

RCC2_MA20 Ergebnisbericht_20231103

Reduced Carbon Concrete 2 (RCC2)

Ökobilanz heizbarer Schalung für CO₂-reduzierte Betone

ERGEBNISBERICHT

MA 20 – 1997855-2022-5
Bestellnummer: 2005956
Kurztitel: RCC2

DI THOMAS ROMM

DI JULIA FLASZYNASKA

MICHAEL KOPP MSc.

Wien, November 2023

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	3
2	Einleitung	7
2.1	Ausgangssituation	7
2.2	Aufgabenstellung und Zielsetzung	10
3	Laborversuche	11
4	Winterversuch	12
4.1	Versuchsvorbereitung	12
4.2	Versuchsaufbau	12
4.2.1	Wandschalung	13
4.2.2	Deckenschalung	14
4.2.3	Container	15
4.3	Versuchsdurchführung	17
4.3.1	Vorbereitung und Betonage	17
4.3.2	Ausschalen & Maßnahmen	19
4.4	Messergebnisse	20
4.4.1	Messungen der Temperaturrentwicklung in den Versuchsbauteilen	20
4.4.2	Festigkeitentwicklung Concremote	22
4.4.3	Würfeldruckfestigkeiten der Probewürfel	22
4.4.4	Bohrkernfestigkeiten Versuchsbauteile	23
4.5	Interpretation der Messergebnisse	25
5	Ökobilanzierung	26
5.1	Betonrezepturen	26
5.2	Darstellung Ökobilanzierung	26
5.3	Ergebnisse der Ökobilanzierung	31
6	Ergebnisskalierung	32
6.1	Abschätzung der CO ₂ -Einsparpotenziale für die durchschnittliche Gesamtbauleistung in Wien.	32
6.2	Bilanzielle Betrachtung, wieviel technischer Kohlenstoff nötig ist, um einer Klimaneutralität von Beton nahe zu kommen	36
6.3	Potenzialabschätzungen für Wien, ob technischer Kohlenstoff in der notwendigen Menge verfügbar ist.	37
7	Anhang	42

1 Kurzfassung

Klinkerreduzierte Rezepturen von Beton haben geringere CO₂-Emission als Standardbeton. Der Nachteil von CO₂-reduziertem Beton (Reduced Carbon Concrete, RCC) ist eine verzögerte Frühfestigkeitsentwicklung, insbesondere bei niedrigen Außentemperaturen. Zufolge des geringeren Bindemittelgehalts ist die Hydratationswärmeentwicklung verhaltener und somit die Festigkeitsentwicklung langsamer. Diese fehlende Energie zu Beginn der Erhärtungsphase kann durch eine beheizbare Schalung ausgeglichen werden. Aber auch eine strombetriebene Beheizung der Schalung verbraucht Energie, deren Erzeugung wiederum CO₂ emittiert. **Daher ist die Ökobilanz von heizbaren Schalungen für klinkerreduzierten Beton ein Schlüssel zur Bewertung der Nachhaltigkeit innovativer RCC-Rezepturen.**

Das im Jahr 2020 vorangegangene und von der MA 20 mitinitiierte Forschungsprojekt Reduced Carbon Concrete (RCC) (GZ 2020-0.657.535) hatte die Erforschung des Baustelleneinsatzes von CO₂-reduziertem Beton durch klinkerreduzierten Zement zum Ziel. Auf die dort formulierten weiterführenden Forschungsfragen zur verbesserten Baustellenpraktik hat sich der Schalungshersteller Doka Österreich GmbH dem Konsortium aus SRE (Strabag Real Estate), Romm ZT, Dr. Ronald Mischek ZT GmbH, bauXund forschung und beratung gmbh und Materialprüfanstalt HARTL GmbH, sowie den Betonherstellern Transportbeton Ges.m.b.H. & Co. Komm. Ges., Holcim Österreich GmbH (ehemals Lafarge Perlmooser) und Wopfinger Transportbeton GmbH angeschlossen, um gemeinsam zur Anwendung innovativer Schalung für RCC-Rezepturen zu forschen. Zeitgleich wurde das Forschungskonsortium um CarStorCon Technologies GmbH, dem Hersteller des innovativen Stoffs Clim@Add® auf Basis von technischem Kohlenstoff erweitert, mit dem Ziel die Potenziale von Beton als CO₂-Senke zu untersuchen. Ein Kilogramm Clim@Add® speichert 2,9 kg CO₂ eq (s. Zertifikat Kap. 7 Anhang).

Ziel dieser ebenfalls von der MA 20 angestoßenen und mittlerweile FFG-geförderten Fortsetzung des Forschungsprojektes ist es, mit einer Ökobilanzierung einen Beitrag bei der Etablierung von CO₂-reduziertem bis hin zum bilanziell klimaneutralen Beton als neuen Stand der Technik zu leisten. Ausgelotet werden sollte, wie diese innovativen Rezepturen eines CO₂-reduzierten Betons zum Stand der Technik weiterentwickelt werden können und inwieweit zusätzlich durch die Zugabe von technischem Kohlenstoff ein Beitrag zur bilanziellen Klimaneutralität von Beton praxistauglich umgesetzt werden kann. Dies soll gegenständlich mit Hilfe eines von Doka zu entwickelnden Prototypen einer heizbaren Schalung in Kombination mit dem Monitoringsystem der Bauteiltemperatur von Doka (Concremote) auf der Baustelle überprüft werden.

Um die klimaabhängigen Einflüsse bewerten zu können, wurden je zwei Versuchsreihen mit CO₂-reduzierten Betonbauteilen durchgeführt – eine im Sommer und eine im Winter. Die Sommerversuche lieferten Referenzwerte für die erfolgssensiblen Winterversuche. Jede Versuchsreihe umfasste je 3 Rezepturen von:

1. Standardbeton (regionaler Referenzbeton),
2. eine CO₂-reduzierte Betonrezeptur (RCC2),
3. eine CO₂-reduzierte Betonrezeptur mit technischem Kohlenstoff (RCC2+).

Sowohl für die Sommer- als auch für die Winterversuchsreihe wurden für je drei Rezepturen jeweils zwei Wand- und zwei Deckenbauteile hergestellt. Alle Bauteile wurden mithilfe des Betonmonitoringsystems Concremote (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). Da aber die Frühfestigkeitsentwicklung bei klinkerreduziertem Beton vor allem bei niedrigeren Temperaturen langsamer voranschreitet, wurden im Winterversuch ein Bauteil je Rezeptur mit und ein Bauteil ohne Heizschalung errichtet, um bei den Testbauteilen einen direkten Vergleich anstellen zu können. Die Sommerversuchsreihe wurde im Oktober 2022 mit Unterstützung der MA 20 und unter Erbringung erheblicher Eigenleistung der beteiligten Unternehmen des Forschungskonsortiums erfolgreich abgeschlossen.

Gegenstand des vorliegenden Ergebnisberichtes ist nun die Dokumentation der Durchführung und der Erkenntnisse des Wissenszuwachs der entscheidenden Winterversuchsreihe mit heizbarer Schalung, die für den Versuch prototypisch entwickelt wurde. Dieser Ergebnisbericht für die MA 20 wird somit vertragsbedingt noch vor dem für April 2024 geplanten Abschluss des FFG-Förderprojektes „*RCC2 Ökobilanz heizbarer Schalung für CO₂-reduzierten und klimaneutralen Beton*“ Projektnummer: FO999901734 vorgelegt.

Ausgangspunkt für die Winterversuche sind die Referenzwerte der Sommerreihe mit folgender Erkenntnis:

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

Die Rezepturen aus dem Sommerversuch wurden dann für den Winterversuch bei der Einstellung der Umgebungstemperatur auf -5°C in Kühlcontainern mit einer heizbaren Schalung und einer konventionellen Schalung getestet und ökobilanziert. Die Versuchsanordnung wurde auf sechs Kühlcontainer aufgeteilt, um von Witterung und Außentemperaturschwankungen unabhängige, kontrollierte Bedingungen gewährleisten zu können. So konnten das für die Region annehmbar ungünstigste Szenario von Klimabedingungen mit konstant tiefen Durchschnittstemperaturen unter 0°C geschaffen werden. Die doppelseitig mit heizbaren Schalungen beheizten Wandelemente konnten baufortschrittsoptimiert nach 24 Stunden wieder ausgeschaltet werden. Die Deckenelemente wurden einseitig beheizt und auf der Oberfläche mit einem Verdunstungsschutz nachbehandelt und mit einer handelsüblichen Winterbaumatte abgedeckt. Die Deckenschalung verbleibt wie gewöhnlich auch unter Baustellenbedingungen als tragende Schalung bis zu drei Wochen eingeschalt und unterstellt.

Die Ökobilanz für Wände in Beton der Festigkeitsklasse C25/30 und für Decken mit der Festigkeitsklasse C30/37 ist sowohl von der Rezeptur als auch von der Heizdauer sehr verschieden (s. Abb. 1). Im Vergleich zu einem regionalen Referenzbeton mit einer herkömmlichen Rezeptur fällt für das Worst-Case-Szenario mit Außentemperaturen unter

RCC2_MA20 Ergebnisbericht_20231103

0°C die Ökobilanz des klinkerreduzierten Betons (RCC2) mit einer CO₂-Reduktion von 14 % (Wände) bzw. 16 % (Decken) und ohne heizbare Schalung mit einer CO₂-Reduktion von 24 % (Wände) bzw. 29 % (Decken) relativ homogen aus: Die Heizung mit österreichischem Strommix verringert die CO₂-Einsparung durch die Klinkerreduktion bilanziell um die Hälfte.

Anders ist dies bei CO₂-reduziertem Beton mit Beigabe von technischem Kohlenstoff (RCC2+). Hier wurde von vorneherein für das Wandelement mit 20 kg/m³ weniger Kohlenstoff in den Beton als in das Deckenelement gegeben. Das übliche Ausschalen nach 24 h war für die Wand aus RCC2+ bei niedrigen Temperaturen ein Risikofaktor. Dagegen kann das Deckenelement aufgrund der längeren Schalzeit mit dem Zusatz von 30 kg/m³ ohne vergleichbares Risiko ein Drittel mehr technischen Kohlenstoff enthalten. Ohne Heizung liegt das Potenzial der CO₂-Reduktion von RCC2+ gegenüber dem Referenzbeton bei über 60 % für Wände und bei etwa 80 % für Decken. Mit heizbarer Schalung bei winterlichen Temperaturen, liegt das Potenzial der CO₂-Reduktion von RCC2+ bei 54 % für Wände und bei 67 % für Decken (s. Abb. 1). Die Heizung der Schalung konsumiert also nur noch einen geringen Teil, etwa ein Fünftel der rezepturbedingten CO₂-Einsparung.
Der CO₂-Ausstoß der strombeheizten Schalung¹ verringert jedenfalls die CO₂-Reduktion durch die Betonrezepturen in der Größenordnung von 10-13 % des GWP.

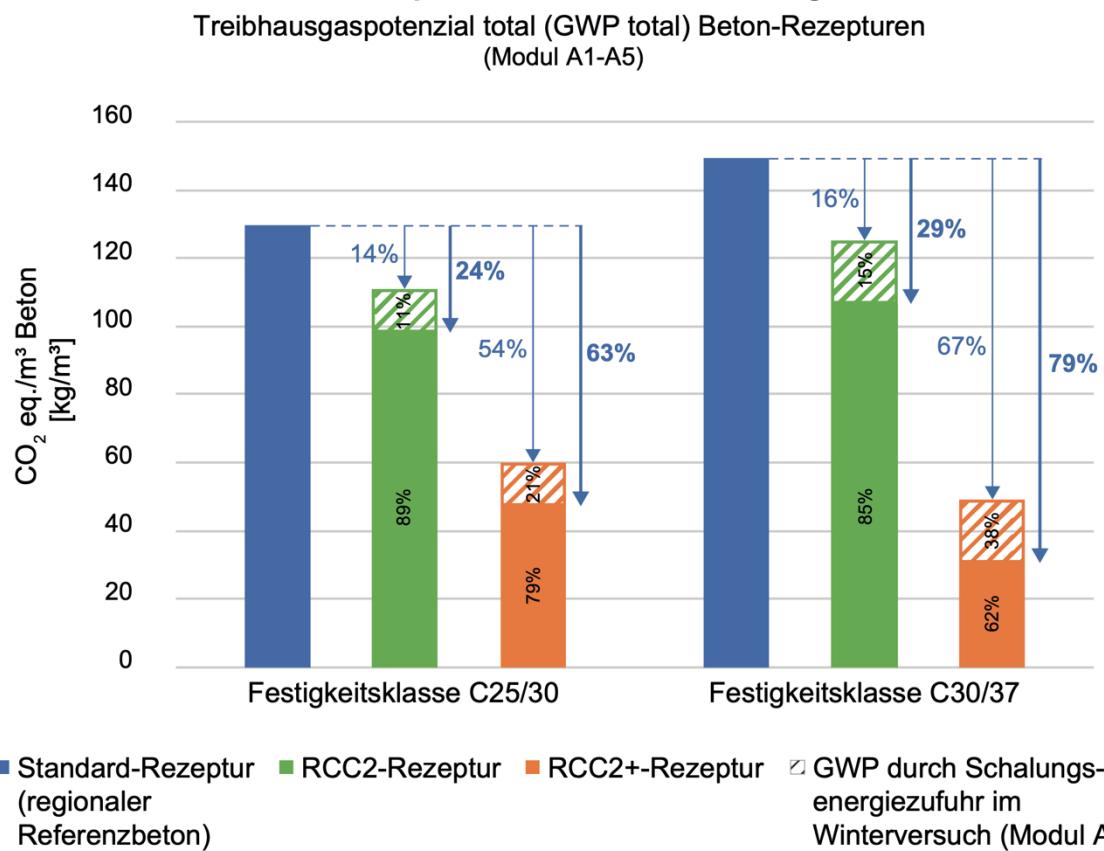


Abb. 1: Ökobilanzierte CO₂-Reduktion von Performancebeton (RCC) mit heizbarer Schalung

¹ Bei einer Heizleistung von 300 - 450 W/m² und Umgebungstemperaturen zw. -5°C und 0°C im Versuchsaufbau.

RCC2_MA20 Ergebnisbericht_20231103

Die Versuche mit innovativer heizbarer Schalung schaffen eine wichtige Perspektive auf einen branchenweiten Einsatz von CO₂-reduziertem und bilanziell klimaneutralen Beton. Dies bedeutet die Möglichkeit einer Etablierung von Klimaschutzz Zielen mit Performancebeton als neuen Stand der Technik ohne einen normativ festgelegten Mindestbindemittelgehalt. Das Performancekonzept 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 W/B Wert an. 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 mit der Nachweisführung gemäß ONR 23339 ist der anrechenbare Mindestbindemittelgehalt durch den Nachweis der gleichwertigen Leistungsfähigkeit hinfällig, so dass CO₂-reduzierter Performancebeton als zugelassener Baustoff zur Anwendung kommen kann. **Hier müssen wir klar differenzieren, dass wir nicht nur von klinkerreduzierten Betonrezepturen sprechen, sondern von Performance-Betonen, die bei Nachweis gleicher Leistungsfähigkeit vom Mindestbindemittelhalt deutlich abweichen dürfen.**

Eine heizbare Schalung ist in der Lage, bei geringen Außentemperaturen die Hydratation bindemittelreduzierten Betons mit geringerer Eigenwärmeeentwicklung 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. Motivierend ist dabei die branchenweite Relevanz, unnötige Umweltbelastungen mit wissensbasierter Sorgfalt hintan halten zu können und perspektivisch die Heizleistung mit der Monitoringtechnologie der Bauteiltemperatur regeltechnisch verbinden zu können. Insbesondere die klinkerreduzierten Rezepturen mit Beigabe von technischem Kohlenstoff sind auch trotz beheizter Schalung in der Lage, Beton bilanziell klimaneutral zu machen, da die Schalungsheizung nur 10% der CO₂-Reduktion ausmacht. Es muss allerdings dezidiert darauf hingewiesen werden, dass das Forschungsprojekt der *Ökobilanzierung einer heizbaren Schalung für CO₂-reduzierten Beton* es nicht zur Aufgabe hat, die notwendigen betontechnologische Untersuchungen für die Beigaben von großen Mengen technischen Kohlenstoffs zu machen. Diese Untersuchungen 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.

RCC2_MA20 Ergebnisbericht_20231103

2 Einleitung

Ziel des vorliegenden Ergebnisberichtes zur Forschung an der Dekarbonisierung von Beton ist es, die Ergebnisse der durch die MA 20 angestoßenen und von der FFG ausfinanzierten Forschung (*RCC2 Ökobilanz heizbarer Schalung für CO₂-reduzierten und klimaneutralen Beton“ Projektnummer: FO999901734*), wie sie zum Zeitpunkt Ende Oktober 2023 vorliegen, zusammenzufassen. Offen sind zu diesem Zeitpunkt, sechs Monate vor dem offiziellen Abschluss des FFG-Forschungsprojektes, noch folgende Punkte:

- Die Interpretation der Messergebnisse mit Ausblick auf offene Forschungsfragen.
- Die Erstellung einer Ökobilanz von CO₂-reduziertem Beton mit heizbarer Schalung, in Bezug auf einen ganzjährigen Einsatz dieser Rezepturen überwiegend ohne beheizbare Schalung.
- Die Dissemination der Ergebnisse.
- Die Vorlage des Endberichtes bis April 2024.

Der vorliegende Ergebnisbericht gliedert sich entsprechend des Fördervertrages in

- Aussagen zu den Laborversuchen (Kapitel 3),
- den Winterversuch unter Baustellenbedingungen samt Interpretation der Ergebnisse (Kapitel 4),
- die Ökobilanzierung der Rezepturen aus dem Winterversuch (Kapitel 5) und
- die Skalierung der Resultate (Kapitel 6).

Die Ergebnisse aus dem Sommerversuch wurden bereits im Zwischenbericht vom November 2022 ausführlich erläutert. Daher thematisiert dieser Abschlussbericht vor allem die erfolgskritischen Erkenntnisse aus dem Winterversuch. Der Bericht nimmt nur dort, wo es zum Verständnis erforderlich ist, Bezug auf die Ergebnisse der Sommerversuche, die zur Kalibrierung und Referenzbildung der erfolgskritischen Winterversuche notwendig waren.

2.1 Ausgangssituation

Ausgangspunkt des Projektes sind europaweite Bemühungen einer Dekarbonisierung der Bauwirtschaft, die unweigerlich mit einer Ökologisierung des meistverwendeten Baustoffes verbunden sind: Beton. Wobei perspektivisch das Potenzial ausgelotet werden soll, wie 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 Performancebeton durch klinkerreduzierte Bindemittel zum Ziel. Dabei wurden Rezepturen mit geringerem Bindemittelanteil, als nach deskriptivem Ansatz normativ lt. ÖN B 4710-1 erforderlich,

erforscht, um den Nachweis über das Konzept der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit, das Performancekonzept zu erbringen und dieses unterstützend in die Praxis zu überführen. Das Forschungsprojekt RCC kam zu dem Ergebnis, dass erwartungsgemäß die Frühfestigkeitsentwicklung eines klinkerreduzierten Betons vor allem im Winterfall temperaturabhängig verlangsamt ist. Eine verringerte Frühfestigkeit bedingt längere Schalzeiten und unter Umständen einen erhöhten Bedarf an Schalungsmaterial auf der Baustelle sowie einer verlängerten Nachbehandlung, was insgesamt zu Bauzeitverlängerung und erheblichen Mehrkosten führen kann. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurden folgende drei weiterführende Forschungsfragen 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?

Erfreulicherweise konnte sich das Konsortium auf ein gemeinsames Vorgehen im erweiterten Kreis einigen, sodass die Forschungsgruppe um die Unternehmen Doka Österreich GmbH, Holcim Österreich GmbH, Transportbeton GesmbH & Co KG und CarStorCon Technologies GmbH erweitert wurde. Damit sind einerseits repräsentative Experten der österreichischen Betonbranche, die gemeinsam an der Umsetzung der normativen Grundlage für Performancebeton (ONR 23339) arbeiten sowie auch ein Unternehmen, das Technologien zum langfristigen Passivieren von technischem Kohlenstoff entwickelt im Konsortium vertreten.

Aufbauend auf dem Forschungsprojekt RCC werden für das vorliegende Projekt RCC 2 folgende Ziele festgehalten:

- Ausloten der möglichen Reduktion der grauen Energie von Beton und mögliche Kompensation der THG-Emissionen durch CO₂-bindende Zusatzstoffe.
- Ökobilanz einer von Doka neu zu entwickelnden, beheizten Betonschalung für verschiedene Rezepturen von Performancebeton.
- CO₂-reduzierte Rezepturen für Versuchsreihen auf der Baustelle auf Basis von Vorversuchen im Labor.
- Rezepturen und Referenzwerte für den kritischen Winterversuch werden im Sommer ermittelt.
- Optimierung kurzer Ausschafffristen mittels beheizter Schalung.
- Detailliertes messtechnisches und bautechnisches Konzept für den Einsatz beheizter Schalung auf der Baustelle für verschiedene Bauteile (Decken, Wände).
- Heizschalung für Wandelemente als Ersatz von Nachbehandlung.
- Anwendung von verschiedenen firmenspezifischen Bindemittelersatzstoffen für CO₂-reduzierten Beton (Reduktion des Klinkeranteils).
- Entwicklung verschiedener Prototypen von Heizschaltungselementen, möglicherweise in Interaktion mit Produktlösungen wie des Monitoringsystems Concremote (Doka).

Der Einsatz von beheizter Schalung mit dem Ziel der verbesserten Frühfestigkeitsentwicklung von Performancebeton bedarf elektrischer Energie. Im Forschungsprojekt wurde in den einzelnen Versuchsreihen ermittelt, wie hoch dieser Stromverbrauch ist. Die Ökobilanzierung ermittelt nun, in welchem Verhältnis die Emissionen aus dem Energiebedarf der Heizschalung bei mittleren Umgebungstemperaturen von -5°C - 0°C zur Einsparung von

RCC2_MA20 Ergebnisbericht_20231103

CO₂ durch Performancerezepturen stehen. Dabei wurden für die Ökobilanzierung der Heizung die Emissionsfaktoren des österreichischen Strommix herangezogen (s. Kapitel 5 Ökobilanzierung).

Die CO₂ Einsparungspotenziale durch den Einsatz klinkerreduzierten Zements werden im großen Maßstab (z.B. Gesamtbauleistung in Wien) in Kapitel 6 Ergebnisskalierung hochgerechnet. Vor allem die mit Anfang 2023 veröffentlichte normative Grundlage der ONR 23339 „Regeln für die Umsetzung des Konzepts der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit“ soll den Weg für den Einsatz von Performancebeton als Stand der Technik ebnen.

Neben der Reduktion von Zement ist auch der Einsatz von technischem Kohlenstoff als CO₂-Senke im Beton untersucht worden. Eine bilanzielle Betrachtung stellt dar, welche Menge an technischem Kohlenstoff nötig ist, um einer bilanziellen Klimaneutralität von Beton nahe zu kommen und welche Betone für diese Anwendung in Frage kommen. An dieser Stelle galt es auch zu klären, wieviel technischer Kohlenstoff derzeit bereits in emissionsfreien Kraftwärme-Kopplungen hergestellt wird und in welchem Umfang diese für die Herstellung von Beton als CO₂-Senke zur Verfügung stehen wird. Etwa 10% des Heizwertes eines Hackguts werden für die Herstellung der Kohle gebunden, 55% Energie und 35% Wärme entstehen bei der Holzvergasung (Pyrolyse).

Im aktuellen 6. Sachstandsbericht des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) der 2. Arbeitsgruppe wird der Begriff *biochar* (Biopflanzenkohle) im Zusammenhang mit CDR, also *carbon dioxide removal* insgesamt 203-mal genannt. Wesentlich ist aber, dass Biopflanzenkohle 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.² Damit ist es wahrscheinlich, dass technischer Kohlenstoff aus emissionsnegativer Strom- und Wärme-gewinnung auch Teil der am schnellsten zu implementierenden CO₂-Senken sein wird.

Die Motivation, das Konzept in einem Bauprojekt umzusetzen, muss durch die experimentelle Erprobung auf der Baustelle gestützt werden. Ausschafffristen und Nachbehandlung können im Konzept für die gleichwertige Betonleistungsfähigkeit (Equivalent Concrete Performance Concept) ECPC 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. Dabei ist die Qualität einer innovativen Schalung entscheidend. Innovative Schalung ist in der Lage, Qualität und Sicherheit bei Bauprojekten zu unterstützen und zu fördern.

Folgender Versuchsablauf wurde gewählt:

1. September 2022: Labortestungen der jeweiligen Betonhersteller zur Erprobung von Rezepturen für die Baustellenversuche.

² IPCC, *Climate Change 2022, Mitigation of Climate Change*, S. 643,
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf

2. Oktober 2022: Betonierarbeiten mit den zuvor im Labor getesteten Rezepturen, um den Sommerfall großtechnisch zu erproben.
3. November 2022 bis April 2023: Konzeption der Versuchsabfolge, Planung der Schalungsanordnung, Bauteilstatik und Logistikanforderungen entsprechend der verfügbaren Hebefahrzeuge.
4. Mai 2023: Betonierarbeiten in Kühlcontainern mit den zuvor im Labor getesteten und im Sommerversuch 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.

2.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Im Sommerversuch wurde im Grenzgang des Möglichen einer klima-neutralen Betonrezeptur bewusst ein Scheitern der ausreichenden Festigkeitsentwicklung nach 28 Tagen von Bauteilen in Kauf genommen. Im Winterversuch aber wurde mit zunehmender Komplexität der Fokus mehr auf die Wirksamkeit einer heizbaren Schalung gelegt, um gesicherte Erkenntnisse erzielen zu können.

Aufbauend auf den Zielen aus dem Sommerversuch sind die Ziele des Winterversuchs:

- Optimierung der Rezepturen aus dem Sommerversuch in Laborversuchen – insbesondere der Rezepturen mit technischem Kohlenstoff, deren W/B-Wert problematisch war.
- Einsatz von verschiedenen Bindemittlersatzstoffen für CO₂-reduzierten Beton (Sommer- und Winterversuch).
- Erprobung der Entwicklung einer heizbaren Betonschalung für verschiedene Rezepturen von Performancebeton.
- Ökobilanz einer heizbaren Schalung auf Basis der von Doka entwickelten Produkte.
- Optimierung kurzer Ausschafffristen 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 Performancebetone bei tiefen Temperaturen und Beurteilung der Wirksamkeit sowie der Anwendung der beheizten Schalung als praxisrelevante Möglichkeit energieeffizienter Umsetzung der Vorgaben.

Die nachstehenden Forschungsfragen sind lt. Fördervertrag mit der MA 20 zu klären:

- Wie kann das Projekt bzw. die Ergebnisse aus dem Projekt zur Dekarbonisierung der Bauwirtschaft sowie zum Erreichen der Wiener Klima- und Energieziele beitragen?
- Wie kann das Projekt dazu beitragen, die Emissionen, die durch den Wiener Bausektor verursacht werden, weiter zu reduzieren?
- Wie schlagen sich die Maßnahmen in der ökologischen Gesamtbilanzierung nieder?
- Potenzialabschätzungen der CO₂-Einsparung durch den reduzierten Klinkereinsatz bei Beton für die durchschnittliche Gesamtbauleistung in Wien.

RCC2_MA20 Ergebnisbericht_20231103

3 Laborversuche

Die Rezepturen aus dem Sommerversuch wurden für den Winterversuch weiter angepasst. So gab es bei der Rezeptur mit technischem Kohlenstoff (RCC2+) seitens Transportbeton GmbH in Zusammenarbeit mit der CarStorCon Technologies GmbH, dem Hersteller des technischen Kohlenstoffs, Anpassungen des Wasserbindemittelwertes, da der RCC2+ Beton im Sommerversuch die erforderlichen Festigkeiten nach 28 Tagen teilweise nicht erreicht hatte. Beide Kohle-Rezepturen für Decke und Wand waren im Sommerversuch zäh fließfähig und somit schwer zu verarbeiten.

Im Vergleich zum Sommerversuch einigte man sich für den Winterversuch auf die Verwendung des CEM II/A-S 42,5R in der RCC2+ Rezeptur. Darüber hinaus musste der Anteil an Zement geringfügig angehoben werden, um die entsprechende Qualität und Performance zu erreichen. Von der im Sommerversuch definierten Zielsetzung, für die RCC2+ Rezeptur Netto-Null CO₂-Emissionen zu erreichen, wurde also für den Winterversuch Abstand genommen. Die Gefahr des Scheiterns, die mit der ambitionierten Rezeptur im Sommer schon sichtbar wurde, sollte im Winterversuch nicht noch weiter herausgefordert werden.

Weitere Laborversuche waren nicht nötig. Alle anderen Rezepturen konnten für den Winterversuch unverändert bleiben.

Zudem sollte festgestellt werden, ob die heizbare Schalung die Frühfestigkeitsentwicklung bei Temperaturen unter 0°C überhaupt ausreichend unterstützen kann.

4 Winterversuch

4.1 Versuchsvorbereitung

Im Vorfeld des Winterversuchs fanden im Dezember 2022 erste Vorversuche auf dem Gelände von Doka in Amstetten statt. Ziel war die Überprüfung der Funktionalität einer beheizten Schalung von Doka. Die Vorversuche wurden zunächst mit konventionellen Rezepturen durchgeführt. Der Nachweis der Praktikabilität dieser beheizten Schalung ist unabhängig von der Rezeptur ein Erfordernis für Regionen, in denen regelmäßig kalte Witterungsbedingungen auftreten. Diese Vorversuche wurden in einem Kühlcontainer durchgeführt, um konstant niedrige Temperaturen unter 0°C zu gewährleisten. Die positiven Erfahrungen mit diesem Test-Setup waren dann auch Anlass, die weiterführenden Versuche im Projekt RCC2 mit dieser Versuchsanordnung umzusetzen und somit zu gewährleisten, dass für die Region realistische tiefe Durchschnittstemperaturen unter 0°C auf die Dauer der Versuchsdurchführung vorgehalten werden können.

Aufgrund der Logistik und der erforderlichen Besicherung der Kühlcontainer wurde davon Abstand genommen, den Versuch so wie im Sommer auf dem Baugrund in der Leystraße durchzuführen. Das gesicherte Gelände des Fertigteilwerks der Mischek Systembau GmbH mit befestigten Außenanlagen und lokal verfügbarem Personal bot sich an, den Winterversuch in Gerasdorf bei Wien durchzuführen.

Analog zum Sommerversuch wurden auch im Winterversuch 3 Rezepturen in jeweils der Festigkeitsklasse C25/30 (Wand) und C30/37 (Decke) getestet:

- Normalbeton/Standardbeton (regionaler Referenzbeton)
- RCC2 Beton klinkerreduziert
- RCC2+ Beton klinkerreduziert inkl. technischem Kohlenstoff

Diese Mischungen orientierten sich an den Rezepturen aus dem Sommerversuch, wurden für die Rezeptur RCC2+ (inkl. techn. Kohlenstoff) geringfügig angepasst (s. Kapitel 3).

4.2 Versuchsaufbau

Mit jeder Rezeptur wurde jeweils ein Bauteil in unbeheizter und ein Bauteil in beheizter Schalung ausgeführt. Insgesamt wurden somit 12 Bauteile hergestellt. Die Wände wurden in der Schalung von zwei Seiten, die Decken nur von unten beheizt.

Die Versuchsbauten 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 einer Bauteilstärke von 0,18 m (s. Abb. 2). Die Deckenbauteile bestehen aus einem Doka Dek Element mit den Maßen: 1,22 x 2,44 und einer Bauteilstärke von 0,2 m (s. Abb. 6). Die Schalungen jedes Bauteils wurden jeweils mit Concremote Messkabeln mit 3 Messpunkten ausgestattet, die ein Echtzeit-Monitoring der Bauteiltemperaturen ermöglichten.

RCC2_MA20 Ergebnisbericht_20231103

4.2.1 Wandschalung

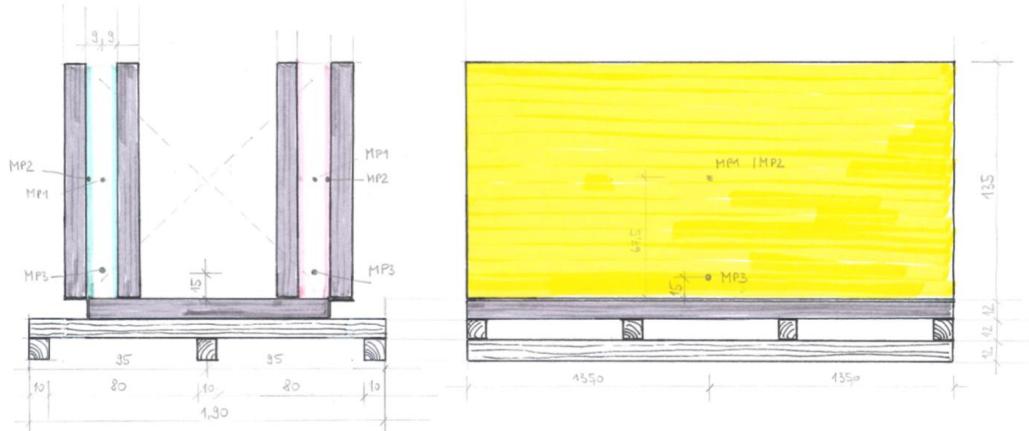


Abb. 2: Skizze Versuchsaufbau Wandschalung inkl. Positionen Messstellen Concremote; links Ansicht Stirnseite, rechts Ansicht Fläche



Abb. 3: Aufbau Wandschalung auf Trägerrost für Manövrieren und Umheben mit Gabelstapler; links Ansicht Stirnseite, rechts Ansicht Fläche

RCC2_MA20 Ergebnisbericht_20231103

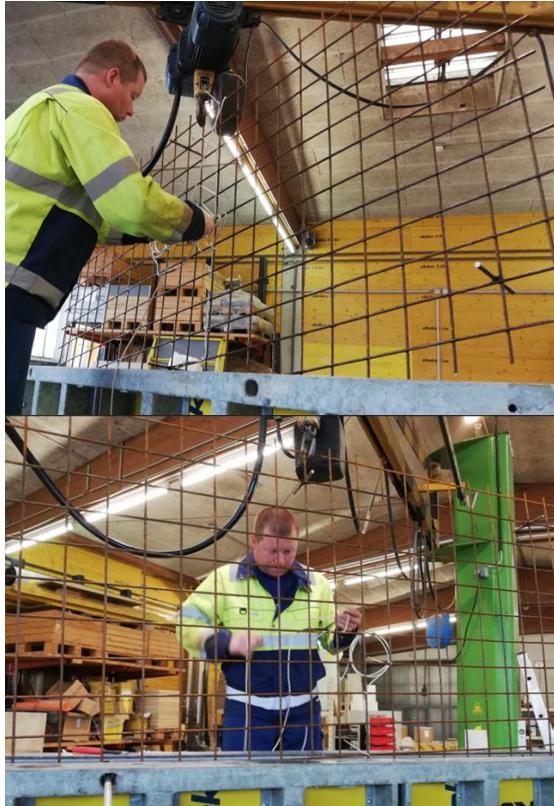


Abb. 5: Montage Messstellen an der Bewehrungsmatte, Wand



Abb. 4: Messstellen an der Bewehrungsmatte, Wand

4.2.2 Deckenschalung

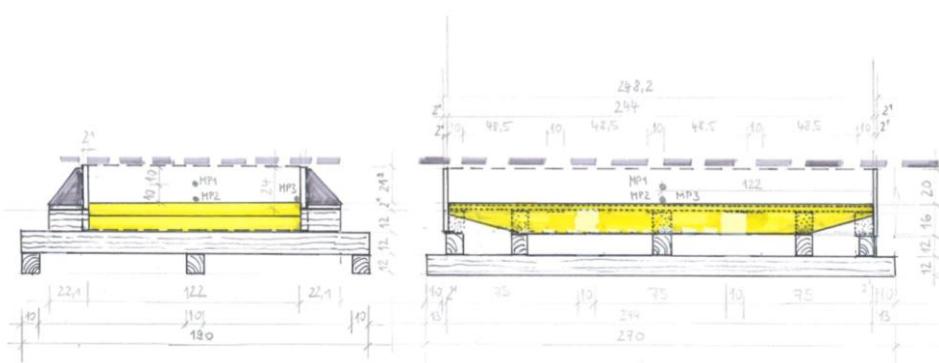


Abb. 6: Skizze Versuchsaufbau Deckenschalung inkl. Positionen Messstellen Concreremote; links Ansicht von vorne, rechts Ansicht von der Seite

RCC2_MA20 Ergebnisbericht_20231103

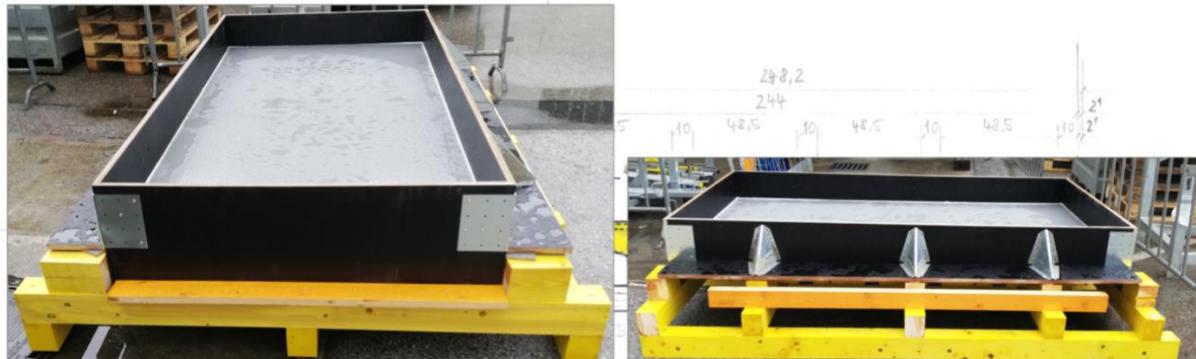


Abb. 7: Beispiel Aufbau Deckenschalung auf Trägerrost zur Möglichkeit des Manövrierens und Umhebens; links Ansicht von vorne, rechts Ansicht von der Seite



Abb. 8: Messstellen Concreremote an Decke



Abb. 9: Messstellen Concreremote an Decke

4.2.3 Container

Die Bauteile wurden in insgesamt 6 Containern gelagert. Die Wandschalungen wurden im Container, um Platz zu sparen nebeneinander angeordnet, die Deckenelemente hintereinander (s. Abb. 10). In den Containern mit ungerader Zahl wurden die Decken platziert, in denen mit gerader Zahl die Wände.

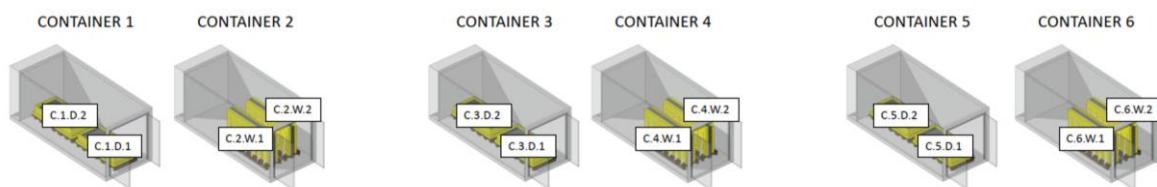


Abb. 10: Versuchsanordnung & Benennung Container/Bauteile Winterversuch RCC2

Der Benennungscode der Bauteile folgte der Containerbezeichnung. Somit konnten die Bauteile den jeweiligen Containern zugeordnet werden.

Benennung Bauteile / Container:

- C.1.D.1: Container 1, RCC2+ – Transportbeton, beheizte Schalung (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 Mischung in jeweils unbeheizter und beheizter Schalung gegossen. Im Container 2 befanden sich nur unbeheizte Wandschalungen (C.2.W.1 und C.2.W.2), allerdings mit unterschiedlichen Betonmischungen (RCC2+ und RCC2), in Container 4 nur die beheizten Wandschalungen (C.4.W.1 und C.4.W.2) mit den entsprechenden Betonmischungen von Container 2 (RCC2+ und RCC2). Dieser Aufbau wurde gewählt, um die Kühlcontainertemperatur bei Bedarf anpassen zu können, ohne die Standardversion bzw. die beheizte Version zu beeinflussen. Zusätzlich konnte so ein Einfluss der beheizten Schalung auf den unbeheizten Versuchsaufbau ausgeschlossen werden.



Abb. 11: Container auf dem Versuchsgelände

RCC2_MA20 Ergebnisbericht_20231103

4.3 Versuchsdurchführung

4.3.1 Vorbereitung und Betonage

Der Versuch startete am 04.05.2023 mit der Anlieferung der Schalung seitens Doka (Decken, Wände als fertig montierte Schalung) inkl. Messkabel und Platten zum Auslegen der Kühlcontainer auf das Werksgelände der Mischek Systembau GmbH. Sowohl die Wandschalung als auch die Deckenschalung waren bereits vorab von Doka inkl. Bewehrungsmatten & Sensoren (Concremote) auf dem Werksgelände montiert worden.

Am 08.05.2023 wurden die 6 Container geliefert und auf -5°C gekühlt. Die Betonage erfolgte am 10.05.2023. Die Schalungen waren bereits am Vortag in den kühlen Containern gelagert worden, um die winterlichen Bedingungen auf der Baustelle zu simulieren. Die Steuerungselemente an den beheizten Schalungen wurden jeweils ca. eine Stunde vor Betonage eingeschaltet.

Die Anlieferung der Transportbetone erfolgte nach einem Zeitplan im 30-Minuten-Takt. Nach dem Befüllen der Schalungen wurden sowohl die Decken als auch die Wände mittels Rüttler verdichtet (s. Abb. 13). In einem weiteren Schritt wurden die Decken abgezogen (s. Abb. 14). Auf die Decken mit Normalbeton wurde gemäß ÖN B 4710-1 als Nachbehandlung ein Verdunstungsschutz mit 2-maligem Sprühauflauf lt. Herstellerangabe und auf die Decken RCC2 und RCC2+ lt. ONR 23339 ein Verdunstungsschutz mit 2-maligem Sprühauflauf mit der 1,5-fachen Menge lt. Herstellerangabe aufgetragen (s. Abb. 15). Anschließend wurden die Decken mittels Stapler in den jeweiligen Kühlcontainer gehoben und mit einer Lage PP-Folie und Winterdämmematte abgedeckt (s. Abb. 16 u. Abb. 17).

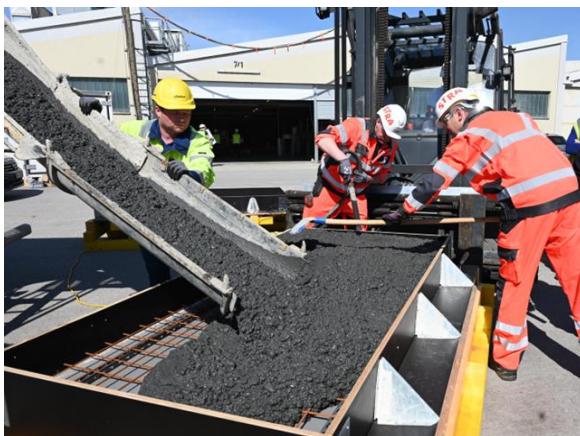


Abb. 12: Schritt 1 = Einfüllen des RCC2+-Betons in Deckenschalung



Abb. 13: Schritt 2 = Verdichten des RCC2+-Betons mittels Rüttler

RCC2_MA20 Ergebnisbericht_20231103



Abb. 14: Schritt 3 = Abziehen der Decke RCC2



Abb. 15: Schritt 4 = Aufbringen des Verdunstungsschutzes an der Decke RCC2+



Abb. 16: Schritt 5 = Auflegen PP-Folie



Abb. 17: Schritt 6 = Auflegen Winterschutzmatte

Die unbeheizten Wandschalungen wurden nach dem Einheben in den Container in Winterschutzmatten verpackt (s. Abb. 19). Die beheizten Wandschalungen wurden nicht abgedeckt, da ein Vorversuch gezeigt hat, dass das Abdecken in diesem Fall keine Verbesserung bezüglich Rückhalten der Wärme bringt.

RCC2_MA20 Ergebnisbericht_20231103



Abb. 18: Einfüllen Beton in Wandschalung



Abb. 19: Abdecken unbeheizte Wandschalungen mit Winterbaumatte

Zur Messung der Festigkeiten der Betonrezepturen im Labor wurden Probekörper hergestellt (s. Abb. 20 & Abb. 21). Zur Prüfung der Festigkeitsentwicklung der Bauteile im Container wurden für das Prüfprogramm regelmäßig Bohrkerne entnommen.



Abb. 20: Herstellen Probekörper



Abb. 21: Herstellen Probekörper

4.3.2 Ausschalen & Maßnahmen

Die Wände C.6.W.1 und C.6.W.2 (Normalbeton beheizt und unbeheizt) konnten nach ca. 20 Std., die Wände C.4.W.1 sowie C.4.W.2 (RCC2 und RCC2+ beheizt) nach ca. 24 Std. also bereits am nächsten Tag ausgeschalt werden. Nach dem Ausschalen wurden die Wände mit einer Lage Winterbaumatte lt. ONR 23339 Tab. 7 eingepackt. Sämtliche Wände in beheizter Schalung wurden bis zum Ausschalzeitpunkt beheizt. Die Decken verblieben in der (heizbaren) Schalung wie unter Baustellenbedingungen.

Aufgrund der kalten Temperaturen in den Containern ist die Oberflächentemperatur bei den unbeheizten Bauteilen bereits einige Stunden nach Betonage auf knapp 3°C bzw. unter 3°C gesunken. Gemäß der normativen Vorgabe wurden Maßnahmen wie das Anheben der

RCC2_MA20 Ergebnisbericht_20231103

Umgebungstemperatur in einzelnen Containern bzw. das Beheizen eigentlich unbeheizter Bauteile mittels heizbarer Schalung ergriffen, um zu verhindern, dass der junge Betone in der Schutzzeit (Zeit bis zum Erreichen der Gefrierbeständigkeit von 5 N/mm²) unter 3°C absinkt und dadurch Frostschäden erleidet. Im folgenden Kapitel 4.4 Messergebnisse werden diese Maßnahmen detailliert beschrieben und mit den Messergebnissen in Kontext gestellt.

4.4 Messergebnisse

Bei den Ergebnissen werden vier 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 werden (Kalibrierung Concremote),
3. Würfeldruckfestigkeiten, die an Probewürfeln im Labor ermittelt werden,
4. Bohrkernfestigkeiten der Versuchsbauten, die im Labor ermittelt werden.

4.4.1 Messungen der Temperaturentwicklung in den Versuchsbauten

Die Messergebnisse variieren je nach Lage im Bauteil. Um den für die Hydratation ungünstigsten Fall abzubilden, werden die gemessenen Temperaturen an den kältesten Messstellen dargestellt.

Leider mussten gemäß der normativen Vorgabe teilweise Maßnahmen getroffen werden, die zur Verfälschung bzw. zur erschwerten Interpretation der Messergebnisse geführt haben. Insbesondere musste das Auffrieren und damit die Zerstörung des Betons nach dem Ausschalen einiger Bauteile, insbesondere der nicht beheizten Bauteile, verhindert werden. Da die Betontemperatur an der Oberfläche aller unbeheizten Decken in der Schutzzeit (Zeit bis zum Erreichen der Gefrierbeständigkeit von 5 N/mm²) unter 3°C abzusinken drohte, wurden diese ab 11.05.2023 auch beheizt (s. Abb. 22). Wäre diese Maßnahme des „Frostschutz-Heizens“ nicht ergriffen worden, wäre der junge Beton durchgefroren und hätte somit einen irreparablen Schaden erlitten.

RCC2_MA20 Ergebnisbericht_20231103

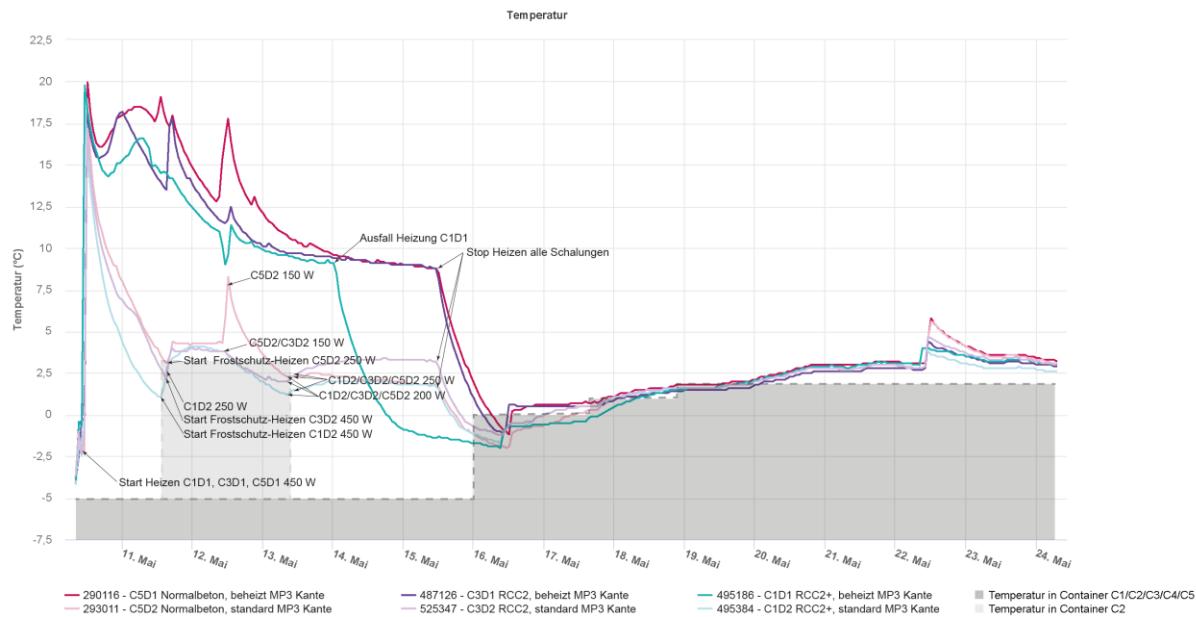


Abb. 22: Temperaturverlauf Deckenbeheizt und unbeheizt mit Umgebungstemperatur im Kühlcontainer

Der Container 2 wurde am 11.05.2023 von -5°C auf +3°C Zieltemperatur umgestellt, da die Betontemperatur an der Oberfläche der unbeheizten Wände RCC2+ und RCC2 in der Schutzzeit bis zum Erreichen der Gefrierbeständigkeit von 5 N/mm² unter 3°C abzusinken drohte (s. Abb. 23). Auch für diese normative Schutzmaßnahme gilt, dass wenn sie nicht ergriffen worden wäre, der junge Beton durchgefroren wäre und irreparabellen Schaden erlitten hätte. (Abb. 22)

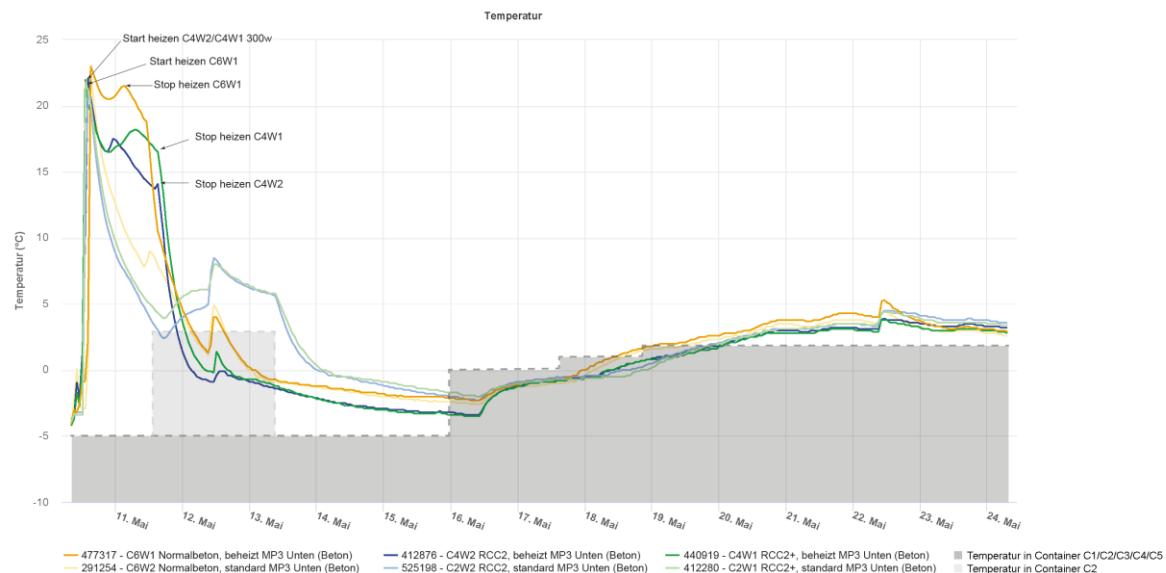


Abb. 23: Temperaturverlauf Wände beheizt und unbeheizt mit Umgebungstemperatur im Kühlcontainer

RCC2_MA20 Ergebnisbericht_20231103

Aufgrund der konstant tiefen Umgebungstemperaturen im Container unter 0°C kam es nach einigen Tagen bei allen Bauteilen zu einem Hydratationsstopp. Die Schutzzeit und somit die auch Gefrierbeständigkeit ($> 5 \text{ N/mm}^2$) war bei allen Bauteilen erreicht, dennoch war an den Messfühlern (Concremote) keine weitere Entwicklung der Festigkeit 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°C und final auf +2°C eingestellt, um die Festigkeitsentwicklung bei tiefen Temperaturen im Versuch weiter voranschreiten zu lassen.

4.4.2 Festigkeitsentwicklung Concremote

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

Die Unterschiede der Frühfestigkeitsentwicklung des Betons lassen sich deutlich an der Temperaturrentwicklung ablesen. Die heizbare Schalung zeigt den gewünschten Effekt und macht eine Ausschalbarkeit nach 24 Std. bei einer Mindestfestigkeit von 3 N/mm² möglich. Die Temperaturmessung konnte ohne Unterbrechung durchgeführt werden und so wurde die Bauteiltemperatur bis zum Ende der Versuchsdurchführung im Monitoring weiterüberwacht.

4.4.3 Würfeldruckfestigkeiten der Probewürfel

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

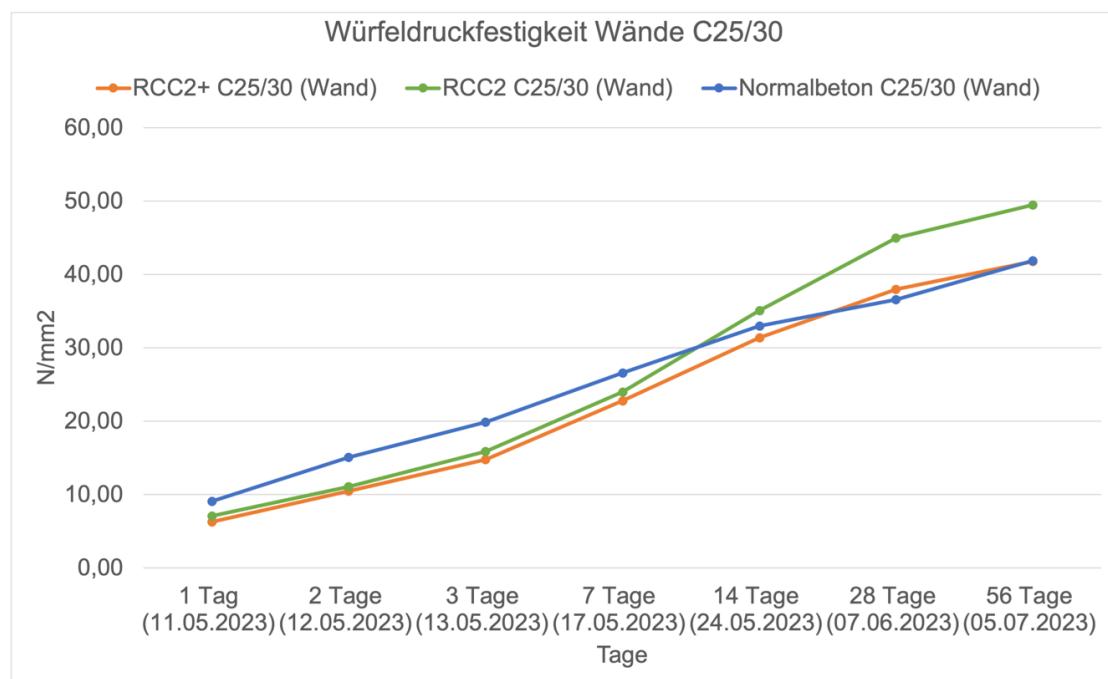


Abb. 24: Würfeldruckfestigkeit C25/30 für Wände (bei Lagerung im Labor unter Optimalbedingungen)

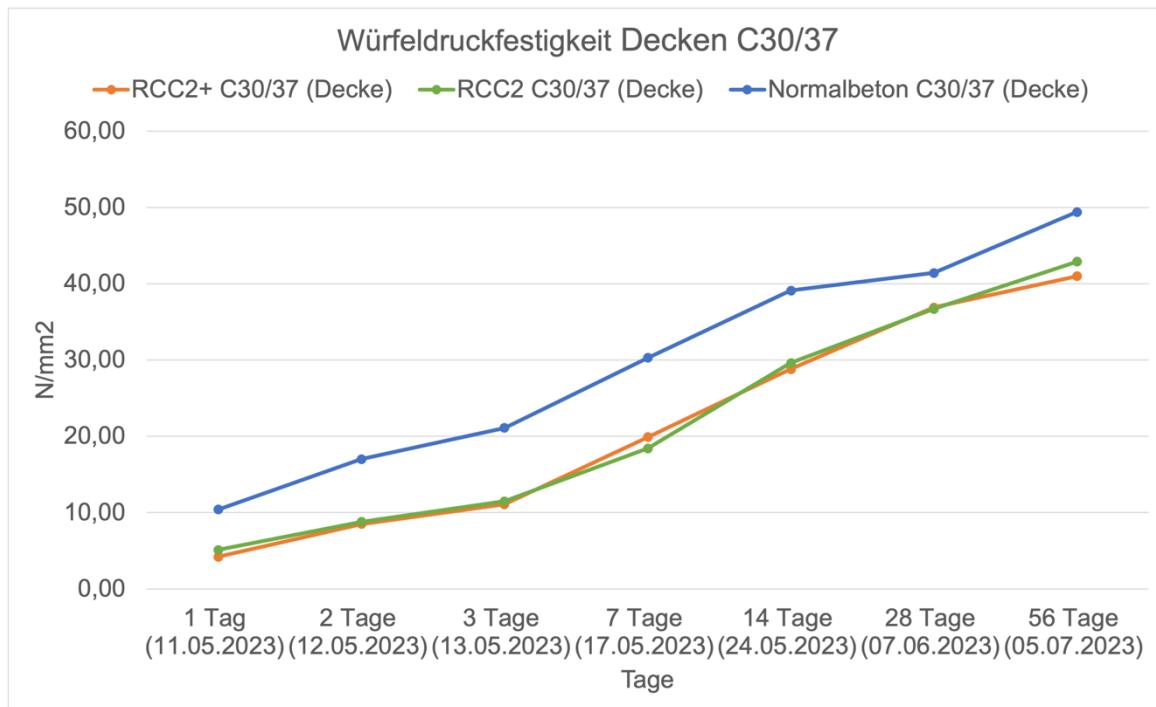


Abb. 25: Würfeldruckfestigkeit C30/37 für Decken (bei Lagerung im Labor unter Optimalbedingungen)

4.4.4 Bohrkernfestigkeiten Versuchsbauten

Die Festbetonprüfungen an den Versuchsbauten werden anhand von regelmäßigen Bohrkernentnahmen auf der Baustelle vollzogen. Diese Festigkeitsprüfungen sind 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 N/mm²) mussten einige Versuchsbauten normgemäß extern beheizt werden, was im Falle von Container 2 am 11.05.2023 durch Erhöhung der Containerzieltemperatur von -5°C auf +3°C erfolgte. Die Betontemperatur an der Oberfläche der unbeheizten Wände RCC2+ und RCC2 im Container 2 drohte noch in der Schutzzeit bis zum Erreichen der Gefrierbeständigkeit von 5 N/mm² unter 3°C abzusinken. Diesem Umstand ist auch das scheinbar bessere Festigkeitsentwicklungen der Rezepturen in Standardschalung zuzuschreiben.

An allen Bauteilen mit beheizter Schalung (mit Ausnahme von Decke RCC2+) konnten am ersten Tag nach Betonage (11.05.2023) Bohrkerne gezogen werden. Bei den übrigen Bauteilen war dies erst ab dem zweiten Tag nach der Betonage (12.05.2023) möglich (Festigkeitswerte Concremote) (s. Abb. 26).

RCC2_MA20 Ergebnisbericht_20231103

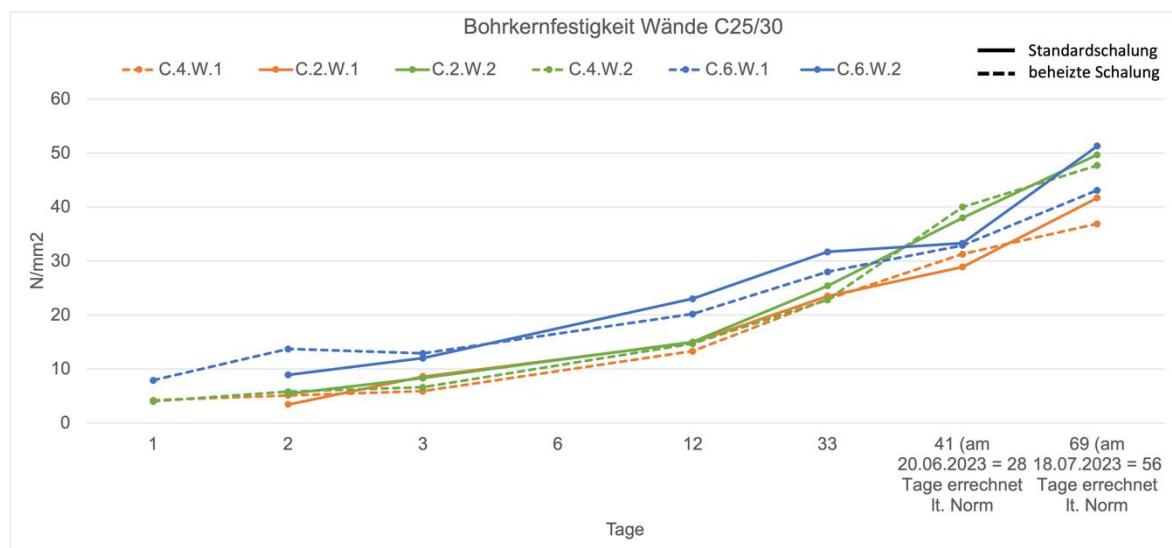


Abb. 26: Festbetonprüfung der Bohrkernfestigkeit C25/30 für Wände beheizt und unbeheizt

Dies gilt auch für die Deckenelemente, die aber nicht über die Raumtemperatur vor dem Auffrieren geschützt werden mussten. Da alle Deckenbauteile auf potenziell heizbaren Schalungen ausgeführt wurden, wurden diese energieoptimiert auch mit den bislang unbeheizten Heizschalungen bis zum Erreichen der Mindestfestigkeit von 5 N/mm² ab dem 11.05.2023 temperiert, um ein Absinken der Betontemperatur an der Oberfläche unter 3 °C in der Schutzzeit und somit eine Schädigung durch Auffrieren zu verhindern (s. Abb. 22). Auch 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 ja nicht spezifisch für die neuen Rezepturen ist. Außerdem würde die heizbare Schalung in diesem Vergleich, klarerweise einen überdeutlichen Vorteil vor der bauüblichen Praxis eines Beheizens des Rohbaus davontragen.

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.

RCC2_MA20 Ergebnisbericht_20231103

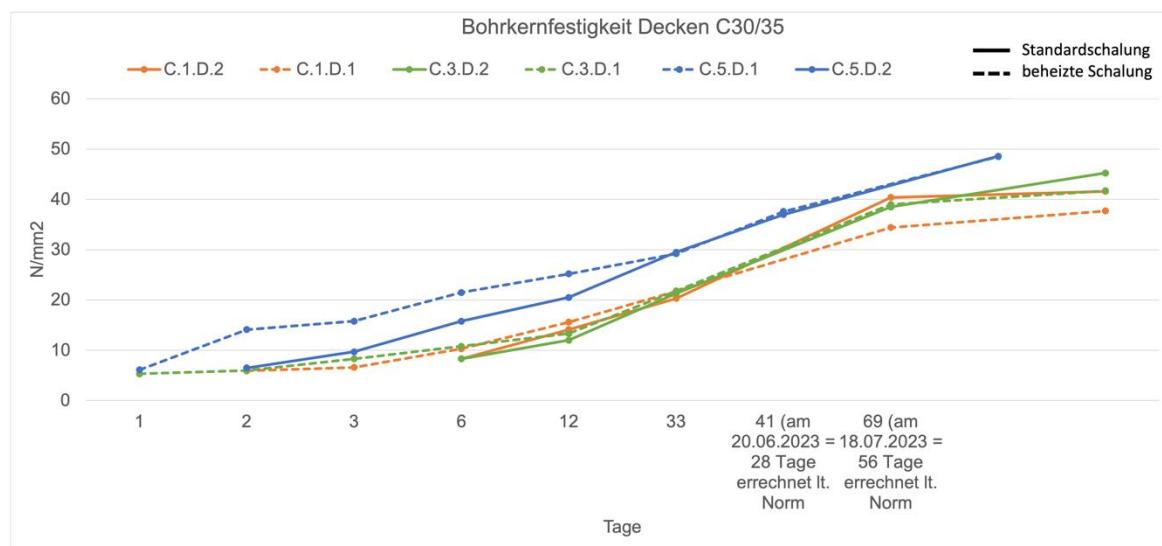


Abb. 27.: Festbetonprüfung der Bohrkernfestigkeit C30/37 für **Decken** beheizt und unbeheizt

4.5 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 -5°C Außentemperatur eine Bauteiltemperatur deutlich über 10°C bei doppelseitiger Schalung (Wände) und um die 10°C bei einseitiger Schalung und Wärmeschutzmatte auf der Oberseite aufrechterhalten.

Nachdem alle Bauteile gefrierbeständig waren, wurden sämtliche Maßnahmen zur Beheizung in den Klimakammern eingestellt. Dies löste in Folge einen Hydratationsstopp aus, also einen Stillstand der Festigkeitsentwicklung bei allen Bauteilen gleichermaßen. Erst das Anheben der Containerzieltemperatur auf letztlich 2°C führt zu einer Fortsetzung der Festigkeitsentwicklung. Schließlich konnte bei allen Bauteilen nach normativ-effektiven 28 Tagen die normativ erforderliche Bemessungsfestigkeit erreicht werden.

Daher wird festgehalten, dass auch Beton-Rezepturen mit geringeren Bindemittelanteilen die erforderlichen Festigkeiten erreichen. Insbesondere ermöglicht die heizbare Schalung von Doka auch bei Temperaturen unter 0°C eine gleichwertige Frühfestigkeitsentwicklung für CO₂-reduzierten Beton, selbst unter schwierigsten Baustellenbedingungen. Die energetischen Aufwände, die für die heizbare Schalung erforderlich sind, sollen im folgenden Kapitel mit den CO₂-Einsparungen der Rezepturen verglichen und ökobilanziert werden.

5 Ökobilanzierung

5.1 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.28). Ein direkter Vergleich des Zementgehaltes ist aufgrund der verschiedenen Klinkergehalte von CEM I (91% Klinker) und CEM II (77% Klinker) **nicht aussagekräftig in Bezug auf die Umweltwirksamkeit**. Darüber hinaus ist einer der beiden CO₂-reduzierten Rezepturen (RCC2+) noch technischer Kohlenstoff beigesetzt: 30 kg/m³ für die Decke und 20 kg/m³ für die Wand.

Folgende Rezepturen wurden im Winterversuch getestet:

Betonrezepturen RCC2 - Ökobilanz heizbarer Schalung für CO ₂ -reduzierte Betone																		
Labornummer:	014146/9	014146/12	Betonorte	014146/8	014146/11	Betonhersteller	014146/7	014146/10	Herstellungstag:	10.05.23	10.05.23	10.05.23	10.05.23	10.05.23	10.05.23			
Bauteil:	Decke	Wand		Decke	Wand		Wopfinger Transportbeton GmbH	Asamer Transportbeton GmbH		10.05.23	10.05.23	10.05.23	10.05.23	10.05.23	10.05.23			
Bezeichnung	Normalbeton			RCC2			RCC2+			C25/30/XC1/ GK22/F52/RCC2+		C25/30/XC1/ GK22/F52/RCC2+		Asamer Transportbeton GmbH				
Betonsorte	C30/37/XC2/ GK22/F52/PB			C30/37/XC1/ GK22/F52/PB RCC2			C30/37/XC1/ GK22/F52/PB/RCC2			Wopfinger Transportbeton GmbH		Asamer Transportbeton GmbH		Asamer Transportbeton GmbH				
Betonhersteller	Perimooser Beton GmbH			Wopfinger Transportbeton GmbH			Wopfinger Transportbeton GmbH			10.05.23		10.05.23		10.05.23				
Herstellungstag:	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	[kg] / [kg/m ³]			
Zementsorte	CEM II A M 42,5N	CEM II A M 42,5N			[kg] / [kg/m ³]	CEM I 52,5R	CEM I 52,5R			[kg] / [kg/m ³]	CEM II A M 42,5R	CEM II A M 42,5R			[kg] / [kg/m ³]			
Zusatzzstoff	148	74	121	60	[kg] / [kg/m ³]	759	190	680	170	[kg] / [kg/m ³]	326	163	288	144	[kg] / [kg/m ³]			
Bindemittelgehalt anrechenbar	340		295		[kg] / [kg/m ³]	188		175		[kg] / [kg/m ³]	202		187		[kg] / [kg/m ³]			
Aktivkohle	-	-	-	-	[kg] / [kg/m ³]	-	-	-	-	[kg] / [kg/m ³]	60	30	40	20	[kg] / [kg/m ³]			
RK 1 trocken	1493	746	1510	755	[kg] / [kg/m ³]	2939	735	3184	796	[kg] / [kg/m ³]	1498	749	1559	780	[kg] / [kg/m ³]			
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	[kg] / [kg/m ³]			
RK 2 Feuchtigkeitsgehalt	1,0		1,0		[%]	0,5		0,5		[%]	1,3		1,3		[%]			
RK 3 trocken	-	1	-	-	[%]	-	1	-	-	[%]	1079	540	1121	561	[kg] / [kg/m ³]			
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	[kg] / [kg/m ³]			
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	[kg] / [kg/m ³]			
Summe Wasser	351	175	346	173	[kg] / [kg/m ³]	638	160	595	149	[kg] / [kg/m ³]	346	173	333	167	[kg] / [kg/m ³]			
Fließmittel	3	2	2	1	[kg] / [kg/m ³]	11	3	11	3	[kg] / [kg/m ³]	5	3	5	3	[kg] / [kg/m ³]			
Menge	2	1	2	1	[m ³]	4	1	4	1	[m ³]	2	1	2	1	[m ³]			
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 _g -Wert (bez. auf Wassergehalt gemessen)	0,45		0,54		[-]	0,50		0,55		[-]	0,50		0,55		[-]			

Abb. 28: Übersicht der Betonrezepturen im Großversuch

5.2 Darstellung 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 Vorabzug vorliegenden Umweltproduktdeklarationen (EPD) von Zement der Fa. Holcim Zementwerke GmbH und der Angaben des Umweltbundesamtes zu CO₂-Emissionen des österreichischen Strommix für die Heizleistung durchgeführt. Branchen-EPDs für Betone einer bestimmten Festigkeitsklasse wie sie in Deutschland vorliegen, sind in Österreich derzeit noch öffentlich zugänglich.

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)

1. Herstellungsphase:

Grundlage für die Ökobilanz der Rezepturen sind die Zementanteile, deren Emissionen nach der im Vorabzug vorliegenden Umweltproduktdeklaration österreichischer Zemente zur Verfügung gestellt wurde (s. Abb. 29). Vereinfachend wurden die Werte des Werkes Mannersdorf der Fa. Holcim Zementwerke GmbH für die Ökobilanz herangezogen.

VORABZUG! - GWP [kg CO ₂ äquiv / t]			
Zementsorte	Bezeichnung	MDF	REI
CEM I 52,5 R	DER BLAUE	538	531
CEM I 52,5 N SR0 WT 38 C ₃ A-free	CONTRAGRESS	544	x
CEM I 42,5 N SR0 WT 27 C ₃ A-free	CONTRAGRESS	539	543
CEM II/A-S 42,5 R WT 42	DER GRÜNE	464	482
CEM II/B-M (S-L) 42,5 N WT 38	ECOPlanet SCHWARZ	404	410
CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N WT 38	ECOPlanet GRAU	404	x
CEM II/C-M (S-L) 42,5 N	ECOPlanet ROT	315	327
CEM III/B 32,5 N – LH/SR	ECOPlanet VIOLETT	x	267
Fluamix C AHWZ GC-HS	FLUAMIX C	116	137

Abb. 29: Vorabzug der Umweltproduktdeklarationen des GWP (Treibhausgaspotenzials) der Zementprodukte von Holcim für die Werke Mannersdorf (MDF) und Reznei (REI)³

Die Angaben zu CO₂-Werten der aufbereiteten, hydraulisch wirksamen Zusatzstoffe (AHWZ), wurden von den Betonherstellern zur Verfügung gestellt. Die genaue Zusammensetzung der AHWZ muss hier als Betriebsgeheimnis akzeptiert werden.

Durch die Beigabe des Produkts Clim@Add®, einem Zuschlagsstoff aus technischem Kohlenstoff der durch die Pyrolyse von vorwiegend regionalem Restholz aus der Forstwirtschaft gewonnen wird, kann das Treibhauspotenzial des Betons reduziert werden. Je Kilogramm technischen Kohlenstoffs können 2,9 kg CO₂ gebunden werden (s. Zertifikat Kap. 7 Anhang). Da es sich um ein Nebenprodukt aus der Energieerzeugung in Pyrolysewerken handelt, werden 0,392 kg CO₂ (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 je m³ Beton 20 kg, bei den Decken 30 kg technischer Kohlenstoff hinzugefügt.

³ Vorabzug der EPDs übermittelt von Holcim Österreich GmbH am 11.10.2023

2. Errichtungsphase:

Das Modul A4 Transport vom Werk zur Baustelle berechnet sich aus den gewählten Transportentfernungen laut EPDs (C25/30: 14,9 km)⁴ bzw. (C30/37: 18,2 km)⁵, der Gesamtmasse eines m³ Betons der jeweiligen Rezeptur und dem Treibhauspotenzial des LKW-Transports (0,1067 kg CO₂/t*km)⁶. Diese Werte werden miteinander multipliziert, um die anfallenden CO₂-Emissionen zu berechnen.

3. Zugeführte Energie

Die beheizte Schalung wurde mit den Emissionsfaktoren des Umweltamtes 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 4.3). 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 (1 m³) bezogen. Nicht kalkuliert wurde die Energiemenge, die für das normgemäß zum Schutz vor Frostschäden zwingend erforderliche Heizen der unbeheizten Bauteile im Kühlcontainer notwendig war. Waren diese zusätzlichen Maßnahmen nicht ergriffen worden, wären die Betontemperaturen dieser Bauteile unter 0°C abgesunken und hätten ohne Gefrierbeständigkeit irreparable Frostschäden im jungen Beton verursacht. (s. Kapitel 4.3.2 Ausschalen & Maßnahmen & 4.4 Messergebnisse). 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 Abschneideregel 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.“⁷

⁴ 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.

⁵ 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.

⁶ lt. https://oekobaudat.de/OEKOPAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=b086b411-019a-4ddc-8fe9-0c264051c24b&version=20.23.050&stock=OBD_2023_1&lang=de

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. 5, via https://www.oekobaudat.de/OEKOPAU.DAT/resource/sources/dc600cd9-9a55-414e-baf5-f36c54269803/Beton_der_Druckfestigkeitsklasse_C_3037_10616.pdf?version=00.03.000

RCC2_MA20 Ergebnisbericht_20231103

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 II/A-M S-L 42,5N WT3	246	CEM I 52,5 R	130	CEM II/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	W/B-Wert		0,56		0,95		0,95
11	W/B _{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 CO2eq/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	Modul A4	CO ₂ /m³ Beton GWP total [kg/m³] A1-A4	129,4		98,1		47,3
		Reduktion zu Normalbeton:		31,3 kg CO2/m³	24,2%	82,1 kg CO2/m³	63,4%
22	Modul A5	CO ₂ /m³ Energiezufuhr über beheizbare Schalung Strommix AUT [kg/m³]		12,40		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%		21,0%
		Reduktion zu Normalbeton unbeheizt:		18,7 kg CO2/m³	14,5%	69,5 kg CO2/m³	53,7%

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

RCC2_MA20 Ergebnisbericht_20231103

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 Zuschlüsse [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 _{2eq} /kg]						2,51
19	CO ₂ /m³ Beton GWP total [kg/m³] A1-A3 inkl. techn. Kohlenstoff						26,8
20	Modul A4	CO ₂ /m³ LKW-Transport Beton von Werk zur Versuchsstelle [kg/m³]		4,27		4,19	4,20
21	Modul A4	CO ₂ /m³ Beton GWP total [kg/m³] A1-A4		149,0		106,3	31,0
		Reduktion zu Normalbeton:		42,7 kg CO ₂ /m³	28,6%	118,0 kg CO ₂ /m³	79,2%
22	Modul A5	CO ₂ /m³ Energiezufuhr über beheizbare Schalung Strommix AUT [kg/m³]		18,55		18,67	18,78
23	Modul A5	CO ₂ /m³ Beton GWP total [kg/m³] A1-A5		167,6		125,0	49,8
		Anteil Schalungsenergiezufuhr		11,1%		14,9%	37,7%
		Reduktion zu Normalbeton unbeheizt:		24,0 kg CO ₂ /m³	16,1%	99,2 kg CO ₂ /m³	66,6%

Abb. 31: Ökobilanzen der Betonrezepturen für Decken C30/37 mit und ohne heizbare Schalung

5.3 Ergebnisse der Ökobilanzierung

Die Darstellung der CO₂-Reduktion der im Winterversuch getesteten innovativen Rezepturen ist bezogen auf den regionalen Referenzbeton mit einer Standard-Rezeptur (s. Abb. 32).

Bei den untersuchten Rezepturen sind in der Festigkeitsklasse C25/30 im Vergleich zum Referenzbeton Einsparungen beim RCC2 von 24 % und beim RCC2+ 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+.

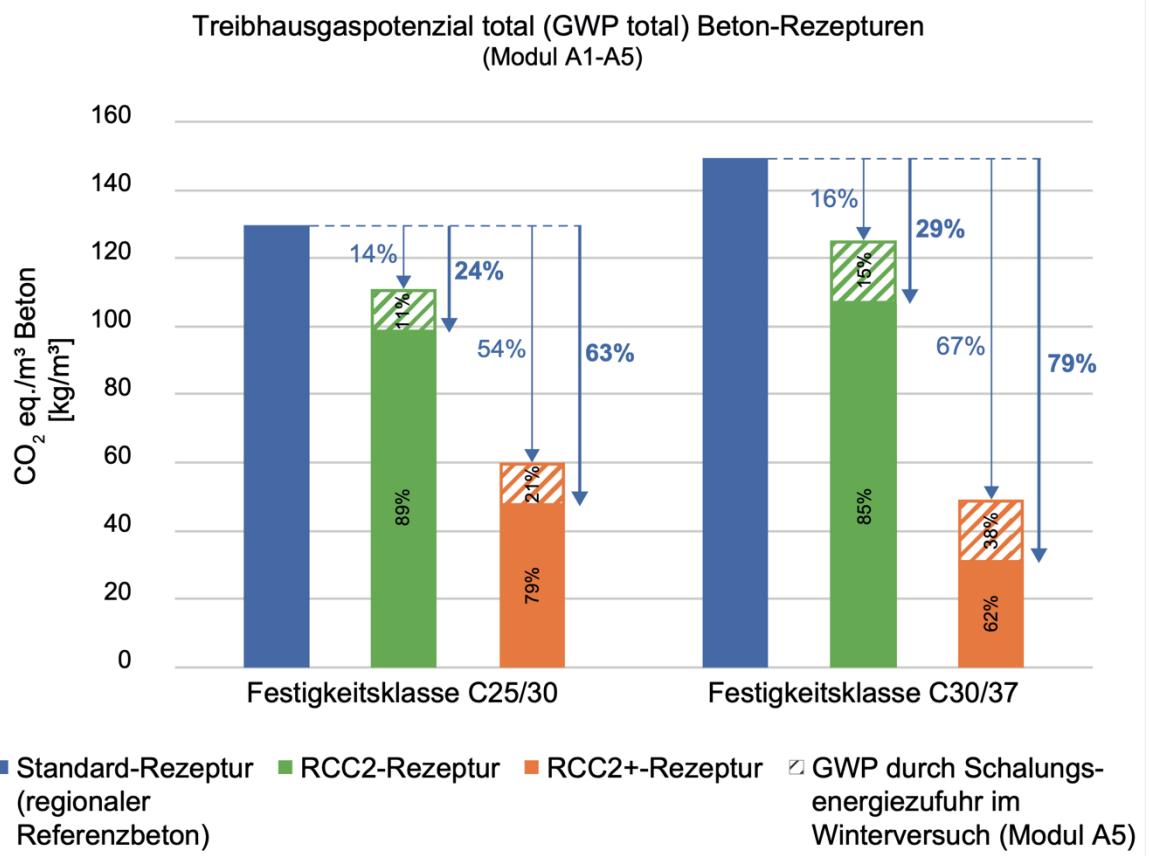


Abb. 32: Vergleich des GWP der drei getesteten Betonrezepturen der Festigkeitsklasse C25/30 und C30/37 inkl. Energiezufuhr durch beheizte Schalung

Der CO₂-Ausstoß der strombeheizten Schalung⁸ verringert jedenfalls die CO₂-Reduktion durch die Betonrezepturen in der Größenordnung von 10-13 % des GWP.

⁸ Bei einer Heizleistung von 300 - 450 W/m² und Umgebungstemperaturen zw. -5°C und 0°C im Versuchsaufbau.

6 Ergebnisskalierung

Die folgenden Fragen der Ergebnisskalierung **sind im Fördervertrag der MA20 formuliert** und sind über die *Ökobilanz heizbarer Schalung* hinaus vom Förderwerber zu bearbeiten. Es muss betont werden, dass diese Ausblicke der Skalierung sich auf die Ergebnisse der *Ökobilanz heizbarer Schalung* beziehen. Der Nachweis betontechnologischer Eignung von technischem Kohlenstoff in verschiedenen Konzentrationen ist nicht Gegenstand des Forschungsprojektes.

Die Forschungsaufgaben des Fördervertrages lauten:

- **Abschätzung der CO₂-Einsparpotenziale für die durchschnittliche Gesamtbauleistung in Wien.**
- **Bilanzielle Betrachtung, wieviel technischer Kohlenstoff im Beton nötig ist, um einer Klimaneutralität von Beton nahe zu kommen.**
- **Potenzialabschätzungen für Wien, ob technischer Kohlenstoff in der notwendigen Menge verfügbar ist.**

6.1 Abschätzung der CO₂-Einsparpotenziale für die durchschnittliche Gesamtbauleistung in Wien.

Die Klimaziele der Stadt Wien geben vor, bis 2040 klimaneutral zu sein. Für den Bausektor bedeutet das ausdrücklich, die Berücksichtigung des gesamten Kohlenstoff-Fußabdrucks von Bautätigkeiten sowie die Förderung der Kreislaufwirtschaft. Der CO₂-Fußabdruck künftiger Bauprojekte ist also durch ressourcenschonende und ökologische Bauweisen zu minimieren. CO₂-reduzierter Beton bietet dabei erhebliches Einsparungspotenzial.

Insbesondere ist Beton als CO₂-Senke durch den Zusatz von technischem Kohlenstoff eine wichtige langfristige Perspektive auf ein klimaregeneratives Bauen. Da keine Statistiken als Ausgangslage zur Gesamtbauleistung in Wien vorliegen, werden in folgendem für eine Abschätzung der CO₂-Reduktionspotenziale durch den Einsatz von CO₂-reduziertem Beton exemplarisch einerseits

- die fertiggestellten Wohnungen in Wien im Jahr 2021 der Statistik Austria, sowie Prognosen der EHL Immobilien GmbH für die Baufertigstellungen in den darauffolgenden Jahren bis 2025 sowie andererseits
- die Transportbeton-Produktionsmenge 2022 in Wien des Güteverbands Transportbeton

als Ausgangslage herangezogen.

• Berechnung CO₂-Reduktionspotenziale über den Wiener Wohnbau im Jahr 2025

Im Jahr 2021 wurden insgesamt 16.500 Wohnungen in Wien fertiggestellt, wohingegen die Prognosen für 2025 einen deutlichen Rückgang auf 7.500 Wohnungen vorhersagen (s. Abb. 33). Die durchschnittliche Nutzfläche der fertiggestellten Wohnungen in Wien betrug 64,2 m² im Jahr 2021.⁹

⁹ <https://www.statistik.at/statistiken/bevoelkerung-und-soziales/wohnen/baufertigstellungen:Nutzflaechen 2021 baufertiggestellter Wohnungen nach Bundeslaendern>

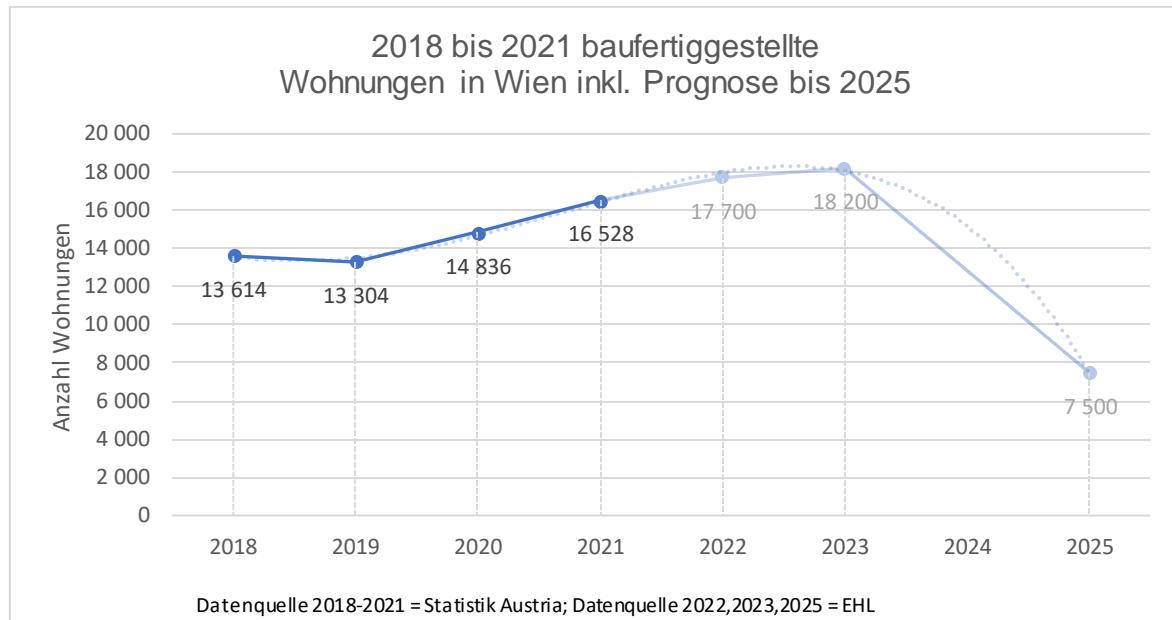


Abb. 33: Baufertiggestellte Wohnungen in Wien 2018-2021 inkl. Prognose bis 2025 (Ohne durch An-, Auf-, Umbautätigkeit fertiggestellte Wohnungen)¹⁰

Für die Fertigstellung von voraussichtlich 7.500 Wohnungen im Jahr 2025 mit einer durchschnittlichen Nutzfläche von 64,2 m² kann für das Jahr 2025 somit von einem CO₂-Ausstoß von ca. 63.400 t CO₂ für Normalbeton ausgegangen werden. Unter der Annahme, dass der Betonbedarf über 0,7 der BGF berechnet wird, ergibt sich ein Gesamtbetonbedarf von ca. 450.000 m³/a. Von diesem Betonbedarf werden vereinfachend 30 % als C25/30 und die restlichen 70 % als C30/37 angenommen.

Durch den Ersatz dieser Betone mit CO₂-reduziertem Beton ist ein Einsparpotenzial von bis zu 21.000 t CO₂/a möglich (s. Tab. 1). Weitere 30.000 t CO₂/a können durch die Zugabe von technischem Kohlenstoff eingespart werden. Dafür würden 12.000 t technischer Kohlenstoff im Jahr benötigt. Das Einsparpotenzial durch den Ersatz von Standardbeton durch Performancebeton inkl. technischem Kohlenstoff liegt mit gut 50.000 t CO₂/a somit bei ungefähr 70 %.

	Normalbeton	RCC2	RCC2+
C25/30: 134.820 m ³	17.323 t CO2 eq. Einsparung von:	12.160 t CO2 eq. 5.164 t CO2 eq.	5.531 t CO2 eq. 11.792 t CO2 eq.
C30/37: 314.580 m ³	46.105 t CO2 eq. Einsparung von:	30.335 t CO2 eq. 15.770 t CO2 eq.	7.151 t CO2 eq. 38.954 t CO2 eq.
TOTAL	63.428 t CO2 eq. Einsparung von:	42.494 t CO2 eq. -33,00%	12.682 t CO2 eq. -70,16%
		20.934 t CO2 eq.	50.746 t CO2 eq.

Tab. 1: Prognose Betonbedarf 2025 und CO₂-Einsparpotenzial im Wiener Wohnbau

¹⁰ Statistik Austria <https://www.statistik.at/statistiken/bevoelkerung-und-soziales/wohnen/baufertigstellungen>

- Berechnung CO₂-Reduktionspotenziale über Transportbeton-Produktionsmenge 2022 in Wien**

Im Jahr 2022 lag die Produktion von Transportbeton in Österreich bei 10,75 Mio. m³. In der Bundeshauptstadt wurde ein Volumen von 1,774 Mio. m³ Transportbeton produziert, was einem Anteil von 16,5 % an der Gesamtproduktion entspricht (s. Abb. 34).

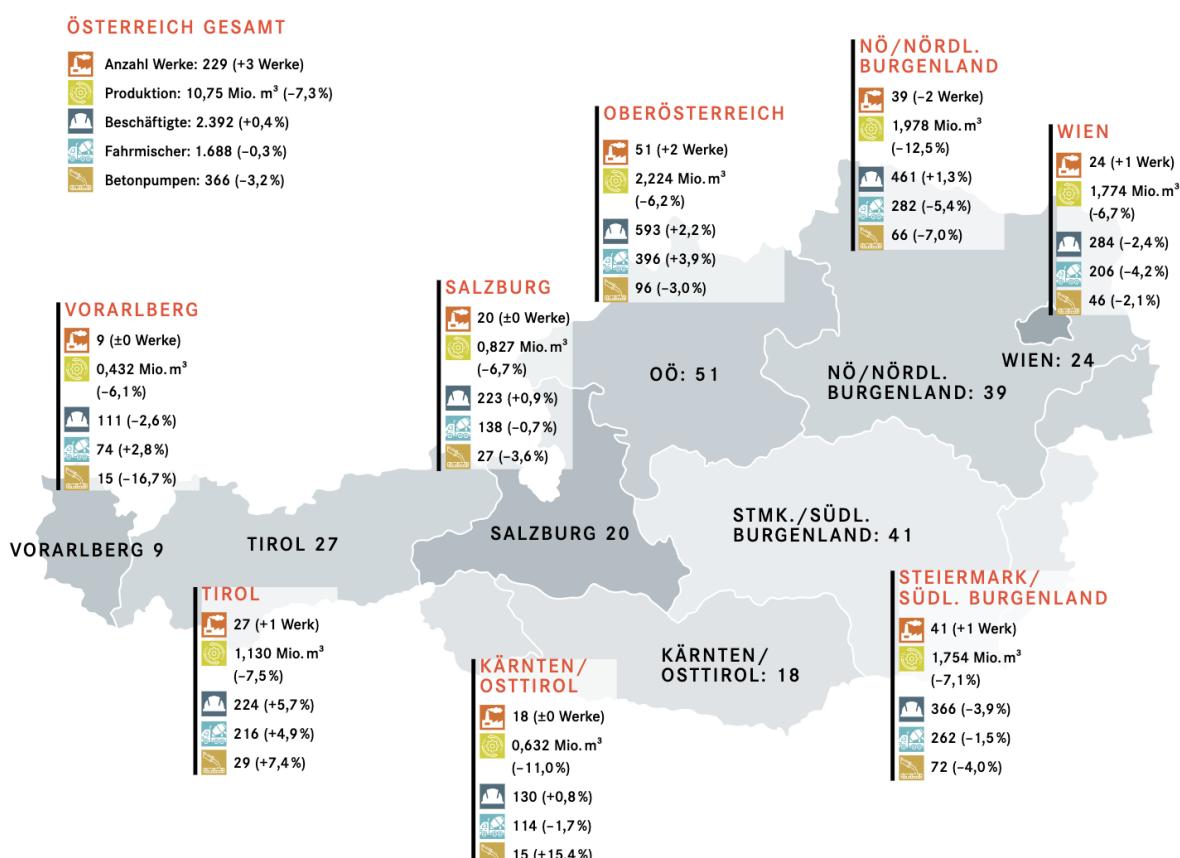


Abb. 34: Transportbeton-Produktionsmenge 2022 in Österreich (die angeführten Zahlen beruhen auf den Meldungen der Mitgliedsunternehmen des Güteverbandes Transportbeton, die rund 90 % des Transportbetonmarktes in Österreich repräsentieren)¹¹

Unter der Annahme, dass von der gesamten produzierten Menge an Transportbeton 15 % im Tiefbau und 85 % im Hochbau verwendet werden, wird für die Berechnungen eine verbaute Menge von 1,51 Mio. m³ im Wiener Hochbau herangezogen. Das CO₂-Einsparpotenzial bei der Verwendung von klinkerreduziertem sowie klinkerreduziertem Beton mit Beigabe von techn. Kohlenstoff ist je nach Festigkeitsklasse unterschiedlich hoch.

Es kann angenommen werden, dass in diesem Forschungsprojekt beprobten Festigkeitsklassen, die am häufigsten verwendeten Betonfestigkeiten repräsentieren (s. ÖN B 4710 Tabelle 44). Für die Potenzialabschätzung wird somit ein Mittelwert der CO₂-

¹¹ Vgl. Güteverband Transportbeton: *Beton(t)*, Die Fachzeitschrift des Güteverbandes Transportbeton, in: www.gvtb.at, 2023, S. 7

RCC2_MA20 Ergebnisbericht_20231103

Einsparpotenziale für die beiden Rezepturen RCC2 (klinkerreduziert) sowie RCC2+ (klinkerreduziert inkl. techn. Kohlenstoff) errechnet (s. Tab. 2).

Rezeptur	Festigkeitsklasse	CO ₂ -Einsparpotenzial	Mittelwert
RCC2 (klinkerreduziert)	C 25/30	24 %	26,5 %
	C 30/37	29 %	
RCC2+ (klinkerreduziert inkl. techn. Kohlenstoff)	C 25/30	63 %	71 %
	C 30/37	79 %	

Tab. 2: CO₂-Einsparpotenzial in % nach Rezeptur und Festigkeitsklasse inkl. Mittelwert

Der Ersatz herkömmlichen Betons durch klinkerreduzierten Beton (RCC2) ermöglicht somit ein CO₂-Einsparpotenzial von 26,5 %, bei klinkerreduziertem Beton mit techn. Kohlenstoff (RCC2+) liegt das CO₂-Einsparpotenzial bei ca. 71 %.

Rezeptur	Festigkeits-klasse	kg Co ₂ e/kg Modul A1-A3	Mittelwert	Mio. m ³ Beton	Mio. kg Co ₂ e	
regionaler Referenzbeton	C 25/30	126	135,35	1,51	204,38	
	C 30/37	144,7				
RCC2 (klinkerreduziertter Beton)	C 25/30	94,6	98,4		148,58	
	C 30/37	102,2				
RCC2+ (klinkerreduziertter Beton inkl. Techn. Kohlenstoff)	C 25/30	43,8	35,3		53,3	
	C 30/37	26,8				

Tab. 3: CO₂-Einsparpotenzial nach Rezeptur und Festigkeitsklasse inkl. Mittelwert in Gegenüberstellung zu Standardbeton (region. Referenzbeton)

Bei einer jährlichen Gesamtbauleistung mit 1,51 Mio. m³ Beton im Wiener Hochbau könnte durch klinkerreduzierten Beton (RCC2) ein Ausstoß von 56.000 t Co₂ bzw. durch klinkerreduzierten Beton inkl. techn. Kohlenstoff (RCC2+) ein Ausstoß von 151.000 t CO₂ pro Jahr verhindert werden (s. Tab. 3).

6.2 Bilanzielle Betrachtung, wieviel technischer Kohlenstoff nötig ist, um einer Klimaneutralität von Beton nahe zu kommen

Standardbetone würden, wie in Abb. 35 dargestellt, ab einer Zugabe von 2,1 - 2,4 M% Anteil technischen Kohlenstoffes bereits bilanziell CO₂-neutral sein. Bei den klinkerreduzierten Rezepturen des Performancebetons reichen zwischen 1,8 – 2,1 M% zur Klimaneutralität. Über die betontechnologischen Eigenschaften von technischem Kohlenstoff ist damit aber keine Aussage getroffen. Die Auswirkungen auf Expositionsklassen und Anwendungen in Asphalt und Beton sind derzeit Gegenstand umfangreicher Forschung.

Wie in Abb. 35 dargestellt, sind folgende Zugaben von technischem Kohlenstoff mit der Speicherfähigkeit von 2,508 kg CO₂eq erforderlich, um die Klimaneutralität von CO₂-reduziertem Beton (RCC2) zu erreichen:

- bei Beton der Festigkeitsklasse 25/30: min. 45 kg/m³ technischer Kohlenstoff,
- bei Beton der Festigkeitsklasse 30/37: min. 50 kg/m³ technischer Kohlenstoff hinzugefügt werden.

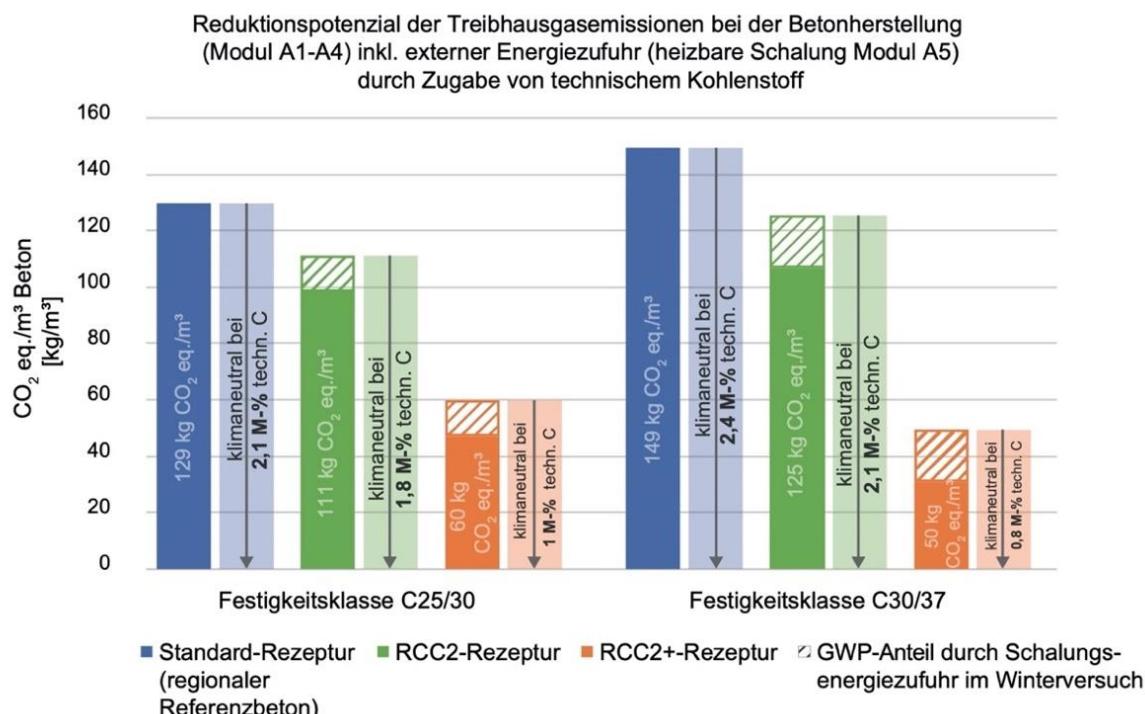


Abb. 35: Reduktionspotenzial der Treibhausgasemissionen bei Betonherstellung durch Zugabe von techn. Kohlenstoff

Im Rahmen des Projekts RCC2 wurden ausschließlich Versuche mit Betonen der Festigkeitsklassen 25/30 und 30/37 durchgeführt, daher können Schlussfolgerungen nur im Hinblick auf diese Festigkeitsklassen gezogen werden. Es ist jedoch denkbar, auch bei Betonen anderer Festigkeitsklassen die Zugabe von technischem Kohlenstoff in Betracht zu ziehen. Vor allem bei Betonen hoher Festigkeitsklassen wäre das Einsparpotenzial groß.

RCC2_MA20 Ergebnisbericht_20231103

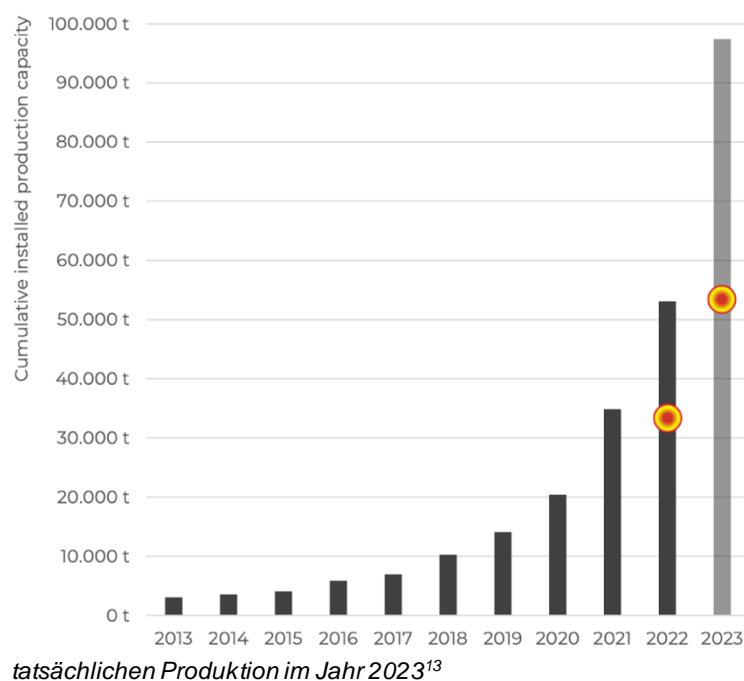
Dennoch ist anzumerken, dass für eine umfassende Anwendung von technischem Kohlenstoff als Zugabe im Beton noch nicht alle betontechnologischen Fragestellungen geklärt sind, einschließlich Fragen zum Umgang im Betonwerk und den Auswirkungen auf die Betoneigenschaften bei hohen Zugabemengen. Diese und weitere Fragen müssen in zukünftigen Forschungsprojekten jedenfalls untersucht werden.

6.3 Potenzialabschätzungen für Wien, ob technischer Kohlenstoff in der notwendigen Menge verfügbar ist.

Die ersten Produktionsanlagen von technischem Kohlenstoff wurden in Europa im Jahr 2012 installiert. Seitdem ist ein exponentiell steigender Trend bei der Neuerrichtung von Produktionsanlagen zu verzeichnen. Im Jahr 2021 wurden 25 Anlagen und im Jahr 2022 28 Anlagen installiert und in Betrieb genommen. Bis Ende 2022 ist die Gesamtzahl der Produktionsanlagen in Europa somit auf 130 Anlagen angewachsen. Für das Jahr 2023 ist die Errichtung bzw. Inbetriebnahme von 51 Projekten vorgesehen. Somit wird die Gesamtzahl der Produktionsanlagen in Europa im Jahr 2023 vsl. auf 180 Anlagen anwachsen. Damit geht auch eine Zunahme der Produktionskapazitäten einher. Die Produktionskapazität in Europa im Jahr 2022 lag bei 53.000 t und soll im Jahr 2023 auf 90.000 t anwachsen. Tatsächlich wurden im Jahr 2022 33.500 Tonnen Bioholzkohle produziert. Für das Jahr 2023 wird eine tatsächliche Produktion von technischem Kohlenstoff von 50.000 t prognostiziert(s).

Abb. 36).¹²

Abb. 36: Kumulierte Produktionskapazität von technischem Kohlenstoff in Europa zw. 2013 und 2022 inkl. Prognose für das Jahr 2023 mit Kennzeichnung der tatsächlichen Produktion im Jahr 2022 und prognostizierten



tatsächlichen Produktion im Jahr 2023¹³

Österreich wird zusammen mit der Schweiz neben Deutschland und den nordischen Ländern in der Produktionskapazität von technischem Kohlenstoff als eine der 3 dominierenden

¹² The European Biochar Industry Consortium, 2023, S.40ff.

¹³ The European Biochar Industry Consortium, 2023, S.44.

RCC2_MA20 Ergebnisbericht_20231103

Regionen im Jahr 2022 genannt. Der Anteil an der Produktionskapazität für technischen Kohlenstoff beläuft sich in Österreich und der Schweiz auf insgesamt 18 %, somit 9.540 t.¹⁴

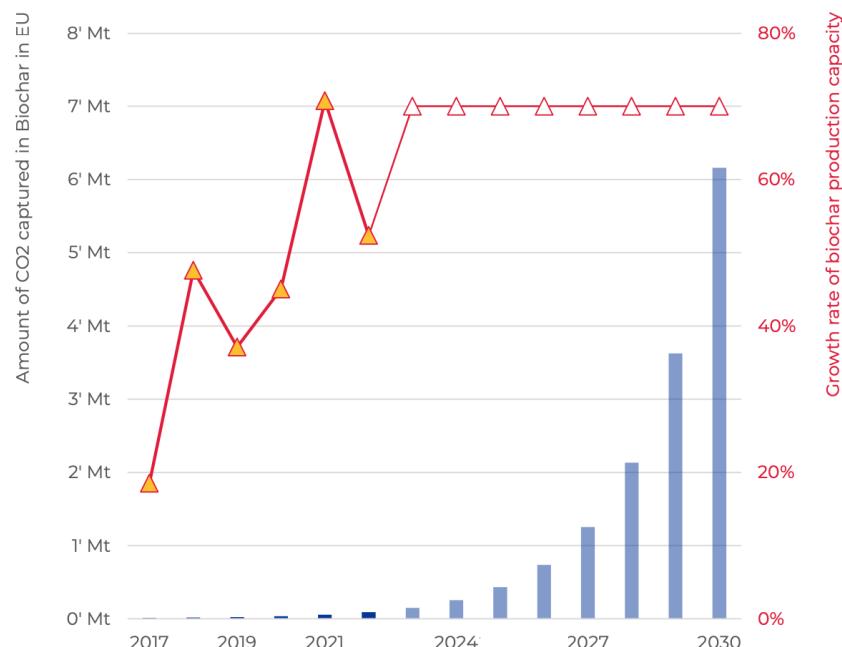


Abb. 37: Menge an in technischem Kohlenstoff gebundenem CO₂ in der EU¹⁵

Mit der Extrapolierung des Wachstums bis 2023 ergibt sich lt. European Biochar Industry (EBI) eine Wachstumsrate von 70 % (s. Abb. 37). Lt. dem Bericht des European Biochar Industry Consortium ist eine Aufrechterhaltung von Wachstumsraten von 70 % bis 2030 anspruchsvoll, aber machbar.¹⁶ Das würde eine europaweite Produktionskapazität von ca. 3,7 Mt technischem Kohlenstoff im Jahr 2030 bedeuten. Bei konstantem Anteil von 18 % im Gebiet Österreich/Schweiz wäre dies im Jahr 2030 eine Produktionskapazität von ungefähr 660.000 t technischem Kohlenstoff mit einem Sequestrierungspotenzial von 1.860.000 t CO₂-Äquivalente (gerechnet über Umrechnungsfaktor von 2,8 t CO₂ pro Tonne technischer Kohlenstoff).

Die Ressource Waldrestholz bietet im Holzland Österreich zudem noch Potenzial für die Herstellung von technischem Kohlenstoff. Sowohl Kalt (2007) als auch Karisch-Gierer und Schnedl (2007) sehen in der verstärkten Nutzung von Schlagrücklass Perspektiven für die inländische Holznutzung.¹⁷ Schätzungen des Potenzials von Schlagrücklass in der Literatur liegen im Bereich von 0,7 bis 3 Mio. Festmeter, wobei Kalt (2007) sowie Gierer und Schnedl (2007) in einer Szenarien Modellierung von einem langfristig realisierbaren Potenzial von 1 bis 1,5 Mio. Festmeter pro Jahr ausgehen.¹⁸ Das wären also zwischen 650.000 und 950.000 t Restholz pro Jahr in Österreich. Eine darüber hinaus gehende Nutzung von Schlagrücklass sollte aus ökologischen Gründen vermieden werden, da ein gewisser Anteil an Restholz im

¹⁴ The European Biochar Industry Consortium, 2023, S.46.

¹⁵ The European Biochar Industry Consortium, 2023, S.63.

¹⁶ The European Biochar Industry Consortium, 2023, S.64.

¹⁷ Kalt, Gerald: Perspektiven für die energetische Holznutzung bis 2050 unter Berücksichtigung der stofflichen Verwertung, Österreich: BMVIT, 2007, S. 5.

¹⁸ Karisch-Gierer, Dagmar; Schnedl, Christian: Entwicklung eines Geschäftsfeldes „Waldbiomasseversorgung - SÜDOST“ durch die vorrangige Nutzung bisher ruhender Holzreserven, Wien, Österreich: BMVIT, 2007, S. 4.

Wald verbleiben sollte, um zur Humusbildung beizutragen und die Nährstoffversorgung zu gewährleisten (Böhmer et al. 2014).¹⁹ Zugleich muss betont werden, dass die Anwendung der Biopfanzenkohle in der Landwirtschaft zusätzliche Vorteile bringen kann, wenn die Kohle mit Mikroorganismen aktiviert wird, wie bei Terra Preta. Nachteile in der landwirtschaftlichen Anwendung sind aber ebenfalls vorhanden, wie z.B. das vielfach genannte Kontaminationsrisiko, bei nicht qualitätsgesicherter Produktion der Biopfanzenkohle.

Insbesondere warnt der IPCC-Bericht aber an verschiedene Stellen vor der Konkurrenz von Nahrungssicherheit und der Verwendung von Biomasse in CO₂-Senken. Daher wird in der Potenzialanalyse hier der Betrachtung von Sekundärrohstoffen der Vorzug gegeben.

Angesichts der dringend erforderlichen Reduktion des CO₂-Ausstosses ist die überwiegende Verbrennung von Altholz in Österreich zu überdenken. Im Jahr 2017 betrug die Verbrennung von Altholz in Österreich insgesamt rund 540.000 t.²⁰ Das sind etwa 40 % des gesamten Altholzaufkommens. Würde thermisch verwertetes Altholz zur Gänze in der Pyrolyse genutzt, wären dies ca. 160.000 t technischer Kohlenstoff, der 410.000 t CO₂ bindet.

Die Vereinigung Österreichischer Zementhersteller (VÖZ) beschreibt in der Roadmap zur CO₂-Neutralität der österreichischen Zementindustrie bis 2050 eine schrittweise Reduktion von 2,85 Mio. t CO₂. Mit ca. 550 kg CO₂ Äquivalente werden in Österreich um fast 100 kg CO₂ pro Tonne Zement weniger als der weltweite Durchschnitt emittiert. Die beiden Zahlen der jährlichen Gesamtemission und der Emission pro Tonne bedeuten daher 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 Anwendung von Zement gibt es nicht. **Das bedeutet, dass in Österreich 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 zementbedingt durchschnittlich 170 kg CO₂/m³ Beton.

Nr.	CO ₂ Emissionen der Zement- und Betonproduktion		Quelle
1	CO ₂ Emissionen der Zementproduktion in Österreich 2020	2.850.000 t CO ₂ /a	VÖZ 2022, Roadmap https://www.zement.at/downloads/downloads_2022/Roadmap_VOEZ_bis_2050.pdf
2	t CO ₂ equ /t Zement in AUT	0,549 kg CO ₂ /t zement	VÖZ 2022, Roadmap
3	Zement in t/a	5.200.000 t/a	VÖZ 2022, Roadmap
4	Gewichtsanteil von Zement im Beton	13%	VÖZ 2022, Roadmap
5	t Beton in AUT/a	40.000.000 t/a	folgt aus 3 und 4
6	Spez. Gewicht t/m ³ Beton	2,41	Wikipedia
7	m ³ Beton in AUT/a	16.700.000 m ³ /a	folgt aus 3 und 4
8	Durchschnittlicher zementbedingter-CO ₂ /Gehalt pro m ³ Beton in t	0,171 t CO ₂ /m ³	folgt aus 1 und 7
9	Potenzial von Altholzpyrolyse für CO ₂ -Bindung im Beton		
10	t thermische Verwertung von Altholz in AUT/a	540.500 t/a	Stoffliche und energetische Verwendung von Holzabfällen, 2019, bmnt.gv.at https://www.klimaaktiv.at/dam/jcr:9126f4c2-b689-45c1-b806-b207295ec425/Aktuelles%20Thema%20Verwendung%20von%20Holzab%C3%A4llen_final.pdf
11	Gewichtsfaktor für Biomasse zu Kohle	30%	Wikipedia
12	t technischer Kohlenstoff aus Altholz/a	162.150 t/a	folgt aus 10 und 11
13	Faktor CO ₂ -Bindung in techn. C	2,508	Käppler 2017
14	CO ₂ -Bindungspotenzial von Altholz in AUT/a	410.000 t CO ₂ /a	folgt aus 12 und 13
15	Potenzial von CO ₂ neutralem Beton durch Altholzpyrolyse in AUT/a	2.400.000 m ³	folgt aus 8 und 14
16	Potenzial von CO ₂ neutralem Beton durch Altholzpyrolyse in AUT/a	14%	folgt aus 15 und 7

Abb. 38: Eigene Berechnung zum Potenzial von Altholzpyrolyse für die bilanzielle Klimaneutralität von Beton

¹⁹ Böhmer, Siegmund; Gössl, Michael; Krutzler, Thomas; Pölz, Werner: Effiziente Nutzung von Holz: Kaskade versus Verbrennung, Wien, Österreich: Umweltbundesamt, 2014, S. 56.

²⁰ Höher, Martin/Lorenz Strimitzer: Stoffliche und energetische Verwendung von Holzabfällen, Wien, Österreich: BMNT, 2019, S. 23.

RCC2_MA20 Ergebnisbericht_20231103

Würde thermisch verwertetes Altholz zur Gänze in der Pyrolyse genutzt, wären diese ca. 160.000 t technischer Kohlenstoff genug, um 2,4 Millionen m³ Beton in Österreich bilanziell klimaneutral zu machen. Allerdings wären auch 2,4 Million m³ bilanziell klimaneutraler Beton nur 14 % des jährlich verbauten Betons in Österreich.

Technischer Kohlenstoff ist also nicht die Lösung zur Dekarbonisierung des Bauens mit Beton, sondern er ist Teil der Lösung.

RCC2_MA20 Ergebnisbericht_20231103

Kontakt:

Architekt DI Thomas Romm
forschen planen bauen - Romm ZT
M: 0650/9848488
E thomas.romm@romm.at

Dr. Thomas Belazzi
bauXund forschung und beratung gmbh
M: 0664/3953156
E: belazzi@bauxund.at

7 Anhang

Übersicht Messergebnisse Winterversuch Prüfprogramm MPA Harth



Carbon sink certificate – for CO₂eq potential

ID of C-sink certificate: cs-z7hy-mmw-tto2-wrds

**EnergieWerk
Hallerstr 66a
6850 Dornbirn
Österreich**

EBC Producer ID: co-at-6
GPS of production: 9°43'53.33''E, 47°23'52.33''N

The Carbon sink potential of the mentioned batch is certified according to the following standard:



BIOCHAR BASED CARBON SINKS

Data of batch:

EBC Batch ID	ba-at-6-1-3
Amount of produced biochar (dry matter)	252.00 t
C-sink potential of biochar (dry matter)	78.4 %
C-sink potential per ton of biochar (dry matter)	2.90 t CO ₂ eq
C-sink potential of total amount of produced biochar (dry matter)	724.49 t CO ₂ eq

Frick, 12.07.2022



Farzaneh Mahdipour
Head of International
Services Division

Philippe Schärrer
Head of Processing
and Trade Division