

# Anorganische Bindemittel und Sonderbetone

## Silicastaub

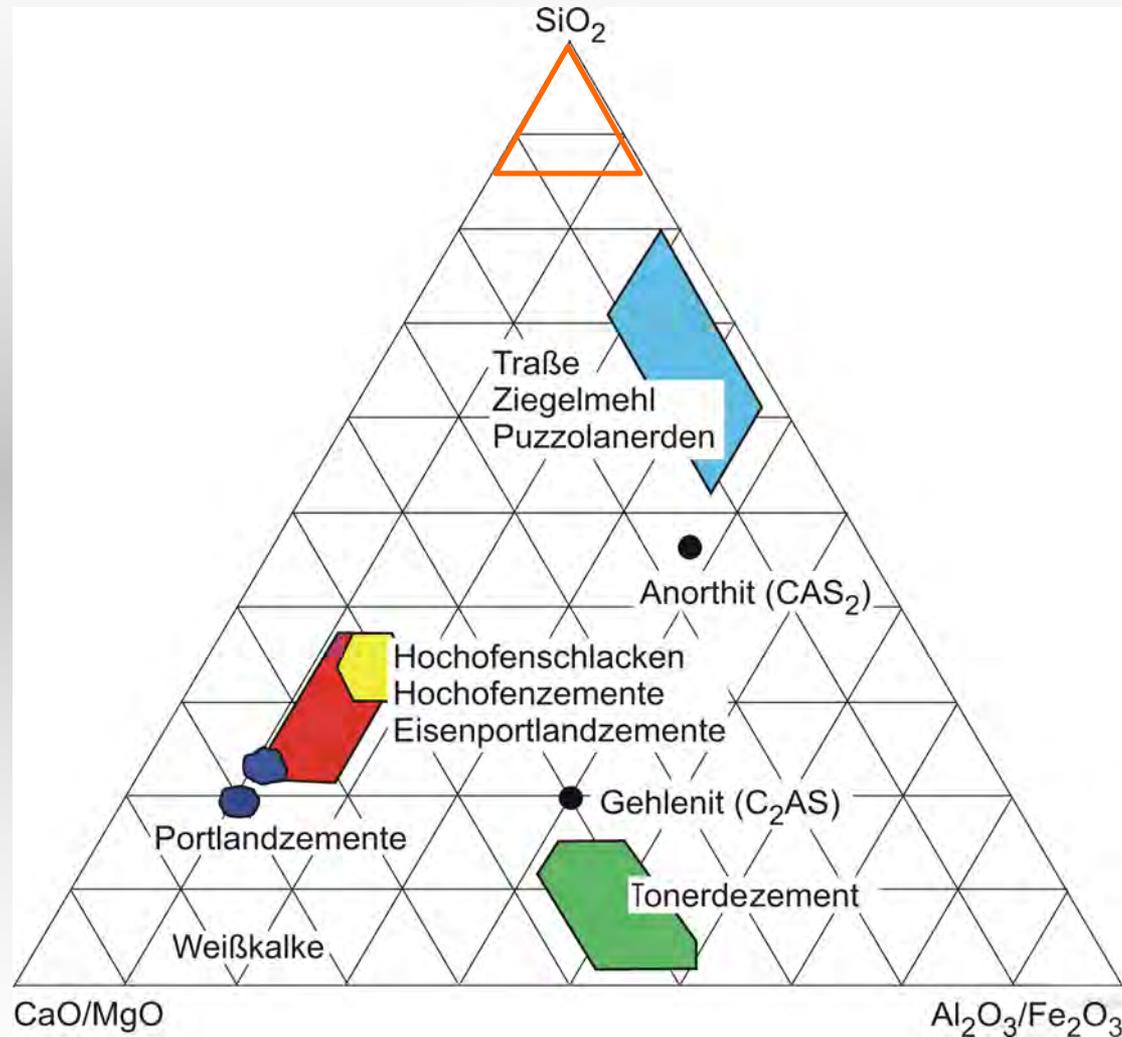
# Gliederung

- Definition von Silicastaub
- Entstehungsprozess von Silicastaub
- Eigenschaften und Reaktionen von Silicastaub
- Silicastaub im Beton
  - Chemische Eigenschaften
  - Physikalische Eigenschaften
  - Betoneigenschaften

# Definition von Silicastaub

- Sehr feines nichtkristallines Silica, das in einem Lichtbogenofen entsteht als Nebenprodukt bei der Herstellung von elementarem Silicium oder von Legierungen, die Silicium enthalten.
- Es ist auch unter den Namen Silicastaub oder Microsilica bekannt.
- glasig erstarrtes, amorphes Siliciumdioxid ( $\text{SiO}_2$ )  
> 85%
- liegt primär pulverförmig vor, wird als Suspension geliefert

# Dreistoffsystem $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$



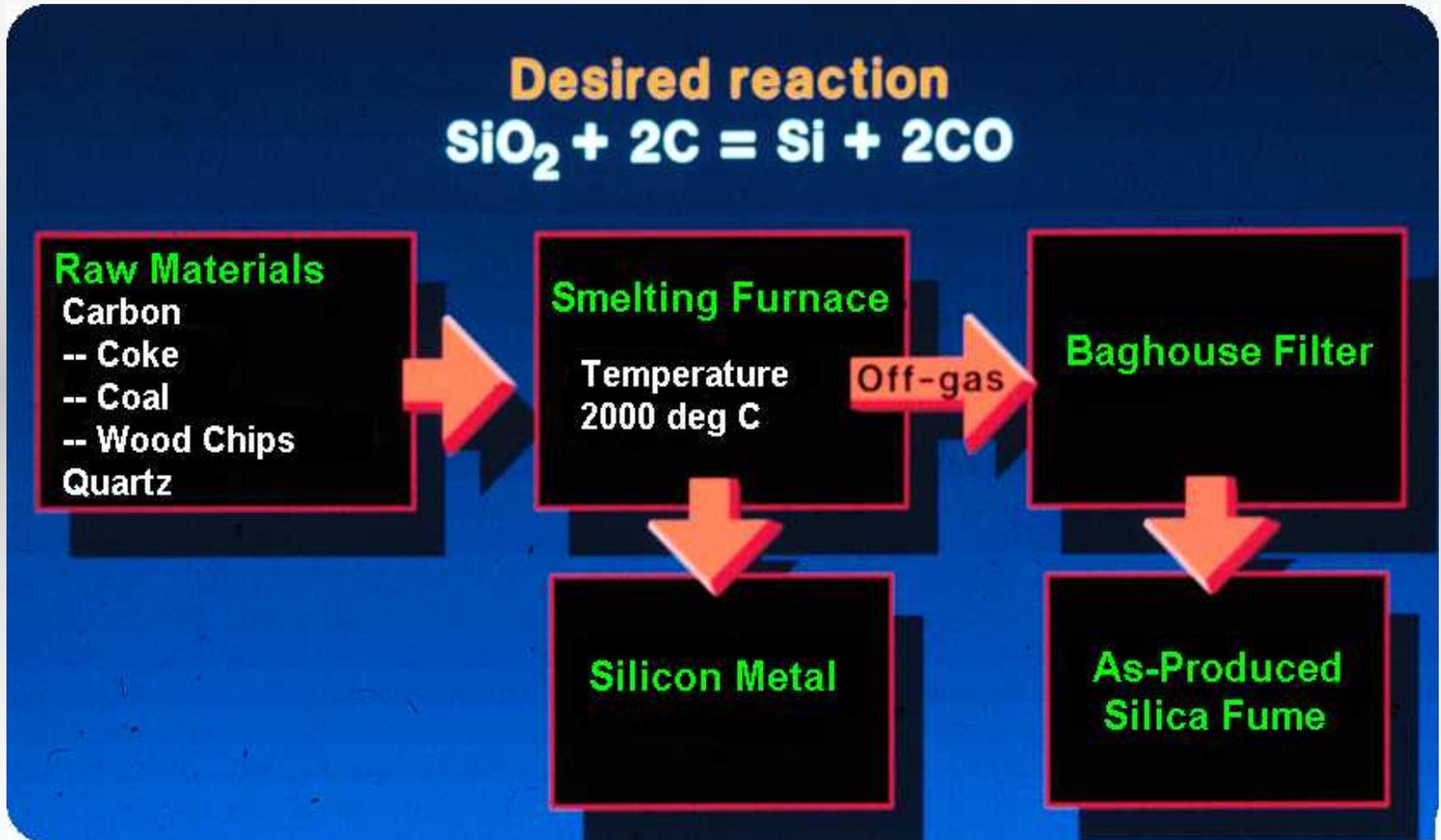
# Gesundheitsaspekte bei Silicastaub

- Es sind bisher keine Gesundheitsprobleme bekannt.
- Silicastaub kann Spuren kristallinen  $\text{SiO}_2$  enthalten.
- Silicastaub muss als inhalierbar angesehen werden.

# Entstehungsprozess von Silicastaub

- Schmelzen von Quarz zusammen mit Kohle in Elektroöfen bei 2500 °C - 2800 °C
- Abstechen der Metallschmelze
- Durch Abkühlen oxidiert Si-Metall erst zu SiO dann zu amorphen Siliciumdioxid SiO<sub>2</sub>
- bei 1700 °C kondensiert Filterstaub aus der Herstellung von Ferrosilicium- bzw. Siliciummetall.

# Entstehung von Silikastaub





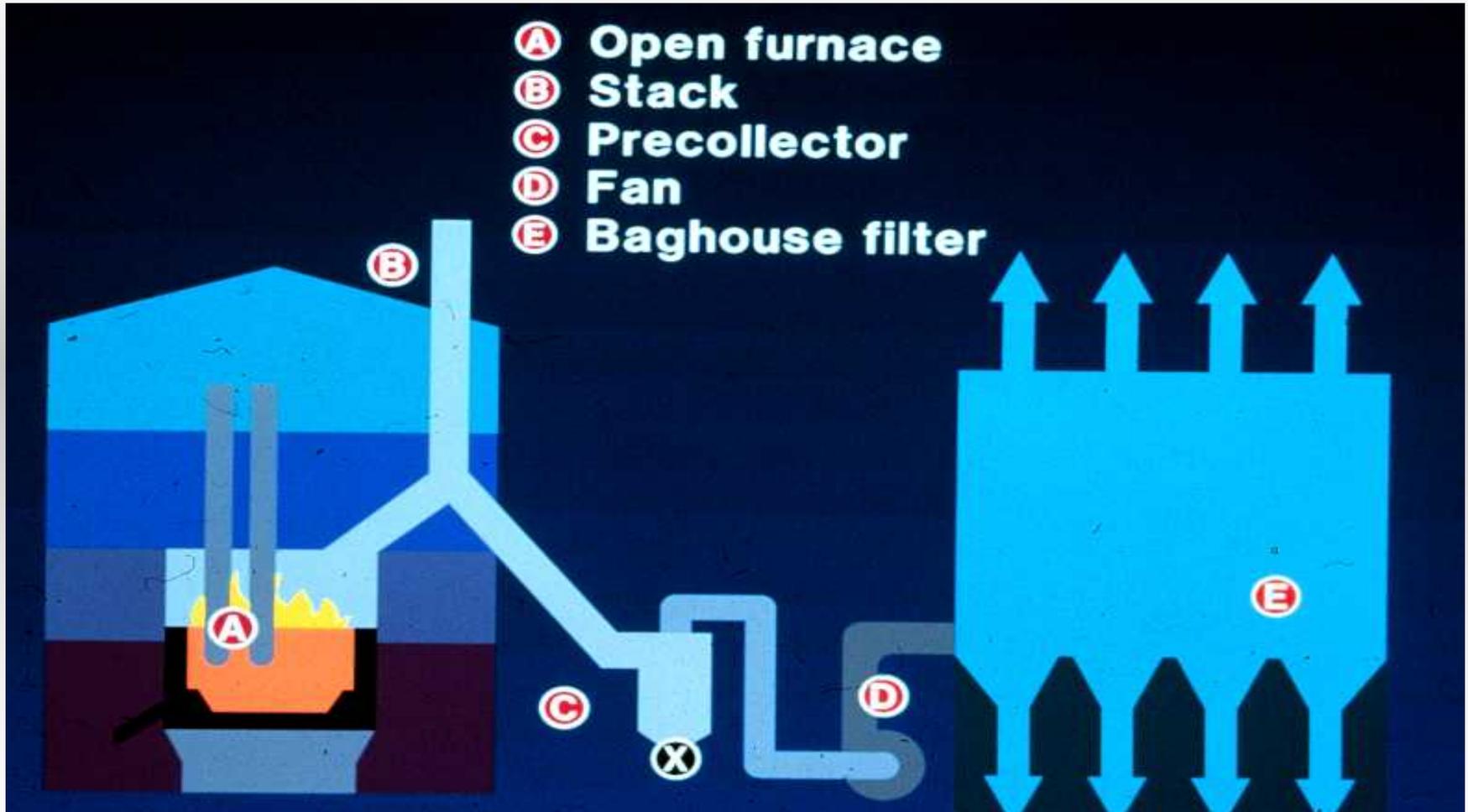




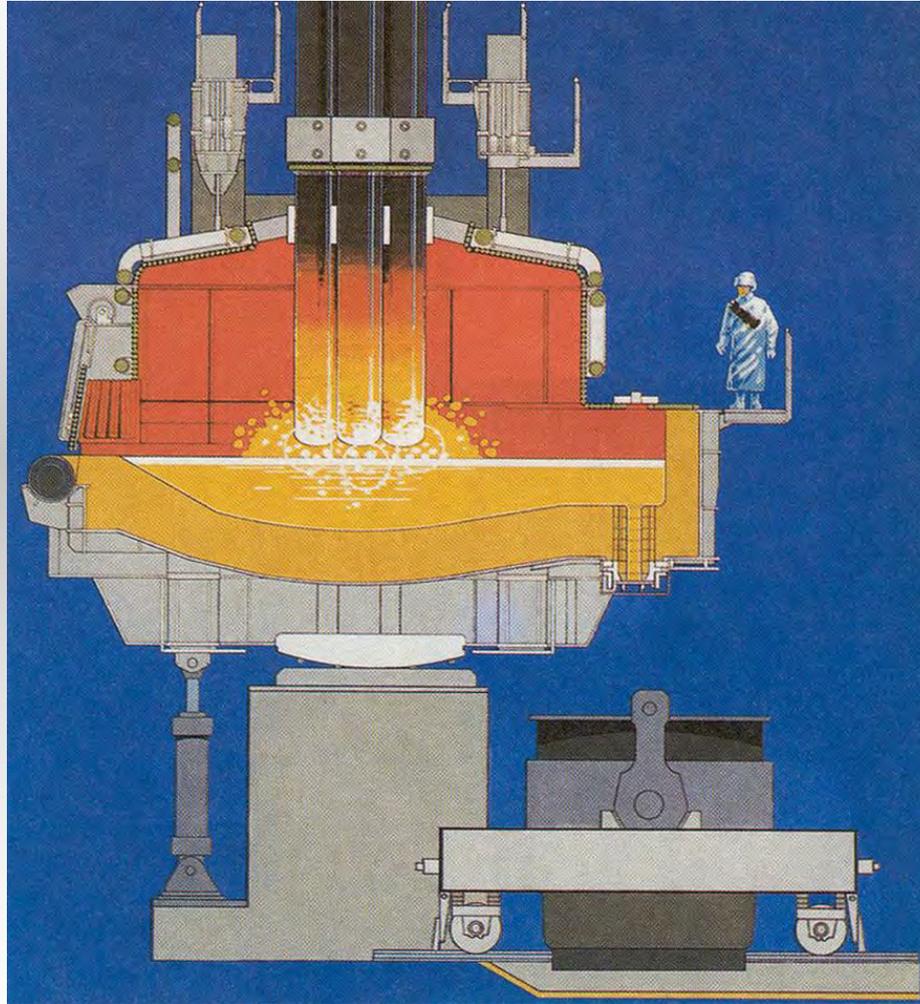




# Entstehung von Silicastaub



# Entstehung von Silicastaub





# Ausgangsstoffe für Silicastaub

- Metallisches Silicium
  - typischer Gehalt > 97 % Silicium
- Ferrosilicium-Legierungen
  - typischer Gehalt 40 bis 90 % Silicium



# Produkteigenschaften

## Direktverwertung von Silicastaub

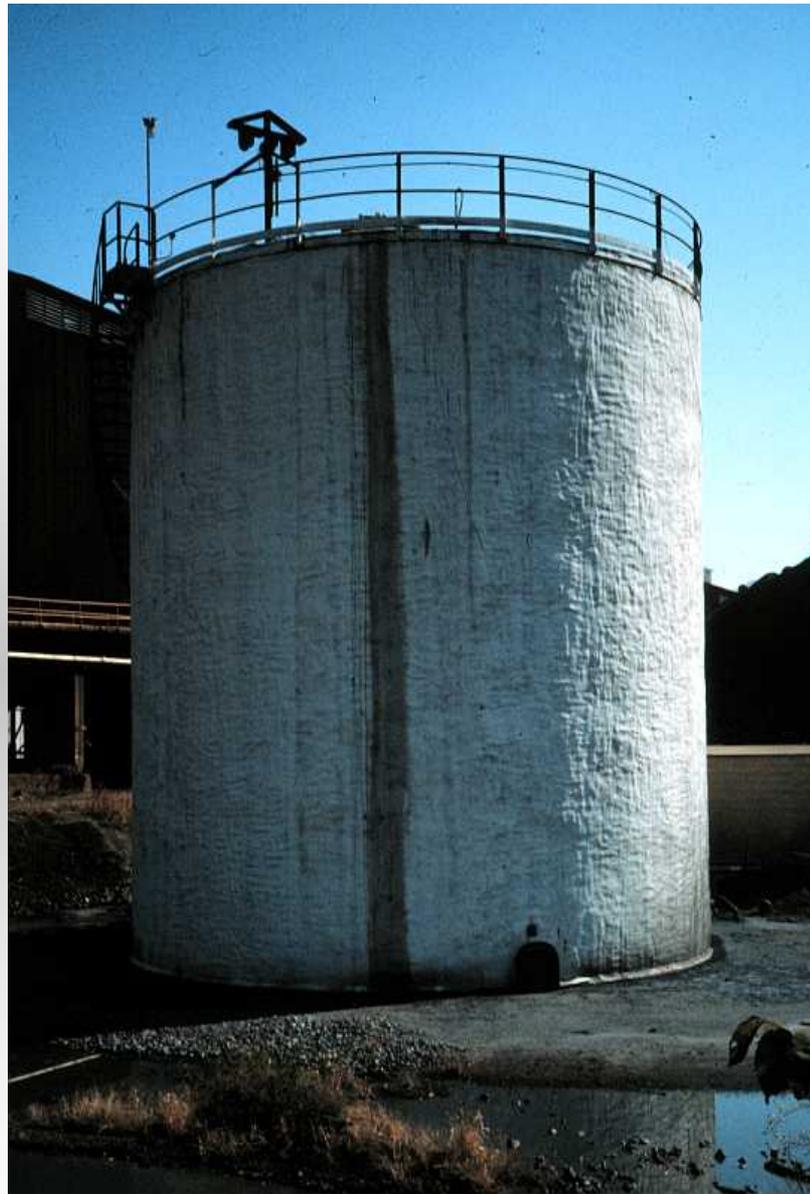
- Das Material wird direkt aus den Filtern entnommen
- Es ist extrem fein und staub stark
- Eine pneumatische Förderung ist schwierig, da das Material leicht anhaftet
- Es agglomeriert leicht und hat die Tendenz kleine schwache Klumpen zu bilden
- Durch die geringe Dichte kann die Zuladung nicht ausnutzen (8 - 10 to)



# Silica-Slurry

- 50 % bis 52 % Feststoff in Wasser dispergiert
- Die Lagerung in Tanks ist nur unter ständiger Agitation möglich und wenn das Produkt vor Frost geschützt wird
- Transport in Silofahrzeugen (12 to)





# Kompaktierter Silicastaub

- Das Material wird einem reversiblen Kompaktierungsprozess unterworfen
- Eine pneumatische Förderung ist problemlos möglich
- Es agglomeriert nicht weiter
- Durch die erhöhte Dichte kann die Zuladung (22 to) ausgenutzt werden
- Die Dichte wird gezielt eingestellt und ermöglicht eine kontrollierte Handhabung



# Eigenschaften und Reaktion von Silicastaub

# Silicastaub Farbe

Premium -- Weiß

Standard -- Grau

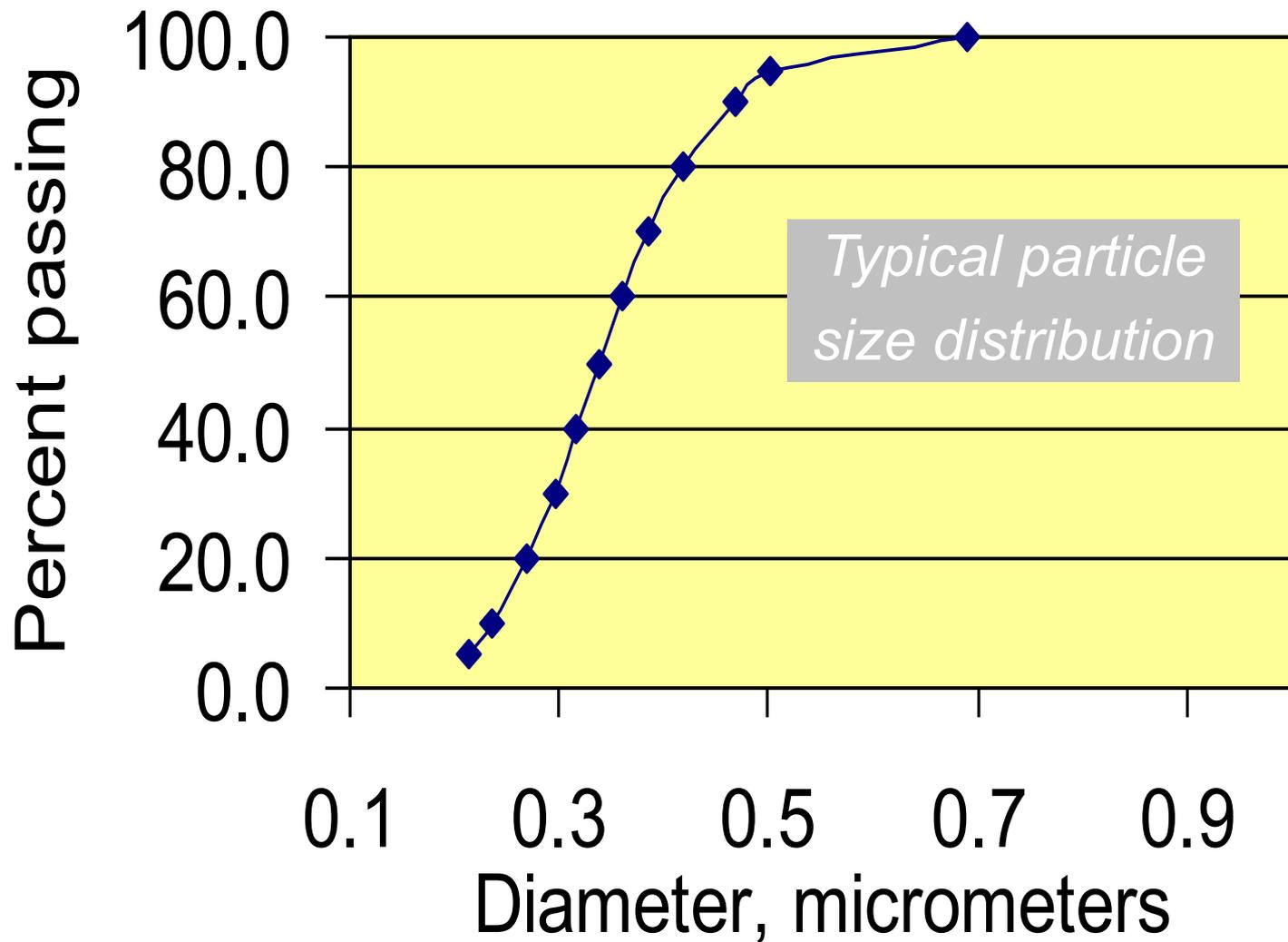


# Silicastaub – Eigenschaften

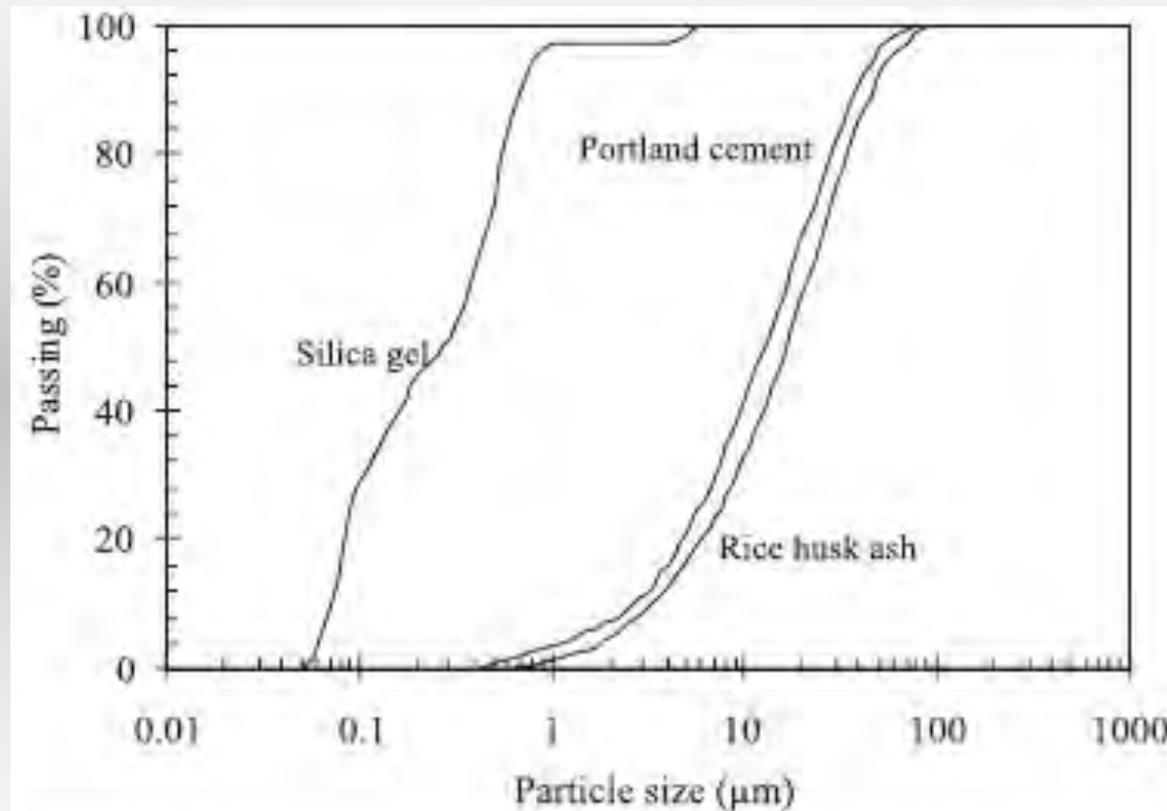
- Amorph
- Siliciumgehalt > 85%
- Der Gehalt an Spurenelementen hängt vom Typ ab

# Silicastaub – Physikalische Eigenschaften

Partikelgröße (typisch)	< 1 $\mu\text{m}$
Dichte	
bei Herstellung	130 bis 430 $\text{kg}/\text{m}^3$
als Suspension	1320 bis 1440 $\text{kg}/\text{m}^3$
verdichtet	480 bis 720 $\text{kg}/\text{m}^3$
Spez. Oberfläche	13.000 bis 30.000 $\text{m}^2/\text{kg}$
zum Vergleich:	CEM: 300 bis 1.000 $\text{m}^2/\text{kg}$
	Metakaolin: 10.000 bis 15.000 $\text{m}^2/\text{kg}$

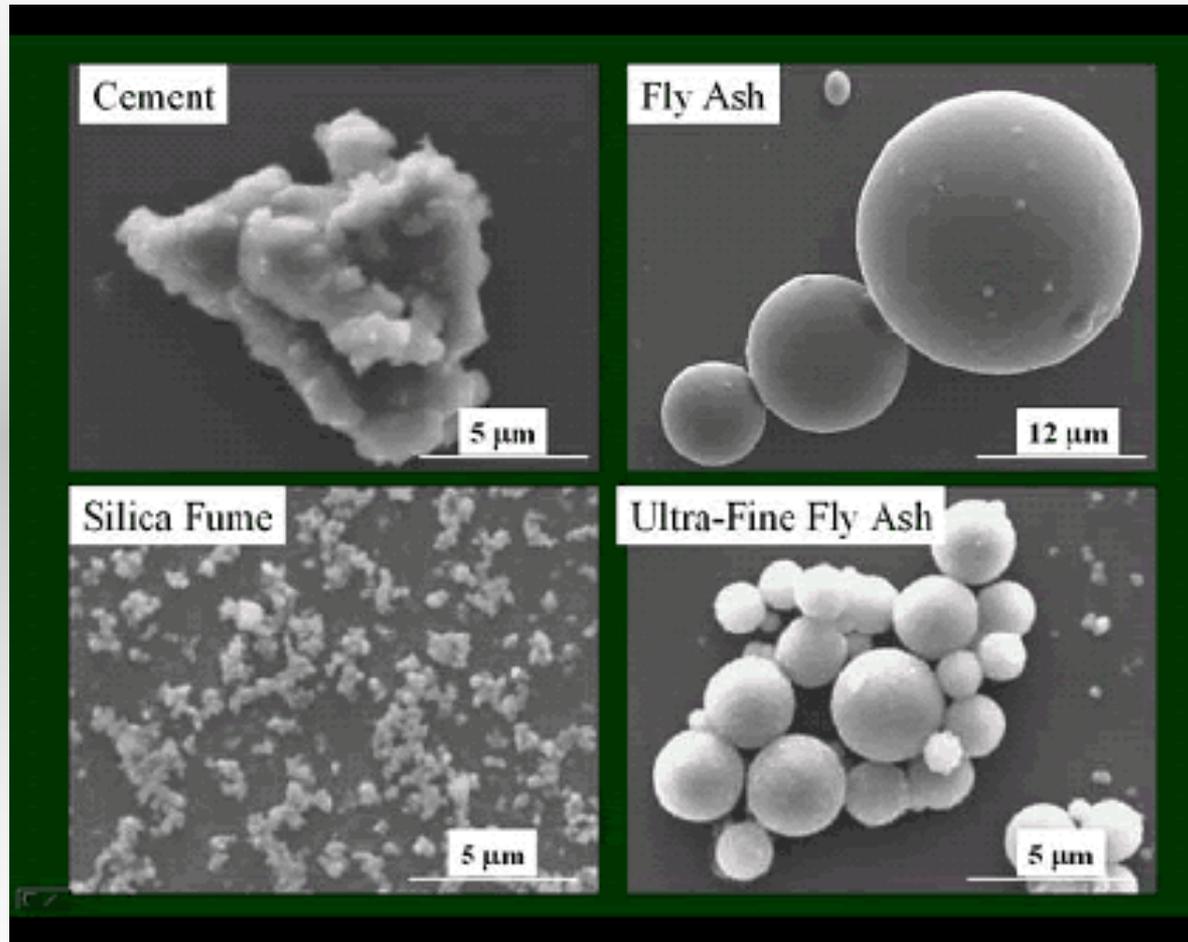


# Größenvergleich verschiedener Bindemittel



*Figure 1. Particle size distributions of the rice husk ash (after grinding), Portland cement and silica gel*

# Größenvergleich verschiedener Bindemittel



Quelle: <http://www.fhwa.dot.gov>



Beim Ersatz von 15 % CEM durch MS kommen ca. 2.000.000 Silicapartikel auf jedes Portlandzementkorn

# Vergleich der chemischen und physikalischen Eigenschaften - Silicastaub, Flugasche und Zement

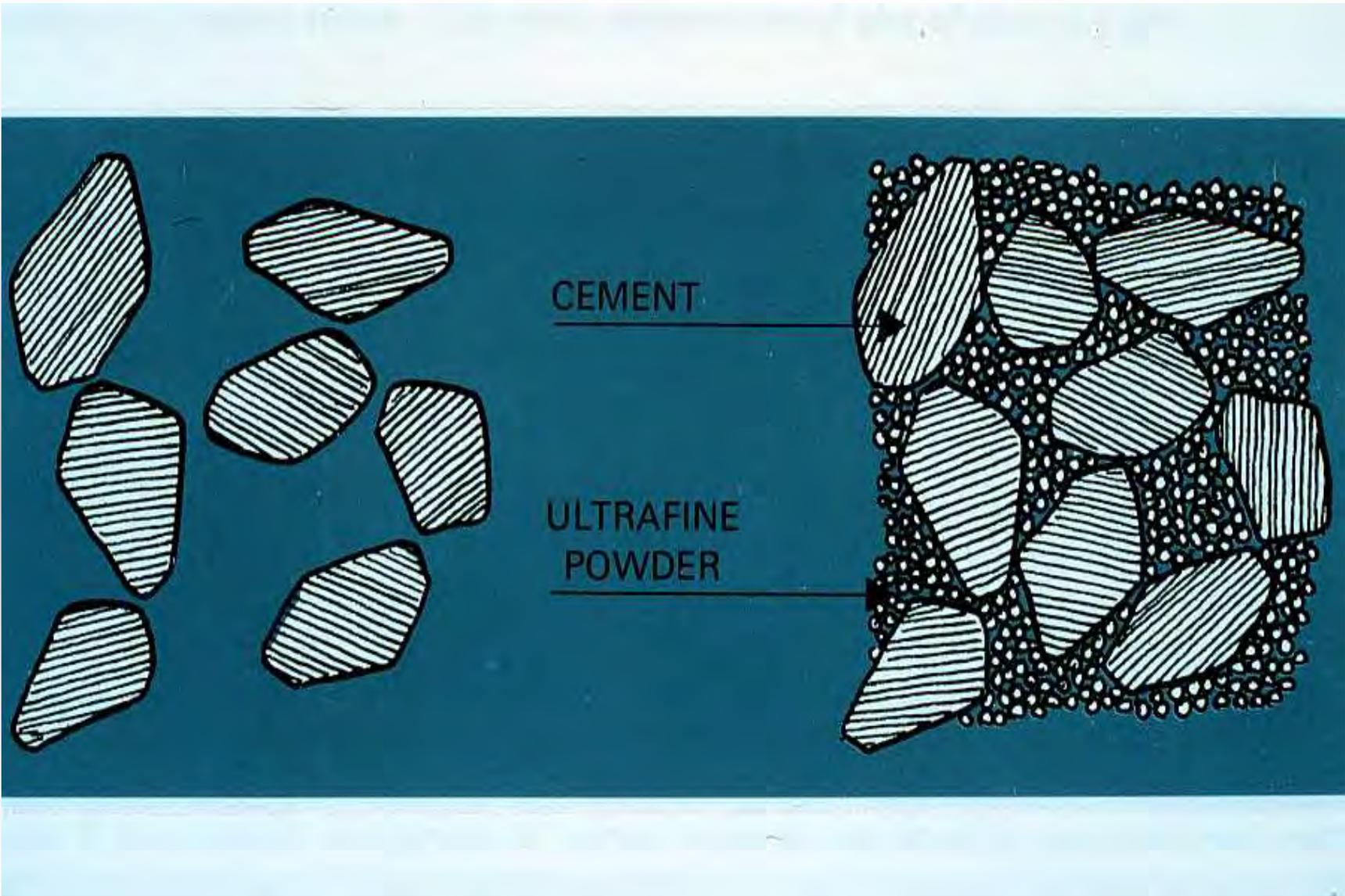
	Silicastaub	Flugasche	Zement
<b>SiO<sub>2</sub> Gehalt</b>	85 - 97	35 - 48	20 - 25
<b>Oberfläche m<sup>2</sup>/kg</b>	17.000 - 30.000	400 - 700	300 - 500
<b>Puzzolanische Aktivität (mit Zement, %)</b>	120 - 210	85 - 110	n/a
<b>Puzzolanische Aktivität (mit Kalk) (MPa)</b>	8,3 - 11,4	5,5 - 6,9	n/a

# Was bewirkt Silikastaub im Beton

- Physikalischer Effekt
- Chemischer Effekt

# Physikalische Effekte

- Partikel des Silikastaubes füllen Zwischenräume zwischen den einzelnen Zementkörnern aus ( $\emptyset$  100 – 1000x kleiner als Zement)
- Packungsdichte in der Zementmatrix wird wesentlich erhöht



# Chemische Effekte

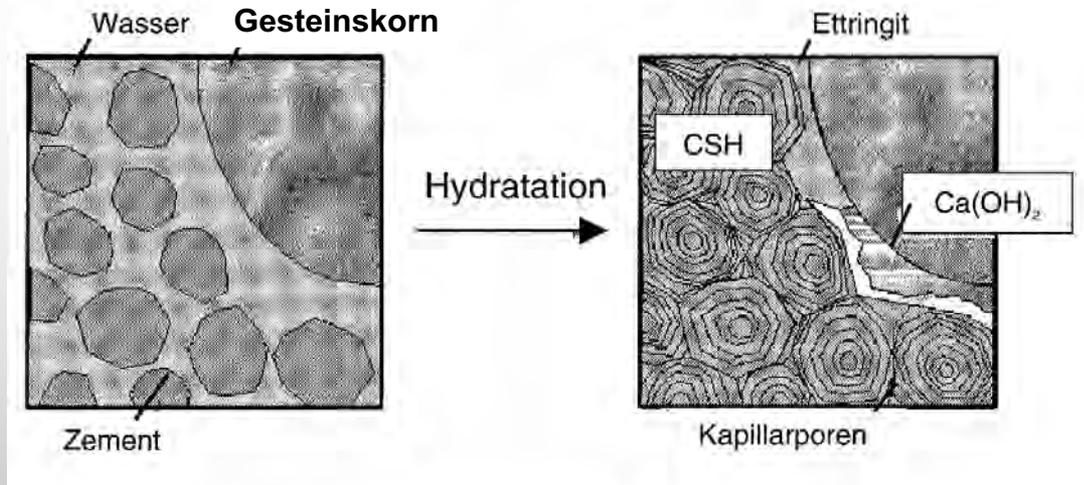
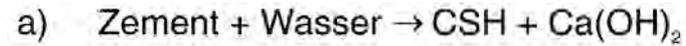
Silicastaub als puzzolanisches Bindemittel

# Puzzolanische Reaktion

- 1) Hoher Anteil an reaktivem amorphen Siliciumdioxid für Reaktion mit bei Zementhydratation entstehendem  $\text{Ca(OH)}_2$
- 2) hohe spezifische Oberfläche für Kontaktflächenreaktion

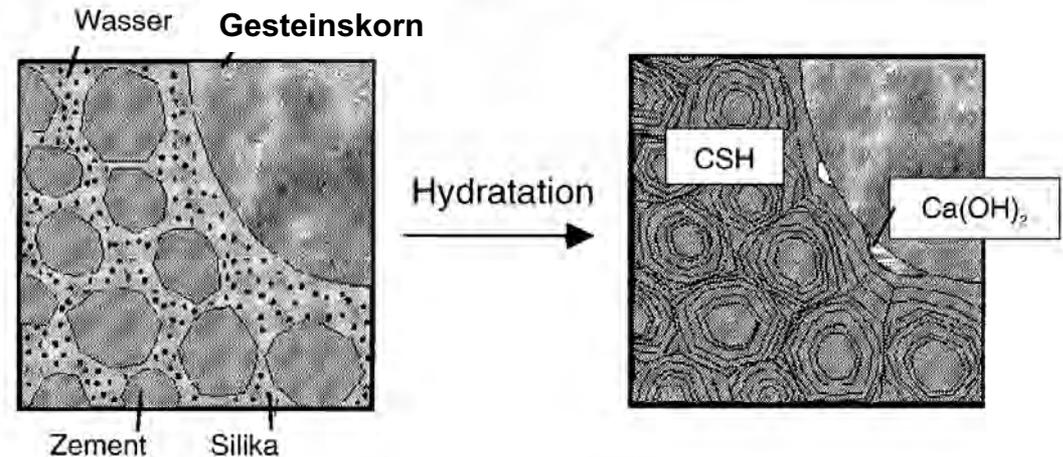
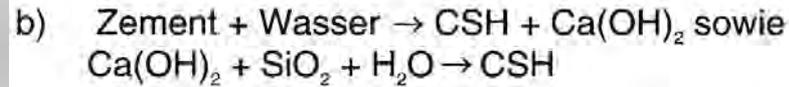
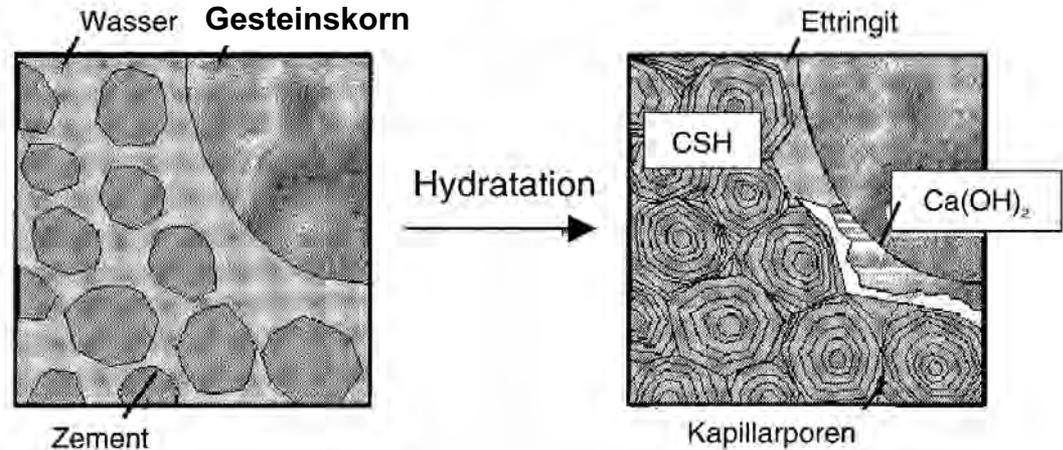
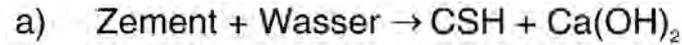
Folge: Reduzierung der Kapillarporen im Beton





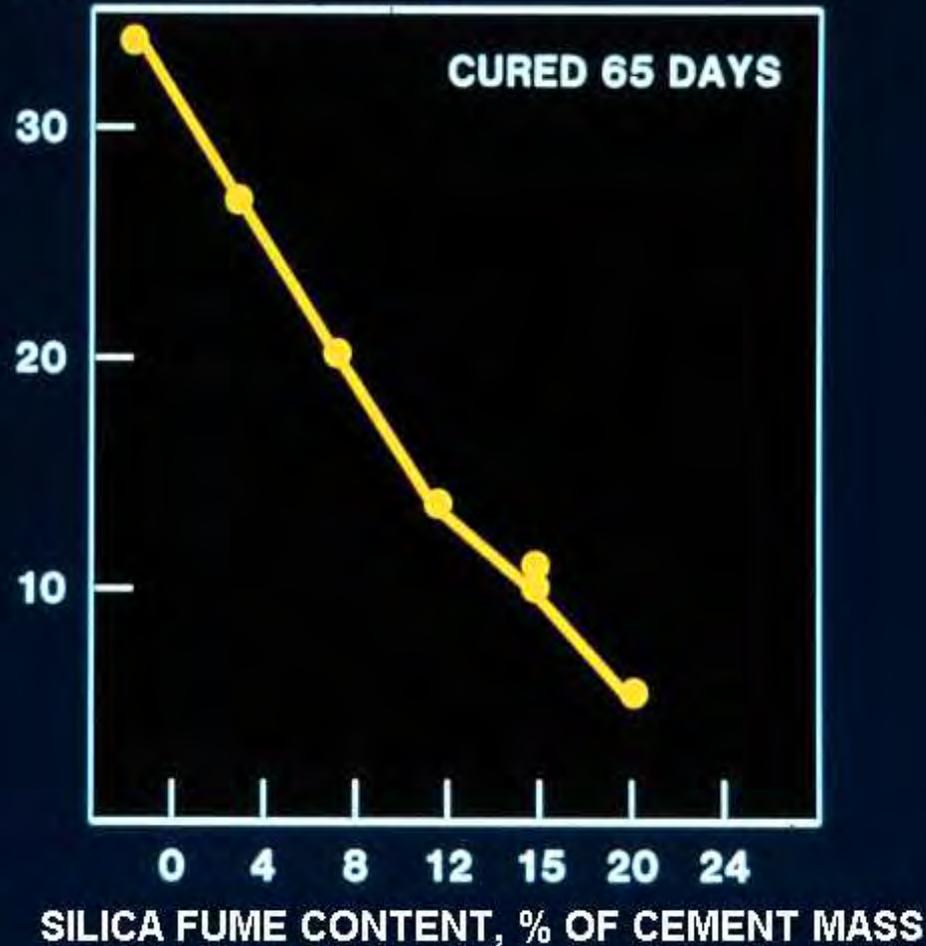
*Portlandzement*  
*+ Wasser*  
*=*  
*Calciumsilicathydrat*  
*+*  
*Calciumhydroxid*

*Puzzolan und  
Calciumhydroxid  
+  
Wasser  
=  
Calciumsilicathydrat*



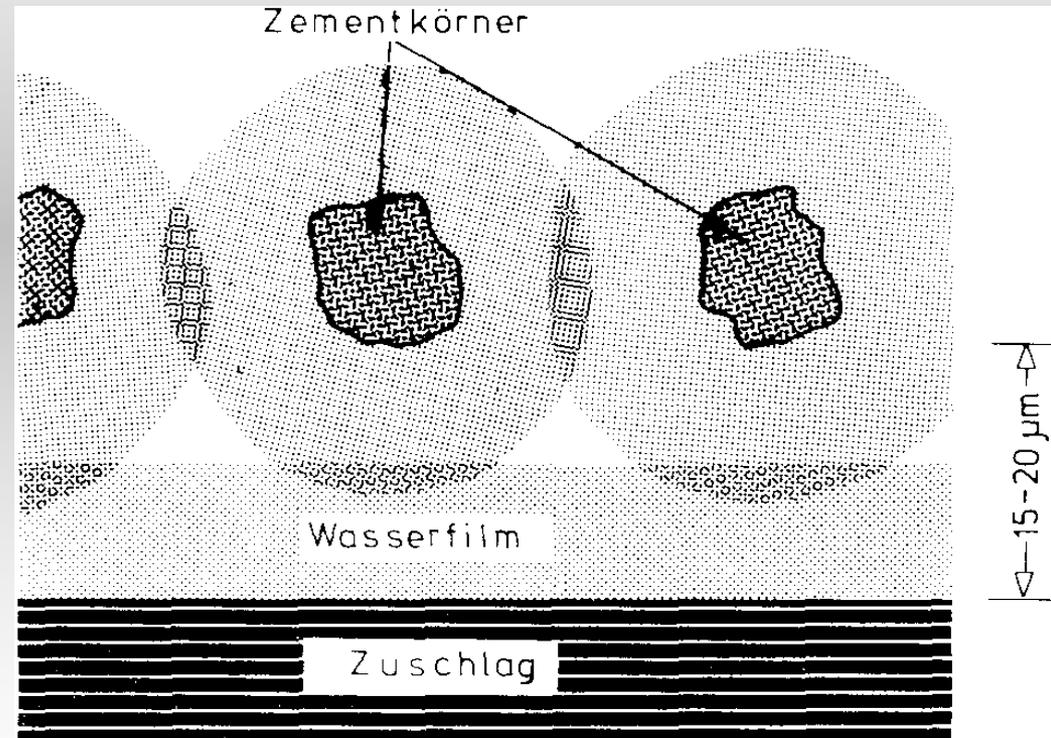
# CALCIUM HYDROXIDE CONTENT

CALCIUM-HYDROXIDE CONTENT  
% BY WEIGHT OF CEMENT

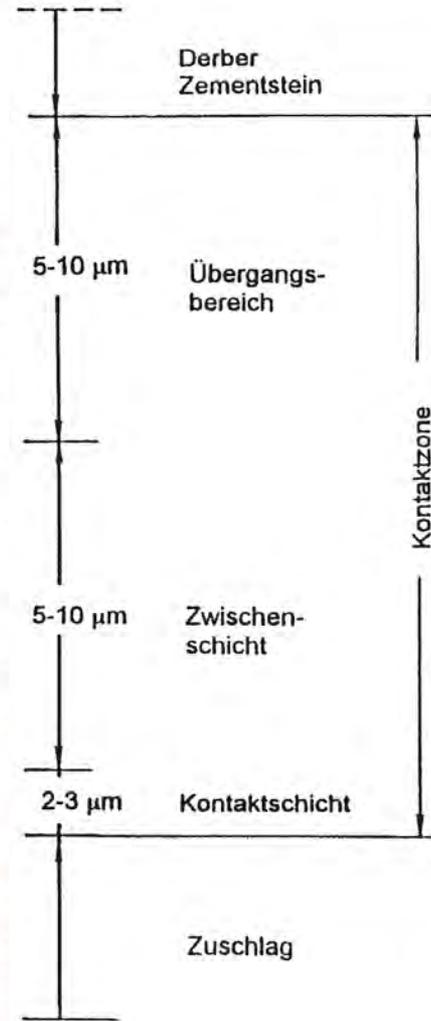
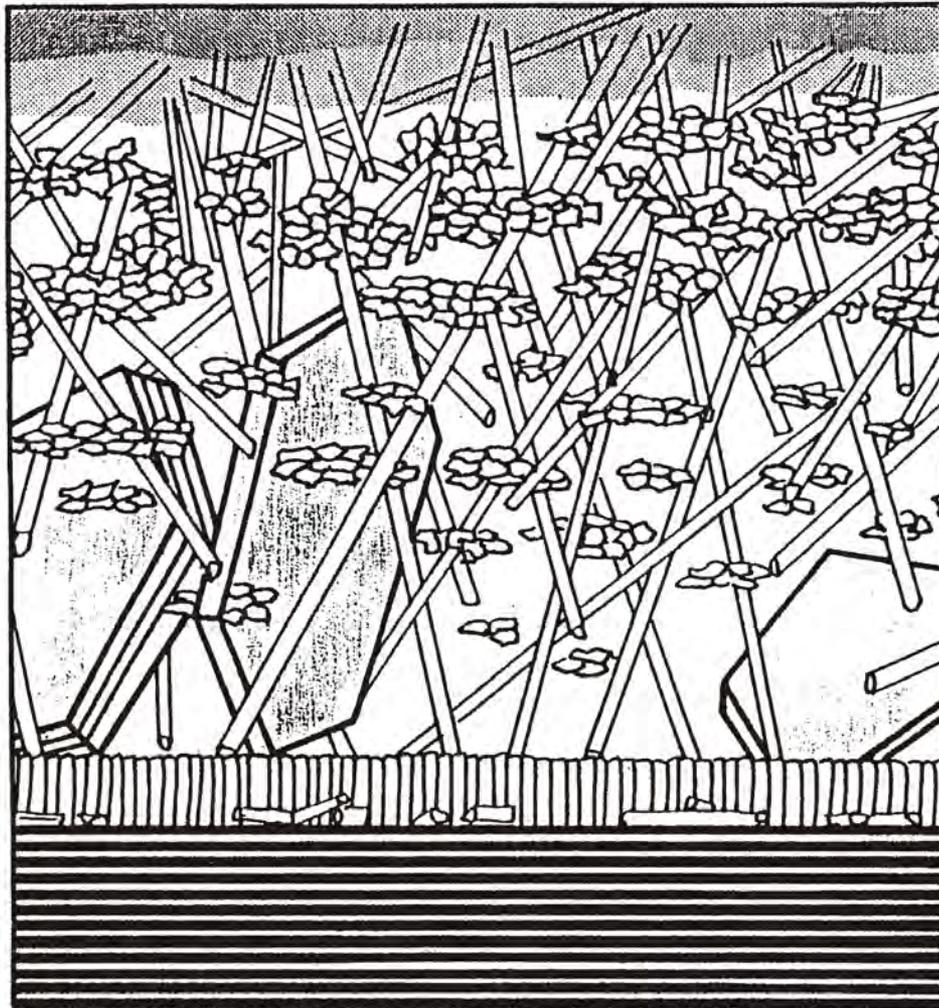


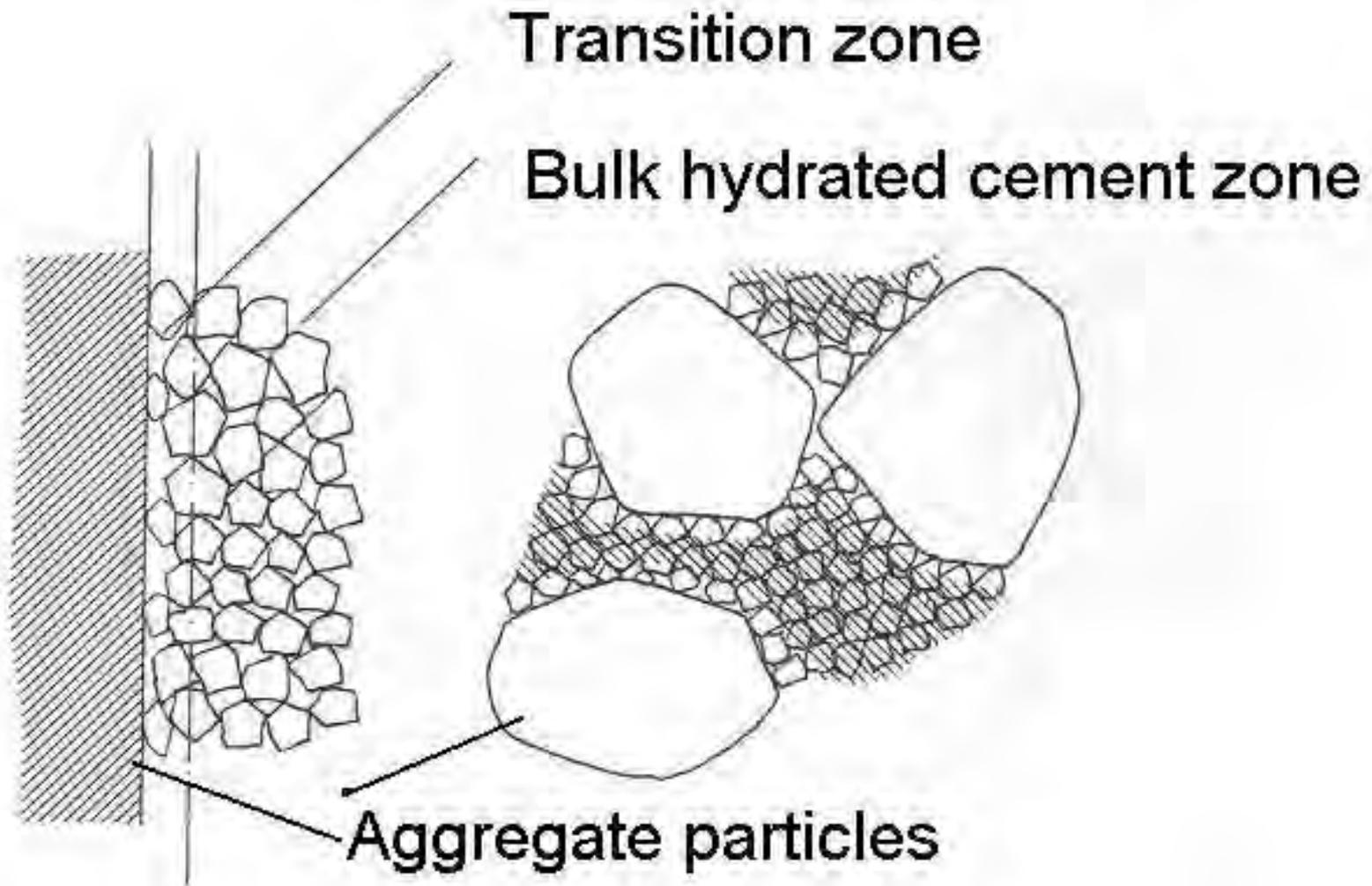
# Die Kontaktzone

- dünne Lage zwischen Zementstein und Gesteinskörnung
- schwächste Komponente im Beton
- durchlässigste Zone
- Silikastaub verbessert die Kontaktzone durch physikalische und chemische Einflüsse.

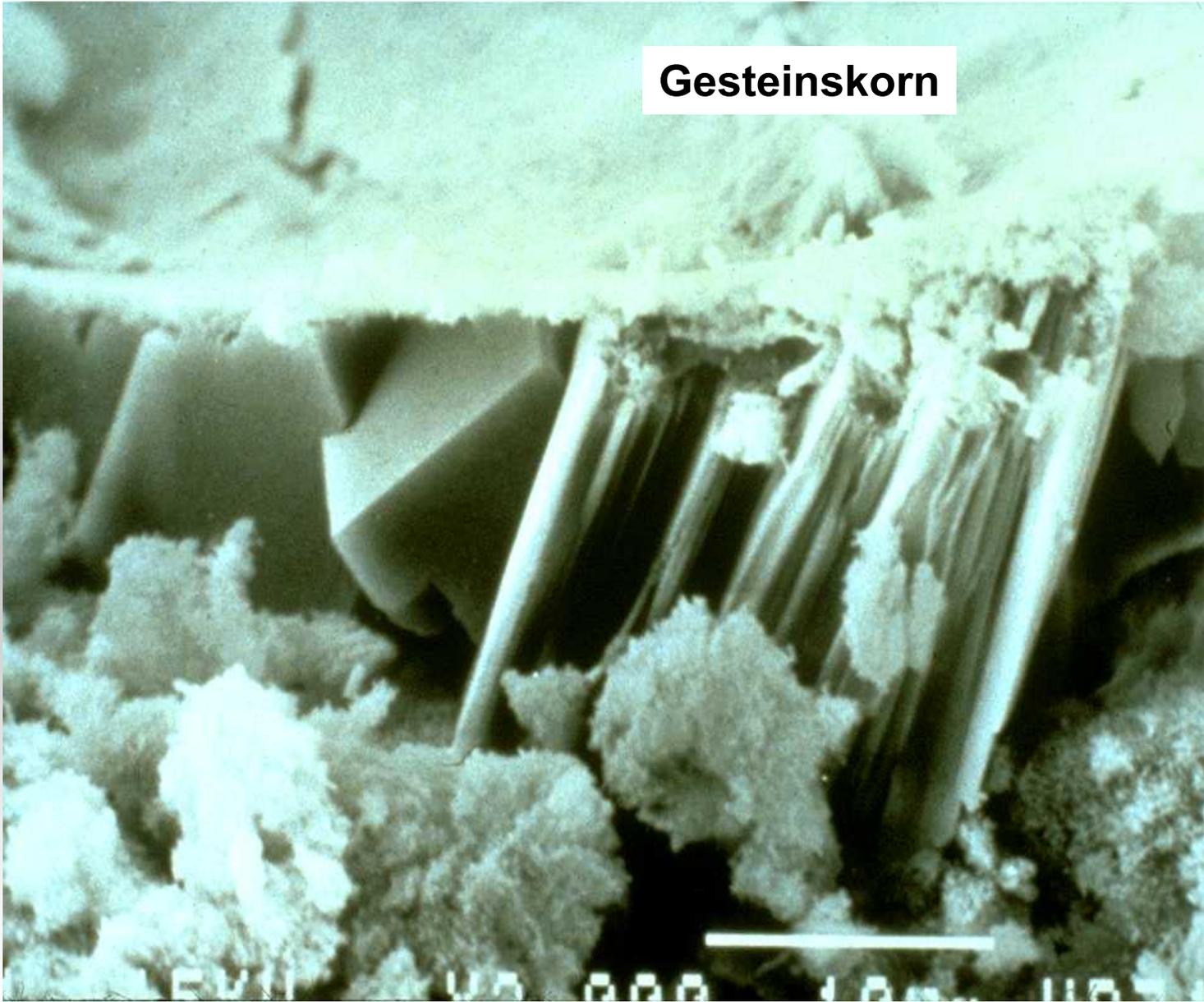


# Die Kontaktzone

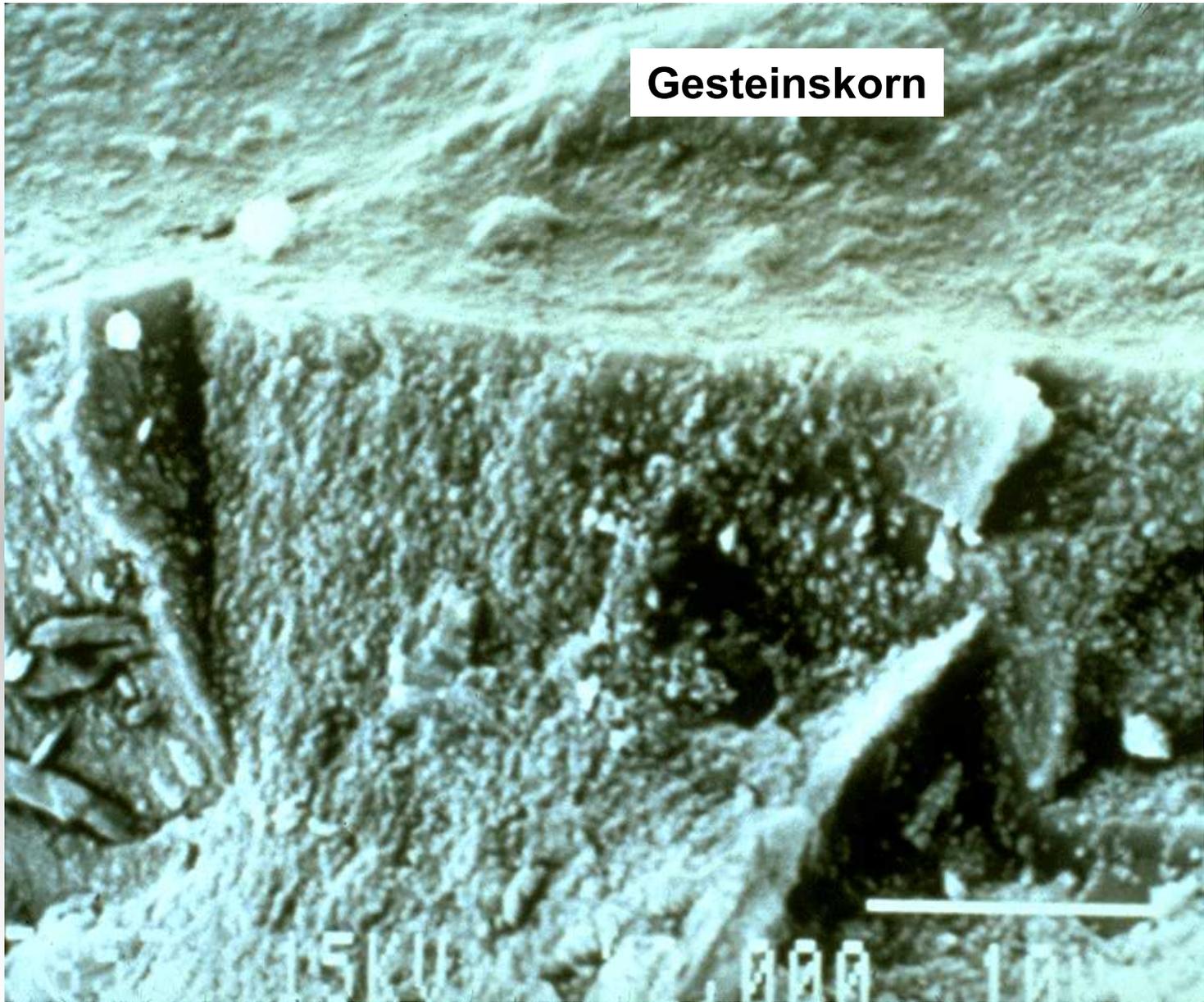




# Gesteinskorn



# Gesteinskorn

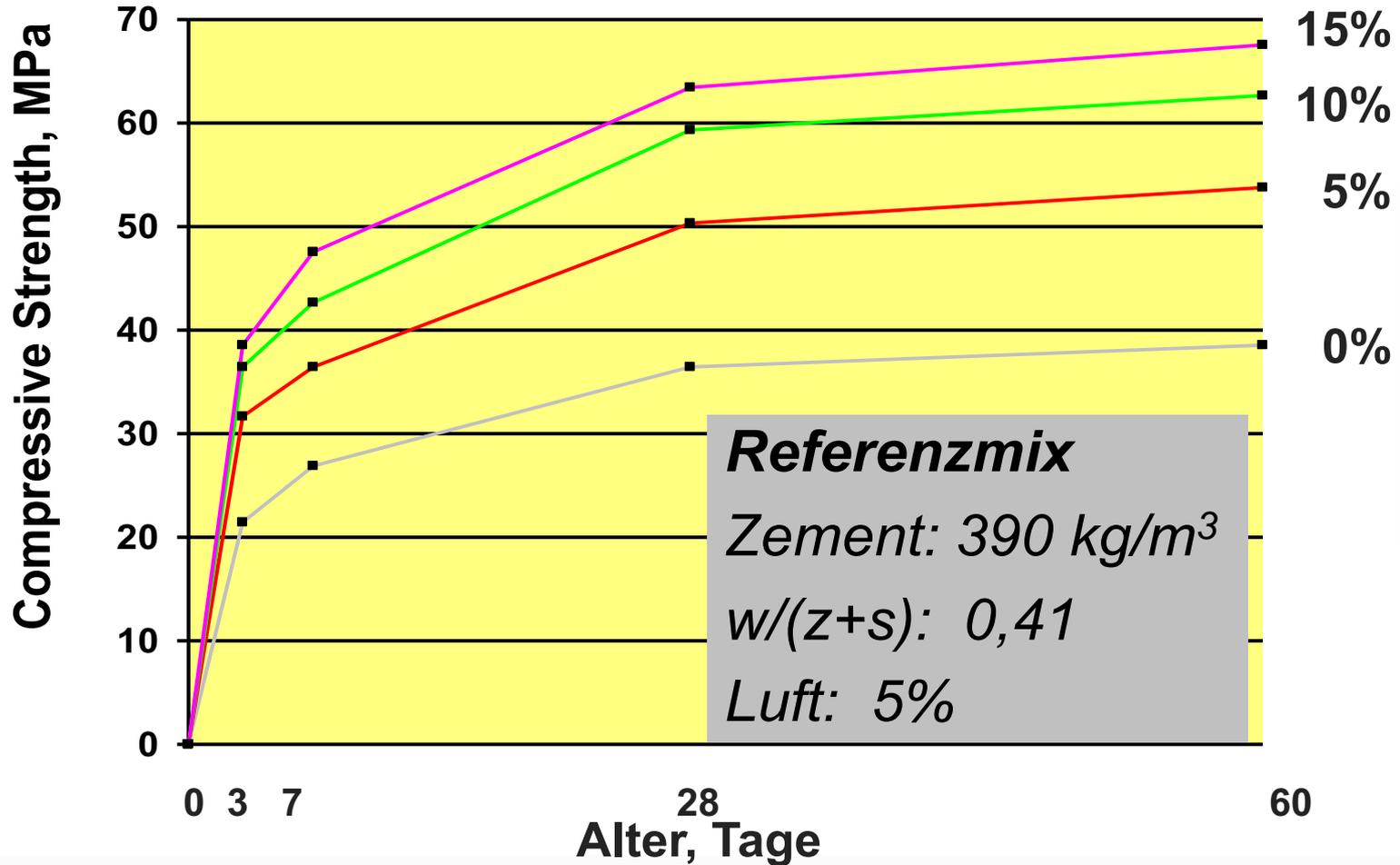




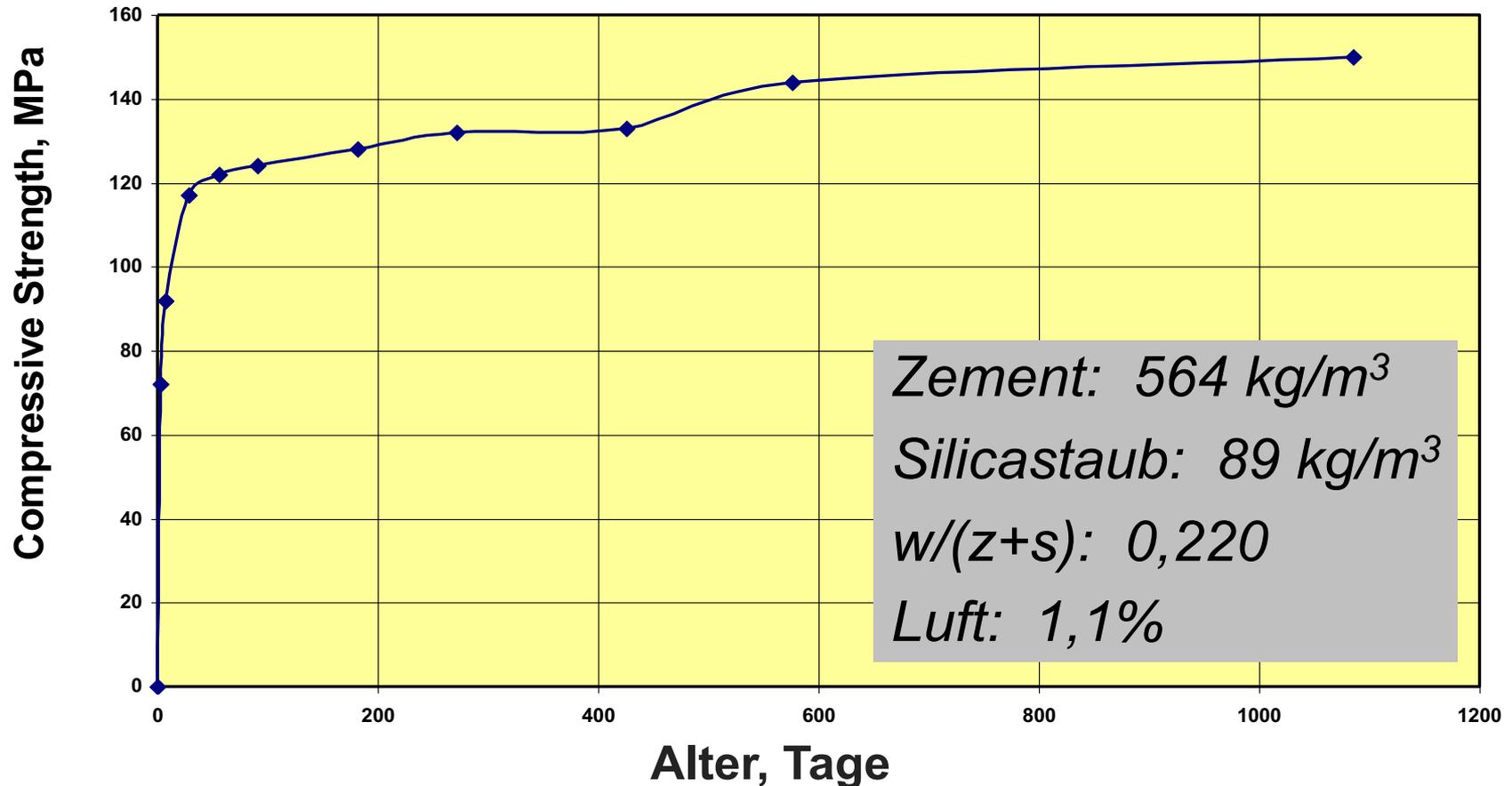
# Anwendung von Silikastaub in Beton

- Erhöhung der mechanischen Eigenschaften
  - Druck-, Zug- und Biegezugfestigkeit
  - E-Modul
- Verbesserung der Dauerhaftigkeit
  - Abriebfestigkeit
  - Erosionsbeständigkeit
  - Frost- bzw. Frosttausalz widerstand
  - Eluationswiderstand
  - Widerstand gegen treibende und lösende Angriffe,...

# Erhöhte Betondruckfestigkeit durch Zugabe von Silicastaub



# Erhöhte Betondruckfestigkeit durch Zugabe von Silicastaub





# Warum lohnt der Einsatz von Hochfestem Beton?

***Column design load = 50 MN***

<b>Concrete Strength, MPa</b>	<b>Column size, meters</b>	<b>Reinforcing required</b>	<b>Comments</b>
<b>40</b>	<b>1.2 x 1.2</b>	<b>56 No. 36</b>	<b>Base case</b>
<b>55</b>	<b>1.2 x 1.2</b>	<b>24 No. 29</b>	<b>Save steel</b>
<b>85</b>	<b>1.2 x 0.75</b>	<b>24 No. 22</b>	<b>Save space Save steel</b>
<b>85</b>	<b>0.95 x 0.95</b>	<b>24 No. 22</b>	<b>Save space Save steel</b>

# *Key Bank Tower Cleveland, Ohio*

*Hohe Festigkeit (83 MPa),  
hohe Steifigkeit (47 GPa)  
Betonstützen in den  
Gebäudeecken wurde zur  
Aussteifung der  
Tragstruktur gegen  
Windlasten (Nähe zum  
Erie-See) ausgelegt.*



# Erhöhte Dauerhaftigkeit



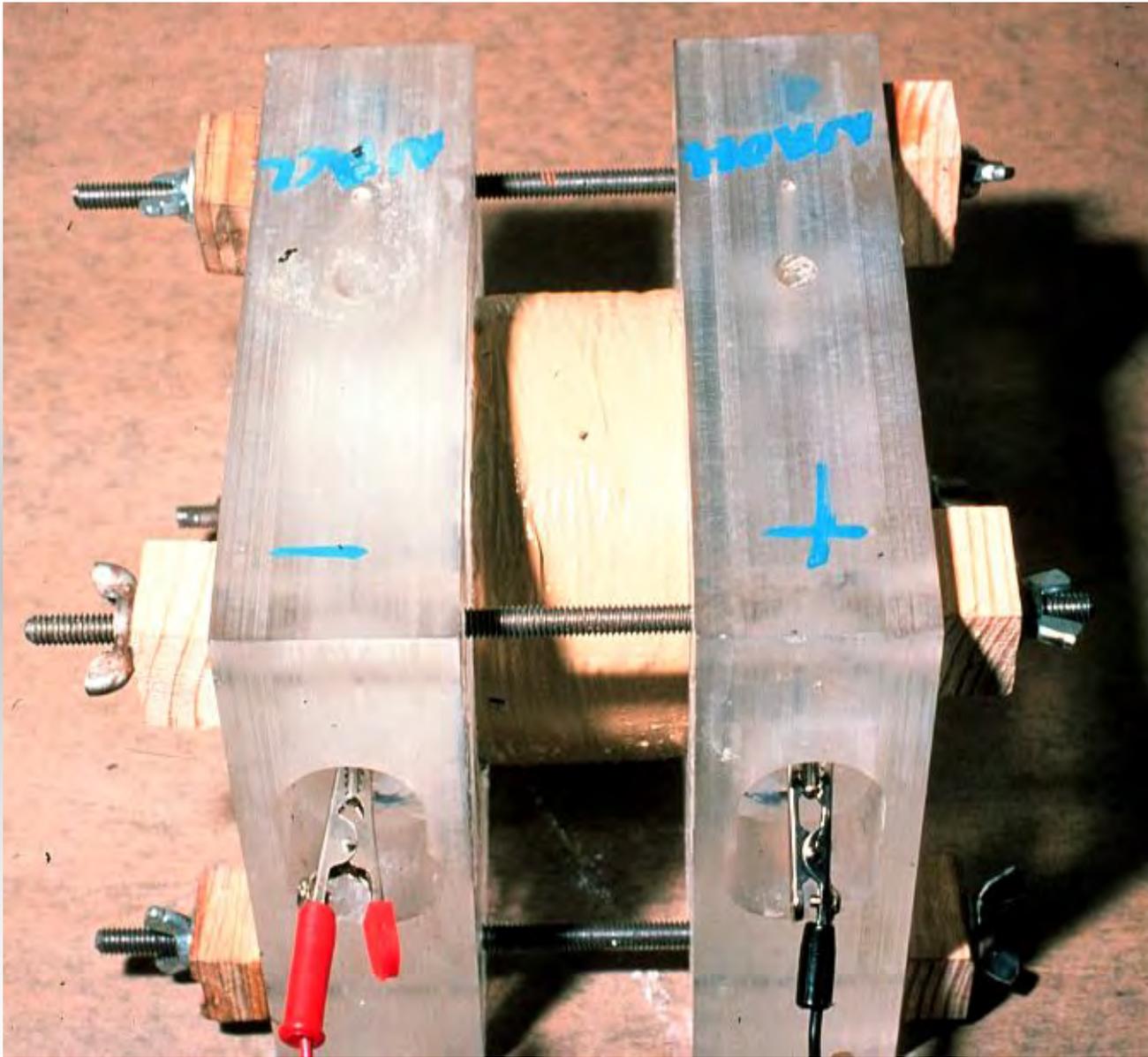






# Silicastaub-Beton: Korrosionsschutz

- 5-10 % v. Z. Silicastaub-Zugabe
- Einsatz von Flugasche oder Hüttensand
- $w/cm < 0,40$ : mit HRWRA
- Bindemittelgehalt, gesamt  $< 415 \text{ kg/m}^3$
- Prüfung der Permeabilität nach ASTM C 1202



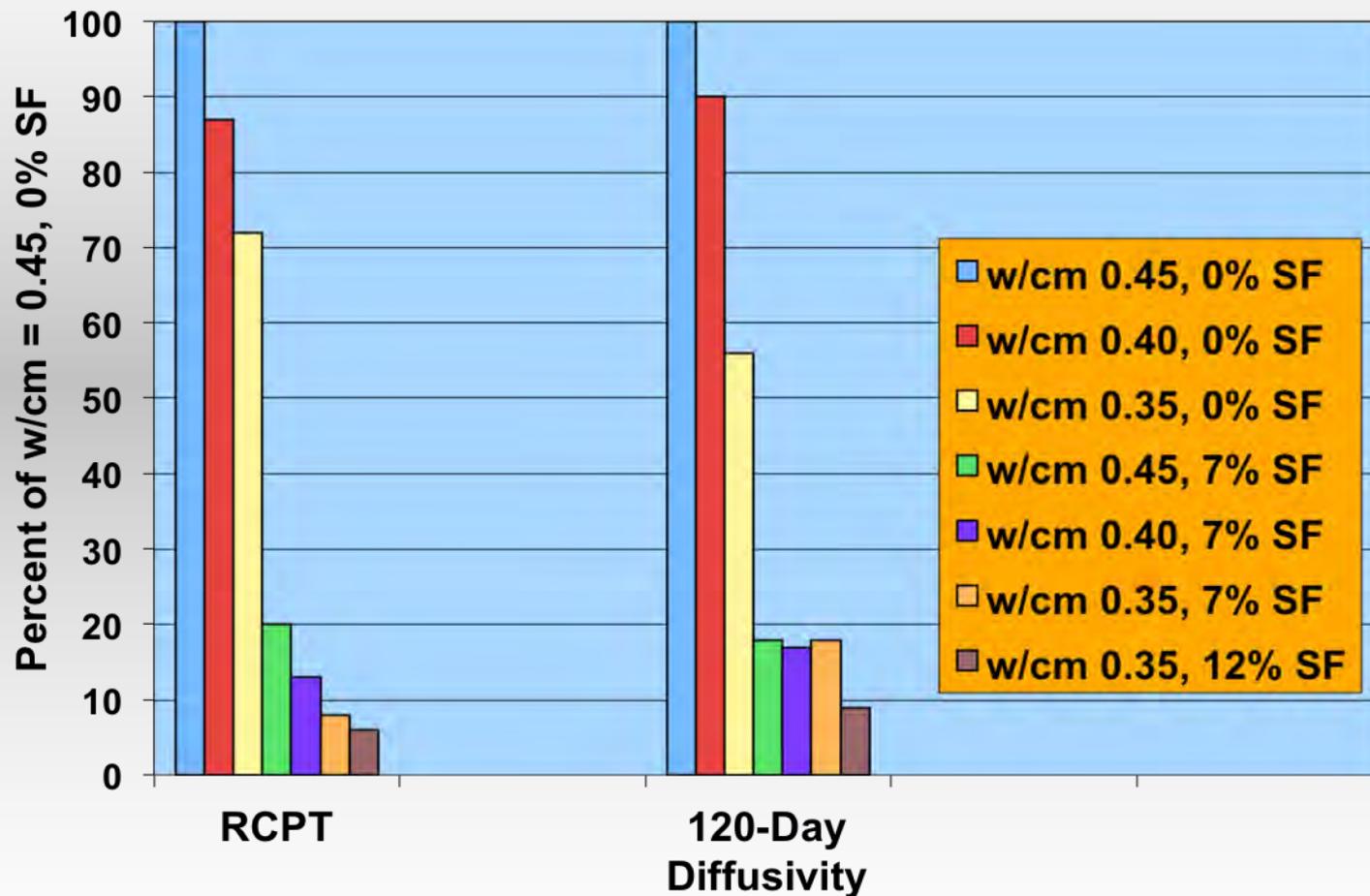
# Silicastaub-Beton: Typische Werte

Silicastaub (v. Z.)	RCP	Druckfestigkeit
0 %	> 3,000 Coulomb	= 35 MPa
7-10 %	< 1,000 Coulomb	> 50 MPa
> 10%	< 500 Coulomb	> 65 MPa

# w/cm Reduktion im Vergleich zum Einsatz von Silicastaub

<u>w/cm</u>	<u>% sf</u>	<u>RCP</u> (coulombs)	<u>Diffusivity</u> (m <sup>2</sup> /s E-12)
<b>0.45</b>	<b>0</b>	<b>3527</b>	<b>10.5</b>
<b>0.45</b>	<b>7</b>	<b>719</b>	<b>1.9</b>
<b>0.40</b>	<b>0</b>	<b>3062</b>	<b>9.4</b>
<b>0.40</b>	<b>7</b>	<b>442</b>	<b>1.8</b>
<b>0.35</b>	<b>0</b>	<b>2530</b>	<b>5.9</b>
<b>0.35</b>	<b>7</b>	<b>295</b>	<b>1.9</b>

# w/cm Reduktion im Vergleich zum Einsatz von Silicastaub



# Silikastaubbeton: Korrosionsschutz

- Zugabe von Mikrosilica
- Dichteres Gefüge - verbesserte Kontaktzone
- Verbesserter Widerstand gegen eindringendes Wasser - verbesserter Korrosionsschutz

# *Capitol South Parking Structure*

## *Columbus, OH 5,000 parking spaces*



# *Bridge Deck Overlay Ohio DOT*



# Erhöhte Verschleißfestigkeit

# *Kinzua Damm, West Pennsylvania*

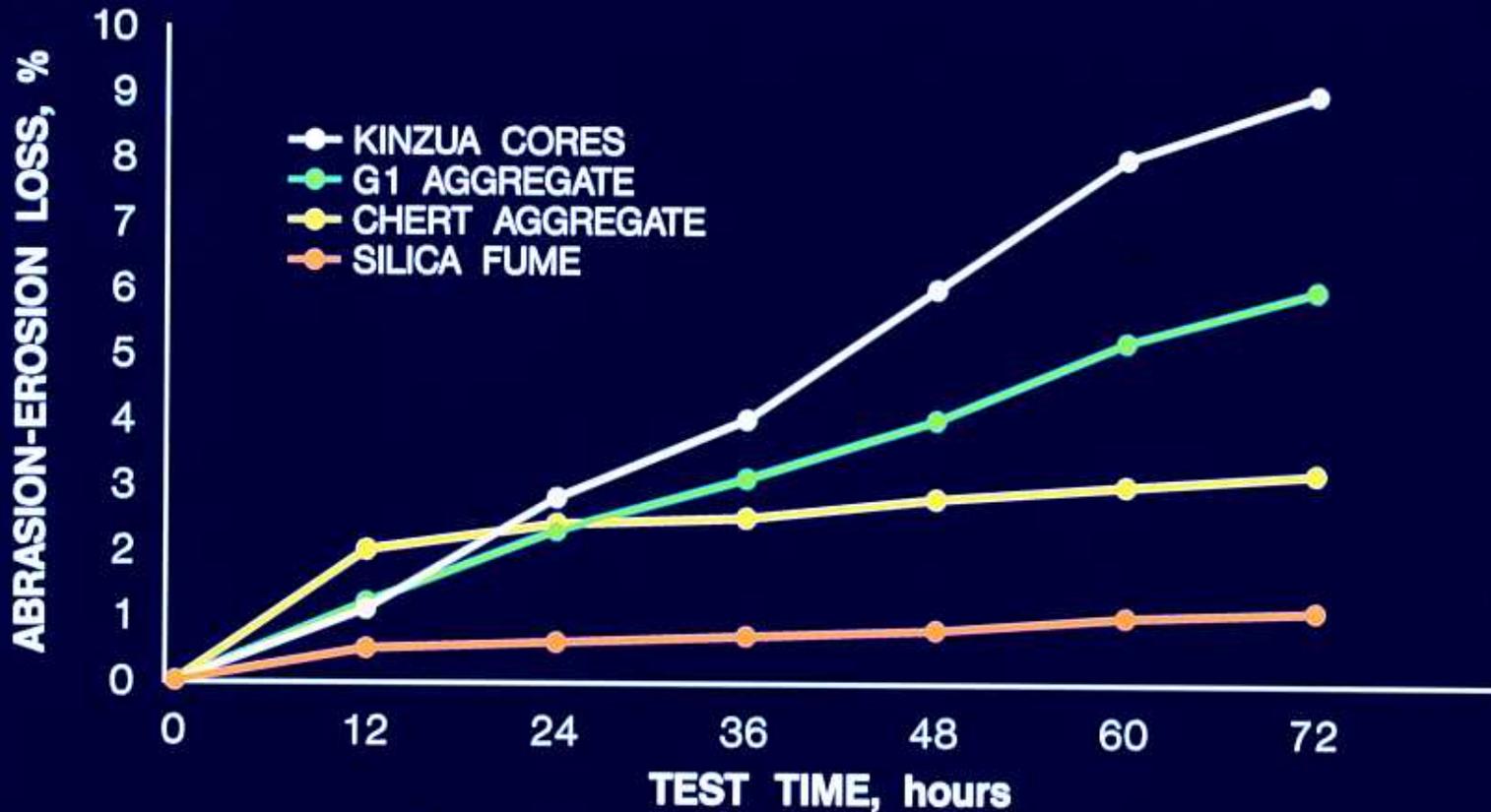


# *Abrasions-/Erosions Schaden im Tosbecken des Kinzua Damms*



# ABRASION-EROSION PERFORMANCE

## KINZUA DAM STILLING BASIN REPAIR

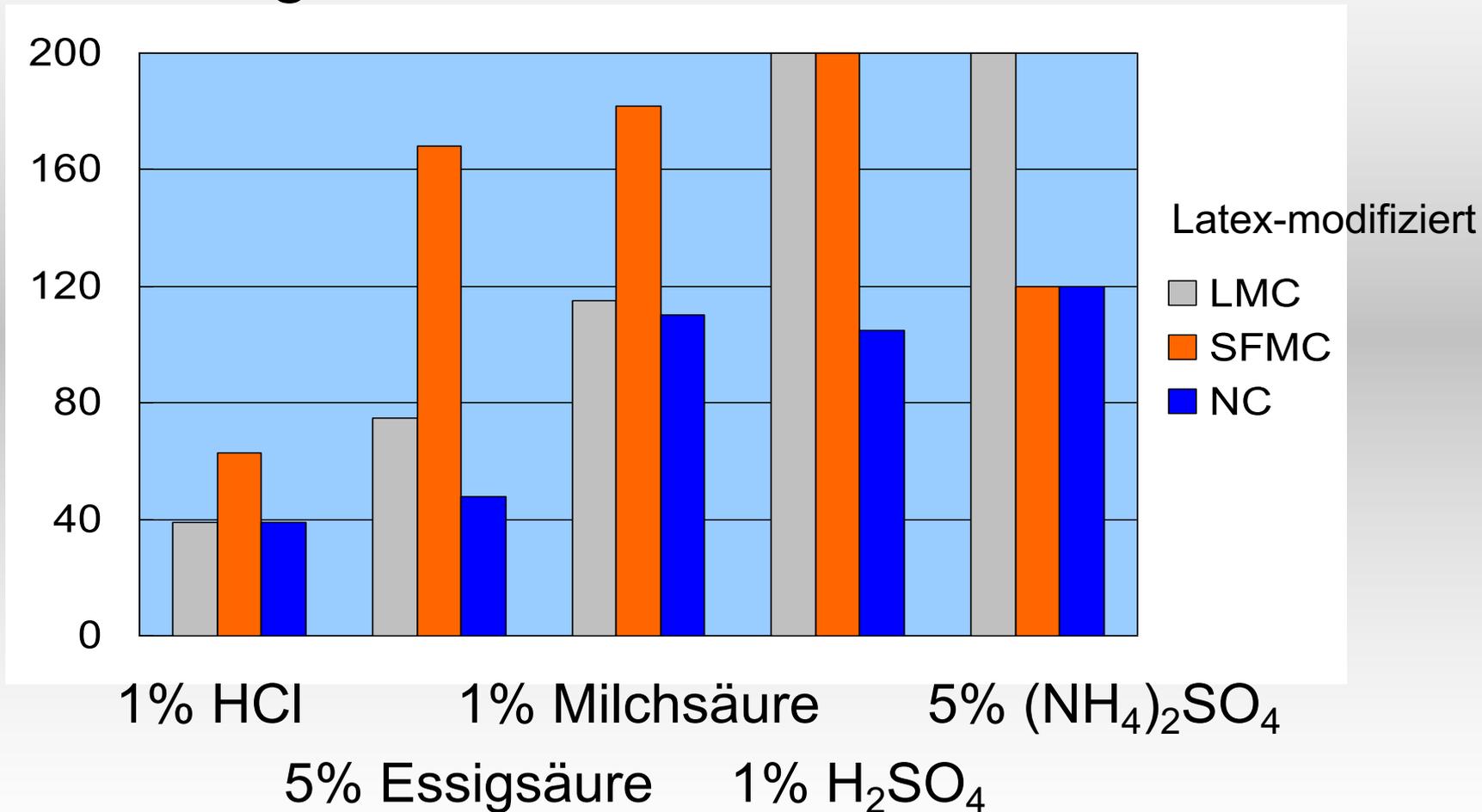


U.S. ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENT STATION

# Erhöhter Widerstand gegen aggressive Medien

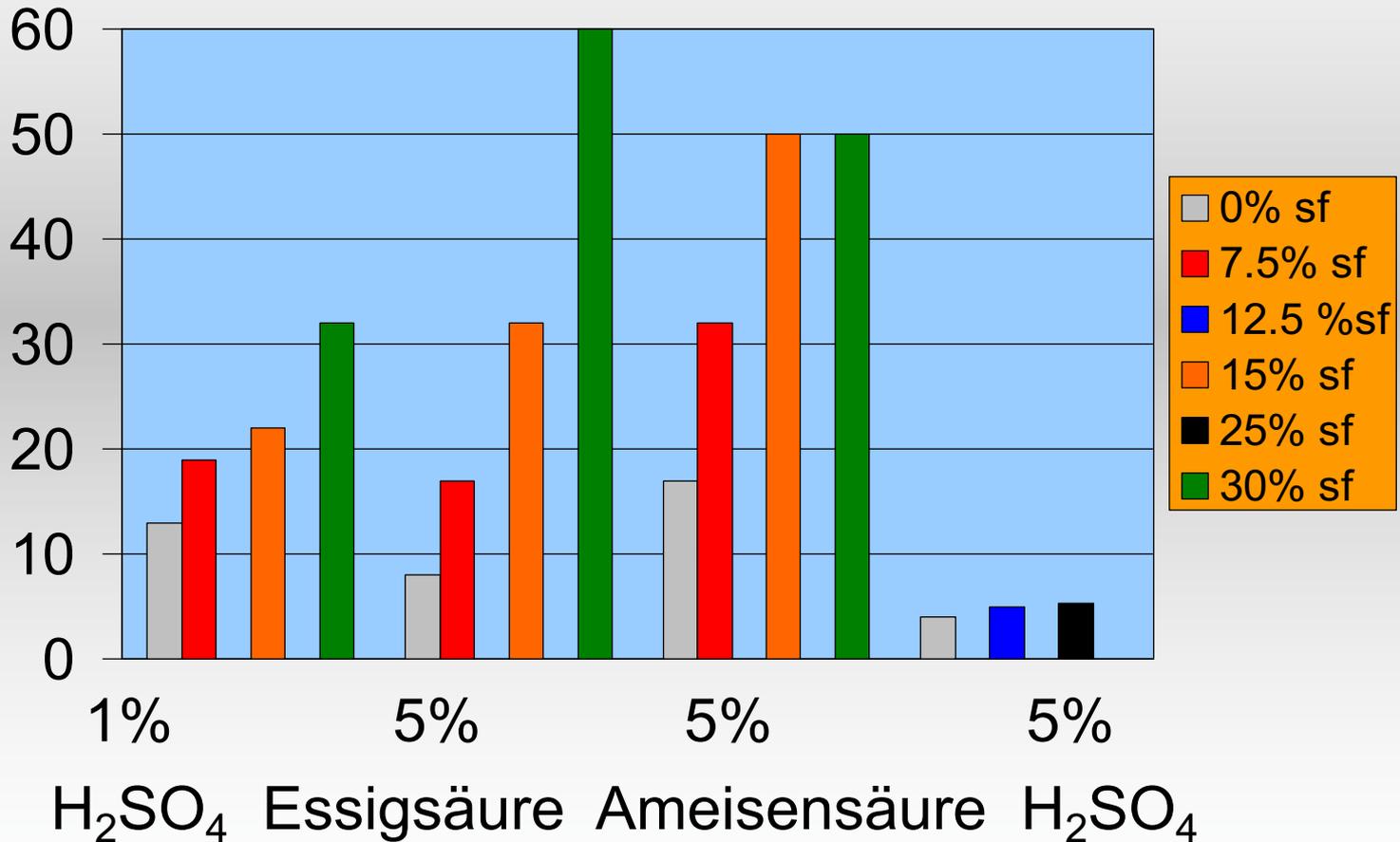
# Widerstand gegen aggressive Medien

## *Tage bis zu 25 % Masseverlust*



# Widerstand gegen aggressive Medien

## Zyklen bis 25 % Masseverlust









# *Silicastaub- Spritzbeton*

# Vorteile von Silicastaub für Spritzbeton

- Reduktion des Rückprallverlustes um bis zu 50 %
- Erhöhte Schichtdicke in einem Durchgang von bis zu 300 mm
- Höhere Verbundfestigkeit
- Verbesserte Kohäsion vermindert Auswaschungen bei Reparaturen and Stützen und Wänden im

# Beispielanwendung

Nachträgliche Verstärkung zum Schutz gegen Erdbeben

Littlerock Staudamm, California

## Anforderung:

Ausreichender Widerstand gegen das größte zu erwartende Erdbeben

Druckfestigkeit: 42 MPa nach 28 Tagen für die 11 cm dicke Deckschicht

# Betonrezeptur

- Portlandzement, CEM I 405 kg/m<sup>3</sup>
- Silicastaub 41 kg/m<sup>3</sup>
- Stahlfasern 60 kg/m<sup>3</sup>
- w/(z+s) 0,45
- Slump 50 - 100 mm

# Betoneigenschaften

- Druckfestigkeit, Bohrkerne:  
nach 28 Tage im Mittel  $> 50$  MPa
- Haftzugfestigkeit übertraf die Anforderung von  
1,0 MPa
- Mittlere Auftragdicke: 119 mm













# Klebrigkeit Silicastaub-Beton



# Nachbehandlung

# *Nachbehandlungsmittel unmittelbar nach dem Fertigstellen der Oberfläche aufbringen*



# Schutz des erhärtenden Betons



# Schutz des erhärtenden Betons



*Winter nicht vergessen*

