



Supplementary Cementitious Materials (SCM)

Prof. Dr.-Ing. Karl-Christian Thienel
Dipl.-Ing. Nancy Beuntner

Themen



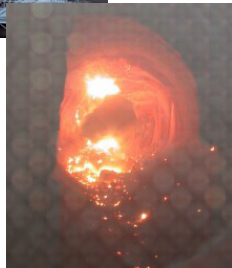
- Einleitung
 - Zement und SCM: ökologische Aspekte
 - Entwicklung der Zementmärkte
 - Entwicklung der Verfügbarkeit an SCM
- SCM im Überblick
- Wirk- und Reaktionsmechanismen
- Einfluss auf die Betoneigenschaften

Ökologische Aspekte



Ca. 600 bis 900 kg CO₂/t Klinker emittiert
($\text{CaCO}_3 \Rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$)

5-7 % der weltweiten CO₂-Emission



Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität  München

Ökologische Aspekte



Möglichkeiten zur CO₂-Senkung:

- ⇒ Steigerung der Energieeffizienz durch Verbesserung der Verfahrenstechnik (z.B. Vorcalcinerer)
- ⇒ Substitution von Primärbrennstoffen (Braun-/Steinkohle) durch alternative Brennstoffe (Altreifen, Tiermehl, Kunststoffabfälle)
- ⇒ Zement mit geringerem Klinkeranteil bzw. erhöhte partielle Substitution durch Zusatzstoffe wie Flugasche

(Quelle: VDZ, Düsseldorf)

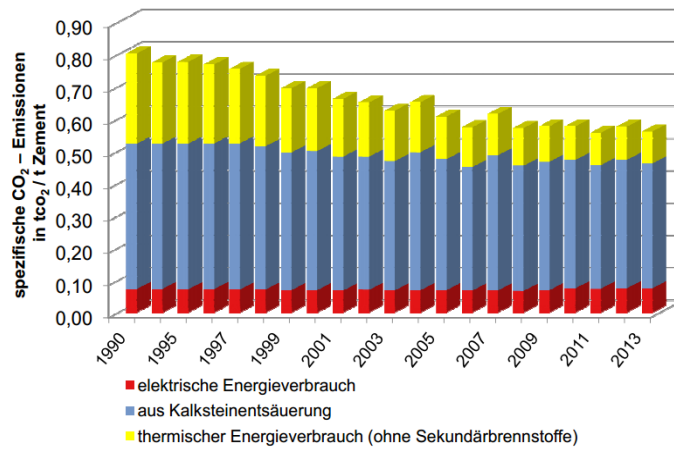
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität  München

Ökologische Aspekte



Spezifische CO₂ – Emissionen der deutsche Zementindustrie

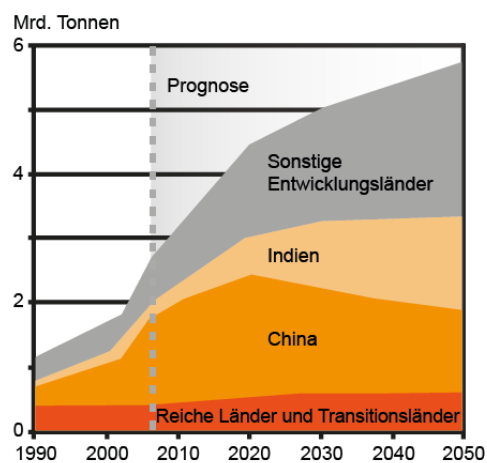


Quelle: VDZ

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Technischen
Universität München

Weltweite Entwicklung der Zementmärkte

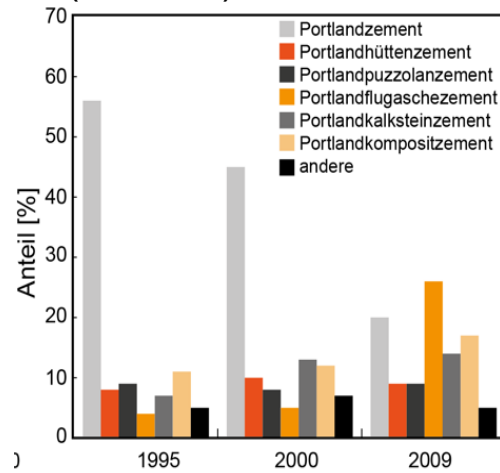


Quelle: Müller NH, J. A: Blueprint for a Climate Friendly Cement Industry – How to Turn Around the Trend of Cement Related Emissions in the Developing World. In: Partnership RptW-LC, editor. Nürnberg 2008. p. 94.

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Technischen
Universität München

Entwicklung der Zementproduktion nach Zementart (weltweit)

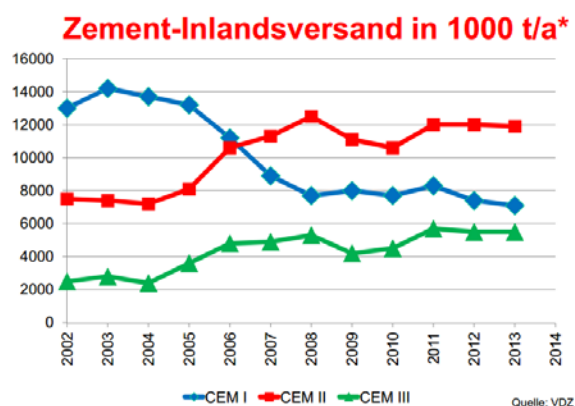


Quelle: Schneider, M., et al., *Sustainable cement production—present and future*. Cement and Concrete Research, 2011. 41(7): p. 642-650.

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

Universität München

Entwicklung der Zementproduktion nach Zementart (in Deutschland)



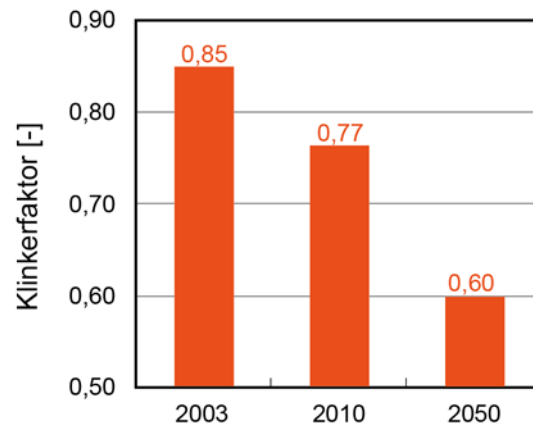
* Verbandsmitglieder des VDZ

Quelle: VDZ, Düsseldorf

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

Universität München

Entwicklung des Klinkerfaktors (weltweit)

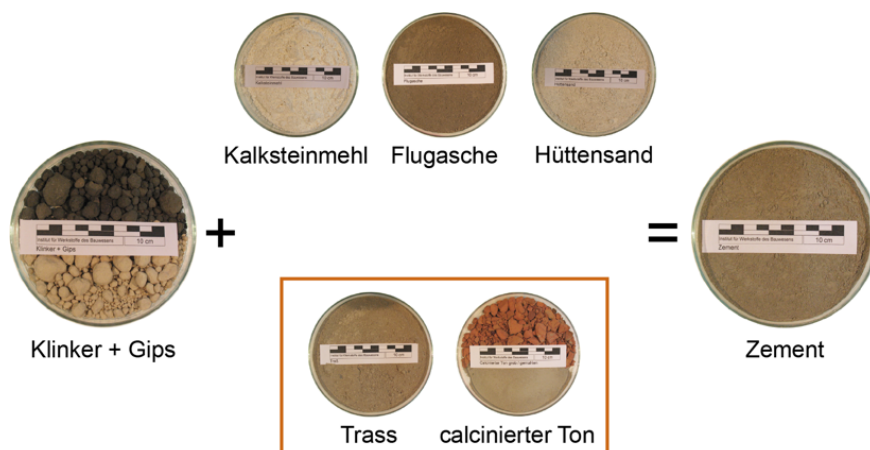


Quelle: Schneider M, Romer M, Tschudin M, Bolio H.: Sustainable cement production—present and future. Cement Concrete Res. 2011;41:642-50.

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

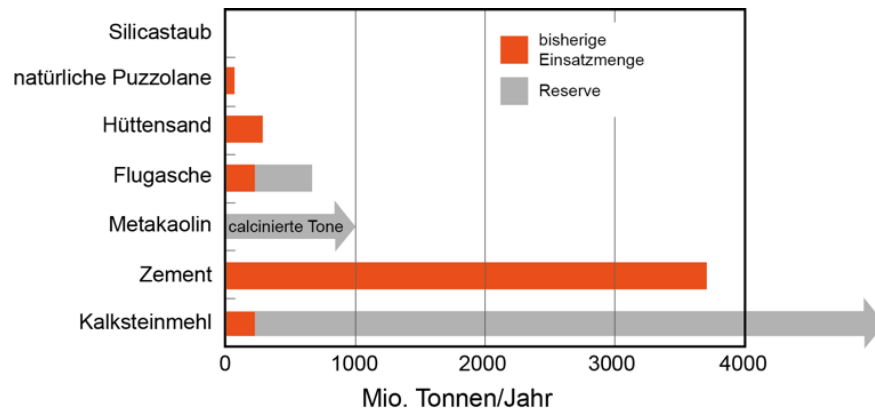
Mögliche Zementersatz- bzw. -zumahlstoffe Supplementary cementitious material (SCM)



Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Verfügbarkeit SCM



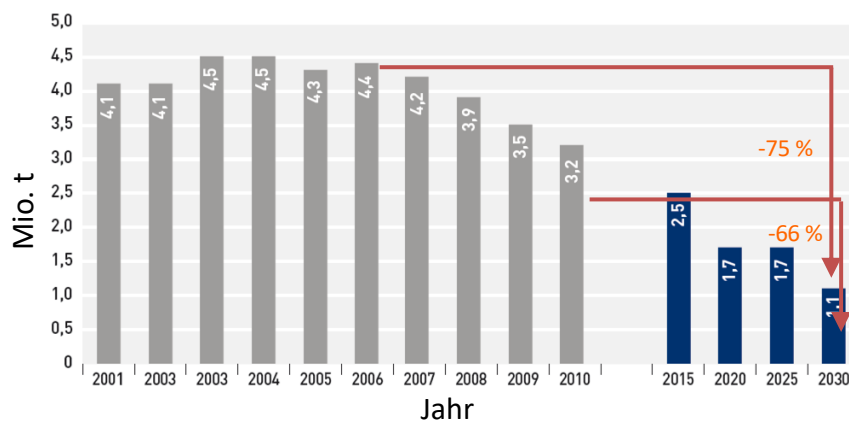
Quelle: Cement Sustainability Initiative (CSI) ECRAE. Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to look ahead. CSI/ECRA-Technology Papers. Düsseldorf, Geneva 2009. p. 99.

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Fokus Flugasche

Produktionsmenge an Steinkohlenflugasche



Quelle: Schwarzkopf, F. et al.: Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2030 in Deutschland - Kurzfassung

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Fokus Hüttensand



- ca. 6 Mio t/ Jahr (Stand 2014) in der Zementindustrie eingesetzt
- Verfügbarkeit:
 - abhängig von Stahlkonjunktur
 - unterliegt erheblichen Schwankungen
 - „ Erhöhung scheint kaum möglich,...., Versorgung mit Hüttensand aus deutscher Produktion wird tendenziell zurückgehen.....“

(Quelle: Bringezu, S., M. Ritthoff, S. Steger and B. Bahn-Walkowiak (2015). Rohstoffversorgung und Ressourcenproduktivität in der deutschen Zementindustrie. Wuppertal, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH: 56.)

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Fokus Kalksteinmehl

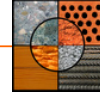


- unbegrenzte Verfügbarkeit
- Dauerhaftigkeit von Beton (v.a. Frostangriff) bei hohen Substitutionsraten limitierender Faktor,
- Aber: Synergien mit SCM, wie calcinierten Tonen nutzen!

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Erstes Fazit



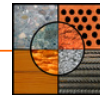
Bedarf an SCM in 2050 für die prognostizierten Zementbedarfsmengen:

1,2 Millionen Tonnen SCM /Jahr

⇒ komplexe anspruchsvolle ternäre Systeme aus Zementklinker + Kombination von Ersatzstoffen

Institut für Werkstoffe des Bauwesens
der Bundeswehr
Universität München

Wirkmechanismen



Physikalischer Wirkmechanismus

Chemischer Wirkmechanismus

Verdünnungseffekt

Füllereffekt

puzzolane Reaktion

- physikalischer Zwickelfüller
 - heterogene Keimbildungsoberflächen
 - Beschleunigung der Zementhydratation
- Bildung von C-S-H-Phasen und AFm-Phasen

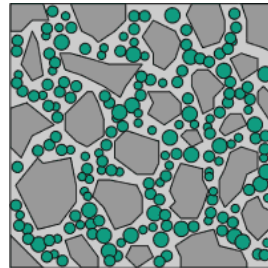
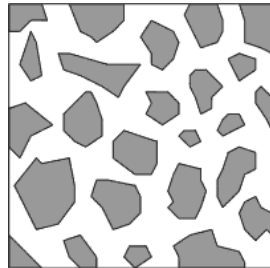


Änderung Hydratphasenstruktur und -verbund

Institut für Werkstoffe des Bauwesens
der Bundeswehr
Universität München

Wirkmechanismen

Füller-Effekt



Calcinierte Tone als feinkörnige mineralische Feinststoffe, welche die Korngrößenabstufung der Feststoffpartikel verbessern.



Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Wirkmechanismen

Füller-Effekt



Zwei prinzipielle Mechanismen bei $w/f_{\text{const.}}$:

- 1) zusätzlicher Raum für Hydratationsprodukte des Klinkers (Wasser/Klinker-Faktor $\uparrow$)
- 2) Verbesserte Keimbildung auf Oberflächen von SCM

[Lit: Lothenbach et.al. CCR 41 (2011), 217-229]

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Reaktions- und Wirkmechanismen



Bezeichnung	Chem. Reaktion	Wirkung	Zusatzstoffart
inert	Keine oder höchstens Oberflächenreaktion	Füllereffekt, verbessert Verarbeitbarkeit, geringere Festigkeit	Kalksteinmehl (auch Fasern und Pigmente)
puzzolanisch	Reaktion mit CH und Wasser unter Bildung zementhydratähnlicher Stoffe	Verminderte Porosität und Frühfestigkeit, erhöhte Endfestigkeit und Dauerhaftigkeit, senkt Hydratationswärme	Steinkohlenflugaschen, Silicastaub, natürliche Puzzolane, calcinierte Tone bzw. Tonschiefer
Latent-hydraulisch	In Gegenwart von Anregern (Alkalien, Kalk, Sulfat) und Wasser unter Bildung zementhydratähnlicher Stoffe	Verminderte Porosität und Frühfestigkeit, erhöht Endfestigkeit und Dauerhaftigkeit, senkt Hydratationswärme	Hüttensand
hydraulisch	Reaktion mit Wasser unter Bildung zementhydratähnlicher Stoffe	Verbessert Verarbeitbarkeit, Füllereffekt, vermindert Porosität	Hydraulische Kalke

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Technischen Universität München

Überblick SCM Eigenschaften

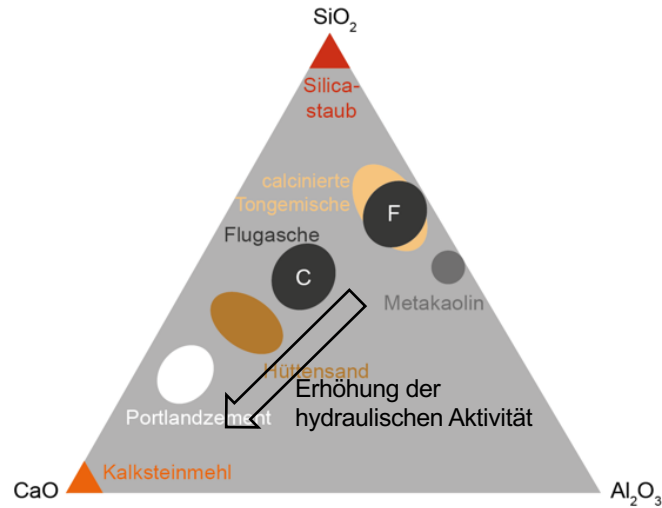


	Kieselsäurereiche Flugasche (V)	Kalkreiche Flugasche (W)	Hüttensand	Silicastaub	Calcinierte Tone	Metakaolin
[%]						
SiO ₂	52	35	35	90	54	53
Al ₂ O ₃	23	18	12	0,4	22	43
Fe ₂ O ₃	11	6	1	0,4	9	0,5
CaO	5	21	40	1,6	4	0,1
SO ₃	0,8	4,1	2	0,4	2	0,1
N _{eq.}	2,2	6,3	0,6	1,9	3,0	0,3
BET [m ² /g]	1,3	1,3	1,2	20	5	15
ρ _{rein} [g/cm ³]	2,38	2,65	2,94	2,40	2,60	2,40

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Technischen Universität München

Abgrenzung zwischen SCMs



Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Fokus Calciniertes Ton



Weltweit im Fokus:

Calcinierte Tone

Im ersten Verständnis Metakaolin

Wo liegen die Unterschiede?

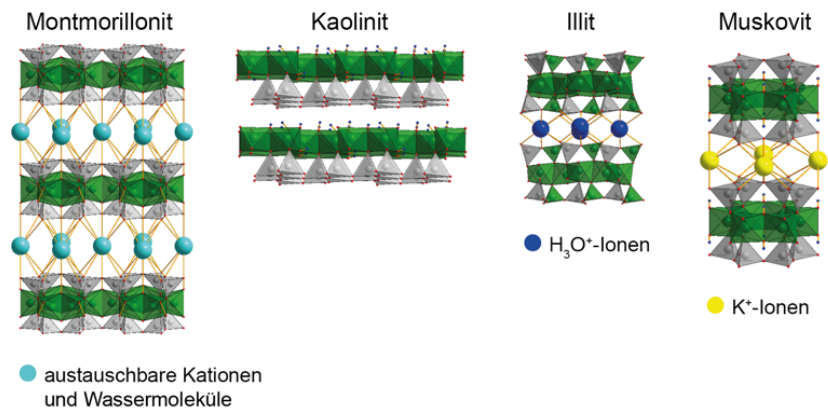
⇒ Exkurs in Mineralogie der Schichtsilikate

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Tonmineralogie

Struktur Schichtsilikate



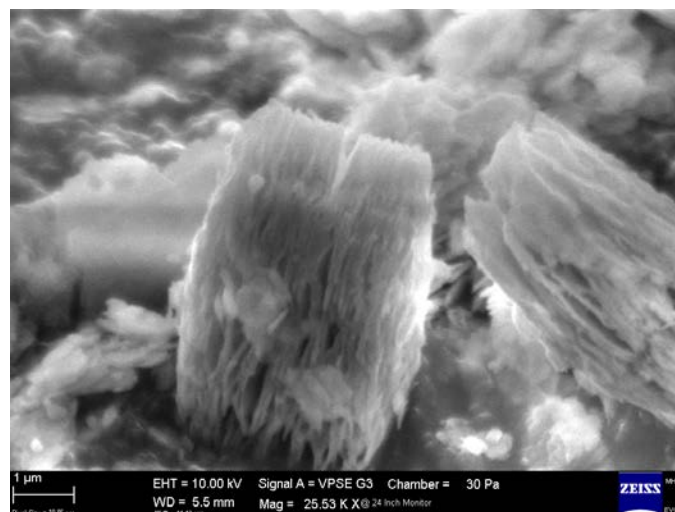
Quelle: Bergaya F., Theng B.K.G., Lagaly G., Brigatti M.F., Galan E., Schoonheydt R.A., et al. Handbook of Clay Science. First ed: Elsevier, 2006. 1225 p.

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Tonmineralogie

REM Aufnahme von Metakaolin



Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Thermische Aktivierung

Calcinierungsprozess: Drehrohröfen



Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Thermische Aktivierung

Calcinierungsprozess: Flash-Calcinierung



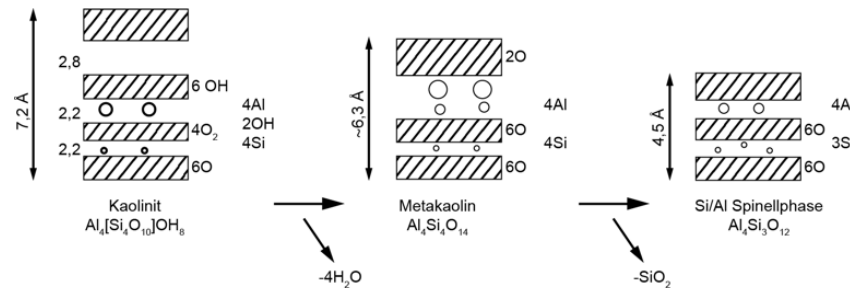
<http://www.mcg-luftbild.de/fotos/industrie>
http://perso.mines-albi.fr/~salvador/html/research_pages/malet.html

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Thermische Aktivierung der Tone

Strukturänderungen beim Calcinieren



Effekt der optimalen Calcinierungstemperatur:
hohe Löslichkeit von Al/Si-Ionen im Alkalischen
geringere spezifische Oberflächen

Quelle:

Garcia-Diaz E. Reactivite pouzzolanique des metakaolinites: Correlations avec les caracteristiques mineralogitologiques des kaolinites [These]: Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne; 1995.

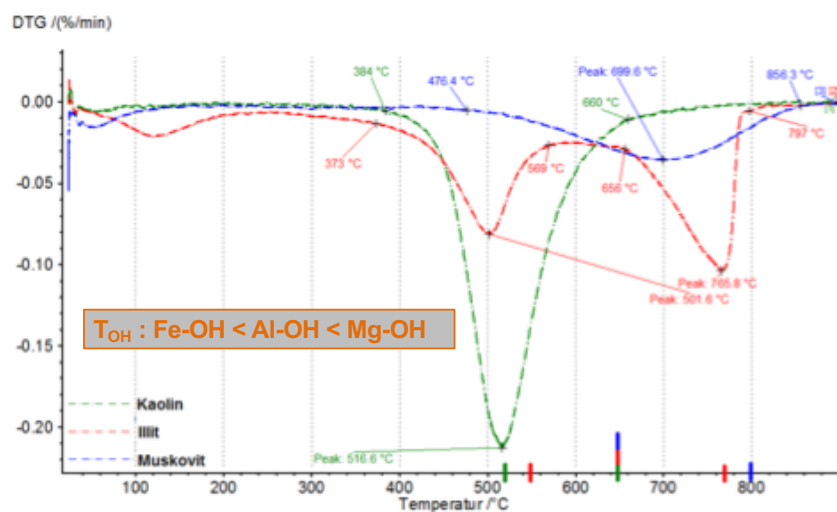
Brindley GW, Nakahira M. The Kaolinite-Mullite Reaction Series: II, Metakaolin. J Am Ceram Soc. 1959;42:314-8.

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

Universität München

Thermische Aktivierung der Tone

Temperaturbereiche



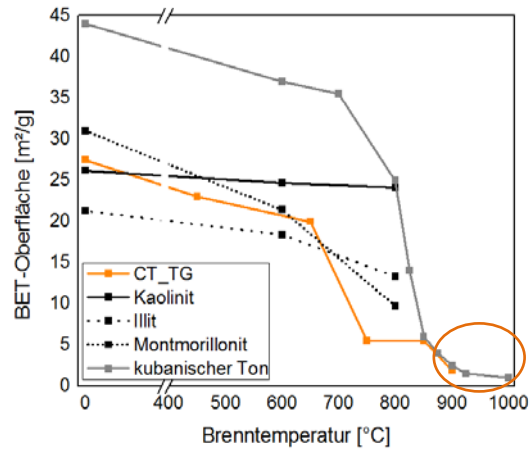
$T_{OH} : Fe-OH < Al-OH < Mg-OH$

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

Universität München

Thermische Aktivierung der Tone

Änderungen der spezifischen Oberflächen



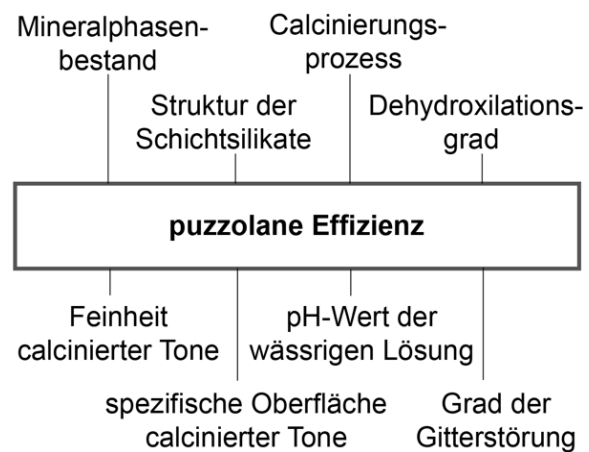
Sinterung: Ton ist „totgebrannt“

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Calcinerte Tone

Einflussfaktoren auf puzzolane Effizienz

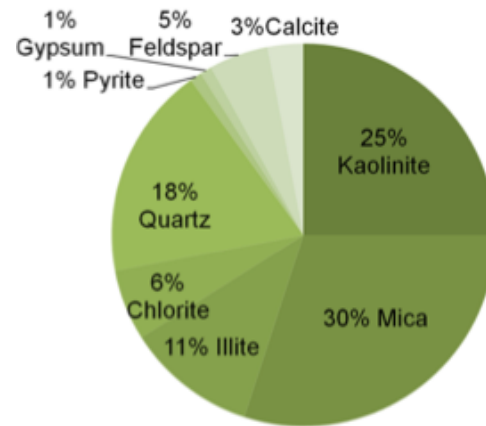


Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Herausforderung: calcinierte Tongemische

Beispiel für Zusammensetzung

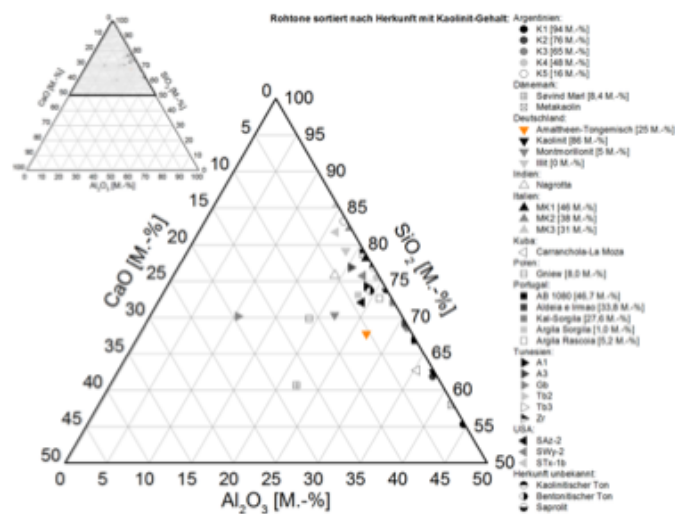


Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Calcinierte Tongemische

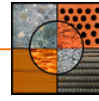
mögliche Zusammensetzung



Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Herausforderung: calcinierte Tongemische



- Kombination von reaktiven Komponenten (Schichtsilikaten) und inerten Stoffen (Quarz, Feldspäte....)
- Hauptparameter: Kaolingehalt („aluminum agent“)
 $\Rightarrow$ „Mehr ist **nicht** automatisch besser“

Zusammensetzung von „attraktiven“ Tongemischen weltweit:

Anteil an Schichtsilikaten (nicht nur Kaolinit!) > 50 M.-%
 + Quarz + Feldspäte
 mit oxidischem Verhältnis Si/Al = 1,5 bis 2,0

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
 Universität  München

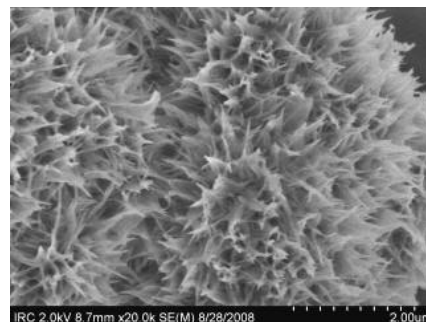
Reaktionsmechanismen

Puzzolane Reaktion



Klassisch für siliciumreiche Zusatzstoffe:

- $S + CH + H \Rightarrow C-S-H$



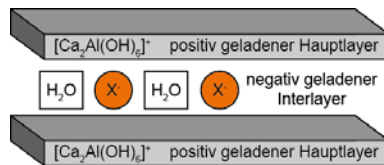
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
 Universität  München

Reaktionsmechanismen

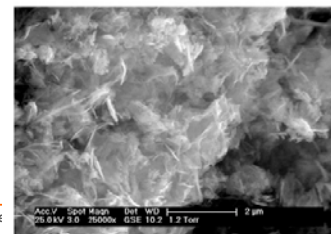
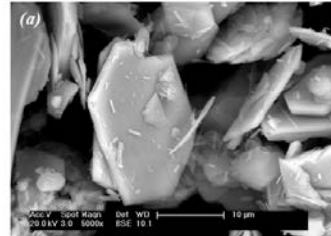
Rolle des Aluminiums

- Al in C-S-H-Phasen: C-A-S-H
- AFm-Phasen



X: CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Alumosilikaten
 $[\text{Al}_2\text{Si}(\text{OH})_8]^-$, Cl^-

Bildung von Strätlingit C_2ASH_8



Institut für Werkstoffe des Bauwesens
 der Bundeswehr
 Universität München

AFm-Phasen

- Tafeliger, lamellarer Habitus
- Starke Kohäsion zwischen Layern
- Hohe Wasserbindung (bspw.: AFm-Hc $\text{C}_4\text{A}_{0,5}\text{H}_{12}$)

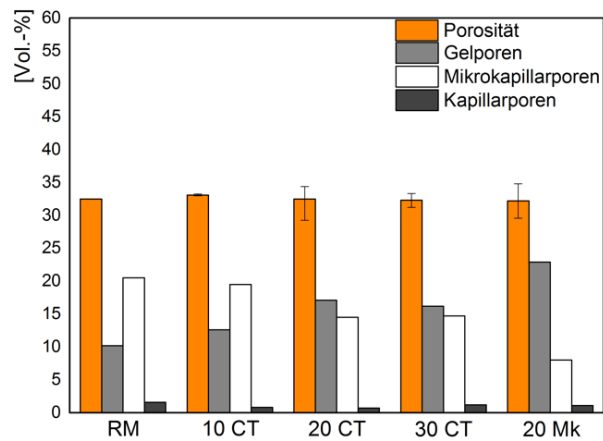
Eigenschaften der AFm-Phasen:

- ❖ Durch Einbau von Cl^- wird FTSW verbessert!
- ❖ Hohe Volumenstabilität: wenig sensibel gegenüber Schwankungen der Temperatur und Feuchtigkeit; mehr Stabilität gegenüber Schwinden
- ❖ Festigkeitssteigernd im Zementstein
- ❖ Stabilisiert AFt-Phase (beachte bei inneren Sulfatangriff!)

Institut für Werkstoffe des Bauwesens
 der Bundeswehr
 Universität München

Wirkmechanismen

Mikrostruktur



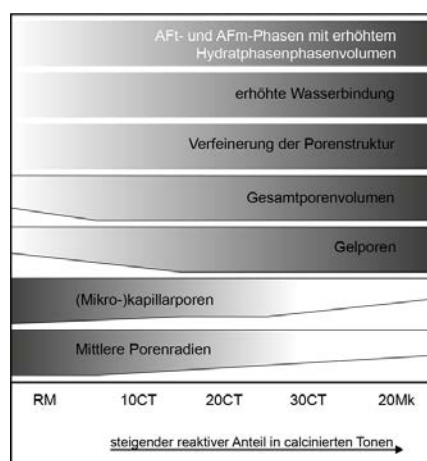
Porositätskennwerte am Zementstein nach 90 Tagen Hydratation

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Wirkmechanismen

Veränderungen im Porengefüge



Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Betontechnologie



Mit der Zugabe von SCM können die Gebrauchs- und Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen **gezielt** eingestellt werden!



Institut für Werkstoffe des Bauwesens
der Bundeswehr
Universität  München

Betontechnologie

Physikalische Kennwerte (beispielhaft)



	Zement CEM I 42,5 R	Calciniertes Tongemisch	Metakaolin
Reindichte [g/cm ³]	3,1	2,6	2,4
S _{BET} [m ² /g]	1,1	5,3	15
WA (nach Puntke) [%]	28	39	70
d ₅₀ [µm]	16	12	6

Institut für Werkstoffe des Bauwesens
der Bundeswehr
Universität  München

Frischbetoneigenschaften



	Fly ash		Slag cement	Silica fume	Natural pozzolans		
	Class F	Class C			Calcined shale	Calcined clay	Metakaolin
Water demand	↓	↓	↓	↑	↔	↔	↑
Workability	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↓
Bleeding and segregation	↓	↓	↔	↓	↔	↔	↓
Setting time	↑	↔	↑	↔	↔	↔	↔
Air content	↓	↓	↔	↓	↔	↔	↓
Heat of hydration	↓	↔	↓	↔	↓	↓	↔

Key: ↓ Lowers ↑ Increases ↔ May increase or lower ↔ No impact

* The properties will change dependant on the material composition and dosage and other mixture parameters. Adapted from Thomas and Wilson (2002).

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

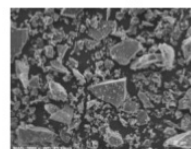
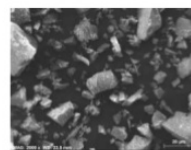
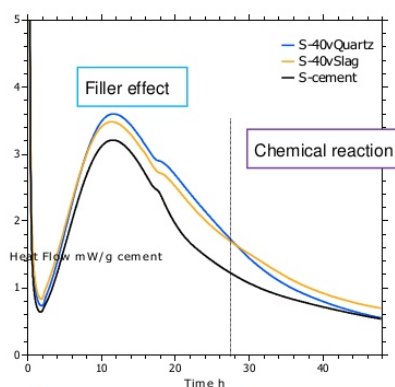
der Bundeswehr
Universität München

Einfluss auf die Zementhydratation

Von Hüttensand und Quarz



For first day only clinker is reacting



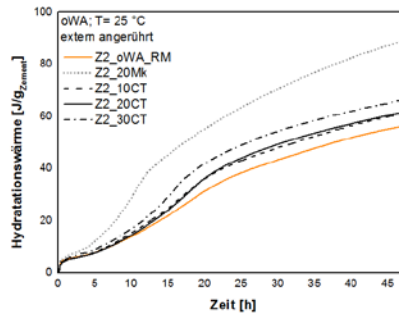
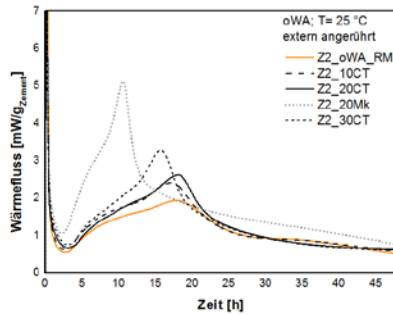
Quelle: Scrivener „Challenge for Concrete“, 2015



Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Einfluss calcinierter Tone auf die Zementhydratation



Beschleunigung!
der Klinkerreaktion
und **eigener Reaktionsbeitrag**

Erhöhung der Hydrationswärme

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Festbetoneigenschaften



	Fly ash		Slag cement	Silica fume	Natural pozzolans		
	Class F	Class C			Calcined shale	Calcined clay	Metakaolin
Early age strength gain	↓	↔	↑	↑	↓	↓	↑
Long term strength gain	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Abrasion resistance	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔
Drying shrinkage and creep	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔
Permeability and absorption	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Corrosion resistance	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Alkali-silica reactivity	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Sulfate resistance	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Freezing and thawing	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔
Deicer scaling resistance	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔

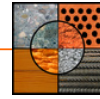
Key: ↓ Lowers ↑ Increases ↔ May increase or lower ↔ No impact ↔ May lower or have no impact

*The properties will change dependant on the material composition, dosage and other mixture parameters. These general trends may not apply to all materials and therefore testing should be performed to verify the impact. Adapted from Thomas and Wilson (2002).

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Betone mit calcinierten Tonen



Vorteile

- Erhöhte Druck- und Biegezugfestigkeit
- Verbesserte Dauerhaftigkeitseigenschaften, wie AKR
- Erhöhter Widerstand gegenüber chemischem Angriff
- Verringerte Permeabilität
- Verringerte Schwindneigung
- Verringerte Ausblühneigung

aber:

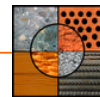
⇒ Substitutionsrate begrenzt auf ca. 10 % an hochreaktiven Metakaolin

⇒ Gründe: Kosten, technologische Aspekte

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Betone mit calcinierten Tonen



Eigenschaften

Verarbeitbarkeit + Dauerhaftigkeit

= limitierende Parameter

⇒ Vorteile Tongemische

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Betone mit calcinierten Tonen

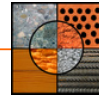
Verarbeitbarkeit

hoher Wasseranspruch aufgrund hoher spezifischer Oberfläche – Interaktion mit Fließmitteln noch nicht geklärt

- Gefahr der Adsorption / Interkalation in die Zwischenschichten von Schichtsilikaten
- Ziel: $BET_{\text{calciniertes Ton}} = 5 - 7 \text{ m}^2/\text{g}$
 $\Rightarrow$ Betone gut verarbeitbar

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

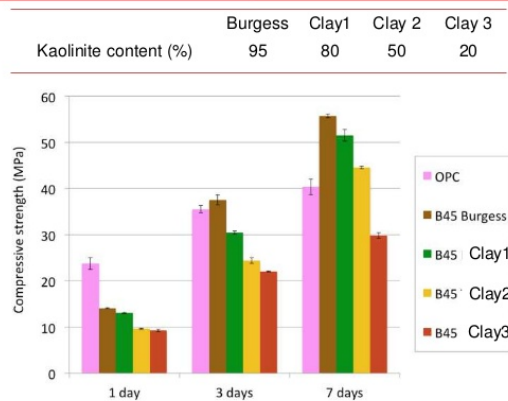
der Bundeswehr
Universität München



Frühfestigkeiten

in Abhängigkeit vom Mk-Anteil

Excellent mechanical properties at young ages



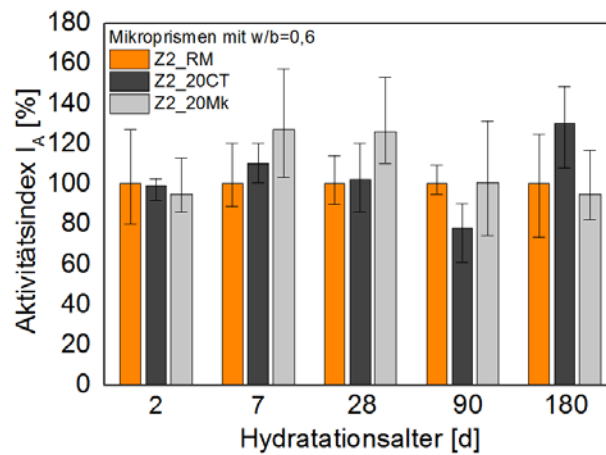
Quelle: Scrivener „Challenge for Concrete“, 2015

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München



Festigkeitsentwicklung

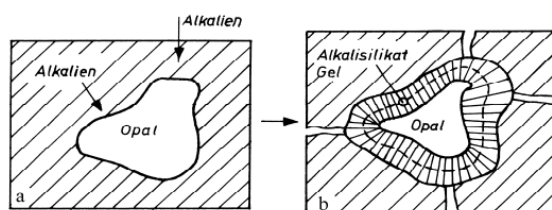


Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Alkali-Silica-Reaktivität

Grundlagen Schädigungsmechanismus



Reaktive Kieselsäure in:
Opal, opalhaltiger
Hornstein, Rhyolit, Porphy,
dichter Flint, Hornstein und
mikrokristalline
Kieselgesteine

Alkaliempfindliche Kieselsäure der Gesteinskörnung
reagiert mit Alkali- und Hydroxid-Ionen der Porenlösung
zu Alkalikieselsäuregel

+ Wasser

⇒ Ausdehnung

⇒ Rissbildung

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

AKR Schäden



Brücken im Bereich Halle / Merseburg, errichtet Mitte der 70er / 80er Jahre (AKR nachgewiesen)

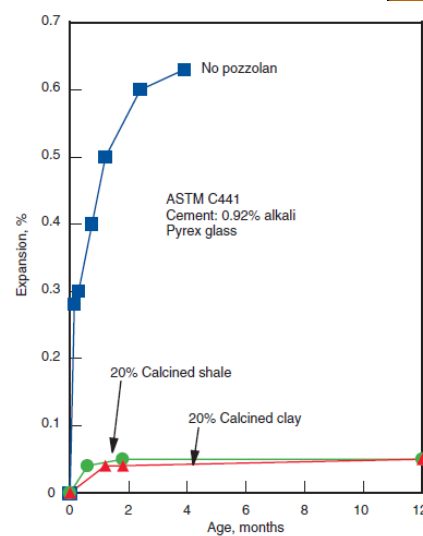
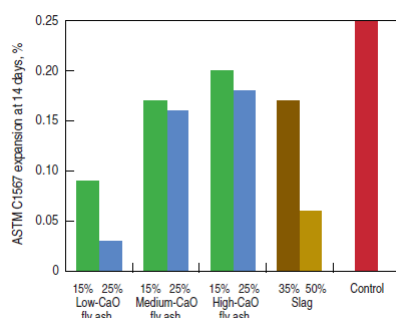
Quelle: Wiens, 2013 Vortrag Jahrestagung DAfStb



Institut für Werkstoffe des Bauwesens

Universität München

Alkali-Silica-Reaktivität



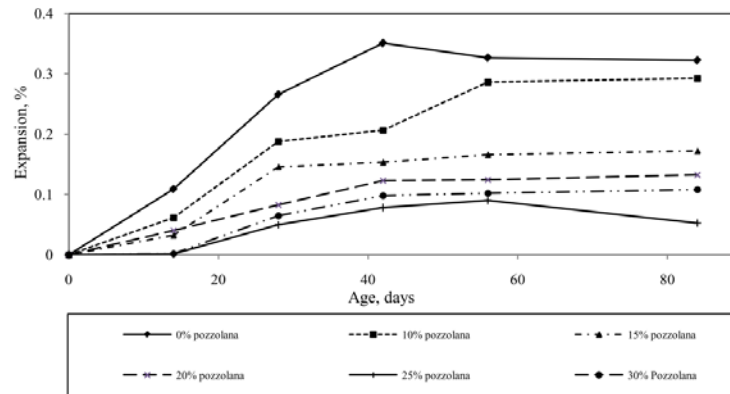
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

Universität München

Widerstandsfähigkeit gegenüber ASR



am Beispiel eines Tongemisches aus Ghana



Sarfo-Ansah, Atiemo et al. 2014

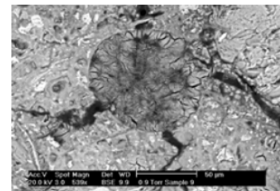
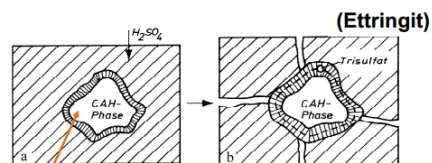
Institut für Werkstoffe des Bauwesens

Universität München

Widerstandsfähigkeit gegenüber Sulfatangriff



Zementpartikel mit
Tricalciumaluminat,
bzw. -
aluminathydrat

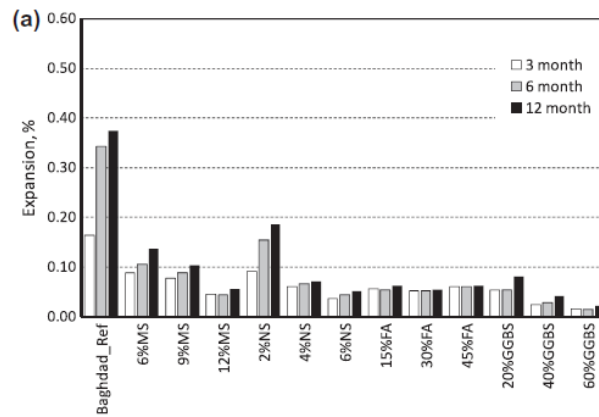


Institut für Werkstoffe des Bauwesens

Universität München

Sulfatangriff

Widerstandsfähigkeit mit Mikrosilica,
Nanosilica, Flugasche und Hüttensand



Quelle: Atahan, Construction and Building Materials 25 (2011) 3450-3457

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

Universität München

Woher könnte der positive Effekt calcinierter Tone stammen?

- Dichtheit des Gefüges bei äußeren Sulfatangriff
- Stabilisierung des Ettringites bei Hydratation durch Bildung Afm – weniger Sulfat in Porenlösung und pH-Wert niedriger

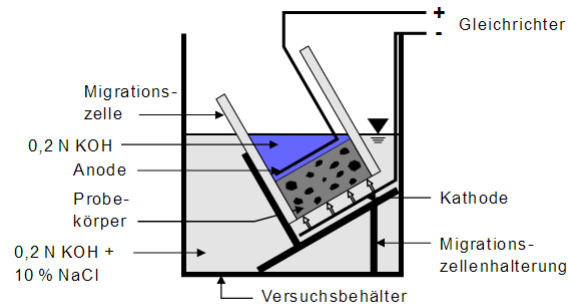
!!!!Trotzdem Vorsicht bei aluminiumreichen SCM!!!!



Institut für Werkstoffe des Bauwesens

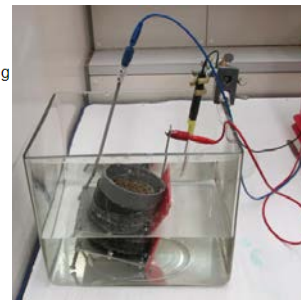
Universität München

Dauerhaftigkeit Chlorideindringwiderstand



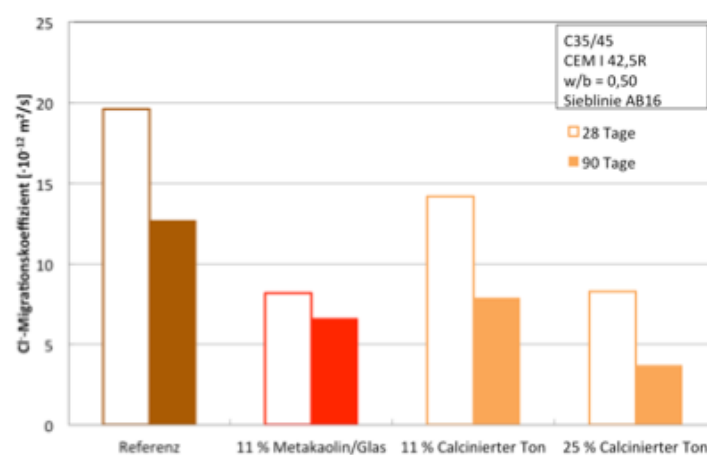
Prinzipskizze des Migrationsapparates

Quelle: BAW-Merkblatt:
Chlorideindringwiderstand von Beton
(MCL), Ausgabe 2012.



Institut für Werkstoffe des Bauwesens
der Bundeswehr
Universität München

Dauerhaftigkeit Chlorideindringwiderstand

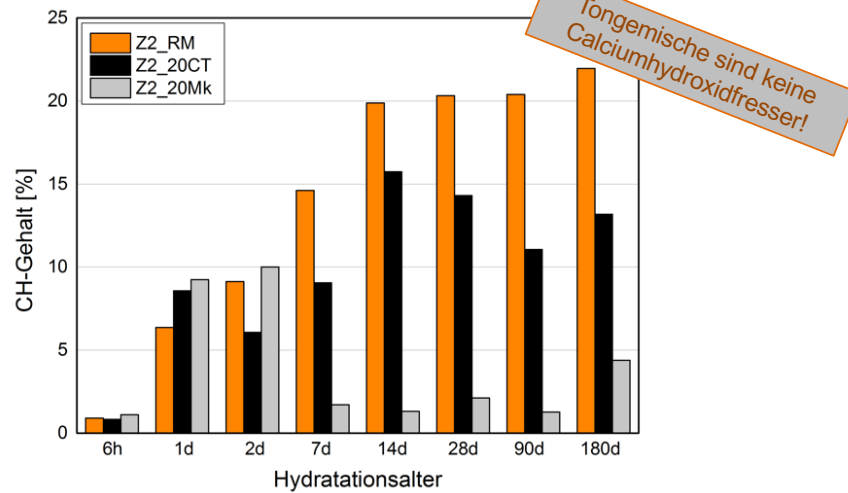


Thienel K.-C., Beuntner N. Ökologisch und technisch verbesserte Betone durch den Einsatz alternativer Zusatzstoffe.
In: Schwarz J., Thienel K.C., editors. Nachhaltigkeit und Innovation; Neubiberg; 2013. p. 58-65.

Institut für Werkstoffe des Bauwesens
der Bundeswehr
Universität München

Betone mit calcinierten Tonen

Calciumhydroxidverbrauch



Quelle: Diss. Beuntner, Universität der Bundeswehr München

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Spritzbeton

Verbesserung ausgewählter Eigenschaften

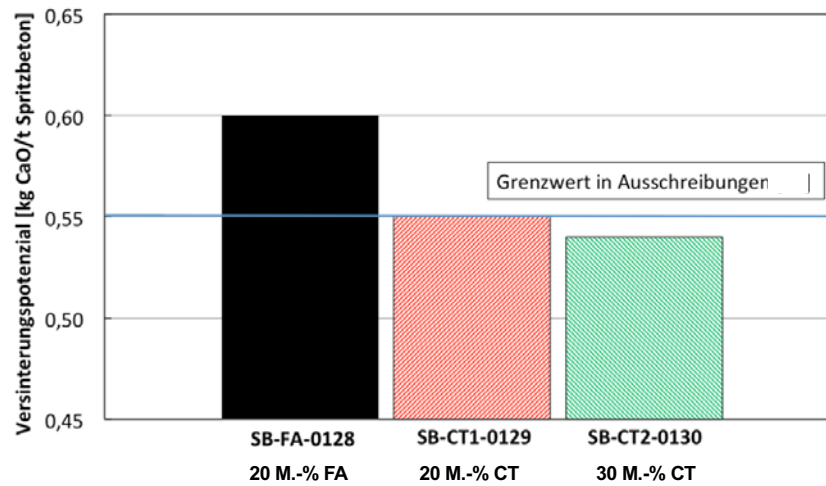


Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Spritzbeton

Bewertung des Versinterungsverhaltens

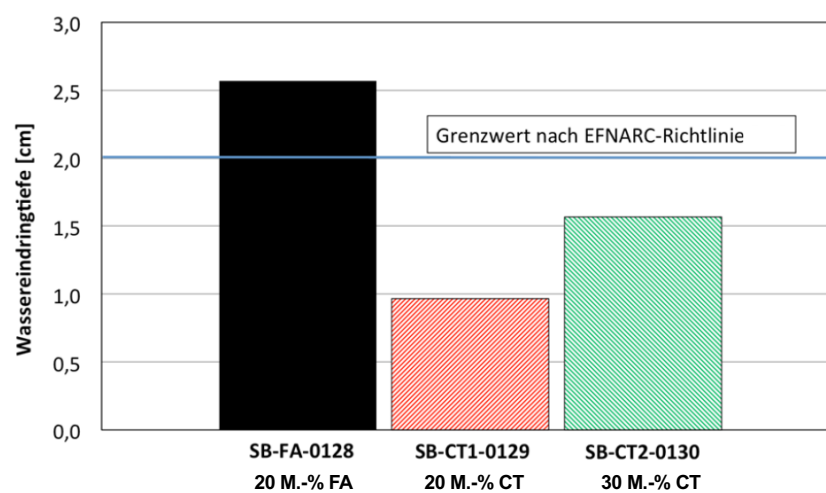


Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Spritzbeton

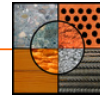
Bewertung der Wassereindringtiefen



Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität München

Rolle von SCM in Zukunft

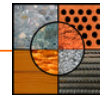


Kombination von Bindemitteln mit hohen
Synergieeffekten zur Herstellung von
nachhaltigen Betonen mit
hoher technischer Leistungsfähigkeit

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität  München

Innovation



„Das Telefon hat zu viele ernsthaft zu bedenkende Mängel für ein Kommunikationsmittel. Das Gerät ist von Natur aus von keinem Wert für uns.“ Manager von Western Union, 1876

„Ich denke, dass es einen Weltmarkt für vielleicht fünf Computer gibt.“
Thomas Watson, IBM-Vorsitzender, 1943

Erstaunlich ist auch Gottlieb Daimlers Misstrauen in den Erfolg der Automobilbranche. *"Die weltweite Nachfrage nach Kraftfahrzeugen wird eine Million nicht überschreiten - allein schon aus Mangel an verfügbaren Chauffeuren"*, meinte er noch 1901.

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

der Bundeswehr
Universität  München