

RCC2 – Reduced Carbon Concrete 2

Ökobilanz heizbarer Schalung für CO₂-reduzierten und klimaneutralen
Beton

T. M. Romm, J. Flaszynska, M. Härtel,
M. Kopp, D. Ehrenreich, T. Meinschad,
P. Kasal, T. Belazzi, J. Horvath,
M. Schwarzbauer, L. Kujawa,
R. Pamminger, M. Löffler, F. Denk,
H.-J. Zeiler, J. Hörler, J. Roth, A. Preuß,
T. Groeneveld

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

26/2024

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:

Abteilung III/3 - Energie und Umwelttechnologien

Leitung: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Kontakt zur Mission „Klimaneutrale Stadt“: DIⁱⁿ (FH) Katrin Bolovich

Kontakt zu „Technologien und Innovationen für die klimaneutrale Stadt“: DIⁱⁿ (FH) Isabella Warisch

Autorinnen und Autoren: T. M. Romm, J. Flaszynska, M. Härtel, M. Kopp, D. Ehrenreich, T. Meinschad, P. Kasal, T. Belazzi, J. Horvath, M. Schwarzbauer, L. Kujawa, R. Pamminger, M. Löffler, F. Denk, H.-J. Zeiler, J. Hörler, A. Preuß, T. Groeneveld

Dieser Bericht gibt Einblick in die Ergebnisse eines Forschungsprojekts, das vom BMK gefördert wurde. Die inhaltliche Verantwortung für Vollständigkeit, Richtigkeit, Aktualität sowie Barrierefreiheit und Freiheit von Rechten Dritter liegen bei den Autorinnen und Autoren. Die dargelegten wissenschaftlichen Ergebnisse entsprechen nicht zwingend dem politischen Standpunkt des BMK.

Wien, 2024.

RCC2 – Reduced Carbon Concrete 2

Ökobilanz heizbarer Schalung für CO₂-reduzierten und klimaneutralen Beton

Arch. DI Thomas Matthias Romm, DIⁱⁿ Julia Flaszynska
forschen planen bauen ZT

DI Michael Härtel
Dr. Ronald Mischek ZT GmbH

Michael Kopp MSc., Dr. Thomas Belazzi
bauXund forschung und beratung GmbH

DIⁱⁿ (FH) Daniela Ehrenreich, DI Dr. Thomas Meinschad, DI Dr. Pavel Kasal
Doka GmbH

Maximilian Schwarzbauer, DI Lukasz Kujawa
STRABAG Real Estate GmbH

Mag. Johannes Hörler
Transportbeton GesmbH & Co KG

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

DI Dr. Franz Denk, DI Hans-Jürgen Zeiler
Wopfinger Transportbeton GmbH

DI Dr. Johannes Horvath
Holcim (Österreich) GmbH

DI Axel Preuß, Thorsten Groeneveld
CarStorCon Technologies GmbH

Wien, Juni 2024

Ein Projektbericht im Rahmen von



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem FTI-Schwerpunkt „Klimaneutrale Stadt“ des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Im Rahmen dieses Schwerpunkts werden Forschung, Entwicklung und Demonstration von Technologien und Innovationen gefördert, mit dem Ziel, einen essentiellen Beitrag zur Erreichung der Klimaneutralität in Gebäuden, Quartieren und Städten zu liefern. Gleichzeitig wird dazu beigetragen, die Lebens- und Aufenthaltsqualität sowie die wirtschaftliche Standortattraktivität in Österreich zu erhöhen. Hierfür sind die Forschungsprojekte angehalten, einen gesamtheitlichen Ansatz zu verfolgen und im Sinne einer integrierten Planung – wie auch der Berücksichtigung aller relevanten Bereiche wie Energieerzeugung, -speicherung und -verteilung, Berücksichtigung von gebauter Infrastruktur, Mobilität und Digitalisierung – angewandte und bedarfsorientierte Fragestellungen zu adressieren.

Um die Wirkung des FTI-Schwerpunkts „Klimaneutrale Stadt“ zu erhöhen, ist die Verfügbarkeit und Verbreitung von Projektergebnissen ein elementarer Baustein. Durch Begleitmaßnahmen zu den Projekten – wie Kommunikation und Stakeholdermanagement – wird es ermöglicht, dass Projektergebnisse skaliert, multipliziert und „Von der Forschung in die Umsetzung“ begleitet werden. Daher werden alle Projekte nach dem Open Access Prinzip in der Schriftenreihe des BMK barrierefrei publiziert und elektronisch über die Plattform [nachhaltigwirtschaften.at](https://www.nachhaltigwirtschaften.at) frei zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.

Abteilung III/3 - Energie und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhalt

| | |
|--|-----------|
| Vorbemerkung | 4 |
| 1 Kurzfassung | 7 |
| 2 Abstract | 10 |
| 3 Projektinhalt | 13 |
| 3.1 Ausgangslage..... | 13 |
| 3.2 Vorgangsweise | 16 |
| 3.2.1 Grundlagen für den Winterversuch | 17 |
| 3.3 Winterversuch..... | 19 |
| 3.3.1 Versuchsvorbereitung..... | 19 |
| 3.3.2 Versuchsaufbau | 22 |
| 3.3.3 Versuchsdurchführung..... | 25 |
| 4 Ergebnisse | 30 |
| 4.1 Messergebnisse..... | 30 |
| 4.1.1 Messungen der Temperaturentwicklung in/an den Versuchsbauteilen..... | 30 |
| 4.1.2 Festigkeitsentwicklung Concremote | 32 |
| 4.1.3 Würfeldruckfestigkeiten der Probekörper | 33 |
| 4.1.4 Bohrkernfestigkeiten Versuchsbauteile | 34 |
| 4.1.5 Karbonatisierungsrate an Bohrkernen | 37 |
| 4.1.6 Ausziehversuche an Decken | 38 |
| 4.2 Interpretation der Messergebnisse | 39 |
| 4.3 Ökobilanzierung | 40 |
| 4.3.1 Betonrezepturen | 40 |
| 4.3.2 Darstellung Ökobilanzierung | 41 |
| 4.3.3 Ergebnisse der Ökobilanzierung..... | 43 |
| 4.4 Beitrag des Projekts zum Schwerpunkt „Klimaneutrale Stadt“ | 46 |
| 5 Schlussfolgerungen | 47 |
| 5.1 Gewonnene Erkenntnisse | 47 |
| 5.2 Weitere Verwertung der Projektergebnisse | 51 |
| 5.3 Relevanz der Projektergebnisse und Weiterverwendung durch Zielgruppen | 52 |
| 5.4 Rechtliche & technische Hürden..... | 53 |
| 5.5 Bisherige Verwertungs- und Verbreitungsaktivitäten | 55 |
| 5.6 Weiteres (Markt-/ Verbreitungs-) Potenzial | 57 |
| 6 Ausblick und Empfehlungen | 60 |
| 6.1 Empfehlungen für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten..... | 60 |
| 6.2 Potenzial für Demonstrationsvorhaben (Chancen / Herausforderungen / Risiken bei der Realisierung / Umsetzung in Richtung Demonstrationsprojekt)..... | 63 |
| 7 Verzeichnisse & Abkürzungen | 65 |
| 7.1 Tabellenverzeichnis..... | 65 |

| | | |
|----------|----------------------------|-----------|
| 7.2 | Abbildungsverzeichnis..... | 66 |
| 7.3 | Literaturverzeichnis..... | 68 |
| 7.4 | Abkürzungen | 69 |
| 8 | Anhang..... | 70 |

1 Kurzfassung

Motivation und Forschungsfrage:

Klinkerreduzierte Rezepturen von Beton haben geringere CO₂-Emissionen als Standardbetone¹. Die verzögerte Frühfestigkeitsentwicklung von CO₂-reduziertem Beton – Reduced Carbon Concrete (RCC) – stellt zufolge des geringeren Bindemittelgehalts insbesondere bei niedrigen Außentemperaturen eine Herausforderung dar. Diese fehlende Energie bei der Hydratationswärmeentwicklung zu Beginn der Erhärtungsphase kann u.a. durch eine heizbare Schalung ausgeglichen werden. Aber auch eine strombetriebene Beheizung der Schalung verbraucht Energie, deren Erzeugung wiederum CO₂ emittiert. **Daher ist die Ökobilanz von heizbaren Schalungen zur Unterstützung CO₂-reduzierter Betone ein Schlüssel zur Bewertung der Nachhaltigkeit innovativer RCC-Rezepturen.** Daraus lässt sich folgende Forschungsfrage formulieren: Wie kann die Ökobilanz von heizbaren Schalungen zur Unterstützung von CO₂-reduzierten Betonen bewertet werden und inwieweit beeinflusst dies die Nachhaltigkeit innovativer Betonrezepturen?

Ausgangssituation/Status Quo:

Das im Jahr 2020 vorangegangene und von der Magistratsabteilung 20 der Stadt Wien (Energieplanung) mitinitiierte Forschungsprojekt Reduced Carbon Concrete (RCC) (GZ 2020-0.657.535) hatte die Erforschung des Baustelleneinsatzes von CO₂-reduziertem Beton zum Ziel. Dabei wurden weiterführende Forschungsfragen formuliert, u.a. zur Rolle innovativer Schalungen für eine verbesserte Baustellenpraxis bei verzögerter Frühfestigkeit des Frischbetons.

Grundsätzlich kann die CO₂-Reduktion im Beton durch folgende Maßnahmen erfolgen:

- Klinkerreduktion und damit CO₂-Reduktion im Zement
- Reduktion des CO₂-Gehalts in den Zusatzstoffen
- Änderungen im Produktionsprozess
- Optimierung der Transportwege

¹ Definition Standardbeton = Beton mit Bindemittelgehalt nach Ö-Norm B 4710-1

Projekt-Inhalte und Zielsetzungen:

Ziel dieser ebenfalls von der Magistratsabteilung 20 der Stadt Wien initiierten und von der FFG geförderten Fortsetzung des Forschungsprojektes ist es, einen Beitrag zur Etablierung von CO₂-reduziertem - bis hin zu bilanziell klimaneutralem - Beton als neuen Stand der Technik zu leisten und den ganzjährigen Einsatz dieser Betone zu ermöglichen. Gegenständlich wurde dies mit Hilfe eines von Doka GmbH zu entwickelnden Prototypen einer heizbaren Schalung (interner Projektname: IHF Intelligent Heated Formwork) in Kombination mit dem Monitoringsystem der Bauteiltemperatur von Doka (Concremote) überprüft. Um die klimaabhängigen Einflüsse bewerten zu können, wurde eine Versuchsreihe im Sommer und eine im Winter durchgeführt. Die Sommerversuchsreihe wurde im Oktober 2022 mit Unterstützung der Magistratsabteilung 20 der Stadt Wien und unter Erbringung erheblicher Eigenleistung der beteiligten Unternehmen des Forschungskonsortiums erfolgreich abgeschlossen. Gegenstand des vorliegenden Endberichtes ist nun die Dokumentation der Durchführung und der Erkenntnisse aus dem Wissenszuwachs der entscheidenden Winterversuchsreihe mit heizbarer Schalung.

Methodische Vorgehensweise:

12 Versuchsbauteile, davon 6 in einer heizbaren Schalung und 6 in einer konventionellen Schalung, wurden hergestellt, bei der Einstellung der Umgebungstemperatur auf -5 °C in Kühlcontainern gelagert und anschließend einem Prüfkonzept unterzogen. Die Versuchsanordnung wurde auf sechs Kühlcontainer aufgeteilt, um von Witterung und Außentemperaturschwankungen unabhängige, kontrollierte Bedingungen gewährleisten zu können. So konnte das für die Region annehmbar ungünstigste Szenario von Klimabedingungen mit konstant tiefen Durchschnittstemperaturen unter 0 °C geschaffen werden. Alle Bauteile wurden mithilfe des Betonmonitoringsystems Concremote von Doka GmbH hinsichtlich ihrer Temperaturentwicklung überwacht, um so zu jedem Zeitpunkt auf ihre Festigkeitsentwicklung schließen zu können. Außerdem wurden die Betone normkonform laborüberwacht: Würfeldruckfestigkeiten und Spaltzugfestigkeiten sowie E-Modul an Zylindern und Karbonatisierungseindringtiefe.

Die Wandelemente verblieben bis zum Erreichen der Ausschalfestigkeit in den (beheizten) Schalungen. Die Deckenelemente wurden einseitig beheizt und lt. Norm nachbehandelt. Aufgrund der konstant tiefen Umgebungstemperaturen in den Containern mussten in der Schutzzeit als auch nach Erreichen der Schutzzeit entsprechende Maßnahmen entsprechend normativer Vorgaben ergriffen werden.

Ergebnisse:

Die Ergebnisse aus dem Winterversuch sind zukunftsweisend: die heizbare Schalung von Doka ist in der Lage, Bauteile in ihrer Frühfestigkeitsentwicklung auch bei Minustemperaturen ausreichend zu unterstützen. Bei allen Bauteilen konnte nach 28 Tagen die normativ erforderliche Bemessungsfestig-

keit erreicht werden. Eine heizbare Schalung ist demnach in der Lage, die Hydratation von CO₂-reduziertem Beton mit geringerer Eigenwärmeentwicklung bei niedrigen Außentemperaturen entscheidend zu unterstützen, um sowohl eine Kompensation der verzögerten Frühfestigkeitsentwicklung zu ermöglichen als auch energieoptimiert den Schutz des jungen Betons bei Temperaturen unter 3 °C gemäß ÖN B 4710-1 bzw. ONR 23339 zu gewährleisten. Auch bei konstanten Umgebungstemperaturen von -5 °C konnten in den Bauteilen in heizbarer Schalung Bauteiltemperaturen von deutlich über 10 °C (doppelseitige Schalung (Wände)) resp. etwa 10 °C (einseitige Schalung (Decken)) aufrechterhalten werden. Insbesondere ermöglicht die heizbare Schalung auch bei Temperaturen unter 0 °C eine gleichwertige Frühfestigkeitsentwicklung für CO₂-reduzierten Beton, selbst unter schwierigsten Umgebungsbedingungen. Der energetische Aufwand, der für die heizbare Schalung erforderlich ist, reduziert die CO₂-Einsparung bei der CO₂-reduzierten Rezeptur um etwa die Hälfte und bei der CO₂-reduzierten Rezeptur inkl. technischem Kohlenstoff lediglich um etwa ein Siebtel.

Der CO₂-Abdruck der strombeheizten Schalung² verringert die CO₂-Reduktion der Betonrezepturen im vorliegenden Winterversuch um ca. 10 % des gesamten „Embedded Carbons“, also des Treibhauspotenzials (GWP) in Relation zum regionalen Referenzbeton.

Schlussfolgerungen & Ausblick:

Die Ergebnisse der Versuchsreihe schaffen eine wichtige Perspektive auf einen branchenweiten Einsatz von CO₂-reduziertem und bilanziell klimaneutralem Beton. Dies bedeutet die Möglichkeit einer Etablierung von Klimaschutzzielen mit Performance-Beton als neuen Stand der Technik ohne Mindestbindemittelgehalt. Basierend auf den Monatsmitteltemperaturen unter 5 °C der letzten Jahrzehnte erscheint für die Metropolregion Wien eine punktuelle Anwendung beheizter Schalungen an ca. 40-50 Tagen im Jahr zielführend.

Insbesondere die CO₂-reduzierten Rezepturen mit Beigabe von technischem Kohlenstoff sind auch trotz beheizter Schalung potenziell in der Lage, Beton bilanziell klimaneutral zu machen, da die Schalungsheizung nur einen Bruchteil der CO₂-Reduktion verringert.

Das Forschungsprojekt hatte nicht zur Aufgabe, die notwendigen betontechnologischen Untersuchungen für die Beigaben von großen Mengen technischen Kohlenstoffs durchzuführen. Diese Untersuchungen sind essenziell und finden derzeit vielerorts bereits statt. Mit der *Ökobilanz heizbarer Schalung für CO₂-reduzierten Beton* ist jedenfalls das Ziel einer Dekarbonisierung von Beton für die Baupraxis perspektivisch greifbar gemacht.

² Bei einer Heizleistung von 300 - 450 W/m² und Umgebungstemperaturen zw. -5 °C und 0 °C im Versuchsaufbau.

2 Abstract

Motivation and Research Question:

Clinker-reduced concrete mixtures have lower CO₂ emissions than standard concretes³. The delayed early strength development of CO₂-reduced concrete - reduced carbon concrete (RCC) - due to the lower binder content poses a challenge, particularly at low outside temperatures. This lack of energy at the beginning of the hardening phase can be compensated for by a.o. heatable formwork. Yet heating the formwork with electricity does consume energy, further contributing to CO₂ emissions. Therefore, the life cycle assessment of heatable formwork to support CO₂-reduced concretes is key to evaluating the sustainability of innovative RCC formulations. The following research question can be addressed as follows: How can the life cycle assessment of heatable formwork to support CO₂-reduced concretes be evaluated and to what extent does this influence the sustainability of innovative concrete mix designs?

Current Situation/Status Quo:

The previous research project RCC – Reduced Carbon Concrete (GZ 2020-0.657.535), which was co-initiated by the City of Vienna, Department 20 (Energy Planning) in 2020, aimed to research the use of CO₂-reduced concrete on construction sites. During this research project further research questions were formulated, including the role of innovative formwork for improved construction site practice with delayed early strength of the fresh concrete.

Generally, CO₂-reduction in concrete can be achieved by

- reducing clinker or CO₂ in the cement,
- reducing the CO₂-content in the cementitious additions,
- changing the production process,
- optimizing transport routes.

Project Content and Objectives:

The aim of this continuation of the research project, also initiated by the Municipal Department 20 of the City of Vienna and funded by the FFG, is to contribute to the establishment of CO₂-reduced – and even climate-neutral – concrete as the new state of the art and to enable the year-round use of these concretes. This was tested on the construction site with the support of a prototype of heated

³ Definition of standard concrete = concretes with (minimum) binder content acc. to Ö-Norm B 4710-1 (standard concrete does not necessarily have to have only the minimum binder content; see Holcim concrete mixture)

formwork which was developed by Doka GmbH (internal project name: IHF Intelligent Heated Formwork) in combination with Doka's component temperature monitoring system (Concremote). In order to evaluate climate-dependent influences, two series of tests were carried out – one in summer and one in winter. The summer test provided reference values for the success-sensitive winter test. The summer test series was successfully completed in October 2022 with the support of the City of Vienna, Department 20 and with considerable in-kind contribution from the participating consortium partners. This final report documents the implementation and the findings of the crucial winter test series with heatable formwork.

Methodical Approach:

12 concrete elements, 6 of them in a heatable moulds and 6 in a conventional moulds, were produced, stored in cooling containers at an ambient temperature of -5 °C and then subjected to a test concept. The test was carried out in six modular cold storages to ensure controlled conditions independent of weather and external temperature fluctuations. This allowed for the creation of the least favorable climate scenario for the region, with constantly low average temperatures below 0 °C. The wall elements remained in the (heated) formwork until stripping strength was reached. The slab elements were heated on one side and post-treated according to normative specifications. Due to the constantly low ambient temperatures in the modular storages, appropriate measures had to be taken during the protection period and after the protection period had been reached in accordance with normative specifications.

Results:

The results from the winter experiment are promising: the heatable formwork from Doka is able to provide adequate support for the early strength development of concrete elements even at sub-zero temperatures. Ultimately, after 28 days the required strength was achieved for all concrete elements. Thus, heatable formwork is able to decisively support the hydration of binder-reduced concrete with lower heat development at low outside temperatures, enabling compensation for the delayed early strength development as well as to ensure the energy-optimized protection of the young concrete at temperatures below 3 °C according to ÖN B 4710-1 and ONR 23339 respectively. Even at constant ambient temperatures of -5 °C, temperatures of well over 10 °C (double-sided formwork (walls)) or around 10 °C (single-sided formwork (ceilings)) could be maintained in the concrete elements in the heated formwork. In particular, the heatable formwork enables an equivalent early strength development for CO₂-reduced concrete even at temperatures below 0 °C, even under the most difficult environmental conditions. The energy input required for the heatable formwork reduces the recipe-related CO₂ savings for the CO₂-reduced concrete mixture by around half and for the CO₂-reduced concrete mixture including technical carbon by only around a seventh.

The CO₂ footprint of the electrically heated formwork reduces the CO₂-reduction of the concrete mixtures in the present winter test by about 10% of the total "embedded carbon" (the global warming potential (GWP)) in relation to the regional reference concrete.

Conclusion & Outlook:

The results from the experiment create an important perspective for the industry-wide use of CO₂-reduced and climate-neutral concrete. This means the possibility of establishing climate protection targets with performance concrete as the new state of the art without a minimum binder content. Based on the average monthly temperatures below 5 °C in recent decades, the selective use of heated formwork on approx. 40-50 days a year appears to be appropriate for the Vienna metropolitan region.

In particular, the CO₂-reduced concrete mixtures with the addition of technical carbon are potentially capable of making concrete climate-neutral in terms of its carbon footprint, even when using heated formwork, as the heating of the formwork only reduces the CO₂-reduction by a fraction.

The research project did not have the task of carrying out the necessary concrete technology tests for the addition of large quantities of technical carbon. These investigations are essential and are already being carried out in many places. In any case, with the life cycle assessment of heatable formwork for CO₂-reduced concrete, the goal of decarbonizing concrete for construction practice is now within reach.

3 Projekinhalt

3.1 Ausgangslage

Ausgangspunkt des Projektes sind europaweite Bemühungen einer Dekarbonisierung der Bauwirtschaft, die unweigerlich mit einer Ökologisierung des meistverwendeten Baustoffes verbunden sind: Beton. Perspektivisch wird hierbei ausgelotet, inwieweit das Bauwerk als CO₂-Senke zur Klimaregeneration beitragen kann.

Technologisch sind dabei folgende Ansätze zu unterscheiden:

- Zemente mit reduziertem Klinkeranteil
- Betone mit reduziertem Zementanteil
- Betonzusatzstoffe als CO₂-Senke
- Alternative Bindemittel

Das vorangegangene Forschungsprojekt Reduced Carbon Concrete (RCC) hatte die Erforschung des Baustelleneinsatzes von CO₂-reduziertem Performance-Beton durch klinkerreduzierte Bindemittel zum Ziel. Dabei wurden Rezepturen mit geringerem Bindemittelanteil, als nach deskriptivem Ansatz lt. ÖN B 4710-1 normativ erforderlich, erforscht. Ziel war es den Nachweis über das Konzept der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit, das Performance-Konzept zu erbringen und dieses unterstützend in die Praxis zu überführen.

Beton mit einem klinkerreduzierten, geringeren Bindemittelgehalt im Vergleich zu Standardbeton wird aufgrund seiner gleichwertigen Leistungsfähigkeit auch Performance-Beton genannt. Das Performance-Konzept überwindet die branchenübliche Anwendung des deskriptiven Konzeptes gemäß ÖNORM B 4710-1, „Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton“. Der dort beschriebene deskriptive Ansatz gibt für Expositionsklassen von Beton aus Erfahrungswerten resultierend einen Mindestbindemittelgehalt und einen maximalen W/B Wert (Verhältnis von Wasser zu Bindemittel) vor. Dem gegenüber steht das Konzept der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit. Grundlage hierfür bildet neben der ÖN B 4710-1, die ONR 23339 „Regeln für die Umsetzung des Konzepts der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit“. Erst durch die Nachweisführung der gleichwertigen Leistungsfähigkeit gemäß ONR 23339 ist das Erfordernis eines anrechenbaren Mindestbindemittelgehalts hinfällig, sodass CO₂-reduzierter Performance-Beton als zugelassener Baustoff zur Anwendung kommen kann. Sowohl im vorangegangenen Projekt RCC als auch im gegenständlichen Projekt RCC2+ wurden experimentelle Untersuchungen an **Performance-Betonen** durchgeführt (s. Tab. 1).

| Klassifizierung der Betone im RCC2 Projekt | | |
|---|---|--|
| CO ₂ -Referenzwert | CO ₂ -reduziert | |
| Standardbeton ¹ (Bindemittelgehalt lt. Ö-Norm B 4710-1) | Beton mit klinkerreduziertem Zement (Mindestbindemittelgehalt lt. Ö-Norm B 4710-1) | Performance-Beton (unterschreitet Mindestbindemittelgehalt lt. Ö-Norm B 4710-1 → Nachweis der Gleichwertigkeit lt. ONR 23339) |
| Rezeptur Regionaler Referenzbeton (Holcim Österreich GmbH) | nicht Gegenstand des Forschungsprojekts RCC2 | <ul style="list-style-type: none"> • Rezeptur RCC2 (Wopfinger GmbH) • Rezeptur RCC2+ (Transportbeton GmbH) |

Tab. 1: Klassifizierung CO₂-reduzierter Beton zu Referenzbeton im Forschungsprojekt RCC2 (in Klammer sind die Hersteller der jeweiligen Rezepturen für die Versuchsreihen angeführt)

Das Forschungsprojekt RCC kam zu dem Ergebnis, dass erwartungsgemäß die Frühfestigkeitsentwicklung eines Performance-Betons aufgrund der Reduktion des Bindemittelanteils vor allem im Winterfall temperaturbedingt verlangsamt ist. Eine verringerte Frühfestigkeit bedingt längere Schalzeiten und unter Umständen einen erhöhten Bedarf an Schalungsmaterial auf der Baustelle sowie eine verlängerte Nachbehandlung, was insgesamt zu Bauzeitverlängerung und erheblichen Mehrkosten führen kann.

Aus den Ergebnissen der Baustellenversuche entwickelte das Konsortium des Projekts RCC eine Maßnahmenmatrix für Wände und Decken zu Schalzeiten sowie zu Methode und Dauer der Nachbehandlungsarten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur (s. Tab. 2).

| 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 f _{ck} Concremote Simulation für 28 N/mm ² : 30°C = 5,9 d 25°C = 7,1 d 20°C = 8,5 d | (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 | abdecken mit hellem kaschiertem Vlies (kein Feuchthalten notwendig, situativ) | 4 d | sämtliche Schalungen | Zeitpunkt nach Angaben Messungen Concremote → 80 % der f _{ck} Concremote Simulation für 28 N/mm ² : 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 kaschiertem Vlies | 6 d | sämtliche Schalungen | Zeitpunkt nach Angaben Messungen Concremote → 80 % der f _{ck} Concremote Simulation für 28 N/mm ² : 12°C = 12,8 d 5°C = 20,1 d | (1) Verdunstungsschutz + (2) abdecken mit hellem kaschiertem Vlies | 6 d | |
| 0 - 5 °C ^(*) | Holzschalung | 72 h | abdecken mit 2 Lagen kaschiertem Vlies | 7 d | sämtliche Schalungen | Zeitpunkt nach Angaben Messungen Concremote → 80 % der f _{ck} Concremote Simulation für 28 N/mm ² : 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 | | | | |
| Bei unterschreiten der angegebenen Ausschallfristen ist durch eine Erhärtungsprüfung nachzuweisen, dass der Beton eine Druckfestigkeit von mindestens 3,0 N/mm ² erreicht hat. ^(*) Abfall der Betontemperatur ≤ 0,3 °C/Std., gemessen im Bereich der geringsten Bauteilabmessung + Gradient der Betontemperatur < 0,7 K/cm. 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). | | | | | 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). | | | | |

Tab. 2: Maßnahmen-Matrix als Ergebnis des vorangegangenen Projekts RCC

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurden drei konkrete weiterführende Forschungsfragen für das RCC2 Projekt formuliert:

1. Kann innovative Schalung die Schalzeit für RCC verkürzen?
2. Kann innovative Schalung die Nachbehandlung von RCC ersetzen?
3. Bis wohin kann innovative Schalung die Grenzen der CO₂-Reduktion für RCC erweitern?

Das Konsortium einigte sich auf ein weiterführendes gemeinsames Vorgehen in erweitertem Kreis. Mit den Unternehmen Doka GmbH, Holcim Österreich GmbH, Transportbeton GesmbH & Co KG und CarStorCon Technologies GmbH sind einerseits repräsentative Expert:innen der österreichischen Betonbranche, die gemeinsam an der Umsetzung der normativen Grundlage für Performance-Beton (ONR 23339) arbeiten wie auch ein Unternehmen, das Technologien zum langfristigen Passivieren von technischem Kohlenstoff entwickelt, im Konsortium vertreten.

Aufbauend auf dem Forschungsprojekt RCC wurden für das vorliegende Projekt RCC2 folgende Ziele festgehalten:

- Ausloten der möglichen Reduktion der grauen Energie von Beton und der möglichen Kompensation der THG-Emissionen durch CO₂-bindende Zusatzstoffe.
- CO₂-reduzierte Rezepturen für Versuchsreihen auf der Baustelle auf Basis von Vorversuchen im Labor.
- Ermöglichung des Einsatzes von Performance-Beton bei Tagesmitteltemperaturen unter 5 °C.
- Entwicklung verschiedener Prototypen von Heizschalungselementen, möglicherweise in Interaktion mit Produktlösungen, wie dem Monitoringsystem Concremote (Doka).
- Rezepturen und Referenzwerte für den kritischen Winterversuch werden im Sommer(versuch) ermittelt.
- Optimierung kurzer Ausschulfristen mittels beheizter Schalung.
- Heizschalung für Wandelemente als Ersatz für Nachbehandlung.
- Ökobilanz einer von Doka neu zu entwickelnden beheizbaren Betonschalung für verschiedene Rezepturen von Performance-Beton.
- Detailliertes messtechnisches und bautechnisches Konzept für den Einsatz beheizter Schalung auf der Baustelle für verschiedene Bauteile (Decken, Wände).
- Anwendung von verschiedenen firmenspezifischen Bindemittlersatzstoffen für CO₂-reduzierten Beton (Reduktion des Klinkeranteils).

3.2 Vorgangsweise

Der Einsatz von beheizter Schalung, mit dem Ziel der verbesserten Frühfestigkeitsentwicklung von Performance-Beton, bedarf elektrischer Energie. Im Forschungsprojekt wurde in den einzelnen Versuchsreihen die jeweilige Höhe des Stromverbrauchs erfasst. Mit den gesammelten Daten wurde in der Ökobilanzierung ermittelt, in welchem Verhältnis die Emissionen aus dem Energiebedarf der Heizschalung bei mittleren Umgebungstemperaturen von -5 °C bis 0 °C zur Einsparung von CO₂ durch Performance-Rezepturen stehen. Für die Ökobilanzierung der Heizung wurden dabei Emissionsfaktoren des österreichischen Strommixes herangezogen.

Neben der Reduktion von Klinker wurde auch der Einsatz von technischem Kohlenstoff als CO₂-Senke im Beton untersucht. Im aktuellen 6. Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) der 2. Arbeitsgruppe wird der Begriff *biochar* (Biopflanzkohle) im Zusammenhang mit *CDR*, also *carbon dioxide removal* insgesamt 203-mal genannt. Wesentlich ist aber, dass Biopflanzkohle aus Sicht des IPCC als CO₂-Senke das bei weitem größte ökonomische Potenzial hat. Der IPCC-Bericht verweist auf die bereits jetzt schon höchsten, negativen Break-Even-Kosten von *biochar* im Vergleich mit allen anderen Carbon Capture Technologien. Das bedeutet, dass für die Profitabilität

des Geschäftsmodells *biochar* keine zusätzlichen Maßnahmen, wie CO₂-Bepreisung oder Steuern erforderlich sind.⁴ Damit ist es wahrscheinlich, dass technischer Kohlenstoff aus emissionsnegativer Strom- und Wärmegegewinnung auch Teil der am schnellsten zu implementierenden CO₂-Senken sein wird.

Folgender Versuchsablauf wurde gewählt:

1. September 2022: Labortestungen der jeweiligen Betonhersteller zur Erprobung von Rezepturen für die Baustellenversuche.
2. Oktober 2022: Sommersversuch - Betonierarbeiten mit den zuvor im Labor getesteten Rezepturen, um den Sommerfall großtechnisch zu erproben.
3. November 2022 bis April 2023: Konzeption der Versuchsabfolge, Adaptierung der Rezepturen im Labor, Planung der Schalungsanordnung, Bauteilstatik und Logistikanforderungen entsprechend verfügbarer Hebefahrzeuge.
4. Mai 2023: Winterversuch - Betonierarbeiten in Kühlcontainern mit den zuvor im Labor getesteten und im Sommersversuch erprobten Rezepturen, um den Winterfall großtechnisch zu erproben; Begünstigung der Frühfestigkeitsentwicklung durch Einsatz beheizter Schalung.
5. Mai-August 2023: Auswertung der Messergebnisse und Bohrkernentnahmen über einen Zeitraum von mehreren Monaten.
6. September-Oktober 2023: Diskussion der Ergebnisse und Fehlerquellen.

3.2.1 Grundlagen für den Winterversuch

Im Sommersversuch wurde bewusst im Grenzbereich des Möglichen einer klimaneutralen Betonrezeptur ein Scheitern der ausreichenden Festigkeitsentwicklung nach 28 Tagen von Bauteilen in Kauf genommen. Im Winterversuch wurde mit zunehmender Komplexität der Fokus auf die Wirksamkeit einer heizbaren Schalung gelegt, um gesicherte Erkenntnisse erzielen zu können. Grundlage für die Winterversuche waren die Referenzwerte der Sommerreihe mit folgender Erkenntnis:

- Bei Durchschnittstemperaturen (Tag/Nacht) von ca. 14,5 °C hatten alle Wandbauteile die erforderlichen Festigkeiten zum Ausschalen nach 24 Stunden erreicht.
- Die Bemessungsfestigkeit, die 28 Tage-Festigkeit, wurde bei allen Probestauteilen erreicht.

Aufbauend auf den Zielen aus dem Sommersversuch waren die Ziele des Winterversuchs:

- Optimierung der Rezepturen aus dem Sommersversuch durch intensive Laborversuche mit und ohne technischen Kohlenstoff; insbesondere die Rezepturen mit technischem Kohlenstoff waren problematisch infolge des hohen Wasseranspruchs.
- Einsatz von verschiedenen Betonzusatzstoffen für CO₂-reduzierten Beton für Sommer- und Wintereinsatz.
- Erprobung einer heizbaren Betonschalung für verschiedene Rezepturen von Performance-Beton für den Einsatz in der Praxis.

⁴ IPCC, *Climate Change 2022, Mitigation of Climate Change*, S. 643, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf

- Ökobilanz einer heizbaren Schalung auf Basis der von Doka entwickelten Produkte für Wand und Decke.
- Optimierung hinsichtlich kurzer Ausschulfristen mittels beheizter Schalung.
- Detailliertes messtechnisches und bautechnisches Konzept für den Einsatz beheizter Schalung auf der Baustelle für verschiedene Bauteile (Decken, Wände).
- Erprobung der definierten Maßnahmen der ONR 23339 für Performance-Betone bei tiefen Temperaturen und Beurteilung der Wirksamkeit sowie der Anwendung der beheizten Schalung als praxisrelevante Möglichkeit energieeffizienter Umsetzung der Vorgaben.

3.2.1.1 Laborversuche

Die Rezepturen für RCC2 und RCC2+ (mit technischem Kohlenstoff) aus dem Sommersversuch wurden infolge der gewonnenen Erkenntnisse für den Winterversuch weiter optimiert. So gab es z.B. bei der Rezeptur mit technischem Kohlenstoff Anpassungen des Wasserbindemittelwertes, da der RCC2+ Beton im Sommersversuch die erforderlichen Festigkeiten nach 28 Tagen teilweise nicht erreicht hatte. Die Rezepturen mit technischem Kohlenstoff für Decke und Wand waren im Sommersversuch zäh plastisch und somit schwer zu verarbeiten.

Aus den Vorversuchen mit verschiedenen Zementsorten im Labor zeigte sich, dass die Verwendung von CEM II/A-S 42,5R für die RCC2+ Rezeptur am geeignetsten war. Darüber hinaus musste der Anteil an Zement geringfügig angehoben werden, um die entsprechende Performance zu erreichen. Von der im Sommersversuch definierten Zielsetzung, für die RCC2+ Rezeptur Netto-Null CO₂-Emissionen zu erreichen, wurde also für den Winterversuch Abstand genommen. Die Gefahr der Praxisuntauglichkeit, die mit der ambitionierten Rezeptur im Sommer schon sichtbar wurde, sollte im Winterversuch nicht noch weiter herausgefordert werden. Parallel zur Erprobung der Rezepturen sollte festgestellt werden, ob die heizbare Schalung die Frühfestigkeitsentwicklung bei Temperaturen unter 0 °C überhaupt ausreichend unterstützen kann.

3.3 Winterversuch

3.3.1 Versuchsvorbereitung

Im Vorfeld des Winterversuchs fanden erste Vorversuche auf dem Werksgelände der Doka GmbH statt. Ziel war die Überprüfung der im Vorfeld von Doka entwickelten heizbaren Schalung. Die Vorversuche wurden zunächst mit konventionellen Betonrezepturen durchgeführt. Der Nachweis der Praktikabilität dieser heizbaren Schalung ist unabhängig von der Rezeptur ein Erfordernis für Regionen mit regelmäßig auftretenden kalten Witterungsbedingungen. Daher wurden die Vorversuche in einem Kühlcontainer durchgeführt, um konstant niedrige Temperaturen unter 0 °C zu gewährleisten. Die positiven Erfahrungen mit diesem Test-Setup waren Anlass, die Testreihe innovativer Rezepturen mit dieser Versuchsanordnung umzusetzen und somit zu gewährleisten, dass konstante Temperaturen unter 0 °C auf die Dauer der Versuchsdurchführung vorgehalten werden können. Somit soll nachgewiesen werden können, dass die neuen Rezepturen ganzjährig einsetzbar sind.

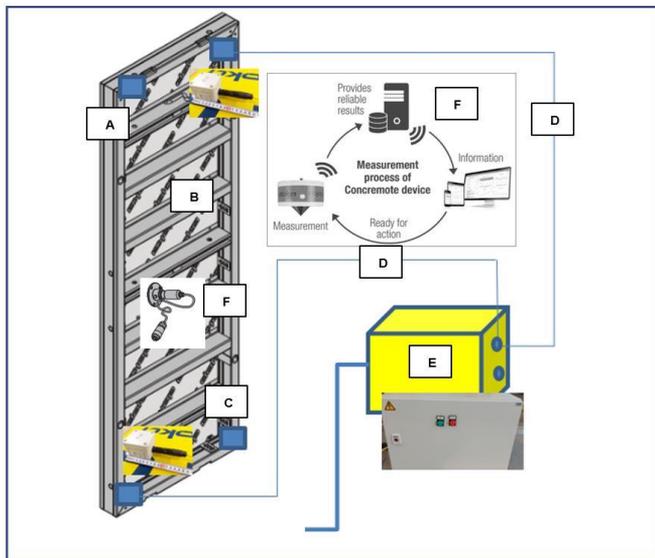
Aufgrund der Logistik und der erforderlichen Absicherung der Kühlcontainer wurde davon Abstand genommen, den Versuch so wie im Sommer auf einer Baustelle durchzuführen. Das gesicherte Gelände des Fertigteilwerks der Mischek Systembau GmbH in 2201 Gerasdorf mit befestigten Außenanlagen und lokal verfügbarem Personal bot sich hierfür an.

Analog zum Sommersversuch wurden auch im Winterversuch 3 Rezepturen in jeweils der Festigkeitsklasse C25/30 (Wand) und C30/37 (Decke) getestet. Wie in Kapitel 3.2.1.1 Laborversuche beschrieben, waren die Rezepturen nach eingehenden Labortests für den Winterversuch angepasst worden:

- Standardbeton (interne Bezeichnung: regionaler Referenzbeton),
- CO₂-reduzierte Betonrezeptur nach dem Performance-Konzept (interne Bezeichnung: RCC2),
- CO₂-reduzierte Betonrezeptur nach dem Performance-Konzept mit technischem Kohlenstoff (interne Bezeichnung: RCC2+).

3.3.1.1 Heizschalung (Prototyp für Versuche) und Concremote

Im Winterversuch wurde die von Doka GmbH entwickelte heizbare Schalung getestet. Die Heiztemperatur wird von Doka Concremote überwacht. Drei Schalungssysteme wurden mit einer beheizbaren Platte ausgestattet. Die Hauptkomponenten sind die Systemrahmen (Framax Xlife bzw. Framax Xlife plus oder Dokadek 30), die Schalungsplatten, die Stromversorgung und die Kabel zum Anschluss der Stromversorgungen an die Systemplatten. Die Anschlusskästen werden mit den Sperrholzelementen verschraubt (s. Abb. 1).



A Framax Xlife-Element (Framax Xlife plus-Element oder Dokadek-Element)

B Sperrholz

C Anschlusskästen, befestigt an den Sperrholzplatten

D Anschlusskabel (eines für die obere, eines für die untere Position)

E Schaltschrank mit CEE 7/4 (Schuko) Stecker

F Concremate System

Abb. 1: Hauptkomponenten eines Doka Heizschalungssystems

A - Schalungssystem

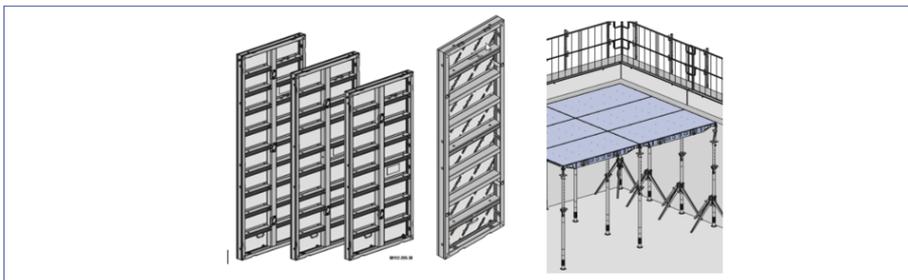


Abb. 2: Bauteil A - das Schalungssystem

B - beheizbare Sperrholzplatte

In die Platte ist eine Leiterschicht eingelegt. Die Befestigung der Sperrholzplatte in den Stahlrahmen erfolgt als Framax Xlife, Framax Xlife plus, Dokadek 30 Schalung. Das Schalungselement hat die gleichen Eigenschaften (Einsatz, Haltbarkeit) wie das Standard-Xlife-Element. In der Anwendung unterscheiden sich beheizbare und nicht-beheizbare Sperrholzplatten nicht. Unterscheiden können Anwender:innen aufgrund der Boxen und der Anschlüsse.

C - Anschlussbox



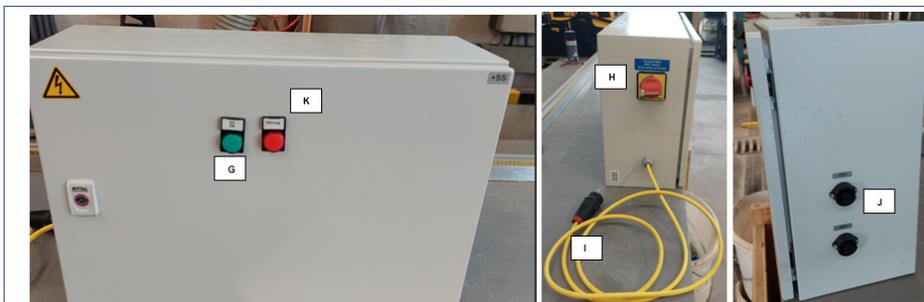
Abb. 3: Komponente C - die Anschlussbox

D - Anschlusskabel



Abb. 4: Komponente D - das Anschlusskabel

E - Stromversorgung / der Schaltschrank



G Power ON "grünes" Licht

H Hauptschalter ON/OFF

I Netzkabel mit CEE 7/4 Stecker (240 VAC, 16A)

J Stecker für 2 Schalungsplatten (entweder eine oder zwei können angeschlossen und betrieben werden)

K Problem "ROTEN" Licht

Abb. 5: Komponente E - die Stromversorgung / der Schaltschrank

3.3.2 Versuchsaufbau

Mit jeder der drei Rezepturen wurde jeweils ein Wand- und ein Decken-Bauteil in Standardschalung und in heizbarer Schalung ausgeführt. Insgesamt wurden somit 12 Bauteile hergestellt. Die Wände wurden in der Schalung von zwei Seiten, die Decken nur von unten beheizt.

Die Versuchsbauteile wurden an die Abmessungen der Standardschalungen von Doka angepasst. Die Wandbauteile hatten die Maße der Doka Framax Xlife Elemente: 1,35 x 2,70 und eine Bauteildicke von 0,18 m (s. Abb. 6). Die Deckenbauteile bestanden aus einem Doka Dek Element mit den Maßen: 1,22 x 2,44 und hatten eine Bauteildicke von 0,2 m (s. Abb. 10). Die Schalungen jedes Bauteils wurden jeweils mit Concremote Messkabeln mit jeweils 3 Messpunkten ausgestattet, die ein Echtzeit-Monitoring der Bauteiltemperaturen ermöglichten.

3.3.2.1 Wandschalung

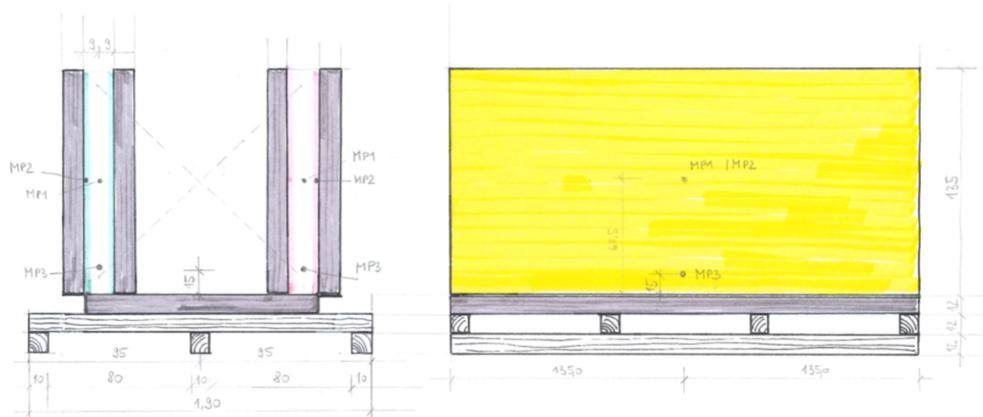


Abb. 6: Skizze Versuchsaufbau Wandschalung inkl. Positionierung der Concremote-Messstellen; links Ansicht Stirnseite, rechts Ansicht Fläche



Abb. 7: Aufbau Wandschalung auf Trägerrost zum Manövrieren und Umheben mit Gabelstapler; links Ansicht Stirnseite, rechts Ansicht Fläche



Abb. 8: Montage Messstellen an der Bewehrungsmatte, Wand

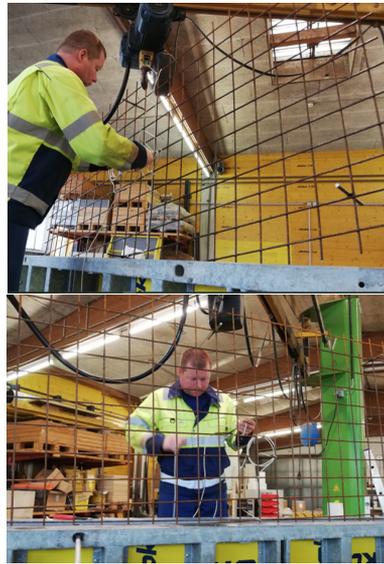


Abb. 9: Montage Messstellen an der Bewehrungsmatte, Wand

3.3.2.2 Deckenschalung

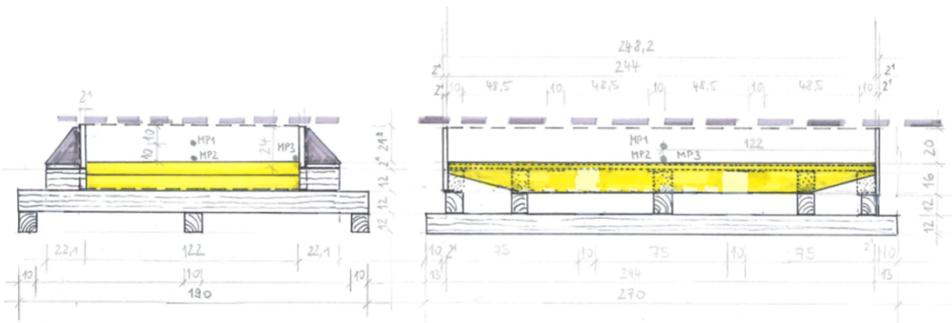


Abb. 10: Skizze Versuchsaufbau Deckenschalung inkl. Positionierung der Concremate-Messstellen; links Ansicht von vorne, rechts Ansicht von der Seite

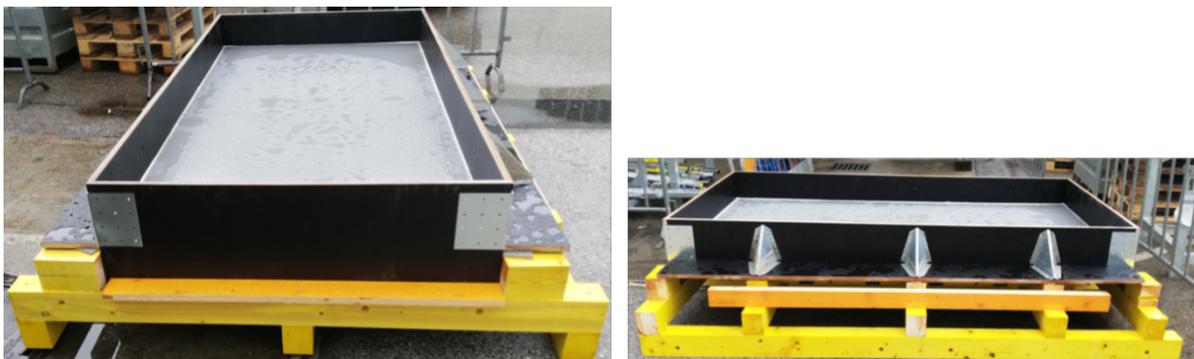


Abb. 11: Beispiel Aufbau Deckenschalung auf Trägerrost zur Möglichkeit des Manövrierens und Umhebens; links Ansicht von vorne, rechts Ansicht von der Seite

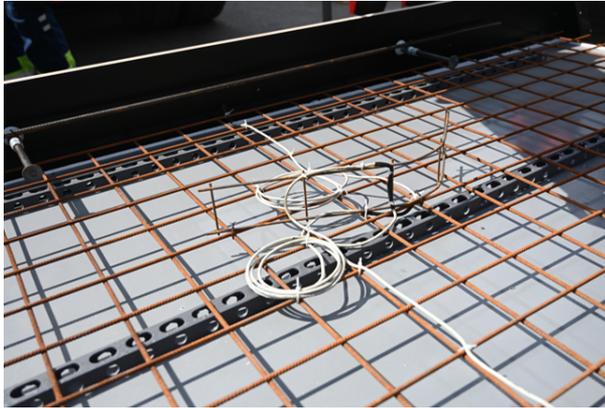


Abb. 12: Messstellen Concremote an Decke

3.3.2.3 Container

Die 12 Bauteile wurden in insgesamt 6 Kühlcontainern gelagert. Die Wandschalungen wurden aus Platzgründen nebeneinander angeordnet, die Deckenelemente hintereinander (s. Abb. 13). In den Containern mit ungerader Nummerierung wurden Deckenbauteile platziert, in denen mit gerader Nummerierung Wandbauteile.

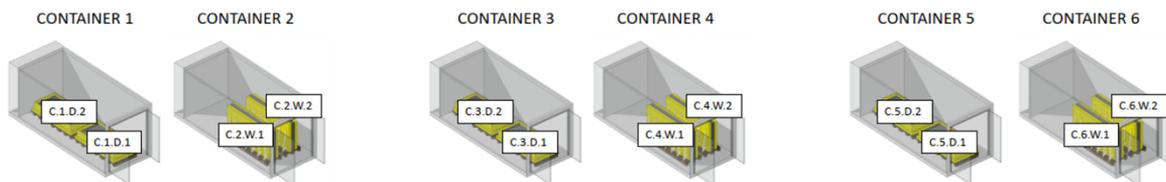


Abb. 13: Versuchsanordnung & Benennung Kühlcontainer/Bauteile Winterversuch RCC2

Der Benennungscode der Bauteile folgte der Containerbezeichnung, um sie den jeweiligen Containern zuordnen zu können:

- C.1.D.1: Container 1, RCC2+ – Transportbeton, beheizte Schalung Doka (Decke)
- C.1.D.2: Container 1, RCC2+ – Transportbeton, Standardschalung Doka (Decke)
- C.2.W.1: Container 2, RCC2+ – Transportbeton, Standardschalung Doka (Wand), unbeheizt
- C.2.W.2: Container 2, RCC2 – Wopfinger, Standardschalung Doka (Wand), unbeheizt
- C.3.D.1: Container 3, RCC2 – Wopfinger, beheizte Schalung Doka (Decke)
- C.3.D.2: Container 3, RCC2 – Wopfinger, Standardschalung Doka (Decke)
- C.4.W.1: Container 4, RCC2+ – Transportbeton, beheizte Schalung Doka (Wand)
- C.4.W.2: Container 4, RCC2 – Wopfinger, beheizte Schalung Doka (Wand)
- C.5.D.1: Container 5, Normalbeton – Holcim, beheizte Schalung Doka (Decke)
- C.5.D.2: Container 5, Normalbeton – Holcim, Standardschalung Doka (Decke)
- C.6.W.1: Container 6, Normalbeton – Holcim, beheizte Schalung Doka (Wand)
- C.6.W.2: Container 6, Normalbeton – Holcim, Standardschalung Doka (Wand), unbeheizt

Bis auf die Container 2 und 4 wurde in jedem Container die gleiche Betonrezeptur jeweils in Standardschalung und heizbarer Schalung gegossen. In Container 2 befanden sich nur Bauteile in Standardschalung, allerdings mit unterschiedlichen Betonmischungen (RCC2+ und RCC2). In Container 4 nur die heizbaren Wandschalungen mit den Betonmischungen von Container 2 (RCC2+ und RCC2). Dieser Aufbau wurde gewählt, um die Kühlcontainertemperatur bei Bedarf anpassen zu können. Zusätzlich konnte so ein Effekt der heizbaren Schalung auf die Standardschalung ausgeschlossen werden. Abb. 14 zeigt die Aufstellung der Container auf dem Gelände der Mischek Systembau GmbH.



Abb. 14: Container auf dem Versuchsgelände

3.3.3 Versuchsdurchführung

3.3.3.1 Vorbereitung und Betonage

Der Versuch startete am 04.05.2023 mit der Anlieferung der Schalungen und Lastverteilerplatten zum Auslegen in den Kühlcontainern am Werksgelände der Mischek Systembau GmbH. Sowohl die Wandschalungen als auch die Deckenschalungen waren bereits vorab von Doka mit Bewehrungsmatten & Sensoren (Concremote) ausgestattet worden.

Am 08.05.2023 wurden die 6 Kühlcontainer geliefert und auf -5 °C gekühlt. Die Betonage erfolgte am 10.05.2023. Die Schalungen waren bereits am Vortag in den heruntergekühlten Containern gelagert worden, um winterliche Baustellenbedingungen zu simulieren. Die Steuerungselemente an den heizbaren Schalungen wurden etwa eine Stunde vor Betonage des jeweiligen Bauteils eingeschaltet. Die Energiezufuhr der beheizten Decken betrug 450 Watt, die beheizten Wände wurden von beiden Seiten jeweils mit einer Leistung von 300 Watt beheizt.

Die Anlieferung der Transportbetone erfolgte in geplantem 30-Minuten-Takt. Nach dem Befüllen der jeweiligen Schalungen wurden sowohl die Decken als auch die Wände mittels Rüttler verdichtet (s. Abb. 16).

Die Decken wurden nach dem Verdichten abgezogen (s. Abb. 17). Auf die Decken aus Normalbeton wurde gemäß ÖN B 4710-1 als Nachbehandlung ein Verdunstungsschutz mit 2-maligem Sprühauftrag lt. Herstellerangabe und auf die Decken RCC2 und RCC+ gemäß ONR 23339 ein Verdunstungsschutz mit zweimaligem Sprühauftrag mit der 1,5-fachen Menge lt. Herstellerangabe aufgetragen (s. Abb. 18). Anschließend wurden alle Decken mittels Stapler in den jeweiligen Kühlcontainer gehoben und mit einer Lage PP-Folie und Winterdämmmatte abgedeckt (s. Abb. 19 / Abb. 20).



Abb. 15: Schritt 1 = Einfüllen des RCC2+-Betrns in Deckenschalung



Abb. 16: Schritt 2 = Verdichten des RCC2+-Betrns mittels Rüttler



Abb. 17: Schritt 3 = Abziehen der Decke RCC2+



Abb. 18: Schritt 4 = Aufbringen des Verdunstungsschutzes an der Decke RCC2+



Abb. 19: Schritt 5 = Auflegen PP-Folie



Abb. 20: Schritt 6 = Auflegen Winterschutzmatte

Die unbeheizten Wandschalungen wurden nach dem Einheben in die entsprechenden Container mit Winterschutzmatten verpackt (s. Abb. 22). Die beheizten Wandschalungen wurden nicht abgedeckt, da ein Vorversuch gezeigt hat, dass hierdurch keine Verbesserung bezüglich Rückhaltewärme erreicht wurde.



Abb. 21: Einfüllen Beton in Wandschalung



Abb. 22: Abdecken unbeheizte Wandschalungen mit Winterbaumatte

3.3.3.2 Prüfprogramm

Um die Festigkeiten der Betonrezepturen im Labor zu messen, wurden Probekörper hergestellt (s. Abb. 23 & Abb. 24). Zur Prüfung der Festigkeitsentwicklung und der Karbonatisierungsrate der Bauteile im Container wurden für das Prüfprogramm nach der Betonage in regelmäßigen Abständen Bohrkern entnommen. Die Prüfungen am Bohrkern wurden im Labor durchgeführt.



Abb. 23: Herstellen Probekörper



Abb. 24: Herstellen Probekörper

3.3.3.3 Ausschalen

Sämtliche Wände in beheizter Schalung wurden bis zum Ausschalzeitpunkt mit einer Leistung von jeweils 300 Watt beheizt. Die Wände C.6.W.1 und C.6.W.2 (Normalbeton beheizt und Normalbeton unbeheizt) konnten ca. 20 Std. nach Betonage ausgeschalt werden. Die Wände C.4.W.1 sowie C.4.W.2 (RCC2 beheizt und RCC2+ beheizt) konnten auch schon nach ca. 24 Std. ausgeschalt werden (s. Abb. 26). Nach dem Ausschalen wurden die Wände gemäß ONR 23339 Tab. 7 mit einer Lage Winterbaumatte eingepackt. Die Wände C.2.W.1 und C.2.W.2 (RCC2 unbeheizt und RCC2+ unbeheizt) konnten erst nach 45 Stunden ausgeschalt werden, da es durch die kalte Temperatur zu einem Hydratationsstopp gekommen war und die Zielfestigkeit für das Ausschalen erst nach zusätzlicher Energiezufuhr erreicht werden konnte.

3.3.3.4 Maßnahmen nach der Betonage

Aufgrund der kalten Temperaturen in den Kühlcontainern sank die Oberflächentemperatur der unbeheizten Bauteile (Decken und Wände) bereits einige Stunden nach Betonage auf knapp 3 °C bzw. darunter. Gemäß der normativen Vorgabe wurden Maßnahmen ergriffen, wie das Anheben der Umgebungstemperatur in einzelnen Containern bzw. das Beheizen ursprünglich unbeheizter Bauteile mittels heizbarer Schalung, um zu verhindern, dass die Temperatur des jungen Betons in der Schutzzeit (Zeit bis zum Erreichen der Gefrierbeständigkeit von 5 N/mm²) unter 3 °C absinkt und dieser dadurch Frostschäden erleidet.

Nach der Betonage mussten somit an den darauffolgenden Tagen gemäß der normativen Vorgabe einige Maßnahmen getroffen werden, um einen Hydratationsstopp und Frostschäden am jungen Beton zu verhindern. Daraus resultiert eine programmatische Verfälschung bzw. eine erschwerte Interpretation der Messergebnisse. Durch zusätzliche direkte bzw. indirekte Energiezufuhr musste das Auffrieren und damit die Zerstörung des Betons nach dem Ausschalen, insbesondere der nicht beheizten Bauteile, verhindert werden. Folgend wird zwischen Maßnahmen, die in der so genannten Schutzzeit und Maßnahmen, die nach Erreichen der Schutzzeit ergriffen worden sind, unterschieden. Die Schutzzeit ist die Zeit bis zum Erreichen der Gefrierbeständigkeit des Betons, die mit einer Druckfestigkeit von $5,0 \text{ N/mm}^2$ erreicht wird. Die Oberflächentemperatur des Betonbauteils darf während dieser Zeit nicht unter $+3 \text{ °C}$ fallen.

Maßnahmen in der Schutzzeit

Ab 11.05.2023, einem Tag nach Betonage, wurden die **unbeheizten Decken** ebenfalls beheizt, da deren Betontemperatur an der Oberfläche in der Schutzzeit unter 3 °C abzusinken drohte (s. „Start Frostschutz-Heizen“ in Abb. 25). Dies war möglich, da auch diese Decken sicherheitshalber in heizbaren Schalungen gegossen worden waren. Wäre diese Maßnahme des ‚Frostschutz-Heizens‘ nicht ergriffen worden, wäre der junge Beton durchgefroren und hätte irreparablen Schaden erlitten. Alle Decken wurden bis zum Vormittag des 15.05.2023 beheizt.

Der **Container 2** wurde am 11.05.2023 von -5 °C auf $+3 \text{ °C}$ Zieltemperatur umgestellt, da die Betontemperatur an der Oberfläche der unbeheizten Wände RCC2+ und RCC2 in der Schutzzeit unter 3 °C abzusinken drohte (s. blaue Linie in Abb. 26). Auch diese normative Schutzmaßnahme war unumgänglich, um das Durchfrieren/Auffrieren und die Beschädigung des jungen Betons zu verhindern.

Maßnahmen nach Erreichen der Schutzzeit

Aufgrund der konstant tiefen Umgebungstemperaturen in den Kühlcontainern von unter 0 °C kam es einige Tage nach Betonage bei allen Bauteilen zu einem Hydratationsstopp. Die Schutzzeit und somit auch die Gefrierbeständigkeit ($> 5 \text{ N/mm}^2$) war zwar bei allen Bauteilen erreicht, die weitere Entwicklung der Festigkeit war laut Kalibrierung (s. Kapitel 4.1.2 Festigkeitsentwicklung Concrete) jedoch nicht erkennbar, da alle Bauteiltemperaturen unter 0 °C abgesunken waren. Aus diesem Grund wurden die Containertemperaturen ab 16.05.2023 zunächst auf 0 °C , dann auf $+1 \text{ °C}$ und final auf $+2 \text{ °C}$ gestellt, um die Festigkeitsentwicklung weiter fortschreiten zu lassen.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des experimentellen Forschungsprojekts dargestellt und interpretiert. Auf Basis der Versuchsergebnisse aus dem experimentellen Forschungsprojekt wird eine Ökobilanz erstellt, die einen Überblick über die CO₂-Emissionen der verschiedenen Betonrezepturen gibt. Dies verdeutlicht, inwieweit sich der Energiebedarf der beheizbaren Schalung in der Ökobilanz niederschlägt. Zudem wird der Beitrag des Projekts zu den Gesamtzielen des Schwerpunkts „Klimaneutrale Stadt“ in Relation gesetzt.

4.1 Messergebnisse

Bei den Ergebnissen der Messungen werden 5 Datensätze unterschieden:

1. Messdaten der Temperaturentwicklung in/an den Bauteilen mittels Messsystem Concremote von Doka,
2. Messdaten der Festigkeitsentwicklung aus dem Monitoring der Bauteiltemperatur, die über die Laborreferenzwerte errechnet wurden (Kalibrierung Concremote),
3. Würfeldruckfestigkeiten, die an Probewürfeln im Labor ermittelt wurden,
4. Bohrkernfestigkeiten der Versuchsbauteile, die im Labor ermittelt wurden,
5. Karbonatisierungsrate an Bohrkernen aus den Versuchsbauteilen, die im Labor ermittelt wurden,
6. Ausziehversuche an den Deckenbauteilen.

Zusätzlich zu den Messungen/Prüfungen im Versuchszeitraum hat sich das Konsortium darauf geeinigt, auch Langzeitprüfungen durchzuführen. Somit sollen 2024, 2028, 2033 und 2043 weitere Prüfungen der Festbetoneigenschaften stattfinden (1, 5, 10, 20 Jahre nach Versuchsdurchführung).

4.1.1 Messungen der Temperaturentwicklung in/an den Versuchsbauteilen

Die Messergebnisse variieren je nach relativer Lage des Messpunkts im Bauteil. Um den für die Hydratation ungünstigsten Fall abzubilden, werden die Temperaturen an den kältesten Stellen betrachtet. Die Messung der Temperatur im Bauteil ermöglichte einen Rückschluss auf die Festigkeit des Betons, da zuvor eine Kalibrierung mittels Concremote von Doka vorgenommen wurde. Concremote erfasst mithilfe von Sensoren die Temperatur und ermittelt die Druckfestigkeit der Betonstruktur mittels der Reifemethode nach De Vree (s. Punkt 4.1.2 Festigkeitsentwicklung Concremote). Durch das Echtzeit-Monitoring der Temperatur im Beton konnten somit auch rechtzeitig Maßnahmen getroffen werden, den jungen Beton zu schützen und die Hydratation zu ermöglichen (s. Kapitel 3.3.3 Versuchsdurchführung). Die Abb. 25 und Abb. 26 zeigen den durch die Messsensoren von Concremote gemessenen Temperaturverlauf an den Bauteilen während der Versuchsreihe. In den Abbildungen ist zu erkennen, wann das Beheizen der Schalungen gestartet respektive

beendet wurde, bzw. wann die Wände ausgeschalt wurden. Zwischen dem 10. und 24. Mai wurden sowohl die Temperaturen an/in den Decken- und Wandbauteilen sowie die Umgebungstemperatur in den Kühlcontainern (s. blaue Linie in Abb. 25 & Abb. 26) gemessen.

Die Bauteile wurden an einigen Tagen aus den Containern gehoben, da dem Prüfplan entsprechend Bohrkern durch FA MPA Hartl entnommen wurden. Diese temporären Anstiege der Temperaturen sind in den Abbildungen als Spitzen bzw. Ausschläge zu erkennen. Um die Ergebnisse nicht zu verfälschen, wurde darauf geachtet, dass die Bauteile nur möglichst kurz außerhalb der Kühlcontainer waren.

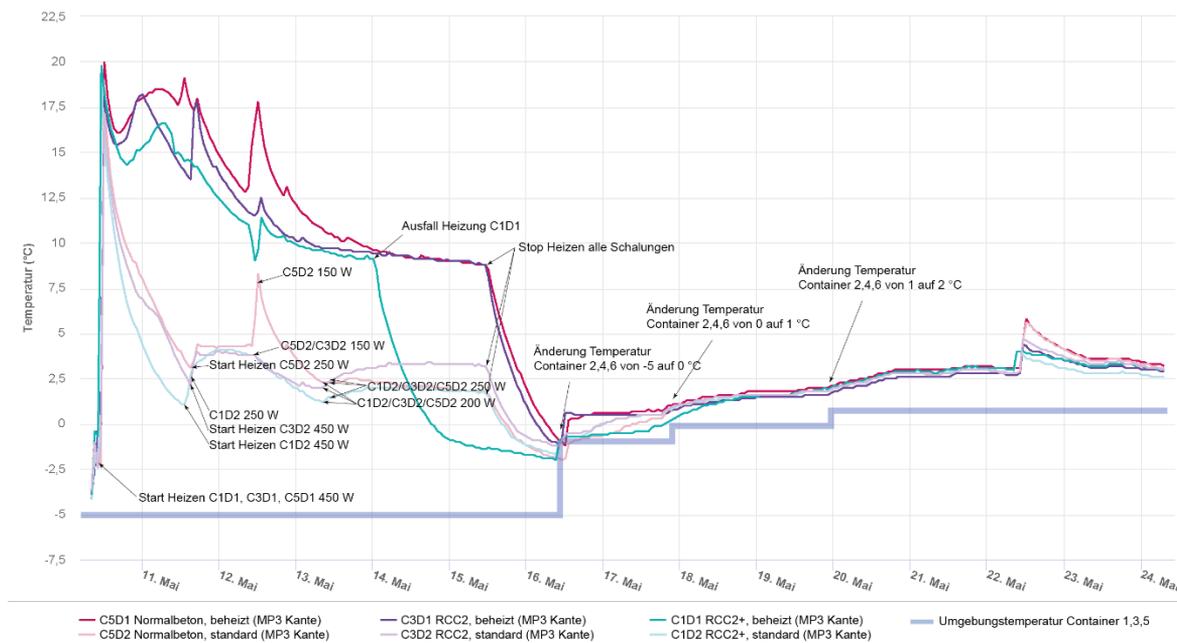


Abb. 25: Temperaturverlauf Decken beheizt und unbeheizt mit Umgebungstemperatur im Kühlcontainer

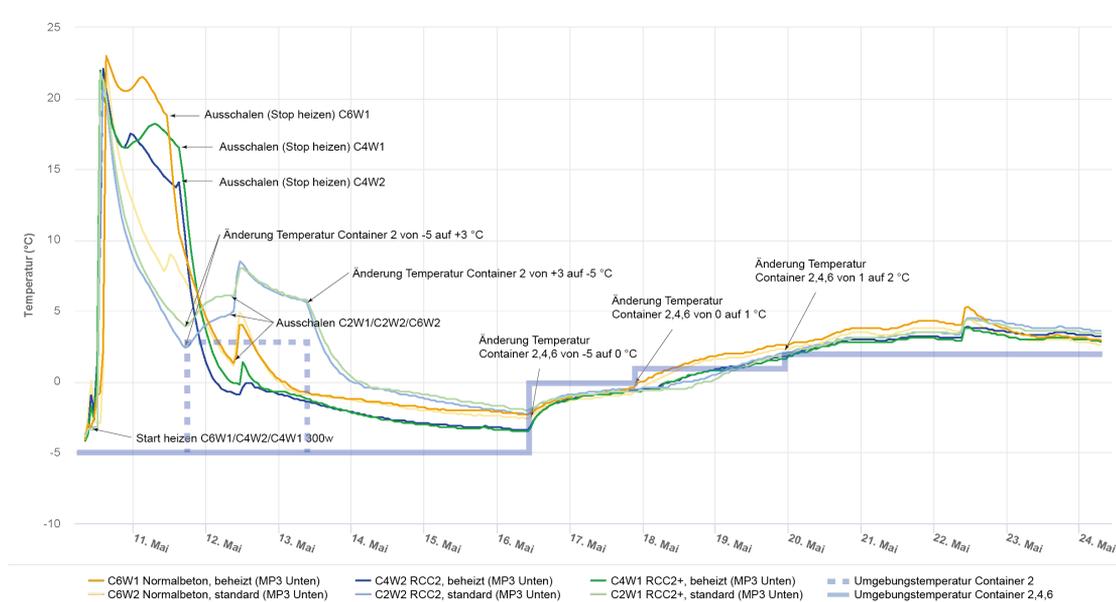


Abb. 26: Temperaturverlauf Wände beheizt und unbeheizt mit Umgebungstemperatur im Kühlcontainer

An beiden Abbildungen ist zu erkennen, dass die Temperaturen der Bauteile in unbeheizter Schalung nach Betonage und Einstellen in die Kühlcontainer rapide absanken. Es ist auch zu erkennen, welche Effekte die zuvor beschriebenen Maßnahmen innerhalb der Schutzzeit und nach Erreichen der Schutzzeit auf die Temperaturentwicklung im jeweiligen Bauteil hatten.

4.1.2 Festigkeitsentwicklung Concremote

Die Festigkeitsentwicklung korreliert mit der Bauteiltemperatur. Die Bauteiltemperatur kann über Concremote-Messfühler auf einem Online-Portal in Echtzeit überprüft werden. Für die Auswertung der Messergebnisse wurde jeweils der Kontrollpunkt mit der niedrigsten Bauteiltemperatur von mehreren Temperaturfühlern ausgewertet.

Für die Ermittlung der Betonfestigkeit anhand des Reifegrades wird das Verfahren nach De Vree angewendet. Die Reifemethode de Vree zur Schätzung der Druckfestigkeit von Frühbeton ist seit den 1970er Jahren bekannt und wird von vielen internationalen Normen akzeptiert (z.B. NEN 5970; EN 13670; ÖNORM B 4710-1; DIN 1045-3)⁵.

Um die Reifemethode anzuwenden, ist es notwendig, eine Kalibrierung der im Projekt verwendeten Betonmischung durchzuführen. Das Ergebnis der Betonkalibrierung ist die Kalibrierungskurve. Die Kalibrierung erfolgt normalerweise im Labor mit Standard-Betonproben (mindestens fünf Würfel). Der gesamte Vorgang beginnt mit dem Gießen der Würfel. Nach dem Gießen und Verdichten aller benötigten Würfel wird die Temperatur der Betonproben kontinuierlich gemessen. Die Reife wird basierend auf der Temperaturentwicklung berechnet. Ein Zeitplan für die Prüfung einzelner Würfel wird erstellt, damit jeder Würfel in einem anderen Alter getestet wird. Die Würfel werden gemäß dem erstellten Prüfplan einzeln getestet. Jedes Testergebnis wird dem berechneten Reifewert zugeordnet. Basierend auf allen Ergebnissen wird die Kalibrierungskurve erstellt. In Bezug auf mögliche Abweichungen wird ein Sicherheitsfaktor in die Berechnung eingeführt. Dann wird die erstellte Kurve gemäß dem Sicherheitsfaktor nach unten verschoben. Projekte in der gängigen Praxis verwenden Sicherheitsfaktoren von 2,5 - 3 MPa, die gemäß der Norm NEN 5970 berechnet werden. Während der Messungen wird die Temperaturentwicklung der gegossenen Betonstruktur aufgezeichnet. Basierend auf den gemessenen Daten und der Kalibrierungskurve wird schlussendlich die Druckfestigkeit berechnet.

Die Unterschiede der Frühfestigkeitsentwicklung des Betons lassen sich deutlich an der Temperaturentwicklung ablesen (s. 4.1.1 Messungen der Temperaturentwicklung in/an den Versuchsbau- teilen). Die heizbare Schalung zeigt den gewünschten Effekt und macht eine Ausschaltbarkeit nach 24 Std. bei einer Mindestfestigkeit von 3 N/mm² möglich. Die Temperaturmessung erfolgte ohne

⁵ NEN 5970. *Determination of the compressive strength development of early age concrete on the basis of the weighted maturity*. 1. Netherlands: Dutch Standard, 2001.

Unterbrechung, sodass die Bauteiltemperatur bis zum Ende der Versuchsdurchführung im Monitoring weiter überwacht werden konnte.

4.1.3 Würfeldruckfestigkeiten der Probekörper

Die Festbetonprüfungen der Rezepturen stellen im Vergleich zu den Festbetonprüfungen am Bauteil die Festigkeitsentwicklung unter Normlagerung unabhängig von den Außentemperaturen dar. Sie bieten Einblick in das Ausmaß der verzögerten Frühfestigkeitsentwicklung, können aber **keinerlei Aussage über die Wirkung heizbarer Schalung treffen, da die Würfelproben in Probekörperformen gegossen wurden.**

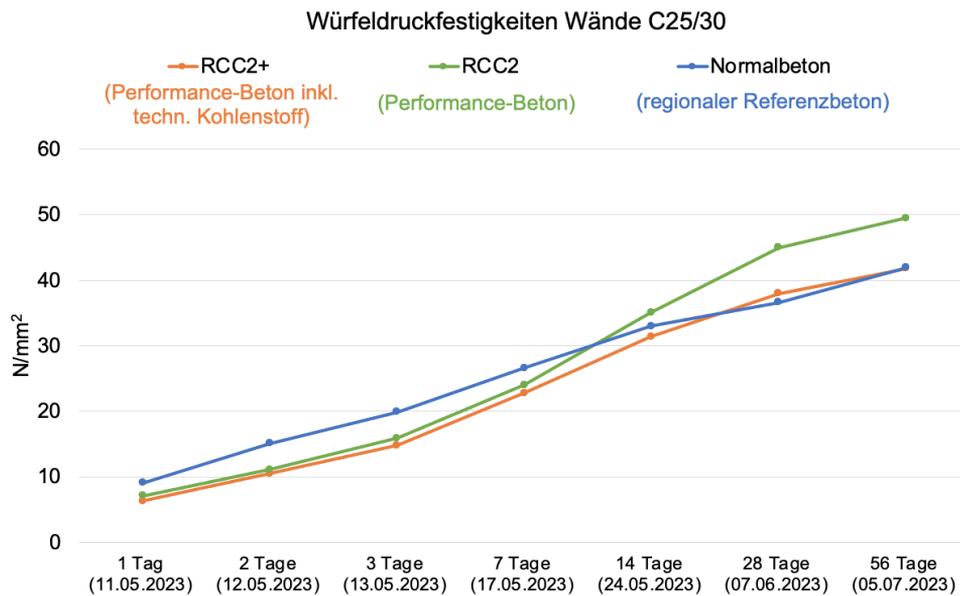


Abb. 27: Würfeldruckfestigkeit C25/30 für Wände (bei Lagerung im Labor unter Optimalbedingungen)

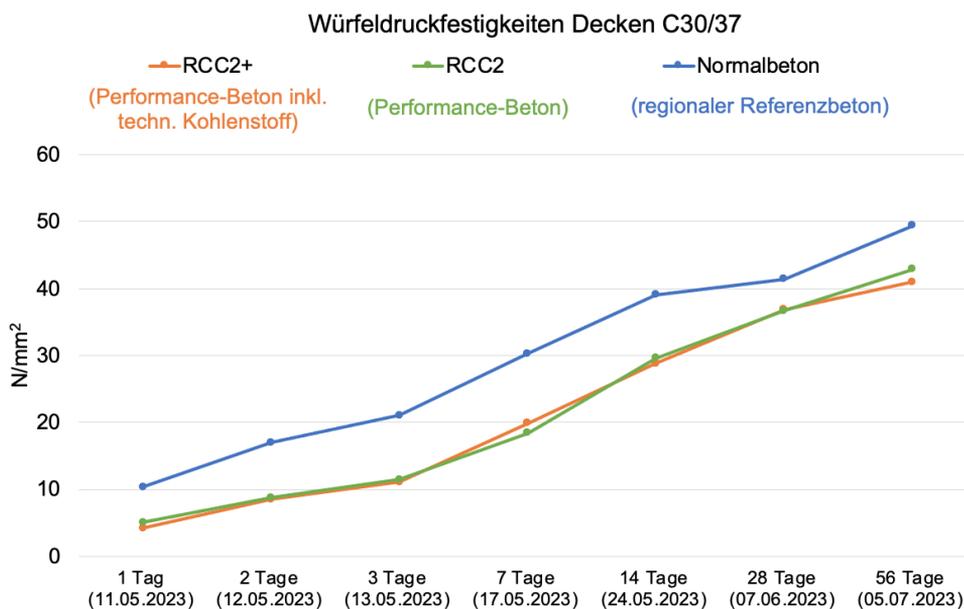


Abb. 28: Würfeldruckfestigkeit C30/37 für Decken (bei Lagerung im Labor unter Optimalbedingungen)

4.1.4 Bohrkernfestigkeiten Versuchsbauteile

Die Festbetonprüfungen an den Versuchsbauteilen wurden anhand von regelmäßigen Bohrkernentnahmen durch FA MPA Hartl auf der Baustelle vollzogen. Diese Festigkeitsprüfungen waren entscheidend, um den Einfluss der Außentemperatur bzw. der heizbaren Schalung und der Nachbehandlung zu bestimmen. Zum Schutz der unbeheizten Bauteile vor Auffrieren in der Schutzzeit ($< 5 \text{ N/mm}^2$) mussten einige Versuchsbauteile normgemäß extern beheizt werden, was im Falle von Container 2 am 11.05.2023 durch Erhöhung der Containerzieltemperatur von -5 °C auf $+3 \text{ °C}$ erfolgte. Die Betontemperatur an den Oberflächen der unbeheizten Wände RCC2+ und RCC2 im Container 2 drohte noch in der Schutzzeit bis zum Erreichen der Gefrierbeständigkeit von 5 N/mm^2 unter 3 °C abzusinken.

An allen Bauteilen mit beheizter Schalung (mit Ausnahme von Decke RCC2+) konnten am ersten Tag nach Betonage (11.05.2023) Bohrkerngezoget werden (s. Abb. 29).



Abb. 29: Bohrkernentnahme an Wandbauteilen der Rezeptur RCC (Fotocredits: ROMM ZT)

Bei den übrigen Bauteilen war dies erst ab dem zweiten Tag nach der Betonage (12.05.2023) möglich (s. Abb. 30).

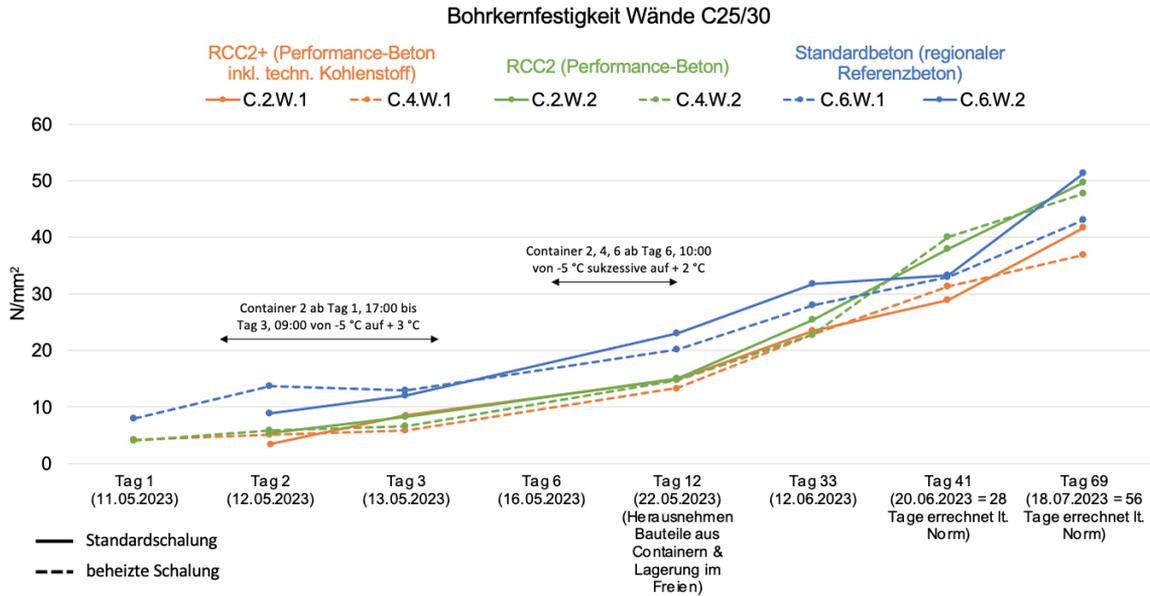


Abb. 30: Festbetonprüfung der Bohrkernefestigkeit C25/30 für Wände beheizt und unbeheizt

Da alle Deckenbauteile in potenziell heizbaren Schalungen waren, wurden bis zum Erreichen der Mindestfestigkeit von 5 N/mm² ab dem 11.05.2023 alle Versuchsbauteile temperiert, um ein Absinken der Betontemperatur an den Oberflächen unter 3 °C in der Schutzzeit und somit eine Schädigung durch Auffrieren zu verhindern. Hier entsteht, ohne Betrachtung der Schutzmaßnahmen, der falsche Eindruck, dass die Standardbetone auch ohne Beheizen eine bessere Festigkeitsentwicklung erreichen würden. Dies muss für die Auswertung der Ergebnisse Berücksichtigung finden. Es wurden daher die Prüfbauteile in der Schutzzeit wie unter echten Baustellenbedingungen durch Heizen vor Zerstörung durch Auffrieren bewahrt. Diese normativ erforderlichen Schutzmaßnahmen wurden nicht in die Ökobilanz einbezogen, da sie nicht spezifisch für die neuen Rezepturen sind. Außerdem würde die heizbare Schalung in diesem Vergleich, klarerweise einen überdeutlichen Vorteil vor der bauüblichen Praxis eines Beheizens des Rohbaus davontragen. Explizit zu erwähnen ist die Tatsache, dass die beheizte Schalung zum Schutz vor dem Auffrieren der Bauteile einen immensen Energieeffizienzvorteil vor der bauüblichen Praxis des Beheizens des Rohbaus mit sich bringt. Der Versuch zeigt hier deutlich auf, dass unter Dauertemperaturen von < 3 °C auch Normalbetone zum Schutz vor Schädigung durch Auffrieren und zur Aufrechterhaltung der Hydratation externe Energiezufuhr benötigen. Im Vergleich ist dies mit der beheizten Schalung, wie im Versuch bewiesen wurde, sehr energieeffizient und CO₂-sparend möglich.

Wie in Abb. 31 ersichtlich, konnten an den Decken in heizbarer Schalung bereits am ersten, bzw. zweiten Tag nach Betonage Bohrkerngezoget werden.

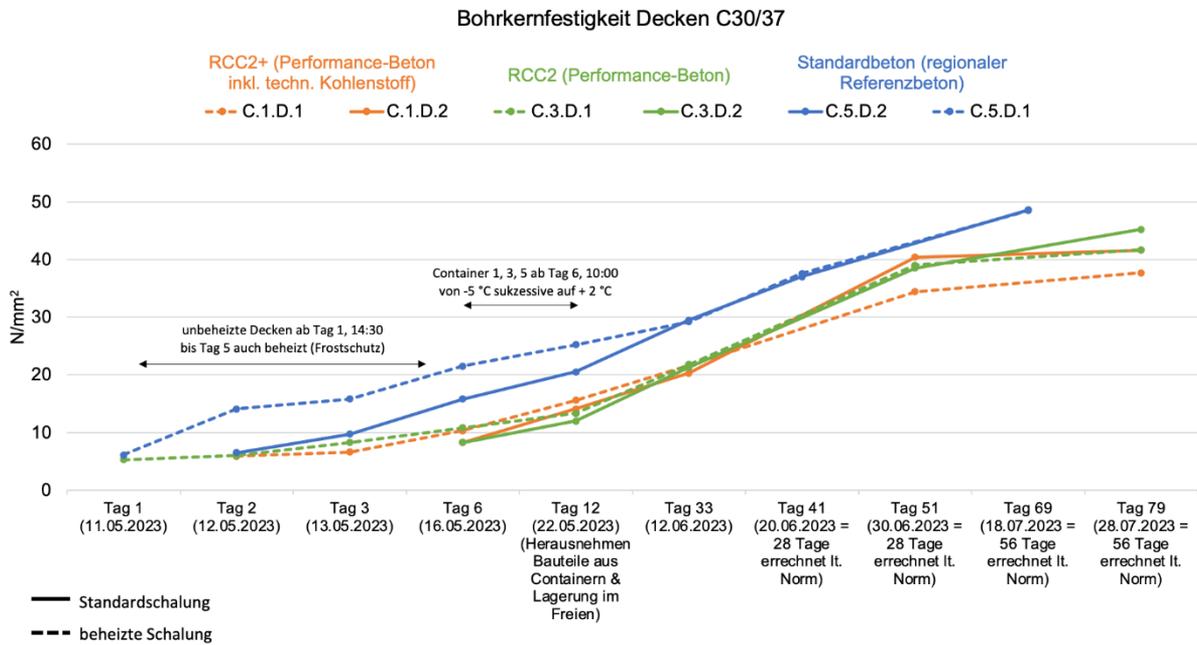


Abb. 31: Festbetonprüfung der Bohrkernfestigkeit C30/37 für Decken beheizt und unbeheizt

Sowohl in Abb. 30 als auch in Abb. 31 sind die Bohrkernfestigkeiten der Bauteile in eigentlich unbeheizter Schalung, z.T. höher als die der Bauteile in beheizter Schalung.

Aufgrund der Maßnahmen zum Schutz vor Frostschäden (Beheizen der Bauteile in unbeheizter Schalung bzw. Einstellung Container auf höhere Umgebungstemperatur) kommt es zu einer Verfälschung der Ergebnisse. Die Festigkeiten der Bauteile in ursprünglich unbeheizter Schalung wären bei Nichtergreifen der Maßnahmen unvermeidlich geringer gewesen.

4.1.5 Karbonatisierungsrate an Bohrkernen

Die Performance-Betone RCC2 und RCC2+ wurden für die Expositionsklassen XC1 ausgelegt. Der Referenzbeton war aber für XC2 ausgelegt und hat daher eine andere Karbonatisierungsgeschwindigkeit (s. Tab. 3). Zurzeit gibt es keine normgemäßen Grenzwerte zur Karbonatisierung von Betonen. Die Performance-Betone haben mit geringerem Zementgehalt auch einen geringeren Calciumhydroxidgehalt und somit chemisch gesehen eine höhere Karbonatisierungsgeschwindigkeit, verhalten sich aber im Bereich der Expositionsklasse XC1 erwartungsgemäß: Der Referenzbeton mit normgemäß höheren Zementgehalt hat automatisch einen höheren Calciumhydroxidgehalt und damit eine geringere Karbonatisierungsgeschwindigkeit, die der höheren Expositionsklasse XC2 entspricht.

| Betonsorte | RCC2+ | | RCC2 | | Normalbeton (regionaler Referenzbeton) | |
|--|---------|---------|---------|---------|--|---------|
| Expositionsklasse | XC1 | | XC1 | | XC2 | |
| Bauteil | C.1.D.2 | C.4.W.1 | C.3.D.2 | C.2.W.2 | C.5.D.2 | C.6.W.1 |
| Karbonatisierungsgeschwindigkeit [mm/(Tag) ^{0,5}] | 2,9 | 2,7 | 2,2 | 2,9 | 1,5 | 1,5 |
| Mittelwert Karbonatisierungsgeschwindigkeit [mm/(Tag) ^{0,5}] | 2,8 | | 2,6 | | 1,6 | |

Tab. 3: Ermittelte Karbonatisierungsgeschwindigkeit an den entnommenen Bohrkernen

4.1.6 Ausziehversuche an Decken

Ebenso wichtig wie eine möglichst kurze Schalzeit ist für den Bauablauf das unbehinderte Versetzen der Schalung. Für das Aufstellen der stehenden Schalung sind Streben als Ausspreizungen erforderlich, die unten in der Decke bzw. Bodenplatte verankert werden. Daher sind Ausziehversuche der Anker wesentlich zur Beurteilung möglicher Bauzeitverzögerungen durch zu geringe Ankerfestigkeiten in den Versuchsrezepturen.

An den auf die Betonage folgenden Tagen wurden deshalb Ausziehversuche mit unterschiedlichen Ankern in den Deckenbauteilen gemacht (s. Abb. 32). Zum Einsatz kamen HSA M10, HSA M12 und HUS M10 Anker. Pro Bauteil wurden für jeden Ankertyp 2 Anker gesetzt. Aufgrund der Bohrlochunterschiede auch in Bezug auf die relative Lage zur vorhandenen Bewehrung bzw. der örtlichen Kornverteilung im Betongefüge differieren die Ergebnisse für den gleichen Ankertyp im gleichen Bauteil mitunter stark.



Abb. 32: Ausziehversuche an einem Deckenbauteil der Rezeptur RCC2+ (Fotocredits: ROMM ZT)

Tab. 4 stellt die Ergebnisse der Ausziehversuche für jedes Deckenbauteil dar. Die gemessenen Ausziehkräfte differieren zwischen 6 kN und 25 kN. Wie auch in der Ankerbemessung über Sicherheitsbeiwerte implementiert, sind die tatsächlichen Ankerwiderstände stark von der Bohrlochqualität, des örtlichen Betongefüges und der relativen Wechselwirkung vorhandener Bewehrung abhängig.

| Rezeptur | | RCC2+ (Performance-Beton mit techn. Kohlenstoff) | | | | RCC2 (Performance-Beton) | | | | Normalbeton (regionaler Referenzbeton) | | | |
|--------------------|---------|---|---------|---------|---------|-----------------------------|---------|---------|---------|--|---------|---------|---------|
| Bauteilbezeichnung | | C.1.D.1 | | C.1.D.2 | | C.3.D.1 | | C.3.D.2 | | C.5.D.1 | | C.5.D.2 | |
| | | Ausziehkraft bis Ausriss in kN | | | | | | | | | | | |
| | | Anker 1 | Anker 2 | Anker 1 | Anker 2 | Anker 1 | Anker 2 | Anker 1 | Anker 2 | Anker 1 | Anker 2 | Anker 1 | Anker 2 |
| Ankertyp | HSA M10 | 25 | 25 | 12 | 10 | 6 | 8 | 15 | 11 | 11 | 12 | 20 | 25 |
| | HSA M12 | 25 | 25 | 17 | 13 | -* | 15 | 12 | 14 | 25 | 25 | 17 | 25 |
| | HUS M10 | 19 | 18 | 20 | 22 | 11 | 17 | 21 | 19 | 7,5 | 20 | 25 | 25 |

-* = Anker konnte nicht gesetzt werden

Tab. 4: Ergebnisse der Ausziehversuche der Anker in den Deckenbauteilen

Die Messergebnisse zeigen neben der Streubreite auch vorhandene Mindestfestigkeiten, die mit dem gewählten System bzw. der erforderlichen Ankerkraft für den jeweiligen Baufortschritt individuell abgestimmt werden müssen.

4.2 Interpretation der Messergebnisse

Das Ergebnis der Forschung lässt sich wie folgt auf den Punkt bringen: Die heizbare Schalung von Doka ist in der Lage, Bauteile in ihrer Frühfestigkeitsentwicklung auch bei Minustemperaturen ausreichend zu unterstützen. Alle Rezepturen in heizbaren Schalungen konnten auch bei einer konstanten Außentemperatur von -5 °C bei doppelseitiger Schalung (Wände) eine Bauteiltemperatur von deutlich über 10 °C und bei einseitiger Schalung (Decken) von etwa 10 °C aufrechterhalten. Nachdem alle Bauteile gefrierbeständig waren, wurden sämtliche Maßnahmen zur Beheizung in den Kühlcontainern eingestellt. Dies löste in Folge einen Hydratationsstopp aus, also einen Stillstand der Festigkeitsentwicklung bei allen Bauteilen gleichermaßen. Erst das Anheben der Versuchstemperatur über die Einstellung der Umgebungstemperatur in den Containern auf letztlich +2 °C führte zu einer Fortsetzung der Festigkeitsentwicklung. Schließlich konnte bei allen Bauteilen nach 28 Tagen die normativ erforderliche Bemessungsfestigkeit erreicht werden. Daher wird festgehalten, dass auch Betonrezepturen mit geringeren Bindemittelanteilen die erforderlichen Festigkeiten erreichen. Insbesondere ermöglicht die heizbare Schalung auch bei Temperaturen unter 0 °C eine gleichwertige Frühfestigkeitsentwicklung für CO₂-reduzierten Beton, selbst unter schwierigsten Umgebungsbedingungen. Die energetischen Aufwände, die für die heizbare Schalung erforderlich sind, sollen im folgenden Kapitel mit den CO₂-Einsparungen der Rezepturen verglichen und ökobilanziert werden.

4.3 Ökobilanzierung

Um die CO₂-Emissionen der unterschiedlichen Betonrezepturen und des Einsatzes einer heizbaren Schalung des Winterversuches bewerten zu können, wurde eine Ökobilanzierung auf Basis der in Österreich im November 2023 bereits als Vorabzug vorliegenden Umweltproduktdeklarationen (EPD) von Zementen der Fa. Holcim Zementwerke GmbH und der Angaben des Umweltbundesamtes zu CO₂-Emissionen des österreichischen Strommix für die Heizleistung durchgeführt. Die im Dezember 2023 erfolgte Veröffentlichung der finalen EPDs der Zementsorten der Holcim Österreich GmbH erforderte keine Änderungen. Branchen-EPDs für Betone einer bestimmten Festigkeitsklasse wie sie in Deutschland vorliegen, gibt es in Österreich nicht. In Österreich werden Rezepturen individuell mittels Ökobilanzierung bewertet, so wie auch in diesem Forschungsprojekt.

4.3.1 Betonrezepturen

Die untersuchten Rezepturen unterscheiden sich vor allem im anrechenbaren Bindemittelanteil, der bei der Rezeptur Normalbeton (regionaler Referenzbeton) C25/30 Wand bei 295 kg/m³ liegt und in den CO₂-reduzierten Rezepturen auf 175 kg/m³ bzw. 187 kg/m³ verringert ist (s. Abb. 33). Ein direkter Vergleich des Zementgehaltes ist aufgrund der unterschiedlichen Klinkergehalte von CEM I (91 % Klinker) und CEM II (77 % Klinker) **in Bezug auf die Umweltwirksamkeit nicht aussagekräftig**. Darüber hinaus wurde einer der beiden CO₂-reduzierten Rezepturen (RCC2+) noch technischer Kohlenstoff zugesetzt: 30 kg/m³ für die Decke und 20 kg/m³ für die Wand.

| Betonhersteller | Perlmooser Beton GmbH | | | | Wopfinger Transportbeton GmbH | | | | Asamer Transportbeton GmbH | | | | | |
|---|-----------------------|-----|------------------|-----|-------------------------------|-------------|----------|-------------|----------------------------|-----------------------------|------------------|-----|------------------|-----|
| | 10.05.23 | | 10.05.23 | | 10.05.23 | | 10.05.23 | | 10.05.23 | | 10.05.23 | | | |
| Zusammensetzung gem. Chargenprotokoll der Hersteller | | | | | | | | | | | | | | |
| Zement | 567 | 283 | 492 | 246 | [kg] / [kg/m ³] | 559 | 140 | 520 | 130 | [kg] / [kg/m ³] | 337 | 169 | 311 | 156 |
| Zementart | CEM II A M 42,5N | | CEM II A M 42,5N | | | CEM I 52,5R | | CEM I 52,5R | | | CEM II A M 42,5R | | CEM II A M 42,5R | |
| Zusatzstoff | 148 | 74 | 121 | 60 | [kg] / [kg/m ³] | 759 | 190 | 680 | 170 | [kg] / [kg/m ³] | 326 | 163 | 288 | 144 |
| Bindemittelgehalt anrechenb | 340 | - | 295 | - | [kg] / [kg/m ³] | 188 | - | 175 | - | [kg] / [kg/m ³] | 202 | 30 | 40 | 20 |
| Aktivkohle | - | - | - | - | [kg] / [kg/m ³] | - | - | - | - | [kg] / [kg/m ³] | 60 | 30 | 40 | 20 |
| RK 1 trocken | 1493 | 746 | 1510 | 755 | [kg] / [kg/m ³] | 2939 | 735 | 3184 | 796 | [kg] / [kg/m ³] | 1498 | 749 | 1559 | 780 |
| RK 1 Feuchtigkeitsgehalt | 6,5 | - | 8,5 | - | [%] | 7,5 | - | 7,1 | - | [%] | 8,0 | - | 8,0 | - |
| RK 2 trocken | 1645 | 823 | 1740 | 870 | [kg] / [kg/m ³] | 2560 | 640 | 2563 | 641 | [kg] / [kg/m ³] | 543 | 272 | 560 | 280 |
| RK 2 Feuchtigkeitsgehalt | 1,0 | - | 1,0 | - | [%] | 0,5 | - | 0,5 | - | [%] | 1,3 | - | 1,3 | - |
| RK 3 trocken | - | - | - | - | [kg] / [kg/m ³] | - | - | - | - | [kg] / [kg/m ³] | 1079 | 540 | 1121 | 561 |
| RK 3 Feuchtigkeitsgehalt | - | - | - | - | [%] | - | - | - | - | [%] | 1,2 | - | 1,2 | - |
| RK 4 trocken | 556 | 278 | 555 | 278 | [kg] / [kg/m ³] | 1821 | 455 | 1800 | 450 | [kg] / [kg/m ³] | 463 | 232 | 473 | 237 |
| RK 4 Feuchtigkeitsgehalt | 1,0 | - | 1,0 | - | [%] | 0,5 | - | 0,5 | - | [%] | 0,8 | - | 0,8 | - |
| Frischwasser | 230 | 115 | 193 | 96 | [kg] / [kg/m ³] | 402 | 101 | 354 | 88 | [kg] / [kg/m ³] | 201 | 101 | 183 | 92 |
| Summe Wasser | 351 | 175 | 346 | 173 | [kg] / [kg/m ³] | 638 | 160 | 595 | 149 | [kg] / [kg/m ³] | 346 | 173 | 333 | 167 |
| Fließmittel | 3 | 2 | 2 | 1 | [kg] / [kg/m ³] | 11 | 3 | 11 | 3 | [kg] / [kg/m ³] | 5 | 3 | 5 | 3 |
| Menge | 2 | 1 | 2 | 1 | [m ³] | 4 | 1 | 4 | 1 | [m ³] | 2 | 1 | 2 | 1 |
| W/B-Wert (bez. auf Wassergehalt lt. Chargenprotokoll) | 0,52 | | 0,59 | | [-] | 0,85 | | 0,85 | | [-] | 0,86 | | 0,89 | |
| W/B-Wert (bez. auf Wassergehalt gemessen) | 0,47 | | 0,56 | | [-] | 0,87 | | 0,95 | | [-] | 0,89 | | 0,95 | |
| W/B _c -Wert (bez. auf Wassergehalt gemessen) | 0,45 | | 0,54 | | [-] | 0,50 | | 0,55 | | [-] | 0,50 | | 0,55 | |

Abb. 33: Übersicht der Betonrezepturen im Winterversuch (s. auch Anhang)

4.3.2 Darstellung Ökobilanzierung

Folgende Module wurden in der berechneten Ökobilanzierung abgebildet:

1. Herstellungsphase (Modul A1-A3)
2. Transport vom Werk zur Baustelle (Modul A4)
3. Zugeführte Energie durch beheizte Schalungen (Modul A5)

4.3.2.1 Herstellungsphase:

Grundlage für die Ökobilanz der Rezepturen sind die Zementanteile, deren Emissionen nach der vorliegenden Umwelt-Produktdeklaration österreichischer Zemente der Holcim Österreich GmbH zur Berechnung herangezogen wurden (s. Anhang). Diese Werte entsprechen einer Ökobilanz der Herstellungsphase A1-A3, von der Wiege bis zum Werkstor. Vereinfachend wurden die Werte des Werkes Mannersdorf der Fa. Holcim Zementwerke GmbH für die Ökobilanz herangezogen.

Die Angaben zu CO₂-Werten der aufbereiteten hydraulisch wirksamen Zusatzstoffe (AHWZ) wurden ebenfalls der Umwelt-Produktdeklaration der Holcim Österreich GmbH entnommen. Die Menge der beigefügten AHWZ wurde von den Betonhersteller:innen angegeben. Die genaue Zusammensetzung der AHWZ muss hier als Betriebsgeheimnis akzeptiert werden.

Durch die Beigabe des Produkts Clim@Add®, einem Zusatzstoff aus technischem Kohlenstoff, der durch die Pyrolyse von vorwiegend regionalem Restholz aus der Forstwirtschaft gewonnen wird, kann das Treibhauspotenzial des Betons bilanziell reduziert werden. Je Kilogramm technischen Kohlenstoffs können 2,9 kg CO₂ gebunden werden (s. Zertifikat im Anhang). Da es sich um ein Nebenprodukt aus der Energieerzeugung in Pyrolysewerken handelt, werden 0,392 kg CO₂ für Transport und Verarbeitung des technischen Kohlenstoffes ökobilanziell in Rechnung gestellt. Der Datensatz zur Berechnung der Transportemissionen wurde über openLCA berechnet (ecoinvent v2.2 & v.3.9.1 Datenbank: kg CO₂/kg [tkm/m³] transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 | Cutoff, U). Somit darf der GWP-Wert des Betons für jedes beigegebene Kilogramm von technischem Kohlenstoff um je 2,508 kg CO₂ reduziert werden. Bei den Wänden wurde 20 kg technischer Kohlenstoff je m³ Beton, bei den Decken 30 kg technischer Kohlenstoff je m³ Beton hinzugefügt.

4.3.2.2 Errichtungsphase:

Das Modul A4 Transport vom Werk zur Baustelle berechnet sich aus den gewählten Transportentfernungen laut EPDs (C25/30: 14,9 km)⁶ bzw. (C30/37: 18,2 km)⁷, der Gesamtmasse eines m³ Betons der jeweiligen Rezeptur und dem Treibhauspotenzial des LKW-Transports (0,1067 kg CO₂/t*km)⁸. Diese Werte werden miteinander multipliziert, um die anfallenden CO₂-Emissionen zu berechnen.

4.3.2.3 Zugeführte Energie

Die beheizte Schalung wurde mit den Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes zum österreichischen Strommix berechnet und in der Ökobilanz im Modul A5 abgebildet. Für die Kalkulation der CO₂-Äquivalente wurde die Laufzeit der elektrischen Heizung der Schalung mit der entsprechenden Watt-Leistung erfasst. Die Decken wurden einseitig, die Wände von beiden Seiten über einen bestimmten Zeitraum beheizt (s. Kapitel 3.3 Winterversuch). Diese Energiemenge wurde mit dem Emissionsfaktor für die Stromaufbringung in Österreich multipliziert. Anschließend wurden die CO₂-Äquivalente auf die Größe der Schalung und somit einen Kubikmeter Beton bezogen. Nicht kalkuliert wurde die Energiemenge, die für das normgemäß zum Schutz vor Frostschäden zwingend erforderliche Heizen der unbeheizten Bauteile im Kühlcontainer notwendig war. Die durch die Herstellung der Schalung verursachten Emissionen wurden, wie in den Standard-EPDs für Beton (Modul A5), nicht berücksichtigt. Dies ist in den deutschen Standard-EPDs für den Beton mit der Abschneideregeln definiert: „3.4 Abschneideregeln [...] Die Umweltlasten aus der Herstellung und Nutzung der Schalung wurden für die Ökobilanzierung der Betonherstellung vernachlässigt. Bei üblichen Einsatzhäufigkeiten von Schalungen liegt die Masse der eingesetzten Ressourcen und der eingesetzten Primärenergie bei unter 1 % der Gesamtwerte für die Betonherstellung.“⁹

⁶ Vgl. Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) UMWELT-PRODUKTDEKLARATION nach ISO 14025 und EN 15804+A1 Beton der Druckfestigkeitsklasse C 25/30, InformationsZentrum Beton, Deutschland, 2018, S. 6.

⁷ Vgl. Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) UMWELT-PRODUKTDEKLARATION nach ISO 14025 und EN 15804+A1 Beton der Druckfestigkeitsklasse C 30/37, InformationsZentrum Beton, Deutschland, 2018, S. 6.

⁸ lt. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=b086b411-019a-4ddc-8fe9-0c264051c24b&version=20.23.050&stock=OBD_2023_1&lang=de

⁹ Vgl. Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) UMWELT-PRODUKTDEKLARATION nach ISO 14025 und EN 15804+A1 Beton der Druckfestigkeitsklasse C 30/37, InformationsZentrum Beton, Deutschland, 2018, S. 5

4.3.3 Ergebnisse der Ökobilanzierung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Ökobilanzierung für die Wände (s. Abb. 34) und Decken (s. Abb. 35) tabellarisch dargestellt.

| Nr. | Ökobilanzierung Modul | Wand C25/30 XC1 | | | | | |
|-----|---|---|-------|-----------------------------------|-------|---|-------|
| | | regionaler Referenzbeton (Holcim Österreich GmbH) | | RCC2 (Wopfinger TB GmbH) | | RCC2+ (inkl. Clim@Add®) (Transportbeton GmbH) | |
| 1 | Zement [kg/m³] | CEM III/A-M S-L 42,5N WT3 | 246 | CEM I 52,5 R | 130 | CEM III/A-S 42,5 R | 156 |
| 2 | AHWZ [kg/m³] | GC | 60 | | 170 | | 144 |
| 3 | AHWZ [kg/m³] | GS | | | | | |
| 4 | AHWZ _{GES} [kg/m³] | | 60 | | 170 | | 144 |
| 5 | Anrechenb. BM | | 295 | | 175 | | 187 |
| 6 | BM _{GES} | | 306 | | 300 | | 320,0 |
| 7 | AHWZ _{GES} /Zement | | 24,4 | | 130,8 | | 92,3 |
| 8 | Anteil AHWZ [%] | | 19,6 | | 56,7 | | 45,0 |
| 9 | Wasser [kg/m³] | | 164 | | 165 | | 177 |
| 10 | WB-Wert | | 0,56 | | 0,95 | | 0,95 |
| 11 | WB _{GES} -Wert | | 0,54 | | 0,55 | | 0,55 |
| 12 | Fließmittel [kg/m³] | | 1,00 | | 2,85 | | 2,62 |
| 13 | CO ₂ /t Zement [kg/t] [kg/m³] | 464 | 114 | 538 | 70 | 464 | 72 |
| 14 | CO ₂ /t AHWZ [kg/t] [kg/m³] | 116 | 7,0 | 116 | 19,7 | 116 | 16,7 |
| 15 | CO ₂ /m³ Zuschläge [kg/m³] | | 4,8 | | 4,9 | | 4,9 |
| 16 | CO ₂ /m³ Beton GWP total [kg/m³] A1-A3 | | 126,0 | | 94,6 | | 94,0 |
| 17 | Clim@Add® [kg/m³] | | | | | | 20,0 |
| 18 | Speicherkapazität CO ₂ /kg Clim@Add® [kg CO ₂ eq/kg] | | | | | | 2,51 |
| 19 | CO ₂ /m³ Beton GWP total [kg/m³] A1-A3 inkl. techn. Kohlenstoff | | | | | | 43,8 |
| 20 | CO ₂ /m³ LKW-Transport Beton von Werk zur Versuchsstelle [kg/m³] | | 3,41 | | 3,47 | | 3,48 |
| 21 | CO ₂ /m³ Beton GWP total [kg/m³] A1-A4 | | 129,4 | | 98,1 | | 47,3 |
| | | Reduktion zu Normalbeton: | | 31,3 kg CO ₂ /m³ 24,2% | | 82,1 kg CO ₂ /m³ 63,4% | |
| 22 | CO ₂ /m³ Energiezufuhr über beheizbare Schalung Strommix AUT [kg/m³] | | 12,40 | | 12,58 | | 12,58 |
| 23 | CO ₂ /m³ Beton GWP total [kg/m³] A1-A5 | | 141,8 | | 110,6 | | 59,9 |
| | | Anteil Schalungsenergiezufuhr | | 8,7% | | 11,4% | |
| | | Reduktion zu Normalbeton unbeheizt: | | 18,7 kg CO ₂ /m³ 14,5% | | 69,5 kg CO ₂ /m³ 53,7% | |

Abb. 34: Ökobilanzen der Betonrezepturen für Wände C25/30 mit und ohne heizbare Schalung

| Nr. | Ökobilanzierung Modul | Decke C30/37 XC1 | | | | | |
|-----|---|---|-------|----------------------------------|--------------|---|--------------|
| | | regionaler Referenzbeton (Holcim Österreich GmbH) | | RCC2 (Wopfinger TB GmbH) | | RCC2+ (inkl. Clim@Add®) (Transportbeton GmbH) | |
| 1 | Zement [kg/m³] | CEM II/A-M S-L 42,5N WT3 | 283 | CEM I 52,5 R | 140 | CEM II/A-S 42,5 R | 169 |
| 2 | AHWZ [kg/m³] | GC | 74 | | 190 | | 163 |
| 3 | AHWZ [kg/m³] | GS | | | | | |
| 4 | AHWZ _{GES} [kg/m³] | | 74 | | 190 | | 163 |
| 5 | Anrechenb. BM | | 340 | | 188 | | 202 |
| 6 | BM _{GES} | | 357 | | 330 | | 362 |
| 7 | AHWZ _{GES} /Zement | | 26,1 | | 135,7 | | 96,4 |
| 8 | Anteil AHWZ [%] | | 20,7 | | 57,6 | | 45,0 |
| 9 | Wasser [kg/m³] | | 160 | | 164 | | 180 |
| 10 | W/B-Wert | | 0,47 | | 0,87 | | 0,89 |
| 11 | W/B _{GES} -Wert | | 0,45 | | 0,50 | | 0,50 |
| 12 | Fließmittel [kg/m³] | | 1,50 | | 2,64 | | 2,69 |
| 13 | CO ₂ /t Zement [kg/t] [kg/m³] | 464 | 131 | 538 | 75 | 464 | 78 |
| 14 | CO ₂ /t AHWZ [kg/t] [kg/m³] | 116 | 8,6 | 116 | 22,0 | 116 | 18,9 |
| 15 | CO ₂ /m³ Zuschläge [kg/m³] | | 4,9 | | 4,8 | | 4,7 |
| 16 | CO ₂ /m³ Beton GWP total [kg/m³] A1-A3 | | 144,7 | | 102,2 | | 102,0 |
| 17 | Clim@Add® [kg/m³] | | | | | | 30,0 |
| 18 | Speicherkapazität CO ₂ /kg Clim@Add® [kg CO ₂ eq/kg] | | | | | | 2,51 |
| 19 | CO ₂ /m³ Beton GWP total [kg/m³] A1-A3 inkl. techn. Kohlenstoff | | | | | | 26,8 |
| 20 | CO ₂ /m³ LKW-Transport Beton von Werk zur Versuchsstelle [kg/m³] | | 4,27 | | 4,19 | | 4,20 |
| 21 | CO ₂ /m³ Beton GWP total [kg/m³] A1-A4 | | 149,0 | | 106,3 | | 31,0 |
| | <i>Reduktion zu Normalbeton:</i> | | | 42,7 kg CO₂/m³ | 28,6% | 118,0 kg CO₂/m³ | 79,2% |
| 22 | CO ₂ /m³ Energiezufuhr über beheizbare Schalung Strommix AUT [kg/m³] | | 18,55 | | 18,67 | | 18,78 |
| 23 | CO ₂ /m³ Beton GWP total [kg/m³] A1-A5 | | 167,6 | | 125,0 | | 49,8 |
| | Anteil Schalungsenergiezufuhr | | 11,1% | | 14,9% | | 37,7% |
| | <i>Reduktion zu Normalbeton unbeheizt:</i> | | | 24,0 kg CO₂/m³ | 16,1% | 99,2 kg CO₂/m³ | 66,6% |

Abb. 35: Ökobilanzen der Betonrezepturen für **Decken C30/37** mit und ohne heizbare Schalung

In Abb. 36 wird die CO₂-Reduktion der im Winterversuch getesteten innovativen Rezepturen im Verhältnis zu einem regionalen Referenzbeton mit Standard-Rezeptur in einer Übersicht dargestellt. Bei den untersuchten Rezepturen sind in der Festigkeitsklasse C25/30 im Vergleich zum Referenzbeton beim RCC2 Einsparungen von 24 % und beim RCC2+ Einsparungen von 63 % der CO₂-Emissionen möglich. Diese Potenziale sind auch nach Abzug der Heizleistung für den „worst case“ mit 14 % und 54 % trotzdem noch deutlich. Beim Beton der Festigkeitsklasse C30/37 sind im Vergleich zum Referenzbeton Einsparungen von 29 % und 79 % der CO₂-Emissionen über den Großteil des Jahres möglich (ohne heizbare Schalung). Auch bei bilanzieller Berücksichtigung der Heizschalung liegen diese Potenziale bei 16 % für RCC2 und über 67 % bei RCC2+.

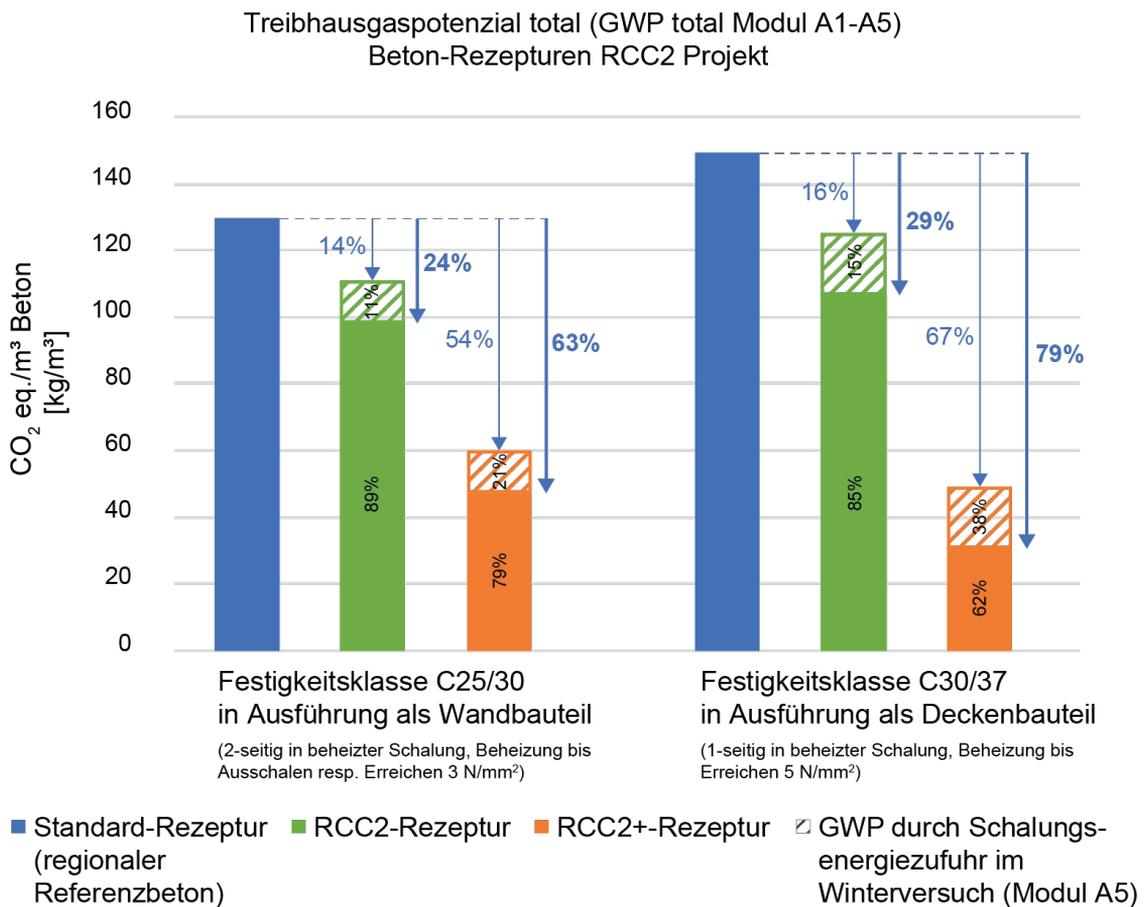


Abb. 36: Vergleich des GWP der drei getesteten Betonrezepturen der Festigkeitsklasse C25/30 und C30/37 inkl. Energiezufuhr durch beheizte Schalung

Der CO₂-Ausstoß der strombeheizten Schalung¹⁰ verringert jedenfalls die CO₂-Reduktion durch die Betonrezepturen in der Größenordnung von 10-13 % des „Embedded Carbons“ von Beton, also des Treibhausgaspotenzials von Beton.

¹⁰ Bei einer Heizleistung von 300 - 450 W/m² und Umgebungstemperaturen zw. -5 °C und 0 °C im Versuchsaufbau.

4.4 Beitrag des Projekts zum Schwerpunkt „Klimaneutrale Stadt“

Der Gebäudesektor ist ein wesentlicher Parameter für die CO₂-Emissionen jeder Stadt. Daher sind wirkungsvolle Maßnahmen, diese zu reduzieren, von großer Bedeutung. Neben den CO₂-Emissionen des Gebäudebetriebs sind die Emissionen für die Baustoffherstellung ein wesentlicher Faktor. Da es zunehmend gelingt, den Betrieb von Gebäuden klimaneutral zu gestalten, fällt der Anteil des „Embedded Carbon“ der Primärkonstruktion, das sind ca. ein Drittel der baulichen Aufwände (s. Abb. 37), immer mehr ins Gewicht.

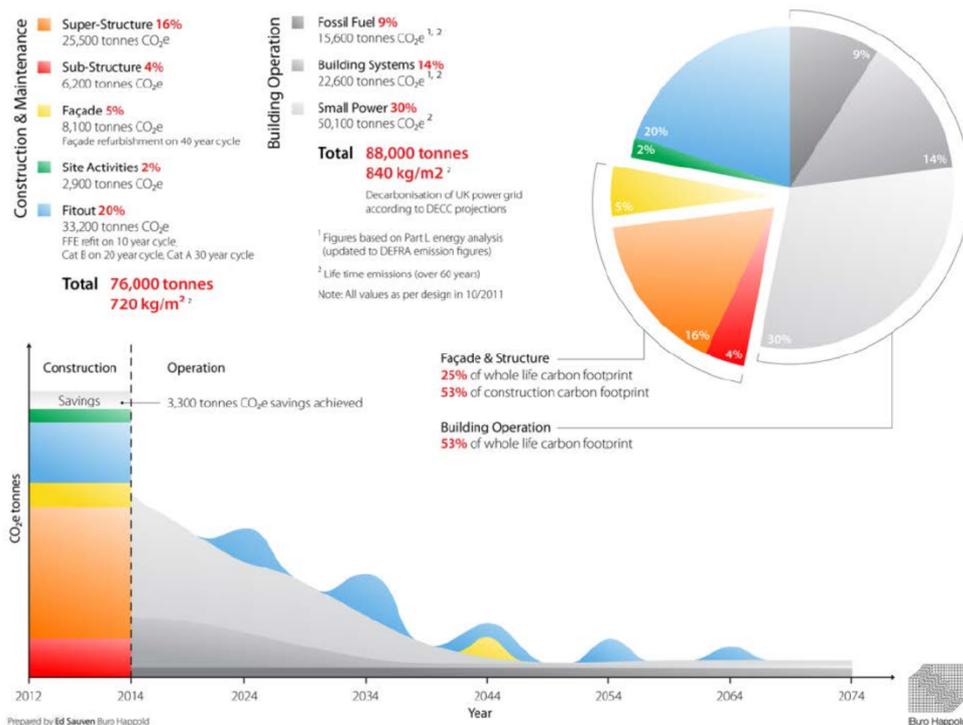


Figure 2. Indicative whole life CO₂ footprint for an office building in Northern Europe

Abb. 37: Abbildung aus EU-Level Indicators: Anteile des CO₂-Abdrucks im Lebenszyklus eines Büro-Gebäudes gemäß Europäischen Standards, https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau//sites/default/files/2021-01/UM3_Indicator_2.3_v1.1_23pp.pdf

Das vorliegende Projekt zeigt einen wirkungsvollen Weg auf, die CO₂-Emissionen des Hauptbaustoffs Beton signifikant zu reduzieren. Dies erfolgt einerseits durch eine deutliche Reduktion von Klinker im Zement bzw. Bindemittel, andererseits durch die Beimischung von technischem Kohlenstoff aus Pyrolyse, der Beton zur CO₂-Senke und damit bilanziell klimaneutral machen kann.

5 Schlussfolgerungen

5.1 Gewonnene Erkenntnisse

Die Anfang 2023 in Österreich veröffentlichte ONR 23339 „Regeln für die Umsetzung des Konzeptes der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit gemäß ÖNORM B 4710-1“ legt einheitliche Regeln für die Anwendung des Konzepts der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit fest. Dieses Konzept bietet die Möglichkeit vom Mindestbindemittelgehalt und dem höchstzulässigen Wasserbindemittelwert abzuweichen. So ist ein geringerer Mindestbindemittelgehalt bei Nachweis der Gleichwertigkeit möglich.

Performance-Beton erfordert aufgrund der im Vergleich zu Beton nach dem deskriptiven Konzept langsameren Festigkeitsentwicklung und aufgrund der tendenziell höheren Karbonatisierungsrate eine konsequente Einhaltung der normgemäß erforderlichen Nachbehandlung und Ausschalfristen. Die Ergebnisse aus dem vorliegenden Forschungsprojekt haben jedoch bestätigt, dass durch die Verwendung beheizter Schalung ein universeller Einsatz von Performance-Beton zu jedweden Außenbedingungen möglich ist.

Gemäß Norm ÖN B 4710-1 bzw. ONR 23339 ist beim Betonieren bei kalter Witterung in der Schutzzeit (Zeit bis zum Erreichen der Gefrierbeständigkeit) dafür Sorge zu tragen, dass die Betontemperatur an den Oberflächen nicht unter +3 °C absinkt. Im eingebrachten Zustand sind während der Erhärtung des Betons lt. Norm Vorkehrungen zu treffen, die Betontemperatur laufend messen zu können. Neben Nachbehandlungsmethoden wie z.B. dem Abdecken mit Wärmedämmmatten ist das Gebäude vor Zugluft zu schützen (z.B. durch Einhausung) oder sogar durch Beheizen warmzuhalten, bis die Gefrierbeständigkeit erreicht ist. Auch eine Erhöhung der Hydratationswärmeentwicklung durch Anhebung des Zementgehalts und/oder die Verwendung von Zement mit höherer Wärmeentwicklung bei sonst gleichen Ausgangsstoffen kann die Kälteresistenz erhöhen. Ein Betonieren bei kalten Umgebungstemperaturen erfordert somit eine gründliche Planung, respektive schnelle Reaktionsbereitschaft und führt mitunter zur Verlängerung der Ausschalfristen bzw. der Nachbehandlungsdauer und einer Intensivierung der Nachbehandlungsmaßnahmen. Dazu bietet die heizbare Schalung eine praxistaugliche Alternative.

Die Versuchsdurchführung bei winterlichen Temperaturen um -5 °C hat verdeutlicht, dass Maßnahmen wie z.B. das Beheizen der Bauteile auch mit Standardbeton erforderlich sind, um dem Verlust von Hydratationswärme entgegenzuwirken und einen Stillstand der Festigkeitsentwicklung zu vermeiden. Hier erweist sich die heizbare Schalung als effiziente Alternative Schutzzeiten zu verkürzen und auch von konventionellem Beton Schaden fernzuhalten. Das Zuführen von externer Energie als Schutzmaßnahme bzw. das Hinzufügen von mehr Zement zur Erhöhung der Wärmeentwicklung im Beton sind zwangsläufig gängige Praxis. Demgegenüber erweist sich das Beheizen des

Betons mittels heizbarer Schalung als hocheffiziente Methode, da Energie unmittelbar am Bauteil mit geringstmöglichem Energieverlust zugeführt werden kann. Daher steht außer Frage, dass sich dieser Schalungstypus in Regionen mit überwiegend kaltem Klima unabhängig von der Betonrezeptur auch wirtschaftlich durchsetzen wird.

Das experimentelle Forschungsprojekt RCC2 hat erwiesen, dass heizbare Schalung die Frühfestigkeitsentwicklung von Betonen bei niedrigen Umgebungstemperaturen unterstützen kann, was im Speziellen bei Performance-Beton technisch dienlich und ökologisch wirksam ist.

Durch den Einsatz von heizbarer Schalung können Performance-Betone somit ganzjährig zur Verwendung kommen. Heizbare Schalung bietet eine schnelle und unkomplizierte Möglichkeit, auf Temperaturänderung zu reagieren. Winterschutzmaßnahmen sind dadurch leichter umzusetzen.

Die technischen Maßnahmen zur Nachbehandlung des Performance-Betons auf der Baustelle dienen einer optimierten Kompensation der verzögerten Frühfestigkeitsentwicklung entsprechend der Umgebungstemperatur. Die Versuchsdurchführung im Kühlcontainer startete als Extremfall bei einer Umgebungstemperatur von $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. An den folgenden Tagen wurde die Umgebungstemperatur sukzessive angehoben. Diese Vorgangsweise spiegelt realistische Temperaturverhältnisse der Tagesmitteltemperaturen unter regionalen Baustellenbedingungen der Metropolregion Wien wider. Alle Betone im Versuch haben nach dem forcierten Hydratationsstopp unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ in Folge der Temperaturerhöhung den Hydratationsprozess weitergeführt. Anhand der an den Probekörpern gemessenen Festigkeiten waren keine signifikanten Schädigungen messbar.

Eine Analyse der Tagesmitteltemperaturen in Wien für das Jahr 2023 zeigt, dass diese in den Monaten November, Dezember, Januar, Februar, März und April jeweils an zumindest einem Tag bei unter $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ lag (s. Abb. 38).

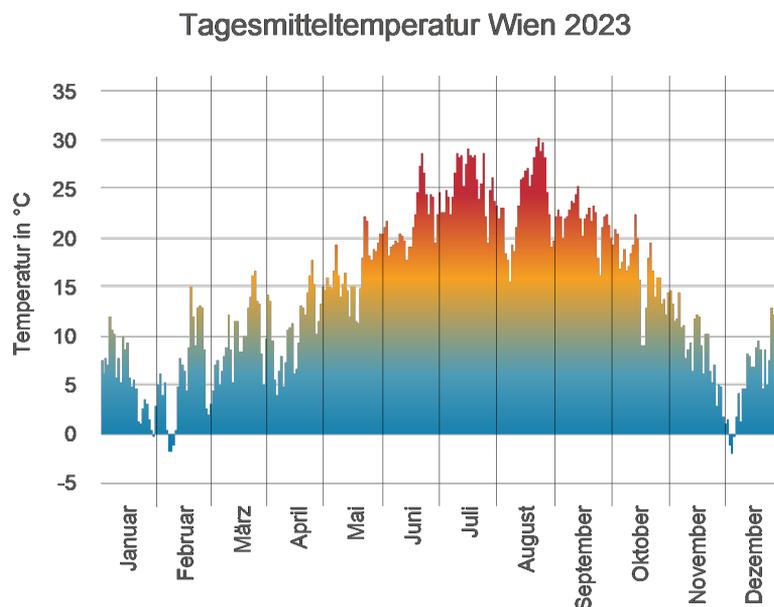


Abb. 38: Tagesmitteltemperatur 2023 - Messtation Wien Innere Stadt (Tagesmitteltemperatur ergibt sich aus = tiefste + höchste Temperatur / 2; Datengrundlage: GeoSphere Austria)

Im Jahr 2023 wurden insgesamt 47 Tage mit Tagesmitteltemperaturen unter 5 °C registriert (s. Abb. 39).

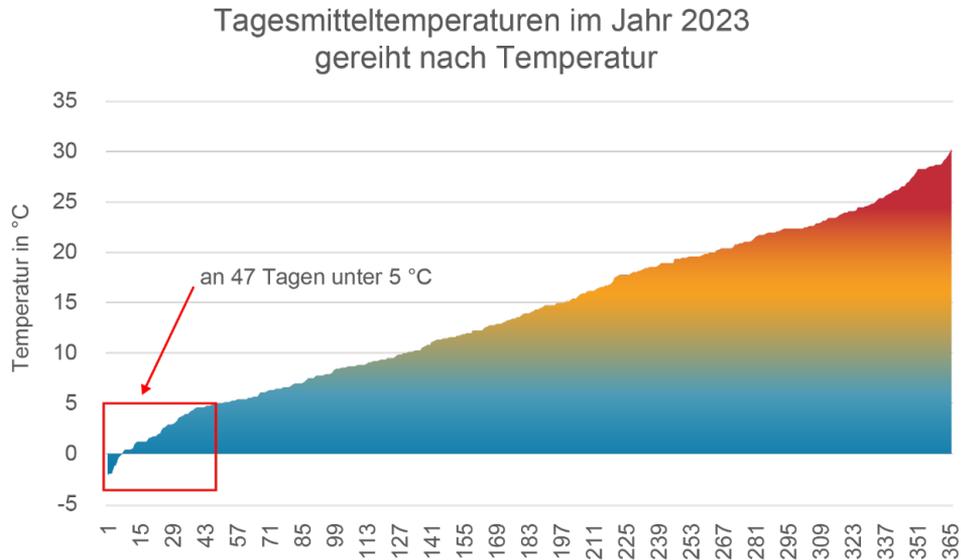


Abb. 39: Tagesmitteltemperatur 2023 gereiht nach Temperatur - Messtation Wien Innere Stadt (Tagesmitteltemperatur ergibt sich aus = tiefste + höchste Temperatur / 2; Datengrundlage: GeoSphere Austria)

Daraus kann abgeleitet werden, dass selbst im Jahr 2023, welches in Wien das heißeste seit Messaufzeichnung war, an ungefähr 13 % des Jahres der Einsatz einer heizbaren Schalung zur (punktuellen) Unterstützung bei der Betonage generell sinnvoll ist.

In Wien gibt es, trotz steigender Durchschnittstemperaturen in den letzten Jahren, zyklisch strengere Winter. Wie die Analyse der letzten Jahre zeigt, sind vor allem in den Monaten zwischen Oktober und April tiefe Temperaturen auch unter Null zu verzeichnen (s. Abb. 40).

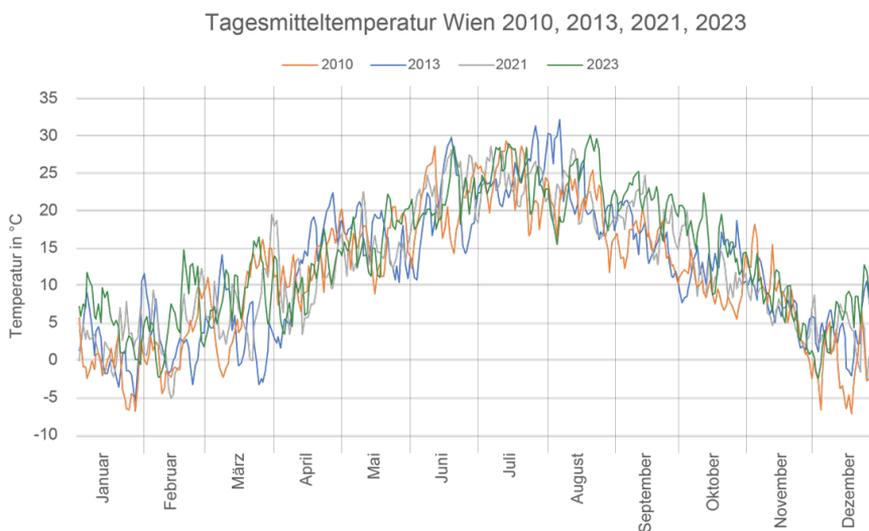


Abb. 40: Tagesmitteltemperaturen in den Jahren 2010 ,2013, 2021, 2023; Messtation Wien Innere Stadt (Tagesmitteltemperatur ergibt sich aus = tiefste + höchste Temperatur / 2; Datengrundlage: GeoSphere Austria)

Zyklisch strengere Winter mit tieferen Tagesmitteltemperaturen bzw. Monatsdurchschnittstemperaturen waren zum Beispiel in den Jahren 2010, 2013 und 2021 zu verzeichnen (s. Abb. 41).

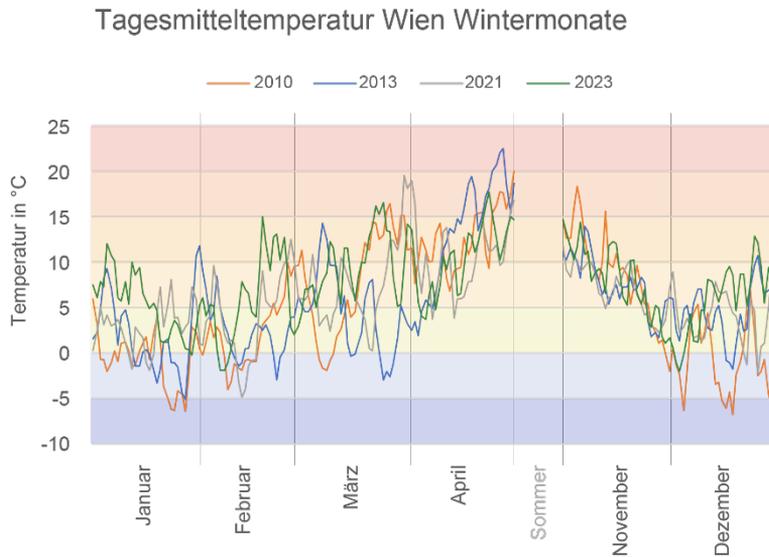


Abb. 41: Tagesmitteltemperaturen in den Wintermonaten der Jahre 2010, 2013, 2021, 2023 - Messtation Wien Innere Stadt (Tagesmitteltemperatur ergibt sich aus = tiefste + höchste Temperatur / 2; Datengrundlage: GeoSphere Austria)

Selbst im wärmsten Jahr 2023 sind in der Metropolregion Wien Tage unter 5 °C Tagesmitteltemperatur und auch Tage unter 0 °C Tagesmitteltemperatur zu verzeichnen. Betrachtet über die Jahre können diese Perioden auch länger andauern. In den kälteren Phasen sind also relevante Zeiträume unter 0 °C vor allem im Dezember, Jänner und Februar beziehungsweise zwischen 0 °C und 5 °C statistisch prognostizierbar.

Trotz Klimawandel sind nach wie vor schwierige Betonierverhältnisse in den Wintermonaten zu erwarten. Daher sind die Entwicklung geeigneter Werkzeuge für den ganzjährigen Einsatz CO₂-reduzierter Betone und das erarbeitete Wissen im Umgang mit diesen Werkstoffen wesentliche Wegbereiter zur Senkung des GWP in der Baubranche.

Die STRABAG Real Estate GmbH (SRE) nimmt als eine der führenden Projektentwickler:innen Europas die wichtige Erkenntnis aus der vorliegenden Forschung mit, dass die Implementierung von RCC-Rezepturen in aktuellen Immobilienprojekten wirtschaftlich und technisch sofort möglich ist. Das Projekt half zudem dabei, die Baustellenteams mit RCC bekannt zu machen und somit einen reibungslosen Ablauf in der Verwendung und Verarbeitung des Materials zu gewährleisten. Auch für die Planer:innen und Projektentwickler:innen waren die Erkenntnisse wichtig, um die erforderlichen Planungs-, Vorbereitungs- und Nachbereitungsmaßnahmen, welche bei der Anwendung von RCC notwendig sind, zu erarbeiten und die Rahmenbedingungen in die Projektierung zu implementieren. Die Ergebnisse haben bestätigt, dass RCC besonders für Verwendung in massiven Bauteilen geeignet ist.

Aus Sicht der Hersteller:in des technischen Kohlenstoffs CarStorCon Technologies GmbH waren die Ergebnisse im Hinblick auf die CO₂-Reduktion des Performance-Betons gegenüber einem Normbeton sehr positiv. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Zugabe von technischem Kohlenstoff eine wesentliche Möglichkeit bietet, Beton in der Gesamtbetrachtung CO₂-neutraler zu gestalten. Des Weiteren hat die im Rahmen dieses Projekts vorangetriebene Entwicklung und Optimierung der Betonrezepturen zu einer erweiterten Anwendungsmöglichkeit des technischen Kohlenstoffs über die ursprünglich verwendeten Mengen hinausgeführt. Gleichzeitig bietet der technische Kohlenstoff die Möglichkeit die höhere CO₂-Belastung durch die beheizten Schalungen nicht nur auszugleichen, sondern Beton bei Erreichen aller erforderlichen Performancekriterien deutlich CO₂-neutraler zu gestalten.

5.2 Weitere Verwertung der Projektergebnisse

Mit dem Ergebnis aus dem Projekt kann nun begonnen werden, CO₂-reduzierten Beton in die praktische Umsetzung zu führen. Die Erkenntnisse aus dem Projekt können an die gesamte Branche weitergegeben werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Beton ein sehr regionales Produkt ist, das mit jeweils individuellen, regionalen Rohstoffen hergestellt wird. Nicht in jedem Werk sind die gleichen Voraussetzungen vorhanden, stehen nicht in gleichem Umfang Mahlwerke zur Verfügung, um feinstgemahlene Füllstoffe als Zementersatz einzusetzen.

Aus der Sicht der Schalungshersteller:in Doka GmbH konnten in der Versuchsdurchführung die Funktionalität der heizbaren Schalung (Leistungsspektrum, Heiztechnologie) demonstriert und weitere Entwicklungsschritte abgeleitet werden. So kann die Weiterentwicklung der Verkabelung, Ansteuerung und Regelung der Heizelemente vorangetrieben werden.

Das Projektteam der STRABAG Real Estate hegte von Beginn an die Absicht, das erarbeitete Wissen in einem ersten Wohnbau-Projekt einsetzen zu können. Die Sommersversuche waren bereits auf der designierten Baustelle noch vor Baubeginn durchgeführt worden. Das Pilotprojekt *Soley* befindet sich in der Leystraße 126 in 1200 Wien. Die feierliche Grundsteinlegung des *Soley* war am 19.4.2024. Auf der Projektwebsite heißt es:

„Unser Neubauprojekt Soley läutet eine neue Ära des nachhaltigen Bauens ein. Erstmals setzen wir auf einer Baustelle der STRABAG Real Estate RCC-Beton ein und reduzieren damit den CO₂-Ausstoß beim Bauen deutlich. Das ist ein wichtiger Schritt in Richtung Umweltschutz und wichtig für die Zukunft“, so Erwin Größ, STRABAG Real Estate Geschäftsführer Österreich“.

„Das Forschungsprojekt RCC hat uns Möglichkeiten aufgezeigt, wie wir zukünftig CO₂-reduzierten bis hin zu klimaneutralem Beton als neuen Stand der Technik in der Baubranche etablieren können. Die Testergebnisse waren sehr vielversprechend und haben uns überzeugt, diese Erkenntnisse bei

unserem Klima-Vorzeigeprojekt Soley einzusetzen. Dieser CO₂-reduzierte Performance-Beton ermöglicht uns eine CO₂-Einsparung von etwa 25 % während des Bauens', konstatiert Maximilian Schwarzbauer, STRABAG Real Estate Projektmanager Wohnbau“.

„STRABAG sucht für den Betonbau aktiv nach klimafreundlichen Alternativen durch Forschungsprojekte und Partnerschaften mit Betonherstellern. Ziel ist es, CO₂-reduzierten Beton vermehrt einzusetzen und gemeinsam mit Auftraggebern den Fortschritt voranzutreiben. Das entspricht unserer Unternehmensstrategie bis 2040 Klimaneutralität zu erreichen. Das Soley ist mit seinem ökologischen Gebäudekonzept ein Paradeprojekt für das nachhaltige Bauen der Zukunft', erklärt Matthias Loimayr, Vorstand der STRABAG AG und kaufmännischer Unternehmensbereichsleiter für Österreich“.¹¹

5.3 Relevanz der Projektergebnisse und Weiterverwendung durch Zielgruppen

Die gewonnenen Forschungsergebnisse sind für die Baubranche von großer Bedeutung. Der Einsatz heizbarer Schalung bietet eine praxistaugliche Möglichkeit, den Baufortschritt bei Temperaturabfall zu sichern und kann somit die Prozesse mit Performance-Beton effektiver gestalten. Die Ergebnisse richten sich daher gezielt an Planer:innen und Ausführende in der Baubranche.

Für Bauherr:innen – allen voran die öffentliche Hand – und Projektentwickler:innen zeigen die Projektergebnisse, dass schon heute beim Bauen mit Beton erhebliche Mengen an CO₂ eingespart werden können, ohne nachteiligen Einfluss auf das Bauwerk. Die Ergebnisse sind für die gesamte Immobilienbranche von größter Relevanz, da CO₂-reduzierter Beton einen wichtigen Baustein am Weg zur Klimaneutralität darstellt. Das Potenzial von Performance-Betonen muss sowohl von Auftraggeber:innen als auch von den Ausführenden ausreichend verstanden werden, um durch eine weitgefächerte Beschäftigung mit dem Material die Entwicklungen voranzutreiben und die Basis für eine breite Anwendung zu schaffen.

Aus Sicht der Planer:innen ist der Ansatz der Gleichwertigkeit über den Performance-Nachweis eine wichtige Möglichkeit, um die bestehenden normativen Anforderungen an die geforderte Zuverlässigkeit der Tragstrukturen nachzuweisen. Mit dem Wissen, die normativen Vorgaben auch mit CO₂-reduzierten Performance-Betonen einhalten zu können, kann ohne Vorbehalte auch die

¹¹ <https://www.strabag-real-estate.com/de-AT/news-beitrag/grundsteinlegung-bei-vorzeigeprojekt-soley/>

planerische Umsetzung klimafreundlicher Projekte mit den signifikanten Materialvorteilen der Betonbauweise wie der hohen Speichermasse, des Schallschutzes, des Brandwiderstandes, der hohen Tragfähigkeit, der Dauerhaftigkeit und der flexiblen Formbarkeit erfolgen.

5.4 Rechtliche & technische Hürden

Mit dem Performance-Konzept wird dem Bauen mit Beton eine gewisse Planungsroutine genommen. Erst durch klare CO₂-Kennwerte für Gebäude im Markt wird RCC breit verankert werden, was mit Vorgaben an die Nachhaltigkeit von Gebäuden absehbar ist, wie sie derzeit in der OIB 7 oder durch die DGNB (Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen) entwickelt werden. Dies ist vermehrt bereits in Wettbewerbsauslobungen zu finden, wie zuletzt in der *IBA Stuttgart 2027* im Rahmen eines Wettbewerbes für die Errichtung von 600 Wohnungen der Nachweis der Klimaneutralität innerhalb von 15 Jahren zu führen war. So heißt es in der Auslobung: *„Das neue Quartier ist über seinen Lebenszyklus emissionsfrei und die grauen Emissionen, also die Emissionen, die beim Abbau, Herstellung, Transport sowie Rückbau anfallen, müssen nach 15 Jahren kompensiert sein. Die Emissionsfreiheit bezieht sich nicht nur auf den Betrieb des Quartiers sondern auch auf die Errichtungsphase.“*

Um diese technische Nachweisführung zu ermöglichen sind derzeit für die RCC Betone noch keine geeigneten Grundlagen verfügbar. Die Rezepturen der Hersteller müssen in Umweltproduktdeklarationen zertifiziert werden, damit sie in Rechnung gebracht werden dürfen. Dieses langwierige und aufwendige Prozedere muss entschieden technisch und rechtlich dynamisiert werden.

Performance-Betone mit deutlich reduziertem Klinkergehalt verfügen im Vergleich zu Standardbetonen über relativ geringe "Reserven" in Bezug auf das Handling und die Performancekriterien. Dieser Sachverhalt wurde auch durch die ermittelten Prüfergebnisse in diesem Forschungsprojekt bestätigt. Die Verwendung dieser Betone erfordert entsprechendes betontechnologisches Know-How und eine konsequente prüftechnische Betreuung sowohl bei der Betonherstellung als auch auf der Baustelle.

Wie die Prüfergebnisse gezeigt haben, erfordern die langsamere Festigkeitsentwicklung und die tendenziell höhere Karbonatisierungsrate von Performancebetonen eine konsequente Einhaltung der normativ definierten Nachbehandlungsarten und -zeiten sowie die konsequente Einhaltung der normgemäß erforderlichen Ausschulfristen. Die Anwendung heizbarer Schalungen muss in diesen technischen Anforderungen als effiziente Methode der Nachbehandlung für kritische Temperaturbereiche normativ verankert werden.

Durch die Beimischung von technischem Kohlenstoff aus emissionsfreier Strom- und Wärmege-
winnung kann der bilanzielle CO₂-Fußabdruck von Beton deutlich verbessert werden. Da Gebäude in der Regel auf Langlebigkeit konzipiert sind und auch nach deren Verwertung der Kohlenstoff

noch im Beton gebunden verbleibt ist das CCS (Carbon Capture and Storage) -Konzept in der Betonbaupraxis zweifelsfrei umsetzbar. Die Zugabe von technischem Kohlenstoff ist grundsätzlich als Pigment nach ÖNORM EN 12878 „Pigmente zum Einfärben von zement- und/oder kalkgebundenen Baustoffen - Anforderungen und Prüfverfahren“ zulässig. Laut ÖN EN 12878 ist der Prozentanteil von Pigmenten auf 10 % zu beschränken. Das bedeutet bei einem Gesamtbindemittelanteil BM_{Ges} von min. 300 kg in den Versuchsrezepturen, dass mit der Beigabe von max. 30 kg technischem Kohlenstoff alle Versuchsrezepturen normkonform waren. Die betontechnologischen Eigenschaften bei Überschreitung der Mengenangaben der ÖN EN 12878 benötigen weitere, eingehende Untersuchungen und rechtliche Rahmenbedingungen. Es besteht jedoch nach wie vor Bedarf an Tests in Hinblick auf Dauerhaftigkeitseigenschaften und Langzeiterfahrungen. Für den Einsatz des technischen Kohlenstoffes braucht es derzeit den ausdrücklichen Wunsch der Bauherr:innen. Aus Sicht der Betonhersteller:innen ist eine Produkthaftung außerhalb der Norm auszuschließen. Daher ist auch noch zu klären, wie technischer Kohlenstoff als Maßnahme zur CO₂-Reduktion im Beton anerkannt werden kann und mit welchem Wert er in der ökobilanziellen Darstellung aufscheint. Dies könnte im Zuge einer EPD (Environmental Product Declaration) für technischen Kohlenstoff erfolgen und Teil der Betonrezeptur werden, analog der EPD für Zement. Die Rezepturanpassungen in den Laborversuchen haben außerdem gezeigt, dass der Wasseranspruch des Betons steigt, je mehr technischer Kohlenstoff beigemengt wird. Bei Zugaben von bis zu 20 kg technischem Kohlenstoff je Kubikmeter Beton konnte man die Veränderungen jedoch durch kleinere Rezepturanpassungen verhältnismäßig rasch kompensieren. Bei höheren Dosierungen war es notwendig, die Zusatzmitteldosierungen deutlich zu erhöhen oder gänzlich andere Zusatzmittel einzusetzen. Trotz dieser Maßnahmen war der Einfluss technischen Kohlenstoffes auf die Verarbeitbarkeit des Betons relativ schnell (innerhalb der normativen 90 Minuten) spürbar. Daher ist zur Sicherstellung einer fachgerechten Verarbeitbarkeit unter den objektspezifischen Anforderungen jedenfalls die fachtechnische Einbindung der Hersteller:in von Bedeutung.

Um die Beigabe von Kohlenstoff auf eine Menge zu erhöhen, die einen bilanziell klimapositiven Beton hervorbringt – das wären ca. 3 % der Masse – sind jedenfalls noch betontechnologische Untersuchungen nötig. Eine gleichbleibende Qualität des technischen Kohlenstoffes innerhalb tolerierbarer Schwankungsbreiten ist hier Grundvoraussetzung.

Die CO₂-reduzierten Betonsorten stellen insbesondere auch Anforderungen an die bauausführenden Unternehmen. Planung, Vorbereitung und Nachbehandlung von CO₂-optimiertem Beton erfordern Mehraufwand. Ungeachtet der beschriebenen Hürden erscheint als nächster Schritt sinnvoll, RCC für Betone mit geringeren Anforderungen zu nutzen, die man auch als Prozessbetone bezeichnen kann. Diese sind zum Beispiel Beton für Sauberkeitsschichten, Bodenauswechslungen, Negativschalungen, Holraumverfüllungen oder auch setzungsfreie Hinterfüllungen mit besonderen

technischen Anforderungen. Bei diesen Anwendungen könnten mit geringerem Zertifizierungsaufwand CCS-Betone¹² mit hohem Kohlenstoffanteil eingebaut werden, um dabei praxistaugliche Erfahrungen im Umgang mit diesen zukunftssträchtigen Betonen von der Produktion bis zur Verarbeitung zu gewinnen und zeitnah Kohlenstoffsinken zu generieren

Die Gefahr nicht ausreichender Verfügbarkeit von technischem Kohlenstoff aus Pyrolyse ist derzeit aus Sicht der Anlagenbetreiber:innen mit dem Hinweis auf die begrenzte Nachfrage aus der Landwirtschaft nicht der Fall. Bioökonomisch ist die Restholz- und Altholzverwertung derzeit jedenfalls suboptimal. Ein klimawandelbedingter Umbau der Wälder und damit die verstärkte Nutzung von Schadh Holz ist anstehend. Bei der Kapazität der bestehenden Pyrolyseanlagen sind nach Auskunft der Betreiber:innen Konzepte für Massenströme jenseits der landwirtschaftlichen Nutzung erforderlich, um die sinnvolle langfristige Verwendung von technischem Kohlenstoff zu sichern.

Die breite Verfügbarkeit von beheizbaren Schalungen ist für eine ganzjährige Anwendung von RCC ein wichtiger Faktor. Da in den Forschungsversuchen ein Mehrwert auch für Standardbeton bei Minustemperaturen deutlich wurde, wird eine Markteinführung beheizbarer Schalungen auch unabhängig von der Anwendung bei Performance-Betonen erfolgreich sein.

5.5 Bisherige Verwertungs- und Verbreitungsaktivitäten

Es gab bisher zahlreiche Verwertungs- und Weiterverbreitungsaktivitäten seitens des Projektkonsortiums. In erster Linie ist hier die Pressekonferenz zu nennen, die am 14. November 2023 in Wien stattfand, bei der die Forschungsergebnisse vorgestellt wurden. Auf dem Podium vertreten waren u.a. die Bundesministerin für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Leonore Gewessler, der Geschäftsführer der Strabag Real Estate, Erwin Größ und der CEO der Doka GmbH, Robert Hauser. Die Pressekonferenz war von entscheidender Bedeutung, die Aufmerksamkeit der Öffentlichkeit auf das Projekt zu lenken und einen Dialog mit wichtigen Stakeholdern zu initiieren. In der Folge erschienen zahlreiche Artikel in digitalen und analogen Medien, die über das Projekt berichteten.

Presseclipping zur Pressekonferenz vom 14.11.2023:

- ZIB (Zeit im Bild), ORF 2, 14.11.2023, 13:00 Uhr, O-Ton: Leonore Gewessler (Klimaschutzministerin, Die Grünen), Robert Hauser (Geschäftsführer Doka)
- Der Standard Online, 14.11.2023: RCC2 / Reduced Carbon Concrete, <https://www.derstandard.at/story/3000000195166/beton-mit-weniger-zement-dafuer-holzkohle-soll-80-prozent-klimafreundlicher-sein>

¹² CCS – Carbon-Capture and Storage

- buildingtimes.at, 15.11.2023 Suchbegriff: Soley, https://buildingtimes.at/projekte_visionen/co2-reduzierter-beton/
- Die Presse, Unabhängige Tageszeitung für Österreich, 15.11.2023 SB: STRABAG Real Estate, *Wie Beton grüner wird Bauen. Beton soll klimafreundlicher werden. Neuste Ergebnisse versprechen große Einsparungen, bringen aber auch Herausforderungen.*
- Web clipping: www.diepresse.com 15.11.2023, RCC2 / Reduced Carbon Concrete; <https://www.diepresse.com/17824964/wie-beton-klimafreundlicher-sein-kann>
- Firmenwagen Newsletter, E-Mail Newsletter, Wien, am 15.11.2023 SB: RCC2 / Reduced Carbon Concrete: *Neuer CO₂-reduzierter Beton verspricht Einsparungen bis zu 80 Prozent*
- NÖN Amstettner, Unabhängige Wochenzeitung für Niederösterreich
St. Pölten, am 15.11.2023, Nr: 46, SB: Mischek *Baustoff der Zukunft soll „klimafit“ sein*
- Web Clipping, 15.11.2023, Report Online Mischek, <https://www.report.at/bau-immo/23007-auf-dem-weg-zum-klimafitten-beton>
- Web Clipping 15.11.2023 Medium: Suchbegriff: Url: solidbau.at, Soley, <https://solidbau.at/news/neuer-co2-reduzierter-beton-verspricht-einsparungen-bis-zu-80-prozent/>
- Web Clipping, 15.11.2023 Medium: Suchbegriff: Url: Wirtschaftszeit <https://www.wirtschaftszeit.at/news/forschungsprojekt-fuer-innovatives-bauen-80-co2-ersparnis-moeglich/>
- NÖN.at, Adresse: <https://www.noen.at/amstetten/innovativer-beton-das-bauen-der-zukunft-394915435> Datum: 16.11.2023, AMSTETTEN: *Innovativer Beton: Das Bauen der Zukunft*
- Web Clipping 16.11.2023 Medium: Suchbegriff: Url: www.tips.at, Soley <https://www.tips.at/nachrichten/amstetten/wirtschaft-politik/626037-forschungsprojekt-klimafittes-bauen-mit-beton> Heizschalung löst Probleme beim Einsatz von RCC-Beton

In Folgendem werden weitere Disseminationsaktivitäten gelistet:

- 11.10.2023, Construction Goes Circular, Konferenz in Lahti, Finnland (Keynote Romm)
- 07.-08.11.2023 Konferenz 29. Betonářské dny in Hradec Králové, Tschechien (Vortrag Pavel Kasal)
- 27.11.2023, Shaping tomorrow by reshaping concrete - mit kreislauffähigen Betonbau, fib Young Members Group Austria, Ilse-Wallentin Haus der BOKU Wien, (Impulsreferat Romm)
- 26.02.2024, Circulaze, Trend tours, TOPIC: Build Environment; Webinar (Keynote Romm)
- 29.02.2024, Webinar: Circularity in the Construction Industry, Innovation Value Institute Dublin, (Keynote Romm)
- 15.05.2024, EUROMECH CNRS Colloquium, European Mechanics Society, Urban Science and Engineering for (quantitative) Resilience and Sustainability (USERS – CNRS), Wien, (Keynote Romm)
- 12./13.9.2024, Betonkolloquium, TU Graz, „Baustoffkreislauf und CO₂-Reduktion von Beton – Projekte & Entwicklungen“, (Vortrag Romm)

5.6 Weiteres (Markt-/ Verbreitungs-) Potenzial

Im „Hearing Beton“ am 06. Oktober 2023 hatte das BMK die Branchenvertreter seitens VÖZ (Vereinigung österreichischer Zementhersteller) und GVTB (Güteverband Transport Beton) um eine Einschätzung der österreichweiten Verfügbarkeit CO₂-redzierten Betons und klinkerreduzierter Zemente, insbesondere von CEM II/C, gebeten. Hintergrund war die Ausarbeitung des Aktionsplanes der nachhaltigen Beschaffung des Bundes, des *naBe-Aktionsplanes* zur Umsetzung der österreichischen Kreislaufwirtschaftsstrategie. Im Basisjahr 2022 betrug das öffentliche Beschaffungsvolumen mit rund € 1,265 Mrd. etwa 8,6 % der österreichischen Hochbauproduktion von insgesamt € 14,8 Mrd. Im öffentlichen Tiefbau liegt das Bauvolumen 2022 bei ca. € 7,239 Mrd. Damit hat die öffentliche Hand, wie aus Abb. 42 ersichtlich, einen Anteil von 33 % der gesamten Bautätigkeit in Österreich (lt. WKO/VIBÖ).¹³ Der naBe Aktionsplan 2024 diskutiert eine CO₂-Reduktion von 25 % für Beton im öffentlichen Bauen.

| Bauproduktion Hoch- und Tiefbau 2022 in Österreich | | | |
|---|-----------------------|----------------------|--------------------|
| Monat | in 100 € | öffentlich | Anteil öff. |
| Jän.22 | 11.614.120 | 3.317.755 | 28,6% |
| Feb.22 | 15.636.951 | 4.470.565 | 28,6% |
| Mär.22 | 21.864.658 | 6.657.600 | 30,4% |
| Apr.22 | 21.646.046 | 6.891.143 | 31,8% |
| Mai.22 | 24.644.987 | 8.218.360 | 33,3% |
| Jun.22 | 25.017.467 | 8.459.592 | 33,8% |
| Jul.22 | 25.059.369 | 8.643.874 | 34,5% |
| Aug.22 | 24.207.870 | 8.594.621 | 35,5% |
| Sep.22 | 26.828.104 | 9.413.171 | 35,1% |
| Okt.22 | 25.944.081 | 9.056.152 | 34,9% |
| Nov.22 | 28.036.014 | 9.400.418 | 33,5% |
| Dez.22 | 22.872.934 | 7.137.106 | 31,2% |
| Gesamt 2022 | 27.337.260.100 | 9.026.035.700 | 33,0% |

Abb. 42: Öffentlicher Anteil am Bauvolumen in Österreich 2022 lt. WKO¹⁴

¹³https://www.wko.at/oe/gewerbe-handwerk/bau/konjunktur-statistik#heading_Bau_Statistik_2

¹⁴ https://www.viboe.at/Downloads/Statistik/Baustatistik/Produktionsstatistik/Bauproduktion_OEsterreich_10-Jahres-UEbersicht/Jahresrueckblick_2020_bis_2022.pdf

Die Vereinigung Österreichischer Zementhersteller (VÖZ) beschreibt in der *Roadmap zur CO₂-Neutralität der österreichischen Zementindustrie* eine Reduktion von 2,85 Mio. t CO₂ bis 2050 (s. Abb. 43). Mit ca. 550 kg CO₂-Äquivalente werden in Österreich um fast 100 kg CO₂ pro Tonne Zement weniger emittiert als der weltweite Durchschnitt. Aus der jährlichen Gesamtemission und der Emission pro Tonne errechnet sich eine jährliche Produktion von 5,2 Mio. t Zement in Österreich. Bei der Annahme von 13 % Gewichtsanteil von Zement im Beton, müssen also in Österreich jährlich rund 40 Mio. t Beton hergestellt werden, denn eine andere signifikante Anwendung von Zement gibt es nicht. **Das bedeutet, dass in Österreich ca. 16,7 Mio. Kubikmeter Beton pro Jahr verbaut werden.** Zurückgerechnet auf die Zementemission von 2,85 Mio. t CO₂ aus der VÖZ-Roadmap sind das für 16,7 Mio. m³ Beton zementbedingte Emissionen von durchschnittlich 170 kg CO₂/m³ Beton. Die wesentlichen Maßnahmen für eine Klimaneutralität der österreichischen Zementindustrie bis 2050 sind lt. Roadmap die CO₂-Reduktion von Zement und Beton (-22 %) und CO₂-Reduktion durch Carbon Capture, Usage and Storage (-44 %). Diese Schwerpunkte zur CO₂-Reduktion in der Betonrezeptur und zu Beton als CO₂-Senke in Zusammenhang mit BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage – Verwertung bzw. Speicherung von biogenem CO₂ zur Entfernung aus der Atmosphäre) entsprechen der Zielausrichtung der vorliegenden Forschung zu RCC2.

CO₂ Roadmap der Österreichischen Zementindustrie

2020 – 2050

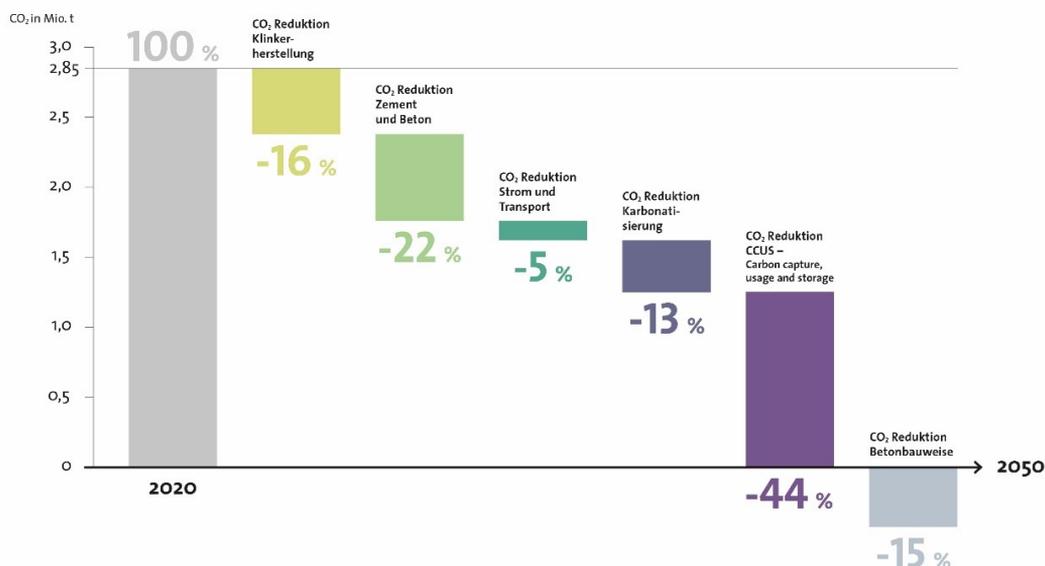


Abb. 43: CO₂-Reduktionspotenziale nach Bereichen, *Quelle: Roadmap zur CO₂-Neutralität der österreichischen Zementindustrie bis 2050, VÖZ*

In der Roadmap wird die Reduktion des Marktanteils klinkerlastiger Zemente von aktuell 83 % (CEM II A/B) bis 2040 auf 20 % und CEM I von 15 % auf 5 % prognostiziert. Klinkerreduzierte Zemente wie CEM II C sollen in 15 Jahren einen Marktanteil von 40 % haben. In den kommenden 5 Jahren ist aber – so die Auskunft im Hearing am 06.10.2023 – mit maximal 100.000 t also ca. 2 %

zu rechnen. Daher werden RCC und das Performance-Konzept hier eine wichtige Ergänzung in der Erreichung der nationalen Klimaziele sein müssen.

Die Verwendung von CO₂-reduzierten Betonen gewinnt mit dem Vorschlag zur Einführung von GWP-Klassen innerhalb der Festigkeitsklassen zunehmend an Bedeutung. Hier sind in Kürze die entsprechenden technischen Grundlagen im Bereich der Nachweisführung und damit die erforderlichen Regulative zu erwarten. Eine wichtige Grundlage dafür sind die in einem FFG-Projekt der öbv, der Österreichischen Bautechnik Vereinigung, ausgearbeiteten GWP-Kataloge.¹⁵

Die Unterstützung der Praxistauglichkeit dieses Betons mit diversifizierten Anforderungen ist für die Schalungstechnik von großem Interesse. Vor allem in Ländern, wo mittlere Temperaturen unter 0 °C sehr oft gemessen werden, ist das Interesse an beheizbarer Schalung groß. Die größte Herausforderung wird darin bestehen, die Vorteile des Einsatzes der heizbaren Schalung zur Optimierung durch eine einfache Handhabung in der Baustellenpraxis zu überzeugen. Im vorliegenden Versuch wurde die Bauteilheizung manuell gesteuert. Ein easy-to-use Ansatz, eingebettet in ein entsprechendes Produktportfolio, das Heizlasten steuert, regelt und dokumentiert, erscheint hier als sinnvoller Ansatz. Ein weiteres Optimierungspotenzial besteht somit darin, die Steuerung der heizbaren Schalung mit dem Sensor für die Betonaushärtung bzw. Betontemperatur direkt zu verknüpfen und so den Energieaufwand für die Heizung zu minimieren. An der Verfügbarkeit von heizbaren Schalungen mit unterschiedlichem Reifegrad wird seitens Doka gearbeitet, um weitere Baustellen mit Prototypen ausstatten zu können. Die baupraktische, prototypische Anwendung am SRE-Projekt SOLEY in Wien ist bereits ein Anfang.

¹⁵ https://www.bautechnik.pro/download/LCCO2-Tool_V1.0.zip

6 Ausblick und Empfehlungen

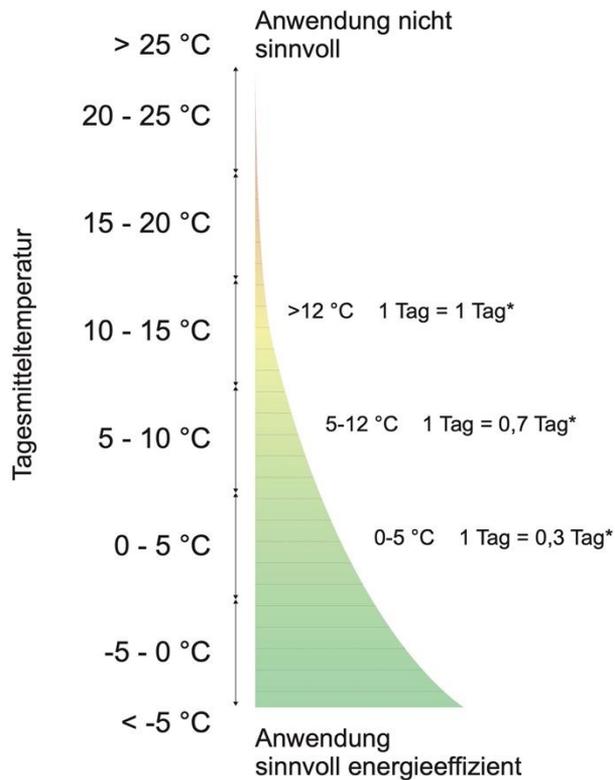
Im Folgenden werden ein Ausblick und Empfehlungen für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten gegeben sowie das Potenzial für Demonstrationsvorhaben dargestellt.

6.1 Empfehlungen für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

Performance-Beton basiert auf einem Dienstleistungskonzept, das in der Lage ist, wissensbasierte Nachweise der Gleichwertigkeit, anstelle von einem erfahrungsbasierten Mindestbindemittelanteil in der Praxis des Betonbaus zu verankern. Dieses Dienstleistungskonzept bezieht Ingenieur-, Labor- und Überwachungsleistungen mit ein. Das Performance-Konzept eröffnet neue Felder zur Konzeption und Ausführung, von der Rezepturgestaltung bis zur Schalungsausführung und messtechnischen Begleitung. Weiterführende Forschung muss nun diesen neuen Work-Flow unterstützen.

Basierend auf den Ergebnissen des Forschungsprojekts wird empfohlen, der verringerten Hydratationsenergie von Performance-Beton nach Betonage bei kalten Umgebungstemperaturen mit Zufuhr externer Energie durch Beheizen mittels heizbarer Schalung mit geringen Wärmeverlusten zu begegnen. **Die heizbare Schalung kann ferner als Nachbehandlungsmaßnahme verstanden werden, die zusätzlich zu anderen Methoden eingesetzt werden kann, bzw. die Nachbehandlungszeit verkürzen oder kompensieren kann.**

Eine generelle Regel, wann heizbare Schalung zur Anwendung kommen sollte, kann auf Grund der unterschiedlichen Einflussfaktoren nicht pauschal definiert werden. Anhaltspunkt für die Anwendung heizbarer Schalung, die in der Lage ist, Nachbehandlung zu kompensieren, bieten die normativen Nachbehandlungszeiten der ÖN B 4710-1. Die Entscheidung, wann es sinnvoll ist, eine heizbare Schalung anzuwenden, ist situations-, respektive projektabhängig und zudem material- und witterungsbedingt sowie von den prozesstechnologischen Aspekten abhängig. Selbstverständlich nimmt die Sinnhaftigkeit der Anwendung heizbarer Schalung mit Abnahme der Tagesmitteltemperatur zu. Dies wird in Abb. 44 dargestellt.



*Mindest-Nachbehandlungszeiten lt. ON B 4710-1

Abb. 44: Anwendungsskala heizbarer Schalung

Wie das Experiment bei ungünstigen Umgebungsbedingungen unter 0 °C gezeigt hat, sind auch Standardbetone wie der regionale Referenzbeton vor allem in der frühen Hydratationsphase und bei geringen Anfangsfestigkeiten auf externe Energiezufuhr angewiesen. Einerseits muss ein Auffrieren unter der Frostsicherheitsgrenze verhindert und andererseits der Verlauf der Frühfestigkeitsentwicklung bis zu den bautechnisch notwendigen Mindestfestigkeitsanforderungen sichergestellt werden. Hierbei sind die normativen Forderungen der ÖNORM B4710-1 in Bezug auf die Ausschalfestigkeit nichttragender Schalungen mit 3 N/mm², die Frostsicherheitsgrenze von 5 N/mm², die Mindestfestigkeit der Schalungssysteme weiterführender Bauabschnitte bzw. auch im Baufortschritt erforderliche Mindestdruckfestigkeiten für die folgenden Überbauungen relevant. Da die Dauer der erforderlichen Nachbehandlung vom Reifegrad der Betonhydratation abhängt, kann die energetisch unterstützte Reifung auch diese Nachbehandlungszeiten entsprechend beeinflussen. Durch aktives Monitoring der Reifegrade des Betons kann die Dauer der Nachbehandlungsphase erfasst werden. Hierfür sind in weiterer Folge auch die Erfahrungen der Performance Tests der jeweiligen Betonrezepturen mit den vorherrschenden Umgebungsbedingungen zu korrelieren, um die gewünschten Betoneigenschaften sicherzustellen. Auch die Langzeituntersuchung der im Forschungsprojekt RCC2 verwendeten Betonsorten RCC2 und RCC2+ war Gegenstand der Überlegungen. Um wesentliche Erkenntnisse auch im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit zu gewinnen, wurden zusätzliche Betonbohrkerne aus den Versuchsbauteilen entnommen und für einen Langzeitmess-

plan eingelagert. Dies bietet die Chance über das abgeschlossene Forschungsprojekt hinaus Betonprüfungen in fortgeschrittenem Betonalter durchführen zu können und somit Erkenntnisse aus diesen Langzeitversuchen der erprobten Betonmischungen zu gewinnen.

Der Ausblick im Bereich des eingesetzten technischen Kohlenstoffs wird seitens der Hersteller:in als positiv bewertet. Im Nachgang zu den hier gegenständlichen Versuchen wurde das Produkt weiter verfeinert. Mittlerweile wurde in weiteren Versuchen erfolgreich bestätigt, dass die technische Möglichkeit besteht, 64 kg technischen Kohlenstoff pro Kubikmeter Beton einzubauen und damit einen CEM III Beton vollständig klimaneutral zu gestalten. Diese Tests wurden außerhalb der Versuche des Konsortiums mit einer externen Prüfanstalt durchgeführt. Darüber hinaus arbeitet CarStorCon intensiv an Dosierlösungen für den effektiven Einsatz in allen gängigen Betonmischanlage. Im Mai 2024 wurde von der Prüf-, Inspektions- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien die CE-Zertifizierung mit der Nummer 1139-CPR-01039/24 nach der EN 12878 ausgestellt. Damit kann Clim@Add® in jedem bewehrten und unbewehrten Normbeton eingesetzt werden. Mit der CE-Zertifizierung ist Clim@Add® in jeglicher Betonanwendung zu verwenden, vorausgesetzt, die Eignungsprüfungen in den Betonwerken sind positiv. Diese sind immer dann erforderlich, wenn es Änderungen oder Ergänzungen bei den verwendeten Komponenten gibt. Zudem wird die Ausarbeitung einer eigenen EPD angestrebt, sodass die Verwendung auch nach allen gültigen Normen zur Reduzierung der CO₂-Belastung der Gebäudeerstellung eingesetzt werden kann.

Empfehlungen für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind die Folgenden:

- Begleitung von ausgewählten Bauvorhaben mit RCC2 bzw. RCC2+ Betonen in Richtung klimaneutraler Betonbau.
- Optimierung des Energieverbrauchs der beheizten Schalung durch automatisierte Ansteuerung anhand von Betonparametern (abhängig von Außentemperatur, gewünschter Betonfestigkeit usw.).
- Lean-Projekte zum Monitoring der Frühfestigkeit zur Optimierung der Schalzeit. Untersuchungen zum Bauablauf zur Vermeidung längerer Verweilzeit in der Schalung.
- Einsatz kalzinierter Tone in der Zementherstellung für CO₂-reduzierten Beton.
- Vertiefte Betrachtung, wieviel technischer Kohlenstoff in marktübliche Betonsorten ohne Beeinträchtigung der technischen Eigenschaften beigemischt werden kann.
- Entwicklung neuer Prüfmethode zum Nachweis der Dauerhaftigkeit, die es ermöglichen, Beton zu optimieren und kurzfristig zu prüfen, ohne langjährige Praxiserprobung am Bauwerk und damit jahrzehntelanger Entwicklungsarbeit.
- Versuche technischen Kohlenstoff als Teil des Bindemittels einzusetzen.
- Entwicklung von Ablaufplänen und Planungshilfen sowie wirtschaftlicher Grundlagendokumente zur Umsetzung von Kohlenstoffsinken im Betonbau, exemplarisch begleitet an beispielhafter Anwendung in Prozessbetonen.

6.2 Potenzial für Demonstrationsvorhaben (Chancen / Herausforderungen / Risiken bei der Realisierung / Umsetzung in Richtung Demonstrationsprojekt)

Die Erkenntnisse aus dem vorliegenden Projekt sind bereits in das Demonstrationsprojekt *Soley* der Projektentwickler:in und Konsortialpartner:in STRABAG Real Estate eingeflossen. Bei dem Projekt handelt es sich um ein Wohngebäude im 20. Wiener Gemeindebezirk. Durch die enge Zusammenarbeit mit den Konsortialpartner:innen ist es gelungen, CO₂-reduzierten Beton und auch heizbare Schalung einzusetzen (s. Abb. 45).



Abb. 45: Baustellenfoto Projekt SOLEY, Strabag SRE; Einsatz heizbare Schalung und CO₂-reduzierter Beton (Fotocredits: Christian Fürthner)

Das Demonstrationsprojekt SOLEY zeigt, dass der Einsatz von CO₂-reduzierten Betonen, in diesem Fall eine Rezeptur der Asamer Transportbeton, bereits heute praxistauglich ist. Die Projektentwickler:in STRABAG Real Estate will auch in Zukunft weitere Demonstrationsprojekte mit CO₂-reduzierten Betonen realisieren. Künftige Pilotprojekte sind erforderlich, um nicht nur die Praxistauglichkeit einzelner Anwendungen von CO₂-reduziertem Beton, sondern das nunmehr greifbare Ziel eines klimaneutralen Betonbaus voranzutreiben.

Die Motivation, das Konzept der CO₂-Reduktion in Betonbauprojekten umzusetzen, muss durch die experimentelle Erprobung auf der Baustelle gestützt werden. Ausschulfristen und Nachbehandlung

können im Konzept für die gleichwertige Betonleistungsfähigkeit ECPC (Equivalent Concrete Performance Concept) festgelegt werden, aber die Abschätzung der tatsächlich erforderlichen Aufwände muss aus der Baupraxis der Ausführenden beurteilt werden. Erst in der gelebten Baustellenerfahrung kann der Umgang mit neuen Werkstoffen erlernt und ein Sinn für die Erfordernisse entwickelt werden. Dies gilt umso mehr für die Weiterentwicklung der heizbaren Schalung, deren Potenzial in Zusammenhang mit den Technologien zur Temperaturüberwachung des Bauteils sehr vielversprechend sind.

Im Folgenden werden Potenziale für Demonstrationsvorhaben (Chancen / Herausforderungen / Risiken bei der Realisierung / Umsetzung in Richtung Demonstrationsprojekt) gelistet:

- Das Performance-Konzept bietet eine Vielzahl von Chancen für Geschäftsmodelle auf dem Weg zur Klimaneutralität von Beton.
- Das Teambuilding zur Anwendung der ONR 23339 (Regeln für die Umsetzung des Konzeptes der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit) ist die Herausforderung: Individuelle Entwicklung und intensive Abstimmung zwischen Planung, Ingenieurkonsulent:innen, Ausschreibung sowie Betonhersteller:innen und Laborüberwachung sind nötig.
- Die Risiken bei der Realisierung betreffen ein neues Leanmanagement zum Hintanhalten von Kosten durch Zeitverzug, bis Performance-Beton zum neuen Alltag der Baustelle wird.

7 Verzeichnisse & Abkürzungen

7.1 Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tab. 1: Klassifizierung CO ₂ -reduzierter Beton zu Referenzbeton im Forschungsprojekt RCC2 (in Klammer sind die Hersteller der jeweiligen Rezepturen für die Versuchsreihen angeführt) | 14 |
| Tab. 2: Maßnahmen-Matrix als Ergebnis des vorangegangenen Projekts RCC | 15 |
| Tab. 3: Ermittelte Karbonatisierungsgeschwindigkeit an den entnommenen Bohrkernen | 37 |
| Tab. 4: Ergebnisse der Ausziehversuche der Anker in den Deckenbauteilen | 39 |

7.2 Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abb. 1: Hauptkomponenten eines Doka Heizschalungssystems | 20 |
| Abb. 2: Bauteil A - das Schalungssystem | 20 |
| Abb. 3: Komponente C - die Anschlussbox..... | 21 |
| Abb. 4: Komponente D - das Anschlusskabel | 21 |
| Abb. 5: Komponente E - die Stromversorgung / der Schaltschrank..... | 21 |
| Abb. 6: Skizze Versuchsaufbau Wandschalung inkl. Positionierung der Concremote-Messstellen; links Ansicht Stirnseite, rechts Ansicht Fläche | 22 |
| Abb. 7: Aufbau Wandschalung auf Trägerrost zum Manövrieren und Umheben mit Gabelstapler; links Ansicht Stirnseite, rechts Ansicht Fläche | 22 |
| Abb. 8: Montage Messstellen an der Bewehrungsmatte, Wand | 23 |
| Abb. 9: Montage Messstellen an der Bewehrungsmatte, Wand | 23 |
| Abb. 10: Skizze Versuchsaufbau Deckenschalung inkl. Positionierung der Concremote-Messstellen; links Ansicht von vorne, rechts Ansicht von der Seite | 23 |
| Abb. 11: Beispiel Aufbau Deckenschalung auf Trägerrost zur Möglichkeit des Manövrierens und Umhebens; links Ansicht von vorne, rechts Ansicht von der Seite | 23 |
| Abb. 12: Messstellen Concremote an Decke | 24 |
| Abb. 13: Versuchsanordnung & Benennung Kühlcontainer/Bauteile Winterversuch RCC2 | 24 |
| Abb. 14: Container auf dem Versuchsgelände | 25 |
| Abb. 15: Schritt 1 = Einfüllen des RCC2+-Betons in Deckenschalung..... | 26 |
| Abb. 16: Schritt 2 = Verdichten des RCC2+-Betons mittels Rüttler..... | 26 |
| Abb. 17: Schritt 3 = Abziehen der Decke RCC2+..... | 26 |
| Abb. 18: Schritt 4 = Aufbringen des Verdunstungsschutzes an der Decke RCC2+ | 26 |
| Abb. 19: Schritt 5 = Auflegen PP-Folie..... | 27 |
| Abb. 20: Schritt 6 = Auflegen Winterschutzmatte | 27 |
| Abb. 21: Einfüllen Beton in Wandschalung..... | 27 |
| Abb. 22: Abdecken unbeheizte Wandschalungen mit Winterbaumatte | 27 |
| Abb. 23: Herstellen Probekörper | 28 |
| Abb. 24: Herstellen Probekörper | 28 |
| Abb. 25: Temperaturverlauf Decken beheizt und unbeheizt mit Umgebungstemperatur im Kühlcontainer | 31 |
| Abb. 26: Temperaturverlauf Wände beheizt und unbeheizt mit Umgebungstemperatur im Kühlcontainer | 31 |
| Abb. 27: Würfeldruckfestigkeit C25/30 für Wände (bei Lagerung im Labor unter Optimalbedingungen) | 33 |
| Abb. 28: Würfeldruckfestigkeit C30/37 für Decken (bei Lagerung im Labor unter Optimalbedingungen) | 33 |
| Abb. 29: Bohrkernentnahme an Wandbauteilen der Rezeptur RCC (Fotocredits: ROMM ZT)..... | 34 |
| Abb. 30: Festbetonprüfung der Bohrkernfestigkeit C25/30 für Wände beheizt und unbeheizt | 35 |
| Abb. 31: Festbetonprüfung der Bohrkernfestigkeit C30/37 für Decken beheizt und unbeheizt..... | 36 |

| | |
|---|----|
| Abb. 32: Ausziehversuche an einem Deckenbauteil der Rezeptur RCC2+ (Fotocredits: ROMM ZT) | 38 |
| Abb. 33: Übersicht der Betonrezepturen im Winterversuch (s. auch Anhang) | 40 |
| Abb. 34: Ökobilanzen der Betonrezepturen für Wände C25/30 mit und ohne heizbare Schalung.. | 43 |
| Abb. 35: Ökobilanzen der Betonrezepturen für Decken C30/37 mit und ohne heizbare Schalung . | 44 |
| Abb. 36: Vergleich des GWP der drei getesteten Betonrezepturen der Festigkeitsklasse C25/30 und C30/37 inkl. Energiezufuhr durch beheizte Schalung | 45 |
| Abb. 37: Abbildung aus EU-Level Indicators: Anteile des CO ₂ -Abdrucks im Lebenszyklus eines Büro-Gebäudes gemäß Europäischen Standards, https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/2021-01/UM3_Indicator_2.3_v1.1_23pp.pdf | 46 |
| Abb. 38: Tagesmitteltemperatur 2023 - Messtation Wien Innere Stadt (Tagesmitteltemperatur ergibt sich aus = tiefste + höchste Temperatur / 2; Datengrundlage: GeoSphere Austria)..... | 48 |
| Abb. 39: Tagesmitteltemperatur 2023 gereiht nach Temperatur - Messtation Wien Innere Stadt (Tagesmitteltemperatur ergibt sich aus = tiefste + höchste Temperatur / 2; Datengrundlage: GeoSphere Austria) | 49 |
| Abb. 40: Tagesmitteltemperaturen in den Jahren 2010 ,2013, 2021, 2023; Messtation Wien Innere Stadt (Tagesmitteltemperatur ergibt sich aus = tiefste + höchste Temperatur / 2; Datengrundlage: GeoSphere Austria) | 49 |
| Abb. 41: Tagesmitteltemperaturen in den Wintermonaten der Jahre 2010, 2013, 2021, 2023 - Messtation Wien Innere Stadt (Tagesmitteltemperatur ergibt sich aus = tiefste + höchste Temperatur / 2; Datengrundlage: GeoSphere Austria)..... | 50 |
| Abb. 42: Öffentlicher Anteil am Bauvolumen in Österreich 2022 lt. WKO | 57 |
| Abb. 43: CO ₂ -Reduktionspotenziale nach Bereichen, <i>Quelle: Roadmap zur CO₂-Neutralität der österreichischen Zementindustrie bis 2050, VÖZ</i> | 58 |
| Abb. 44: Anwendungsskala heizbarer Schalung..... | 61 |
| Abb. 45: Baustellenfoto Projekt SOLEY, Strabag SRE; Einsatz heizbare Schalung und CO ₂ -reduzierter Beton (Fotocredits: Christian Fürthner) | 63 |

7.3 Literaturverzeichnis

Spaun Sebastian, Bauer Cornelia, Dankl Claudia, Friedle Rupert, Papsch Felix: Roadmap zur CO₂-Neutralität der österreichischen Zementindustrie bis 2050. Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ), Wien 2022. https://www.zement.at/downloads/downloads_2022/Roadmap_VOEZ_bis_2050.pdf (abgerufen am 11.03.2024; 14:22)

R. Shukla Priyadarshi, Skea Jim, Slade Raphael, Fradera Roger, Pathak Minal, Al Khourdajie Alaa, Belkacemi Malek, van Diemen Renée, Hasija Apoorva, Lisboa Géninha, Luz Sigoourney, Malley Juliette, McCollum David, Some Shreya, Vyas Purvi: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf (abgerufen am 24.04.2024; 09:55)

Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) UMWELT-PRODUKTDEKLARATION nach ISO 14025 und EN 15804+A1 Beton der Druckfestigkeitsklasse C 25/30, InformationsZentrum Beton, Deutschland, 2018. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/resource/sources/62cc9175-a326-4215-bbbb-5bc6e3467a84/Beton_der_Druckfestigkeitsklasse_C_2530_10614.pdf?version=00.02.000 (abgerufen am 10.07.2023; 12:13)

Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) UMWELT-PRODUKTDEKLARATION nach ISO 14025 und EN 15804+A1 Beton der Druckfestigkeitsklasse C 30/37, InformationsZentrum Beton, Deutschland, 2018. https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/resource/sources/dc600cd9-9a55-414e-baf5-f36c54269803/Beton_der_Druckfestigkeitsklasse_C_3037_10616.pdf?version=00.02.000 (abgerufen am 10.07.2023; 12:42)

8 Abkürzungen

A

AHWZ
aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe 41

B

BMK
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie 4

C

CSS
Carbon Capture and Storage 54

E

EPD
Environmental Product Declaration 40

G

GWP
Global Warming Potential 9

I

IPCC
Intergovernmental Panel on Climate Change 16

O

ONR
Österreichische-Norm-Regel 15

R

RCC
Reduced Carbon Concrete 7

9 Anhang

- Kohlenstoffsinken-Zertifikat Clim@Add – q.inspecta GmbH
- CE-Zertifizierung Clim@Add - Prüf-, Inspektions- und Zertifizierungsstelle Stadt Wien
- Bau-EPD Holcim Österreich GmbH Zementprodukte
- Prüfbericht MPA Hartl GmbH

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

+43 800 21 53 59

servicebuero@bmk.gv.at

bmk.gv.at