


Materials Science and Technology

**Vorlesung Bautechnologie I
- Baustoffe –
Teil: mineralische Baustoffe**

**2 Beton:
Gesteinskörnungen
Zusatzmittel und Zusatzstoffe
Betoneigenschaften und -korrosion**


3 Mauerwerk

Dr. Frank Winnefeld
Eidgenössische Materialprüfungs- und
Forschungsanstalt
Abteilung Beton/Bauchemie
Überlandstrasse 129
8600 Dübendorf




Beton

Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie


Materials Science and Technology

2

Überblick: wie wird Beton hergestellt ?



Sand und Kies Zement Wasser

Frischbeton Festbeton

Zement-hydration

Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie


Materials Science and Technology

3

Beton: Frischbeton

Durch intensives Vermischen der Betonkomponenten entsteht der **Frischbeton**

- plastische, giessfähige Masse
- beliebig formbar (Schalungen)
- beliebige Abmessungen
- muss verdichtet werden



Beton: Ortbeton

Ortbeton

- erhärtet dort, wo er verbaut wird
- wird als **Transportbeton** mit Mischfahrzeugen auf die Baustelle gebracht oder
- an Ort und Stelle als **Baustellenbeton** gemischt.



Beton: Fertigteilbeton

Fertigteilbeton

- vorfabrizierte Bauelemente
- industriell im Fertigteilwerk oder auf der Baustelle hergestellt
- wird auf der Baustelle in seine endgültige Lage gebracht (z.B. per Kran)



Stahlbeton (I)

Verbundbaustoff: Beton und Stahlbewehrung

- Beton: Zugfestigkeit nur ca. 10% der Druckfestigkeit d.h. ca. 3-5 MPa
- Stahl: hohe Zugfestigkeit 500 MPa

=> Beton nimmt die Druckkräfte, Stahl die Zugkräfte auf
=> thermische Ausdehnungskoeffizienten Stahl \approx Beton
=> Stahl ist im Beton vor Korrosion geschützt (pH ca. 13)

Anwendung:

- biegebeanspruchte flächige Bauteile (z. B. Decken)
- massige Bauteile (z. B. Brückenpfeiler, Stützwände)

Spannbeton: Vorspannung der Stahlbewehrung



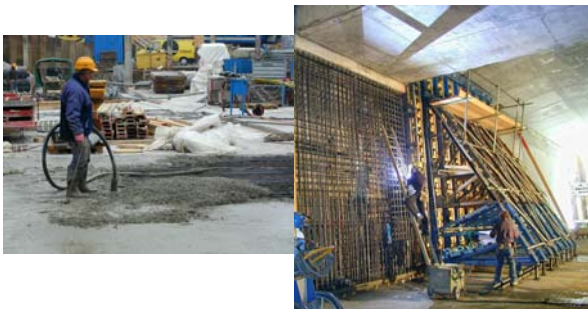
Stahlbeton (II)



Verwendung seit Mitte des 19. Jhd. ausgehend von Frankreich (J.-L. Lambot, J. Monier)



Beton: konventionell vibrierter Beton



Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie



9

Beton: Selbstverdichtender Beton (I)



Laborversuch: Ausbreitmass



Selbstverdichtender Hochleistungsmörtel (Kunststein)

Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie



10

Beton: Selbstverdichtender Beton (II)

Schnell bauen mit selbstverdichtenden Beton

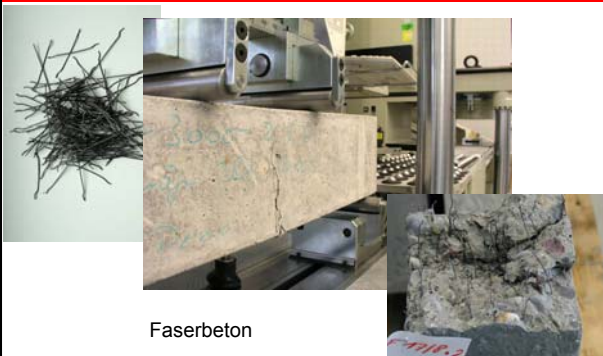
250 m-Hochhaus
Roppongi Hills, Tokyo



M. Danzinger 2002, Sika Japan



Beton: Faserbeton

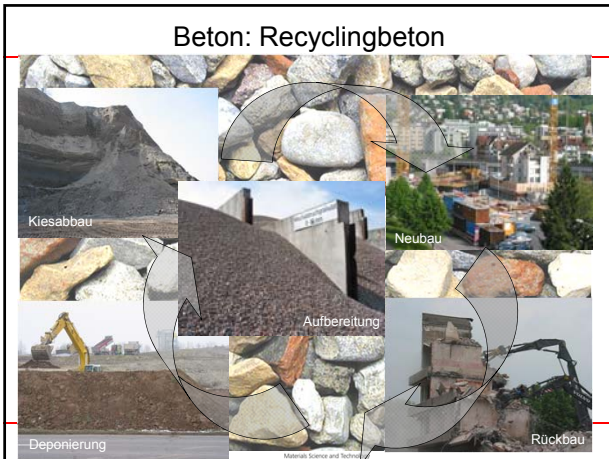


Faserbeton

Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie



12



Beton - Eigenschaften

Beton ...

- ist nach **6 - 8 Stunden** betretbar
- nach **(1) 2 - 3 Tagen** kann die **Schalung abgenommen werden, falls unbelastet**
- erreicht nach **28 Tagen** die **Sollfestigkeit**
- verfestigt sich aber später noch weiter

Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie

Empa
Material Science and Technology

14

Typische Betonrezeptur (konv. Beton)

- **Kies+Sand** 0 – 32 mm 2000 kg pro m³ Beton
- **Portlandzement** 200 – 500 kg pro m³ Beton
- **Wasser** ca. 150 kg pro m³ Beton

=> Wasser/Zement-Wert (W/Z) bestimmt Festigkeit und Porosität (und damit auch die Dauerhaftigkeit) !!!

- Ggf. **Zusatzstoffe**: Kalksteinmehl, Flugasche, Silicastaub u. a. können z. T. auf Zementgehalt angerechnet werden
- Ggf. **Zusatzmittel**: Verflüssiger, Verzögerer, Beschleuniger, Luftporenmittel, Stabilisierer u. a.

=> total Beton 2350 – 2650 kg pro m³
=> d.h. **Beton besteht zu 75 – 85 % aus Kies und Sand!**

Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie

Empa
Material Science and Technology

15

Der Wasser/Zement-Wert (w/z)

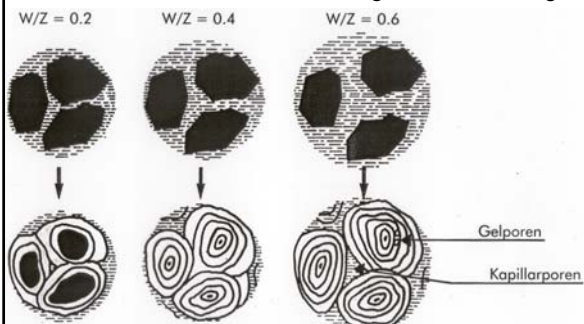
Der w/z-Wert gibt das Mischverhältnis Zement zu Wasser an:

w/z = 0.4 heisst 10 kg Zement
 + 4 kg Wasser
 = 14 kg Zementstein

Typische W/Z-Werte liegen um 0.4.

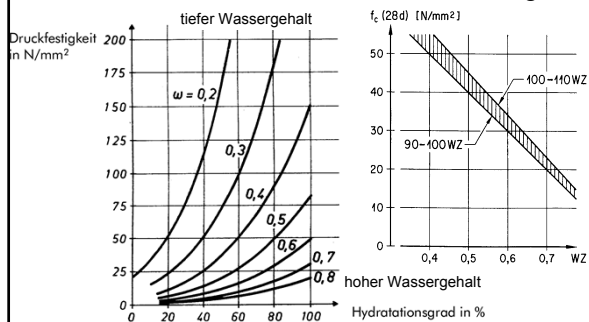
Der W/Z-Wert ist massgebend für die Festigkeit, Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit.

Beton – Einfluss w/z auf Festigkeitsentwicklung



Überschüssiges Zugabewasser hinterlässt Kapillarporenraum
 => Senkung der Festigkeiten mit zunehmendem w/z

Beton – Einfluss w/z und Hydratationsgrad auf die Druckfestigkeit



Beton – Druckfestigkeit

- in einem Normversuch an Zylindern oder Würfeln bestimmte Druckfestigkeiten im Alter von 28 Tagen
- in der Schweiz üblicherweise an Würfeln mit Kantenlänge 150 mm
- fließt direkt in statische Formeln ein (mit Sicherheitsfaktoren)
- charakteristische Festigkeiten!



Beton - Druckfestigkeitsklassen

Druckfestigkeitsklassen

Betonsorte	C8/10...	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50...	C 100/115
$f_{ck,cyl}$ [MPa]	8	20	25	30	35	40	100
$f_{ck,cube}$ [MPa]	10	25	30	37	45	50	115

↑
Druckfestigkeit

Üblicher Hochbaubeton (points to C25/30)

Üblicher Beton im Brückenbau (points to C30/37)

Beton – Expositionsklassen

Klassenbezeichnung	Beschreibung der Umgebung	Beispiele für die Zuordnung von Expositionsklassen (Informant)	Klassenbezeichnung	Beschreibung der Umgebung	Beispiele für die Zuordnung von Expositionsklassen (Informant)
1 Keine Korrosion- oder Angriffsklasse Für Beton ohne Bewehrung oder angroßten Metall- oder Eisenbestandteilen, ausgenommen Frostangriff mit oder ohne Taueis, oder chemischen Angriff. Für Beton ohne Bewehrung oder angroßten Metall: sehr trocken			4 Korrosion, ausgelöst durch Chloride aus Meerwasser Wenn Beton, die Bewehrung oder andere angroßtes Metall enthält, Chloriden aus Meerwasser oder salzhaltiger Bewehrung ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugewiesen werden: X1: mäßige Weissenbildung, ohne Taueis X2: mäßige Weissenbildung, mit Taueis X3: hohe Weissenbildung, ohne Taueis X4: hohe Weissenbildung, mit Taueis		
X0		Beton in Gebäuden mit sehr geringer Luftfeuchte	X1	mäßige Weissenbildung, ohne Taueis	sehr viele Betonoberflächen, die Regen und Frost ausgesetzt sind
X1	trocken oder ständig feucht	Beton in Gebäuden mit geringer Luftfeuchte Beton, der ständig in Wasser getaucht ist	X2	mäßige Weissenbildung, mit Taueis	sehr viele Betonoberflächen von Straßenbauwerken, die durch häufigen Sprühnebel angegriffen sind
X2	sehr selten trocken	mäßig wasserbenetzte Oberflächen bei Gründungen	X3	hohe Weissenbildung, ohne Taueis	angroßte Betonoberflächen, die Regen und Frost ausgesetzt sind
X3	mäßige Feuchte	Beton in Gebäuden mit mäßiger oder hoher Luftfeuchte Vollflächig überdeckter Beton im Freien	X4	hohe Weissenbildung, mit Taueis	Stützenenden und Brückenpfeilern, die Taueis ausgesetzt sind sehr viele Betonoberflächen, die durch häufigen Sprühnebel und Gießwasser angegriffen sind Betonbauwerken, die Frost ausgesetzt sind
X4	wechselnd feucht und trocken	wasserbenetzte Oberflächen, die nicht der Klasse X02 zuzuordnen sind	6 Chemischer Angriff Wenn Beton übermäßig angroßt durch saure Regen, saure Böden und Grundwasser nach Tabelle 2 ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugewiesen werden. Die Klassifizierung von Meerwasser folgt von gewöhnlichen Ort des Ort, es gilt jedoch die Art der Verbindung des Betons getrennt festzustellen. A1: mäßig, A2: stark, A3: sehr stark A4: sehr stark A5: sehr stark A6: sehr stark A7: sehr stark A8: sehr stark A9: sehr stark A10: sehr stark A11: sehr stark A12: sehr stark A13: sehr stark A14: sehr stark A15: sehr stark A16: sehr stark A17: sehr stark A18: sehr stark A19: sehr stark A20: sehr stark A21: sehr stark A22: sehr stark A23: sehr stark A24: sehr stark A25: sehr stark A26: sehr stark A27: sehr stark A28: sehr stark A29: sehr stark A30: sehr stark A31: sehr stark A32: sehr stark A33: sehr stark A34: sehr stark A35: sehr stark A36: sehr stark A37: sehr stark A38: sehr stark A39: sehr stark A40: sehr stark A41: sehr stark A42: sehr stark A43: sehr stark A44: sehr stark A45: sehr stark A46: sehr stark A47: sehr stark A48: sehr stark A49: sehr stark A50: sehr stark A51: sehr stark A52: sehr stark A53: sehr stark A54: sehr stark A55: sehr stark A56: sehr stark A57: sehr stark A58: sehr stark A59: sehr stark A60: sehr stark A61: sehr stark A62: sehr stark A63: sehr stark A64: sehr stark A65: sehr stark A66: sehr stark A67: sehr stark A68: sehr stark A69: sehr stark A70: sehr stark A71: sehr stark A72: sehr stark A73: sehr stark A74: sehr stark A75: sehr stark A76: sehr stark A77: sehr stark A78: sehr stark A79: sehr stark A80: sehr stark A81: sehr stark A82: sehr stark A83: sehr stark A84: sehr stark A85: sehr stark A86: sehr stark A87: sehr stark A88: sehr stark A89: sehr stark A90: sehr stark A91: sehr stark A92: sehr stark A93: sehr stark A94: sehr stark A95: sehr stark A96: sehr stark A97: sehr stark A98: sehr stark A99: sehr stark A100: sehr stark		
2 Korrosion, ausgelöst durch Chloride, ausgenommen Meerwasser Wenn Beton, die Bewehrung oder andere angroßtes Metall enthält, chloridhaltigen Meerwasser, atmosphärischen Meerwasser oder Meerwasser ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugewiesen werden. A1: mäßig, A2: stark, A3: sehr stark A4: sehr stark A5: sehr stark A6: sehr stark A7: sehr stark A8: sehr stark A9: sehr stark A10: sehr stark A11: sehr stark A12: sehr stark A13: sehr stark A14: sehr stark A15: sehr stark A16: sehr stark A17: sehr stark A18: sehr stark A19: sehr stark A20: sehr stark A21: sehr stark A22: sehr stark A23: sehr stark A24: sehr stark A25: sehr stark A26: sehr stark A27: sehr stark A28: sehr stark A29: sehr stark A30: sehr stark A31: sehr stark A32: sehr stark A33: sehr stark A34: sehr stark A35: sehr stark A36: sehr stark A37: sehr stark A38: sehr stark A39: sehr stark A40: sehr stark A41: sehr stark A42: sehr stark A43: sehr stark A44: sehr stark A45: sehr stark A46: sehr stark A47: sehr stark A48: sehr stark A49: sehr stark A50: sehr stark A51: sehr stark A52: sehr stark A53: sehr stark A54: sehr stark A55: sehr stark A56: sehr stark A57: sehr stark A58: sehr stark A59: sehr stark A60: sehr stark A61: sehr stark A62: sehr stark A63: sehr stark A64: sehr stark A65: sehr stark A66: sehr stark A67: sehr stark A68: sehr stark A69: sehr stark A70: sehr stark A71: sehr stark A72: sehr stark A73: sehr stark A74: sehr stark A75: sehr stark A76: sehr stark A77: sehr stark A78: sehr stark A79: sehr stark A80: sehr stark A81: sehr stark A82: sehr stark A83: sehr stark A84: sehr stark A85: sehr stark A86: sehr stark A87: sehr stark A88: sehr stark A89: sehr stark A90: sehr stark A91: sehr stark A92: sehr stark A93: sehr stark A94: sehr stark A95: sehr stark A96: sehr stark A97: sehr stark A98: sehr stark A99: sehr stark A100: sehr stark			3 Korrosion, ausgelöst durch Chloride, ausgenommen Meerwasser Wenn Beton, die Bewehrung oder andere angroßtes Metall enthält, chloridhaltigen Meerwasser, atmosphärischen Meerwasser oder Meerwasser ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugewiesen werden. A1: mäßig, A2: stark, A3: sehr stark A4: sehr stark A5: sehr stark A6: sehr stark A7: sehr stark A8: sehr stark A9: sehr stark A10: sehr stark A11: sehr stark A12: sehr stark A13: sehr stark A14: sehr stark A15: sehr stark A16: sehr stark A17: sehr stark A18: sehr stark A19: sehr stark A20: sehr stark A21: sehr stark A22: sehr stark A23: sehr stark A24: sehr stark A25: sehr stark A26: sehr stark A27: sehr stark A28: sehr stark A29: sehr stark A30: sehr stark A31: sehr stark A32: sehr stark A33: sehr stark A34: sehr stark A35: sehr stark A36: sehr stark A37: sehr stark A38: sehr stark A39: sehr stark A40: sehr stark A41: sehr stark A42: sehr stark A43: sehr stark A44: sehr stark A45: sehr stark A46: sehr stark A47: sehr stark A48: sehr stark A49: sehr stark A50: sehr stark A51: sehr stark A52: sehr stark A53: sehr stark A54: sehr stark A55: sehr stark A56: sehr stark A57: sehr stark A58: sehr stark A59: sehr stark A60: sehr stark A61: sehr stark A62: sehr stark A63: sehr stark A64: sehr stark A65: sehr stark A66: sehr stark A67: sehr stark A68: sehr stark A69: sehr stark A70: sehr stark A71: sehr stark A72: sehr stark A73: sehr stark A74: sehr stark A75: sehr stark A76: sehr stark A77: sehr stark A78: sehr stark A79: sehr stark A80: sehr stark A81: sehr stark A82: sehr stark A83: sehr stark A84: sehr stark A85: sehr stark A86: sehr stark A87: sehr stark A88: sehr stark A89: sehr stark A90: sehr stark A91: sehr stark A92: sehr stark A93: sehr stark A94: sehr stark A95: sehr stark A96: sehr stark A97: sehr stark A98: sehr stark A99: sehr stark A100: sehr stark		
X02	mäßig feucht	Betonbauwerken, die chloridhaltigen Sprühnebel ausgesetzt sind	X0	keine Weissenbildung	Umgebung nach Tabelle 2
X03	sehr selten trocken	Beton, der überfluteten Industriegebäuden ausgesetzt ist	X01	keine Weissenbildung	Umgebung nach Tabelle 2
X04	wechselnd feucht und trocken	Tale von Brücken, die chloridhaltigen Meerwasser ausgesetzt sind; Parkdecks; Holzdecks	X02	mäßige Weissenbildung	Umgebung nach Tabelle 2
			X03	hohe Weissenbildung	Umgebung nach Tabelle 2

Gesteinskörnungen für Beton - Eigenschaften

- Kornfestigkeit
- Frostbeständigkeit
- unerwünschte Stoffe
 - Sulfate (Treibreaktion)
 - weiche Einschlüsse
 - alkalilösliche Bestandteile (Treibreaktion)
 - organische Materialien (Erhärtungsstörungen Zement)
 - abschlämmbare Bestandteile < 0.063 mm (Frostwiderstand)
- Rezyklierbarkeit

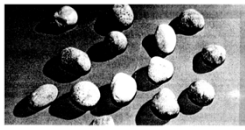
Gesteinskörnungen – Bezeichnungen

Bezeichnung		Korngruppen	
natürlich gerundet und/oder zerkleinert	künstlich zerkleinert, gebrochen, gemahlen	Kleinstkorn mm	Größstkorn mm
Feinstsand	Steinmehl	0.02	0.1 (0.125)
Naturfiller	Filler	0.02	0.1 (0.125)
Feinsand	Brechsand (fein)	0.02	1
Sand	Brechsand	0.02 (0)	4 ev. 3 oder 5
Feinkies	Feinsplitt	4	8
Kies	Splitt	8	32 (31.5)
Grobkies	Schotter	32	63 und mehr

Gesteinskörnungen - Gewinnung



Gesteinskörnungen - Kornform



Runde kugelige Körner aus bestem Zuschlagmaterial



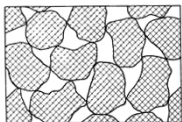
Rundkies mit ungünstigen länglichen und plattigen Kornformen



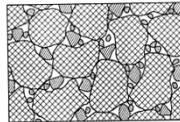
gebrochenes Steinmaterial

← ungünstigere Packungsdichte

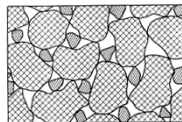
Gesteinskörnungen - Packungsdichte



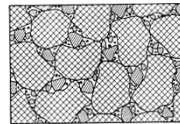
Eine Korngruppe von 16-32 mm weist je nach Packungsdichte zwischen 25 und 50% Hohlräume auf.



Drei Korngruppen (16-32, 8-16, 4-8 mm) führen zu einer weiteren Reduktion des Hohlraumvolumens.

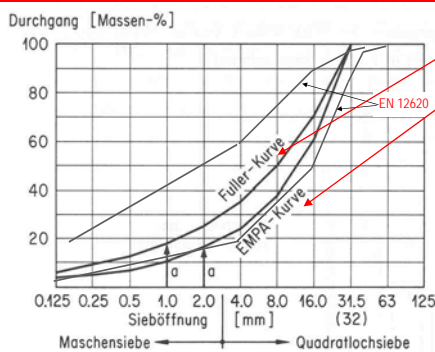


Zwei Korngruppen (16-32, 8-16 mm) vermögen das Hohlraumvolumen bereits zu reduzieren.



Vier und mehr Korngruppen (16-32, 8-16, 4-8, 0-4 mm) und ev. die Beigabe von mehlfineinen Stoffen ergeben ein hohlraumarmes Korngerüst.

Gesteinskörnungen - Sieblinie



$$a = 100 \cdot \sqrt{\frac{d}{D}}$$

$$a = 50 \cdot \left(\frac{d}{D} + \sqrt{\frac{d}{D}} \right)$$



Zusatzstoffe Zusatzmittel

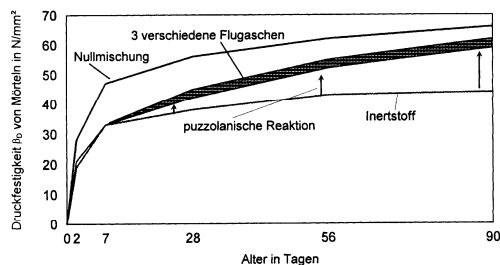
Zusatzstoffe - Überblick

- Kalksteinmehl
- Flugasche
- Silicastaub
- Gebrannter Ton
- Hüttensand
-

=> Beeinflussen Verarbeitbarkeit, Festigkeitsentwicklung,
Schwinden, Hydratationswärme des Betons
=> Siehe Zement

Manche Zusatzstoffe können mit einem gewissen
Faktor auf den Zementgehalt angerechnet werden
(k-Wert – Konzept), z. B. Flugasche mit k-Wert von 0.40

Zusatzstoffe – Einfluss auf Betonfestigkeit



33 Vol.-% des Zementes durch 3 verschiedene SFA bzw. durch Inertmaterial (Quarzmehl) ersetzt

Betonzusatzmittel - Überblick

- gezielte Verbesserungen der Eigenschaften von Mörteln und Betonen
- keine Korrekturmittel, die eine mangelhafte Zusammensetzung oder fehlerhafte Mischung eines Mörtels oder Betons ausgleichen
- Zugabemenge:
 - Zusatzstoffe: ≥ 50 g bzw. cm^3 je kg Bindemittel
 - Zusatzmittel: ≤ 50 g bzw. cm^3 je kg Bindemittel
- Zusatzmittel dienen der Beeinflussung des Zementhydratationsprozesses und der Frisch- bzw. Festbetoneigenschaften
- Bestimmte Betone (z. B. selbstverdichtender Beton oder hochfester Beton) können nur mit Hilfe von Betonzusatzmitteln hergestellt werden
- in EN 934 genormt, verschiedene Wirkgruppen

Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie



37

Betonzusatzmittel - Wirkgruppen

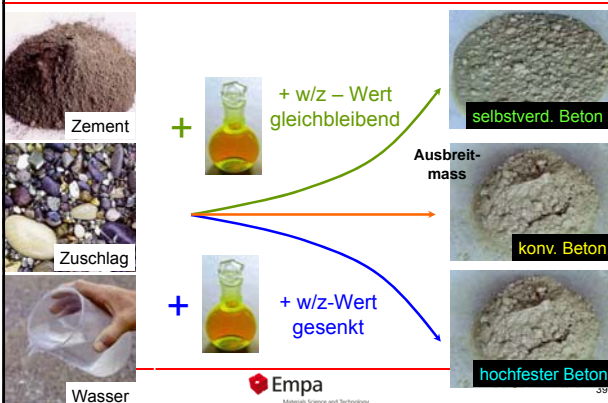
Wirkungsgruppe	Hauptanwendungsbereiche
Beschleuniger	kurze Verarbeitungszeit, Frühfestigkeitserhöhung
Betonverflüssiger	Plastifizierung, Erhöhung von Druckfestigkeit und Dichtigkeit, Verbesserung der Betonoberfläche
Chromatreduzierer	Reduzierung des Chromatgehaltes in zementgebundenen Werkstoffen
Dichtungsmittel	Erhöhung der Dichtigkeit
Einpresshilfen	Quellen im plastischen Zustand, Plastifizierung
Fließmittel	Fließfähigkeit, Frühfestigkeitserhöhung
Luftporenbildner	Plastifizierung, Stabilisierung, Erhöhung des Frost-Tau-Wechsel-Widerstandes
Recyclinghilfen	Wiederverwendung von Frischbeton nach mehrtägiger Lagerung
Stabilisierer	Stabilisierung, Verbesserung der Betonoberfläche
Verzögerer	lange Verarbeitungszeit, Erhöhung von Druckfestigkeit und Dichtigkeit

Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie



38

Betonzusatzmittel – Beispiel Fließmittel (I)

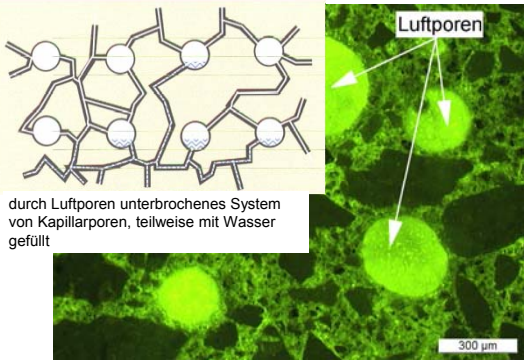


Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie



39

Betonzusatzmittel – Beispiel Luftporenbildner

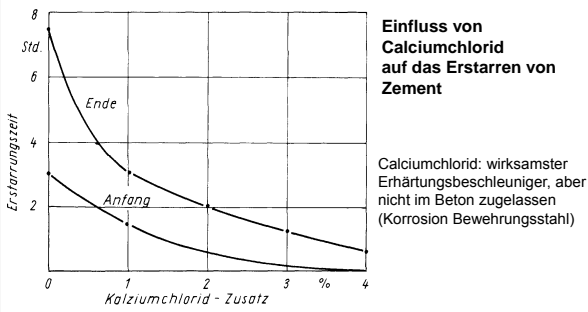


Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie



40

Betonzusatzmittel – Beispiel Beschleuniger



Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie



41

Eigenschaften von Beton

Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie



42

Frischbetoneigenschaften

Frischbetonkontrolle

- Konsistenz
- Rohdichte
- Luftporengehalt
- Wassergehalt
- Temperatur

Verdichtungsmass

Luftporentopf

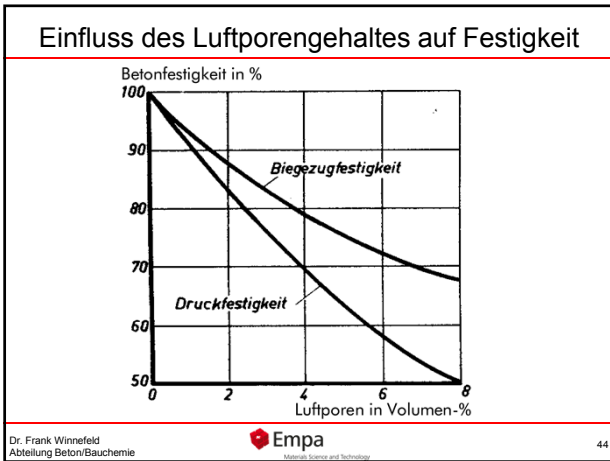
Ausbreitmass

„Schocken“

Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie

Empa
Materials Science and Technology

43



Beton – Bestimmung der Druckfestigkeit

Würfeldruckfestigkeit

- Würfel belasten bis zum Bruch: $f_{cw} = F_{max} / A$
- Materialkonstante, entspricht aber nicht der Realität im Bauwerk
- Breite = Höhe
- Behinderte Querdehnungen

Unverformter Probekörper

Unverformter Probekörper

Verformter Probekörper

Verformter Probekörper

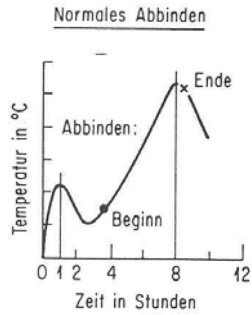
Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie

Empa
Materials Science and Technology

45

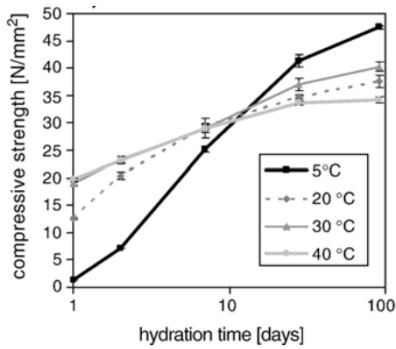
Wärmefreisetzung während der Erhärtung

- Hydratation ist exothermer Vorgang
- Temperaturerhöhung im Beton

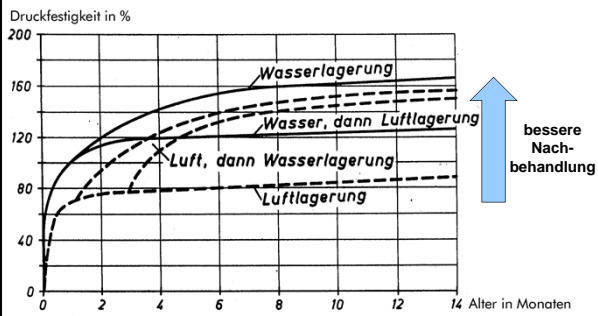


Temperatureinfluss auf Festigkeitsentwicklung

- hohe Temperatur:** hohe Frühfestigkeit, etwas geringere Festigkeit zu späten Zeiten
- tiefe Temperatur:** geringe Frühfestigkeit, etwas höhere Festigkeiten zu späten Zeiten



Beton – Einfluss der Nachbehandlung



relative Druckfestigkeit: 28d Wasserlagerung bei 20°C = 100%

Beton –Nachbehandlung



Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie



49

Schwinden (Längenverkürzung) des Betons

4 Arten des Schwindens bei Beton und Mörtel

Definitionen nach dem Zeitraum des Auftretens oder nach den Ursachen für die Veränderung des Wasserhaushalts:

- Schwinden durch Kapillarkräfte im frischen, noch verarbeitbaren Beton: Kapillarschwinden, **Frühschwinden** oder plastisches Schwinden
- Schwinden des erhärtenden Betons: Schrumpfen oder **Chemisches Schwinden (siehe Zementerhärtung)**
- Schwinden durch Austrocknung des Festbetons: **Trocknungsschwinden**
- **Autogenes Schwinden** (tiefer w/z, Selbst austrocknung)

(Schwinden durch Carbonatisierung: **Carbonatisierungsschwinden**)

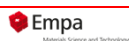


Frühschwindrisse

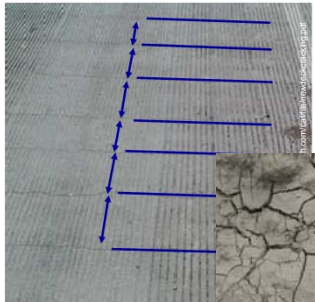


Durchgehende Risse!

Leemann 2008



Trockenschwindrisse



R. Loser, 2008



Trockenschwinden
Lehmboden

Vermeidung von Schwindrissen

Schwindrisse vermeiden durch

- Platten, Balken anstatt grosser Bauteile
- Feuchthalten
- Schutz vor Sonne und Wind
- Dilatationsfugen
- Schwindbewehrung, Fasern

Kriechen

Plastische, irreversible Verformung unter Belastung

- **Dauer des Kriechvorgangs: je nach Feuchtegehalt** feucht bis zu Jahren
- **Kriechzahl φ** = Verhältnis von plastischer (bleibender) ϵ_{bleib} Deformation zu elastischer Deformation ϵ_{el} ,

$$\varphi = \frac{\epsilon_{\text{bleib}}}{\epsilon_{\text{el}}} \quad 1.5 \leq \varphi \leq 4$$

d.h. der Kriecheffekt ist bis zu 4 mal grösser als die elastische Deformation!

Kriechen von Beton - Beispiel



Betonbrücke, Deventer, Niederlande

Korrosion von Beton

Betonkorrosion

Beton ist dauerhaft:

- unter normalen Umweltbedingungen
- in Innenräumen und im Freien

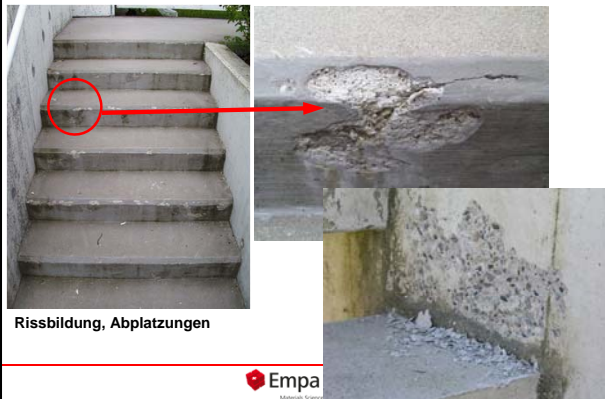
Beweis

- gut erhaltene Betonbauten aus der Römerzeit
- z. B. Pantheon in Rom

Aggressive Bedingungen

- aus der Atmosphäre
- aus wässrigen Lösungen (Wasser, Grundwasser usw.)
können zum chemischen Angriff, zur Betonkorrosion führen
- **Korrosion** - chemische bzw. physikalische Vorgänge
- **Erosion** - mechanische Abtragungsvorgänge

Einwirkung von Frost- und Tauwechselln



Chemische Betonkorrosion - Überblick

Betonprisma:

Lösender Angriff:

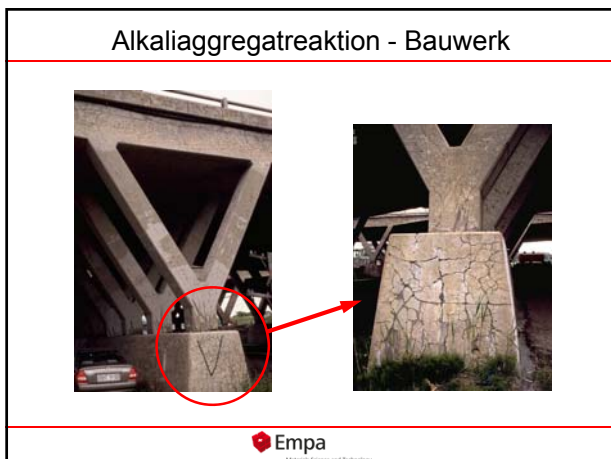
- Säuren
- Laugen
- Weiches Wasser
- ...

Treibender Angriff:

- CO₂ (+ Stahlbewehrung)
- Sulfate
- Alkalien (+ reaktives SiO₂ im Zuschlag)
- ...

Empa
Materials Science and Technology

Alkaliaggregatreaktion - Bauwerk



Sulfattreiben - Bauwerk



Empa
Materials Science and Technology

Carbonatisierung des Betons

Carbonatisierung:

- Beim Abbinden des Zementes entsteht Calciumhydroxid.
- Dieses ist stark alkalisch (pH-Wert = 12) und schützt den Stahl des Stahlbetons vor Korrosion (Passivierung)
- Calciumhydroxid reagiert mit dem Kohlendioxid der Luft zu Calciumcarbonat.
- Calciumcarbonat ist weniger alkalisch (pH-Wert = 9); der Stahl ist nicht mehr vor Korrosion geschützt.
- Die Reaktion geht langsam (Jahre) von der Betonoberfläche ins Innere.
- Erreicht die Carbonatisierungsfront den Stahl, beginnt dieser unter Volumenzunahme zu rosten.

Empa
Materials Science and Technology

Korrosion des Bewehrungsstahls



Empa
Materials Science and Technology

Mauerwerk - Übersicht



Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie



67

Mauerwerk - Trockenmauerwerk



Mykene, Löwentor

Nuraghe,
Sardinien

Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie



68

Mauersteine

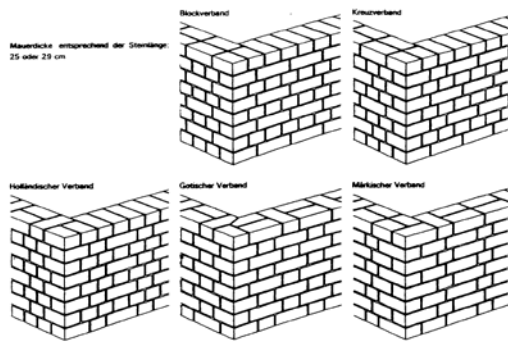
Bausteine von Mauerwerk (genormt in SIA 266)

- Natursteine
- Backsteine (B) / Leichtbacksteine (BL)
- Kalksandsteine (K)
- Zementsteine (C) / Leichtzementsteine (CL)
- Porenbetonsteine (P) / Porenbetonleichtsteine (PL)

Mauersteinart	Steindruckfestigkeit f_{bk}
Backstein	$\geq 28,0 \text{ N/mm}^2$
Leichtbackstein	$\geq 10,0 \text{ N/mm}^2$
Zementstein	$\geq 14,0 \text{ N/mm}^2$
Leichtzementstein	$\geq 2,5 \text{ N/mm}^2$
Kalksandstein	$\geq 22,0 \text{ N/mm}^2$
Porenbetonstein	$\geq 5,0 \text{ N/mm}^2$
Porenbetonleichtstein	$\geq 2,5 \text{ N/mm}^2$

69

Beispiele für Mauerwerksverbände



Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie



70

Anforderungen an Mauersteine nach SIA 266

Mindestanforderungen an die mechanischen Eigenschaften von Standardmauerwerk

Mauerwerksart	MB	MBL	MC	MCL	MK	MP	MPL
f_{sk} [N/mm ²]	7,0	3,2	7,0	1,8	7,0	3,2	1,8
f_{sk} [N/mm ²]	0,15	0,10	0,25	0,10	0,15	0,25	0,15

f_{sk} = charakteristischer Wert der Druckfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge.
 f_{sk} = charakteristischer Wert der Mauerwerksbiegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen

Mindestanforderungen an Mauersteine für Standardmauerwerk

Mauersteinart	B	BL	C	CL	K	P	PL
f_{sk} [N/mm ²]	28,0	10,0	14,0	2,5	22,0	5,0	2,5
f_{sqk} [N/mm ²]	7,0	3,2	7,0	1,8	7,0	—	—

f_{sk} = charakteristischer Wert der Steindruckfestigkeit.
 f_{sqk} = charakteristischer Wert der Steinquerzugfestigkeit

Mindestanforderungen an Mauermortel für Standardmauerwerk

Mauerwerksart	MB	MBL	MC	MCL	MK
f_{mk} [N/mm ²]	15,0	5,0	15,0	5,0	15,0

f_{mk} = charakteristischer Wert der Mörteldruckfestigkeit

Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie



71

Backsteine/Ziegel - Herstellung

- Herstellung aus **gemagertem Lehm** (Ton + Kalk + Sand + ...)
- Lehm wird mit Wasser angemischt,
- durch Formpressen zu einem Strang von geeignetem Querschnitt (Masse, Hohlräume) **extrudiert**
- in Steine geschnitten, getrocknet** und
- schliesslich bei **Temperaturen um 1000° C gebrannt**.
- diese Temperatur liegt knapp unterhalb des Schmelzpunktes der wesentlichsten Bestandteile
- und bewirkt ein **Zusammensintern der Körner** und dadurch eine Verfestigung.

Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie



72

Tonprodukte

Bezeichnung:	Backstein	Klinker	Steingut	Steinzeug	Porzellan
Rohstoff:	magerer Lehm	fettere Lehme; Gehalt an Tonmineralien nimmt zu			reiner Kaolin (Tonmineral)
Brenntemperatur:	ca. 1000 °C	ca. 1100 1450°C Zunahme der Brenntemperaturen			
Dichtigkeit des Gefüges:	Dichtigkeit wird immer grösser ----->				

Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie



73

Vorgänge bei der Backsteinherstellung

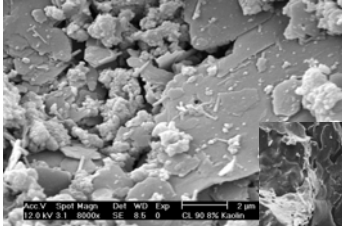
Temperatur °C	Vorgang	Chemische Umsetzung
20 – 200	Abgabe von freiem Wasser (Trocknen der Rohmasse)	
200 – 450	Abgabe von adsorbiertem Wasser	
450 – 600	Tonzersetzung, dabei Bildung von Metakaolinit	$Al_2(OH)_2Si_2O_{10} \rightarrow 2(Al_2O_3 \cdot 2SiO_2) + 4 H_2O$
600 – 950	Metakaolinitzerersetzung, dabei Bildung einer reaktionsfähigen Oxidmischung	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \rightarrow Al_2O_3 + 2SiO_2$
1000 – 1500	Bildung von Mullit, freies SiO ₂ wird zu Christobalit	$3 Al_2O_3 + 2SiO_2 \rightarrow 3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ (3/2-Mullit)

Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie

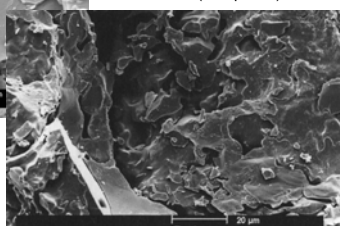


74

Backsteinherstellung mikroskopisch



Gesintertes Produkt (Glasphase)



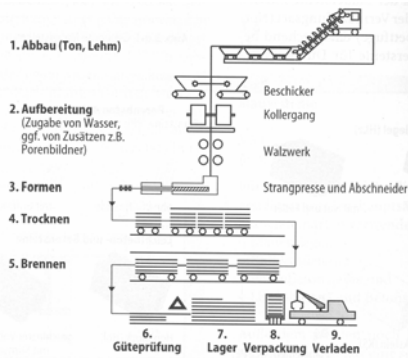
Tonminerale, z. B. Kaolin (plättchenförmige Aluminiumsilicate)

Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie



75

Herstellung von Ziegeln

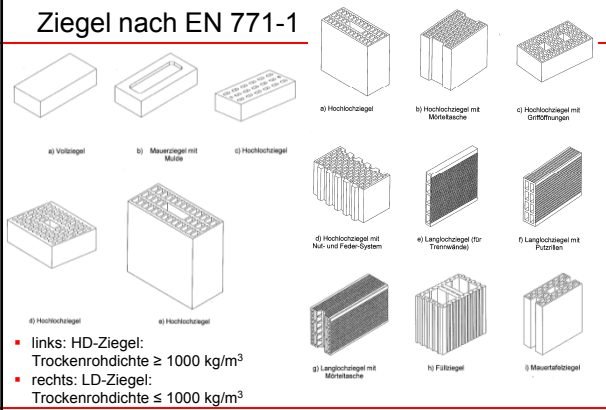


Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie



76

Ziegel nach EN 771-1



Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie



77

Kalksandsteine und Porenbeton

Herstellung Kalksandsteine:

Quarzsand + Bindemittel (gebrannter Kalk + Zement) + Wasser

Autoklav-Härtung

ca. 170-200°C,
8-16 bar Druck

Calciumsilicathydrate (vgl. Zement)

wachsen auf Quarzpartikeln auf
und verzahnen diese

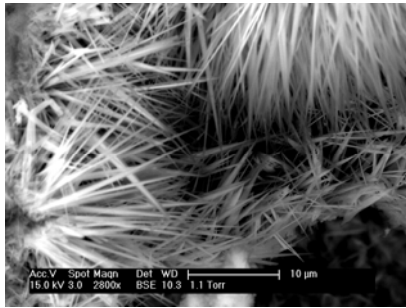
Porenbeton: zusätzlich Aluminiumpulver als Treibmittel

Dr. Frank Winnefeld
Abteilung Beton/Bauchemie



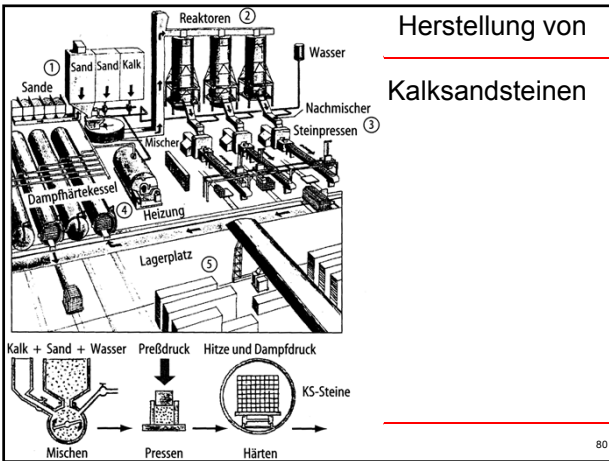
78

Porenbeton mikroskopisch

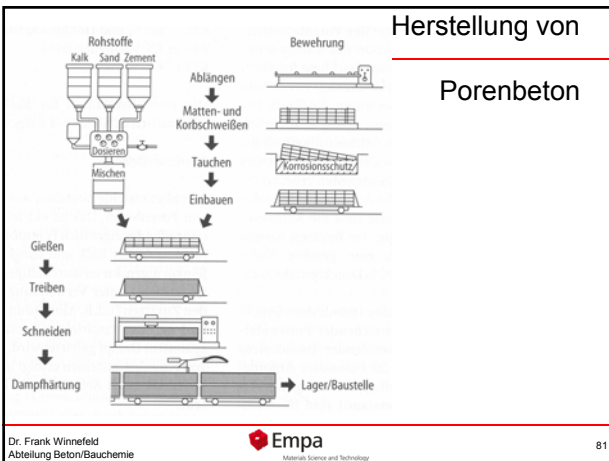


Calciumsilicathydrate bei hydrothormaler Erhärtung

Herstellung von Kalksandsteinen



Herstellung von Porenbeton



Mörtel

Mörtel als:

- Bindemittel für Mauerwerk
- Mörtelstrich (Unterlagsboden)
- Putz: Grundputz, Deckputz
- für Ausbesserungen und Injektionen
- Kleber: Fliesenkleber, Fugenfüller
- ...

Grösstkorn 4 mm (i. Ggs. zum Beton)

Mörtel - Beispiele



Mauermörtel



Fliesenkleber

Fugenfüller



Putzmörtel



Selbstverlaufender Nivelliermörtel

Die Mauerwerksoberfläche

- **Sichtmauerwerk:** Schutz durch Imprägnierung, Hydrophobierung (Silicone)
wichtig: Wasserdampfdurchlässigkeit
- **Anstriche:** nicht poren-schliessend
- **Verputze:** Zementmörtelbewurf 3 – 5 mm
Grundputz, 5 – 20 mm
Deckputz, 7 – 9 mm
innen: Gipsputz 3 – 5 mm
"moderne" Produkte z. B. Sanierputze
- **Graffiti-schutz**
