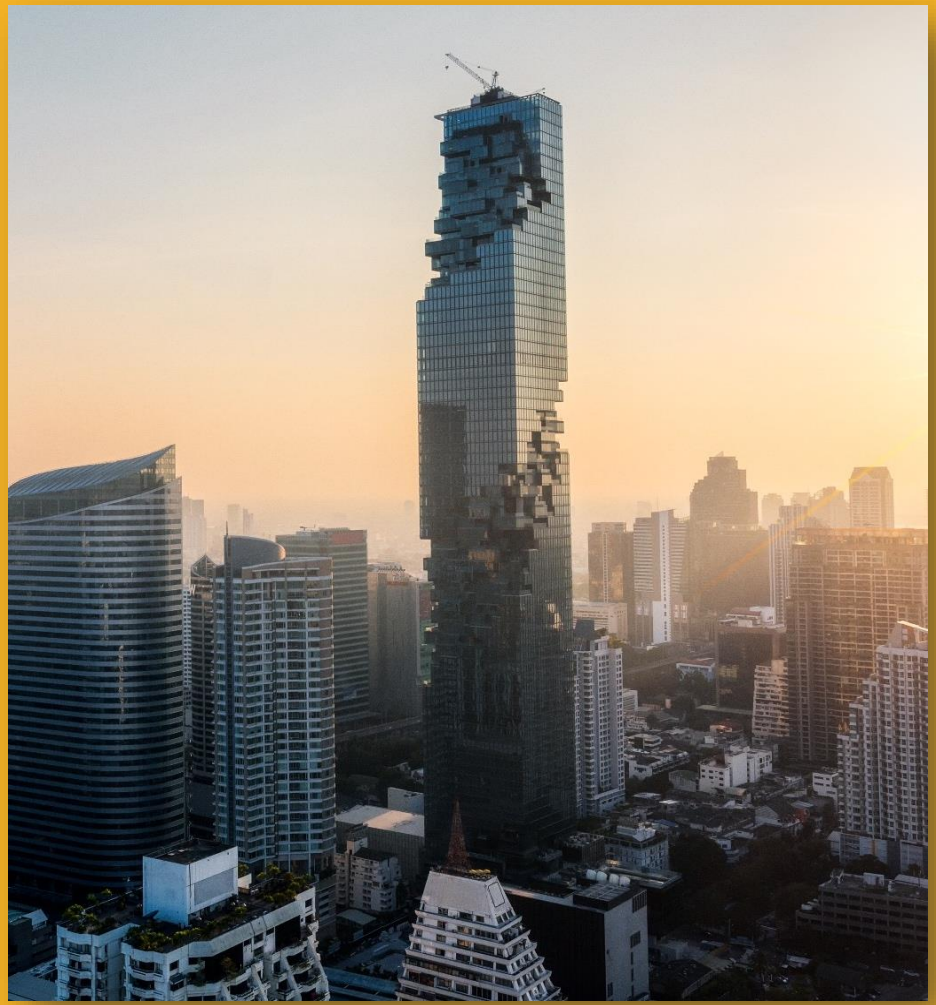


CO_2-REDUZIERTER BETONBAU

Nachhaltigkeit vs. Dauerhaftigkeit

SIKA SCHWEIZ AG
MARIO KAPFERER
12.11.2024

BUILDING TRUST

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung – Globale Herausforderungen
2. Anhang ND zur SN EN 206:2016+A2:2021
3. Chancen und Risiken
4. Lösungsansätze und alternative Konstruktionen
5. Digitale Qualitätssicherung in der Betonproduktion

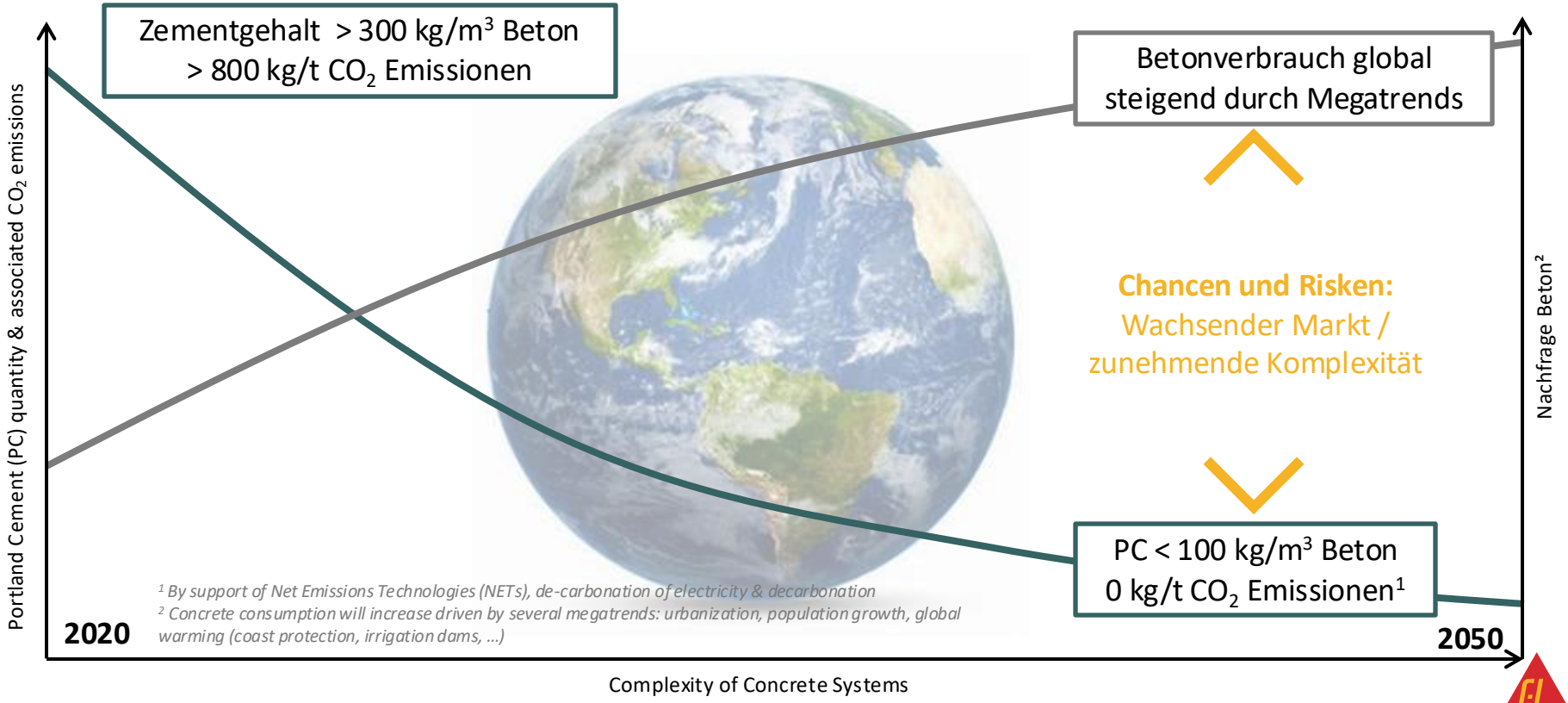
BUILDING TRUST

EINLEITUNG

GLOBALE HERAUSFORDERUNGEN

BUILDING TRUST

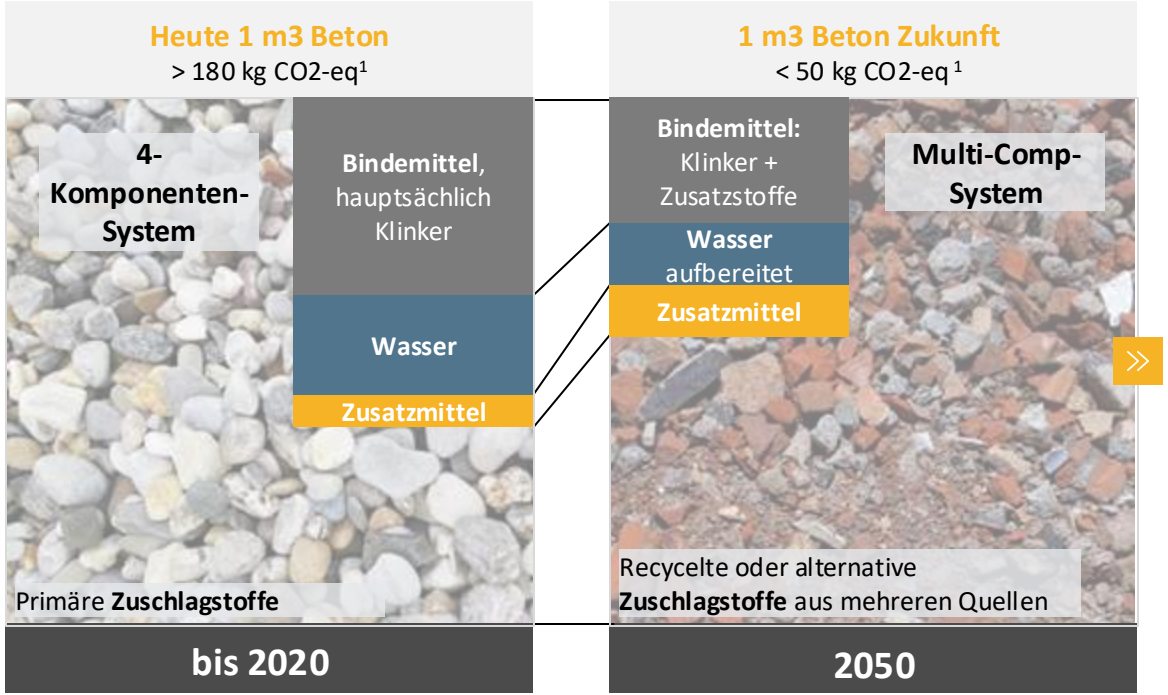
GLOBALE HERAUSFORDERUNG DER BETONBRANCHE
SUSTAINABILITY: TRENDS



[1] *By support of Net Emissions Technologies (NETs), de-carbonation of electricity & decarbonation*
[2] *Concrete consumption will increase driven by several megatrends: urbanization, population growth, global warming (coast protection, irrigation dams, ...)*

BUILDING TRUST

GLOBALE HERAUSFORDERUNG DER BETONBRANCHE
SUSTAINABILITY: TRENDS



Weniger Klinkergehalt, weniger Wasser und alternative Zuschlagstoffe stellen eine **grössere** Herausforderung der Qualitätssicherung dar.

[1] *Anlehnung einer EPD gemäss ISO 14025 und EN-15804 für die Herstellungsphase A1-A3*

BUILDING TRUST

ANHANG ND ZUR SN EN 206:2016+A2:2021

NORMATIVES

BUILDING TRUST

ANHANG ND ZUR SN EN 206
EINLEITUNG

sia
FprSIA 262.051+A2/ND Bauwesen

Schweizer Norm
Norme Suisse
Norma Svizzera

EN 206:2013+A2:2021/ND

Was ermöglicht / bewirkt der Anhang konkret?

«Auf Vorgaben für die Zusammensetzung des Betons gemäss nationalem Anhang ND wird vollständig verzichtet.»

*«Die Zusammensetzung des Betons, Art und Menge des Bindemittels und Menge des zugegebenen Wassers sind so zu wählen, dass **alle geforderten Frisch- und Festbetoneigenschaften erreicht werden** und der **Korrosionsschutz** einer allfälligen Bewehrung sichergestellt ist.»*

Quelle: Auszug der SN EN 206:2013+A2:2021/ND.5.2

BUILDING TRUST

ANHANG ND ZUR SN EN 206
EINLEITUNG

sia
FprSIA 262.051+A2/ND Bauwesen

Schweizer Norm
Norme Suisse
Norma Svizzera

EN 206:2013+A2:2021/ND

Anforderungen an die Zusammensetzung SN EN 206:

Bezeichnung Anforderungen	Sorte 0 (Null)	Sorte A	Sorte B	Sorte C	Sorte D (T1)	Sorte E (T2)	Sorte F (T3)	Sorte G (T4)
Expositionsklasse (Kombination der aufgeführten Klassen)	X0(CH)	XC2(CH)	XC3(CH)	XC4(CH), XF1(CH)	XC4(CH), XD1(CH), XF2(CH)	XC4(CH), XD1(CH), XF4(CH)	XC4(CH), XD3(CH), XF2(CH)	XC4(CH), XD3(CH), XF4(CH)
Maximaler w/z-Wert bzw. w/z_{eq}-Wert	–	0,65	0,60	0,50	0,50	0,50	0,45	0,45
Mindestzementgehalt z_{min}, in kg/m³ [1),2)]	–	280	280	300	300	300	320	320
Dauerhaftigkeits-prüfungen [3)]	Keine	Keine	WL [4)], KW	KW	KW, FT	KW, FT	CW, FT	CW, FT
Andere Anforderungen	SN EN 12620+A1:2008 enthält Anforderungen an die Gesteinskörnungen							
Frei gegebene Zement-arten (Tabelle NA.1)	Bei der Kombination von Expositionsklassen gilt für die Wahl des Zementes jeweils die strengste Anforderung							

	Nennwert des Grösstkorns in mm					
	8	16	22,5	32	45	63
Anpassung des Mindestzementgehaltes in % des Mindestzementgehalts gemäss Tabelle NA.6	+15 %	+10 %	+5 %	0	–5 %	–10 %

Anforderungen an die Zusammensetzung SN EN 206 / ND:

- **Keine!**
- Normierte/zugelassene Ausgangsstoffe (wie gehabt)
- Es müssen alle vereinbarten Frisch- und Festbetoneigenschaften gemäss SN EN 206 erfüllt werden

Quelle: Auszug der SN EN 206:2013+A2:2021 Tabelle NA.6 und NA.7

BUILDING TRUST
Sika®

CHANCEN UND RISIKEN

ANHANG ND ZUR SN EN 206:2016+A2:2021

BUILDING TRUST

CHANCEN UND RISIKEN

Chancen der Nachhaltigkeit:

- Fördern von alternativen Bindemitteln und Zusatzstoffen mit tieferem CO_2-Fussabdruck
- Freie Wahl der Zusammensetzung der Betonrezeptur
- Fördert und lässt innovative Ansätze zu
- Projektspezifische Prüfungen fördern massgeschneiderte Lösungen
- Je nach Bauteil, kann ein tieferer Bindemittelgehalt und höherer w/b-Wert sinnvoll sein

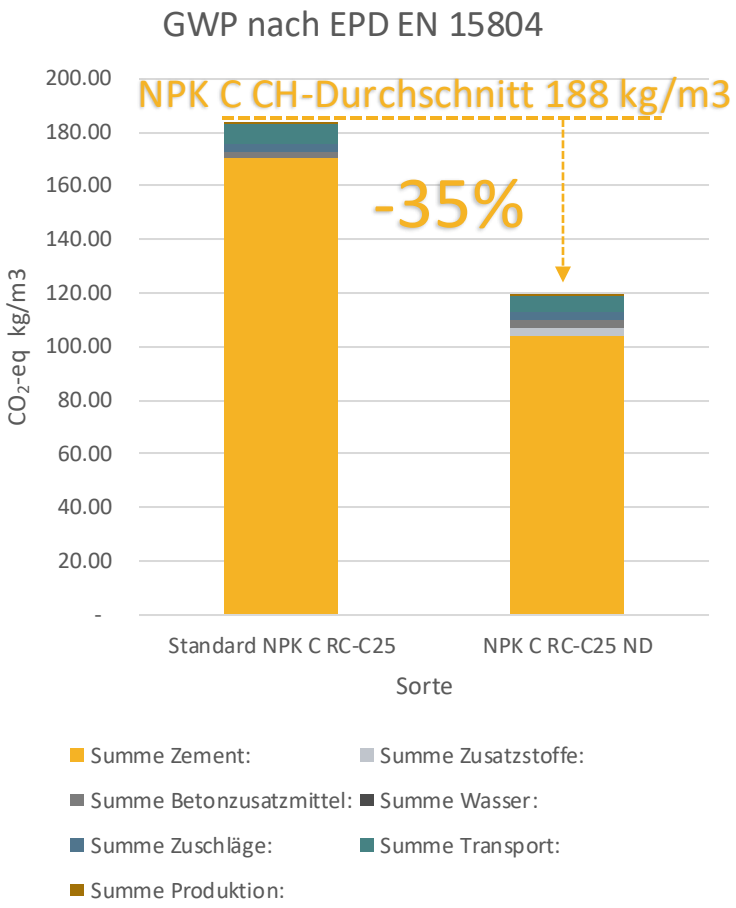
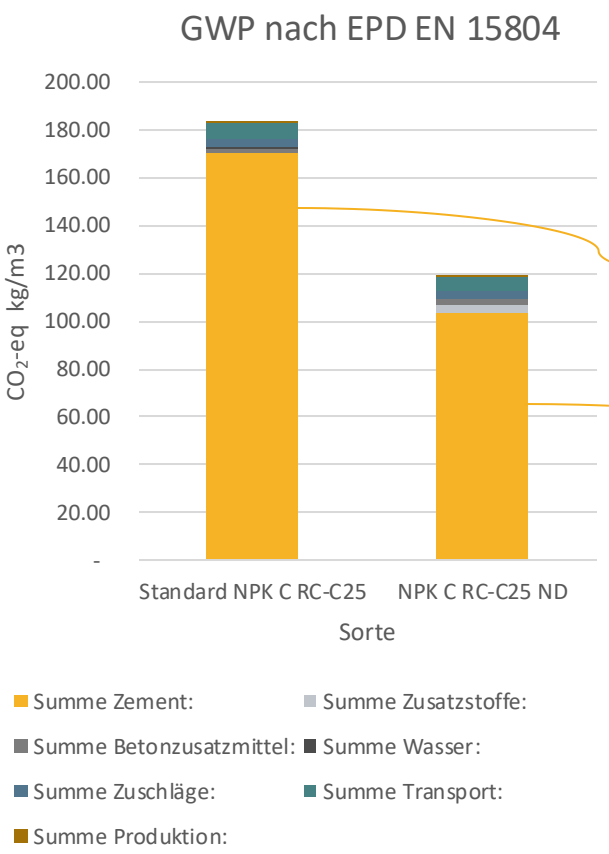
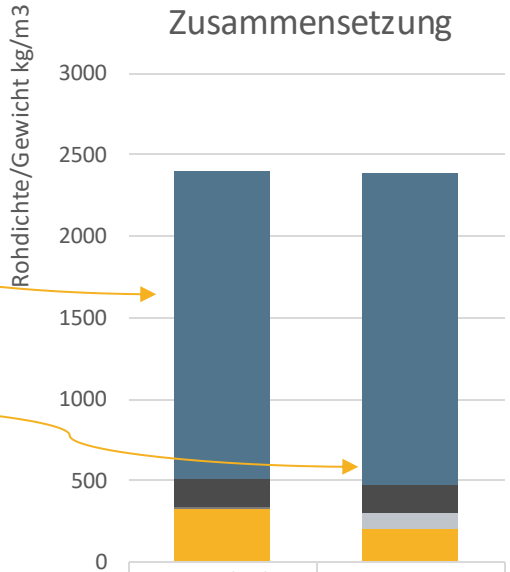


Abbildung1:
Vergleich Standard NPK-C mit NPK-C ND optimiert

BUILDING TRUST

CHANCEN UND RISIKEN





	Standard NPK C RC-C25	NPK C RC-C25 ND
Zuschläge	1895	1909
Wasser	178	175
Betonzusatzmittel	3	3
Zusatzstoffe	0	100
Zement	330	200

Abbildung2: Vergleich Standard NPK-C mit NPK-C ND optimiert

Was ist dazu notwendig?

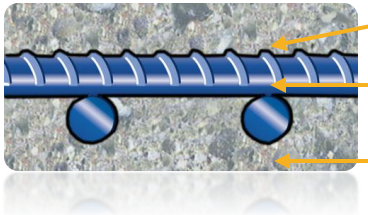
- **Optimierte Siebkurve mit geringem Hohlraum**
- Klinkerreduzierter Zement
- Reaktive Zusatzstoffe
- Hochleistungs-Betonzusatzmittel

BUILDING TRUST

CHANCEN UND RISIKEN

Risiken bei der Anwendung von CO_2-Reduzierten Betonsorten:

- Potenziell höhere Kosten bei den Ausgangsstoffen
- Wegfall fester Grenzwerte könnte zu Qualitätsverlust führen
- **Schlechte Verarbeitbarkeit auf den Baustellen**
- Vergleichbarkeit der Sorten nur noch bedingt möglich
- Fehlende Erfahrungswerte kann zu unzureichender Konformität führen
- **Fehlende, schlechte Passivierungsschicht und Dauerhaftigkeiten**
- Mindestzementgehälter bieten Sicherheit und Reserven



BUILDING TRUST

CHANCEN UND RISIKEN
KARBONATISIERUNG VON BETON

Was ist die Karbonatisierung von Beton?

- Ist ein chemischer Prozess bei dem Kohlendioxid CO_2 aus der Luft mit dem Beton enthaltenen Kalziumhydroxid reagiert und Kalziumkarbonat bildet

Auswirkung:

- Der pH-Wert sinkt von 12-13 auf 8-9.
- Niedriger pH-Wert kann die schützende Passivschicht der Stahlbewehrung zerstören → Korrosion

Was braucht es für eine Karbonatisierung?

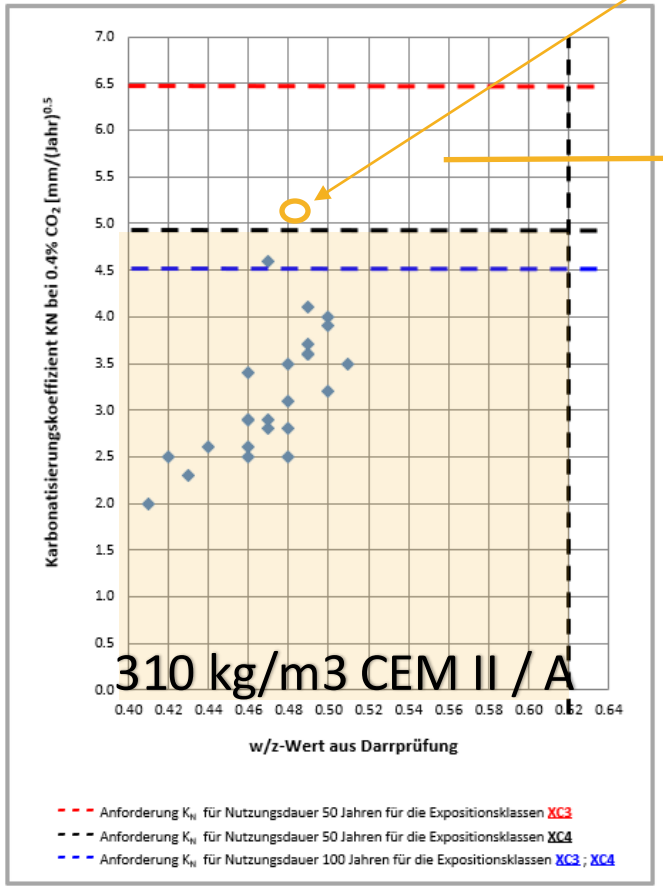
$$Ca(OH)_2 + CO_2 + H_2O \rightarrow CaCO_3 + 2\,H_2O$$

Kalziumhydroxid (Zement) | Kohlendioxid (Luft) | Wasser bzw. Feuchtigkeit

BUILDING TRUST

CHANCEN UND RISIKEN

Abbildung3: Karbonatisierungswiderstände abhängig von w/z-Wert



Bei 166 Liter Wasser und 150 kg CEM II / B

Warum nicht einfach den w/z-Wert reduzieren?

- In der Theorie wäre dies der richtige Ansatz → Ein tieferer w/z-Wert reduziert die Porosität
- In der Praxis jedoch nicht möglich, da der Beton nicht mehr verarbeitbar wäre
- Bei 150kg Zement und einem w/z-Wert von 0,5 läge der Wassergehalt bei 75 Liter pro m³
- Für eine gute Verarbeitbarkeit sind rund 130–140 l/m³ Wasser erforderlich

BUILDING TRUST

LÖSUNGSANSÄTZE UND ALTERNATIVE KONSTRUKTIONEN

BUILDING TRUST

LÖSUNGSANSÄTZE UND ALTERNATIVE KONSTRUKTIONEN
KW - WAS KANN MAN TUN?

Betontechnologisch Massnahmen:
«Dichter Beton»

- **Verringerung der Porosität in der Randzone**
  - Schalungen mit saugender Schalhaut
  - Die Wahl des richtigen Trennmittels
- Verringerung der Porosität über w/b-Wert
  - Geht zu Lasten der Verarbeitbarkeit
- **Abgestuftes Kiesgemisch mit guter Packungsdichte**
- Vollständige Verdichtung auf der Baustelle (Verdichtungsporen minimieren) + ausgedehnte Nachbehandlung
- Betonzusatzmittel (insbesondere Sika WT)

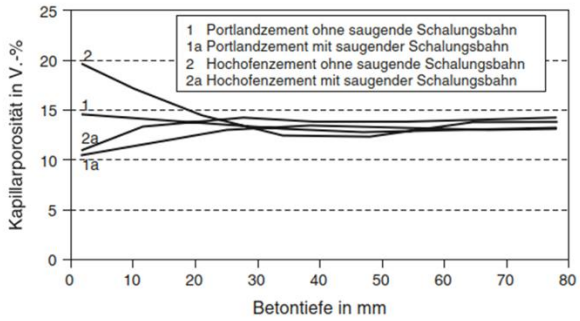


Abbildung4:
Einfluss einer saugenden Schalungsbahn auf die Kapillarporosität
Quelle: Jochen Stark, B. W. (2013)

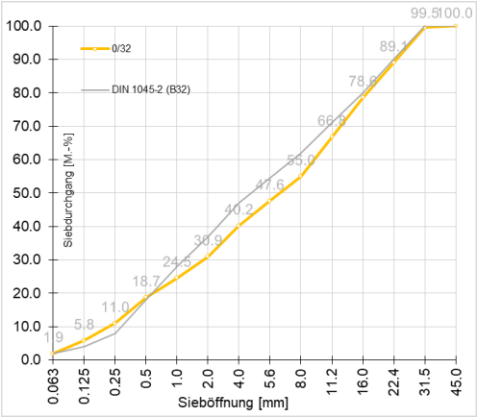


Abbildung5:
Sieblinie an Fuller orientiert mit wenig Hohlraum

BUILDING TRUST

LÖSUNGSANSÄTZE UND ALTERNATIVE KONSTRUKTIONEN
KW - WAS KANN MAN TUN?

Konstruktive Massnahmen:

«Ausreichende Betondeckung»

- Die erforderliche Betondeckung der Bewehrung wird durch die Aspekte der Dauerhaftigkeit und der Übertragung von Verbundkräften bestimmt

- **Erhöhen der Betonüberdeckung** insbesondere bei Nutzungsdauer von 100 Jahre

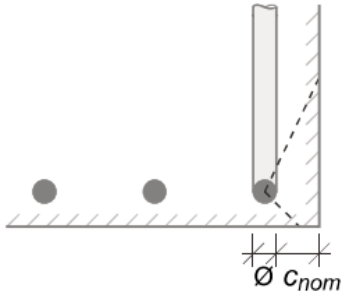


Abbildung 6:
Bewehrungsüberdeckung
Quelle: SIA 262:2013

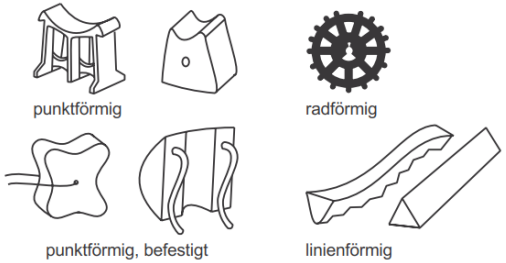


Abbildung 7:
Abstandhalter für Stahlbeton
Quelle: Zilch, K., & Zehetmaier, G. (2010)

BUILDING TRUST

LÖSUNGSANSÄTZE UND ALTERNATIVE KONSTRUKTIONEN
KW - WAS KANN MAN TUN?

Konstruktive Massnahmen:
«Karbonatisierungsbremsen»

- Als Karbonatisierungsbremsen sind Beschichtungen geeignet auf Basis von:
  - Polyurethanharzen
  - Epoxidharzen
  - Kunststoffdispersionen
- Hydrophobierungsmittel (indirekt durch Verringerung der Feuchtigkeitsaufnahme)
  - Silane / Siloxane

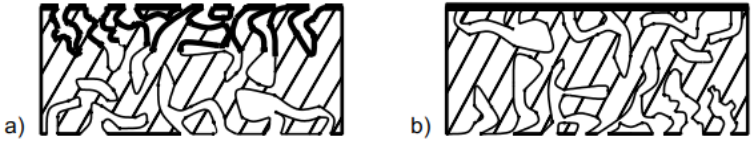


Abbildung8:
Schematischer Vergleich zwischen einer a) imprägnierten und b) einer beschichteten Betonoberfläche
Quelle: Benedix, R. (2017)

BUILDING TRUST

LÖSUNGSANSÄTZE UND ALTERNATIVE KONSTRUKTIONEN
KW - WAS KANN MAN TUN?

Konstruktive Massnahmen:
«Bewehrungswahl und Konstruktion»

- Hochlegierte Stähle
- Korrosionsinhibitoren
- **Unbewehrte Betonbauteile**
- **Faserbeton mit synthetischen Fasern**

Keine statische Bewehrung vorhanden, somit:

$$\begin{matrix}\text{kein}\\ \text{Angriff}\end{matrix} \rightarrow \left\{ \mathbf{X0} \rightarrow (\text{engl. } \textit{Zero Risk}) \right.$$

Anwendungsbeispiele:
- Kelleraussenwände mit Auflast
- Windbelastete Aussenwände
- Innenwände
- Einzel- und Streifenfundamente

Dünnere Bauteile bei Wänden möglich:
- Innen 12cm
- Aussen 14cm

Nachweis gemäss SIA262 5.5.1 und EC-2 Kapitel 12 möglich

«Zudem muss gewährleistet sein, dass die Rissbildung kein Ver sagen des Bauteils zur Folge hat.»

BUILDING TRUST

LÖSUNGSANSÄTZE UND ALTERNATIVE KONSTRUKTIONEN
ALTERNATIVE KONSTRUKTIONEN

Konstruktive Massnahmen:
«Bewehrungswahl und Konstruktion»

Wand d=25cm und h=2.5m pro Laufmeter

Abbildung9: Vergleich Faserbeton mit Stahlbeton

- **Faserbeton mit synthetischen Fasern**

Erhöhte Duktilität in den Bauteilen

Messbare residuelle Biegezugfestigkeit

Schwindrisse reduzieren sich auf ein Minimum
→ Bauteile verweilen im ungerissenen Zustand

Keine Korrosion!

Erhöhte Dauerhaftigkeit

Nachweis kann unbewehrt erfolgen nach SIA 262 oder EC-2 Kapitel 12 oder nach SIA2064 (in Vernehmlassung)

BUILDING TRUST

DIGITALE QUALITÄTSSICHERUNG IN DER BETONPRODUKTION

SIKA SAND-APP

BUILDING TRUST

DIGITALE QUALITÄTSSICHERUNG IN DER BETONPRODUKTION
DIE SIKA-SAND-APP

Der Durchschnitts-Beton in der Schweiz:

Gesteinskörnung
~ 1‘800-1‘990 kg/m³

Zement
~ 280-330 kg/m³

Wasser
~ 150-180 kg/m³

Zusatzstoffe
~ 10-50 kg/m³

Zusatzmittel
~ 2-5 kg/m³

BUILDING TRUST

DIGITALE QUALITÄTSSICHERUNG IN DER BETONPRODUKTION
DIE SIKA-SAND-APP

- Die Gesteinskörnung macht rund 70-80 M-% des Betons aus
- Viele Frisch- und Festbetoneigenschaften hängen davon ab:
  - Verarbeitbarkeit
  - Mechanische Eigenschaften
  - Schwinden und Kriechen
  - Dauerhaftigkeit und Porosität
- Da die Eigenschaften der Gesteinskörnungen als Naturprodukt oder mineralischer Rückbau grösseren Schwankungen unterliegen, ist eine besonders sorgfältige Auswahl und Überwachung erforderlich
- Insbesondere bei Betonsorten mit niedrigem Bindemittelgehalt ist eine gut abgestufte Siebkurve essenziell
- Die frühzeitige Erkennung von Abweichungen erleichtert die Betonproduktion

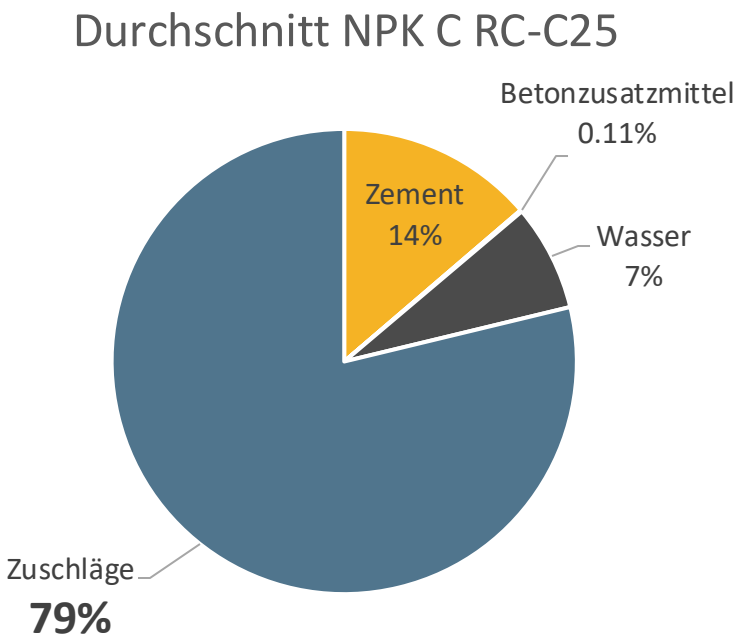


Abbildung10: Verteilung der Massenprozent pro m3 Beton

BUILDING TRUST

SIKA-SAND-APP
DIE DIGITALE SIEBKURVE

- Steigern der Prüfhäufigkeit der Zuschläge ohne erhöhten Aufwand
- Jedes Smartphone wird zu einem Analysewerkzeug
- Mit nur 3 Bildern erhält man eine vollständige Siebanalyse deren Qualität mit Trockensiebungen vergleichbar ist
- Funktioniert mit allen Fraktionen:
  0/4, 4/8, 8/16, 16/32
- Eine vollständige Siebanalyse dauert nur mehr rund 5 Minuten

BUILDING TRUST

Labortisch
3
Kapelle
2
Sika

SIKA-SAND-APP
DIE DIGITALE SIEBKURVE

- Die Sand-App kann die Kornform analysieren
- Sie erstellt eine Kennziffer für das Verhältnis von gebrochenen zu gerundeten Gesteinskörnungen
- Mit diesen Angaben lassen sich die Sieblinie und das Rezept des Betons weiter optimieren
- Die Kornform und insbesondere die Korngrössenverteilung eines Korngemisches bestimmen den **Zementleimbedarf**
- Mehr Zementleim bedeutet z. B. ein grösseres Schwindmass, eine höhere Hydratationswärmeentwicklung, mehr CO_2-Äquivalente pro m^3

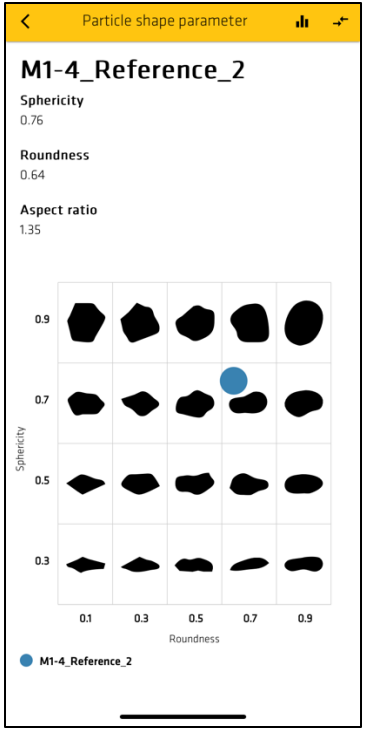


Abbildung11: Ermittlung der Kornform

BUILDING TRUST

SIKA-SAND-APP
DIE DIGITALE SIEBKURVE

- Die App liefert genaue Ergebnisse der Korngrössenverteilung
- Mit der App können zwei verschiedene Siebanalysen direkt miteinander verglichen werden:
  - Aussiebung Gestern vs. Heute
  - Aussiebung Mittelwert vs. Heute
- Abeweichungen werden schneller sichtbar
- **Die Siebkurve wird künftig das Betonrezept in Bezug auf den Bindemittelgehalt und die Verarbeitbarkeit bestimmen**

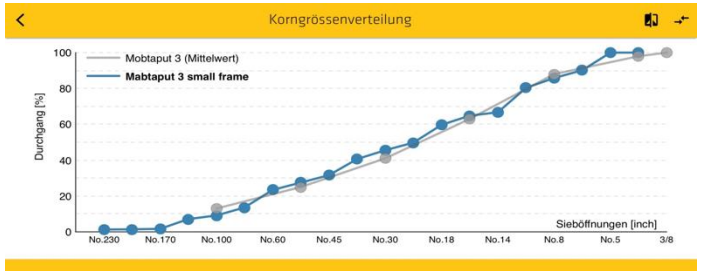


Abbildung12: Vergleich der Sieblinien mit der Sika SandApp

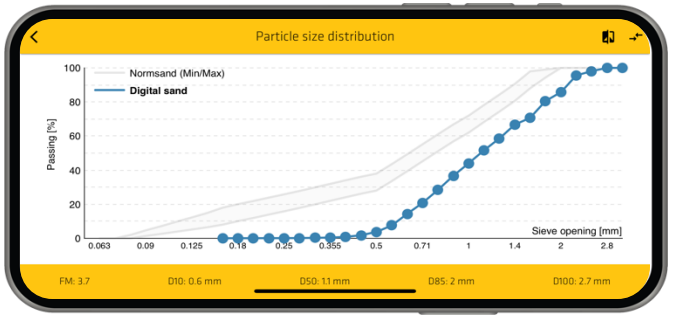


Abbildung13: Vergleich Referenzsieblinien

BUILDING TRUST

Gracias	ευχαριστώ	Danke	Grazie	Hvala	Obrigado	Kiitos	شكراً	谢谢
Thank you	Teşekkürler	متشكرم	Salamat Po	Cám ơn	شكريه	Terima Kasih	Dank u Wel	Tack
நன்றி	Köszönöm	ありがとうございます	ขอบคุณครับ	Mulțumesc				
תודה	多謝晒	дякую	Ďakujem	спасибо				
благодаря	Tak	감사합니다	Děkuji	Dziękuję				

Thank you

BUILDING TRUST

Sika®

VERWEISE UND QUELLEN

1. Benedix, R. (2017). *Bauchemie für das Bachelor-Studium, 3. Auflage*. Leipzig: Springer Vieweg .
2. Gluth, G. J. (2024). *Dauerhaftigkeit von Betonen auf Basis klimafreundlicher Bindemittel*. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM).
3. Greve-Dierfeld, S. M. (2015). *Bemessungsregeln zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit XC-exponierter Stahlbetonbauteile* . München: Technischen Universität München .
4. Jochen Stark, B. W. (2013). *Dauerhaftigkeit von Beton, 2. Auflage*. Weimar: Springer Vieweg.
5. Müller, M., Sowoidnich, T., Lieboldt, M., Kraft, B. I., & Ludwig, H.-M. (2023). *Erhöhung des Carbonatisierungswiderstandes klinkerreduzierter Betone durch alkalische Puffer*. Weimar : Ernst & Sohn GmbH.
6. Neroth, G., & Vollenschaar, D. (2012). *Wendehorst Baustoffkunde 27. Auflage*. Siegen: Vieweg+Teubner Verlag.
7. Pöllabauer, F., Gröll, C., Köck, W., & Flachberger, H. (2024). *Modellbasierte Rohmehlrezeptsteuerung für eine CO2-optimierte Klinkerproduktion*. Leoben: Berg Huettenmaenn Monatsh .
8. Proske, T., Hainer, S., Jakob, M., Garrecht, H., & Graubner, C.-A. (2012). *Stahlbetonbauteile aus klima- und ressourcenschonendem Ökobeton*. Berlin: Ernst & Sohn GmbH .
9. Schweiz, B. (04. November 2024). *Baustoffkreislauf Schweiz* . Von https://alt.fskb.ch/beton/epds/ abgerufen
10. Zilch, K., & Zehetmaier, G. (2010). *Bemessung im konstruktiven Betonbau, 2. Auflage*. München: Springer-Verlag.
11. Zürich, S. (2013). *SIA 262:2013 Betonbau*. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
12. Zürich, S. (2022). *SN EN 206:2013+A2:2021 Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformitat*. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
13. Zürich, S. (2024). *Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Nationaler Anhang ND zur SN EN 206:2013+A2:2021* . Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.