



Untersuchung neue Werkstoffe

Gestaltungsleitfaden Öko-Beton

Planen, Bauen, Betreiben

DB InfraGO AG

Zukunftsinitiative Bahnbau
Produktivität & Innovation

ZIB-Team „Baustoffe der Zukunft“

München, den 20.11.2024

„Baustoffe der Zukunft“

Gestaltungsleitfaden: Öko-Beton

Planen, Bauen, Betreiben

Allgemeine Arbeitsgruppe:

Die Arbeitsgruppe setzt sich zusammen aus 13 Vertretern der DB InfraGO AG, KIBAG, LEUBE, MKP, Kleihues, König Bau, CBING, C³, RWTH Aachen, TU Dresden, EPFL Lausanne, MKIngenieure, FOLAB)

Die Unterlage wurde extern geprüft von:

Prof. em. Dr. Eugen Brühwiler
EPFL - ETH Lausanne
beratender Ingenieur
Schweiz

Das Vertiefungsdokument wurde erstellt von:

LEUBE:
Gerhard Thaler
Anton Steiner

Alle Dokumente wurden durch die DB InfraGO AG begleitet und geprüft:

Grundsätze Infrastrukturplanung und -projekte - Abteilung Baukapazität, Umwelt und Logistik:
I.IIG 41: Conrad Pelka

Bauartenverantwortung Ingenieurbau - Brückenbau und LS-Anlagen Technik
I.IAI 31: Tristan Mölter
I.IAI 31: Peter Dul

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	4
1.1 Vorstellung des Werkstoffs.....	5
2 Einsatzgebiete	7
2.1 Planungsprozess und Technologie	7
2.2 Schnelles Bauen	7
2.2.1 Bauablauf und Bauzeit	7
2.2.2 Bahnbetrieb.....	7
2.2.3 Bahninfrastruktur.....	7
2.3 Wartung und Betrieb	7
2.3.1 Dauerhaftigkeit.....	7
2.3.2 Erfordernis von Erneuerungen	8
2.3.3 Wartungszyklen.....	8
3 Chancen für Ökologie, Ökonomie und Soziales	9
3.1 Nachhaltigkeitsanalyse	9
3.2 Kosten.....	9
3.3 Soziales	10
4 Risikobewertung	11
5 Anwendungsbeispiele	12

1 Einleitung

Beton gehört zu den wichtigsten Baustoffen weltweit, er kommt im Hoch- und Tiefbau auf vielfältige Weise zum Einsatz. Die Rohstoffe für die Betonproduktion verursachen allerdings bei der Herstellung große Mengen an CO₂, spezielle die Herstellung des Zementes trägt nicht unerheblich zum globalen CO₂ Ausstoß bei.

Aufgrund dieses Umstandes ergab sich ein akuter Handlungsbedarf in der Beton- und Zementindustrie. Durch intensive Forschungen der letzten Jahre konnte der Klinkeranteil des Zementes ohne Qualitätsverlust reduziert und damit ein entscheidender Beitrag zur CO₂-Reduktion erzielt werden. Diese Zemente eröffnen ein großes Potential mit wenig Einschränkungen.

Weitere CO₂-Einsparungen können durch die Verwendung von Recycling-Zuschlagstoffen erzielt werden.

Beton mit geringen CO₂-Emissionen werden als **Öko-Betone** bezeichnet.

1.1 Vorstellung des Werkstoffs

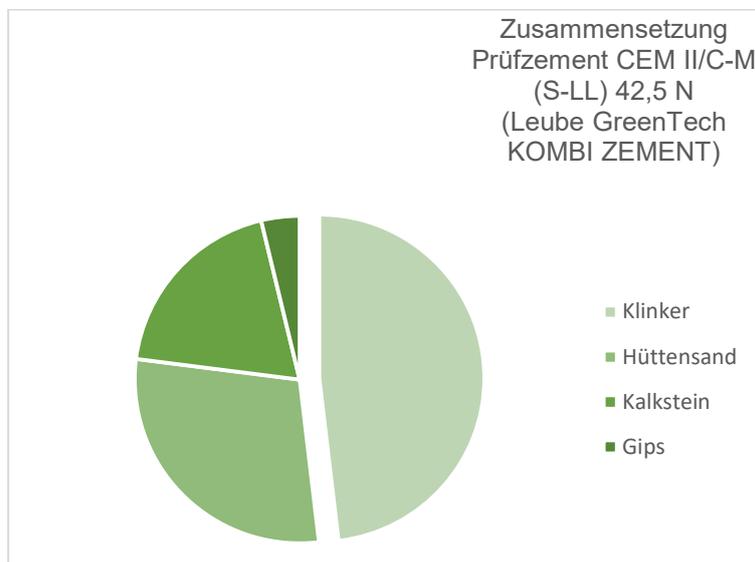
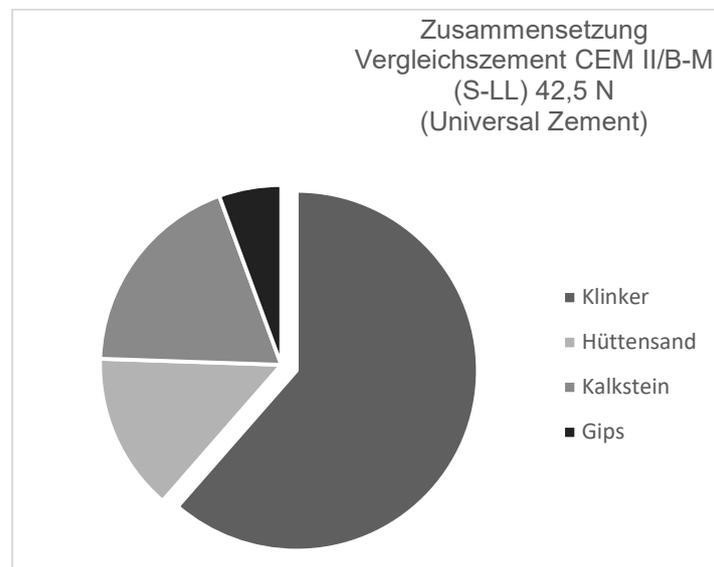
Der Werkstoff Öko-Beton verwendet, zum Unterschied von herkömmlichem Beton, Ausgangsstoffe mit niedrigen CO₂-Emissionen. Dies beginnt mit dem Einsatz von CO₂-reduzierten Zementen. Diese werden derzeit von den Zementherstellern entwickelt bzw. haben einige Hersteller bereits eine Zulassung für den Einsatz dieser Zemente.

Die erste in Deutschland vergebene allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für einen CO₂-armen Zement (CEM II/CM (S-LL)) erfolgte im Jahr 2020.

Diese Genehmigungen wurden auf nationaler Ebene eingeholt, da die Normen für diese Zemente noch nicht harmonisiert sind.

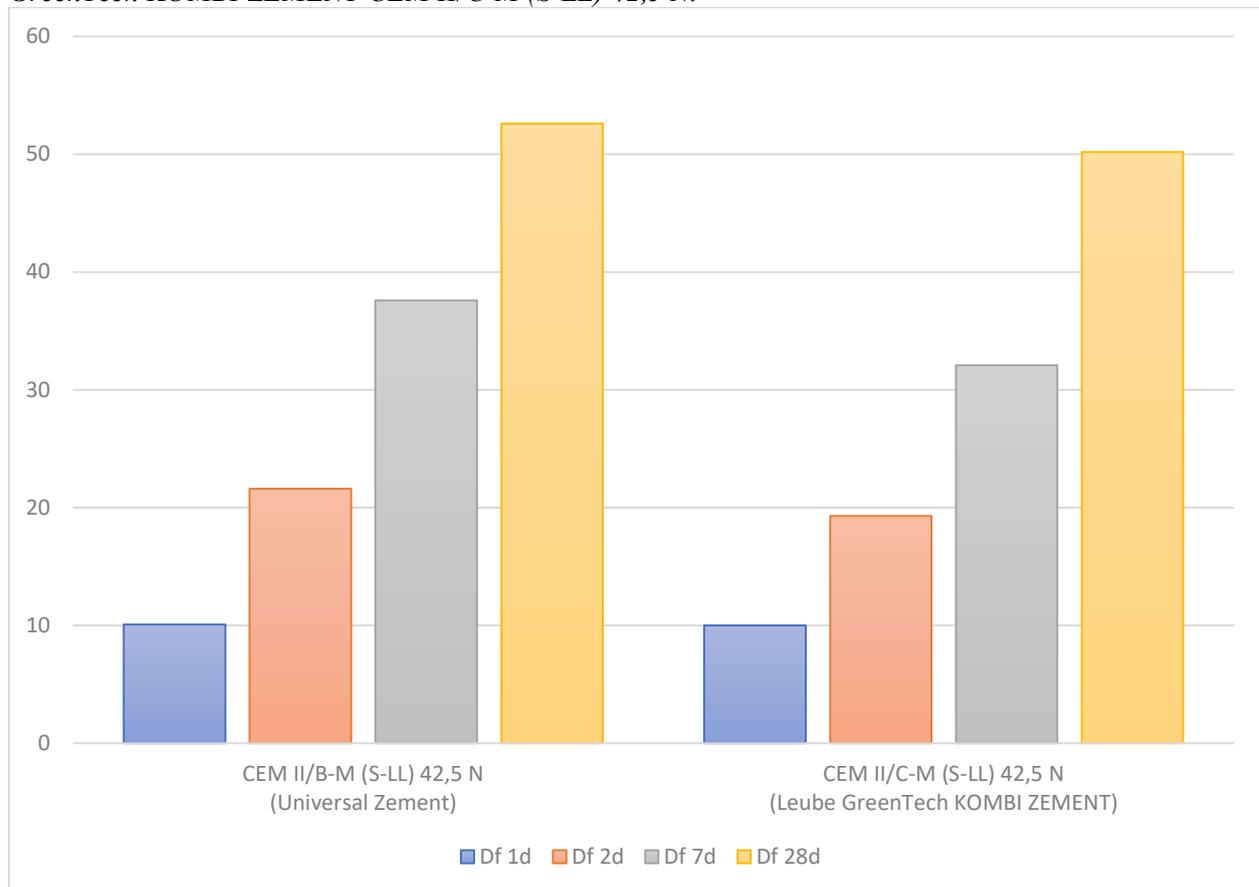
Dieser Zement spart bis zu 39 % CO₂ im Vergleich zu CEM I und bis zu 25 % im Vergleich zu CEM II/C.

Diagramm 1: Vergleich der Zusammensetzung des Standardzements (Universal Zement) CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N zum Leube GreenTech KOMBI ZEMENT CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N.



Die Neufassung der DIN 1045 sieht die Verwendung klinkerarmer Zemente vor und ist in einigen deutschen Bundesländern bereits in Kraft, was das Zulassungsverfahren für den Zement vereinfachen soll.

Diagramm 2: Vergleich der Mörtelfestigkeit des Standardzements CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N zum Leube GreenTech KOMBI ZEMENT CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N.



Weitere CO₂-Einsparungen können durch die Verwendung von Recycling-Zuschlagstoffen erzielt werden. Dazu werden bestehende Gebäude abgerissen und der Beton z.B. von Stützen und Decken wird zerkleinert, sortiert und aufbereitet, damit er als Zuschlag wieder geeignet ist.

Die aktuellen Normen erlauben bereits den Einsatz dieses Ausgangstoffes für Bauwerke, die keine hohe Festigkeiten und spezielle Anforderungen an den Beton voraussetzen.

2 Einsatzgebiete

2.1 Planungsprozess und Technologie

Öko-Beton erfordert keine Änderungen im herkömmlichen Planungsprozess. Besonders geeignet ist er für massige Bauteile, da er aufgrund der niedrigeren Klinkergehalte im Zement geringere Hydratationswärme entwickelt.

Darüber hinaus hat er Vorteile als Transportbeton, da er im flüssigen Zustand, bei langen Lieferwegen oder Verkehrsbehinderungen und im Sommer bei heißem Wetter länger verarbeitbar bleibt.

Es können derzeit nicht alle Expositionsklassen abgedeckt werden, da die Norm den Einsatz von Recycling-Zuschlägen und den CO₂-armen Zementen nicht überall zulässt.

Für folgende Expositionsklassen ist der Einsatz von Recycling-Zuschlägen lt. Norm nicht vorgesehen: XF2, XF3, XF4 (Frostangriff mit und ohne Taumittel), XD2-XD3 (Korrosion verursacht durch Chloride), XS (Bewehrungskorrosion durch Chloride aus Meerwasser).

Nationale Normen in Deutschland und Österreich sehen keine Beschränkungen der Expositionsklassen CEMII/C-M (S-LL) vor. Derzeit gibt es jedoch keine harmonisierte Norm. Einige Hersteller schränken derzeit noch die Verwendung von CEM II/CM (S-LL) für hohe Expositionsklassen (XC4, XF4, XD3) ein. Technisch sind alle Expositionsklassen realisierbar.

2.2 Schnelles Bauen

2.2.1 Bauablauf und Bauzeit

Der Bauablauf ist nahezu gleich. Lediglich die Frühfestigkeiten sind etwas geringer als bei herkömmlichen Betonen. In der Praxis bedeutet dies, dass die Ausschulfristen genau betrachtet werden müssen.

Neue Generationen von klinkerarmen Zementen werden in Zukunft vergleichbare Festigkeitsentwicklungen wie herkömmliche Zemente besitzen. Somit werden längere Ausschulfristen der Vergangenheit angehören.

2.2.2 Bahnbetrieb

Im Bahnbetrieb gibt es keine Änderungen zu herkömmlichen Betonen.

Bei der Verwendung von Fertigteilen aus Ökobeton sind jedoch erhebliche Bauzeitverkürzungen möglich, da die aktuell noch längeren Ausschulfristen im Fertigteilwerk kompensiert werden.

2.2.3 Bahninfrastruktur

Hier gilt das gleiche wie im Punkt vorher.

2.3 Wartung und Betrieb

2.3.1 Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit ist bei Betonen, welche laut Norm eingesetzt werden können, nicht eingeschränkt.

2.3.2 Erfordernis von Erneuerungen

Kein Unterschied zu herkömmlichem Beton

2.3.3 Wartungszyklen

Die Wartungszyklen sind unverändert.

3 Chancen für Ökologie, Ökonomie und Soziales

3.1 Nachhaltigkeitsanalyse

- CO₂ Vergleich

Der Vergleich mit herkömmlichen Zementen zeigt eine CO₂ - Einsparung von 25 %. Mit neuen Generationen klinkerarmer Zemente besteht doch Potenzial, diesen Wert weiter zu verbessern.

- Kreislaufwirtschaft

Bei der Verwendung von Recycling-Zuschlägen werden bestehende Gebäude abgetragen, Betonbauteile zerkleinert und nach der Aufbereitung wieder als Zuschlag verwendet.

Aktuelle Normen sehen die Möglichkeit vor, nur einen Teil der Gesteinskörnung durch Recycling-Zuschlägen zu ersetzen, da eine große Menge an Recycling-Zuschlägen die Eigenschaften des Betons negativ beeinträchtigt.

Klinkerarme Zemente können ohne Einschränkungen auch für Betone mit Recycling-Zuschlägen verwendet werden. Auch Beton auf CEMII/C-M (S-LL) Basis kann zerkleinert und wiederverwendet werden.

3.2 Kosten

- Primär- und Nutzungskosten:

Die Baustoffkosten sind vergleichbar mit herkömmlichem Beton, da der Preis für klinkerarmen Zement nicht höher ist. Allerdings kann Beton mit Recycling-Zuschlägen etwas teurer sein als Beton mit herkömmlichen Zuschlagstoffen, da Recycling-Zuschlägen teurer in der Herstellung ist und oft vor Ort nicht verfügbar sind.

Die längeren Ausschulfristen können in gewissen Bereichen eine Kostensteigerung bewirken, dies kann jedoch mit einer entsprechenden Vorausplanung kompensiert werden.

Neue Generationen von klinkerarmen Zementen werden in Zukunft vergleichbare Festigkeitsentwicklungen wie herkömmliche Zemente besitzen. Somit sind längere Ausschulfristen in Zukunft nicht mehr zu berücksichtigen.

- Lebenszykluskosten:

Das Gleiche wie bei herkömmlichem Beton. Es besteht sogar eine Erhöhung der Nutzungsdauer, da Öko-Beton widerstandsfähiger gegen chemische und klimatische Einflüsse ist. Dies wird durch das Zusammenspiel mehrerer Faktoren erreicht:

1. Eine geringere Wärmeentwicklung beim Aushärten verbessert die Struktur des Betonsteins
2. Erhebliche Mengen an Hüttensand und Kalkstein machen den Beton dichter, was die Eindringtiefe verschiedener Stoffe verringert.
3. Außerdem führt eine verringerte Wärmeentwicklung während des Erhärtens zu einem verringerten Schwinden und Kriechen sowie zu geringeren Rissbildungen im Beton.
4. Durch die Reduzierung der Klinkermenge wird auch die Menge an Portlandit (Ca(OH)₂) reduziert, wodurch das Risiko einer vorzeitigen Zerstörung des Betons oder einer Korrosion der Bewehrung infolge einer vorzeitigen Zerstörung von Portlandit verringert wird.

3.3 Soziales

- **Kulturelle Fragestellungen**

Kein Unterschied zu herkömmlichem Beton.

- **Was macht der Werkstoff in Verbindung mit historischer Bausubstanz**

Kein Unterschied zu herkömmlichem Beton.

4 Risikobewertung

GreenTech:

- In der Planung im Vorfeld sicherzustellen, dass der Ökobeton für den jeweiligen Einsatzfall geeignet ist.
- Es gibt geringere Ein Tages-Festigkeiten, dies ist im Bauablauf zu berücksichtigen.
- Einige Zusatzmittel müssen ersetzt oder anders dosiert werden. Rezepturen sind entsprechend zu optimieren.
- Bei hohem Verbrauch von Zuschlagstoffen für die Zementproduktion kann es zu einem Mangel auf dem Markt kommen.
- Derzeit sind klinkerärmere Zemente nicht ausreichend geregelt.

Teilweise gibt es Zulassungen für CO₂-arme Zemente. Allerdings wird in Deutschland in naher Zukunft (1 – 2 Jahre) eine Norm eingeführt, die den Einsatz klinkerarmer Zemente regelt.

- Es besteht die Gefahr, dass die Entwicklung der Norm für klinkerarme Zemente hinter der Praxis zurückbleiben wird.

Recycling-Zuschlagstoffe:

- Qualität und Menge von Recycling-Zuschlagstoffen sind unterschiedlich.
- Recycling-Zuschlagstoffe sind nicht überall verfügbar.
- Die maximale Dosierung von Recycling-Zuschlagstoffen ist begrenzt und kann nicht für Beton mit hohen Anforderungen verwendet werden.
- Teuer als herkömmlicher Zuschlagstoff.
- Sehr aufwendig (fast nicht geeignet) bei hohen Anforderungen an die Oberfläche (Sichtbeton).

5 Anwendungsbeispiele

5.1 Klinkerarmer Zement (CEM II/C-M (S-LL))

CEM II/C-M (S-LL) Zemente gibt es auch von mehreren Herstellern in Österreich und Deutschland, allerdings sind uns die Verkaufszahlen und Anwendungsbeispiele von Marktbegleiter nicht bekannt.

Von unserer Seite können Anwendungsbeispiele von GreenTech Kombi Zement (CEM II/C-M (S-LL)) vorgestellt werden. Dieser Zement ist seit Mitte 2022 auf dem Markt in Österreich und liegt mit unter 380 Kilogramm CO2 pro Tonne Zement noch einmal um 25 Prozent unter dem aktuellen Leube Transportbeton-Zement. Im Jahr 2024 betrug der Umsatzanteil dieses Zements ca. 20 % des herkömmlichen Zements für Transportbeton.

5.1.1. Projekt Sperre Kleinkirchentalgraben, Hallein

Der CEM II/C-M (S-LL) erfüllt eine gleichbleibende hohe Funktionalität und Festigkeitsentwicklung im Beton – die Ausschalzeiten und damit verbunden der gleichbleibende Baufortschritt sind unverändert gegenüber dem Vergleichszement. Durch die niedrige Wärmeentwicklung bei der Erhärtung ist eine schwindungsarme Nacherhärtung des Betons gegeben.

Zwei Jahre nach dem Hochwasser in Hallein (Tennengau) wurde als letzter Bauabschnitt das Rückhaltebecken der WLV – Sperre Kleinkirchentalgraben – mit dem CEM II/C-M (S-LL) im Jahre 2023 fertiggestellt. Ein großes Hochwasser wie 2021, als die gesamte Altstadt überflutet wurde, gilt damit künftig als ausgeschlossen. Im Ernstfall kann das neue Rückhaltebecken bis zu 40 Millionen Liter Wasser fassen. Das Rückhaltebecken im Kleinkirchental ist eines von drei Bauwerken. Insgesamt hat der Kotbach einen Zulauf aus vier Bächen. Schon Ende 2021 wurde das Rückhaltebecken mit 80 Millionen Liter Fassungsvermögen beim Oberlauf fertiggestellt.



Abbildung 1: Projekt Sperre Kleinkirchentalgraben, Hallein

Eckdaten Projekt Sperre Kleinkirchentalgraben

Bauzeit	November 2022 bis September 2023
Beton:	C25/30 B2 GK32 F52
Menge:	2.400 m ³ Beton

Im Zuge einer verifizierten Umwelt-Produktdeklaration konnte die CO2-Einsparung um über 21 % gegenüber dem Vergleichszement (CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N (Universal Zement)) nachgewiesen werden.

5.2 Volksschule Adnet

In Zusammenarbeit mit der Leube Gruppe und Deisl-Beton entsteht mit der neuen Volksschule ein Musterbeispiel für angewandte Kreislaufwirtschaft und ressourcenschonendes Bauen.

Durch den Einsatz von regionalem Recyclingbeton und Österreichs erstem grünen Zement werden in Summe rund 35 Tonnen CO₂ eingespart und ca. 300 Tonnen Naturstein durch Sekundärrohstoffe ersetzt.



Abbildung 2: Volksschule in Adnet, Österreich