



NACHHALTIGES
BAUEN
INSTITUT FÜR
TRAGWERKSENTWURF

**Strategien zur Reduktion sowie
Entfernung von Treibhausgasen
in der gebauten Umwelt und
Möglichkeiten zur Erreichung von
Netto-Null-Emissionen in
Baumaterialien**

Barbara Truger

Nicolas Alaux

Alexander Passer

Allgemeines

Der vorliegende projektinterne Endbericht wurde im Rahmen von Projekt *Strategien zur Reduktion sowie Entfernung von Treibhausgasen in der gebauten Umwelt und Möglichkeiten zur Erreichung von Netto-Null-Emissionen in Baumaterialien* erstellt und umfasst eine zusammenfassende Darstellung der inhaltlichen Bearbeitung der Arbeitsgruppe Nachhaltiges Bauen (AG-NHB).

Projektdaten

Projekttitel:

Strategien zur Reduktion sowie Entfernung von Treibhausgasen in der gebauten Umwelt und Möglichkeiten zur Erreichung von Netto-Null-Emissionen in Baumaterialien

Projektzeitraum:

01/24-04/25

Projektleitung (PL) | Projektbearbeitung (PB):

Alexander Passer (PL)

Barbara Truger (PB)

Nicolas Alaux (PB)

Dominik Steinberger-Maierhofer (PB)

Kontaktdaten

NACHHALTIGES BAUEN

Institut für Tragwerksentwurf

www.nhb.tugraz.at

office.nhb@tugraz.at

tel.: +433168736213

Kurzfassung

In diesem Forschungsprojekt wurden relevante Strategien zur Reduktion sowie Entfernung von Treibhausgasen (THG) in der gebauten Umwelt und Möglichkeiten zur Erreichung von Netto-Null-Emissionen in Baumaterialien untersucht und ihre Auswirkungen auf den Gebäudebereich abgeschätzt. 95 identifizierte Strategien wurden nach THG-Reduktionspotenzial, technischer Verfügbarkeit und Anwendbarkeit in Österreich gefiltert, mit Vertreter*innen der WKO diskutiert und zu sechs Szenarien gebündelt. Die Ökobilanzierung der Szenarien zeigt die Auswirkungen auf die THG-Emissionen auf Material-, Gebäude- und Gebäudebestandsebene. Durch eine Kombination der Szenarien kann eine Reduktion der österreichischen konstruktionsbezogenen THG-Emissionen der Gebäudeerrichtung bis 2050 von über 50% erreicht werden.

1 Inhaltsverzeichnis

Allgemeines.....	2
Projektdaten.....	2
Kontaktdaten	2
Kurzfassung	3
1 Inhaltsverzeichnis	4
2 Einleitung	5
3 Methode.....	6
3.1 Literaturrecherche	6
3.2 Ökobilanzierung.....	7
4 Übersicht der Strategien	8
4.1 Identifizierte Strategien	8
4.2 Erstauswahl der Strategien	9
4.3 Gemeinsame Priorisierung der Strategien	10
5 Ergebnisse der Modellierung	11
6 Zusammenfassung & Fazit	15
7 Literatur	16

2 Einleitung

Basierend auf Vorprojekten wurde ein Forschungsprojekt entwickelt (Alaux et al., 2023; Truger et al., 2022), um relevante Strategien zur Reduktion sowie Entfernung von Treibhausgasen in der gebauten Umwelt und Möglichkeiten zur Erreichung von Netto-Null-Emissionen in Baumaterialien zu identifizieren und ihre Auswirkungen auf den Gebäudebereich abzuschätzen. Die Leistungen der Arbeitsgruppe Nachhaltiges Bauen (NHB) setzen sich für das hier Forschungsprojekt aus einem Arbeitspaket für Projektmanagement und zwei inhaltlichen Arbeitspaketen zusammen:

Arbeitspaket 01: Ermittlung der aussichtsreichsten Strategien zur Reduktion von Treibhausgasen in der gebauten Umwelt

Das Arbeitspaket 01 dieses Forschungsprojekts hatte das Ziel, Strategien zur Reduktion von Treibhausgasen (THG) in der gebauten Umwelt, mit speziellem Fokus auch auf mineralische Baustoffe im europäischen Kontext, zu identifizieren. Basierend auf Literatur- und Datenquellen wurden Strategien abgeleitet und analysiert. Darauffolgend wurde die Anwendbarkeit auf den österreichischen Kontext mit den Stakeholdern und Mitgliedern der WKO in einem gemeinsamen Workshop diskutiert. Die einzelnen Tasks sind in Abbildung 1 abgebildet.

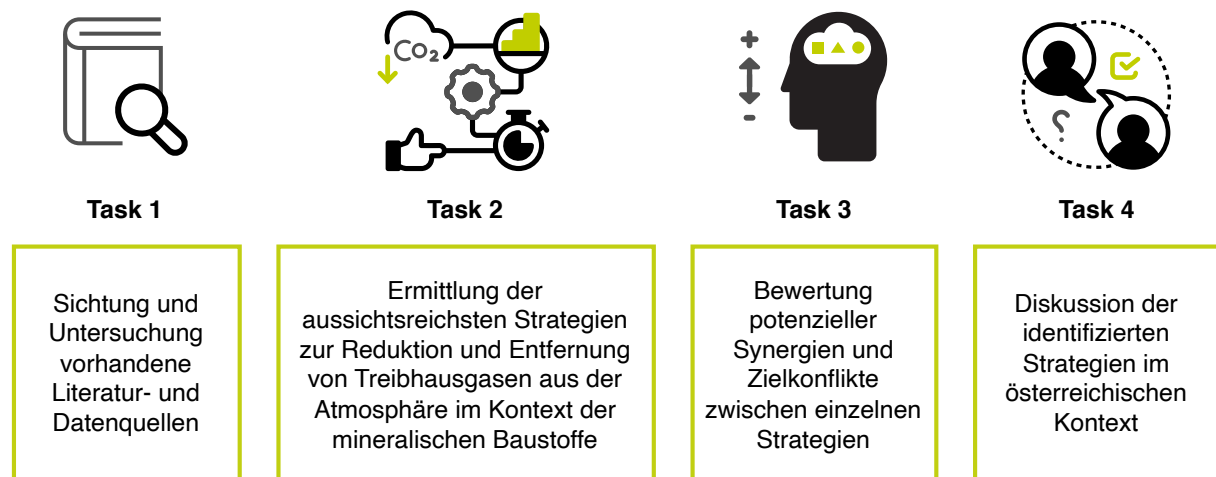


Abbildung 1: Tasks Arbeitspaket 1

Arbeitspaket 02 – Technologische Möglichkeiten zur Erreichung von Netto-Null-Emissionen in Baumaterialien

Das zweite Arbeitspaket dieses Forschungsprojekts zielte darauf ab, einen "Bottom-up"-basierten Fahrplan in Richtung Netto-Null-Emissions-Baumaterialien (zu definieren und gleichzeitig sicherzustellen, dass der Anstieg der Nachfrage nach erneuerbaren Energien im Rahmen der österreichischen Produktionskapazitäten bleibt. Dafür werden die in Arbeitspaket

01 identifizierten Strategien in ein LCA-Modell (basierend auf Python, Brightway2 und Premise) integriert, um so industrielle Szenarien in Richtung Kohlenstoffneutralität (Netto-Null) zu entwickeln. Die einzelnen Tasks sind in Abbildung 2 abgebildet.

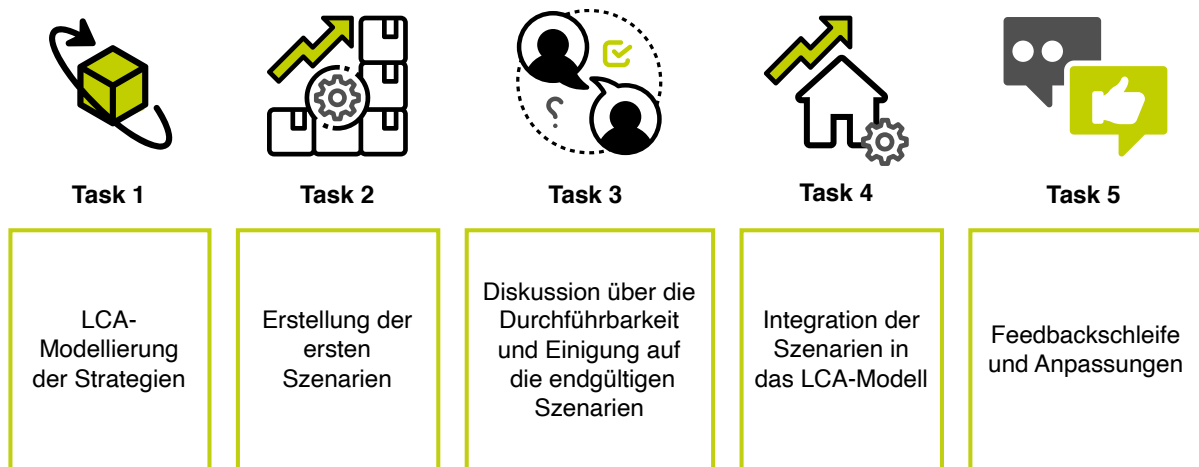


Abbildung 2: Tasks Arbeitspaket 2

3 Methode

3.1 Literaturrecherche

Die Liste der Strategien wurde durch eine umfassende Literaturrecherche zusammengestellt, die auf der Grundlage nationaler und europäischer Projekte durchgeführt wurde, insbesondere der Projekte INTEGRATE¹ und EU-WLC², die bereits teilweise veröffentlicht wurden (Alaux et al., 2024a; Maierhofer et al., 2023). Zunächst wurde nach früheren Literaturübersichten, Studien und Berichten über Strategien zur Reduzierung oder Beseitigung von Treibhausgasen in Gebäuden oder typischen Baumaterialien (z. B. Zement) gesucht. Wichtige Literaturübersichten und graue Literatur wurden identifiziert, die die Analyse ergänzen könnten, insbesondere internationale Berichte. Die meisten systematischen Literaturübersichten zu diesem Thema für verschiedene Branchen oder Lebenszyklusstadien von Gebäuden basieren auf Arbeiten, die vor 2021 veröffentlicht wurden. Da es für einige Strategien Datenlücken gab, wurden systematisch Artikel überprüft, die zwischen 2021 und 2023 veröffentlicht wurden. Auf der Grundlage der ausgewählten Studien wurden Informationen gesammelt und klassifiziert. Diese Ergebnisse wurden sowohl auf europäischer Ebene mit Interessenvertreter*innen aus europäischen Organisationen von Architekt*innen, Industrie, Hersteller*innen, Abbruchunternehmen und Wohnungsbaugesellschaften als auch mit den Vertreter*innen der WKO diskutiert.

¹ <https://wegcwp.uni-graz.at/integrate/>

² <https://c.ramboll.com/life-cycle-emissions-of-eu-building-and-construction>

3.2 Ökobilanzierung

Die Ökobilanzierung auf der Ebene der Baumaterialien, der Gebäude und des Gebäudebestands wird mit dem Modell PULSE-AT v3.0 (Alaux et al., 2024b) durchgeführt, das an der Technischen Universität Graz entwickelt wurde. Abbildung 3 zeigt einen Überblick über das Modell (Alaux et al., 2025). Es projiziert die zukünftige Entwicklung des österreichischen Gebäudebestands und die damit verbundenen Umweltauswirkungen mittels prospektiver Ökobilanzierung, indem es die identifizierten Strategien mit anderen dynamischen Parametern (wie der Bevölkerungsentwicklung) zu Zukunftsszenarien kombiniert. Aufgrund der detaillierten Gebäudeinventardaten können die Auswirkungen der einzelnen Strategien auf verschiedenen Ebenen (Gebäude, Komponenten und Materialien) dargestellt werden. Bei der Modellierung der Ökobilanz werden Brightway2 (Mutel, 2017), Premise (Sacchi et al., 2022) und benutzerdefinierte Python-Skripte kombiniert, um die Verwendung sowohl nationaler Daten als auch umfassenderer europäischer und globaler Daten zu ermöglichen.

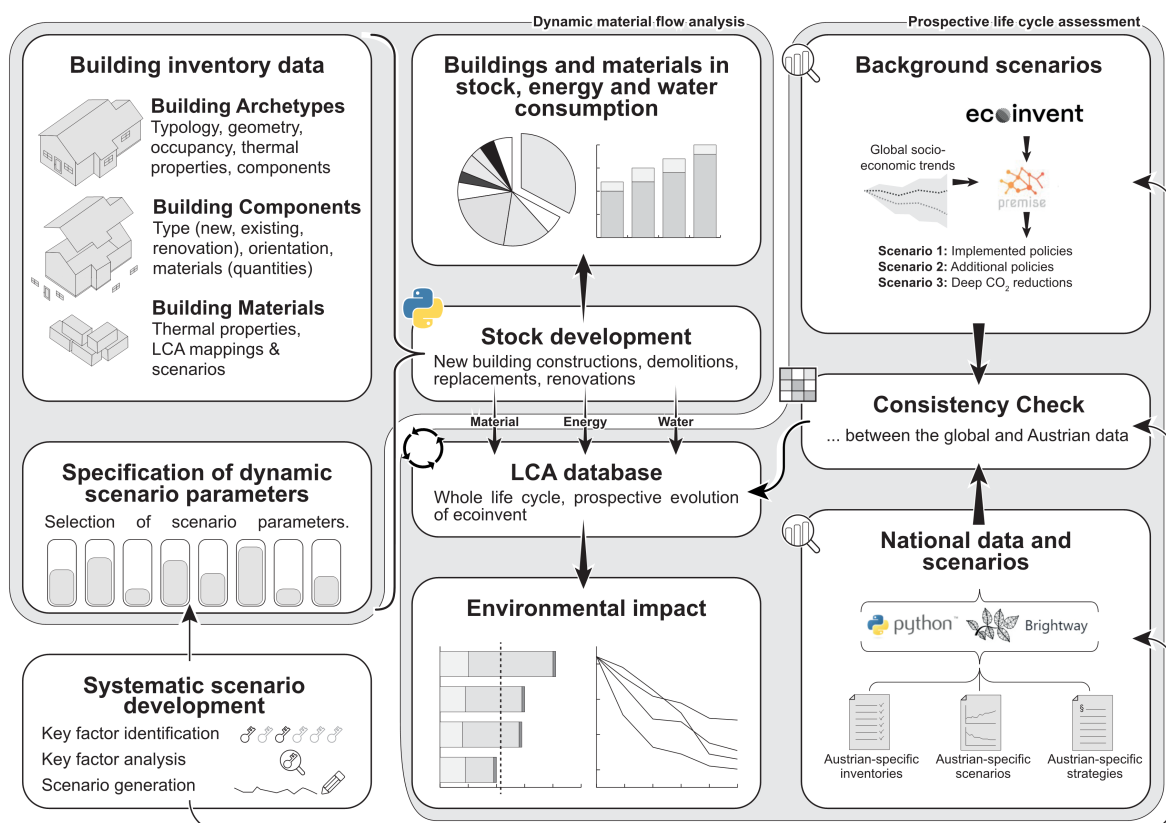


Abbildung 3: Überblick über PULSE-AT (Alaux et al., 2025)

Des weiteren wurden die Strategien in 5 Strategietypen unterteilt:

- Erneuerbare Energie
- CCS/CCU
- Energieeffizienz
- Stoffliche Effizienz
- Alternative Einsatz- und Rohstoffe

4.2 Erstauswahl der Strategien

Die identifizierten Strategien wurden sowohl anhand des potenziellen THG-Reduktionspotential als auch anhand des technologischen Entwicklungsstands (technology readiness level, TRL) sowie der Anwendbarkeit in Österreich bewertet. Somit wurde eine Erstauswahl von 25 relevanten Strategien getroffen (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Erstauswahl relevanter Strategien

Material	Strategienname	THG-Reduktion	TRL	Anwendbarkeit AT
Zement	Bio- und synthetische Treibstoffe	Niedrig	Mittel	Mittel
Zement	CCS/CCU	Mittel	Mittel	Mittel
Zement	Energieeffizienz	Niedrig	Hoch	Mittel
Zement	Klinkersubstitution	Mittel	Hoch	Mittel
Beton	Betonfertigteile	Niedrig	Hoch	Hoch
Beton	Optimierung Rezeptur	Niedrig	Hoch	Mittel
Beton	Reduzierte Überspezifikation von Beton	Niedrig	Hoch	Hoch
Beton	RC Gesteinskörnungen	Niedrig	Hoch	Mittel
Keramik	Energieeffizienz	Niedrig	Hoch	Mittel
Keramik	Lehmziegel	Mittel	Mittel	Mittel
Keramik	Recyclingmaterial	Mittel	Niedrig	Hoch
Gips und Putze	Recycelte Rohstoffe	Mittel	Hoch	Hoch
Mineralwolle	Glaswolle aus recyceltem Glas	Mittel	Hoch	Hoch
Mineralwolle	Recyclingmaterial	Niedrig	Hoch	Hoch
Eisen und Stahl	Energieeffizienz	Niedrig	Hoch	Mittel
Eisen und Stahl	Betonstahl aus Ökostrom	Niedrig	Hoch	Mittel
Eisen und Stahl	Sekundärmaterial in Baustahl	Mittel	Hoch	Hoch
Dämmstoffe	Energieeffizienz und Treibstoffwechsel	Niedrig	Hoch	Mittel
Dämmstoffe	Recycling von Polystyren in EPS/XPS	Mittel	Mittel	Hoch
Dämmstoffe	Elektrifizierung der EPS/XPS-Produktion	Niedrig	Mittel	Mittel

Das aus der Literatur abgeleitete THG-Reduktionspotenzial ist in Abbildung 5 dargestellt. Das Reduktionspotenzial bezieht sich auf die Herstellung des Materials und ist jeweils als Abweichung zur konventionellen Produktion des Materials zu verstehen.

Diese ausgewählten Strategien wurden in einem Projektworkshop mit Vertreter:innen der WKO diskutiert und eine weitere Auswahl bzw. Gruppierung vorgenommen.

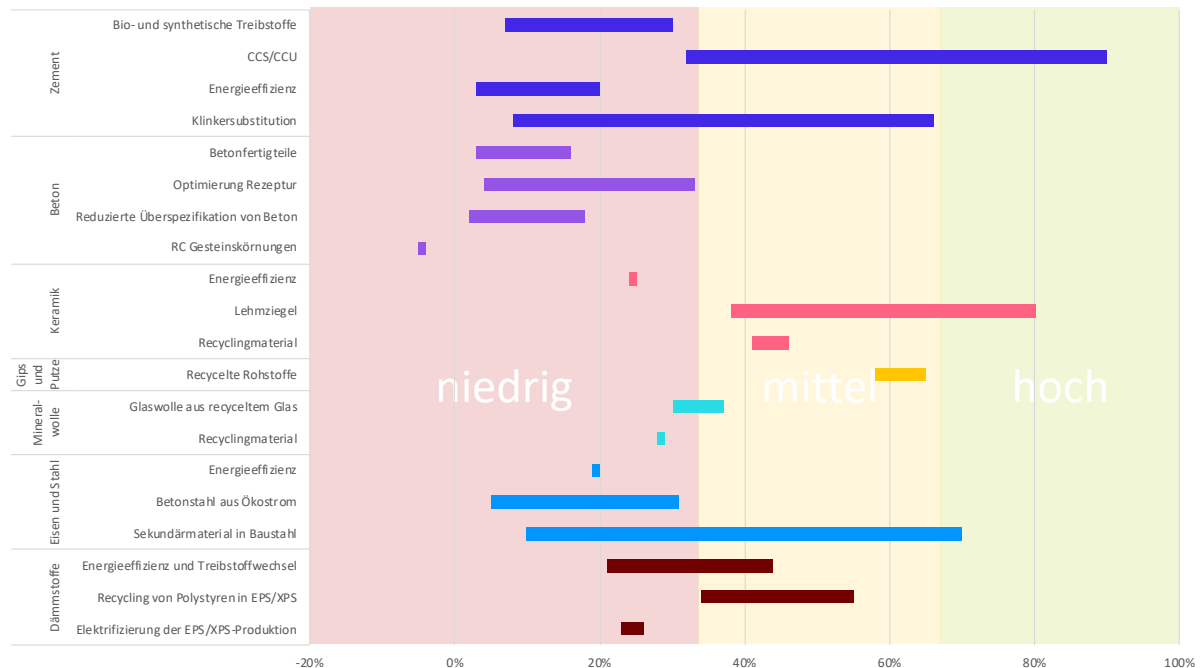


Abbildung 5: Potenzielle THG-Reduktion auf Materialebene der ausgewählten Strategien

4.3 Gemeinsame Priorisierung der Strategien

Im Workshop mit Vertreter:innen der WKO am 12.02.2025 in Wien wurden die dargestellten Strategien diskutiert, gruppiert und priorisiert. Die 25 Strategien der Erstausswahl wurden zu zehn übergeordneten Strategien zusammengefasst (Abbildung 6):

Strategienname	Material
CCS/CCU	Zement
Klinkersubstitution	Zement
Betonfertigteile	Beton
Optimierung Rezeptur	Beton
Lehmziegel	Keramik
Recyclingmaterial	Beton, Keramik, Gips und Putze, Mineralwolle, Eisen und Stahl, Dämmstoffe
Elektrifizierung	Dämmstoffe
Energieeffizienz	Beton, Keramik, Eisen und Stahl, Dämmstoffe
Ökostrom	Eisen und Stahl
Bio- und synthetische Treibstoffe	Zement

Abbildung 6: Gruppierung der Strategien

Anhand dieser Gruppen wurde abgestimmt, welche für die weitere Modellierung besonders relevant sind (Abbildung 7). Als besonders relevant wurden CCS/CCU sowie die Elektrifizierung von Produktionsprozessen und Steigerungen der Energieeffizienz erachtet.



Abbildung 7: Abstimmungsergebnis zur Priorisierung der Strategien

5 Ergebnisse der Modellierung

Basierend auf der mit WKO-Vertreter*innen getroffenen Auswahl wurden folgende Szenarien entwickelt, anhand derer potenzielle zukünftige Entwicklungen im Gebäudebereich modelliert wurden:

Tabelle 2: Szenarien für die Modellierung der THG-Emissionen

SZENARIO	KURZBEZEICHNUNG	BESCHREIBUNG
BAU	Business as usual	Keine technologischen Änderungen, Projektion von 2023
CCS	CO ₂ -Abscheidung und Speicherung/Nutzung	Emissionsreduktion durch CCS/CCU in der Zementproduktion
REN	Erneuerbare und Steigerung Energieeffizienz	Einsatz von erneuerbaren Strom- und Treibstoffquellen in der Materialproduktion
CEM	Klinkersubstitution	Substitution von Klinker durch Nebenprodukte wie Flugasche oder Schlacke und anderen innovativen Bindemitteln
OPT	Materialeffizienz	Verbesserter Einsatz von Materialien: Optimierte Konstruktion mit weniger Materialverbrauch (Beton, Stahl)
CIR	Recycling und Reuse	Vermehrter Einsatz von Reuse und Recycling in der Materialproduktion
ALL	Kombination aller Szenarien	Kombination der Szenarien (ohne BAU)

Anhand dieser Szenarien wurden die konstruktionsbezogenen Emissionen des österreichischen Gebäudebestands in den kommenden Jahren modelliert. Die Ergebnisse der fossilen THG-Emissionen durch Neubauten (Modul A1-A3) werden in Abbildung 8 dargestellt.

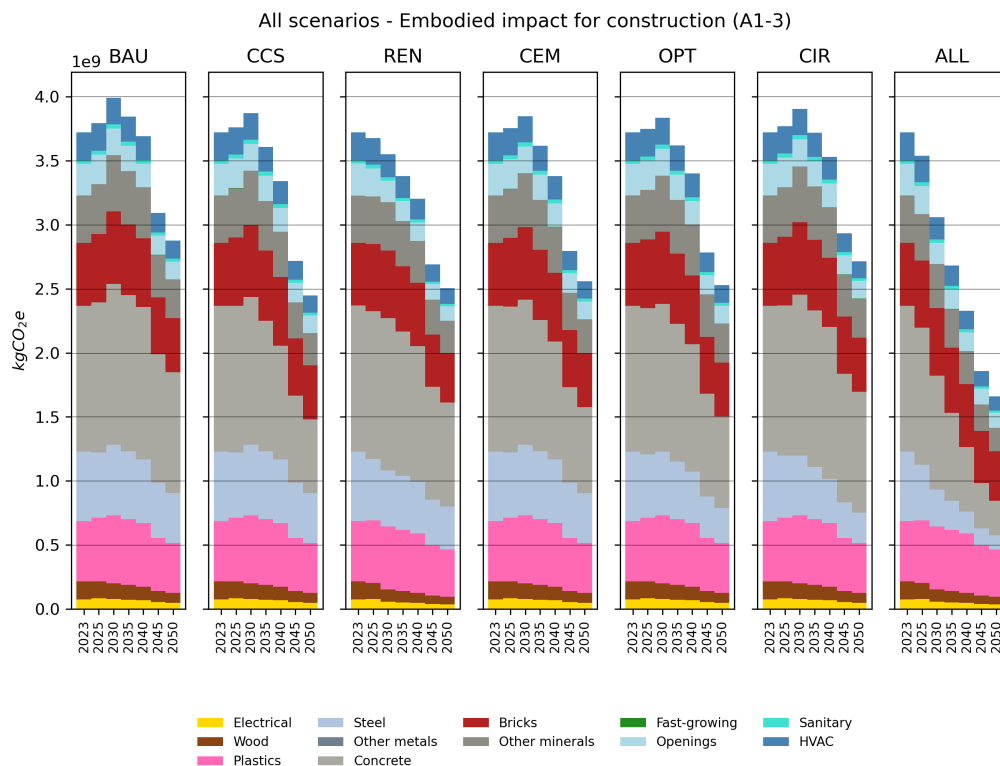


Abbildung 8: Ergebnisse der fossilen konstruktionsbezogenen THG-Emissionen (GWP100, Modul A1-A3) auf nationaler Ebene bis 2050, nach Szenario und Baumaterial, ambitioniertes Szenario

Alle Szenarien (bis auf REN und ALL) steigen bis 2030 an und sinken erst danach ab. In der Modellierung der Szenarien werden technische Änderungen nach und nach stärker eingesetzt bis sie ihre „finale“ Diffusionsrate 2050 erreichen. Durch steigende Bautätigkeiten in den nächsten Jahren wird in der kurzen Zeit bis 2030 noch keine absolute Reduktion der THG-Emissionen erreicht. Eine Ausnahme bildet das Szenario REN, welches den vermehrten Einsatz erneuerbarer Energieträger für Elektrizität und Treibstoffe zum Fokus hat. Bei diesen Umstellungen wird eine schnellere Implementierung vorausgesetzt. Zu beachten ist, dass hier der österreichische Gebäudebestand modelliert wird und Auswirkungen auf andere Sektoren durch z.B. eine höhere Nachfrage nach Ökostrom nicht berücksichtigt sind.

Nach 2030 nehmen die jährlichen THG-Emissionen in allen Szenarien ab. Im BAU-Szenario liegt dies vorrangig an dem projizierten abflachenden Bevölkerungswachstum und damit verbundenen sinkenden Neubauten. Dieser Effekt wird in den weiteren Szenarien durch technologische Änderungen verstärkt. Das Szenario CCS wirkt sich auf die Emissionen aus

Beton aus, während REN in allen Materialien angewandt wird. CEM zeigt ebenso beim Beton Wirkung, OPT reduziert die Materialnachfrage von Beton und Stahl. CIR wird bei einigen Materialien angewandt (Stahl, Beton, Plastik, mineralische Materialien). ALL zeigt Auswirkungen in allen Sektoren.

Tabelle 3: Veränderung der THG-Emissionen (fossil, A1-A3) 2023-2050, in Relation zu 2023 und zu BAU

	VERÄNDERUNG PRO SZENARIO (2050 ZU 2023)	VERÄNDERUNG KUMULIERT ZU BAU
BAU	-23%	0%
CCS	-34%	-7%
REN	-33%	-10%
CEM	-31%	-6%
OPT	-32%	-6%
CIR	-33%	-6%
ALL	-59%	-30%

Während die Emissionen im Vergleich zu 2023 um über 50% reduziert werden (ALL), fallen die Veränderungen der Emissionen im Vergleich zum BAU-Szenarien im jeweils gleichen Zeitraum kleiner aus. Über den Gesamtzeitraum 2023-2050 können die THG-Emissionen durch einzelne Strategien zu 6-10% im Vergleich zu BAU reduziert werden, durch eine Kombination (ALL) können die Emissionen deutlich stärker reduziert werden: um 59% im Vergleich 2050 zu 2023, um 30% kumulativ im Vergleich zu BAU.

Die Ergebnisse der Modellierung können auch auf Gebäudeebene betrachtet werden, wie in Abbildung 9 dargestellt. Pro Gebäudetyp wurden jeweils verschiedene Bauweisen (Archetypen) betrachtet, wodurch sich eine Bandbreite an möglichen THG-Emissionen pro m² und Gebäudetyp ergibt. In der Abbildung wird die Kombination der verschiedenen Szenarien dargestellt („ALL“). Es zeigt sich, dass durch die Veränderungen in der Baumaterialproduktion die konstruktionsbezogenen Emissionen aller Gebäudetypen im Schnitt über die Hälfte reduziert werden können. „OTH“ und „TRA“, Gebäude des (Einzel-)Handels und Dienstleistungssektors sowie andere Nicht-Wohngebäude zeigen in der Abbildung Datenpunkte, die weit außerhalb der restlichen liegen. Diese Ausreißer entstehen durch die hohe Varianz innerhalb der Gebäudetypen und damit einhergehend verschiedenen Konstruktionsweisen.

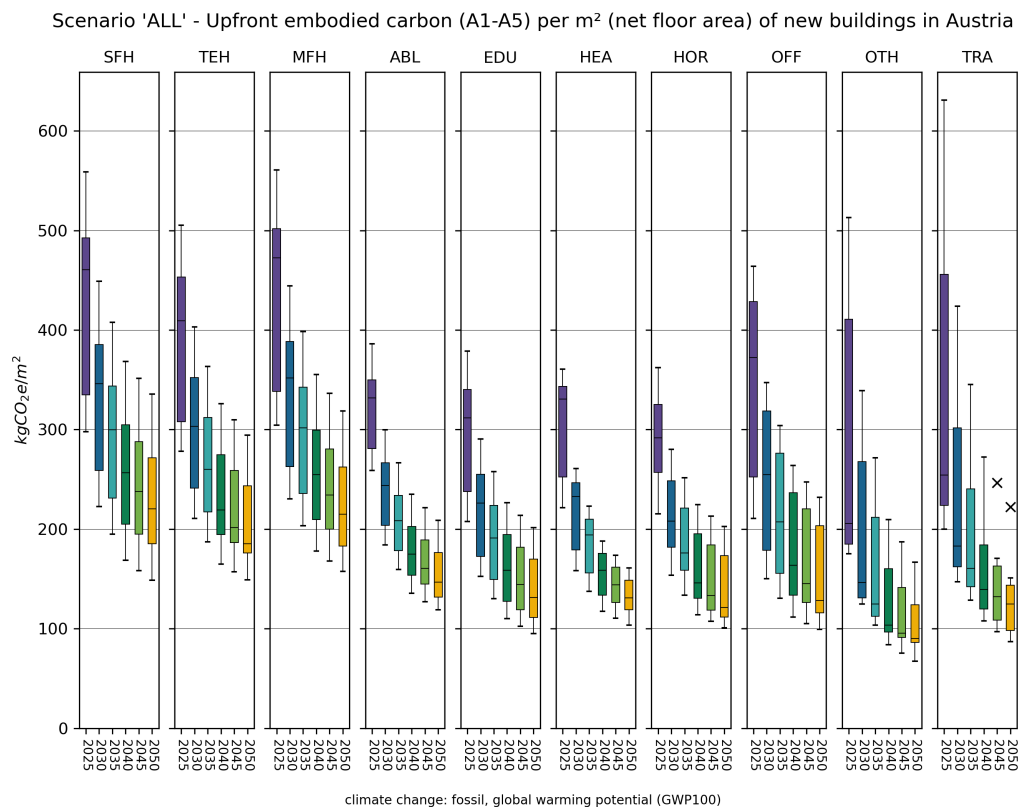


Abbildung 9: Konstruktionsbezogene fossile THG-Emissionen (GWP100, Modul A1-A5) auf Gebäudeebene bis 2050, nach Gebäudetyp, Szenario „ALL“. Legende: SFH – Einfamilienhaus, TEH – Reihenhaushaus, MFH – Mehrfamilienhaus, ABL – Mehrfamilienhaus (>10 Wohnungen), EDU – Gebäude für Bildung, HEA – Gebäude des Gesundheitswesens, HOR – Hotels und Gastronomiegebäude, OFF – Bürogebäude, OTH – Andere Nicht-Wohngebäude, TRA – Handels- und Dienstleistungsgebäude

6 Zusammenfassung & Fazit

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass einzelne Strategien bzw. Strategiepakete nicht ausreichend sind, um die THG-Emissionen deutlich zu reduzieren. Viel mehr braucht es ein Zusammenspiel aus den unterschiedlichen Sektoren und Herangehensweisen. Während die Produktion von Baumaterialien etwa durch gesteigerte Energieeffizienz, alternative Produktionsmethoden sowohl in der Wahl der Rohstoffe als auch der Energieträger nachhaltiger gestaltet werden kann, könnten Restemissionen in den nächsten Jahrzehnten durch CCS/CCU vermindert werden. Darüber hinaus spielen auch die Verwendung der Baustoffe im Gebäude (zum Beispiel durch effizienteren Materialeinsatz und regionale Materialien) und der verwendete Energiemix (Ausbau erneuerbarer Energien) eine wichtige Rolle. Die höchsten THG-Reduktionen werden durch eine Kombination aller Szenarien erzielt (ALL), damit können die konstruktionsbezogenen THG-Emissionen in Österreich bis 2050 über 50% reduziert werden.

Um die restlichen THG-Emissionen weiter zu reduzieren, werden weiterführende technologische Änderungen in der Baumaterialproduktion – bzw. eine schnellere Umsetzung dieser – benötigt, sowie Technologien zur Entfernung von THG in der Umwelt. Nur durch zusätzliche Kohlenstoffsinken können bis 2050 Netto-Null-Emissionen erreicht werden.

7 Literatur

- Alaux, N., Ruschi Mendes Saade, M., Hoxha, E., Truger, B., & Passer, A. (2023). Future trends in materials manufacturing for low carbon building stocks: A prospective macro-scale analysis at the provincial level. *Journal of Cleaner Production*, 382, 135278. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.135278>
- Alaux, N., Marton, C., Steinmann, J., Maierhofer, D., Mastrucci, A., Petrou, D., Potrč Obrecht, T., Ramon, D., le Den, X., Allacker, K., Passer, A., & Röck, M. (2024a). Whole-life greenhouse gas emission reduction and removal strategies for buildings: Impacts and diffusion potentials across EU Member States. *Journal of Environmental Management*, 370, 122915. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2024.122915>
- Alaux, N., Schwark, B., Hörmann, M., Ruschi Mendes Saade, M., & Passer, A. (2024b). Assessing the prospective environmental impacts and circularity potentials of building stocks: An open-source model from Austria (PULSE-AT). *Journal of Industrial Ecology*, 28(6), 1435–1448. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jiec.13558>
- Alaux, N., Steubing, B., Habert, G., Ruschi Mendes Saade, M., & Passer, A. (2025). Future life-cycle greenhouse gas emission scenarios for the Austrian building stock: A systematic approach. *Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c12138>
- Maierhofer, D., Zögl, I., Saade, M. R. M., & Passer, A. (2023). The carbon dioxide storage potential of building materials: a systematic literature review. *Journal of Physics: Conference Series*, 2600(16), 162003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2600/16/162003>
- Mutel, C. (2017). Brightway: An open source framework for Life Cycle Assessment. *Journal of Open Source Software*, 2(12), 236. <https://doi.org/10.21105/JOSS.00236>
- Sacchi, R., Terlouw, T., Siala, K., Dirnaichner, A., Bauer, C., Cox, B., Mutel, C., Daioglou, V., & Luderer, G. (2022). PRospective EnvironMental Impact asSEment (premise): A streamlined approach to producing databases for prospective life cycle assessment using integrated assessment models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 112311. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112311>
- Truger, B., Nabernegg, S., Lackner, T., Röck, M., Alaux, N., Hoxha, E., Saade, M. R. M., & Passer, A. (2022). Life cycle GHG emissions of the Austrian building stock: A combined bottom-up and top-down approach. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1078(1), 012024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012024>



NACHHALTIGES BAUEN
Institut für Tragwerksentwurf
www.nhb.tugraz.at
office.nhb@tugraz.at
tel.: +433168736213