Österreichisches Institut für Bautechnik
ONR	ÖNorm Regel (Austrian Standards International)
NB	Nachbehandlung (von Ortbeton)
RCC	Reduced Carbon Concrete
SRE	STRABAG Real Estate
ÜA	Einbauzeichen zur Dokumentation erfüllter Anforderung der Baustoffliste ÖA
VDZ	Verein Deutscher Zementwerke
VÖZ	Verband österreichischer Zementindustrie
W/B-Wert	Wasserbindemittelwert
XC1	Expositionsklasse von Beton (Umwelteinflüsse)

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)