

WP 2

Abschlussbericht

ITAT-11-028
SITAR



Impressum

Forschungsprojekt Sitar - Arbeitspaket WP2 - Bericht Projektpartner Bergmeister

Veröffentlichung der Verwaltungsbehörde:

Autonome Provinz Bozen – Südtirol

Abteilung Europa

Gemeinsames Sekretariat

Gerbergasse 69 – 39100 Bozen

T.: +39 0471 41 31 10

gs-sc@provincia.bz.it

www.interreg.net

Die gegenständliche Broschüre dient ausschließlich der Information. Der Text des von der Europäischen Kommission mit Entscheidung C(2022)4260 final vom 16.06.2022 genehmigten Programms ist der einzig geltende Text.

© Autonome Provinz Bozen – Vervielfältigung mit Quellenangabe gestattet.

Für etwaige Aktualisierungen: www.interreg.net

Inhaltsverzeichnis

1.	Einführung	3
2.	Rezyklierte Gesteinskörnung	4
3.	Emissionsarme Bindemittel	8
4.	Betone mit rezyklierten Zuschlägen	13
5.	Ressourceneffiziente Betonkonstruktionen	16
6.	Lebenszyklus-Analysen.....	26

1. Einführung

Gemäß einer Schätzung des UN Environment Programme [UNEP, 2019] liegt der weltweite Verbrauch an Sand, Kies und gebrochener Gesteinskörnung bei etwa 40 bis 50 Milliarden Tonnen pro Jahr. Davon entfallen allein auf die Bauindustrie rund 30 Milliarden Tonnen. Gleichzeitig ist das Bauwesen für etwa 11 % der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich [UNEP, 2018]. Ein wesentlicher Faktor hierfür ist der Baustoff Beton, der aufgrund seiner breiten Anwendung und der damit verbundenen hohen Produktionsmengen erheblich zur Ressourcennutzung und Emissionsbelastung beiträgt. Jährlich werden global etwa 4 Milliarden Tonnen Zement produziert, während für die Betonherstellung rund 28 Milliarden Tonnen Gesteinskörnung und 2,8 Milliarden Tonnen Wasser benötigt werden [UNEP, 2019]. In Deutschland wurden im Jahr 2020 etwa 236 Mio. t mineralischer Primärrohstoffe und fossiler Brennstoffe zur Herstellung von Zement und Beton eingesetzt. Diese Mengen werden zur Herstellung von 55,3 Mio. m³ Transportbeton und eine statistisch nicht erfasste Menge für die zunehmende Anzahl von Betonfertigteilen verwendet. Im selben Jahr 2020 wurden in Deutschland etwa 35,5 Mio. t Zement hergestellt. In Österreich beträgt der Gesamtverbrauch an Gesteinskörnungen etwa 100 Millionen Tonnen pro Jahr. Jährlich werden etwa 10 Millionen m³ Transportbeton, 4 Millionen m³ Fertigteilbeton und 1 Million m³ Beton aus Baustellenmischanlagen produziert [ÖBV Sachstandbericht, 2022].

Diese Materialressourcen werden in Bauwerken über deren gesamte Lebensdauer hinweg gebunden und fallen nach Erreichen der Lebensdauer im Falle eines Rückbaus als Abfall wieder an. Mineralische Abfälle aus Bau- und Abbrucharbeiten, Bodenaushub und Baggergut machen dabei etwa 38 % des gesamten Abfallaufkommens in der EU aus. In Österreich stellen Aushubmaterialien und Abfälle aus dem Bauwesen mit ca. 46,1 Millionen Tonnen und 12,5 Millionen Tonnen die größten Anteile des gesamten Abfallaufkommens dar [Umweltbundesamt: Statusbericht zur Abfallwirtschaft in Österreich, 2023]. In Südtirol fallen pro Jahr (Wert ca. seit 5 Jahren konstant) etwa 1 Mio t Bauschutt an, davon ca. 20% Betonabbruch.

Angesichts der begrenzten Verfügbarkeit natürlicher Rohstoffe und der steigenden Nachfrage nach Baustoffen sowie geänderter gesetzlicher Rahmenbedingungen (in Österreich gilt seit dem Jahr 2024 ein Deponierungsverbot für Beton, Asphalt und Straßenaufbruch [Deponieverordnung 2008 i.d.g.F.]) gewinnt die Wiederverwertung von Beton zunehmend an Bedeutung.

Nach dem Ende der Lebensdauer von Bauwerken ist es entscheidend, die darin enthaltenen Materialien einer Verwertung zuzuführen. Im Idealfall wird der Betonbruch aufbereitet und als Gesteinskörnung für die Herstellung von Recycling-Beton verwendet. Dieses Verfahren trägt nicht nur zur Ressourcenschonung bei, sondern reduziert auch die Umweltbelastungen, die mit der Gewinnung und Verarbeitung von Primärrohstoffen verbunden sind. Recycling-Beton ist daher ein zentraler Baustein für nachhaltiges Bauen und eine zirkuläre Bauwirtschaft [Haist et al., 2023; Glock et al., 2024; [DAfStB Richtlinie, 2024].

Angesichts des hohen Material- und Energieverbrauchs sowie der Abfallmengen im Bauwesen wird sich das zukünftige Bauen im Kontext der Herausforderungen des Klimawandels grundlegend von den heute etablierten Bauprozessen unterscheiden. Insbesondere die verwendeten Baustoffe stehen im Fokus eines Wandels hin zu höherer Klimateffizienz und Ressourcenschonung [Glock et al., 2024]. Dies umfasst einerseits die Entwicklung und Nutzung von CO₂-reduzierten Baumaterialien, wie beispielsweise klimafreundlichen

Bindemitteln im Beton, und andererseits die Wiederverwertung von Rückbaumaterialien sowie die Verwertung von Aushub- und Abbruchmaterialien.

Trotz der ökologischen und ökonomischen Vorteile bestehen in Österreich und Italien weiterhin normative Einschränkungen, die den Einsatz von Recycling-Beton reglementieren. Diese Normen definieren unter anderem die zulässigen Anteile von Recycling-Gesteinskörnungen sowie die Anforderungen an deren Qualität und Einsatzbereiche [Haist et al., 2023; Glock et al., 2024]. Solche Regelungen stellen sicher, dass die technischen Eigenschaften und die Sicherheit von Bauwerken auch bei der Verwendung von Recycling-Beton gewährleistet bleiben. Dennoch sind weitere Anpassungen und Innovationen notwendig, um die Akzeptanz und Verbreitung von Recycling-Beton zu fördern und die Bauwirtschaft nachhaltiger zu gestalten.

Zahlreiche aktuelle Beispiele und Studien zeigen, dass unter Verwendung geeigneter Aufbereitungstechniken Recyclinggesteinskörnungen mit sehr hoher Qualität hergestellt werden können. Dadurch ergeben sich sehr hohe mögliche Verwertungsraten (Verwendung von bis zu 100 % rezyklierter Gesteinskörnung) für die Herstellung qualitativ hochwertiger Betone – bei Abstimmung bzw. Optimierung der Betonrezepturen. Dies wirkt sich nicht nur positiv auf den Ressourcenverbrauch (Schonung natürlicher Ressourcen), sondern auch positiv auf das Klima (geringeres Global Warming Potential bei Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen) aus [Wild et al., 2024; Stengel et al., 2024].

Die Klimawirkung kann durch Verwendung emissionsärmerer Zementarten bzw. Anpassung des Bindemittels (Reduktion des Portlandzementklinkeranteils durch Verwendung von Zusatzstoffen) auch bei Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen weiter verbessert werden [Hron et al., 2025].

Baustofftechnologische Ansätze und konstruktive Vorschläge (Bergmeister, 2023), die nicht nur den CO₂-Ausstoß pro m³ Beton betrachten, sondern auch die Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit des Werkstoffs berücksichtigen, liegen jedoch bereits vor. Eine verlässliche und vor allem vergleichbare Planungsmöglichkeit hinsichtlich einer nachhaltigen Tragwerksgestaltung, wurde durch den Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) im Jahr 2024 die Richtlinie „Treibhausgas-Reduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton“ eingeführt.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes werden die wichtigsten Forschungsergebnisse in Bezug auf die lokale Verfügbarkeit von rezyklierter Gesteinskörnung (RC-Körnung) in Südtirol, die international und regionalen Kenntnisse zur Aufbereitung von rezyklierter Gesteinskörnung, der Stand der emissionsarmen Bindemittel und einige Überlegungen zu topologieoptimierten Konstruktionen dargelegt.

2. Rezyklierte Gesteinskörnung

Bei der Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung aus aufbereitetem Betonabbruch für die neuerliche Betonherstellung kommt der Aufbereitung des Altbetons zur Gewinnung von rezyklierter Gesteinskörnung eine wesentliche Rolle zu. Diese entscheidet maßgeblich über die Qualität und Verwendungsmöglichkeiten der rezyklierten Gesteinskörnung, da sich diese wesentlich auf deren Eigenschaften auswirkt und wiederum die Frischbetoneigenschaften (und folglich auch jene des Festbetons) des neu herzustellenden Recycling-Betons (R-Beton) beeinflusst.

In Abhängigkeit der Betonsorte sowie der Abbruchmethode des Altbetons weist das unmittelbar nach Abbruch vorliegende Material jeweils unterschiedliche geometrische, physikalische und chemische Eigenschaften auf. Während die wesentlichen physikalischen Eigenschaften, wie Festigkeit oder Verformungsverhalten sowie die chemischen Eigenschaften (z.B. Gehalt an Chlorid oder Sulfat) primär vom Ausgangsbeton bzw. von der ursprünglichen Ausgangsgesteinskörnung abhängen, können die geometrischen Eigenschaften (Größtkorn, Kornverteilung, Feinteilgehalt, Kornform, etc.) maßgeblich durch die Art der Aufbereitung beeinflusst werden.

Es zeigte sich, dass bei entsprechender Aufarbeitung von Altbeton ein rezykliertes Zuschlagmaterial wieder gewonnen werden kann, welches sich gut zur Betonherstellung eignet.

Eine optimale Aufbereitungsmethode zum Erreichen günstiger Gesteinskörnungseigenschaften ist die Kombination einer Nassaufbereitung (Abwaschen anhaftender Feinteile, Verringerung des Feinteilgehaltes, Optimierung der Sieblinie) mit geeigneten Brecherarten (Prallmühle), um eine angepasste Sieblinie für die Betonherstellung mit möglichst gedrungener, kubischer Kornform zu erreichen und bei der späteren Anwendung der rezyklierten Gesteinskörnung als Gesteinskörnung für Beton das Saugvermögen auf Kornebene zu verbessern.

In Abbildung 1 werden die wichtigsten Arbeitsschritte zur Aufbereitung von rezyklierter Gesteinskörnung dargestellt. Die aktuellen Forschungsergebnisse (siehe Forschungsprojekt: Green Infrastructure; FFG-gefördertes Projekt an der BOKU-University 2024-2027) und Untersuchungen aus der aktuellen Literatur zeigen folgende Erkenntnisse:

- Nur eine optimierte Nassaufbereitung eine hochwertige rezyklierte Gesteinskörnung mit allen erforderlichen geometrischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften für dauerhaften Beton liefert.
- Auch zeigte sich, dass mit steigendem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung ein höherer Bedarf an Fließmittel und Konsistenzhaltemittel notwendig ist. Die Frischbetonrohichte sinkt mit steigendem Anteil aufgrund der geringeren Dichte der rezyklierten Gesteinskörnung.
- Mit steigendem Anteil an rezyklierten Gesteinskörnung wurde eine tendenzielle Reduktion der Wassereindringtiefe beobachtet, was auf die verbesserte Packung der rezyklierten Gesteinskörnung zurückzuführen ist.
- Druckfestigkeit: Bei einem qualitätsgesicherten Aufbereitungsvorgang bleibt für alle Betonsorten die Druckfestigkeit auch mit steigendem Anteil an rezyklierten Gesteinskörnung nahezu konstant.
- Spaltzugfestigkeit: Bei steigendem Anteil an rezyklierten Gesteinskörnung sinkt die Spaltzugfestigkeit leicht ab, stabilisiert sich jedoch bei höheren Ersatzraten.
- E-Modul: Ein Rückgang des E-Moduls wird bei höheren Anteilen an rezyklierten Gesteinskörnung festgestellt, was auf eine höhere Verformbarkeit hinweist.
- Bruchenergie: Mit steigendem Anteil an rezyklierten Gesteinskörnung sinkt die Bruchenergie (Beispiel: natürliche GK: 86 N/mm²; 100 % rezyklierte Gesteinskörnung: 63 N/mm² = 73%).
- Wasserdurchlässigkeit: Auch mit steigendem Anteil an rezyklierten Gesteinskörnung kann eine Wasserundurchlässigkeit bis zu einem Wasserdruck von 7 bar erreicht werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Betone mit hohen Anteilen an rezyklierter Gesteinskörnung bei angepasster Rezeptur ein dichtes Gefüge und damit geringe Wasserdurchlässigkeiten erreicht werden können.

Die Ergebnisse zeigen, dass Recyclingbetone mit angepasster Rezeptur vergleichbare oder bessere Druckfestigkeiten als Referenzbetone erreichen können, bei gleichzeitig leicht reduzierter Steifigkeit und Bruchenergie, was sich positiv auf die Duktilität auswirkt.

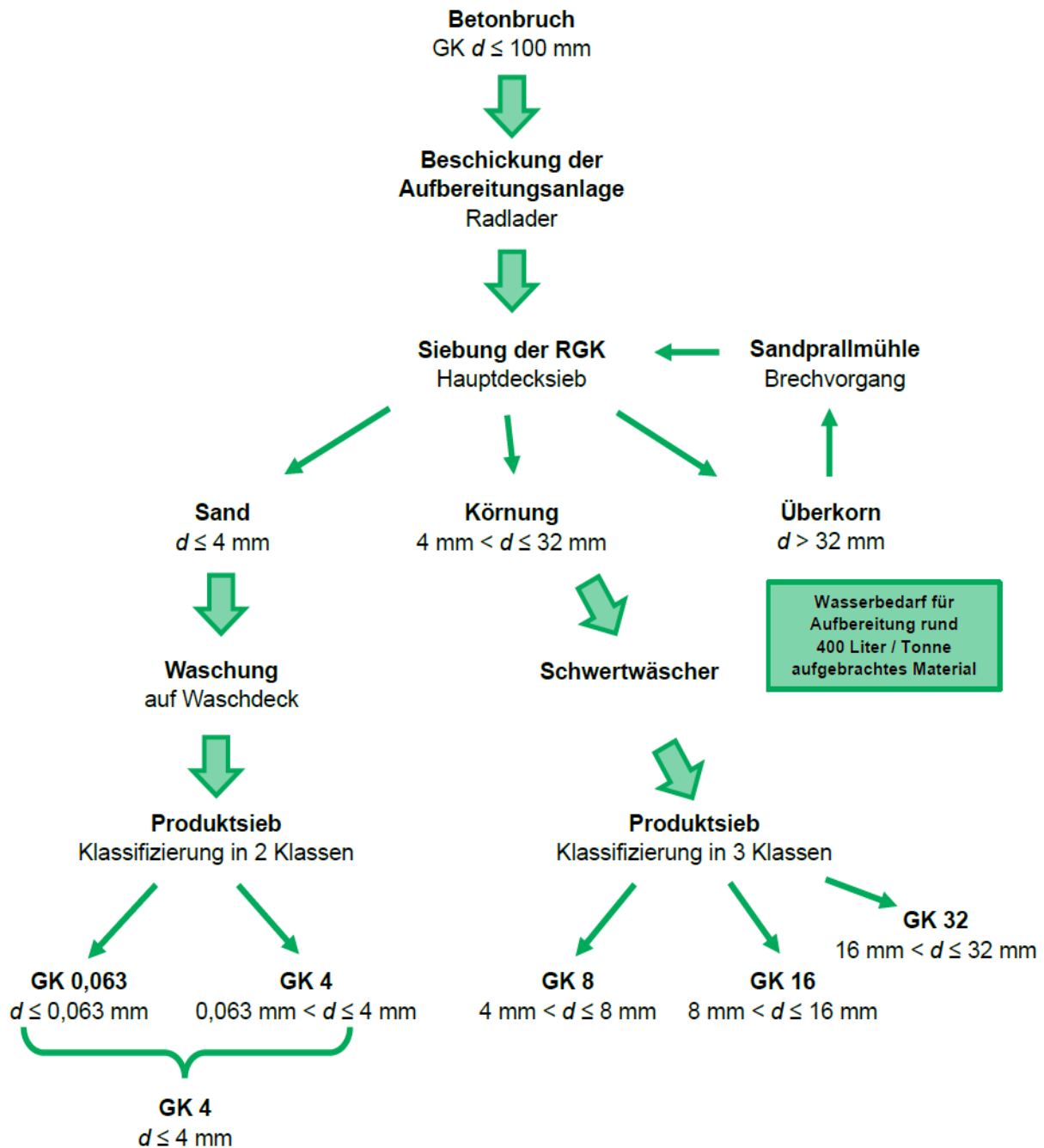


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Aufbereitungsvorganges

Die Druckfestigkeit des Rohmaterials kann durch einen Punktlastversuch ermittelt werden. Weiters soll der LA-Wert zur Feststellung der Widerstandfestigkeit der Gesteinskörnung gegen Zertrümmerung ermittelt werden.

Zur Überprüfung der Form soll der Shape Index verwendet werden. Tabelle 1 zeigt ein Beispiel für den Shape Index verschiedener Kornklassen. Die feineren Kornklassen weisen geringfügig höhere Werte beim *SI* auf. Bei einer Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnung für die Betonherstellung soll daher die Form der einzelnen Gesteinskörner möglichst gedungen – also der Shape Index möglichst klein – sein.

Tabelle 1: Shape Index je Kornklasse

Kornklasse	<i>SI</i>	<i>SI</i> -Klasse
$d \leq 4 \text{ mm}$	32	<i>SI</i> ₄₀
$8 \text{ mm} < d \leq 16 \text{ mm}$	29	<i>SI</i> ₄₀
$16 \text{ mm} < d \leq 32 \text{ mm}$	23	<i>SI</i> ₄₀

Eine optimale Aufbereitung zum Erreichen geeigneter geometrischer Gesteinseigenschaften schafft die Grundlage für eine spätere erfolgreiche Verwertung als Gesteinskörnung für Beton. Durch eine optimierte Nassaufbereitung in einer großtechnischen Anlage können die wesentlichen geometrischen und mechanischen Anforderungen als Gesteinskörnung für Beton (v.a. hinsichtlich Korngrößenverteilung, Feinteilgehalt und Kornform) und damit die Voraussetzungen für deren Verwendung als rezyklierte Gesteinskörnung für Beton erfüllt werden.

Die Überprüfung der regionalen Verfügbarkeit von rezyklierten-Zuschlagsstoffen, ergab das 29 Unternehmen in Südtirol mit rezyklierten-Zuschlag arbeiten (siehe Kapitel 4: Recyclingbeton).

3. Emissionsarme Bindemittel

3.1 Verfügbarkeit und Wirkungen

In einigen europäischen Ländern wurden sogenannte „Roadmaps“ entwickelt, um ist Klimaschutzziele durch ein Zusammenwirken vielfältiger Maßnahmen zu erreichen. Zur Herstellung möglichst emissionsarmer Betone werden in der Praxis bereits seit vielen Jahren Zementersatzstoffe (engl. Supplementary Cementitious Materials, SCMs) wie z. B. Hüttensand (ein Nebenprodukt der Stahlherstellung), Flugasche (ein Abfallprodukt bei der Verbrennung von Steinkohle) oder Kalksteinmehl (gemahlener Kalkstein) eingesetzt. Zum einen bietet die Zementindustrie bereits Zemente an, bei denen direkt im Zement der bereits erwähnte (hoch CO₂-intensive) Portlandzementklinker durch derartige Zusatzstoffe ausgetauscht wurde (Müller, 2020; Schack et al, 2023; Schack et al., 2025). Zum anderen werden die genannten Stoffe auch direkt bei der Betonherstellung eingesetzt. Mit solchen Nebenprodukten bzw. Abfallstoffen sind durch die Weiterverwendung dieser Materialien große ökologische Vorteilen verbunden. Auch wirken sich Hüttensand und Flugasche durch ihre jeweilige chemische Reaktivität positiv auf die Betoneigenschaften und hier besonders die Dauerhaftigkeit damit hergestellter Betone aus.

Grundsätzlich muss jedoch beachtet werden, dass ein Kilogramm Hüttensand oder Flugasche im Normalfall nicht die gleiche Wirkung im Beton erzielen wie entsprechend ein Kilogramm Portlandzementklinker. Entsprechend muss die Leistungsfähigkeit der einzelnen Stoffe detailliert bei der Zement- bzw. Betonentwicklung betrachtet werden. Eine andere Möglichkeit diese Unterschiede in der chemischen Reaktivität auszugleichen stellt dabei die gezielte Mahlung der einzelnen Stoffe dar, da mit zunehmender Feinheit die chemische Reaktivität der Stoffe – sofern diese überhaupt eine chemische Reaktivität aufweisen – verbessert wird (Schack, Haist, 2024).

Für den Betonbau im alpinen Raum, insbesondere oberhalb von 1000 m Seehöhe, werden Zemente benötigt, die nicht nur den hohen klimatischen und mechanischen Anforderungen genügen, sondern auch einen möglichst geringen CO₂-Fußabdruck aufweisen. Die Kombination aus technischer Dauerhaftigkeit und ökologischer Effizienz gewinnt im Kontext nachhaltiger Infrastrukturplanung zunehmend an Bedeutung. Emissionsarme Zemente, insbesondere solche mit reduziertem Klinkeranteil, bieten hier ein hohes Potenzial, sofern ihre Zusammensetzung und Leistungsfähigkeit an die spezifischen Beanspruchungen im Hochgebirge angepasst sind.

Nach wie vor werden bei vielen Infrastrukturprojekten der Zementtyp **CEM I** und im Hochbau Zemente des Typs **CEM II/A** und **CEM II/B**, bei denen der Klinkeranteil durch Hauptbestandteile wie Hüttensand (S), Flugasche (V) oder Kalkstein (LL) ergänzt wird, verwendet. Besonders gut geeignet sind **CEM II/B-S**-Zemente, bei denen der Einsatz von Hüttensand nicht nur die CO₂-Emissionen gegenüber CEM I signifikant reduziert, sondern auch die Dauerhaftigkeit des Betons verbessert. Der resultierende dichte Zementstein erhöht die Widerstandsfähigkeit gegenüber Frost-Tau-Wechseln, Sulfaten und Chloriden, was bei alpiner Exposition eine zentrale Anforderung darstellt. Auch **CEM II/B-V** mit Flugascheanteil kann bei geeigneter Rezeptur und

Temperaturführung im frischen Beton positive Dauerhaftigkeitseigenschaften mit einem verbesserten Emissionsprofil verbinden.

Ergänzend sind **CEM III/A-Zemente**, die bis zu 50 % Hüttensand enthalten, aufgrund ihrer sehr guten Umweltbilanz und hohen chemischen Beständigkeit von besonderem Interesse. Sie sind prädestiniert für den Einsatz in dauerhaft feuchten oder salzbelasteten Umgebungen, wie sie bei alpinen Verkehrs-, Energie- und Wasserbauprojekten häufig auftreten. Der gegenüber CEM I deutlich reduzierte CO₂-Ausstoß macht sie zu einer der nachhaltigsten Zementoptionen im technischen Massivbau.

Auch **CEM II/C-Zemente**, die einen besonders niedrigen Klinkeranteil aufweisen und damit zu den emissionsärmsten Zementarten gemäß EN 197-5 zählen, bieten Potenzial für den alpinen Einsatz, insbesondere wenn sie auf einer Kombination aus latent hydraulischen oder puzzolanischen Bestandteilen basieren. Voraussetzung ist, dass die spezifische Zusammensetzung, insbesondere die Art der Zusatzstoffe, auf die jeweilige Expositionsklasse abgestimmt ist. So können beispielsweise CEM II/C-Zemente mit Hüttensand, Silikastaub oder natürlichen Puzzolanen auch in Bereichen mit erhöhter Frost- und Tausalzbeanspruchung verwendet werden, sofern sie über die erforderlichen Leistungsmerkmale verfügen. Aufgrund des teils verzögerten Festigkeitsaufbaus ist jedoch eine Anpassung der Bauabläufe, insbesondere bei niedrigen Temperaturen, notwendig.

Zunehmend vermehrt werden auch **performance-basierte Bindemittel** (engl. performance-based binders) verwendet. Bei diesen Bindemittel erfolgt die Auswahl nicht nach ihrer chemischen Zusammensetzung, sondern nach ihrer tatsächlichen Leistung im Endprodukt, insbesondere im Hinblick auf mechanische, chemische und dauerhafte Eigenschaften im Beton. Häufig zielen performance-basierte Bindemittel auf eine Reduktion der CO₂-Emissionen, z. B. durch weniger Klinkeranteil oder den Einsatz industrieller Nebenprodukte (z. B. Verbrennungsrückstände aus Fernheiz- oder Abfallwerken (derzeit läuft ein Forschungsprojekt am NOI Techpark Südtirol unter der Koordination von David di Paoli, an dem auch das Büro Bergmeister und ein großer österreichischer Zementhersteller beteiligt sind), Hüttensand, Flugasche, Metakaolin, etc.). Die Rezepturen sind flexibel, solange die geforderte Performance erreicht wird (z. B. gemäß EN-Normen, RVS, DAfSt-, ÖBV-Richtlinien oder projektbezogenen Vorgaben).

Wesentliche Merkmale der performance-basierte Bindemittel sind:

- Leistungsorientierter Ansatz: Die Eignung des Bindemittels wird anhand definierter technischer Leistungsparameter beurteilt (z. B. Druckfestigkeit, Dauerhaftigkeit, Schrumpfverhalten, Reaktionszeit).
- Materialoffenheit: Es können sowohl traditionelle als auch besonders nachhaltige Bindemittel eingesetzt werden (z. B. geopolymere Bindemittel, sulfoaluminatbasierte Systeme, LC³ – Limestone Calcined Clay Cement, etc.).

Insgesamt zeigen die Untersuchungen, dass eine Reihe von emissionsarmen vorkonfektionierten Zementen als auch performance-basierte Bindemittel für den Einsatz im alpinen Betonbau technisch geeignet und ökologisch vorteilhaft ist. Neben CEM II/A-S, CEM II/B-S, CEM II/B-V und CEM III/A rücken zunehmend auch

Zemente der Klasse CEM II/C in den Fokus, insbesondere im Zusammenhang mit weiterentwickelten Zusatzstoffkonzepten und optimierten Betonzusammensetzungen. Ihre Auswahl sollte projektspezifisch erfolgen und auf Grundlage der geplanten Expositionsklassen, der klimatischen Bedingungen sowie der gewünschten Früh- und Endfestigkeiten geprüft und validiert werden.

Im Folgenden werden eine kurze Übersicht zu **emissionsarmen Zementen** mit den spezifischen **CO₂-Emissionen** pro Kilogramm Zement (A1–A3 Lebenszyklus), basierend auf verfügbaren EPD-Daten (Environmental Product Declarations) gegeben:

Zementtyp	CO ₂ -Emission (kg CO _{2,e} /to)	Quelle / Anmerkung
CEM I	764 – 941 (Ø 898)	Durchschnittliche europäische EPD: 0,898 kg CO _{2,e} /t Zement (Cembureau, 2015) Reddit+15proquest.com+15materials.oneclicklca.com+15
CEM II/B-S	~531	Holcim Suisse (CEM I/II/B/C/III): 0,531 kg CO _{2,e} /kg
CEM II/C	280 – 470	MDPI-Studie C1/C2: 0,470 kg (S-LL), 0,420 kg (S-V)
CEM III/A	346 – 514	EPD-Daten: 0,514 kg (Italia), 0,346 kg (Spanien, ECOPlanet)

3.2 Regionale Verfügbarkeit von CEM II/C

Die Überprüfung der regionalen Verfügbarkeit von emissionsarmen Bindemitteln ergab, dass innerhalb Südtirols 38 Unternehmen zusammenarbeiten, um die Qualität und die Nachhaltigkeit zu steigern.

Recherchen ergaben, dass der CEM II/C ein vielversprechender Zement ist, bei dem der Klinkeranteil zwischen 50-64 % reduziert wird und dadurch eine CO₂-Einsparung über 40 % erzielt werden kann. Diese Zemente sind bereits in EN 197-5 geregelt.

Forschungen zeigen, dass beim Einsatz von RC-Zuschlag und CEM II/C RC-Betone hergestellt werden können, die teilweise bessere Eigenschaften als der Normalbeton aufweisen - beispielsweise bei der Druckfestigkeit und bei der Dichtigkeit. Bei RC-Beton ist jedoch darauf zu achten, dass länderspezifisch nur gewisse Betongüten des RC-Betons zur Verfügung stehen. Insbesondere gibt es auch noch diverse Einschränkungen bei den Expositionsklassen

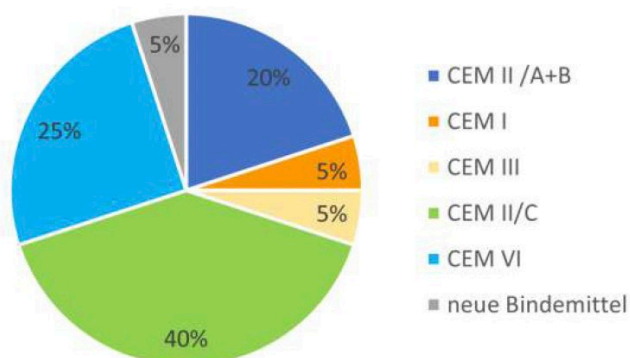


Abbildung 2: Aktuelle Verwendung verschiedener Zemente im Infrastrukturbau (nach: Bergmeister, 2024)

Der emissionsarme Zement CEM II/C ist Stand Juni 2025 in Österreich bei allen Zementherstellern erhältlich. In Nordostitalien hat aktuell der Hersteller (und Projektpartner) Alpacem einen Zement CEM II/C im Sortiment. Andere Hersteller sind in der Zulassungsphase.

Die Eignung von CEM II/C-Zement in alpinen Regionen hängt von mehreren Faktoren ab – insbesondere von den klimatischen Bedingungen (Frost, Feuchtigkeit), den geforderten Festigkeiten sowie der Exposition gegenüber chemischen Angriffen (z. B. Tausalze). Hier sind die wichtigsten Aspekte:

VORTEILE

- CEM II/C eignet sich für sämtliche Hochbauten und nicht sulfatbelasteten Infrastrukturprojekten.
- Reduzierte Hydratationswärme vorteilhaft bei massiven Bauteilen (z. B. Fundamente, Stützmauern), wo thermische Spannungen vermieden werden müssen.
- Bessere Dauerhaftigkeit insbesondere bei Zementen mit puzzolanischen oder latent hydraulischen Zusätzen (z. B. Hüttensand), die die Porenstruktur verbessern.
- Gute Sulfat- und Frostwiderstandsfähigkeit Abhängig vom genauen Zusatzstoff und dessen Anteil.
- Geringerer CO₂-Fußabdruck durch geringeren Klinkeranteil, was bei nachhaltigem Bauen in den Alpen oft gewünscht ist.

EINSCHRÄNKUNGEN

- Langsamerer Festigkeitsaufbau: Bei tiefen Temperaturen ($< 5\text{ °C}$) verlangsamt sich die Reaktion deutlich stärker als bei CEM I. Kann problematisch bei Baustellen im Winter sein.
- Frost-Tausalz-Beständigkeit muss im jeweiligen Expositionsklassenkonzept geprüft werden. Bei Exposition XF2–XF4 sind nicht alle CEM II-Zemente ohne Weiteres geeignet. Besonders Zemente mit hohem Kalksteinanteil sind hier kritisch.
- Ein CEM II/B-S (mit Hüttensand) ist deutlich widerstandsfähiger als ein CEM II/B-LL (mit Kalkstein).

Für stark frost- oder tausalzbelastete Bauteile in hochalpinen Lagen sind CEM I oder CEM III/A (mit Hüttensand) häufig die robustere Wahl. Auch laufen derzeit Untersuchungen (z.B. TU Graz im Rahmen des Forschungsprojektes „Green Infrastructure“) zur Entwicklung leistungsbasierter Bindemittel, wo gezielt solche Anforderungen berücksichtigt werden.

Nachdem emissionsarme Bindemittel häufig langsamer abbinden, sollte neben der 28-Tagesfestigkeit die 56- oder 90-Tages-Festigkeit verwendet werden. Die zeitabhängige Festigkeitsentwicklung wird daher vom Bauablauf maßgebend bestimmt.

4. Betone mit rezyklierten Zuschlägen

Im folgenden Kapitel wird die Verfügbarkeit von recyceltem Betongranulat zur Herstellung von Beton auf regionaler Ebene untersucht. Die Europäische Union zielt durch rechtliche Vorgaben auf eine Verwendungsquote von mindestens 70 % dieser Bau- und Abbruchabfällen durch Recycling ab. Die verfügbaren Mengen an „brauchbaren“ und qualitativ hochwertigen Recyclinggesteinskörnungen sind derzeit dennoch knapp und stehen einer deutlich höheren Nachfrage gegenüber, weshalb am Markt kaum Recyclinggesteinskörnungen nach EN 12620 erhältlich sind: In Österreich beispielsweise ist derzeit nur eine Abdeckung von ca. 10 % des Bedarfs an Gesteinskörnungen durch Rezyklierung von Baurestmassen möglich, derzeit steht dort einer Betonabbruchmenge von knapp 4 Mio. Tonnen einem jährlichen Verbrauch von 35 Mio. Tonnen gegenüber.

Aus genannten Gründen ist auf längere Sicht mit einer Verknappung der Ausgangsmaterialien und einer damit einhergehenden Erhöhung der Rohstoffpreise zu rechnen. Eine Substitution hochwertiger Sande und Kiese durch alternative mineralische Rohstoffe – sei es durch Baustoffrecycling oder die Verwertung von Aushubmaterial – ist somit unbedingt erforderlich, um den Bedarf an mineralischen Rohstoffen in Zukunft abdecken zu können.

Genau hier kommt der Kreislaufwirtschaft eine bedeutende Rolle zu. Mit Datenbanken können die möglichen Rezyklatstoffe von Bauabbrüchen erfasst und gezielt in der näheren Umgebung (Beispielsweise Transportdistanzen < 50 km oder max. 100 km sind in Südtirol zu empfehlen) als Recyclingkörnung wieder eingesetzt werden. Gerade im Bereich der Fertigteile ist Rückführung des Betonabbruchs in den Kreislauf zur Herstellung neuer Fertigteile in Bezug auf die Minimierung des Ressourcenverbrauches sehr erstrebenswert. Die Verwendung von Recyclingzuschlägen führt in Bezug auf die Nachhaltigkeit zu geringerem Ressourcenverbrauch und nur in optimierten Fällen auch zu einer Reduktion der THG-Emissionen (siehe Haist et. al. (2024.).

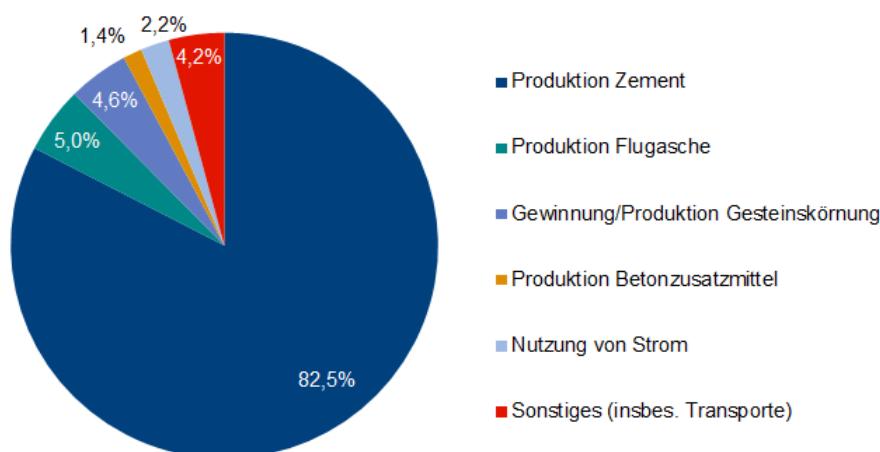


Abbildung 3: Einflussgrößen auf das Treibhauspotenzial der Herstellung eines C30/37

Aus ressourcentechnischer und ökologischer Sicht ist eine Aufbereitung und Wiederverwertung von Betonabbruchmaterial gegenüber der Deponierung grundsätzlich zu bevorzugen. Ob die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung in der Ökobilanz der Betonherstellung zu einer Verminderung der Umweltwirkungen führt, ist daher für jeden Einzelfall zu betrachten und hängt insbesondere vom jeweiligen Verhältnis der Transportentfernungen von natürlicher zu rezyklierter Gesteinskörnung ab.

Die Höchstwerte für den Austausch feiner und grober Gesteinskörnungen durch rezyklierte Gesteinskörnungen sowie die Anwendbarkeit von Recyclingbeton sind dabei in nationalen Normungsdokumenten geregelt und sind im DACH-Raum sehr unterschiedlich (vgl. Haist et al., 2021).

In Deutschland beispielsweise ist grundsätzlich lediglich der Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen mit einem Kleinstdurchmesser von 2 mm erlaubt. Somit dürfen aufbereitete Brechsande in Deutschland nicht eingesetzt werden. Hier ist auch der Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung nur für Beton bis zu einer Druckfestigkeitsklasse C30/37 zulässig.

In Österreich wiederum ist eine Verwendung von feiner rezyklierter Gesteinskörnung– trotz des eventuell erhöhten Wasseranspruches – möglich, sofern diese aus einer Nassaufbereitung stammt und weitere bestimmte Anforderungen eingehalten werden. Eine Verwendung bei vorgespannten und ermüdungsgefährdeten Bauteilen ist nicht zulässig, die maximal zulässige Festigkeitsklasse ist in Österreich mit C35/45 festgesetzt.

Die Schweiz nimmt hinsichtlich Recyclingbeton eine Vorreiterrolle ein, die Anwendungsbereiche für Recyclingbeton sind nur wenig limitiert. Bei speziellen Anforderungen an den Beton sind die jeweils relevanten Betoneigenschaften mit einem Statiker abzustimmen.

In Italien und damit auch in Südtirol dürfen rezyklierte Gesteinskörnungen aus Betongranulat zur Herstellung von Beton verwendet werden. In Italien gelten rezyklierte Zuschläge nicht mehr als Abfall, wenn sie gemäß dem “End of Waste”-Dekret (D.M. 152/2022) verarbeitet werden. Sie müssen aus reinem Betonabbruch (conglomerato cementizio) stammen und dürfen keine Verunreinigungen wie Gips, Holz, Plastik oder organische Stoffe enthalten. Bei der Herstellung von Beton ist in Italien die wichtigste Norm die UNI EN 206:2016 mit der nationalen Ergänzung UNI 11104:2016. Diese regelt die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen (aggregati riciclati) im Beton.

Rezyklierte Gesteinskörnungen dürfen nur für bestimmten Expositionsklassen verwendet werden (z. B. kein Einsatz bei hoher Frost-Tausalz-Belastung oder bei Einwirkung von Meerwasser).

In Bezug auf die Mengenbegrenzung gilt, dass max. 30 % rezyklierte Zuschläge der Grobkörnung (über 4 mm) verwendet werden dürfen. Die Verwendung in der Feinkörnung ist zwar grundsätzlich nicht verboten (unter 4 mm), wird jedoch nicht empfohlen.

Hier zeigt sich wie wichtig die Forschungen in diesem Bereich sind. Es hat sich nämlich gezeigt, dass beispielsweise bei einem 100% Ersatz der natürlichen Gesteinskörnung durch rezyklierte Zuschläge die Festigkeiten keineswegs kleiner werden; einzig der E-Modul ist etwas geringer und die Kriechverformungen sind etwas größer (siehe Kapitel 2. Rezyklierte Gesteinskörnungen).

Bestimmte Regionen in Italien, wie die Lombardei, die Toskana und das Trentino-Südtirol fördern den Einsatz von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung durch regionale Umweltauflagen oder Ausschreibungsrichtlinien.

In Südtirol werden Recyclingzentren Südtirols werden jährlich 1 Mio t Bauschutt abgegeben. Dieser Wert blieb über die vergangenen fünf Jahre konstant. Quelle: <https://umwelt.provinz.bz.it/de/abfall-boden/statistiken-abfall-boden>

Diese teilen sich auf in

25 % Asphalt,

57 % Mischgranulat,

20 % (196.000 t) Betonabbruch, vorwiegend aus Abbruch von Infrastrukturanlagen.

Italien

<https://blog.federbeton.it/rapporto-di-sostenibilita-2023/>

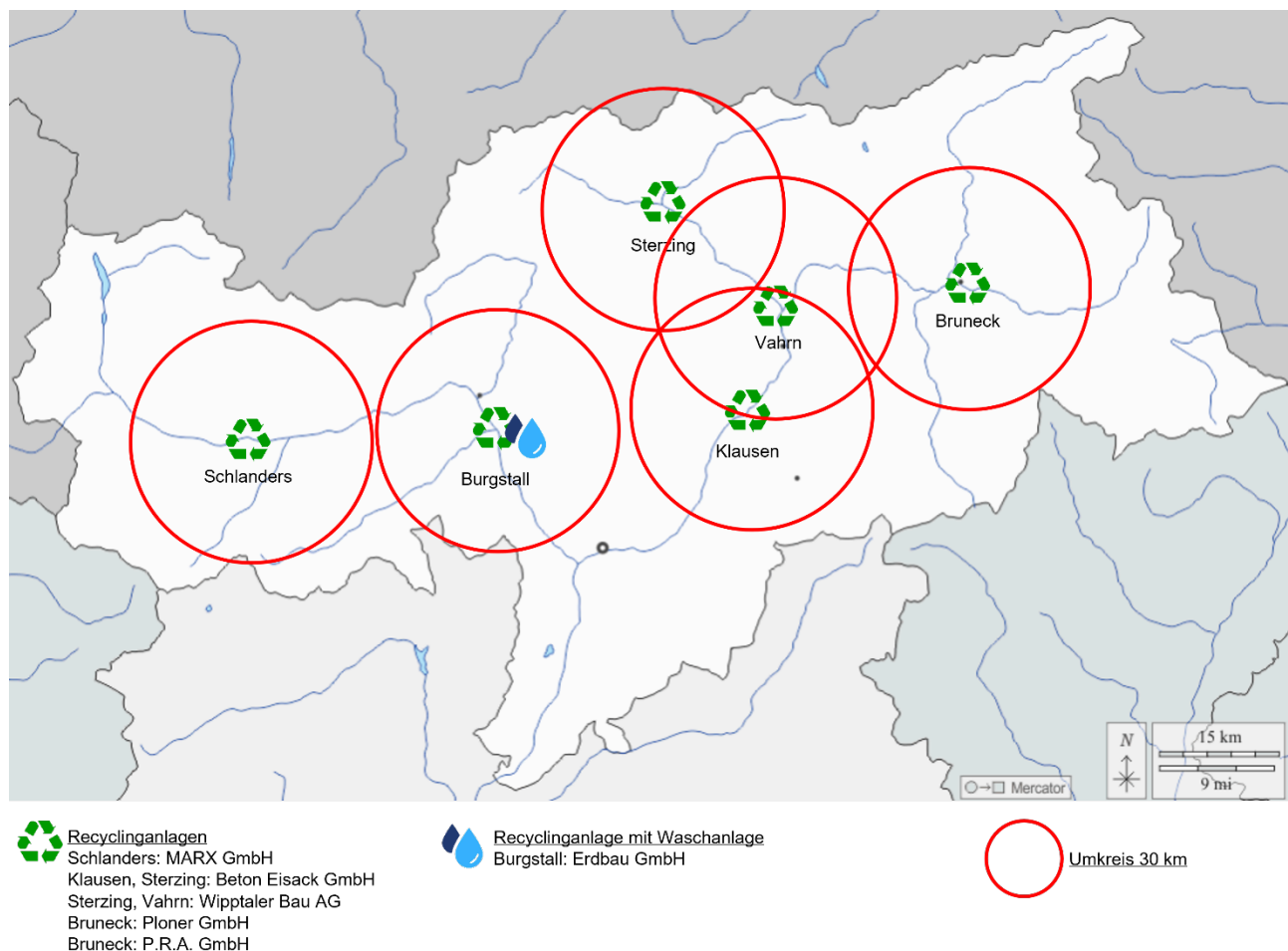


Abbildung 4: Recyclinganlagen in Südtirol (Stand 2025)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass theoretisch die Infrastrukturen in Südtirol zur Herstellung von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen vorhanden sind; jedoch hat nur ein Recyclingzentrum (Burgstall: Erdbau) eine Waschanlage um qualitativ hochwertige Gesteinskörnung aufzubereiten.

5. Ressourceneffiziente Betonkonstruktionen

Im Rahmen des Forschungsprojekts wird angestrebt, ressourceneffiziente Konstruktionsmethoden zu entwickeln, die sowohl die CO₂-Emissionen als auch den Materialeinsatz im Hoch- und Tiefbau signifikant senken (siehe Bergmeister, Taferner, 2023). Neben dem Beton spielt auch die Bewehrung eine maßgebliche Rolle. Als Bewehrung können sowohl Stahl als auch nichtmetallische Werkstoffe verwendet werden.

5.1 Serienfertigung

Betrachten wir zuerst konzeptiv die Bauweisen. Neben dem Ortbeton kommt der Vorfertigung von materialeffizienten Betonbauteilen eine wichtige Rolle zu. Adaptiven Modulbauweisen, wie sie beispielsweise im Schwerpunktprogramm 2187 „Adaptive Modulbauweisen mit Fließfertigungsmethoden“ gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) erforscht werden, kommt eine besondere Rolle zu (siehe dazu die Literatur: Mark et al. 2021; Forman, Gaganelis, Mark 2020; Putke, Bergmeister, Mark 2016).

Ziel im Bauwesen muss sein, die aus dem Maschinenbau bekannte Serienfertigung mit Fließprinzip auf das Bauwesen zu übertragen und Betonbauteile qualitätsgesichert als Module vorzufertigen. Die Baustrukturen werden dazu in serienfertigteile hergestellt und auf der Baustelle nur noch zusammengefügt. Der gesamte Entwurfs-, Herstellungs- und Montageprozess wird dabei mit einem digitalen Gesamtmodell verbunden und anschließend als Zustandsüberwachung für die Nutzungszeit verwendet. Abbildung 5 zeigt das grundsätzliche Prinzip in zeitlichen Abfolge von links nach rechts mit der Herstellung (links), der Montage nach Vorbild eines digitalen Zwillings (Mitte) und der Nutzungszeit mit Zustandsüberwachung und möglichem Tausch von Einzelmodulen (rechts).

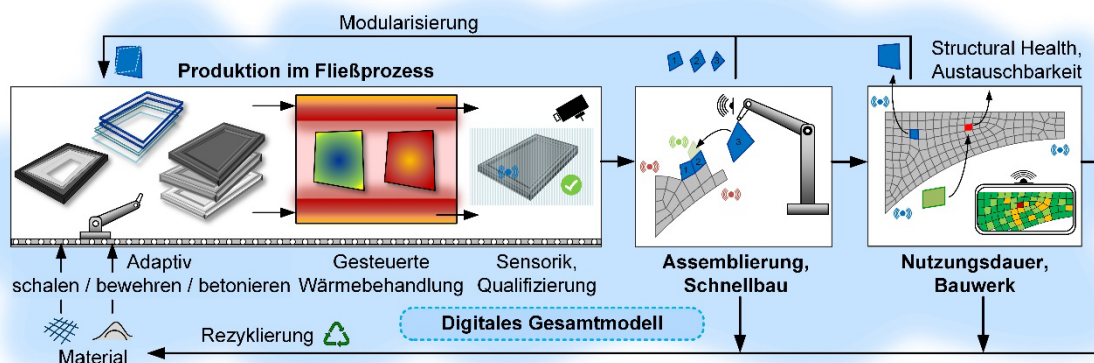


Abbildung 5: Modulbauweise von der Herstellung adaptiver Einzelmodule mit Fließfertigung zu Schnellbau, Nutzung und Rückbau mit digitaler Gesamtrepräsentation (aus Haist et al. 2023)

5.2 Topologieoptimierungen im Betonbau

Als topologische Optimierungsmethoden werden entweder kontinuumsbasierte Ansätze als Entwurfshilfe, hybride Ansätze aus Kontinua und Stäben und reine Stabwerksansätze verwendet. Ziel ist mit dem Minimierungsanspruch besonders geringe Massen an Beton und geringe Bewehrungsmengen im Bereich der Zugspannungsfelder anzuordnen.

Zur **Bewehrungsfindung** bieten sich besonders die Ansätze mit Stäben an. In der Abbildung 6 wird ein Beispiel eines scheibenartigen Trägers mit Aussparungen und mittiger Einzellast (a) gezeigt. Bei einer Modellierung mit Stabwerken (aufbauend auf der Spannungsfeldtheorie) ergibt sich eine Vielzahl an überkreuzten, statisch hoch überbestimmten Stabstruktur. Durch eine Optimierung kann die Stabanzahl reduziert werden (b). Die eigentlichen Stabpositionen bleiben unverändert. Es entstehen Stabwerkmodelle mit Zug- und Druckstreben (c), die aufgrund der Formulierung in Stäben (also als Fachwerk) direkt statisch in ihren Stabkräften ausgewertet werden. Stäbe und Stabkräfte lassen sich so direkt zu Bewehrungsführungen und Bewehrungsmengen umsetzen (d).

Eine andere Methode ist die Modellierung mit linearen oder je nach Anforderung nichtlinearen FE. Damit können einerseits topologie-optimierte Wandstärken und auch konzentrierte Spannungsbereiche (siehe Fensterecken) untersucht und ressourceneffizient konstruiert werden.

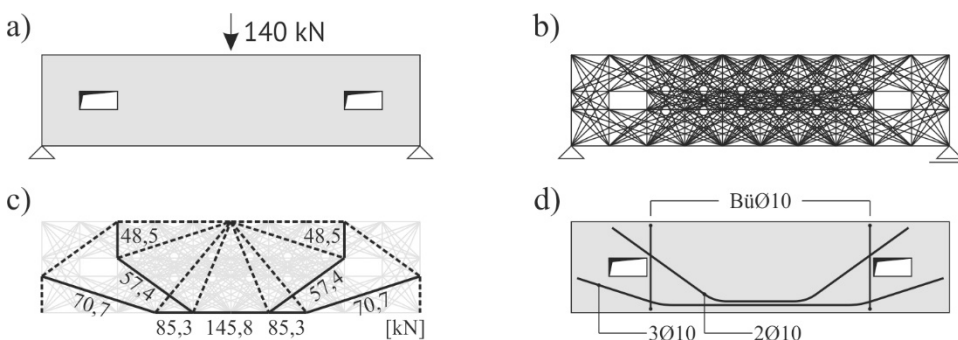


Abbildung 6: Bewehrungsfindung mit topologischer Stabwerksoptimierung; a) Wandscheibe mit Aussparungen, b) Stabvernetzung, c) Stabwerk mit Zug- und Druckkräften, d) Bewehrung (aus Gaganelis, Mark 2021)

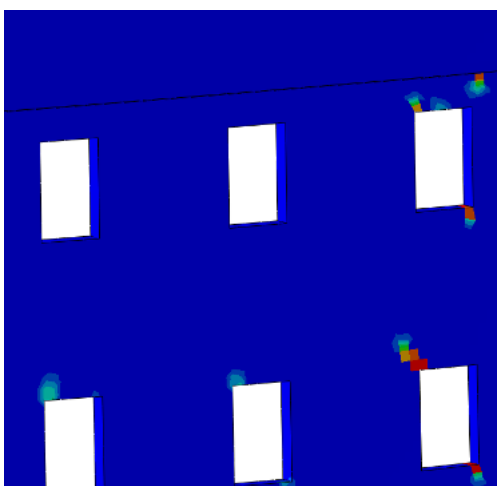


Abbildung 7: FE-Modellierung mit Abacus einer Wandscheibe

Die Topologieoptimierung ist ein iterativer Prozess, und wird häufig Computerprogrammen durchgeführt. Das prinzipielle Vorgehen ist:

1. **Definition des Bauraums und der Randbedingungen:** Der erste Schritt besteht darin, den maximal verfügbaren Bauraum und die Randbedingungen festzulegen. Dazu gehören die Einwirkungen, Randbedingungen und andere mechanische oder physikalische Anforderungen.
2. **Initiales Modell:** Ein initiales Modell des Bauteils wird erstellt, das den gesamten Bauraum ausfüllt. Dieses Modell dient als Ausgangspunkt für die Optimierung (beispielsweise eine volle Deckenplatte)
3. **Festlegen der Optimierungsziele:** Die Ziele der Optimierung können unterschiedlich sein. Es können die Massen minimiert, die Steifigkeiten maximiert, die Spannungen unterhalb bestimmter Grenzwerte gehalten oder bestimmte bauphysikalische Eigenschaften erzielt werden. Es können auch minimale Wanddicken oder anderweitige Symmetrieanforderungen berücksichtigt werden.
4. **Iterativer Optimierungsprozess:** Die Software führt eine Reihe von Iterationen durch, bei denen entlang einer Zielfunktion das Material aus Bereichen entfernt wird, die weniger zur Lastübertragung beitragen, und beispielsweise in hochbelastete Bereichen hinzugefügt. Dies geschieht durch Algorithmen wie dichtebasierte-, Level-Set- oder gitterbasierte Methoden.
5. **Validierung und finale Optimierung:** Das optimierte Design wird mittels (linearer oder nichtlinearer) Finite-Elemente-Analysen (FEA) validiert.

Für solche Topologieoptimierungen stehen eine Reihe von Softwarelösungen zur Verfügung, beispielsweise:

- OpenLSTO (Lightweight Structural Topology Optimization): Open Source, entwickelt von NASA und TU München; Fokus auf CAD-Integration.
- 3D Topology Optimization (MIT): Matlab-Toolbox, stark bei Lehre & Forschung
- Rhino/Grashopper mit Sofistik/Karamba
- Abaqus Topology Optimization Module: Eng verknüpft mit Abaqus; stark bei komplexen Materialien
- SolidWorks Topology Study: Leicht zugänglich, aber limitiert für sehr komplexe Fälle
- etc.
- Aber auch FE-Programme wie Abacqus, Ansys, Athena, etc.

Aus den verschiedenen Bereichen des Bauwesens lässt sich im Betonbau durch Topologieoptimierung mit am meisten Material einsparen. Der Stahlbeton stellt den Großteil des heute praktizierten Betonbaus dar. Dabei werden Zugkräfte von der Bewehrung aufgenommen, der Beton übernimmt die Druckkräfte. Da, zum Beispiel bei der Biegetragwirkung, ein Großteil des Betons außerhalb der Druckzone liegt, kann dort theoretisch sehr viel unnötiges Material eingespart werden.

Rippendecken

Rippendecken sind im Grunde bereits optimierte Flachdecken, da sie das Material so umverteilen, dass mehr statische Nutzhöhe generiert wird, und somit insgesamt Material eingespart wird. In Verbindung mit einer Vorspannung stellen sie eine äußerst wirtschaftliche Deckenvariante dar.



Abbildung 8: Rippendecke

Kassettendecken

Stahlbeton-Kassettendecken sind eine spezielle Art von Rippendecken, bei denen die Rippen lotrecht zueinander in zwei Richtungen verlaufen. Dadurch entstehen zwischen den Rippen rechteckige oder quadratische Felder (Kassetten). Diese Bauweise ermöglicht eine effiziente Lastabtragung in beide Richtungen und eignet sich besonders für hohe Belastungen auf überwiegend quadratischen Flächen.

Kassettendecken bieten zudem gestalterische Vorteile, da die ästhetisch ansprechende Kassettenform gern sichtbar gelassen wird. Dadurch sind meist hohe Ansprüche an die Schalung gestellt.

Diese beruht entweder auf einem System vorgefertigter Kassetten-Schalelemente, oder es wird eine verlorene Schalung verwendet.

Hohlkörperdecken

Hohlkörperdecken sind Stahlbetondecken mit integrierten Hohlkörper aus recyceltem Kunststoff, die das Gewicht der Decke um bis zu 35 % reduzieren. Die Decke wird im Vergleich zur üblichen Flachdecke dahingehend optimiert, dass in Bereichen mit niedrigen Betonspannungen der schwere Beton durch leichte Hohlkörper ersetzt wird. Somit wird Material eingespart, was das Eigengewicht der Decke verringert.

Übliche Verdrängungskörper sind Kugeln, Ellipsoide, kegel- oder kastenförmige Formen. Ein bekanntes Beispiel sind die Cobiax-Hohlkörperdecken, bei denen plastische Hohlkörper (meist aus recyceltem Kunststoff) in die statisch nicht beanspruchten Mittelzone der Decke eingebettet werden, um das Eigengewicht zu reduzieren, ohne dabei die Tragfähigkeit wesentlich zu beeinträchtigen.

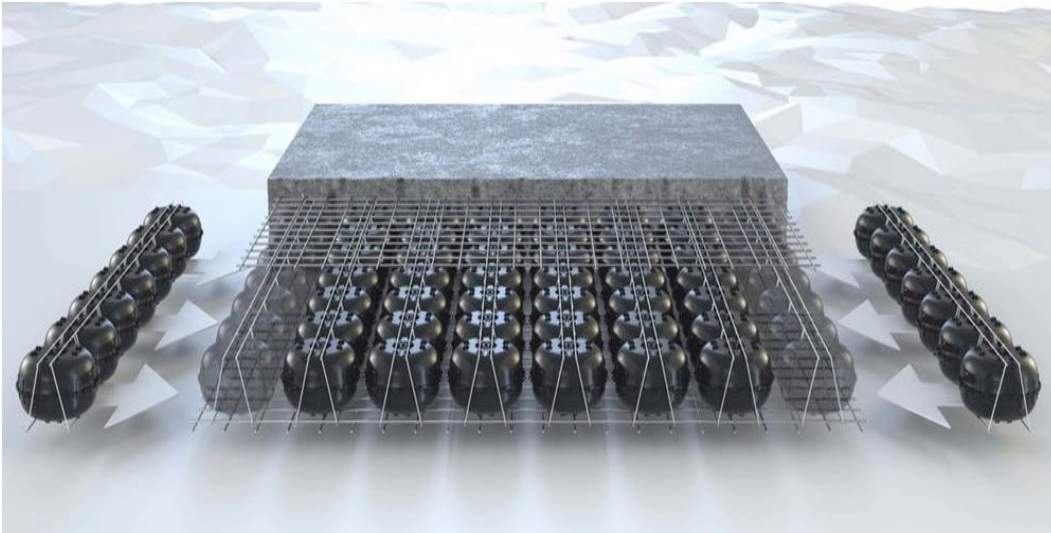


Abbildung 9: CobiX-Elemente

Grundsätzlich reduzieren die Hohlkörper geringfügig die Biegetragfähigkeit, in weit stärkerem Maße die Querkrafttragfähigkeit aus den verbleibenden Betonstegen sowie durch Vierendeeltragwirkung und die Membrantragfähigkeit des eingeschnürten Nettoquerschnitts. Dies hängt von der Körpergröße und der Verlegung in der Fläche ab.

Es gibt derzeit in der Forschung einige sehr schön herzeigbare Ergebnisse, die kurz nachfolgend angeführt werden:

Topologieoptimierte Betondecke - ETH Zürich

- **Umfang & Algorithmus:** Eine $1,8 \times 1 \times 0,15$ m große Betonplatte wurde mittels SIMP-Algorithmus in Abaqus optimiert
- **Fertigung:** Die Schalung wurde dreidimensional per Binder-Jet-3D-Druck hergestellt, gefüllt mit Faserbeton – ergab eine 70 % Gewichtsreduktion gegenüber konventioneller Platte (ca. 120 kg statt wesentlich schwerer) .
- **Ergebnis:** Materialeffizienz durch filigrane Geometrien, realisiert via digitale Fertigung.

OptiBridge – Topologieoptimierte Fußgängerbrücke - Ghent University, Belgium

- **Design & Optimierung:** Ein 5 m langer Brückenträger, ursprünglich in 2D optimiert (Technion), wurde in ein 3D-Objekt transformiert und ergänzt mit post-tensioning Bewehrung und 3D-Druck .
- **Fertigung & Montage:** Der Träger wurde in vier Segmenten aus gedrucktem Formteil gelagert, ausgegossen und anschließend professionell montiert – in nur 1,5 Stunden Druckzeit pro Segment .
- **Innovation:** Kombination aus Topologieoptimierung und additive Fertigung für realistische Brückenelemente.

Topologieoptimierte Betonbalken - MIT

- **Fokus:** Vergleich zwischen herkömmlichen Balken und Struktur mit ca. 75% reduziertem Betongehalt unter gleicher Bewehrung .
- **Ergebnis:** Im elastischen Bereich ähnliche Leistungsfähigkeit zwischen konventionellem und optimiertem Balken nachgewiesen – Potenzial für materialeffiziente Designs .
- **Ansatz:** Strut-and-tie Topologieansatz mit experimenteller Validierung.

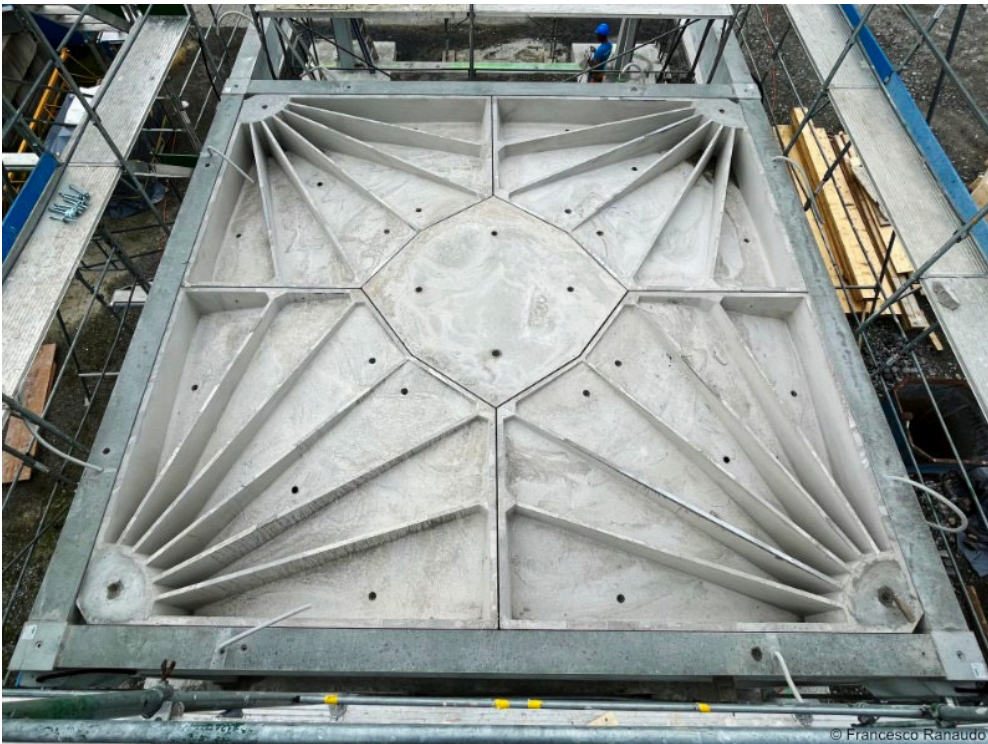


Abbildung 10: https://www.elemente-material.de/assets/images/Materialblog/mb_24/eth-zuerich/vaulted-floors_photo4_rfs_ct_top_1_300dpi_by_francesco_ranaudo_elemente-materialforum.jpg

Mesogradierung mit Gradientenbeton – Universität Stuttgart

Gradientenbeton (auch „funktional gradierter Beton“ oder „Beton mit Eigenschaftsverlauf“) funktioniert ähnlich. Der Begriff stammt ursprünglich aus dem Konzept der Functionally Graded Materials (FGM), das aus der Luft- und Raumfahrttechnik übernommen wurde. Dieser Beton wurde von Prof. Werner Sobek entwickelt und es wird im Rahmen eines integrativen Forschungsgebäudes der Universität Stuttgart in Vaihingen der Gradientenbeton eingesetzt werden. Dabei wird eine Bodenplatte mit $h=45$ cm und eine Deckenkonstruktion mit $h=25$ cm aus Hohlkörpern mit mineralischem Werkstoff, hergestellt.

Da dieser Betontyp noch keine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung besitzt, wurde von Prof. Konrad Bergmeister ein Gutachten als Grundlage für eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) erarbeitet. Einige Informationen dazu werden nachfolgend kurz vorgestellt.



Abbildung 11: Mit mineralischen Hohlkörpern gradierte Betondecke © Daniel Schmeer / ILEK

Sowohl bei der Schnittgrößenermittlung sowie den Nachweisen im Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit der Hohlkörperbauteile ist die verminderte Querschnittsfläche, die verminderte Biegesteifigkeit sowie die Gewichtsreduzierung im Bereich der Hohlkörper zu berücksichtigen.

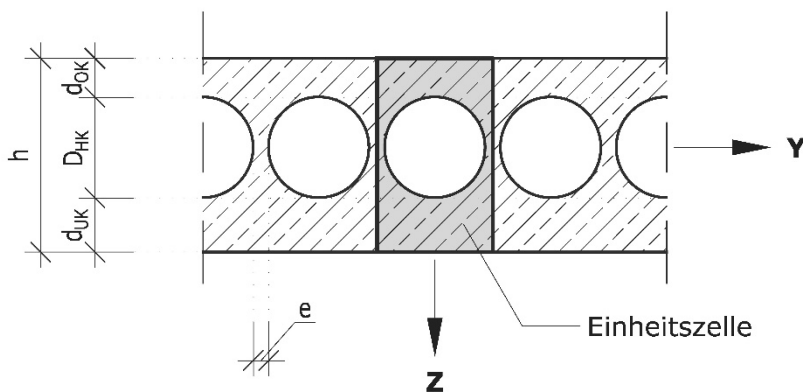


Abbildung 12: Geometrische Randbedingungen beim Gradientenbeton (© Benedikt Strahm/ILEK)

Die Biegebemessung dieser Hohlkörperdecke erfolgt analog der eines massiven Querschnittes nach EN 1992-1-1. Es muss zusätzlich überprüft werden, ob im Grenzzustand der Tragfähigkeit die Druckzone im Bereich der Hohlkörper liegt. Ist dies der Fall, so muss der durch die Hohlkörper geschwächte Bereich der Druckzone abgemindert werden. Die Querkraft wird nach der allgemeinen Nachweisführung angelehnt an den gültigen Eurocode 2 mit einem Reduktionsfaktor durchgeführt.

Für den Fall, dass die Durchstanztragfähigkeit einer Massivdecke erreicht werden soll, wird vorgeschlagen keine Hohlkörper im Bereich des Durchstanzkegels einzulegen. Die Ermittlung dieses Bereichs sollte mit einer Neigung des Durchstanzkegels von 30° gegenüber der Vertikalen erfolgen.

Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit ist nach EN 1992-1-1 zu führen. Dabei ist die verminderte Biegesteifigkeit der Hohlkörperdecke zu berücksichtigen. Für die Verformungsberechnung im Zustand II ist auch die gegenüber einem Massivquerschnitt frühzeitig auftretende Rissbildung zu berücksichtigen.

Bei diesem Prototyp ergeben sich für die 45 cm starke Bodenplatte mit Hohlkörperdurchmesser von 30 cm:

- Querschnittsreduktionsfaktor ($A_{\text{net}}/ A_{\text{brutto}} = 0,48$)
- Steifigkeitsreduktionsfaktor ($I_{\text{net}}/ I_{\text{brutto}} = 0,91$)
- Massenreduktionsfaktor ($M_{\text{net}}/ M_{\text{brutto}} = 0,65$)

In Abbildung 13 wird ein Schnitt durch den Probekörper bei der experimentellen Untersuchung gezeigt. Die dünnen Hohlkörper werden mit einem mittig verlaufenden Drahtstift in ihrer Lage gehalten.

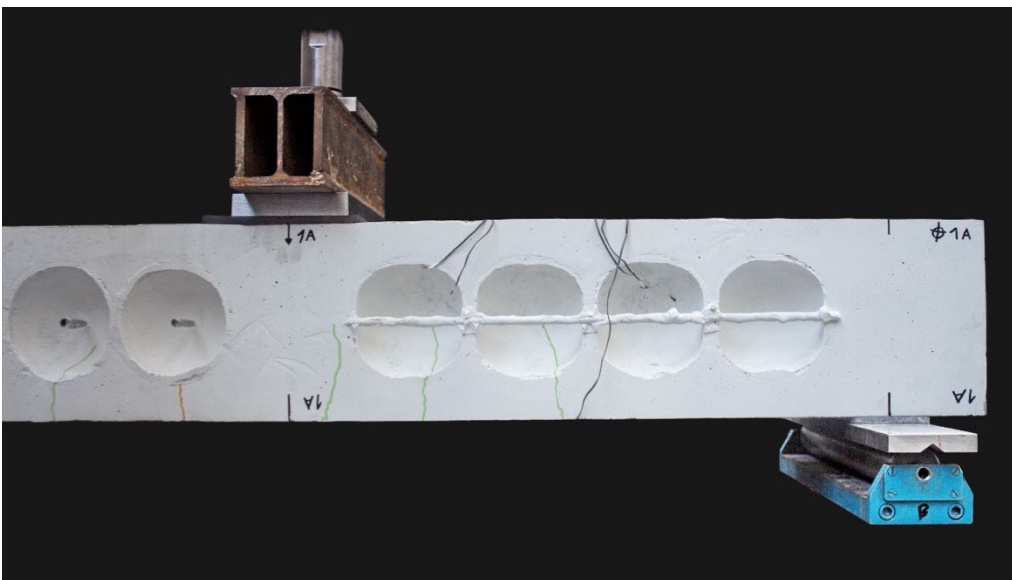


Abbildung 13: Versuchskörper einer Platte mit Gradientenbeton (© Benedikt Strahm/ILEK)

Das wesentliche Problem bei der Topologieoptimierung im Betonbau ist die baupraktische Umsetzbarkeit. Im klassischen Stahlbetonbau ist alles auf Standardisierung und minimalen Arbeitsaufwand getrimmt. Es werden überwiegend kubische, simple Bauteilgeometrien geplant, da diese den geringsten Schalungs- und Bewehrungsaufwand aufweisen. Im genauen Gegenteil dazu stehen filigrane, organische Formen mit vielen Hohlräumen, wie sie bei der Topologieoptimierung auftreten. Diese Geometrien lassen sich, wenn überhaupt, nur mit sehr hohem Aufwand umsetzen.

Die Schalung bietet dabei die größten Hindernisse, da durch die besondere Geometrie ein extremer Mehraufwand bei der Schalungsfertigung, der Betonierbarkeit und dem Ausschalen entsteht. Da durch die Optimierung jedes Bauteil nur für eine bestimmte Position geeignet ist, muss auch jede Schalung einzigartig

sein. Im Vergleich zum klassischen Betonbau, wo ein Großteil der Schalungselemente mehrfach verwendet werden, entsteht dadurch ein deutlich erhöhtes Abfallaufkommen, was dem nachhaltigen Ansatz widerspricht.

6 Bewehrungsoptimierungen

6.1 Nichtmetallische Bewehrungen

Nichtmetallische Bewehrung aus faserverstärkten Kunststoffen zeichnet sich durch hohe Zugfestigkeit und hervorragende Korrosionsbeständigkeit aus. FVK-Stabbewehrung besteht aus Bündeln von endlosen technischen Fasern, z. B. aus Glas, Kohlenstoff, Aramid oder Basalt. Die Fasern werden in eine Polymermatrix eingebettet, um sie vor direkter physikalischer oder chemischer Einwirkung zu schützen und um sie für eine gleichzeitige Aktivierung unter axialer Belastung miteinander zu verbinden. Typische Matrixmaterialien sind ungesättigte Polyesterharze, Epoxidharze oder Vinylesterharze. Solche nichtmetallischen Bewehrungen ersetzen primär den Stahl als innere, ausgerichtete Bewehrung.

Diese faserverstärkten Kunststoffe kann man als gebogene oder vorgeformte Bewehrungstäbe, als Gelege oder Gewebe auch dreidimensional herzustellen. Sie können üblicherweise nicht direkt nach der Herstellung umgeformt werden, sondern müssen vor dem Aushärten des Harzes gewickelt oder geformt werden.

Über Glas- und Kohlenstofffasern wurde schon sehr viel geforscht und publiziert. Daher sollen in diesem Forschungsbericht ein paar Informationen zu Basaltfasern gegeben werden.

		E-Glas	ECR-Glas	AR-Glas	S-Glas R-Glas	Basalt	HT-Carbon- faser
E-Modul	GPa	73	80	72	90	80–110	250
Festigkeit	GPa	3–3,5	3,5	1,7	4	3,0–4,5	3,5–4,5
Wärmeausdehnungskoeffizient	10 ⁻⁶	5	6	–	5,5	3,0–5,0	–1
Dichte	g/cm ³	2,54	2,6	2,68	2,55	2,6–2,8	1,8
Anwendung		Stäbe für nichttragende Anwendungen	Stäbe und Gitter	Fasern und Gitter direkt im Beton	Stabbügel	Stäbe und Gitter	Gitter, Stäbe, Vorspannlitzen

Tabelle 2: Übersicht der gebräuchlichen Fasertypen für nichtmetallische Bewehrungen (aus Bielak et al. Nichtmetallische Bewehrung. In: Betonkalender 2026)

Zahlreiche Studien haben gezeigt, dass Basalt das Potenzial hat, Kohlenstoff- und Glasfasern in verschiedenen Anwendungen in der Bauindustrie zu ersetzen (siehe Bandaru, A. K. et al., 2016; Du, Y. et al., 2017; Elmahdy, A; Verleysen, P., 2019; Elmahdy, A; Verleysen, P., 2020; Sun, B. et al., 2020). Basalt ist ein natürlich vorkommendes Material und seine Verwendung als Bewehrung kann zu umweltfreundlichen Baupraktiken beitragen. Im Vergleich zur Herstellung von herkömmlichen Bewehrungsmaterial wie Stahl belasten Basaltfasern die Umwelt geringer [Bergmeister et al., 2022]

Die hervorragende Beständigkeit von Basalt gegenüber Chloridionen ist besonders vorteilhaft in Umgebungen, in denen Korrosion ein Thema ist. Die Verwendung von Basaltbewehrung kann dazu beitragen, die Lebensdauer von Betonelementen unter solchen Bedingungen zu verlängern.

Da man bei den faserverstärkten Kunststoffen nicht auf herkömmliche 2D-Raster beschränkt ist, können auch 3D-gewickelte Bewehrungsanordnungen dem Verlauf der Zugspannungstrajektorien folgend, hergestellt werden. Durch den Einsatz von Robotern und modernen Wickeltechniken wird ein neuartiger 3D-Bewehrungsaufbau entwickelt. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Entwicklung von robusten 3D-Bewehrungsanordnungen mit Bewehrungsstäben und Geweben, die so ausgerichtet sind, dass sie in Richtung der auftretenden Hauptzugspannungen in den Bauteilen liegen. Die Anordnungen können unter Berücksichtigung wie etwa der Korngröße, der Verarbeitbarkeit des Betons, der Betondeckung, etc. getroffen werden.

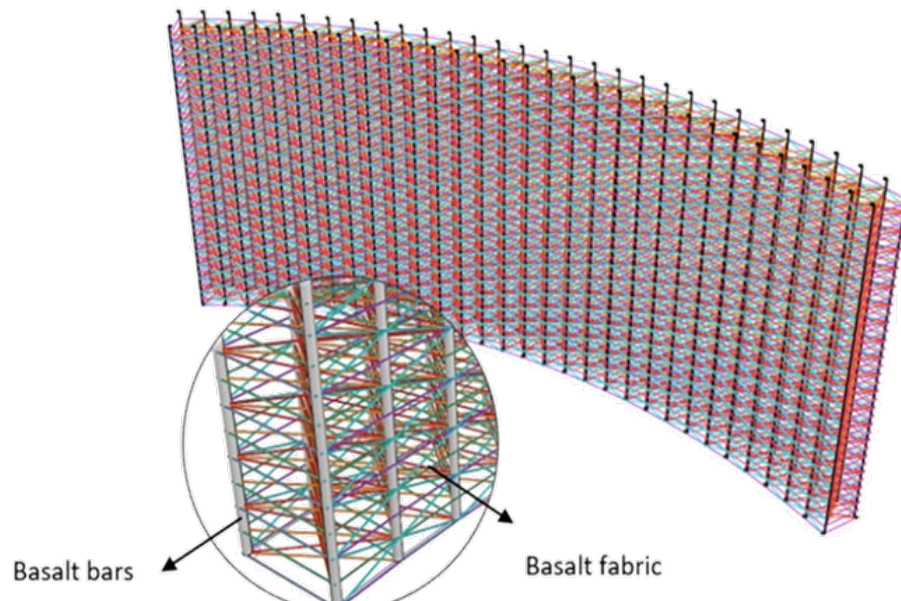


Abbildung 14: Konzeptionelle Entwicklung des 3D-Basaltbewehrungsmodells (aus Bergmeister, Green Infrastructure, 2025)

6.2 Minimierung der Bewehrung

Zur Minimierung der Bewehrung werden verschiedenen Ansätze verfolgt:

- Untersuchungen altbewehrter Konstruktionsregeln
- Innovative Berechnungsmodelle mit nichtlinearen FE-Analysen
- Verbesserte/reduzierte Verbundlänge bei geschweißten Matten: der Schweißpunkt reduziert die Verbundlänge des an den Riss angrenzenden Stabes um bis zu 50%
- Vorspannung von Bauteilen zur Reduktion der Schlaffbewehrung

Zur Minimierung der Bewehrung sollen spezifische numerische Untersuchungen durchgeführt werden, um die realistischen Temperaturverläufe und Bauwerksbedingungen verbessert zu erfassen. Solche Untersuchungen werden in der nächsten Projektphase weiter verfolgt.

6. Lebenszyklus-Analysen

Ökobilanzierung

Dabei wird der gesamte Lebensweg (cradle to cradle) betrachtet, um alle Auswirkungen zu berücksichtigen, auch wenn diese vor oder erst nach der eigentlichen Nutzung entstehen.

Im Bauwesen ist die Ökobilanzierung eines Gebäudes oder Gebäudeentwurfs ein wichtiges Hilfsmittel, um die Umwelteinwirkungen verschiedener Lebensphasen zu erfassen und unterschiedliche Varianten hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit zu vergleichen. Ein wichtiger Teilschritt dabei ist die Ökobilanzierung einzelner Bauteile, die mithilfe der EPDs der verwendeten Baumaterialien erfolgt.

Die Durchführung einer Ökobilanzierung basiert auf den internationalen Normen EN ISO 14040 und EN ISO 14044, die die Grundsätze und Rahmenbedingungen sowie Anforderungen und Anleitungen definieren.

Eine Ökobilanz besteht aus vier Phasen:

- Zieldefinition und Untersuchungsrahmen
- Erstellung der Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung

Die Analyse ist in einzelne Lebensphasen aufgeteilt. Somit ist nicht nur ein Vergleich der gesamten Umwelteinwirkungen eines Produkts möglich, sondern es können auch einzelne Lebens-/Produktionsabschnitte (Module) gut miteinander verglichen werden.

Dabei wird in vier große Module unterteilt (siehe Abb. 16):

- **Modul A:** Herstellungs-/Errichtungsphase
- **Modul B:** Nutzungsphase
- **Modul C:** Rückbau-/Entsorgungsphase
- **Modul D:** Potenziale jenseits des Lebenszyklus

Die vier Module sind nochmals weiter unterteilt, um einzelne Effekte, wie beispielsweise den Transport in der Herstellungsphase, isoliert betrachten und bewerten zu können. Dabei liegt ein großer Fokus zunächst bei der Reduktion der CO₂-Emissionen während der Herstellung der Baustoffe (Lebenszyklusphasen A1 bis A3) und anschließend bei der Errichtung des Bauwerks (Lebenszyklusphasen A4 bis A5 gemäß EN 15804), wo gerade die Emissionen z. B. infolge verkehrlicher Wirkungen wie Staus und Umleitungsverkehre berücksichtigt werden müssen. Diese Thematik spielt zunehmend in den alpinen Bergregionen mit einem hohen Tourismusanteil eine große Rolle.

Unterteilung der Module gemäß EN 15804

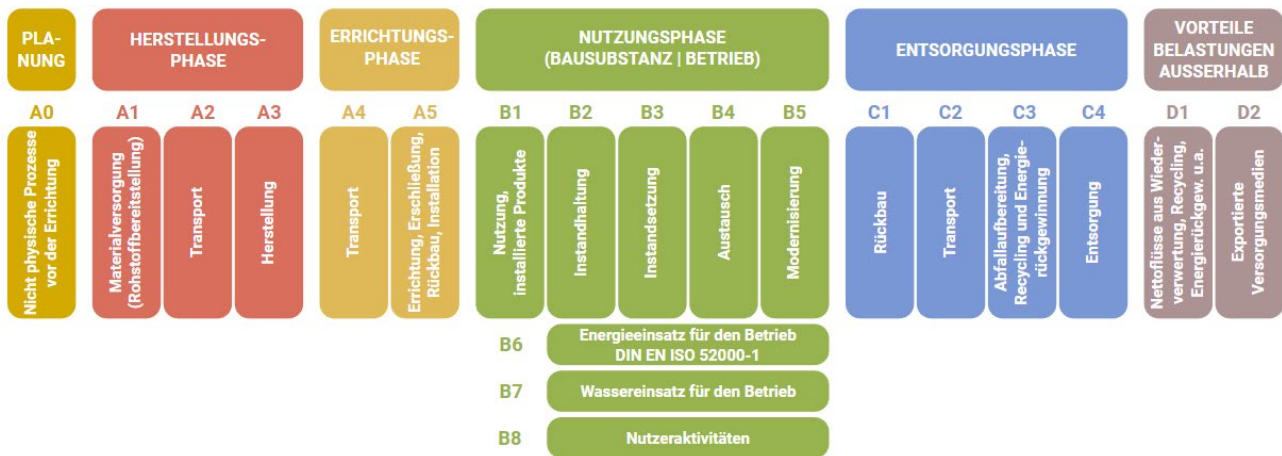


Abbildung 16: Ökobilanzierung (LCA - Lebenszyklusanalyse) für Gebäude

Im Hinblick auf die Bilanzierung einzelner Bauteile (z.B. Stützen, Decken) – wie sie etwa bei Variantenuntersuchungen erforderlich ist – wird häufig meist nur die Herstellungsphase (A1–A3) betrachtet. Dies liegt daran, dass gerade in den Bereichen Materialversorgung und Herstellung die größten Unterschiede zwischen den Varianten auftreten.

Bei der Ökobilanzierung werden mithilfe der EPDs der verwendeten Baustoffe, und den Nutzungsdaten des Bauwerks, diverse Umweltindikatoren berechnet, welche ein umfassendes Abbild der Umwelteinwirkungen aufzeigen.

Dabei lassen sich die Indikatoren in folgende Wirkungstypen gruppieren:

- **Energieverbrauch und Ressourcen**
- **Abfall und Recycling**
- **Emissionen und Umweltbelastungen**
- **Gesundheit und Toxizität**

Die beiden wichtigsten Indikatoren im Bauwesen, welche am häufigsten zur Bewertung und Vergleich verwendet werden, sind:

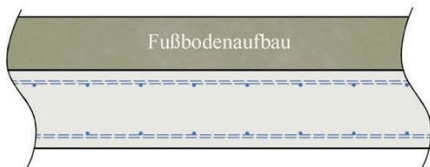
- **PENRT** (Total nicht erneuerbare Primärenergie)
- **GWP** (Globales Erwärmungspotenzial, Treibhauspotenzial)

Durch die Analyse dieser Umweltindikatoren können fundierte und detaillierte Erkenntnisse über die Klima- und Umweltwirkungen gewonnen werden. Um die ökologische Gebäudequalität zu bewerten, werden die Ergebnisse der Berechnung Referenzwerten vergleichbarer Gebäude gegenübergestellt. Je nach Bewertungssystem müssen entweder Grenzwerte eingehalten oder Zielwerte unterschritten werden.

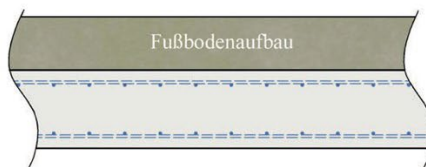
Einen Vergleich verschiedener Deckensysteme haben Warter, Kromoser in der Zeitschrift Beton- und Stahlbetonbau 2022 (<https://doi.org/10.1002/best.202200076>) veröffentlicht.

Für eine Spannweite von 5 m wurden Deckenhöhen von 16 bis 28 cm mit verschiedenen Baustoffen und Ausführungsvarianten untersucht (siehe Abbildung 16).

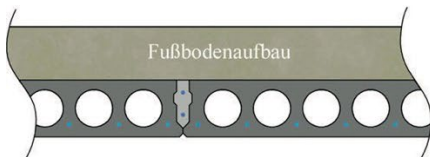
(a) Ortbetondecke mit Stabstahlbew.



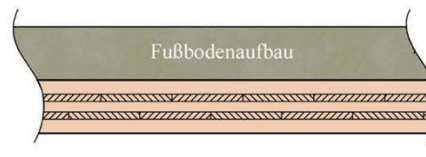
(b) Ortbetondecke mit Mattenbew.



(c) Hohlblechendecke



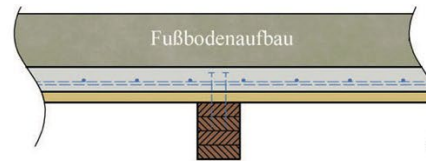
(d) Brettspertholzdecke



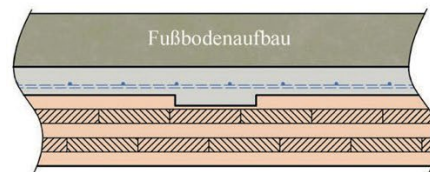
(e) Holzbalken(Tram-)decke



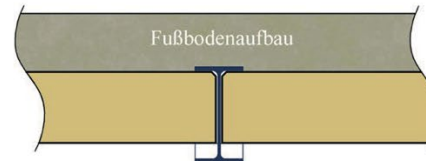
(f) Holz-Beton-Verbunddecke (Tram mit Schraubenverbindung)



(g) Holz-Beton-Verbunddecke (Brettspertholz mit Kervenverbindung)



(h) Tramtraversendecke



(i) Stahlbetonverbunddecke

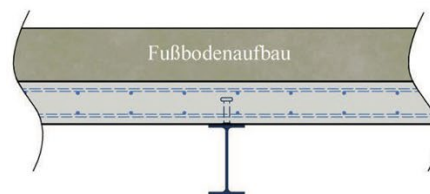


Abbildung 16: Deckenvarianten (aus Warter, Kromoser 2022)

Als Ergebnis zeigte sich, dass die Holz-Beton-Verbunddecke den geringsten ökologischen Fußabdruck aufweist.

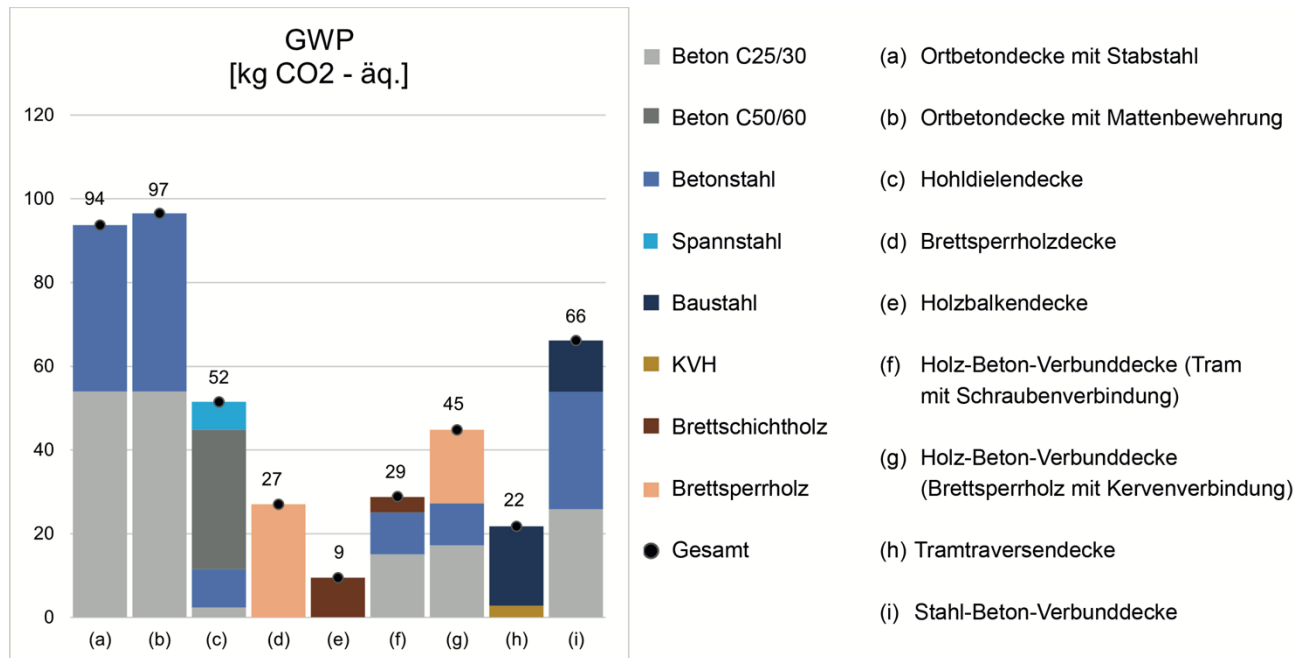


Abbildung 17: Ökobilanzierung verschiedener Deckenvarianten (aus Warter, Kromoser 2022)

7.2 Umwelt-Produktdeklarationen

Umwelt-Produktdeklarationen (Environmental Product Declarations, EPDs) sind standardisierte Datensätze, die die Umweltauswirkungen von Baustoffen und Produkten transparent darstellen.

Sie sind ein essenzieller Bestandteil der LCA, da die Umweltindikatoren aller verwendeten Bauteile sich aus deren Massen und den entsprechenden EPDs berechnen.

Die EPDs basieren auf den Normen ISO 14025 und DIN EN 15804, die Umweltinformationen über den Lebensweg von Produkten festhalten und eine einheitliche Ableitung, Darstellung und Verifizierung der Daten sicherstellen. Mit der Aktualisierung von EN 15804+A1 auf EN 15804+A2 im Juli 2022 wurden wesentliche methodische Änderungen eingeführt, insbesondere bei der Anzahl und Definition der Umweltindikatoren.

Aufgrund unterschiedlicher Charakterisierungsmodelle und erweiterter Wirkungsindikatoren sind EPDs nach EN 15804+A1 und EN 15804+A2 nicht kompatibel und dürfen nicht gemeinsam in Ökobilanzen oder Nachhaltigkeitsbewertungen verwendet werden.

Erstellung von EPDs: Baustoffhersteller, Experten und Öffentlichkeit erarbeiten Produktkategorie-Regeln (PCR), die die Anforderungen an eine EPD festlegen. Produzenten ermitteln alle relevanten Daten als Ökobilanz, von der Rohstoffgewinnung bis zum Abriss des Gebäudes. Diese Daten werden von unabhängigen Dritten geprüft und verifiziert. Nach erfolgreicher Prüfung wird die EPD veröffentlicht und ist fünf Jahre gültig.

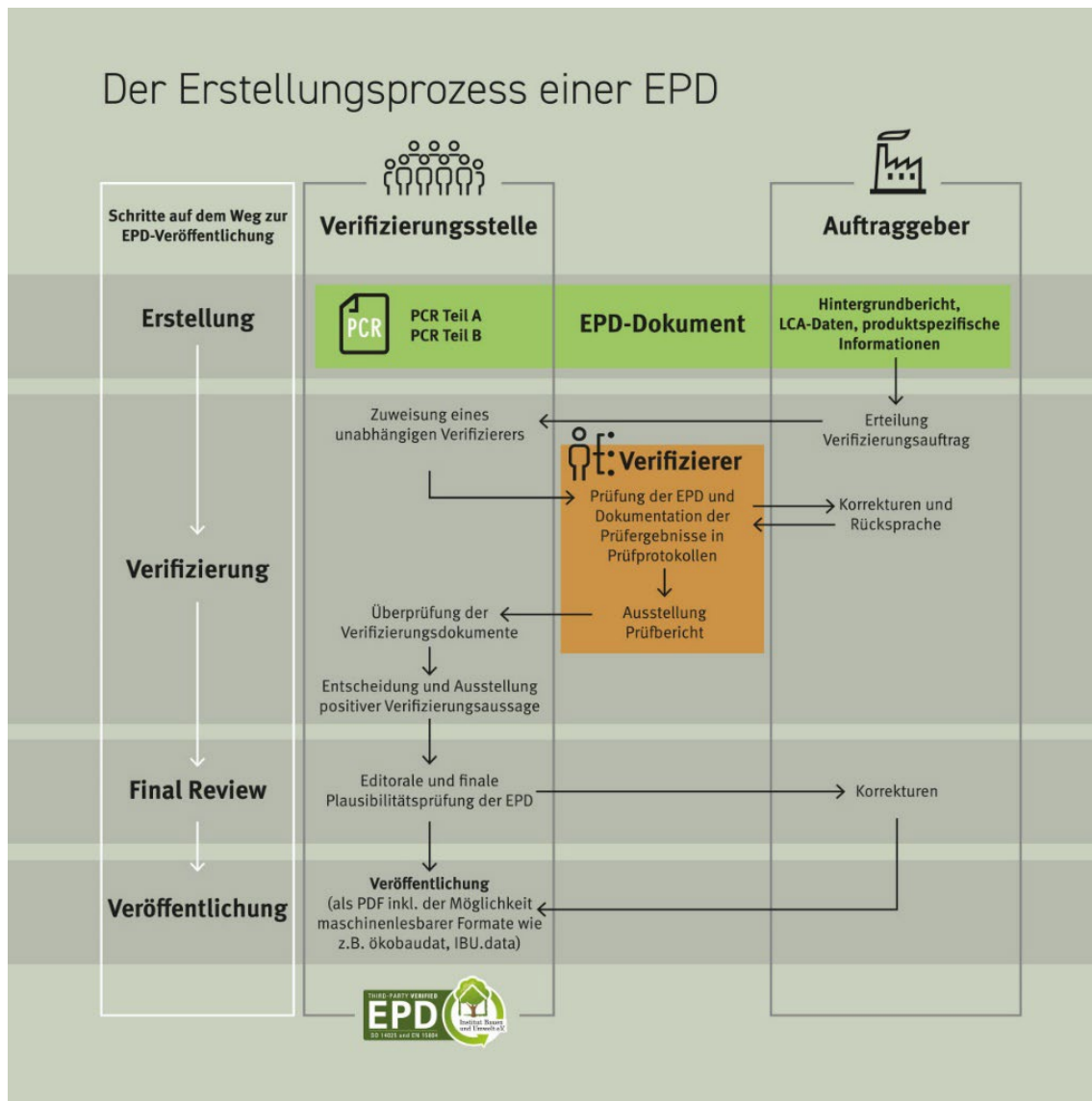


Abbildung 18: Entwicklung einer Umwelt-Produktdeklaration

6. Literatur

Bergmeister, K.: Klimaverträglich und ressourceneffizient konstruieren. In: bauaktuell. Wien, 07/2023

Bergmeister, K., Taferner, J.: The beauty of simplicity and recyclability”, Keynote. Proceedings fib Symposium 2023 Building for the future: Durable, Sustainable, Resilient Istanbul, 05 June 2023, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-32519-9_2

Bergmeister, K. (2024): Emissionsarme, kreislaufgerechte Innenschalen – aktuelle Forschungen. In: 28. Münchner Massivbauseminar. TUM, 11/2024

Bergmeister et al. (2025): 1. Endbericht FFG-Forschungsprojekt „Green Infrastructures“. ÖBV und BOKU-University, 2025

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton [Hrsg.] (2024) DAfStb-Richtlinie - Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton - Teil 1: Grundlagen und Nachweis am gesamten Tragwerk; Teil 2: Deckenbauteile. Beuth, Berlin.,[Online].

Forman, P.; Gaganelis, G.; Mark, P. (2020) *Optimierungsgestützt entwerfen und bemessen* in: Bautechnik 97, H. 10, S. 697–707.

Gaganelis, G.; Mark, P. (2021) Wohin mit der Bewehrung? – Mit Optimierungsansätzen zu passenden Stabwerkmodellen. In: BFT International 87, Heft 2, 97

Haist, Bergmeister, Fouad, Curbach, Deiters, Forman, Gerlach, Hatzfeld, Hoppe, Kromoser, Mark, Müller Ch., Müller H., Scope, Schack, Tietze, Voit (2023): Nachhaltiger Betonbau – Vom CO₂- und ressourceneffizienten Beton und Tragwerk zur nachhaltigen Konstruktion. In: Bauphysikkalender 2023, Ernst & Sohn Verlag, Berlin

Haist, M.; Bergmeister, K.; Curbach, M.; Forman, P.; Gaganelis, G., Gerlach, J.; Mark, P.; Moffatt, J.; Müller, C.; Müller, H.S.; Reiners, J.; Scope, C.; Tietze, M.; Voit, K. (2021) *Nachhaltig konstruieren und bauen mit Beton* in: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. [Hrsg.] *Beton-Kalender 2021*. Berlin: Ernst & Sohn, S. 421-531.

Mark, P.; Lanza, G.; Lordick, D.; Albers, A.; König, M.; Borrmann, A.; Stempniewski, L.; Forman, P.; Frey, A.; Renz, R.; Manny, A. (2021) *Vom Handwerk zur individualisierten Serienfertigung - Schwerpunkt adaptive Modulbauweisen mit Fließfertigungsverfahren* in: Bautechnik 98, H. 3.

Müller, C.; Palm, S. (2020) Anwendung klinkereffizienter Zemente. Newsletter Technik Heidelbergcement 33, S. 12–23., “[Online].

Putke, T.; Bergmeister, K.; Mark, P. (2016) Wirtschaftliches Konstruieren und Bewehren in: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. [Hrsg.] *Beton-Kalender 2016*. Berlin: Ernst & Sohn, S. 695–739.

Schack, T.; Deiters, M.; Neubaus, K.; Oberhoff, T.; Klemm-Albert, K.; Haist, M. (2023) Road-map zur klimaoptimierten Transportbetonherstellung – Quantifizierte Betrachtung von Handlungsoptionen zur Steigerung der Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz. Bet., “[Online].

Schack, T.; Haist, M. (2024) Performance assessment of eco-efficient concrete with ternary blended cementitious materials considering the effect of binder component fineness. Case Studies in Construction Materials 20, e03154., “[Online].

Schack, T.; Haist, M. (2025) Betone mit ternären klinkereffizienten Zementen – Review der mechanischen Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit unter Berücksichtigung der THG-Emissionen. Beton- und Stahlbetonbau 120, S. 2-11.,“ [Online].

Schmeer, D. (2021) Mesogradierung von Betonbauteilen: Herstellung und Tragverhalten von Betonbauteilen mit integrierten mineralischen Hohlkugeln. Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Stuttgart, Düren, 2021.

Warter, L.; Kromoser, B. (2023): Ökologische Effizienz von Hochbaudecken – Aktuelle Systeme und Zukunftspotenzial. In: Beton- und Stahlbetonbau, veröffentlicht 09/2022.
<https://doi.org/10.1002/best.202200076>