

- 4 Wiederverwertung von Betonbruch
- 4.1 Definitionen und Begriffe
- 4.2 Verbrauch an Primärmaterial,  
Abfallentstehung
- 4.3 Aufbereitung von Betonbruch
- 4.4 Eigenschaften von Betonrezyklaten
  - 4.4.1 Merkmale des Primärmaterials
  - 4.4.2 Betonrezyklate
- 4.5 Verwertungstechnologien
  - 4.5.1 Verwertung im Straßenbau
  - 4.5.2 Verwertung als rezyklierte Gesteinskörnung
  - 4.5.3 Anwendungsbeispiele

Beton: Baustoff aus dem Bindemittel Zement und einem Mineralstoff

Einsatzgebiete: Straßen- und Verkehrsbau, Wasserbau, Hochbau

Beton ist der “Infrastrukturwerkstoff”. Nur auf der Grundlage von Beton sind moderne Infrastrukturbauten möglich.



**Betonbruch: Sammelbezeichnung für aus Straßen- und Verkehrsflächen sowie aus Bauwerken zurückgewonnenen Beton**

**Betonabbruch**

Material, das bei Abbruch- und Umbauarbeiten von Betonbauwerken oder beim Aufnehmen von Betonwaren anfällt.

**Betonaufbruch**

Material, das beim Aufbruch von Fahrbahndecken aus Beton anfällt.

## Recycling-Baustoff RC

Bezeichnung für aus Betonbruch hergestellte  
Gesteinskörnungen zum Einsatz im Straßenbau

## Rezyklierte Gesteinskörnungen

Bezeichnung für aus Betonbruch hergestellte  
Gesteinskörnungen zum Einsatz im Beton

Hauptbestandteil von Beton sind Gesteinskörnungen, die nach der Dichte und der Korngröße klassifiziert werden.

Die Korngrößenklassifizierung gilt ebenfalls für rezyklierte Zuschläge.

Korngröße	Gebrochene Gesteinskörnungen	Natürliche Gesteinskörnungen
0/2 mm	feine gebrochene Gesteinskörnung (Brechsand)	feine natürliche Gesteinskörnung (Sand)
> 32 mm	grobe gebrochene Gesteinskörnung (Splitt)	grobe natürliche Gesteinskörnung (Kies)

Der Zusammenhalt der Gesteinskörnungen wird durch das Bindemittel Zement erreicht.

- 4 Wiederverwertung von Betonbruch
  - 4.1 Definitionen und Begriffe
  - 4.2 Verbrauch an Primärmaterial,  
Abfallentstehung
  - 4.3 Aufbereitung von Betonbruch
  - 4.4 Eigenschaften von Betonrezyklaten
    - 4.4.1 Merkmale des Primärmaterials
    - 4.4.2 Betonrezyklate
  - 4.5 Verwertungstechnologien
    - 4.5.1 Verwertung im Straßenbau
    - 4.5.2 Verwertung als rezyklierte Gesteinskörnung
    - 4.5.3 Anwendungsbeispiele

# Gegenwärtiger Bedarf der Bauindustrie an mineralischen Rohstoffen und an Zement

## Quellen

**DERA** Deutsche Rohstoffagentur  
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

### DERA Rohstoffinformationen



6,644	5,610	3,028	0,7	1,290	1,3	96,2
8,514	267	1,018	94,173	100	33	
92,8	126,1	44,7	1,728,9	418,9	0,8458	
472,1	891,0	1,309,7	40,8	754,4	202,7	
1,294,8	2010	207,8	631,7	1,783,36		
548,7	393,8	9,9	219,7	226,5	36,0	
363,8	2,479,9	226,1	781,8	983,3	1,722,8	
1,962,1	1,963,3	96,2	1,016,0	3,079,3,3		
388,7	1,8	1,0	1,8	388,7	1,016,0	
1,302,5	10	-1,8	4,000	30,8	100,0,8	
44,8	96,4	107,4	37,9	220	12,0	

Deutschland  
Rohstoffsituation 2010



### Konjunkturperspektiven 2011

Bundesverband Baustoffe –  
Steine und Erden e.V.  
German Building Materials  
Association





**bbs** die Baustoffindustrie  
Bundesverband Baustoffe –  
Steine und Erden e.V.

## Input an mineralischen Rohstoffen 2010

Input 2010			
Hochbau	Mio. t/a	Tiefbau	Mio. t/a
Gesteinskörnungen für die Mörtel- und Betonherstellung	171,8	Gesteinskörnungen für ungebundene Anwendungen	160,8
Kies/Sand für sonstige Anwendungen	13,4	Gesteinskörnungen für die Betonherstellung	76,9
Rezyklierte Gesteinskörnungen	0,8	Kies/Sand für sonstige Anwendungen	24,1
		Industrielle Nebenprodukte	31,5
		RC-Baustoffe	64,4
Summe Gesteinskörnungen	186,0	Summe Gesteinskörnungen	357,7
Rohstoffe für die Baustoffherstellung		Rohstoffe für die Baustoffherstellung	
Kalkstein für Zement	26,0	Kalkstein für Zement	19,3
Sand u.a. für Kalksandsteine	5,9		
Sand u.a. für Porenbeton	0,8		
Ton für Ziegel	8,8		
Gips	8,3		
Gesamtsumme	235,8	Gesamtsumme	377,0

## Zeitreihe zum Bauabfallaufkommen

	1996	1998	2000	2002	2004	2006	2008
Aufkommen [Mio. t]							
Bodenaushub	136,8	128	163,6	140,9	128,3	106	107,3
Bauschutt (aus dem Hochbau)	58,1	58,5	54,5	52,1	50,5	57,1	58,2
Straßenaufbruch	17,6	14,6	22,3	16,6	19,7	14,3	13,6
Gemischte Bau- und Abbruchabfälle (1996 inkl. Abbruchholz, ab 2004 inkl. Gipsabfälle)	7,5	4,0	11,8	4,3	1,9	10,9	12,4
Gipsabfälle					0,3	0,4	0,5
Gesamt ohne Bodenaushub	83,2	77,1	88,6	73,0	72,4	82,7	84,7
Gesamt mit Bodenaushub	220,0	205,1	252,2	213,9	200,7	188,7	192,0

## Zeitreihe zur Verwertung

Verbleib [Mio. t]							
	1996	1998	2000	2002	2004	2006	2008
Straßenbau	38,2	40,4	42,5	35,5	32,9	37,4	32,75
Erdbau	13,4	11,8	11,9	9,9	12,3	12,2	15,45
Beton	1,6	0	1,9	0,8	2,4	1,1	0,8
Sonstiges	5,3	3	5,1	4,9	2	4,7	8,7
Gesamt	58,5	55,2	61,4	51,1	49,6	55,4	57,7

Mineralische Bauabfälle  
 Monitoring 2008



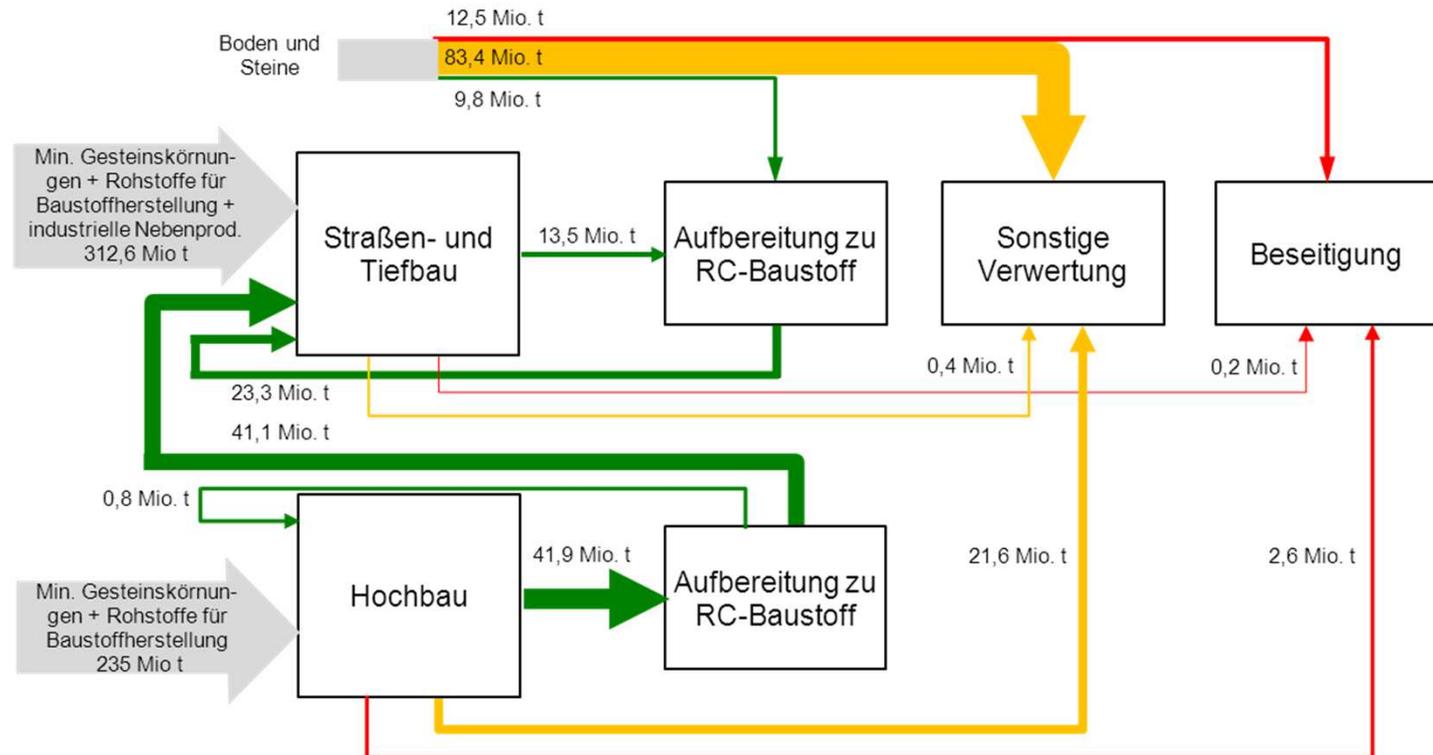
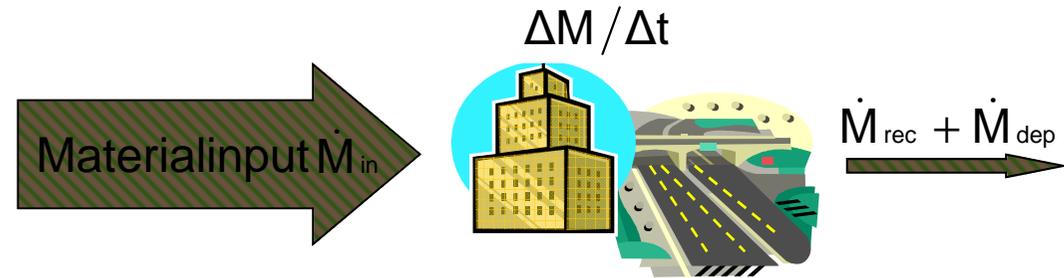
## Output aus dem Bausektor

Output 2010		Verwertungssektoren	
	Mio. t/a		Mio. t/a
Bauschutt		Straßenbau	35,1
Aufbereitung	41,6	Erdbau	14,6
Sonstige Verwertung	9,3	Beton und Asphalt	11,0
Beseitigung	2,2	Sonstiges	4,5
Summe	53,1	Summe	65,2
Straßenaufbruch			
Aufbereitung	13,5		
Sonstige Verwertung	0,4		
Beseitigung	0,2		
Summe	14,1		
Baustellenabfälle			
Aufbereitung	0,3		
Sonstige Verwertung	12,3		
Beseitigung	0,4		
Summe	13,0		

# Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

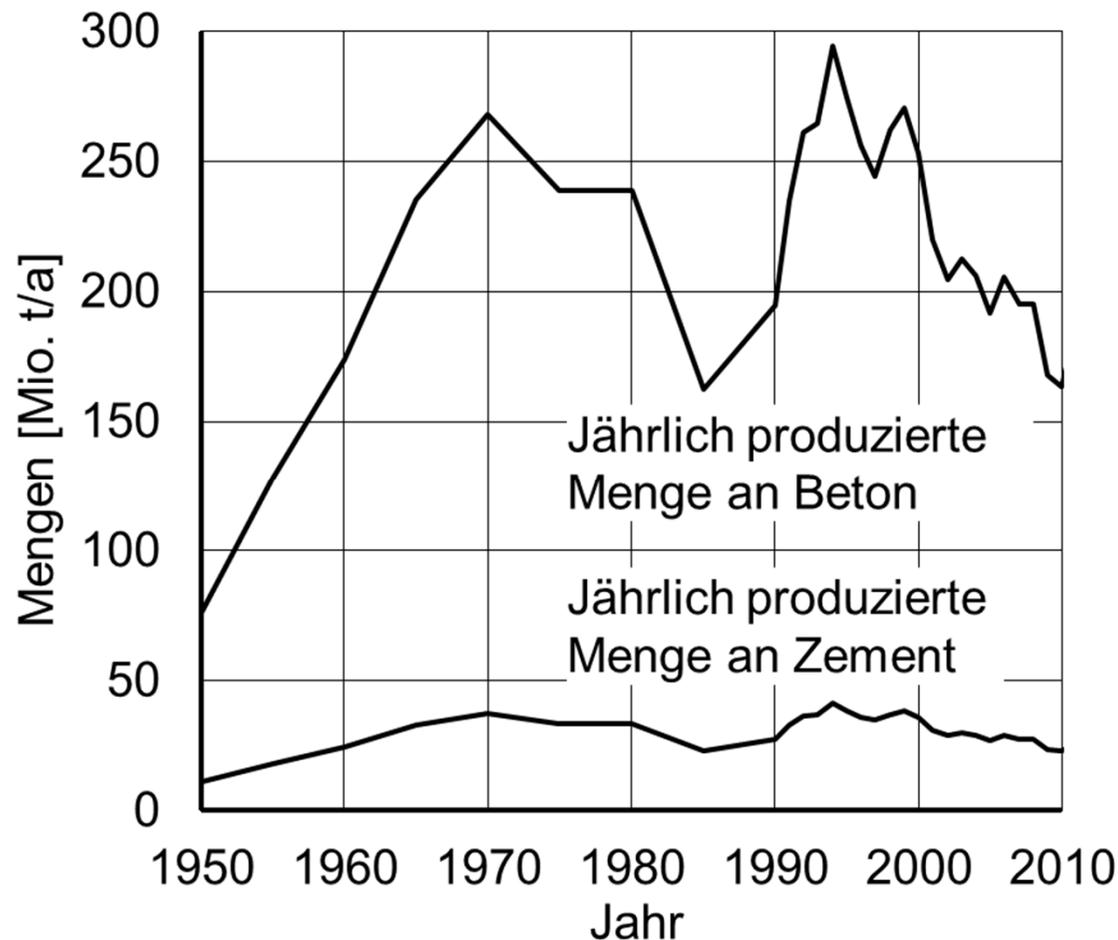
## Massenbilanz der Baubranche

## Definition der Recycling- und der Substitutionsquote



## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

### Zeitreihe zum Zementverbrauch und daraus berechnete Betonherstellung



### Umrechnung Beton = 7,244 \* Zement

Betonausgangsstoff	C30/37
Gesteinskörnungen [kg/m <sup>3</sup> ]	1790
... davon Sand [kg/m <sup>3</sup> ]	627
... davon Kies [kg/m <sup>3</sup> ]	805
... davon Splitt [kg/m <sup>3</sup> ]	358
Zement [kg/m <sup>3</sup> ]	320
Wasser [kg/m <sup>3</sup> ]	170
Flugasche [kg/m <sup>3</sup> ]	80
Betonverflüssiger [kg/m <sup>3</sup> ]	1,28

Quelle: Ökobilanzielle Baustoffprofile für Transportbetone der Druckfestigkeitsklassen C20/25, C25/30 und C30/37  
 Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. (FTB), 2007.

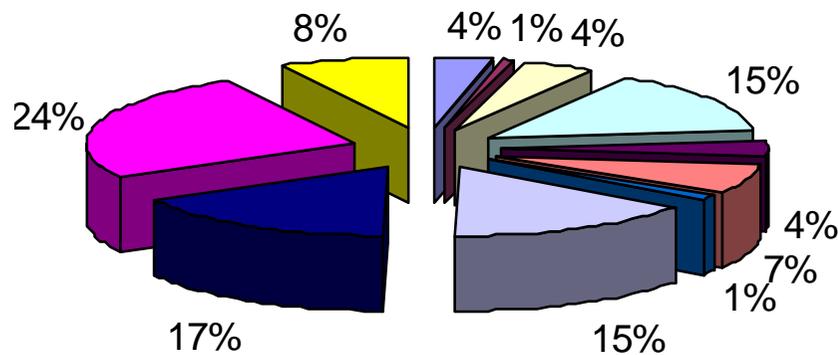
## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

### Differenzierung der Verwertungswege 1999

	Aufkommen	Verwertung	
	[Mio. t/a]	[Mio. t/a]	[%]
Ausbauasphalt	15	15	100
Straßenaufbruch	28	27	96
Bauschutt	45	29	64
Baumischabfälle	12	4	33

= Betonaufbruch

= Betonabbruch +  
Mauerwerkabbruch



- Landschaftsbau, Deponiebau, Rekultivierung
- Lärmschutzwälle
- Unterbau, Dammbau
- Verfüllmaterial
- Bodenverbesserung
- Ungebundene Verkehrsflächen, Wegebau
- hyd. gebundene Tragschicht
- Frostschutzschicht
- Schottertragschicht
- Sonstiges
- Zwischenlager

Einsatzgebiete  
für  
Betonrezyklate

- 4 Wiederverwertung von Betonbruch
  - 4.1 Definitionen und Begriffe
  - 4.2 Verbrauch an Primärmaterial,  
Abfallentstehung
  - 4.3 Aufbereitung von Betonbruch**
  - 4.4 Eigenschaften von Betonrezyklaten
    - 4.4.1 Merkmale des Primärmaterials
    - 4.4.2 Betonrezyklate
  - 4.5 Verwertungstechnologien
    - 4.5.1 Verwertung in Tragschichten
    - 4.5.2 Verwertung als rezyklierter Zuschlag
    - 4.5.3 Anwendungsbeispiele

## Anlagenkonfigurationen

### Aufbereitung in mobilen Anlagen

“Robuste” Produkte für

- Hinterfüllungen, Überschüttungen
- Baugrubenverfüllungen
- Vegetationsschichten
- Lärmschutzwälle, Dämme
- Unterbau
- Untergrundverbesserung

Anzahl der mobilen Anlagen (2010):  
1327, aufbereitete Bauschuttmenge:  
32,9 Mio. t

### Aufbereitung in stationären Anlagen

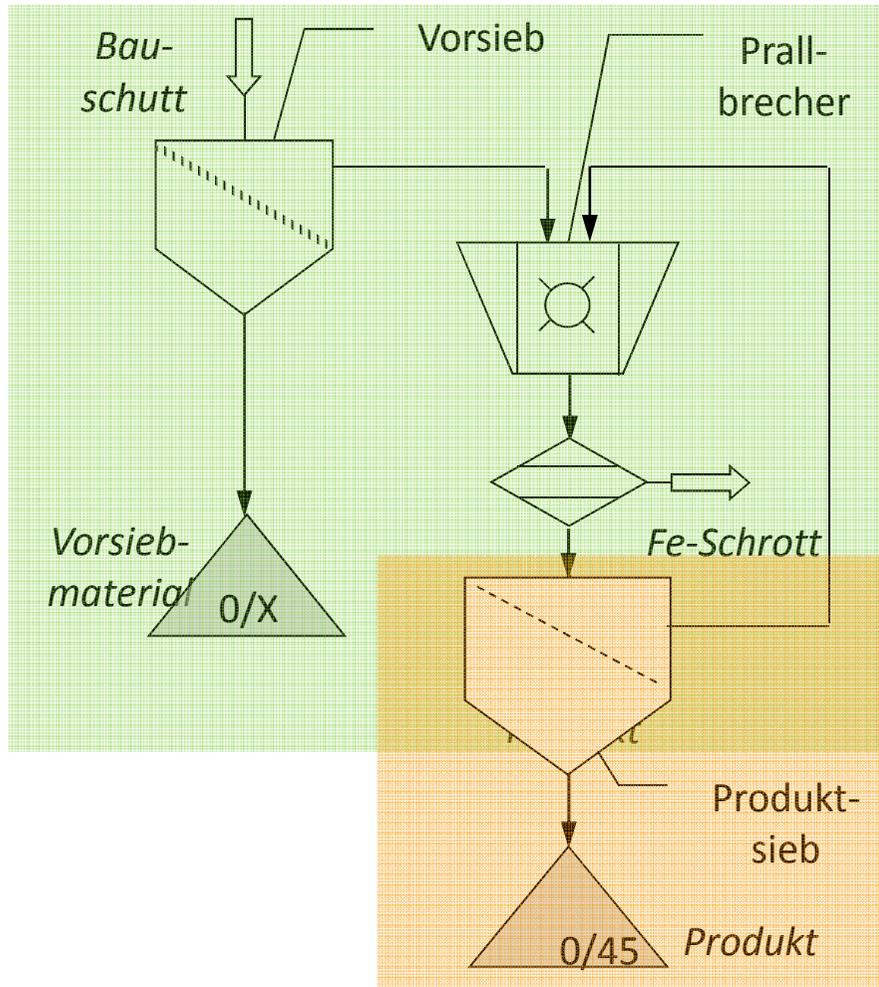
Produkte

- RC-Baustoffe für den qualifizierten Straßenbau
- Rezyklate für die Betonherstellung

Anzahl der stationären Anlagen (2010):  
746, aufbereitete Bauschuttmenge:  
29,7 Mio. t

# Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

## Anlagenfließbild mobil



### Aufgabetrichter (1)

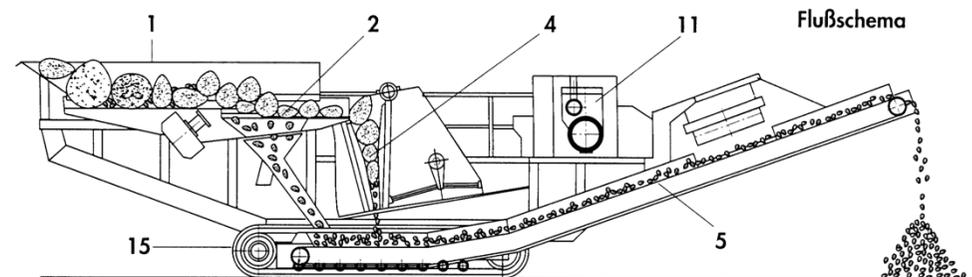
Ausgeführt in einer stabilen Stahlkonstruktion mit verschleißfesten Trichterwänden. Zum Transport können die Trichterwände abgeklappt werden.

### Aufgaberinne (2)

Hergestellt in einer stabilen Stahlkonstruktion mit Schleifauskleidung und einem integrierten Stufenspaltrost. Der Antrieb erfolgt durch Richterregler oder Unwuchtmotore.

### Brecher (4)

Herzstück der Anlage ist ein Kurbelschwingen- oder Pendelschwingenbackenbrecher. Das Brechergehäuse ist in einer stabilen Schweißkonstruktion ausgeführt und mit einer Schleifauskleidung ausgepanzert.



### Antriebseinheit (11)

Die benötigte Antriebsleistung wird als Selbsterzeuger mittels Dieselaggregat oder durch elektrische Fremdeinspeisung bereitgestellt. Es kommen bei der Selbsterzeugung diesel-elektrische, diesel-hydraulische Varianten bzw. beide in Kombination zur Anwendung.

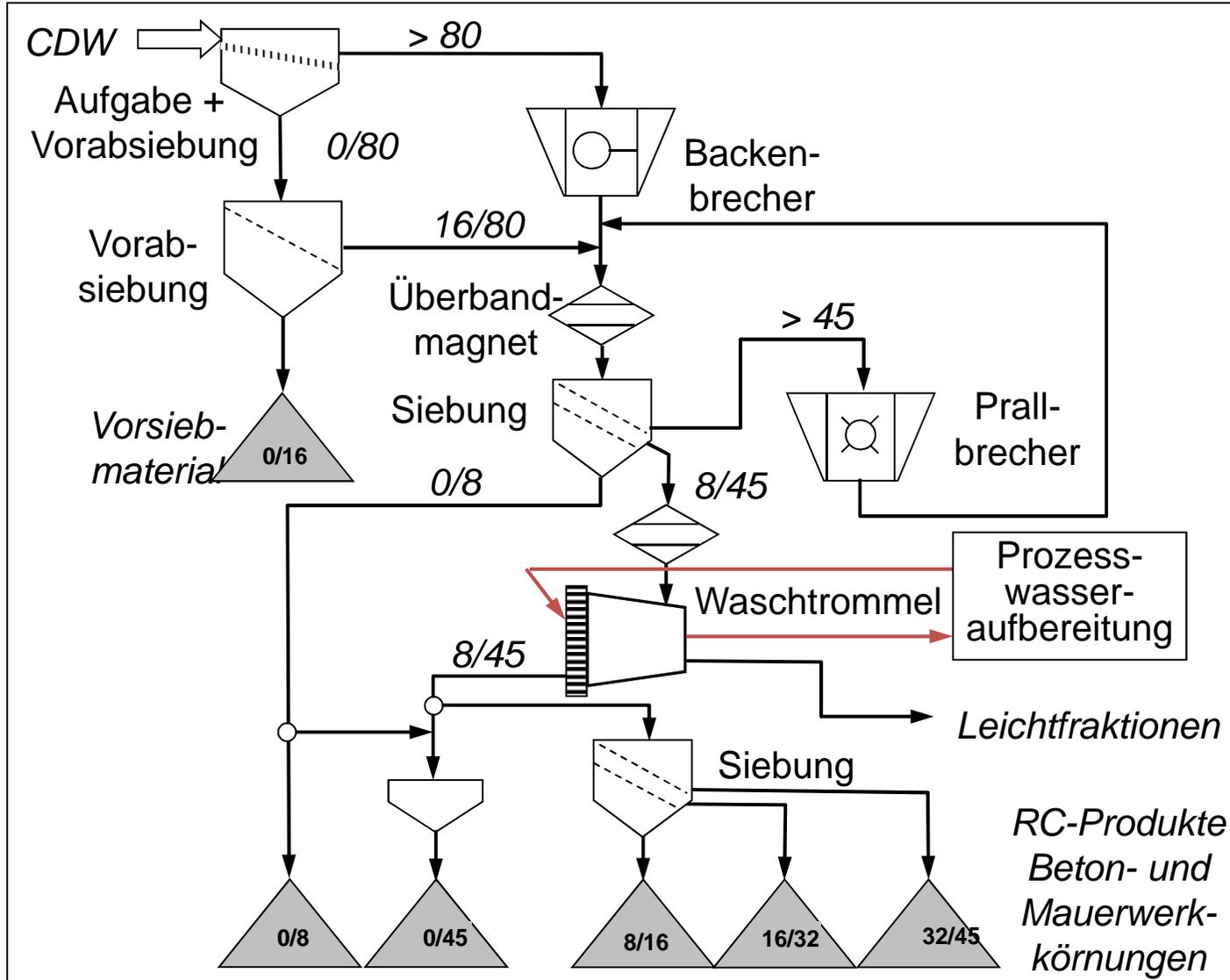
### Abzugsförderer (5)

Der Materialaustrag aus dem Brechbereich erfolgt mittels stabilem Gurtbandförderer.

### Fahrwerk (15)

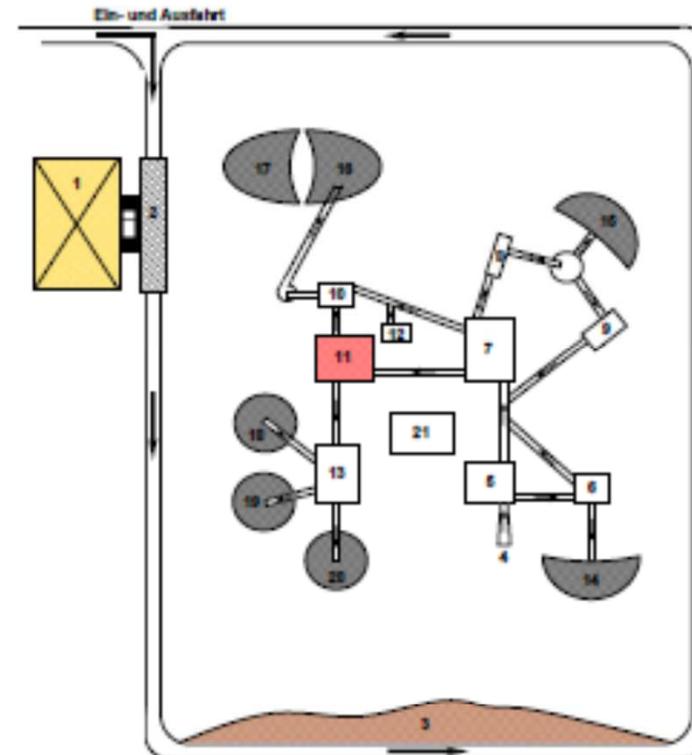
Mobile Brecheranlagen werden als Kufenanlage, Radanlage oder Raupenanlage entsprechend ihrer Aufgabenspezifika hergestellt. Der Transport erfolgt entsprechend ihrer Ausstattung mit Tieflader, als Sattelaufleger oder als Anhänger.

# Anlagenfließbild stationär



- 1 Büro / Annahme / Verkauf
- 2 Waage
- 3 Inputlager
- 4 Plattenband
- 5 Vorabsiebung und Backenbrecher
- 6 Siebstation
- 7 Zwischensieb
- 8 Lesestation
- 9 Prallbrecher
- 10 Verteilertrichter

- 11 hydromechanische Waschanlage
- 12 Feinsand – Rückgewinnungsanlage
- 13 Endsieb
- 14 Halde 0 - 8 aus Vorabsiebung
- 15 Halde > 56
- 16 Halde 0/56
- 17 Halde 0/8
- 18 Halde 32/56
- 19 Halde 16/32
- 20 Halde 8/16
- 21 Drehstrom - Aggregat



## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

### Verfahrensschritte für die Aufbereitung von Bauabfällen

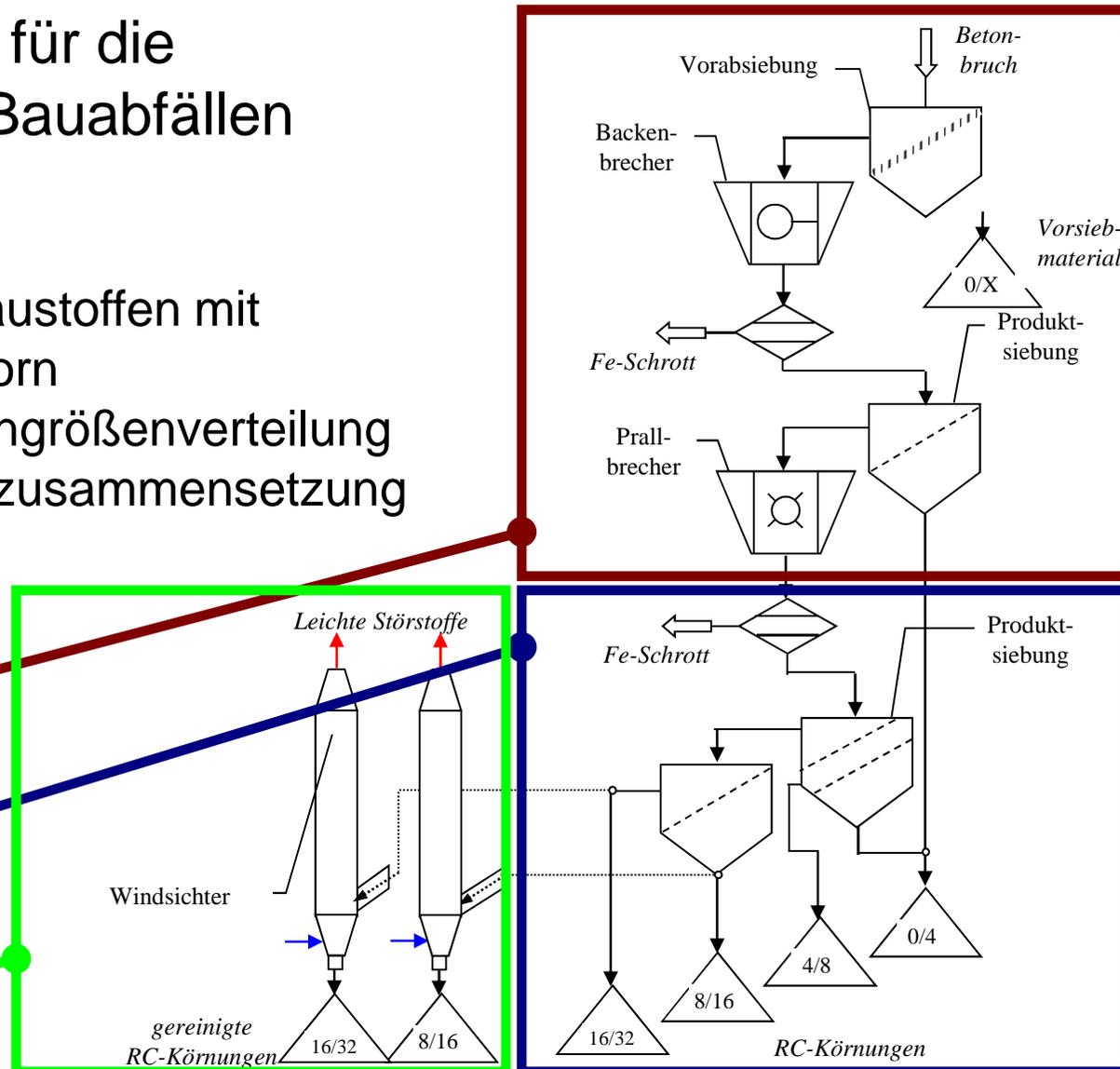
Ziel der Aufbereitung  
 Erzeugung von RC-Baustoffen mit

- definiertem Größtkorn
- mit bestimmter Korngrößenverteilung
- mit definierter Stoffzusammensetzung

**Zerkleinerung**

**Klassierung**

**Sortierung**



## Zerkleinerung

Zerteilen eines Feststoffs durch mechanische Kräfte;  
Resultat ist Abnahme der Partikelgröße.

In Recyclinganlagen dient die Zerkleinerung

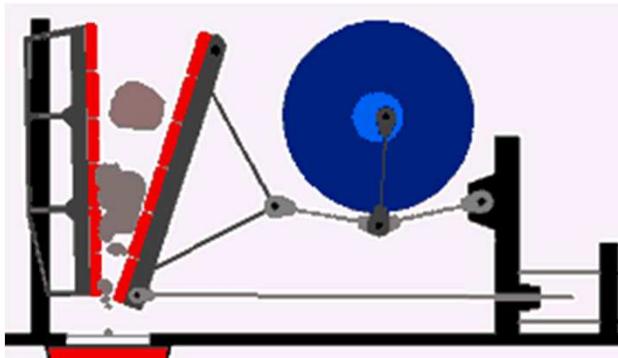
- der Herabsetzung der oberen Korngröße
- der Erzeugung bestimmter Korngrößenverteilungen
- dem Aufschließen von „Verwachsungen“, d.h. dem Freilegen der Einzelkomponenten aus Verbundstoffen

Grobzerkleinerung, d.h. Brechen dominiert

## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

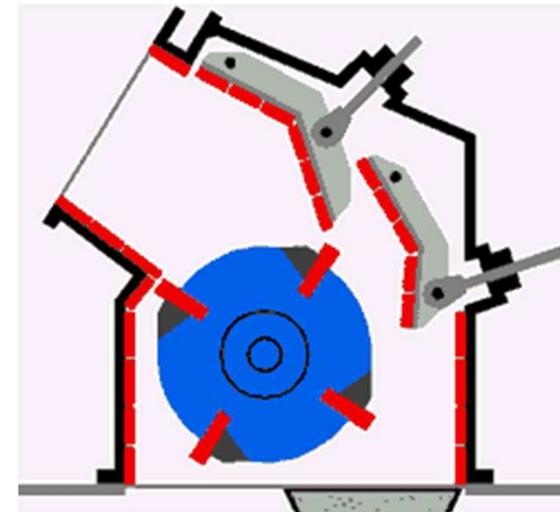
### Backenbrecher

- Materialbeanspruchung durch Druck
- grobes Brecherprodukt
- plattiges Korn



### Prallbrecher

- Materialbeanspruchung durch Prall
- feineres Brecherprodukt
- kubisches Korn



## Gegenüberstellung Backenbrecher $\Leftrightarrow$ Prallbrecher

### Backenbrecher

Zerkleinerungswerkzeuge üben Zwangsbeanspruchung aus. Dadurch werden innere Spannungen erzeugt, die den Bruch oder Gefügestörungen bewirken.

### Vorteile

- robuste Bauweise, um Schwingungen durch den Wechsel von Belastung und Entlastung zu widerstehen
- geringerer Verschleiß
- keine Entstaubung erforderlich

### Prallbrecher

Zerkleinerung ohne Formzwang. Prallbeanspruchung führt zum sofortigen Bruch ohne das Zurückbleiben von inneren Spannungen.

### Vorteile

- günstiges Durchsatz-Masse-Verhältnis
- großes Zerkleinerungsverhältnis
- kubisches Korn
- guter Aufschluss von Verbundbaustoffen, z.B. Beton mit Bewehrung

## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

### Backenbrecher

#### Nachteile

- relativ ungünstiges Durchsatz-Masse-Verhältnis
- geringes Zerkleinerungsverhältnis  
flache Bestandteile werden schlecht zerkleinert
- schlechter Aufschluss (z.B. von Baustahl)

Einsatz entweder als Vorbrecher in zweistufigen Anlagen oder als Produktbrecher in einstufigen Anlagen. Wirtschaftliche Lösung bei geringen Ansprüchen an das Fertigprodukt.

### Prallbrecher

#### Nachteile

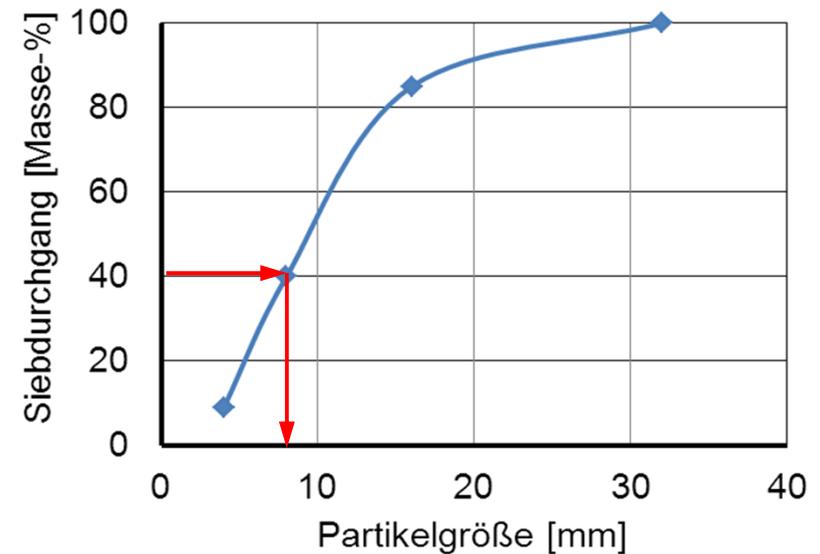
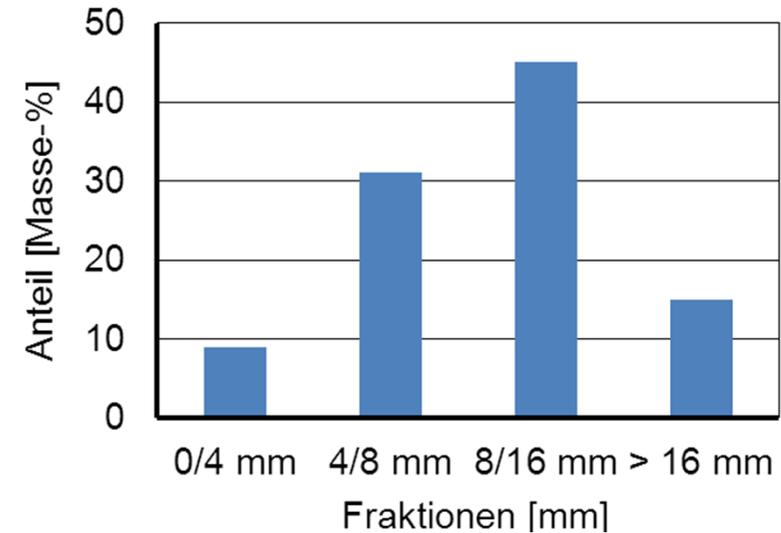
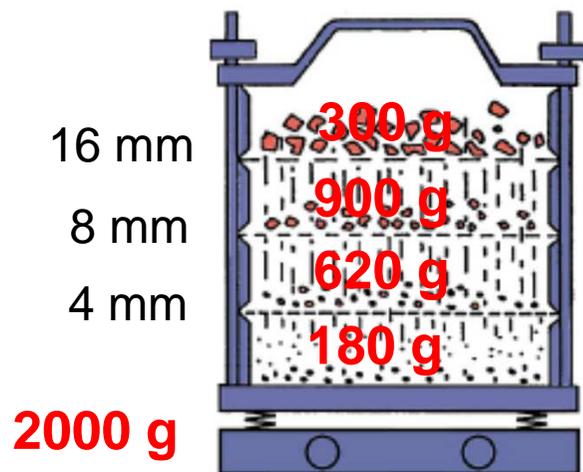
- hoher Verschleiß
- hoher Fein- und Feinstkorngelalt im Endprodukt
- Entstaubung / Staubniederschlag ist notwendig
- hohe Geräuschentwicklung

Einsatz sowohl als Nachbrecher als auch als Produktbrecher möglich. Hohe Endprodukterfordernngen können erfüllt werden.

## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

### Ergebnis des Aufbereitungsschritts Zerkleinern

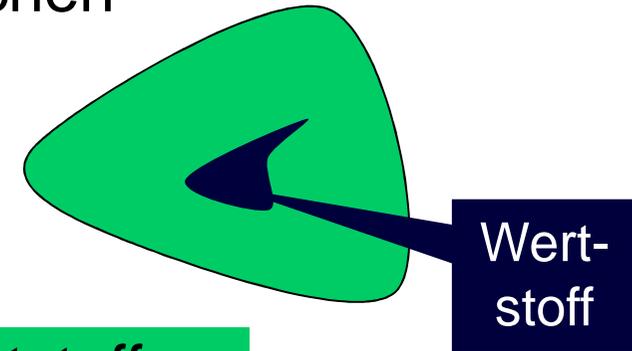
- Korngrößenreduktion
- Erzeugung eines polydispersen Haufwerks
- Aufschluss von Materialverbunden



## Exkurs: Aufschluss von Materialverbunden

### Aufschließen

Freilegen eines Wertstoffs aus mineralischen Rohstoffen oder Sekundärrohstoffen als Voraussetzung für eine nachfolgende Trennung.



$$\text{Aufschlussgrad} = \frac{\text{frei vorliegender Wertstoff}}{\text{insgesamt enthaltener Wertstoff}}$$

### Möglichkeiten des Aufschließen

- Zerkleinerung
- Selektive Löseverfahren
- ????

## Aufschluss durch Zerkleinerung

### Zerkleinerungswiderstand

= f (Verformungsverhalten, Elastizitätsmodul...)

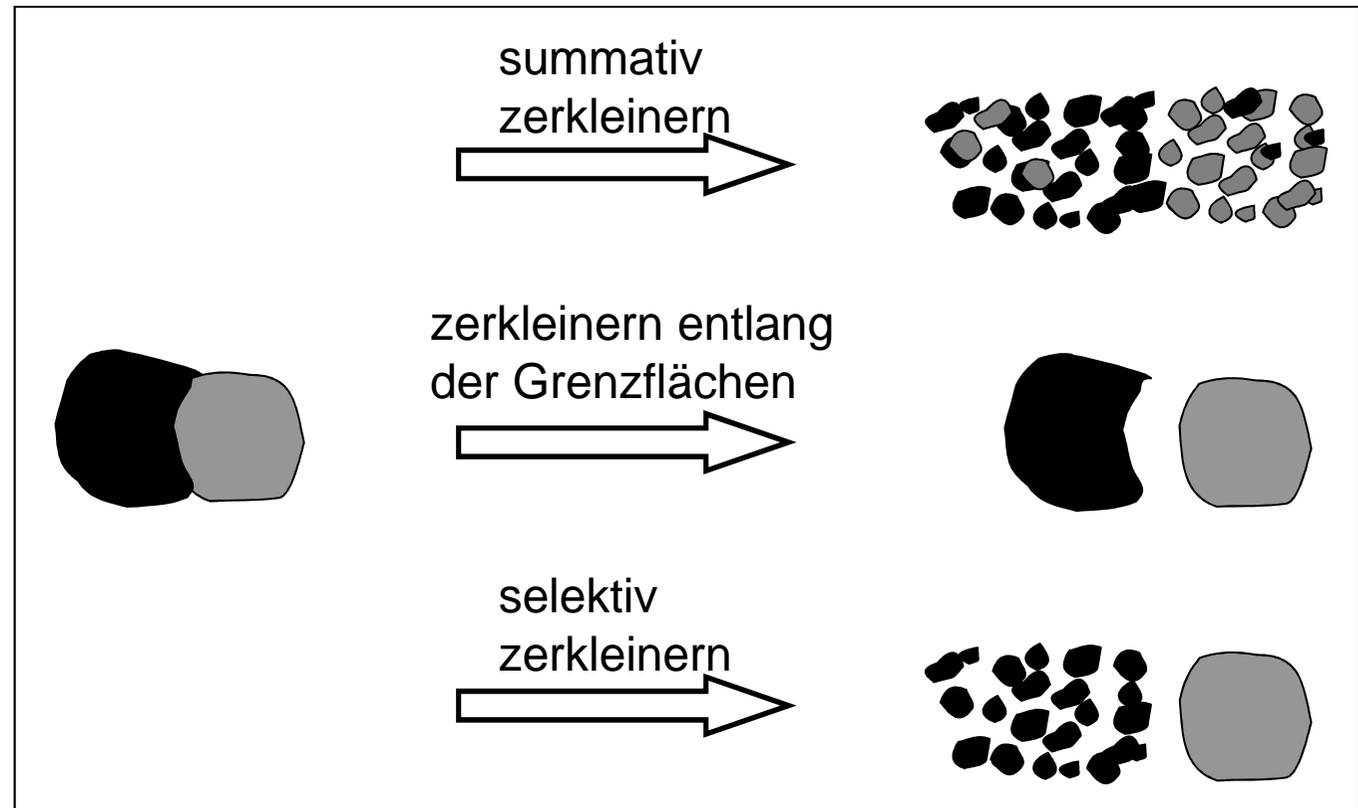
→ theoretische Bruchspannung

→ Druckfestigkeit

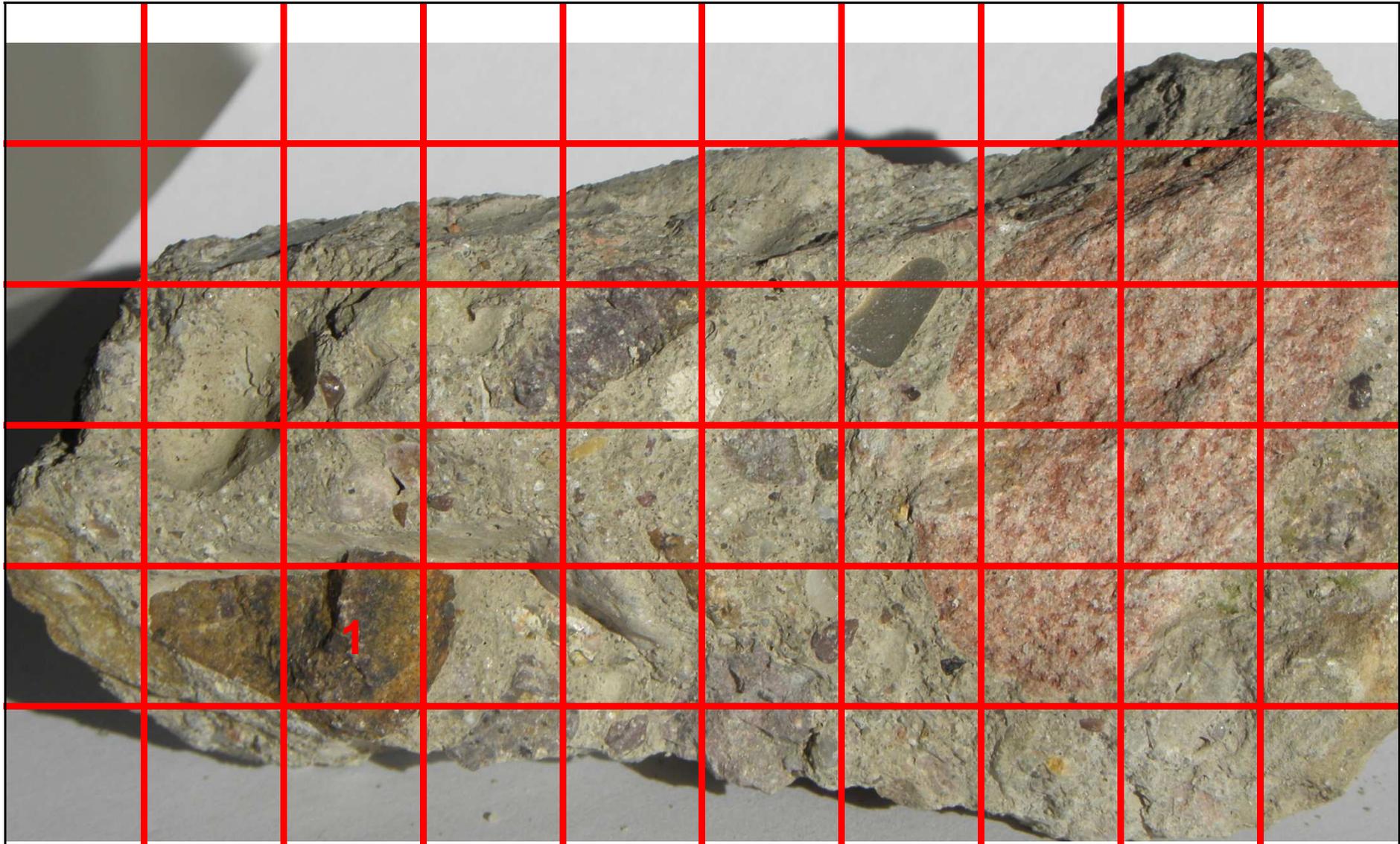
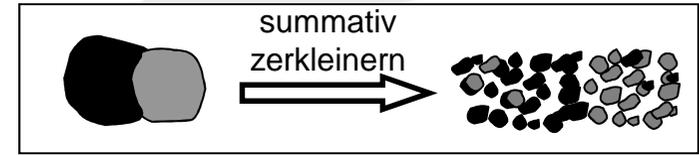
Zerkleinerungswiderstände unterscheiden sich wenig

Geringer Zerkleinerungswiderstand der Grenzfläche

Zerkleinerungswiderstände unterscheiden sich stark

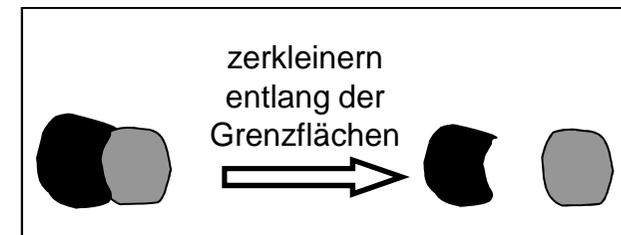


# Aufschluß bei summativer Zerkleinerung

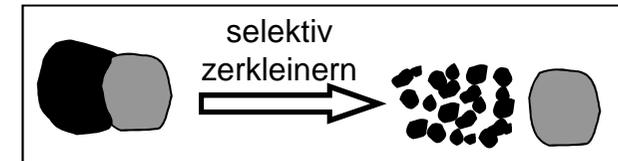




Aufschluß bei Zerkleinerung entlang der Phasengrenzfläche



## Aufschluß bei selektiver Zerkleinerung



$$\text{Aufschlussesgrad} \sim 1 - \frac{\text{Zerkleinerungswiderstand Komponente 1}}{\text{Zerkleinerungswiderstand Komponente 2}}$$

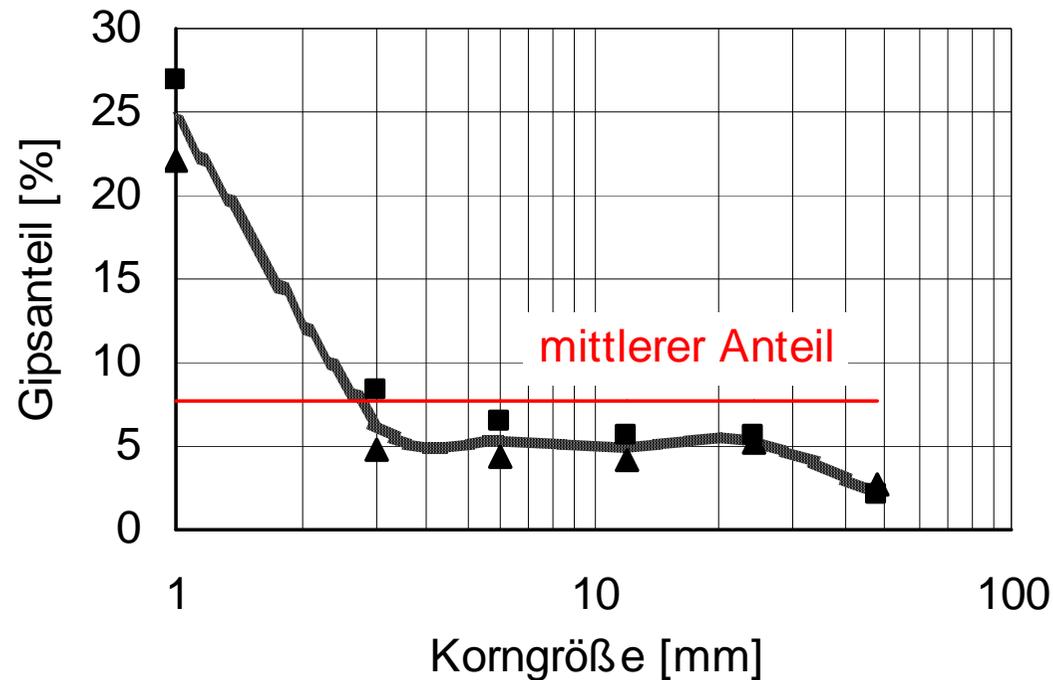
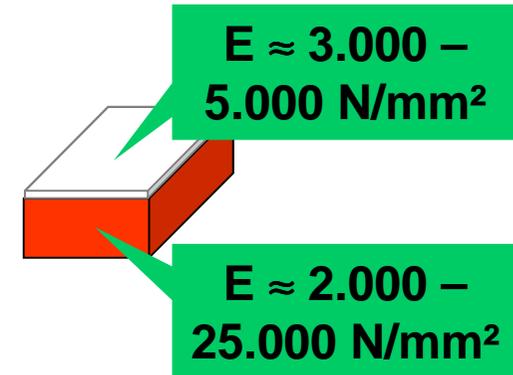
Zerkleinerungswiderstand  
Komponente 1  $\ll$  Komponente 2

Hoher Aufschlussesgrad bei Materialien mit großen Unterschieden im E-Modul und in der Festigkeit.

## Bestätigung durch Zerkleinerungsversuche an (festen) Ziegeln mit Gipsputzen:

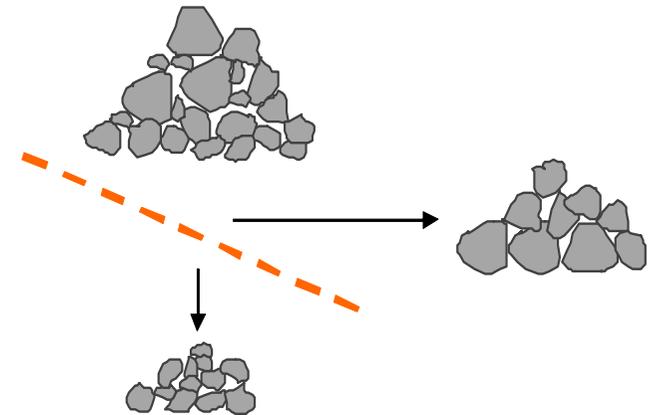
Gipsanteil in den Fraktionen des Brechproduktes aus dem Prallbrecher

Ziegel mit 20 mm Gipsputz



## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

Sieben (Klassieren): Trennung eines körnigen Haufwerks nach geomerischen Abmessungen in Kornfraktionen

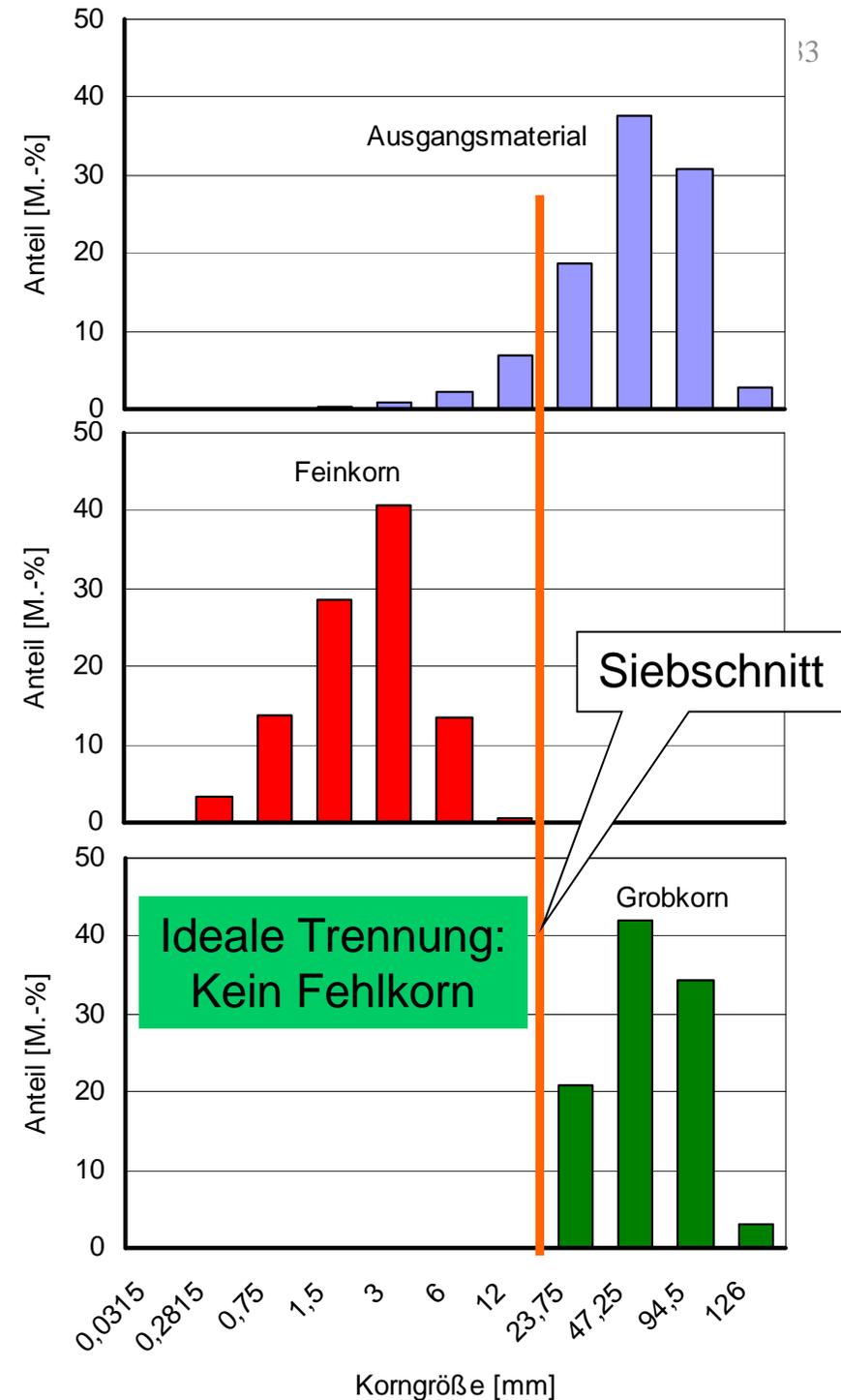
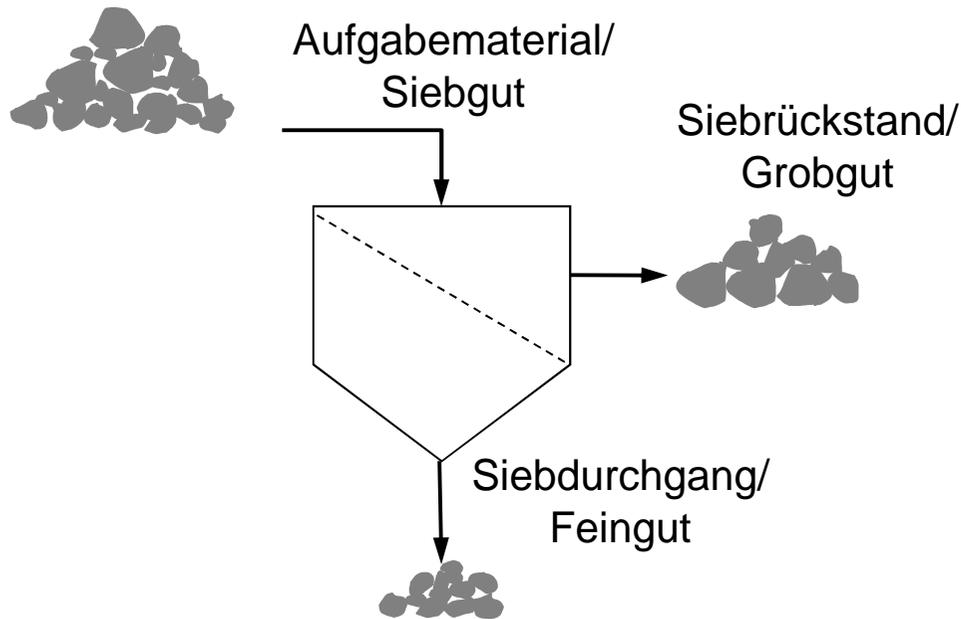


Trennfläche wird durch Siebboden gebildet. Die Abmessungen der Sieböffnungen geben näherungsweise die Trennkorngröße vor.

Unterscheidung der Siebverfahren

- nach Bauform und Funktionsweise der Siebmaschine
- nach der Aufgabe im Verfahrensablauf
- nach den Eigenschaften des Siebgutes

Bei der Siebung erfolgt eine Aufteilung des Aufgabestoffstroms in Siebdurchgang/Feingut und Siebrückstand/Grobgut.



Beurteilung der Siebung anhand von

- Durchsatz und
- Trennschärfe

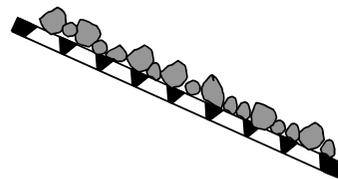
Trennschärfe macht Angaben zu den Fehlkornanteilen.

Bei konstanten Material- und Anlagenparametern gilt:

Trennschärfe  $\sim 1/\text{Durchsatz}$

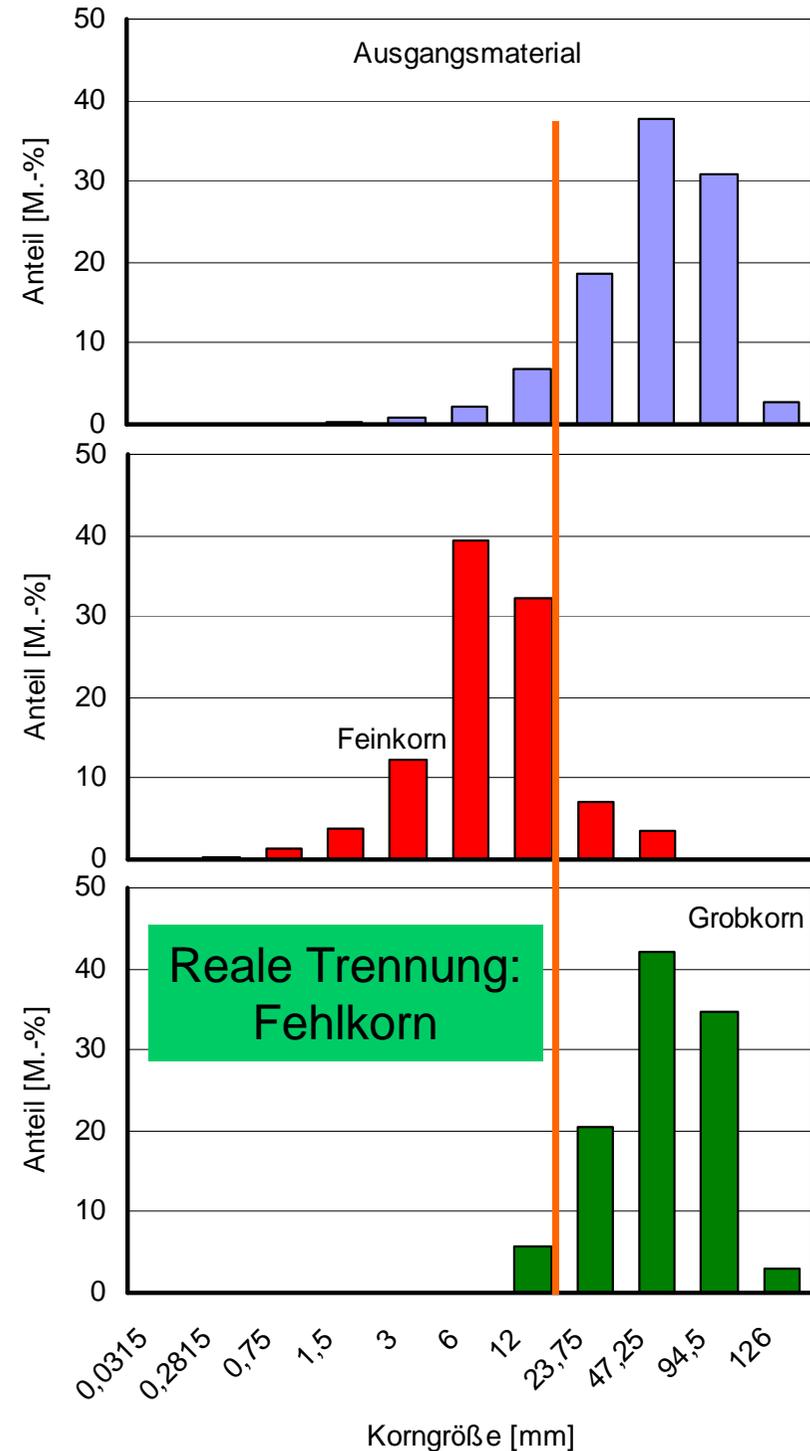
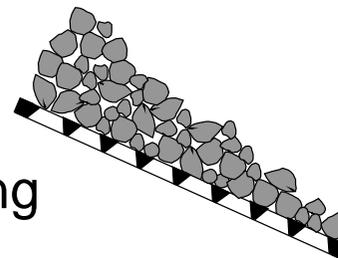
Geringer Durchsatz (oder lange Siebdauer)

→ vollständige Trennung



Hoher Durchsatz (oder kurze Siebdauer)

→ unvollständige Trennung



## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

In Recyclinganlagen dient die Siebung

- der Begrenzung der oberen Korngröße oder der Erzeugung bestimmter Korngrößenverteilungen für die nachfolgende Verwendung, z.B. als Tragschichtmaterial 0-32 mm oder als rezyklierte Körnung 16-32 mm
- dem Abtrennen von Grobanteilen zum Schutz nachgeschalteter Brecher vor Überlastung und Beschädigung
- dem Abtrennen von Feianteilen zur Entlastung von Zerkleinerungsanlagen, zum Schutz vor Verschleiß, zum Vermeiden von Verstopfungen
- der Vorbereitung der Sortierung, wenn diese nur bei engem Körnungsband möglich ist
- ggf. der Sortierung selbst, wenn in bestimmten Kornfraktion, bestimmte Stoffe angereichert sind

Produkte

RC-Korngemische: z.B. 0/32 mm, 0/45 mm oder z. T. 0/56 mm

RC-Brechsande: z.B. 0/2 mm, 0/4 mm oder 0/8 mm

RC-Körnungen  $x_{\min}/x_{\max}$  : z.B. 8/16 mm und 16/32 mm

RC-Schotter: z.B. > 32 mm, > 45 mm oder > 56 mm

## Bauarten von Siebmaschinen

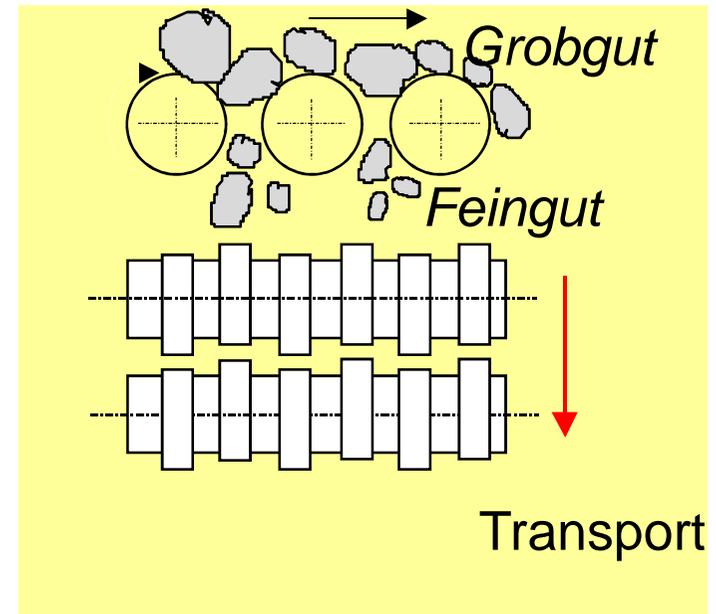
### Vibrationsroste/Vibration grizzly

- Parallele, nur an einer Seite fixierte Stangen
- Rüttel- oder Vibrationsbewegungen durch mechanischen Antrieb
- für die Vorabsiebung vor dem Materialeintritt in den Brecher
- Korngröße des Aufgabematerials bis 1 m x 1 m
- Spaltbreite 10 -100 mm
- Durchsätze bis 1000 t/h



## Rollenroste

- Rotierende Walzen mit aufgesteckten Scheiben, die auch sternförmig ausgebildet sein können (Sternsieb)
- gleichzeitiger Transport und Siebung
- für die Vorabsiebung vor dem Materialeintritt in den Brecher



## Rollenrost: Diskscheider



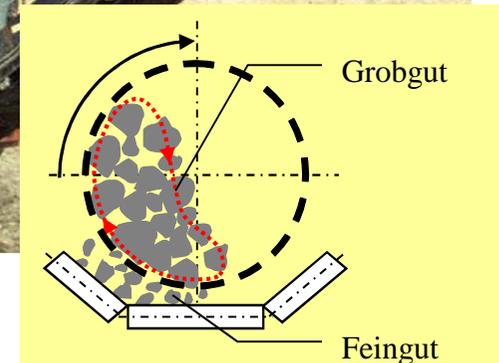
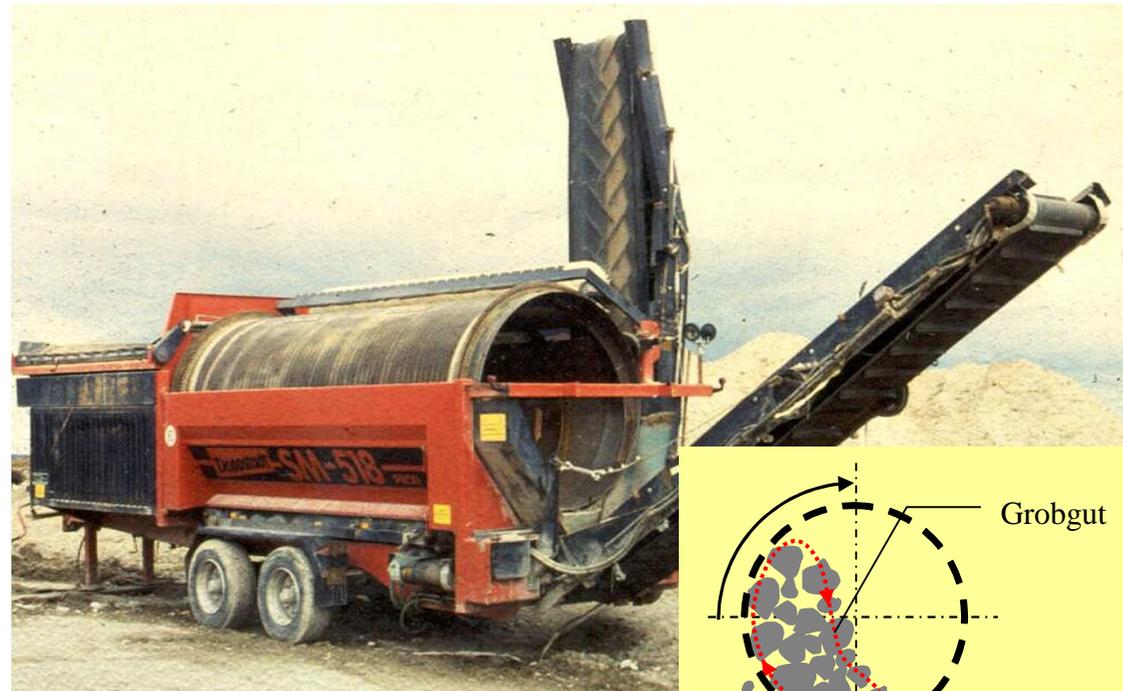
## Trommelsiebmaschinen

Leicht geneigtes, rotierendes, zylindrisches Sieb. Materialzugabe am höheren Ende. Transport durch die Trommel verbunden mit einer ständigen Materialumwälzung. Feinkorn tritt durch die Öffnungen des Trommelmantels aus. Grobkorn verlässt die Trommel axial am unteren Ende.

Beispiele.

$\varnothing = 1800 \text{ mm}$ ,  $l = 4700 \text{ mm}$ ;  
Drehzahl  $0-23 \text{ min}^{-1}$   
Instal. Leistung  $24 \text{ kW}$

$\varnothing = 1800 \text{ mm}$ ,  $l = 7100 \text{ mm}$ ;  
Drehzahl  $0-41 \text{ min}^{-1}$   
Instal. Leistung  $74 \text{ kW}$



## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

### Vorteile von Trommelsieben

- kostengünstig
- robust
- vibrationsfrei

Besonders geeignet für die Siebung von Hausmüll, Verpackungsabfällen, Gewerbeabfällen, Kompost und Baustellenabfällen.

Einsatz in mobilen Anlagen für Korngrößen zwischen 4 mm und 56 mm

### Nachteile

- niedriger spezifischer Siebdurchsatz
- Neigung zum Erblinden



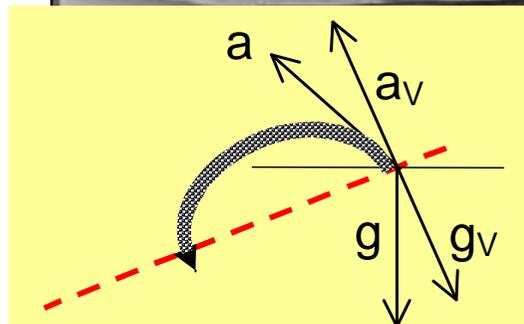
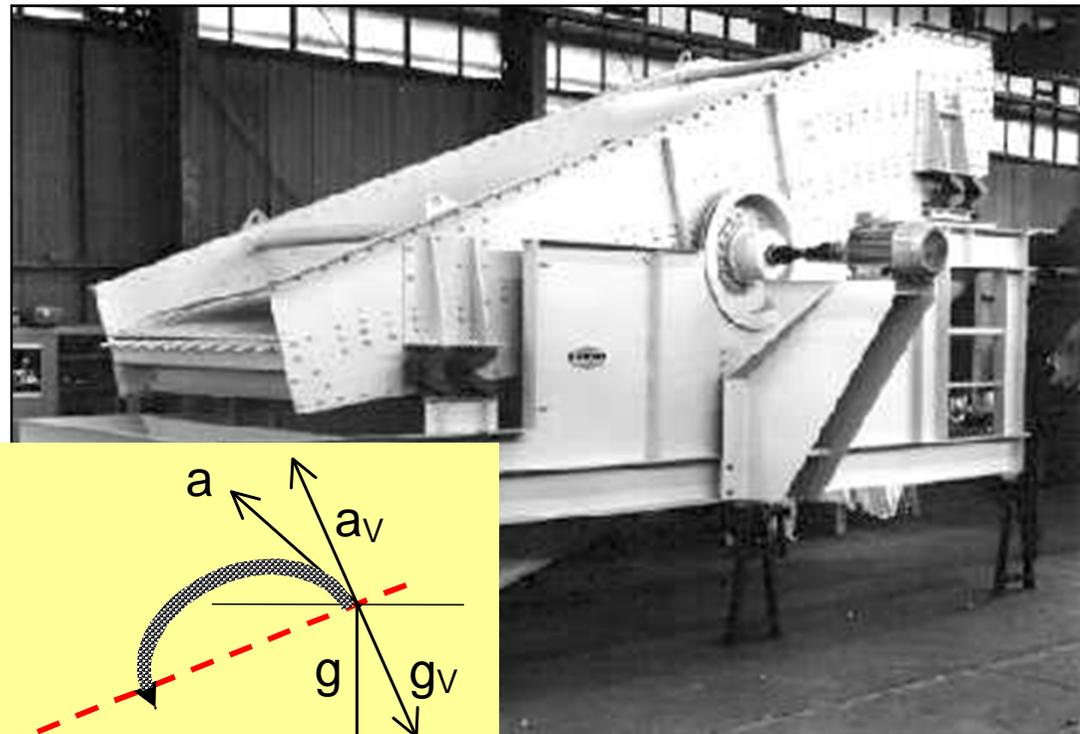
## Schwingsiebmaschinen

### Kreisschwingsiebmaschine, Ellipsenschwingsiebmaschine

Siebkasten, auf welchem der Siebbelag fixiert ist, wird mittels Exzenterantrieben oder Unwuchten in lineare, kreisförmige oder ellipsenförmige Schwingungen versetzt. Partikel des Siebgutes bewegen sich in Mikrowürfen der Neigung des Siebbodens folgend vom Ort der Materialaufgabe zum Austrag.

Beschleunigungskräfte bewirken

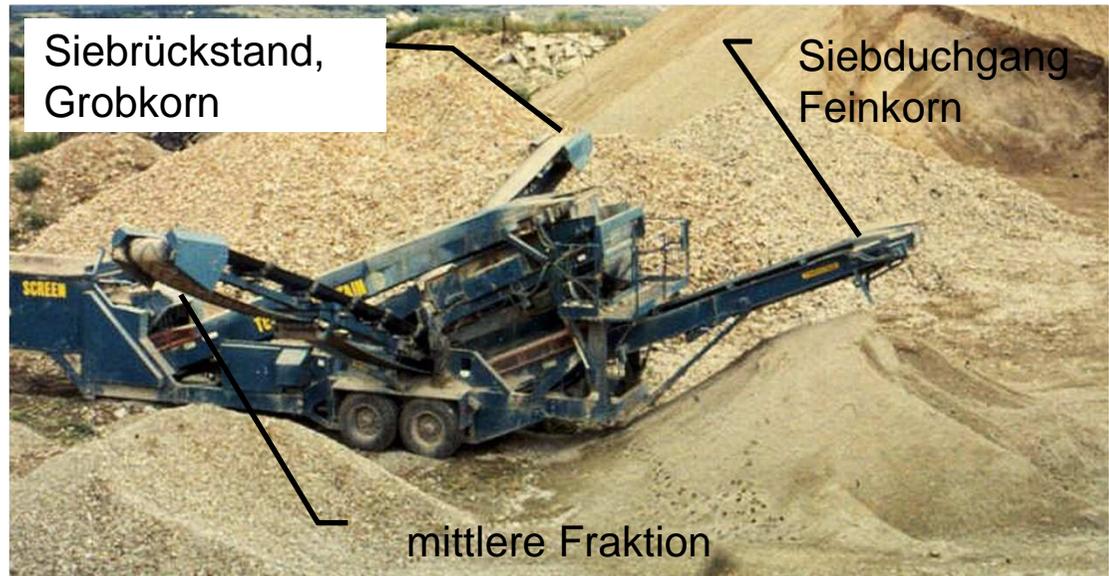
- Auflockerung des Materialbetts
- Schichtung und Anreicherung der feinen Partikel über dem Siebboden
- Durchgang der feinen Partikel durch den Siebboden



## Eindecksiebmaschine 4000 x 1200



## Mobile Zweidecksiebmaschine



## Sortierung: Trennen eines körnigen Haufwerkes nach stofflichen Merkmalen

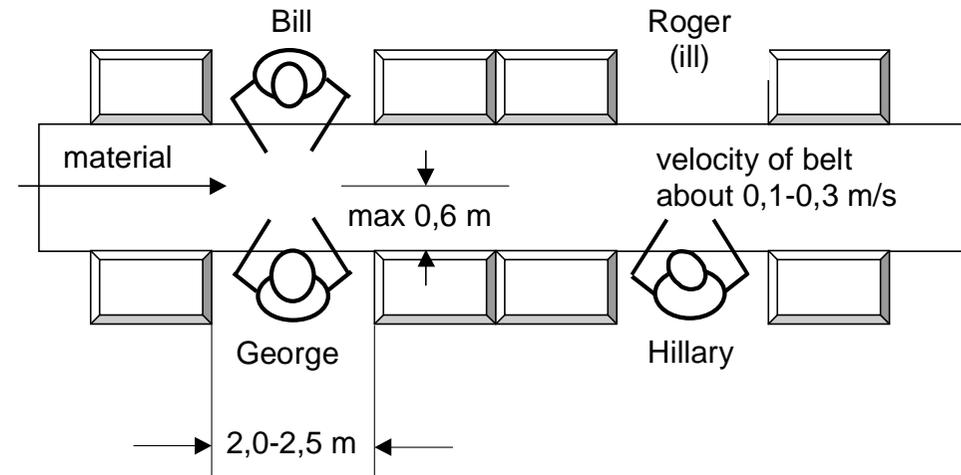
Ziel der Sortierung:

- Entfernung von Schad- und Störstoffen
- Gewinnung von Wertstoffen

Zur Sortierung genutzte Stoffmerkmale:

- Optische Merkmale bei der Handklaubung oder der sensorgestützte Sortierung
- Dichte bei der Windsichtung oder bei nassen Sortierverfahren
- mag. Eigenschaften beim Überbandmagnet

## Handklaubung



## Handklaubung



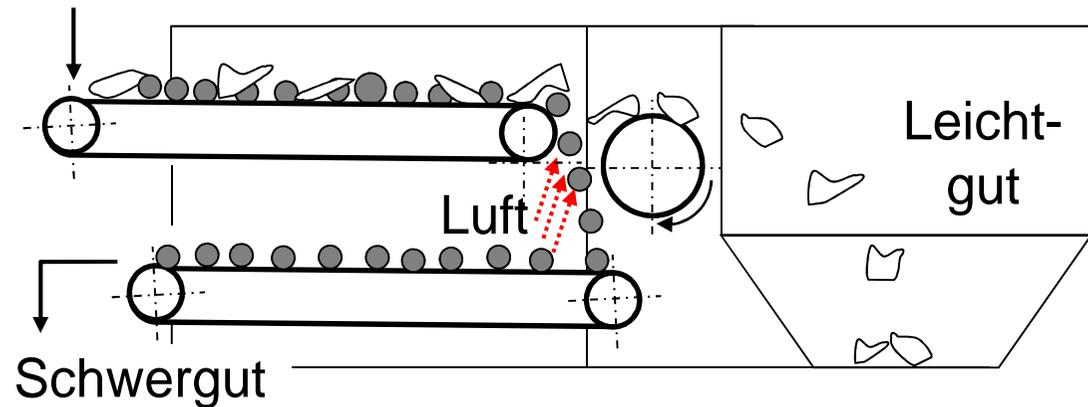
## Klaubung mittels Sortiergreifer



## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

Trockene Sortierung mittels Windsichter zur Abtrennung leichter Störstoffe mit Dichten  $< 300 \text{ kg/m}^3$  wie Dämmstoffe, Folien, Papier...

### Aufgabe



Quelle: Eberhard, Zürich 2007)

- 4 Wiederverwertung von Betonbruch
  - 4.1 Definitionen und Begriffe
  - 4.2 Verbrauch an Primärmaterial, Abfallentstehung
  - 4.3 Aufbereitung von Betonbruch
  - 4.4 **Eigenschaften von Betonrezyklaten**
    - 4.4.1 **Merkmale des Primärmaterials**
    - 4.4.2 Betonrezyklate
  - 4.5 Verwertungstechnologien
    - 4.5.1 Verwertung im Straßenbau
    - 4.5.2 Verwertung als rezyklierte Gesteinskörnung
    - 4.5.3 Anwendungsbeispiele

Kompositwerkstoff aus mineralischem Bindemittel und Gesteinskörnungen. Beide Bestandteile einschließlich des zugegebenen Wassers sind eigenschaftsbestimmend.

Drei „Eigenschaftstypen“ können unterschieden werden:

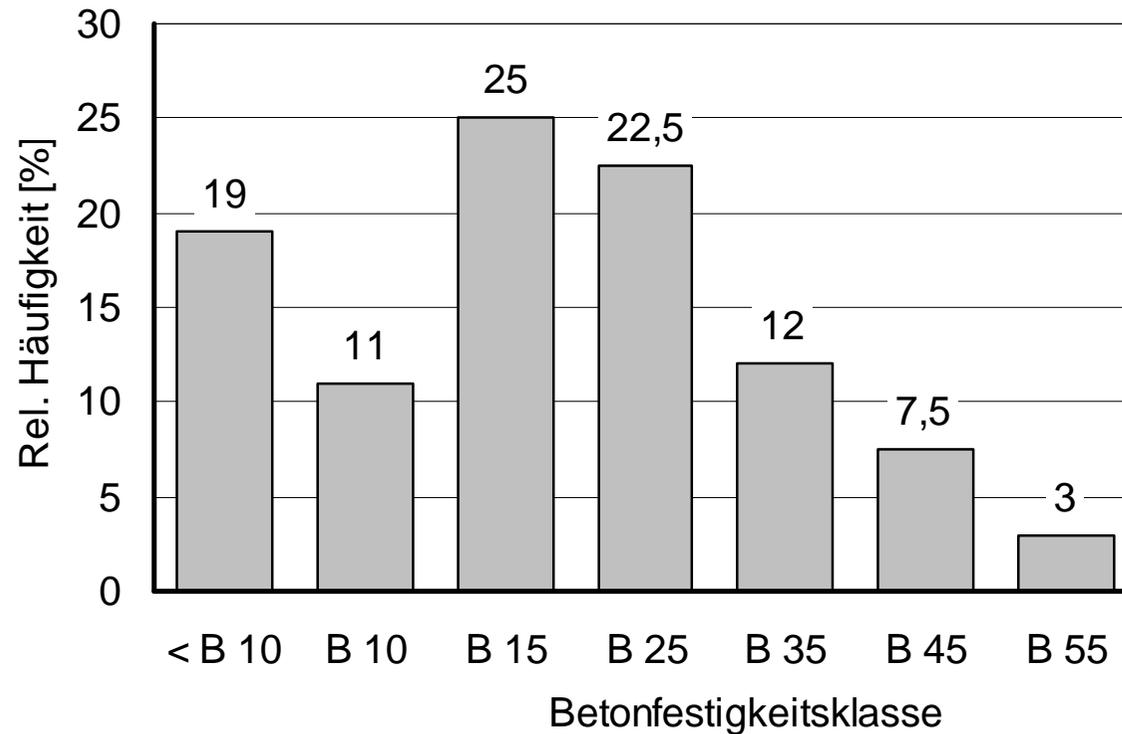
- Frischbetoneigenschaften
- mechanische Eigenschaften des Festbetons
- Dauerhaftigkeit des Festbetons

Für das Recycling von Interesse sind

- Druckfestigkeit
- Zementsteingehalt
- Merkmale der ursprünglichen Gesteinskörnungen

**Druckfestigkeit**

Im Betonabbruch dominieren Betone mit geringen bis mittleren Festigkeiten.

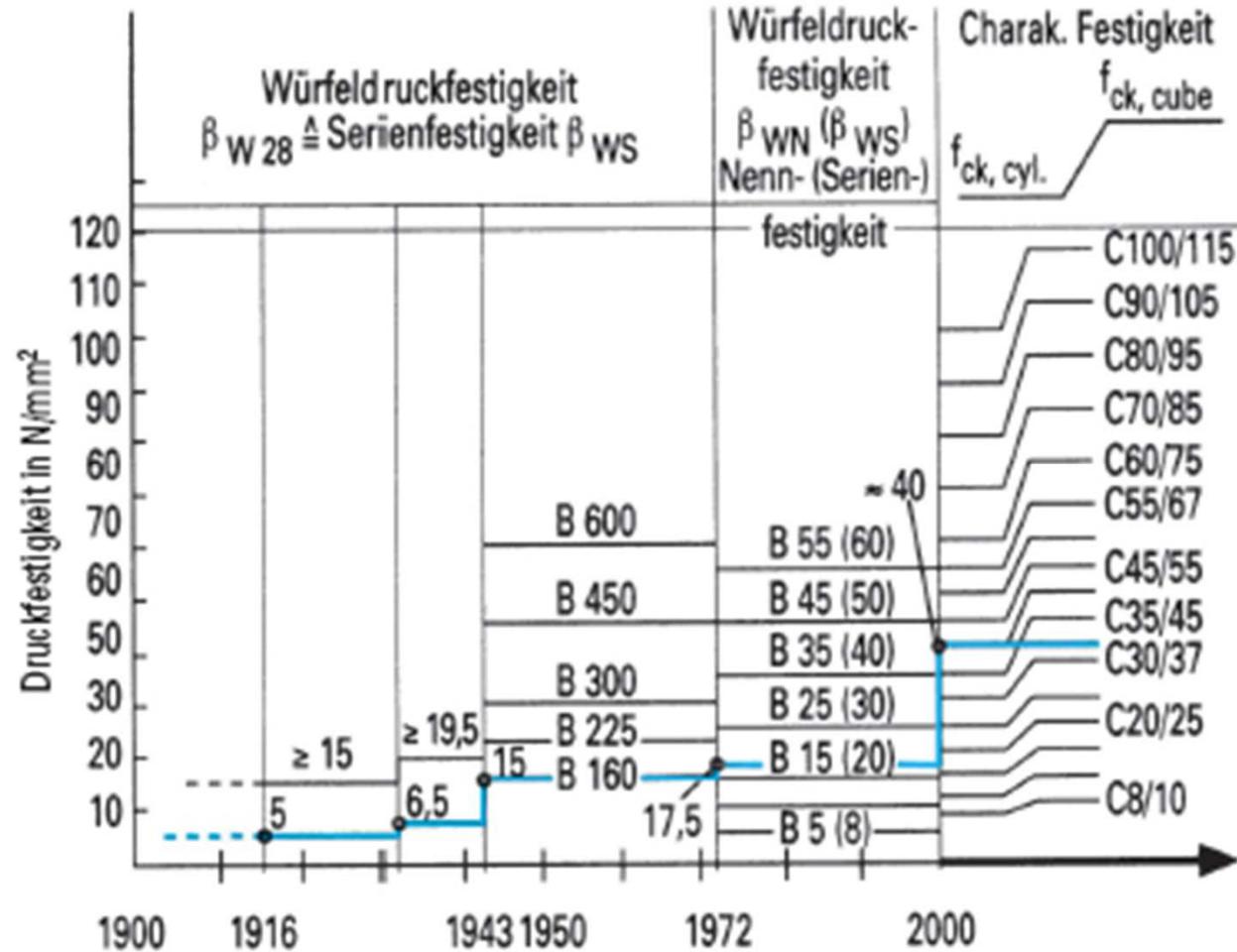


Im Betonaufbruch werden höhere Festigkeiten nachgewiesen.

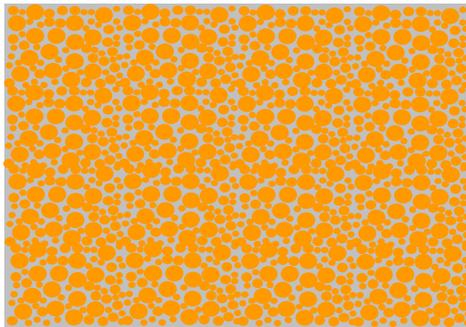
	com. strength [psi]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
location A	5990	41
location B	6500	45
location C	5860	40

Entwicklung der Betondruckfestigkeiten

Blaue Linie: Ungefähre Entwicklung der ausnutzbaren Biegedruckspannungen der jeweils höchsten Festigkeitsklasse



## Auswirkungen auf das Recycling: Zerkleinerung



### Hochfester Beton

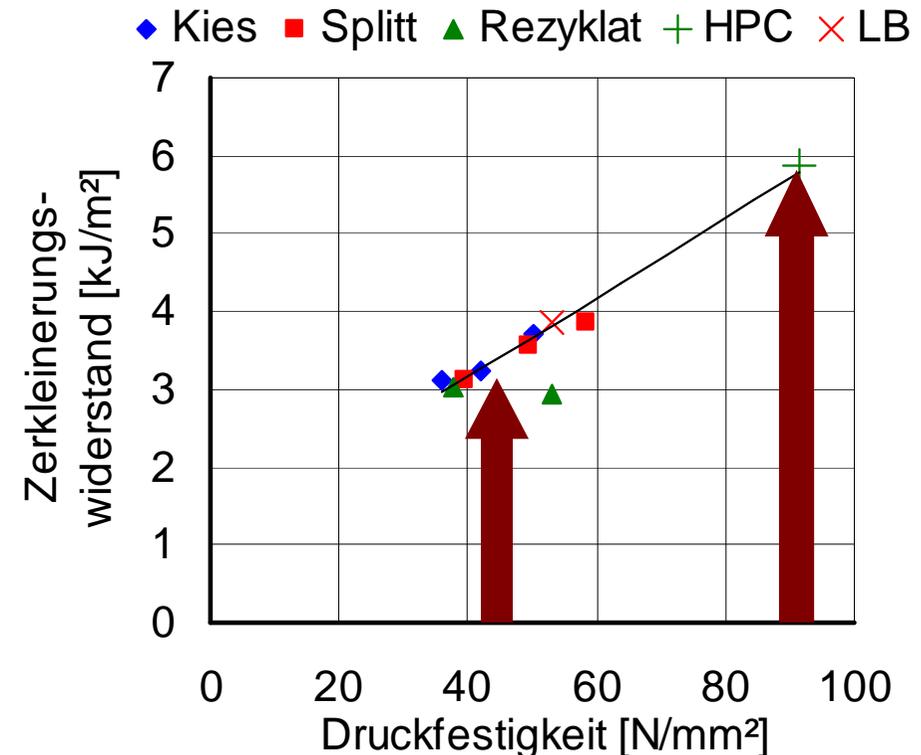
Betone aus Zement, nanoskaligen Zusätzen, Hochleistungsverflüssigern und feinkörnigen Gesteinskörnungen mit Festigkeiten  $> 60 \text{ N/mm}^2$

### Mögliches Recyclingverfahren

- Mehrstufige Zerkleinerung
- Geringerer Durchsatz bzw. höherer Energieverbrauch sowie höherer Verschleiß gegenüber Normalbeton

### RC-Produkte

- RC-Körnungen
- Zement z.T. noch reaktiv



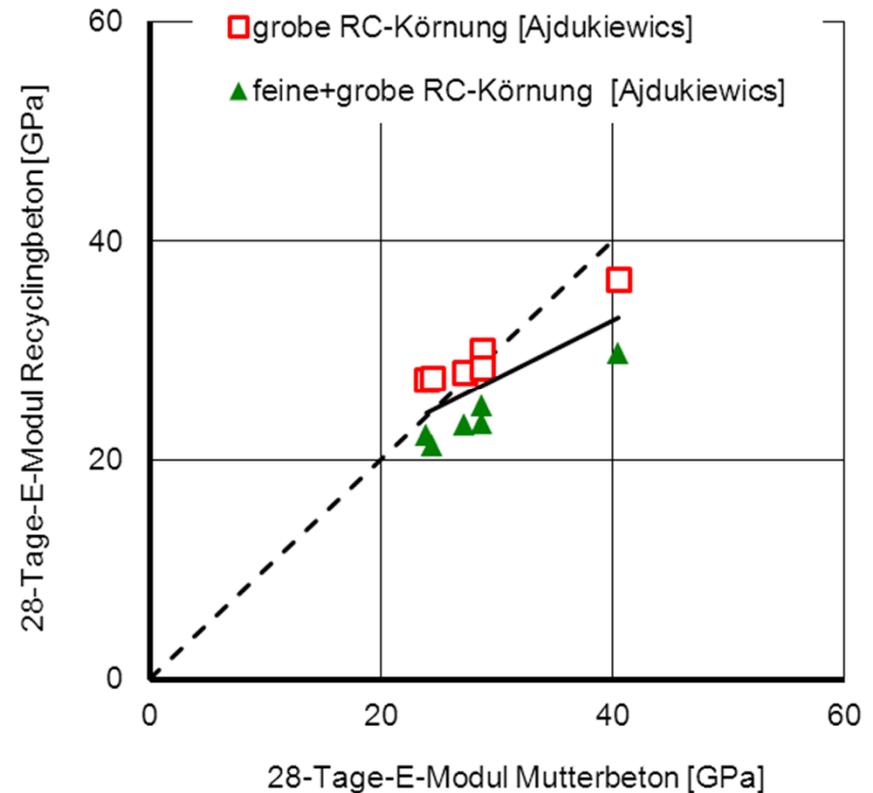
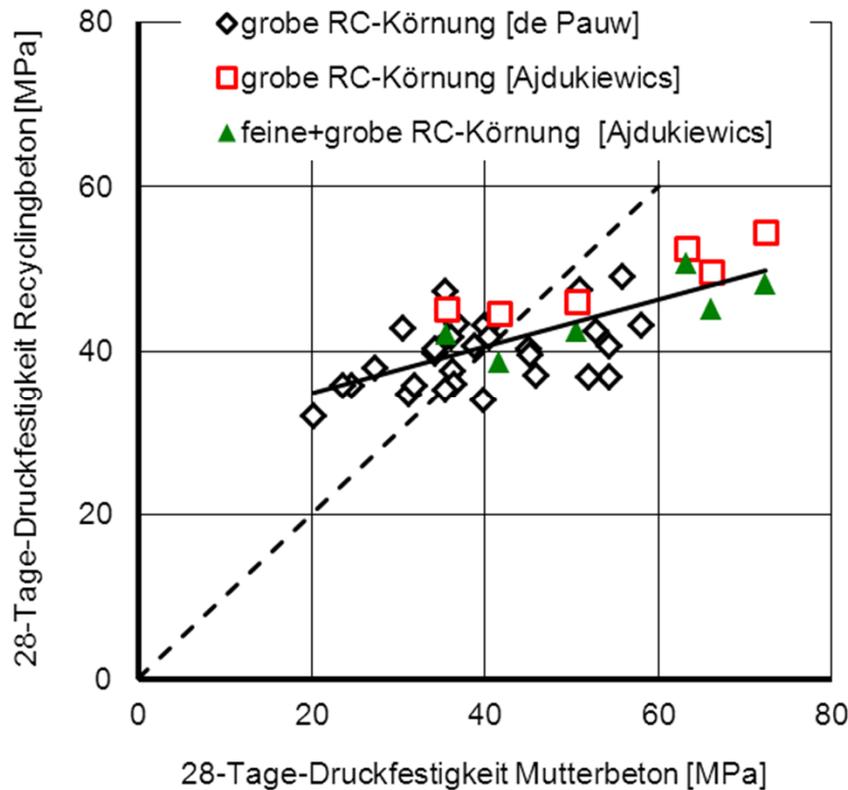
**Auswirkungen auf das Recycling: Festigkeit und E-Modul von Recyclingbeton in Abhängigkeit vom "Mutterbeton"**

$$y = 0,29x + 29,2$$

$$R^2 = 0,50$$

$$y = 0,53x + 11,6$$

$$R^2 = 0,51$$



- 4 Wiederverwertung von Betonbruch
  - 4.1 Definitionen und Begriffe
  - 4.2 Verbrauch an Primärmaterial,  
Abfallentstehung
  - 4.3 Aufbereitung von Betonbruch
  - 4.4 Eigenschaften von Betonrezyklaten
    - 4.4.1 Merkmale des Primärmaterials
    - 4.4.2 **Betonrezyklate**
  - 4.5 Verwertungstechnologien
    - 4.5.1 Verwertung im Straßenbau
    - 4.5.2 Verwertung als rezyklierte Gesteinskörnung
    - 4.5.3 Anwendungsbeispiele

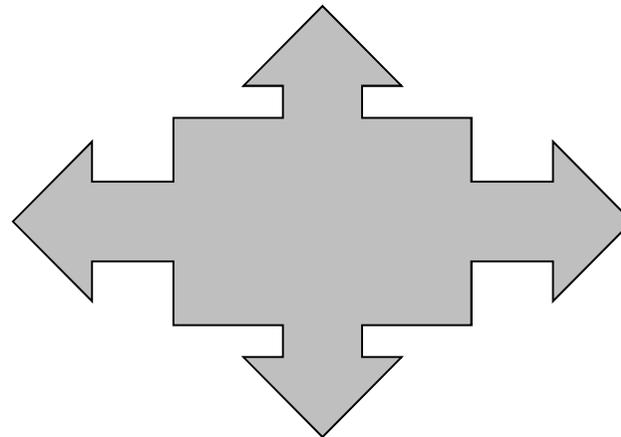
## Überblick über die Charakterisierungsparameter

### Parameter zur Zusammensetzung

- Materialzusammensetzung
- Chemische Zusammensetzung
- Mineralogische Zusammensetzung
- Gehalt an eluierbaren Bestandteilen

### Parameter zur Reaktivität

- Reaktivität in Bezug auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion
- Reaktivität in Bezug auf von außen einwirkende Medien



### Physikalische Parameter

- Rohdichte
- Wasseraufnahme
- Kornfestigkeit
- Frostwiderstand
- Frost-Tausalz-Widerstand

### Granulometrische Parameter

- Korngrößenverteilung
- Kornform

## Granulometrische Parameter

- Korngrößenverteilung
- Kornform

Korngrößenverteilung durch Aufbereitungsprozess beeinflussbar  
→ Zerkleinerung → Siebung

Kornform abhängig von

- Brecherart
- Plattigkeit des aufgegebenen Materials
- Richtungsabhängigkeit der Materialeigenschaften

→ Backenbrecher: plattiges und/oder anisotropes Ausgangsmaterial:  
Produkt enthält mehr plattige Bruchstücke

→ Prallbrecher: plattiges und/oder anisotropes Ausgangsmaterial  
Produkt enthält weniger plattige Bruchstücke

## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

Beispiele für den Einfluss von Materialmerkmalen auf die Kornform

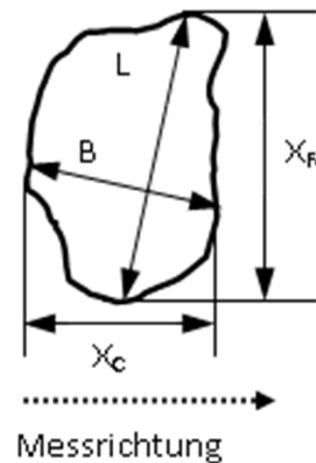
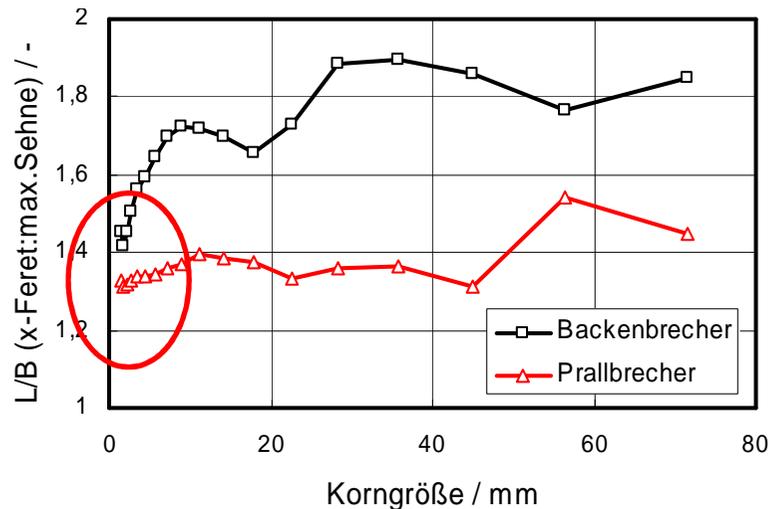
Materialmerkmal Plattigkeit



Materialmerkmal „Richtungsabhängigkeit“

anisotropes Material wie (manche)  
 Ziegel abhängig von Brecherart  
 Backenbrecher → plattiges Korn  
 Prallbrecher → kubisches Korn

→ kubisches Korn erst bei  
 Korngrößen < Wandstärke



### Physikalische Parameter

- Rohdichte
- Wasseraufnahme
- Kornfestigkeit
- Frostwiderstand
- Frost-Tausalz-Widerstand

### Parameter zur Zusammensetzung

- Materialzusammensetzung
- Chemische Zusammensetzung
- Mineralogische Zusammensetzung
- Gehalt an eluierbaren Bestandteilen

## Exkurs: Heterogenität von Rezyklaten

Heterogenität =

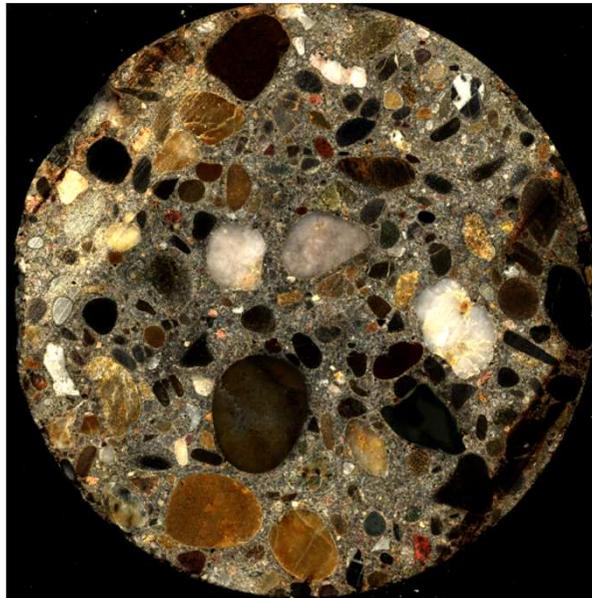
$$\sum(\text{Constitution heterogeneity} + \text{Distribution heterogeneity}) = \sum(\text{Partikelheterogenität} + \text{Haufwerksheterogenität})$$

## Partikelheterogenität: Haufwerk aus Betonpartikeln mit unterschiedlicher Zusammensetzung



## Partikelheterogenität

- Folge des Kompositcharakters von Beton
- Ursache für Streubreite der Eigenschaften auch wenn nur eine Materialart vorliegt



A: Reiner Mörtel



B. Komposit



C: Reiner Zuschlag



## Haufwerksheterogenität: Haufwerk aus Partikeln von rezyklierten Gesteinskörnungen unterschiedlicher Materialarten

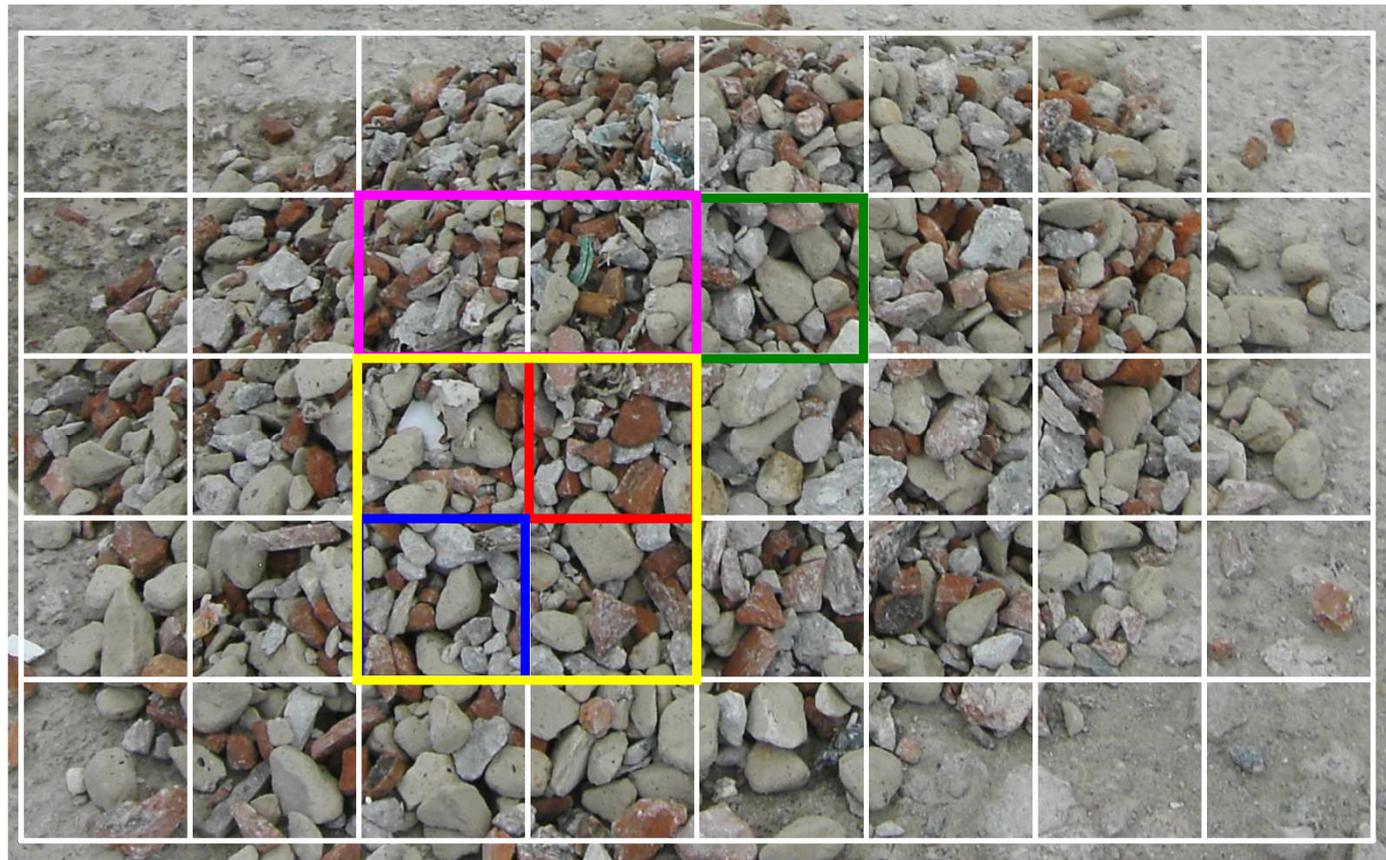


## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

### Haufwerksheterogenität

- Folge der komplexen Zusammensetzung von Bauwerken
- weitere Zunahme der Streubreite der Eigenschaften
- beeinflusst Probenmenge zur Bestimmung der Materialzusammensetzung

Composition green  $\neq$  comp. red  $\neq$  comp. blue  $\neq$  comp. magenta  
 $\neq$  comp. yellow



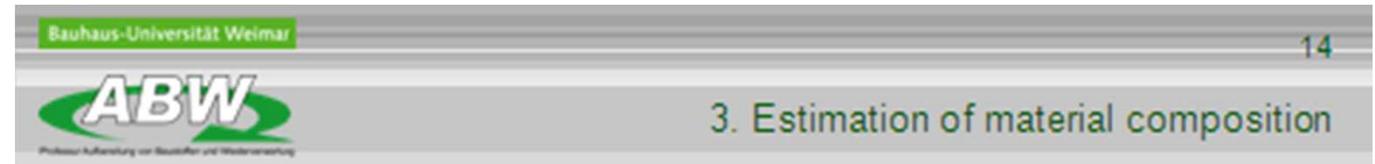
## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

Fehler bei der Bestimmung der Zusammensetzung eines heterogenen Haufwerks

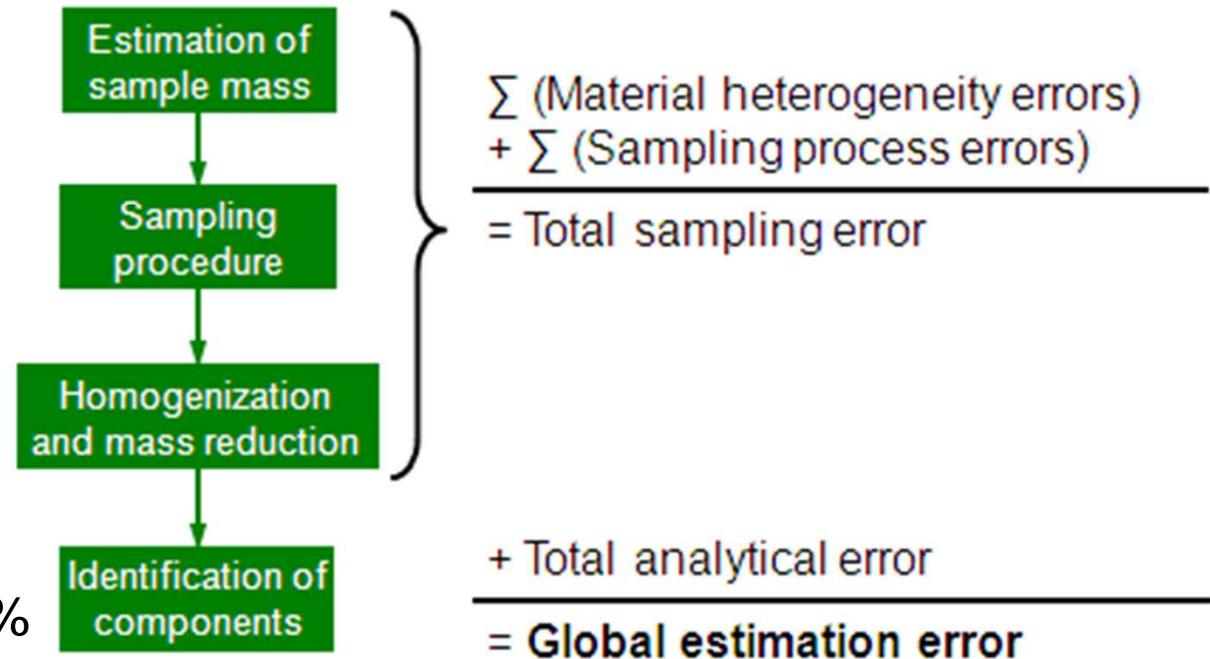
Ausgangspunkt →  
Neugier,  
Politbarometer

Bestimmung der  
Probemenge

Wichtig bei der  
Bestimmung von  
Nebenbestandteilen,  
die nur in geringen  
Mengen vorhanden  
sein dürfen, z.B.  
Gipskörner max. 0,2 M.-%



### Errors of sampling and analyzing process



## Antwort auf Anfrage bei der Forschungsgruppe Wahlen

Von: Stefan Hunsicker [stefan.hunsicker@forschungsgruppe.de]

Gesendet: Montag, 26. November 2007 09:08

An: anette-m.mueller@bauing.uni-weimar.de

Betreff: Fwd: Ihre Anfrage zum Stichprobenumfang

Sehr geehrte Frau Müller,

zu ihren Fragen:

1. Die Stichprobengröße ist natürlich immer ein Kompromiss aus finanziellem Aufwand und der angestrebten Genauigkeit. Der Wert von etwa 1.250 Befragten im Politbarometer orientiert sich vor allem an den Aussagen zu den kleineren Parteien, da hier die 5%-Hürde eine Rolle spielt.

Bei kleineren Parteien, die mit 7% in der Stimmung gemessen werden, ergibt sich bei einer Fehlertoleranz von etwa 1,5% und einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 95% ( $t=1,96$ ) eine Stichprobengröße von:

Stichprobengröße von:

$$n = (1,96/0,015)^2 * 0,07 * (1-0,07) = 1.112$$

Die Stichprobengröße wird auf 1.250 aufgestockt, damit ergeben sich 1.000 Interviews für die alten und 250 für die neuen Bundesländer.

## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

Bei 7% in der politischen Stimmung beträgt die Fehlertoleranz etwa  $\pm 1,5\%$  und damit liegt der Anteil in der Grundgesamtheit zwischen 5,5% und 8,5% und damit über 5%. Wird eine Partei mit etwa 7% bei der Projektion ausgewiesen, dann überspringt diese bei einer Normalwahlsituation die 5%-Hürde.

Dazu ist anzumerken, dass die Forschungsgruppe Wahlen zwischen politischer Stimmung und Projektion unterscheidet. Mit der politischen Stimmung werden die Rohdaten-Ergebnisse zur Wahlabsicht (Sonntagsfrage:

"Was würden Sie wählen, wenn am nächsten Sonntag Wahl wäre?") bezeichnet. Diese Daten, die lediglich einer sozialstrukturellen Gewichtung unterworfen sind, werden von den meisten anderen Instituten nicht veröffentlicht. Bei der Projektion werden die aktuellen Überzeichnungen der politischen Stimmung in einem Modell auf eine Normalwahl-Situation übertragen (Was wäre, wenn am nächsten Sonntag wirklich Wahl wäre). Neben der politischen Stimmung fließen hier auch Erfahrungen über mittel- und längerfristige Bindungen der Wähler, taktisches Wahlverhalten und ein „time-lag“ ein.

2. Bei den Fehlertoleranzen handelt es sich um Absolutangaben.

Wir hoffen damit ein wenig zur Auflockerung ihrer Vorlesung beizutragen.

Mit freundlichen Grüßen

Stefan Hunsicker

## Politische Umfrage

Der Wert von etwa 1.250 Befragten im Politbarometer orientiert sich vor allem an den Aussagen zu den kleineren Parteien, da hier die 5%-Hürde eine Rolle spielt. Bei kleineren Parteien, die mit 7% in der Stimmung gemessen werden, ergibt sich bei einer Fehlertoleranz von etwa 1,5% und einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 95% ( $t=1,96$ ) eine Stichprobengröße von:

$$n = (1,96/0,015)^2 * 0,07 * (1-0,07)$$
$$n = 1.111,5$$

Das korreliert mit den Aussagen zur Probenahme aus Schüttgütern

Mindestpartikelzahl in einer Probe nach Sommer (entnommen aus Stieß)

$$\text{Anzahl } Z = \left( \frac{z(S)}{\Delta \bar{X} / P} \right)^2 \cdot \frac{1-P}{P}$$
$$Z = 1.111,5$$

## Berechnung der erforderlichen Probenmasse

Bauhaus-Universität Weimar 15



3. Estimation of material composition

### Influence of sample mass (1)

Sample mass M [kg] acc. European Standard DIN EN 932-1

$$M = 6 \times \sqrt{d_{\max}} \cdot \rho_{\text{bulk}}$$

$d_{\max}$  maximum particle size [mm]  
 $\rho_{\text{bulk}}$  bulk density [t/m<sup>3</sup>]

Sample mass M acc. general processing considerations [Sommer/Stieß]

$$M = \left( \frac{z(S)}{\Delta\bar{X}/P} \right)^2 \cdot \frac{1-P}{P} \cdot m_{\text{par}}$$

$z(S)$  factor for confidence level  
 $\Delta\bar{X}/P$  relative deviation  
 $P$  concentration of minor comp.  
 $m_{\text{par}}$  particle mass

Sample mass M acc. Sampling Theory [Gy]

$$M = \frac{d^3}{(S/100)^2} \cdot \left[ \frac{(1 - a/\alpha)^2}{a/\alpha} \cdot \rho_c + (1 - a/\alpha) \cdot \rho_g \right] \cdot f \cdot g \cdot \beta$$

$d$  maximum particle size  
 $S$  coefficient of variation [%]  
 $a/\alpha$  concentration of minor component  
 $\rho_c$  density of minor composition  
 $\rho_g$  density of main components  
 $f, g, \beta$  particle shape (0.5), size distribution (0.25), liberation factor (1.0)

## Berechnung der erforderlichen Probenmasse

Bauhaus-Universität Weimar 16



3. Estimation of material composition

### Influence of sample mass (2)

Sample mass acc. European Standard DIN EN 932-1

- Influence of maximum particle size  $d_{max}$
- No influence of material and concentration

$\rho_{bulk} =$ 1.5 t/m <sup>3</sup>	$d_{max}$ [mm]	32	16	8	4
	M [kg]	50.9	36.0	25.5	18.0

Sample mass acc. Theory of Sampling

- Influence of maximum particle size  $d_{max}$ , material density and concentration

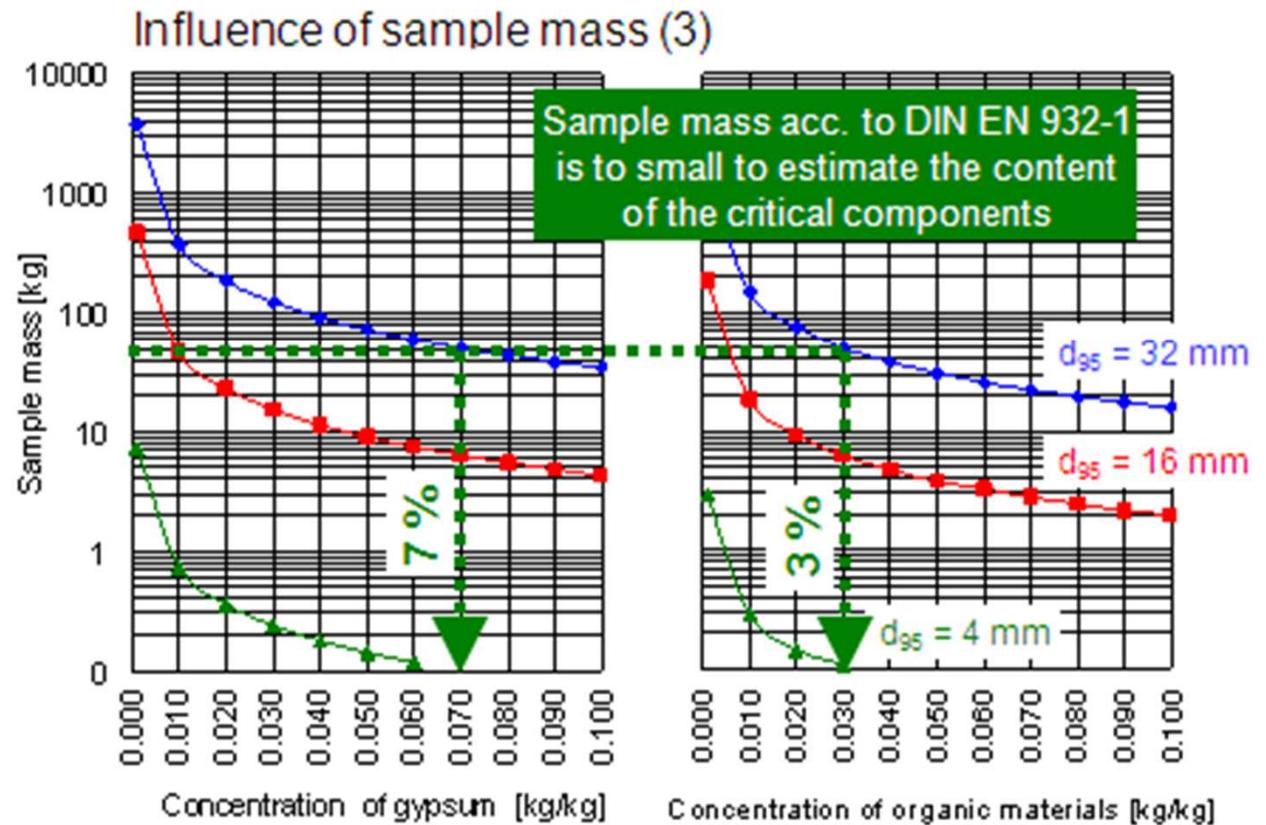
# Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

## Berechnung der erforderlichen Probenmasse

Bauhaus-Universität Weimar 17

**ABW**  
 Professor Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung

3. Estimation of material composition



Berechnung der erforderlichen Probenmasse

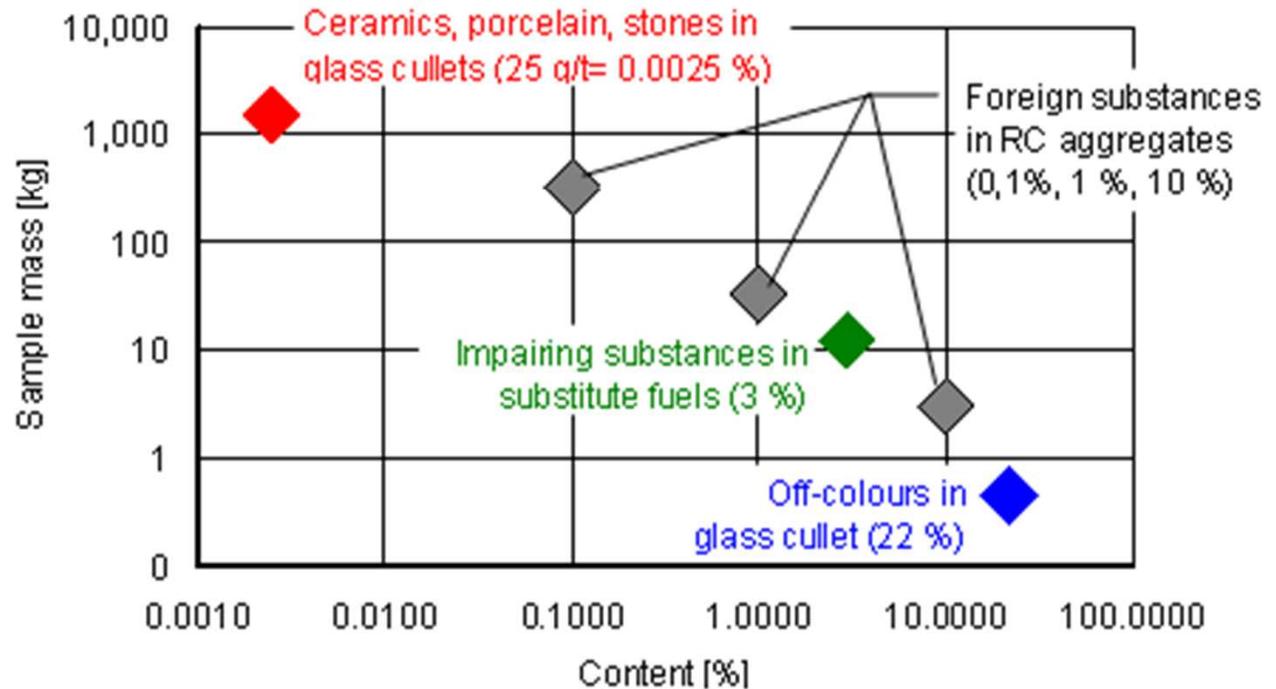
Bauhaus-Universität Weimar 18

**ABW**  
 Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung

3. Estimation of material composition

Influence of sample mass (4)

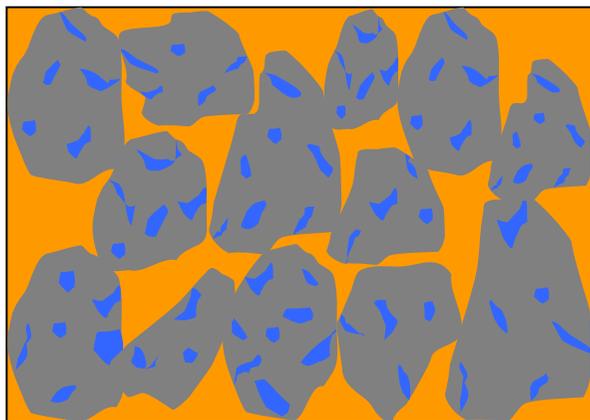
Comparison of sample masses of secondary materials



## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

### Physikalische Parameter

- Rohdichte
- Wasseraufnahme
- Kornfestigkeit
- Frostwiderstand
- Frost-Tausalz-Widerstand



Rohdichte ist Leitgröße für wichtige physikalische Eigenschaften

Definitionen von Dichten

Reindichte =

$$\text{Masse}_{\text{grau}} / \text{Volumen}_{\text{grau}}$$

Rohdichte =

$$\text{Masse}_{\text{grau}} / (\text{Volumen}_{\text{grau}} + \text{Volumen}_{\text{blau}})$$

Schüttdichte =

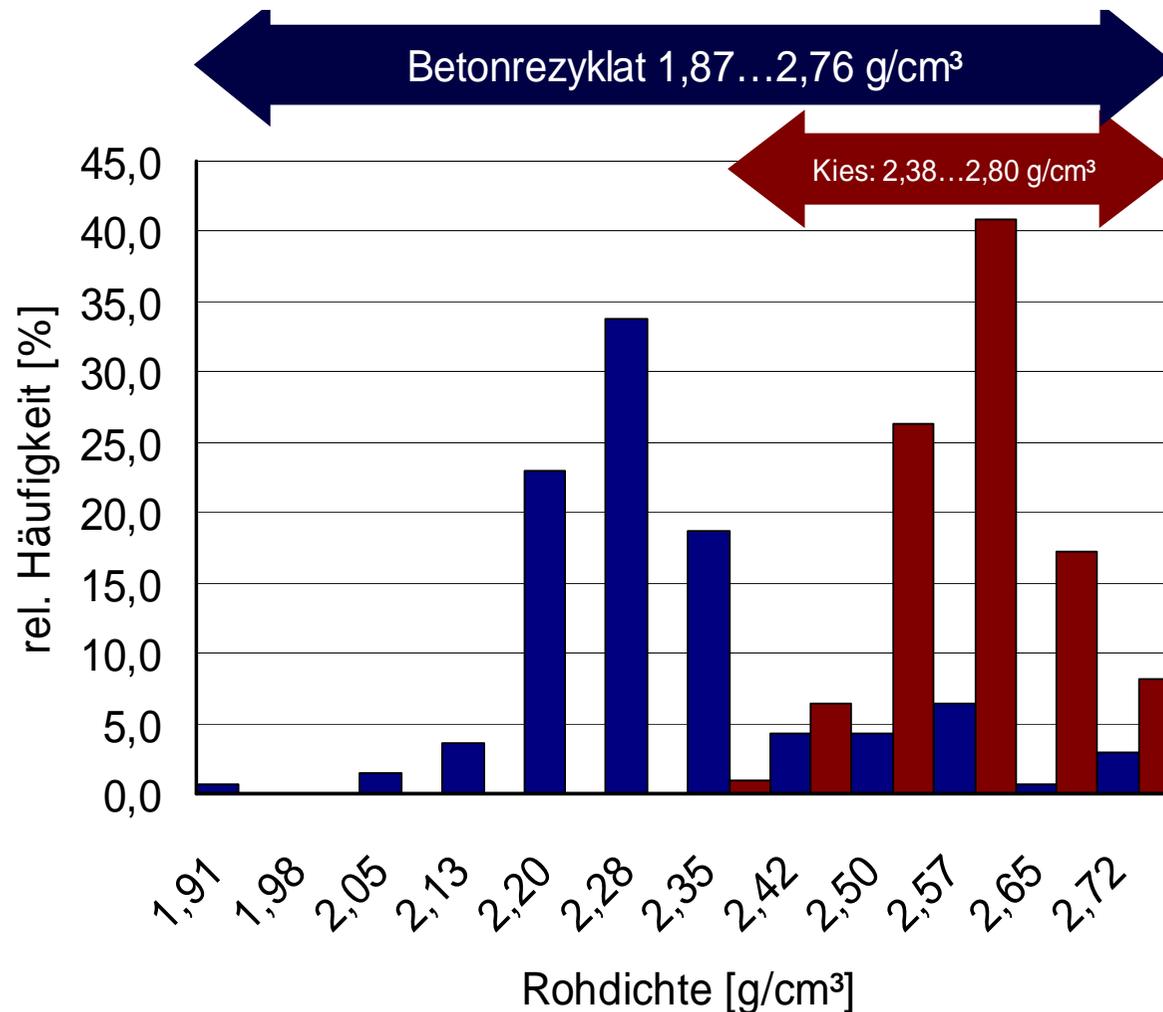
$$\text{Masse}_{\text{grau}} / (\text{Volumen}_{\text{grau}} + \text{Volumen}_{\text{blau}} + \text{Volumen}_{\text{orange}})$$

Gesamtporosität =

$$(1 - \text{Rohdichte} / \text{Reindichte}) * 100 \%$$

## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

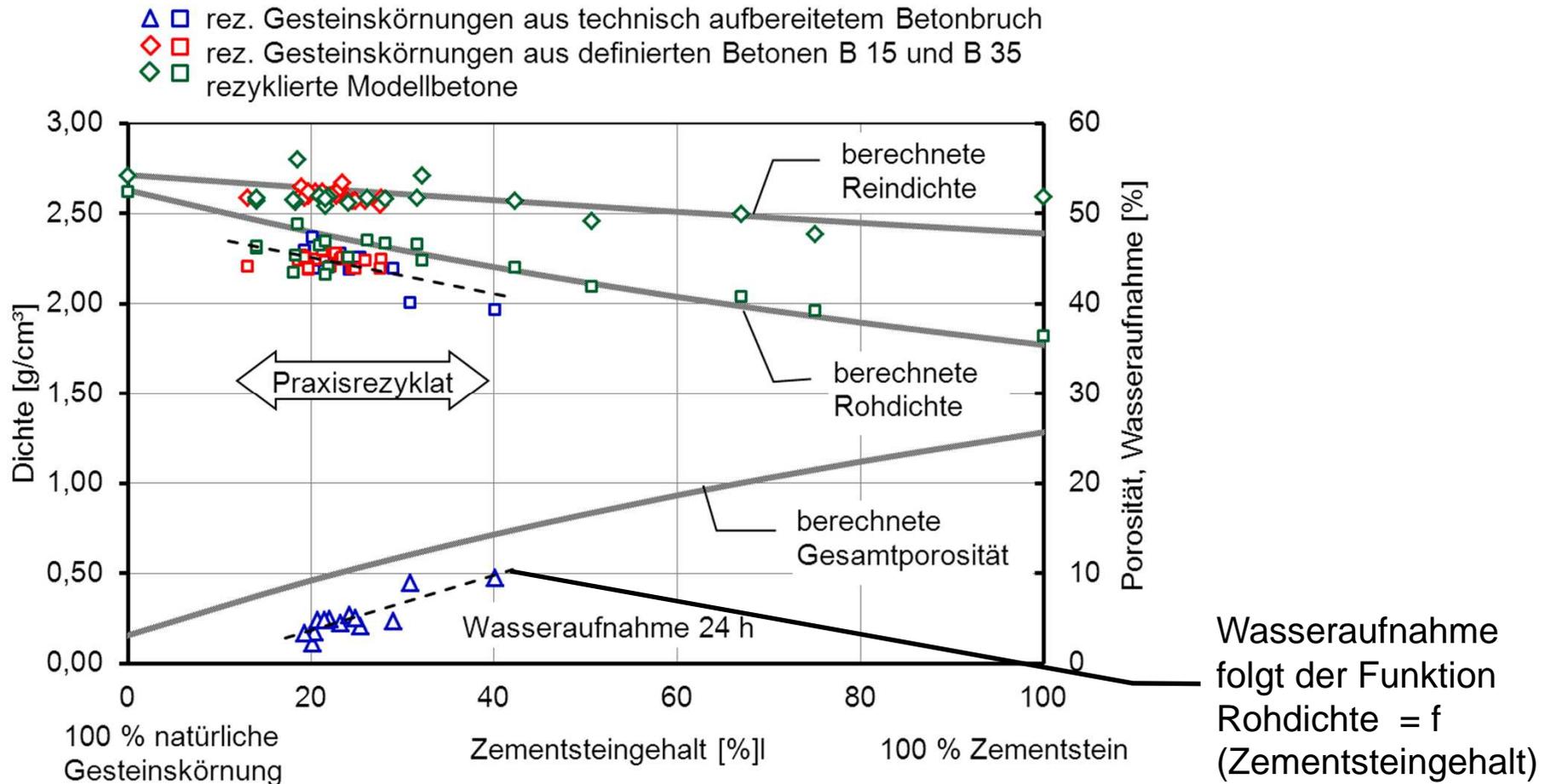
Rohdichte kann infolge der Partikelheterogenität von Partikel zu Partikel unterschiedlich sein → Streuung der Rohdichte



Zusammensetzung bewegt sich zwischen (Zementstein) → Mörtel → nat. Gesteinskörnung

## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

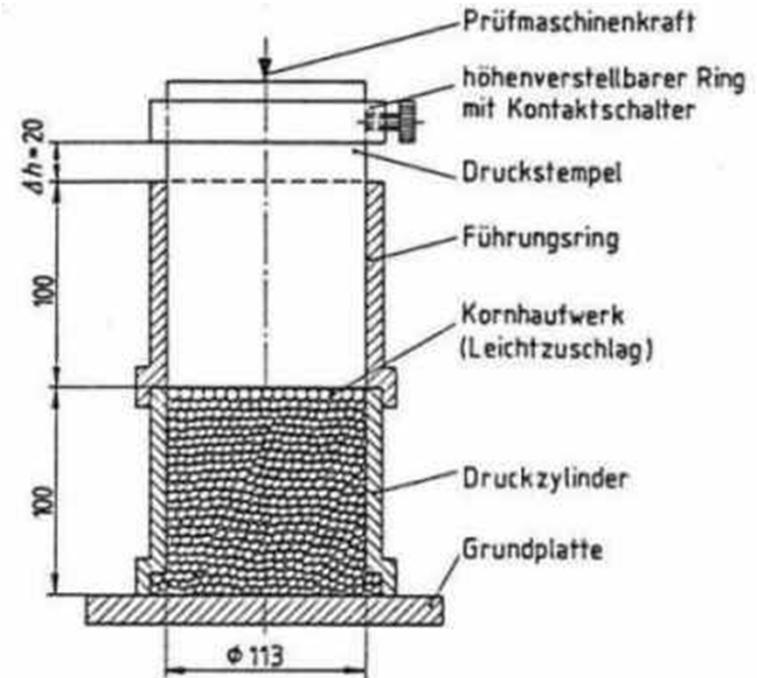
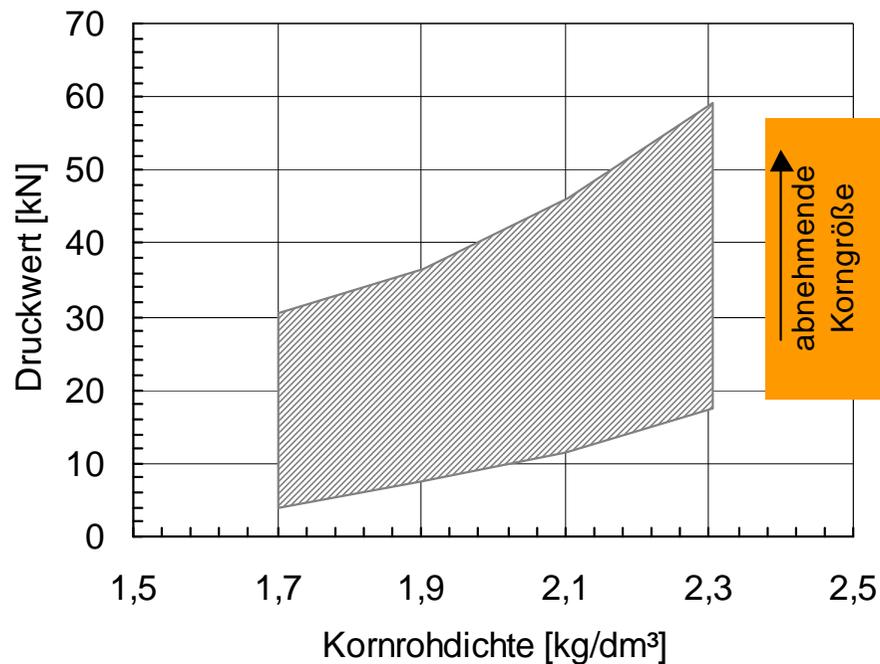
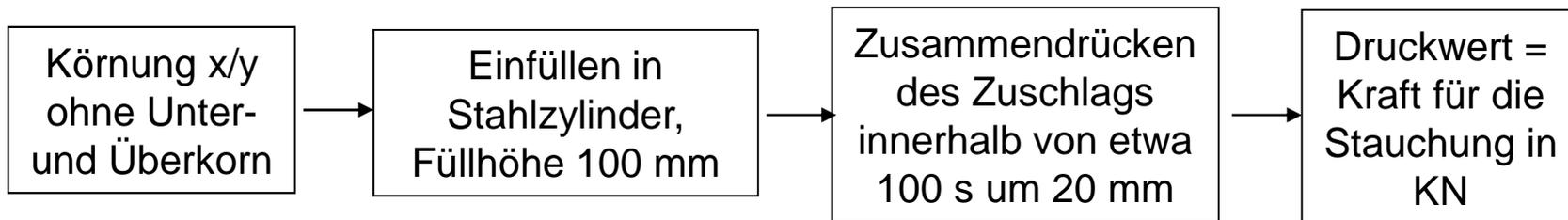
Rohdichte theoretisch variabel zwischen den Grenzen „natürliche Gesteinskörnungen“ und „Zementstein“ → Rohdichtediagramm für Rezyklate als Zwei-Phasen-Komposite



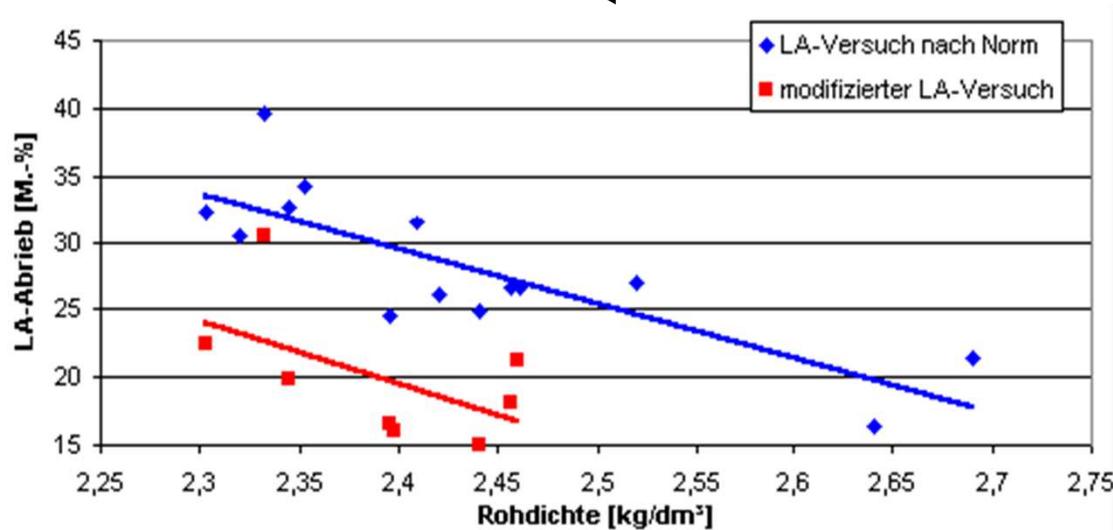
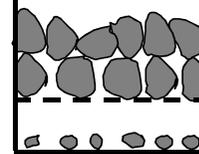
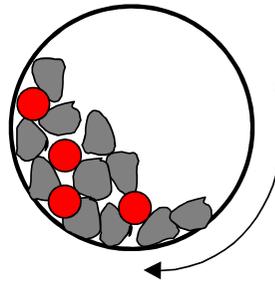
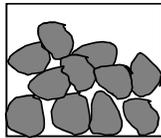
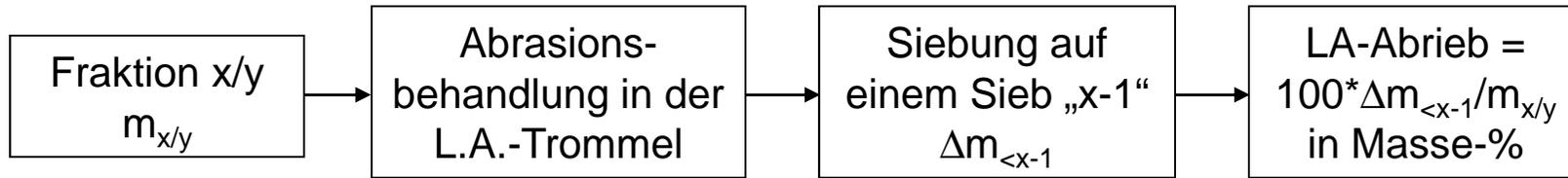
## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

Kornfestigkeit = f(Zementsteingehalt) ?

### Druckwert

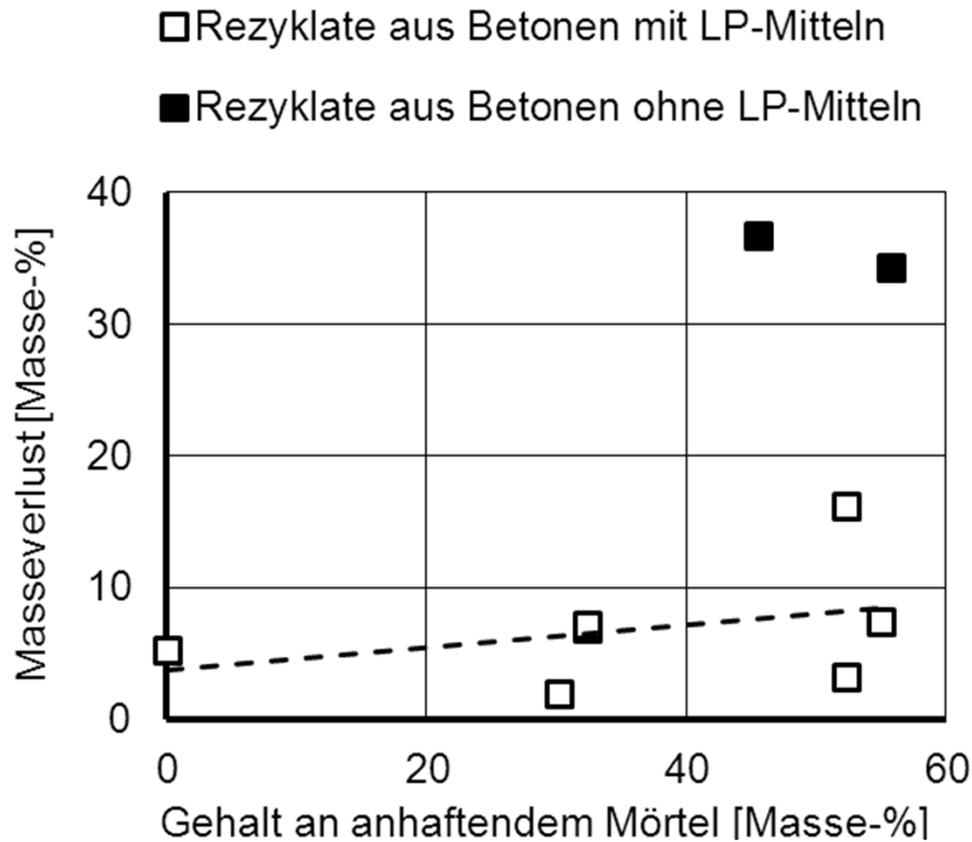


**Los Angeles-Test**

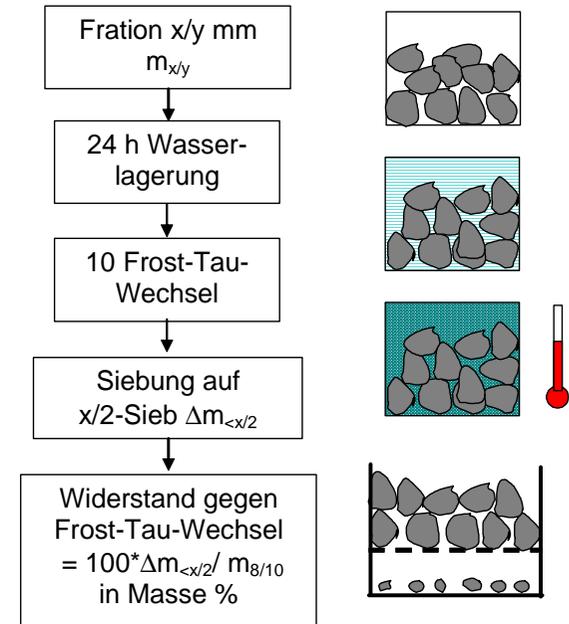


## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

Frostwiderstand = f(Zementsteingehalt) ?



Quelle: Gokce 2011



Richtwerte für die physikalischen Parameter

	Mittelwert	Min	Max
Rohdichte Sande [g/cm <sup>3</sup> ]	2,11	1,81	2,31
Rohdichte Splitte [g/cm <sup>3</sup> ]	2,26	1,86	2,59
Wasseraufnahme Sande [M.-%]	> 10		
Wasseraufnahme Splitte [M.-%]	4 - 10		
L.A. Abrieb [M.-%]	20 - 35		
Frostabsplitterungen [M.-%]	2 - 4		

$Rohdichte_{Sande} < Rohdichte_{Ausgangsbeton}$   
 Anreicherung von Zementstein

$Rohdichte_{RC-Splitte} \approx Rohdichte_{Ausgangsbeton}$

## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

### Parameter zur Zusammensetzung

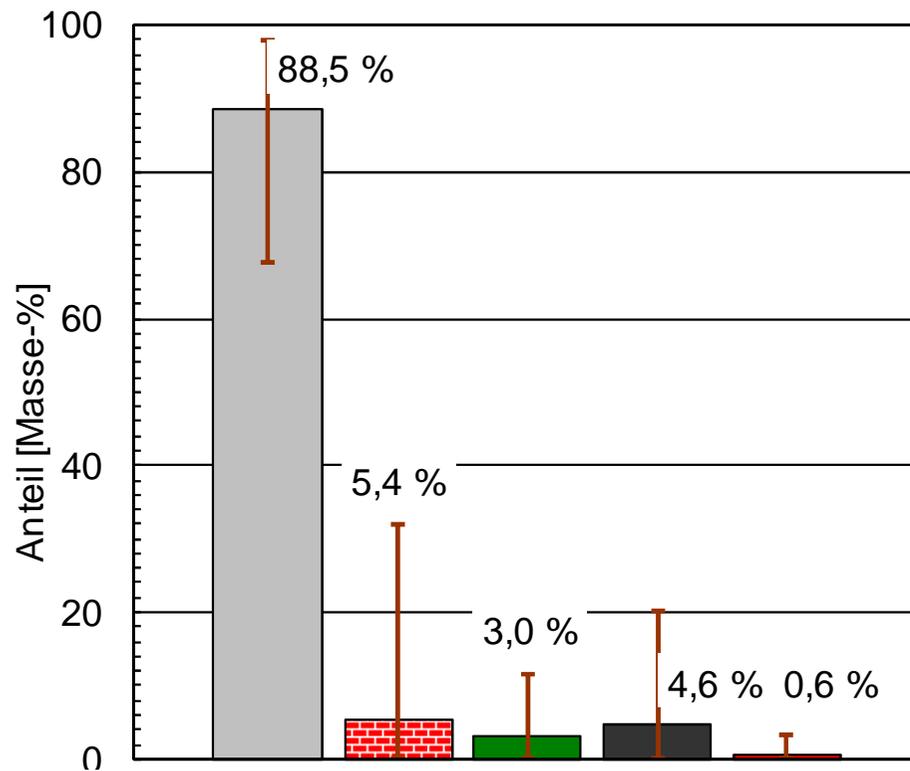
- Materialzusammensetzung
- Chemische Zusammensetzung
- Mineralogische Zusammensetzung
- Gehalt an eluierbaren Bestandteilen

### Bestimmung der Materialzusammensetzung mittels Sortieranalyse



## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

### Materialzusammensetzung



-  Beton und Gesteinskörnungen nach DIN 4226-1
-  Klinker und nicht porosierte Ziegel + Kalksandstein
-  Asphalt
-  Andere mineralische Bestandteile wie por. Ziegel, Putz, Mörtel, Leichtbeton, haufwerksporiger Beton, poröse Schlacken, Bimsstein
-  Fremdbestandteile wie Glas, NE-Metallschlacken, Stückgips, Gummi, Kunststoff, Metall, Holz, Pflanzenreste, Papier, Sonstiges

42 Proben

## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

### Chemische Zusammensetzung

	$X_m$	$X_{min}$	$X_{max}$
	[%]	[%]	[%]
TV	0,74	0,4	1,5
<b>GV</b>	<b>8,08</b>	<b>6,0</b>	<b>15,0</b>
SiO <sub>2</sub>	64,14	47,9	71,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,81	5,40	9,80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,98	1,15	4,2
<b>CaO</b>	<b>11,12</b>	<b>5,40</b>	<b>18,50</b>
MgO	1,03	0,40	1,8
K <sub>2</sub> O	2,21	1,38	4,95
Na <sub>2</sub> O	1,03	0,48	1,68

	Gehalte [%]		– 31 Messwerte an Splitten und Sanden aus Laborbetonen oder industriellen Ursprungs
	Chlorid	Sulfat	
Mittelwert	0,013	0,57	
Min	0,002	0,07	
Max	0,042	1,15	

## Mineralogische Zusammensetzung

Minerale aus den ursprünglichen Gesteinskörnungen  
Quarz, Calcit, Feldspäte

Minerale aus dem Zementstein

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ , Calcit,  $\text{CaO-SiO}_2$ -Hydrate,  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ -  
 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Hydrate,  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-SO}_3$ -Hydrate

Minerale aus Verunreinigungen und  
Nebenkompontenten

Sulfathydrate, Chloride, Tonminerale

### Parameter zur Reaktivität

- Reaktivität in Bezug auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion
- Reaktivität in Bezug auf von außen einwirkende Medien

### AKR-Reaktionspotential von Rezyklaten

- abhängig von Qualität und Alter des „Mutterbetons“
- abhängig von Lagerungsdauer und -bedingungen nach der Aufbereitung
- abhängig von Partikelgröße

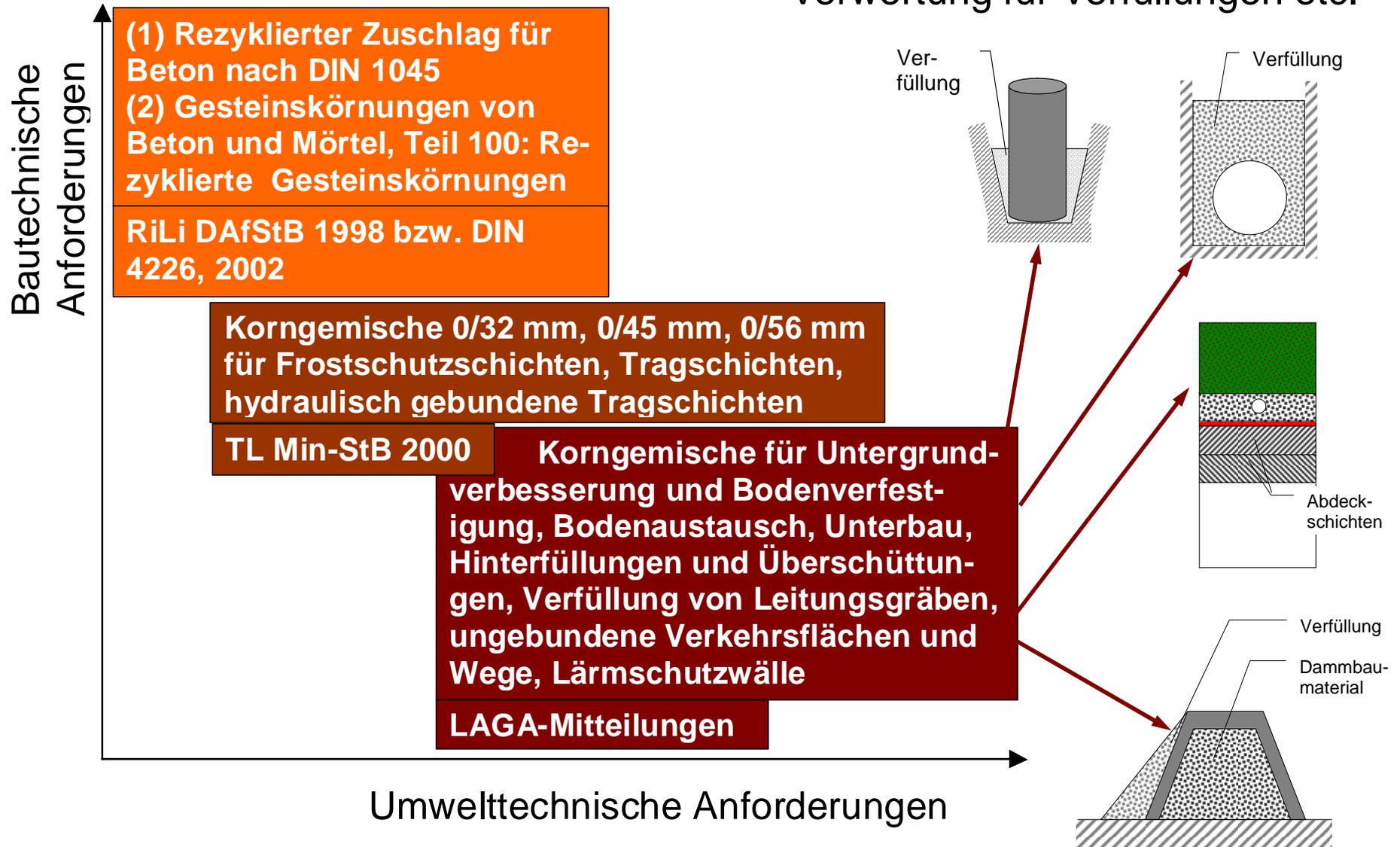
### Reaktivität in Bezug auf Carbonatisierung von rezyklierten Gesteinskörnungen

- abhängig von Qualität und Alter des „Mutterbetons“
- abhängig von Lagerungsdauer und -bedingungen nach der Aufbereitung
- abhängig von Partikelgröße

- 4 Wiederverwertung von Betonbruch
  - 4.1 Definitionen und Begriffe
  - 4.2 Verbrauch an Primärmaterial, Abfallentstehung
  - 4.3 Aufbereitung von Betonbruch
  - 4.4 Eigenschaften von Betonrezyklaten
    - 4.4.1 Merkmale des Primärmaterials
    - 4.4.2 Betonrezyklate
  - 4.5 Verwertungstechnologien**
    - 4.5.1 Verwertung im Straßenbau
    - 4.5.2 Verwertung als rezyklierte Gesteinskörnung
    - 4.5.3 Anwendungsbeispiele

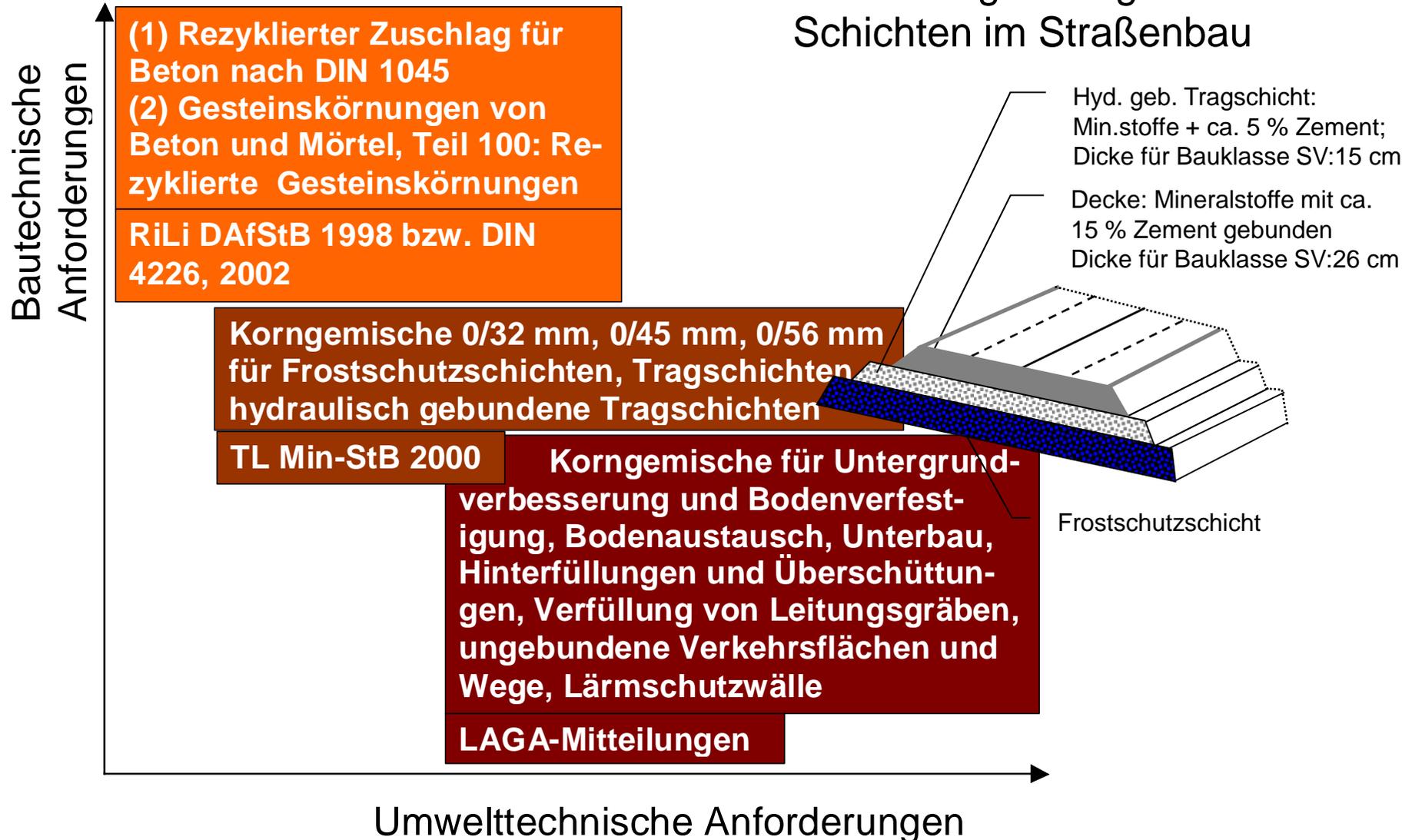
## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

### Verwertung für Verfüllungen etc.



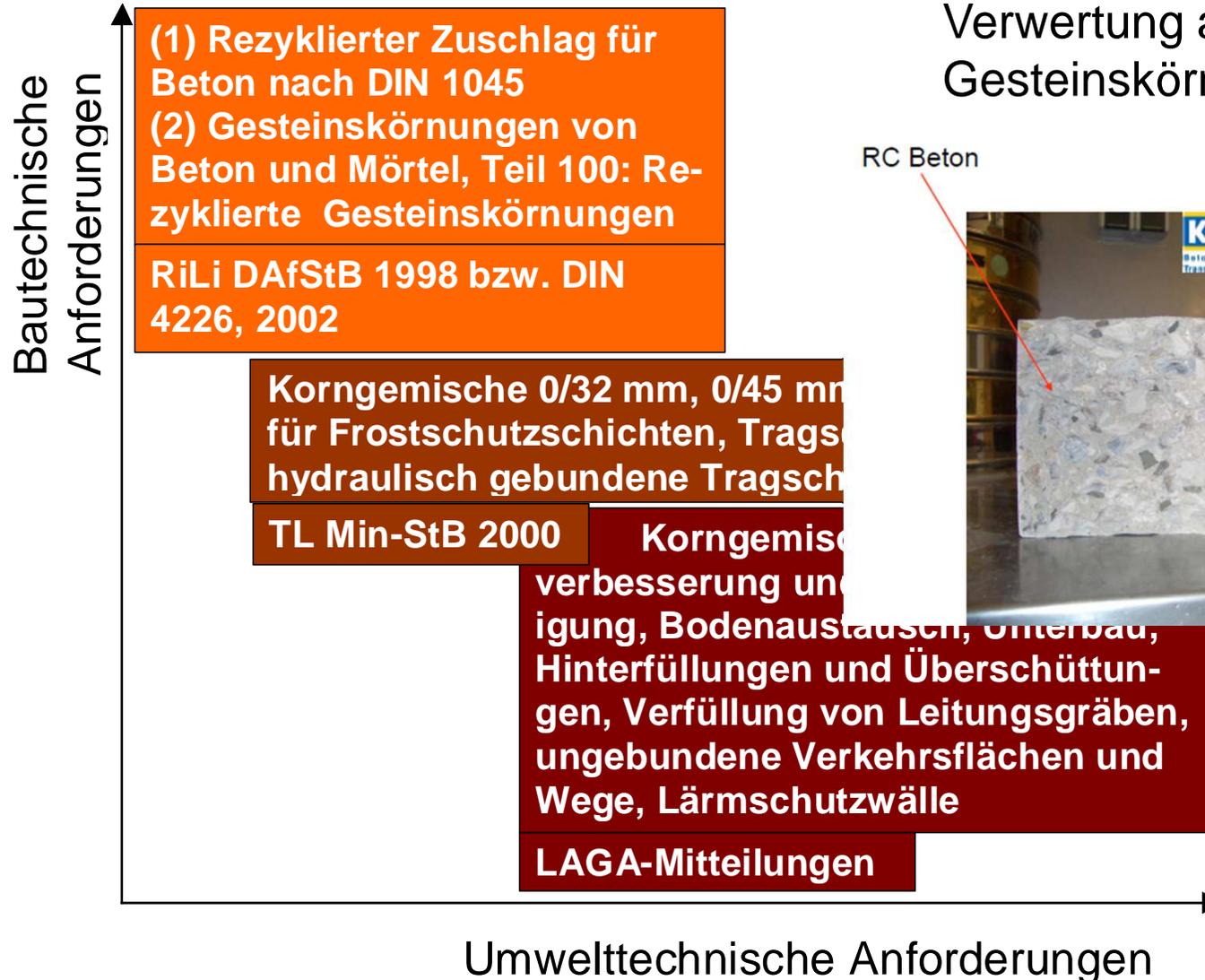
## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

### Verwertung für ungebundene Schichten im Straßenbau



## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

### Verwertung als rezyklierte Gesteinskörnung



RC Beton

Standardbeton



- 4 Wiederverwertung von Betonbruch
  - 4.1 Definitionen und Begriffe
  - 4.2 Verbrauch an Primärmaterial,  
Abfallentstehung
  - 4.3 Aufbereitung von Betonbruch
  - 4.4 Eigenschaften von Betonrezyklaten
    - 4.4.1 Merkmale des Primärmaterials
    - 4.4.2 Betonrezyklate
  - 4.5 Verwertungstechnologien
    - 4.5.1 Verwertung im Straßenbau**
    - 4.5.2 Verwertung als rezyklierter Zuschlag
    - 4.5.3 Anwendungsbeispiele

## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

### Funktionen verschiedener Schichten im Straßenbau

#### Deckschicht

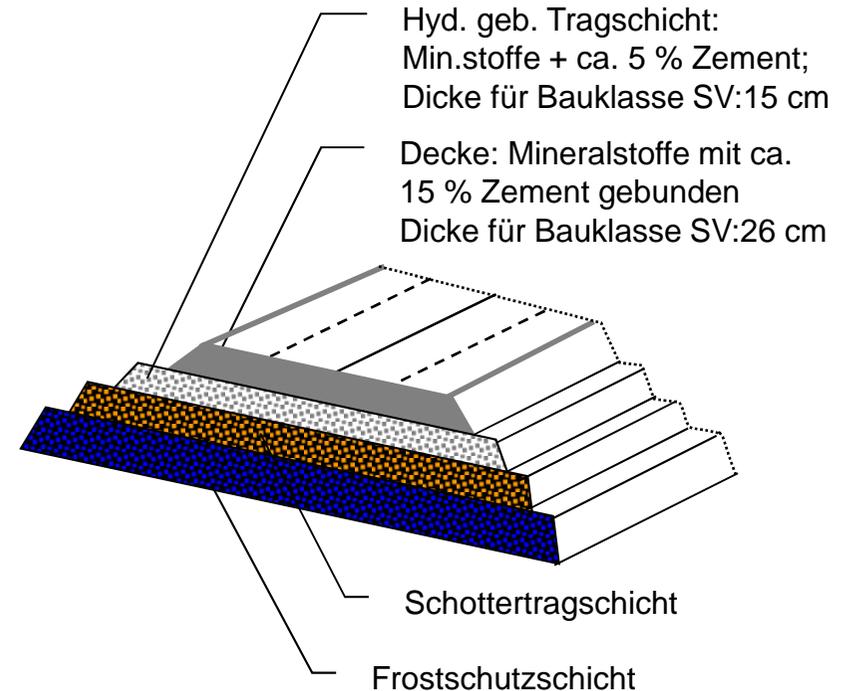
#### Hydraulisch gebundene Tragschicht

#### Schottertragschichten

Korngerüst mit ausreichender Tragfähigkeit durch Reibung und Verzahnung der Körner untereinander  
→ Sieblinie, Anteil gebrochener Körner

#### Frostschuttschicht

Korngerüst mit ausreichender Drainagewirkung und geringer Wasseraufnahmefähigkeit, um Frosthebungen zu vermeiden  
→ Sieblinie, Kornfestigkeit, Frostbeständigkeit



## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

RC-Baustoff bei Einhaltung der Anforderungen für Frostschutzschichten und Schottertragschichten geeignet.

Vorteile durch

- Verminderung des Rohstoffverbrauchs
- Substituierung transportkostenempfindlicher Massenrohstoffe
- Selbsterhärtungseffekte

Ausgewählte Anforderungen laut TL Gestein-StB 2004, Anhang B 12: Recycling-Baustoff RC

- Materialzusammensetzung

	[M.-%]
Asphaltgranulat	≤ 30
Klinker, dichte Ziegel, Steinzeug	≤ 30
Kalksandstein, weichgebrannte Ziegel, Putze	≤ 5
Min. Leicht- und Dämmbaustoffe	≤ 1
Fremdstoffe	≤ 0,2

- Frostbeständigkeit
- Raumbeständigkeit
- Widerstand gegen Schlag
- Anteil an gebrochenen Körnern
- Korngrößenverteilung

## Recycling von Fahrbahndecken aus Beton stellt Stand der Technik dar

Brechen der alten Fahrbahndecke



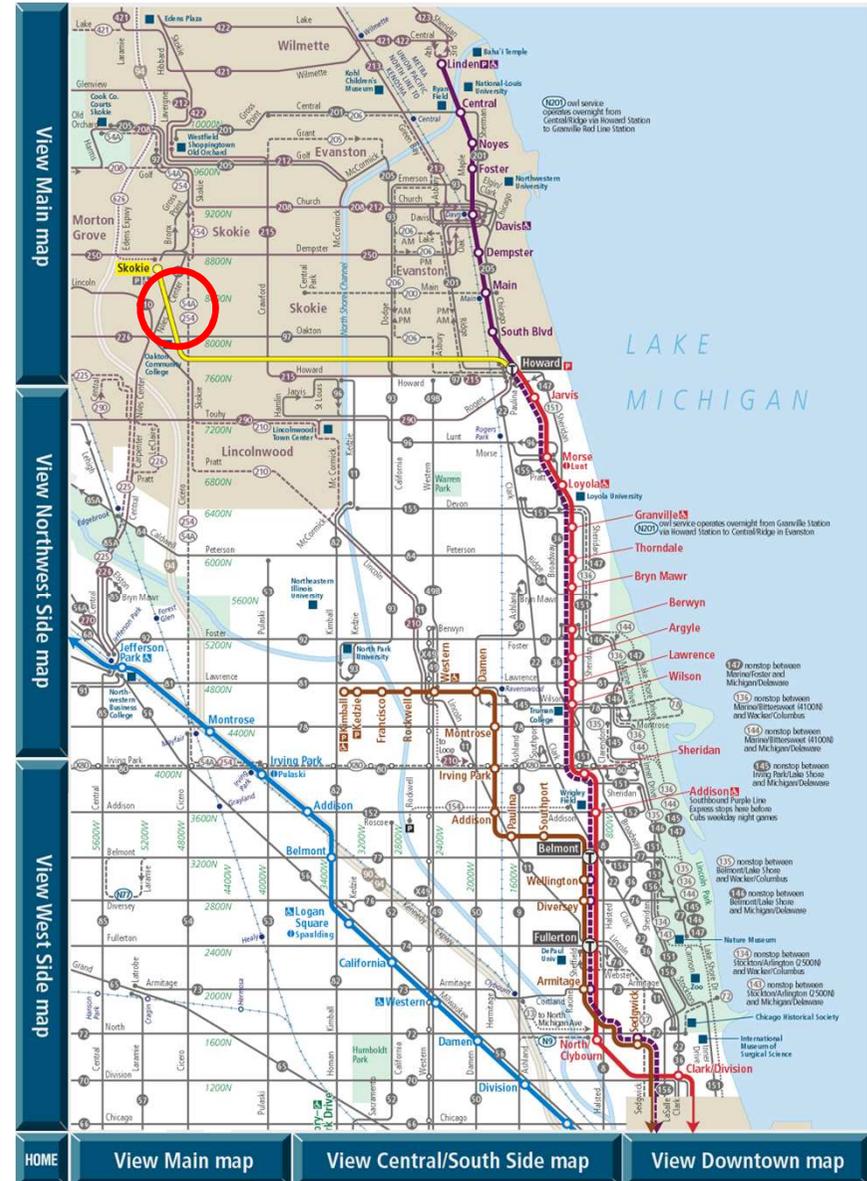
Einbau der Schottertragschicht  
mit einem Fertiger



# Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

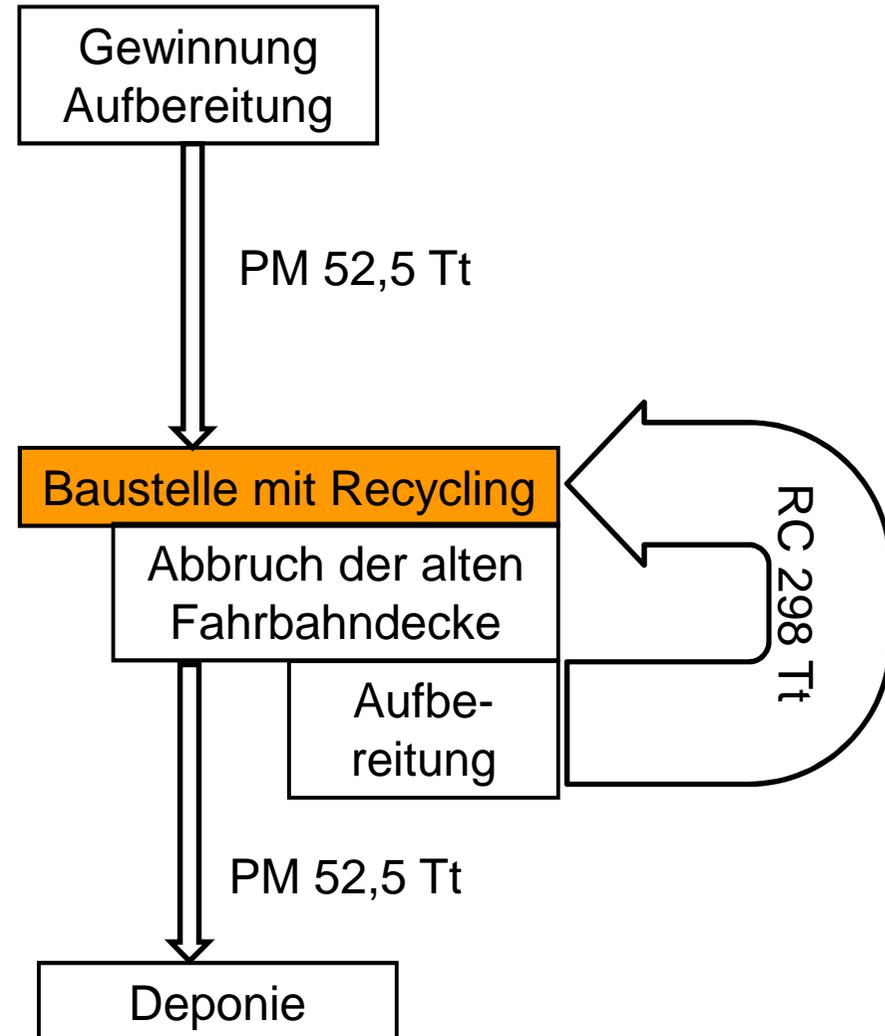
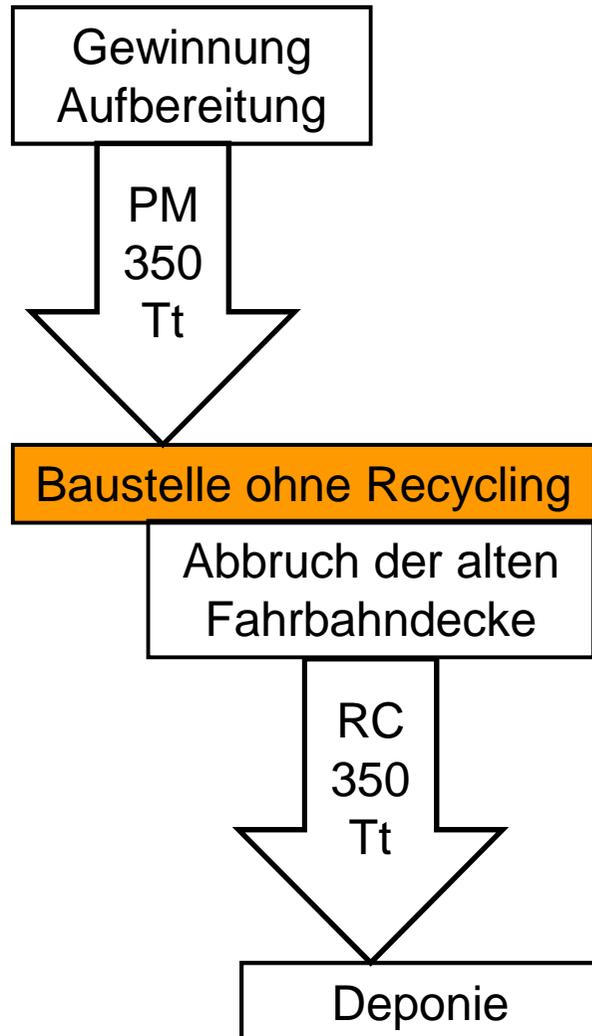
Recycling-Baustoff als lokaler Baustoff:  
Rohstoff- und Transportersparnis

Beispiel EDENS EXPREEWAY  
CHICAGO 1989: Vor-Ort-Aufbereitung  
und Verwertung des Fahrbahnbetons



Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

Materialbilanz: 350.000 t Betonaufbruch



## Ausgangsdaten für Energiebilanz

### Energieaufwand ohne Recycling

- Transporte zur Deponie (15 Meilen) und zur Anlieferung des Primärmaterials (18 Meilen)
- Aufbereitung für PM

### Energieaufwand mit Recycling

- Transporte zur Deponie und zur Anlieferung des Primärmaterials
- Abbruch
- Aufbereitung vor Ort
- Aufbereitung für PM und RC

Überprüfung der angegebenen Einsparung von Kraftstoff von 200.000 gallons of diesel durch eigene Berechnungen

## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

### Gegenüberstellung von Material- und Energieaufwand

	Ohne Recycling		Mit Recycling			
Materialaufkommen [t]						
	Primärmaterial	Abfall zur Beseitigung	Primärmaterial (15 %)	Abfall zur Beseitigung (15 %)	RC-Baustoff (85 %)	
	350.000	350.000	52.500	52.500	297.500	
Aufbereitung						
spez. Energieaufwand [MJ/t]	45	0	45	0	min	43
					Mittel	62
					max	84
Energieaufwand [MJ]	15.750.000	0	2.362.500	0	min	12.792.500
					Mittel	18.445.000
					max	24.990.000
Transport						
spez. Energieaufwand Lastfahrt [MJ/t*km]	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	
spez. Energieaufwand Leerfahrt [MJ/t*km]	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	
Entfernung [km]	29	24	29	24	0	
Transportenergie [MJ]	21.315.000	17.640.000	3.197.250	2.646.000	0	
Gesamtenergieaufwand [MJ]						
	54.705.000		min	Mittel	max	
			20.998.250	26.650.750	33.195.750	

# Eignung von Hochbaubetonbruch für den Straßenbau? Materialmenge eines 5-geschossigen P2-Standardgebäudes mit 30 Wohneinheiten

Länge 36,00 m  
Breite (inkl. Loggien) 12,76 m  
Höhe 16,20 m  
umbauter Raum 6.742 m<sup>3</sup>



- ⇒ 1084 Betonfertigelemente mit einer Masse von 2029 t
- ⇒ Gesamtbaustoffmenge 2403 t

Quelle: Mettke, Thomas 1999

## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

	Anteil	
	[M.-%]	
Terrazzo	3,9	Beton + min. Bestandteile
Holz	0,7	84,4 + 3,1 + 2,2 + 3,9 = 93,6 %
Glas	0,2	
Estrich/ Anhydrit	3,2	
Mineralwolle	0,3	Leicht- und Dämmstoffe (kein Anhydrit!)
Kamolithplatten	0,032	3,2 %
Andere Dämmstoffe	0,073	
Schlackensand	3,1	
Kies	2,2	Fremdbestandteile
PVC-Rohre	0,033	0,7 + 0,2 + 0,3 + 0,032 + 0,073 + 0,033
Stahlrohre	0,003	= 1,35 %
Bewehrungsstahl	1,9	
Beton	84,4	

### Materialzusammensetzung im P2-Standardgebäude

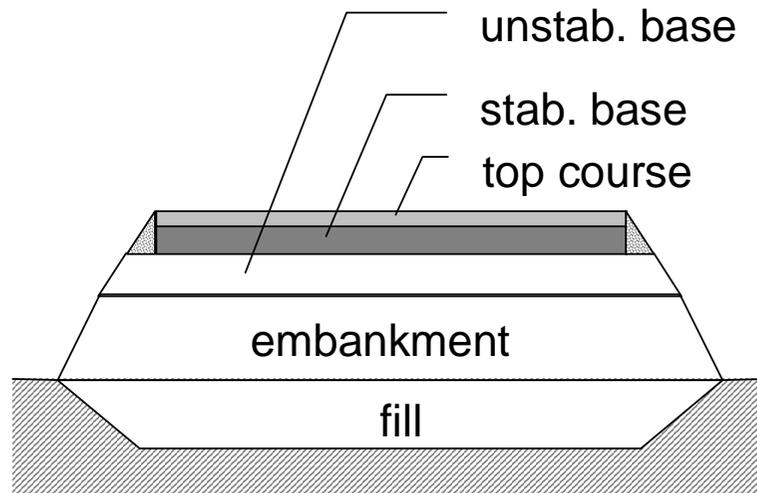
mineralische Leicht- und Dämmstoffe entsprechend TL Min-STB 2000 max.

1 M.-% -/✓

Fremdstoffe max.

0,2 M.-% -

## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton



Materialbedarf für 0,5 m starke Tragschicht pro m Richtungsfahrbahn einer dreispurigen Autobahn ca. 18 t  
⇒ P2-Standardgebäude ergibt ca. 100 m Richtungsfahrbahn

### Anforderungen

- Mineralstoffgemisch für Frostschutzschichten und/oder Tragschichten nach TL Gestein-StB 2004
- Bautechnische Anforderungen ✓ (stoffliche Zusammensetzung, Frostbeständigkeit, Raumbeständigkeit, Widerstandsfähigkeit gegen Schlag, Sieblinie, Anteil an gebrochenen Körnern)
- Wasserwirtschaftliche Merkmale ✓

Voraussetzung: Schad- und Störstoffe durch kontrollierten Rückbau oder Sortierung aushalten

- 4 Wiederverwertung von Betonbruch
  - 4.1 Definitionen und Begriffe
  - 4.2 Verbrauch an Primärmaterial, Abfallentstehung
  - 4.3 Aufbereitung von Betonbruch
  - 4.4 Eigenschaften von Betonrezyklaten
    - 4.4.1 Merkmale des Primärmaterials
    - 4.4.2 Betonrezyklate
  - 4.5 Verwertungstechnologien
    - 4.5.1 Verwertung in Tragschichten
    - 4.5.2 **Verwertung als rezyklierte Gesteinskörnung**
    - 4.5.3 Anwendungsbeispiele

## Vorschriften für rezyklierte Gesteinskörnungen und für die Betonherstellung aus Rezyklaten

Europäische Produktnorm / Deutsche Fassung	Mitteltende deutsche Regelwerke
DIN EN 12620 (2002) + A1 (2008): Gesteinskörnungen für Beton.	DIN 4226-100 (2002): Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel. Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen.
DIN EN 206- 1 (2001) + A1 (2004) + A2 (2005): Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität.	DAfStb-Richtlinie (2010): Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100 - Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN 1045-1.
	DAfStb-Richtlinie (2007) + Berichtigung (2010): Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktionen im Beton (Alkali-Richtlinie).

## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

# Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung von rezyklierten Gesteinskörnungen für die Betonherstellung (1)

Materialgruppen entsprechend DIN EN 12620			Materialgruppen entsprechend DIN 4226-100		
Materialgruppen	Gehalt [Ma.-%]		Materialgruppen	Gehalt [Ma.-%]	
	Typ 1	Typ 2		Typ 1	Typ 2
Rc: Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton	Rc+Ru ≥ 90	Rc+Ru ≥ 70	Beton und natürliche Gesteinskörnungen	≥ 90	≥ 70
Ru: Ungebundene Gesteinskörner, Naturstein, hydraulisch gebundene Gesteinskörner GK					
Rb: Mauer- und Dachziegel aus gebranntem Ton, Kalksandsteine, nicht schwimmender Gasbeton	≤ 10	≤ 30	Klinker, nicht por. Ziegel	≤ 10	≤ 30
			Kalksandstein		
			porosierter Ziegel, Leichtbeton, haufwerksporiger Beton, Porenbeton, Putz, Mörtel, poröse Schlacke, Bimsstein	≤ 2	≤ 3

## Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung (2)

Materialgruppen entsprechend DIN EN 12620			Materialgruppen entsprechend DIN 4226-100		
Materialgruppen	Gehalt [Ma.-%]		Materialgruppen	Gehalt [Ma.-%]	
	Typ 1	Typ 2		Typ 1	Typ 2
Ra: Bitumenhaltige Materialien	≤ 1	≤ 1	Asphalt	≤ 1	≤ 1
FL : Schwimmendes Material im Volumen	≤ 2 cm <sup>3</sup> /kg		Glas, Keramik, Stückgips, Metall, NE-Metallschlacke, Holz, Gummi, Kunststoff, Papier, Pflanzenreste, Sonstiges	≤ 0,2	≤ 0,5
X: Bindige Materialien (d. h. Ton, Erde), Fe- und NE- Metalle, nicht schwimmendes Holz, Kunststoff, Gummi, Gips	X+Rg ≤ 1	X+Rg ≤ 2			
Rg: Glas					

## Weitere Anforderungen

Bautechnische Anforderungen entsprechend DIN 4226-100			
		Typ 1	Typ 2
Trockenrohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	≥ 2000	
Schwankungsbreite	[kg/m <sup>3</sup> ]	150	
Wasseraufnahme nach 10 min	[Ma.-%]	≤ 10	≤ 15
Säurelösliches Sulfat	[Ma.-%]	≤ 0,8	
Säurelösliches Chlorid	[Ma.-%]	≤ 0,04	
Umwelttechnische Anforderungen			

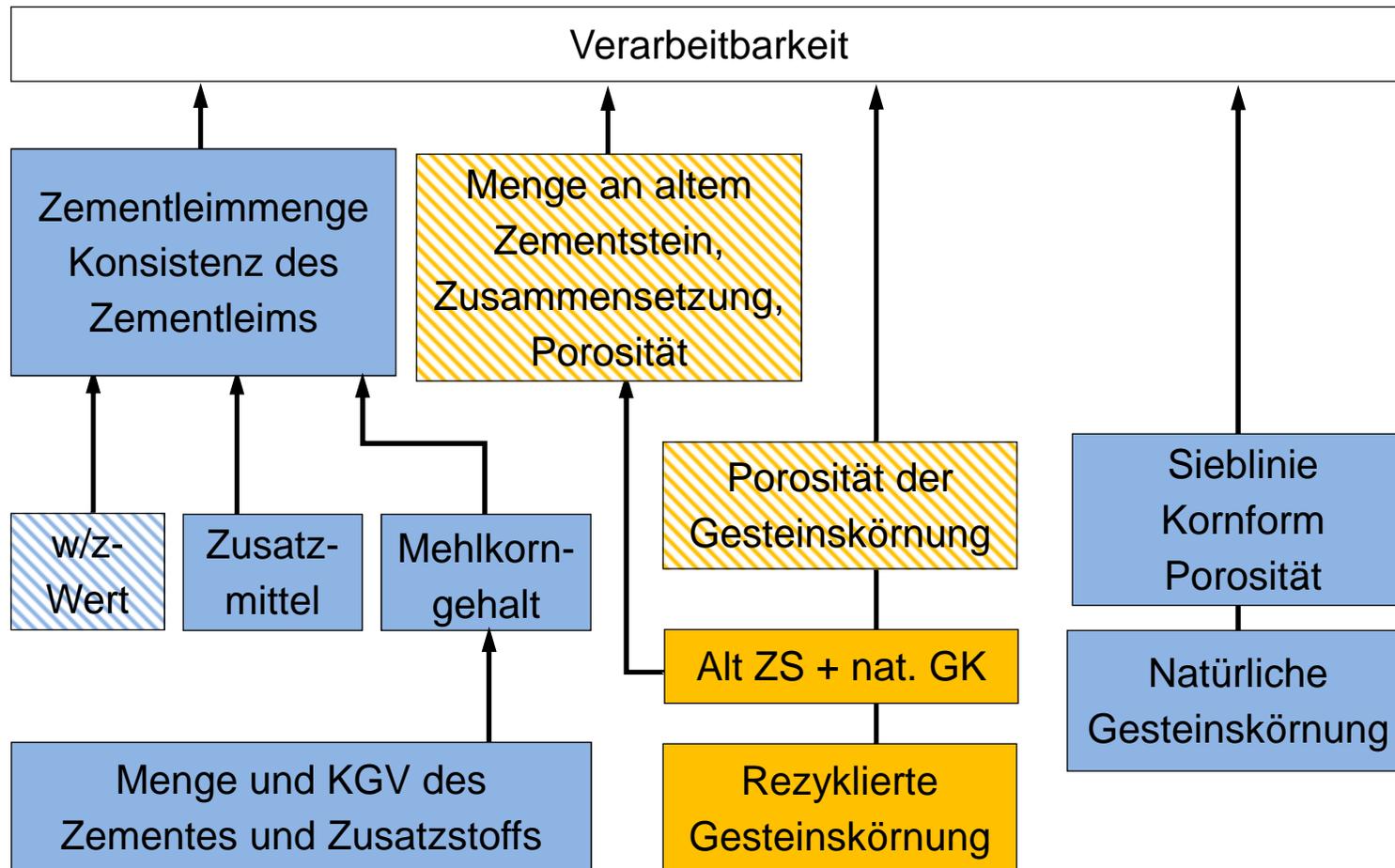
## Betonherstellung aus Rezyklaten

		Typ 1	Typ 2
Verwendung von rezyklierter GK < 2 mm		nicht erlaubt	
Alkali-Richtlinie	Expositionsklassen	[Vol.-%]	
WO (trocken)	Karbonatisierung XC 1		
WF (feucht)	Kein Korrosionsrisiko X 0 Karbonatisierung XC 1 bis XC 4	≤ 45	≤ 35
	Frost ohne Taumittleinwirkung XF 1 und XF 3 Beton mit hohem Wassereindringwiderstand	≤ 35	≤ 25
	Chemischer Angriff XA 1	≤ 25	≤ 25
Erlaubte Festigkeitsklassen		bis C 30/37	
Bemessung		nach DIN 1045/EN 206-1	
Weitere Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nicht für Bauteile aus Spannbeton oder Leichtbeton</li> <li>• Nachweis der Alkaliunempfindlichkeit und der Frostwiderstandsfähigkeit erforderlich</li> <li>• Erweiterte Erstprüfung und Produktionskontrolle</li> </ul>		

**Leitgedanke der Normen: Keine Veränderungen der Eigenschaften und der Bemessungsgrundlagen für Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen gegenüber Beton mit natürlichen Gesteinskörnungen**

# Einflüsse auf die Verarbeitbarkeit und Gegenmaßnahmen

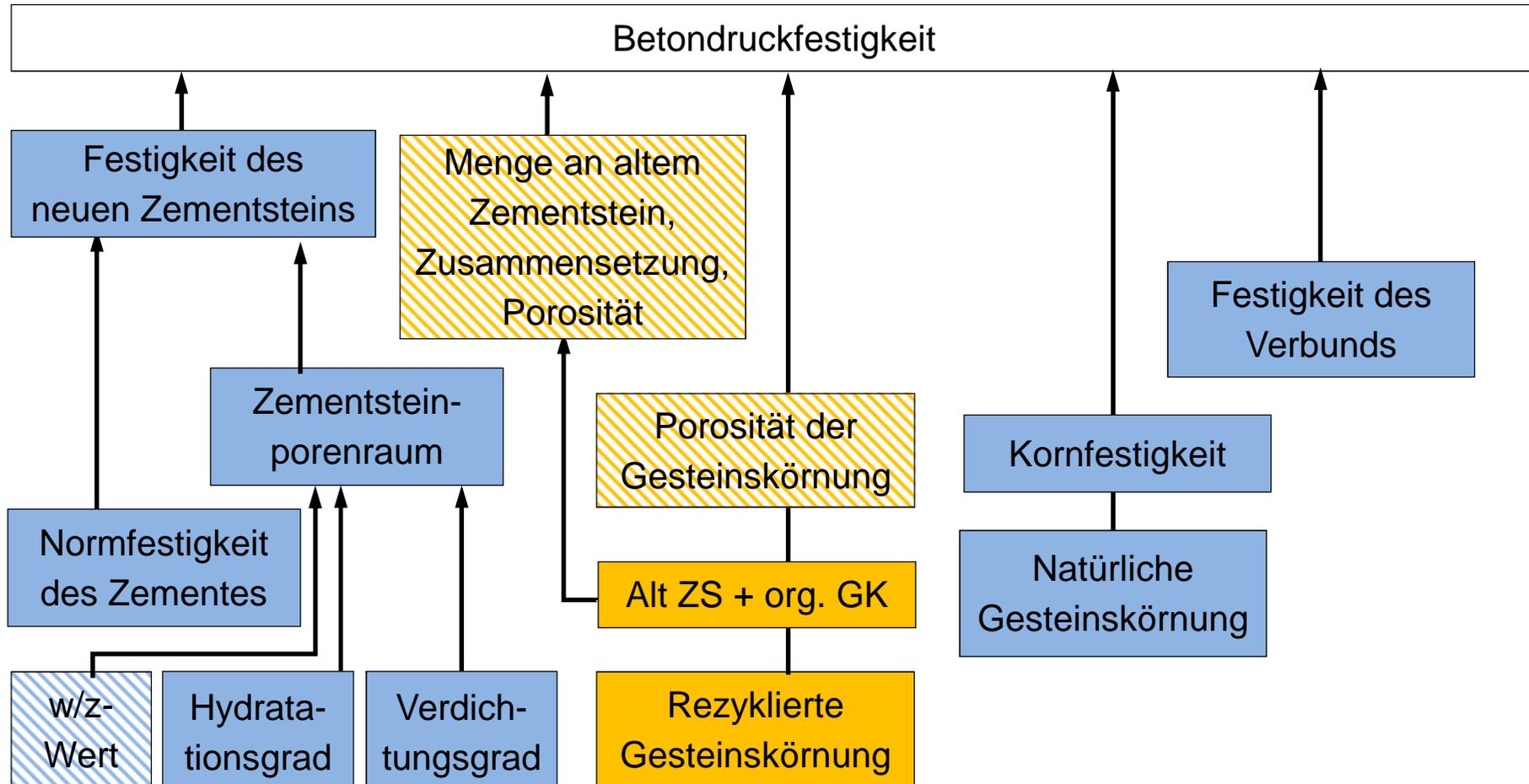
- Vornässen der Zuschläge bzw.
- Wasseraufnahme der Zuschläge in Rezeptur berücksichtigen
- Feinstoffzugabe
- Verwendung von Fließmittel



## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

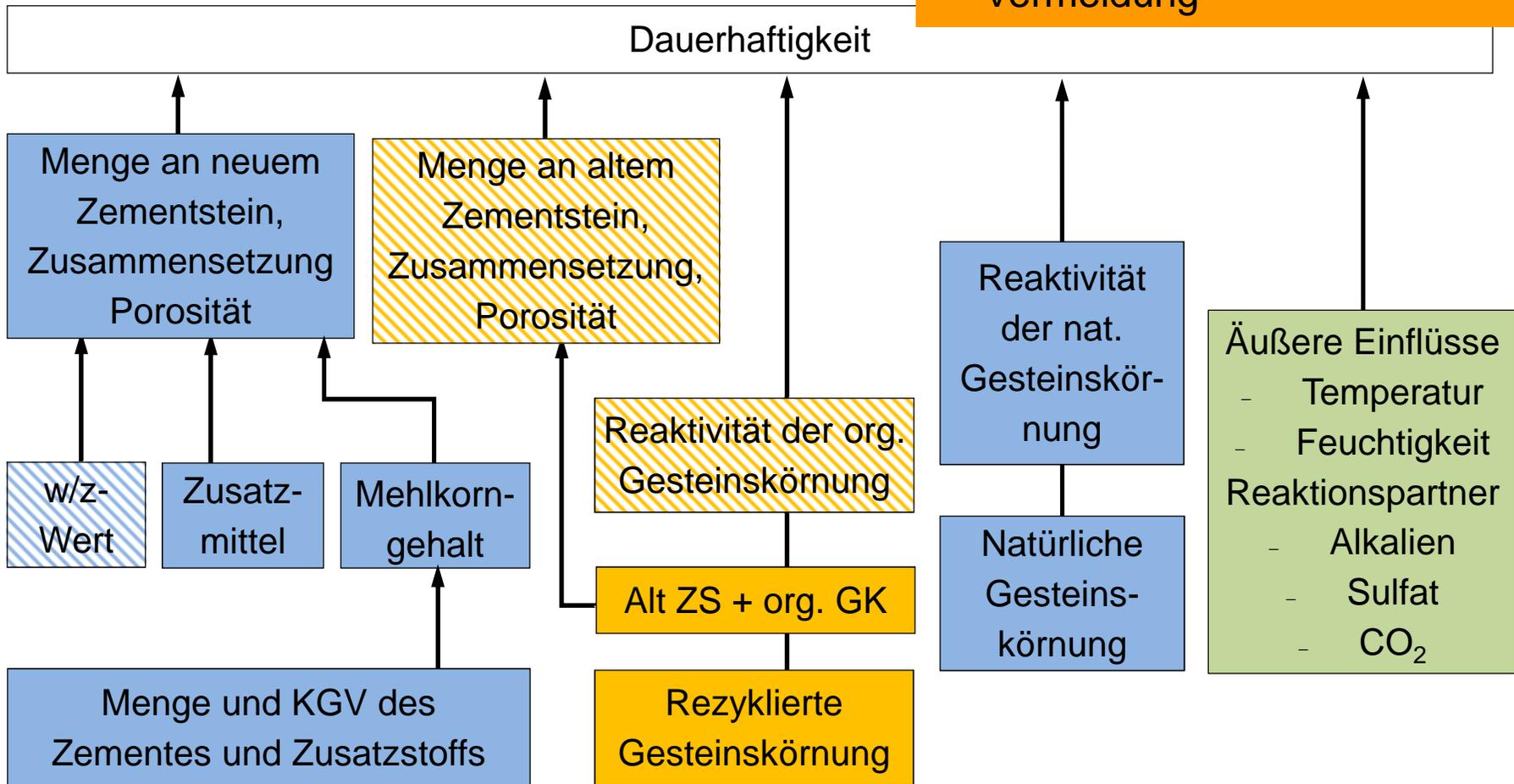
- Rohdichten Rezyklat > 2 kg/dm<sup>3</sup>
- Wasseraufnahme < 10 %
- Fraktion > 2 mm
- Begrenzung der Zugabemenge

### Einflüsse auf die Festigkeit und Gegenmaßnahmen

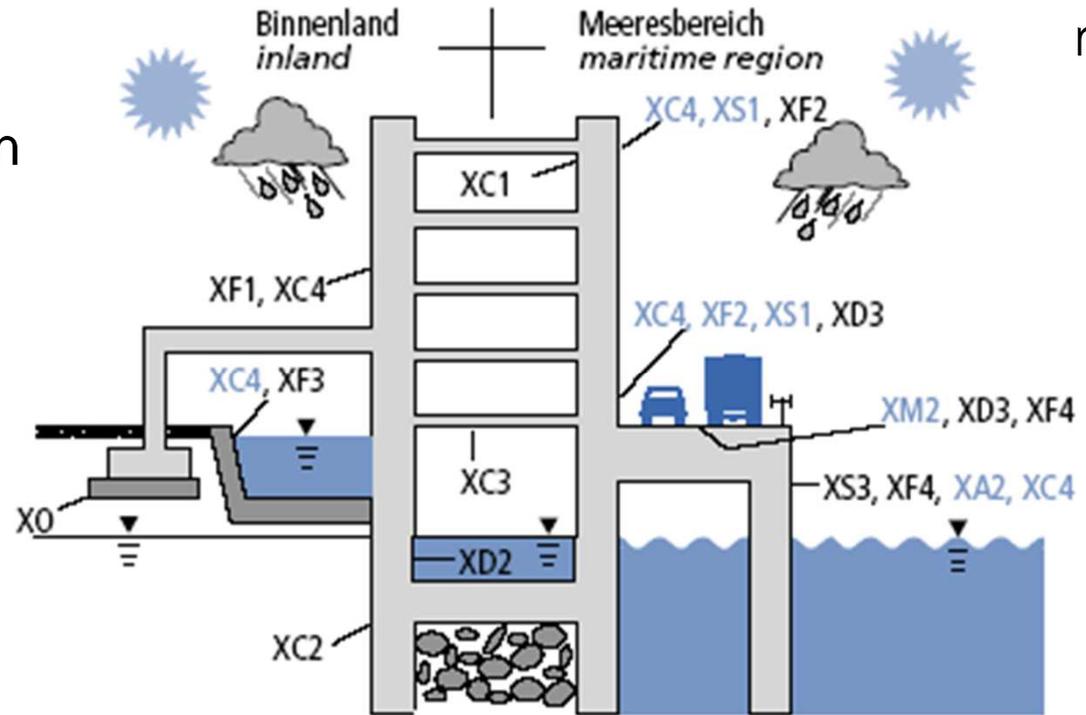
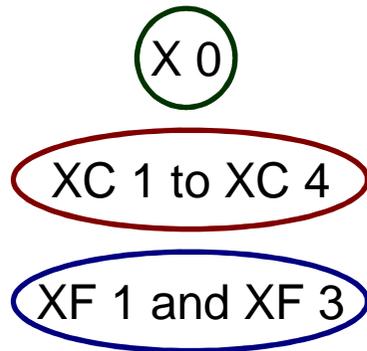


# Einflüsse auf die Dauerhaftigkeit und Gegenmaßnahmen

- Einsatz nur in bestimmten Expositionsklassen unter Beachtung der Begrenzung des Rezyklatanteils
- Regelungen zur AKR-Vermeidung



## Erlaubte Expositionsklassen für Betone mit Rezyklaten



Field of application				Replacement by RCA [vol.-%]	
ASR-guideline	DIN EN 206-1 and DIN 1045-2			Type 1	Type 2
	Exposure class	Effect	Stress		
WO (dry)	XC 1	Carbonation	dry	≤ 45	≤ 35
WF (humid)	X 0	No concrete attack			
	XC 1 to XC 4	Carbonation	dry to wet		
	XF 1 and XF 3	Freeze-thaw <b>without</b> salt	moderate <b>and</b> high water saturation	≤ 35	≤ 25
	XA 1	Chemical attack	weakly corrosive	≤ 25	≤ 25

## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

Zusätzliche Regelungen in Bezug auf die Widerstandsfähigkeit gegenüber inneren Einflüssen, die aus der Alkali-Kieselsäure-Reaktion herrühren.

Klassifizierung erfolgt nach

- der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen und
- der einwirkenden Feuchtigkeit

Einsatz von rezyklierte Gesteinskörnungen in Abhängigkeit von der jeweiligen Alkaliempfindlichkeitsklasse und weiteren Randbedingungen wie dem Zementgehalt in den Feuchtigkeitsklassen WO, WF und WA

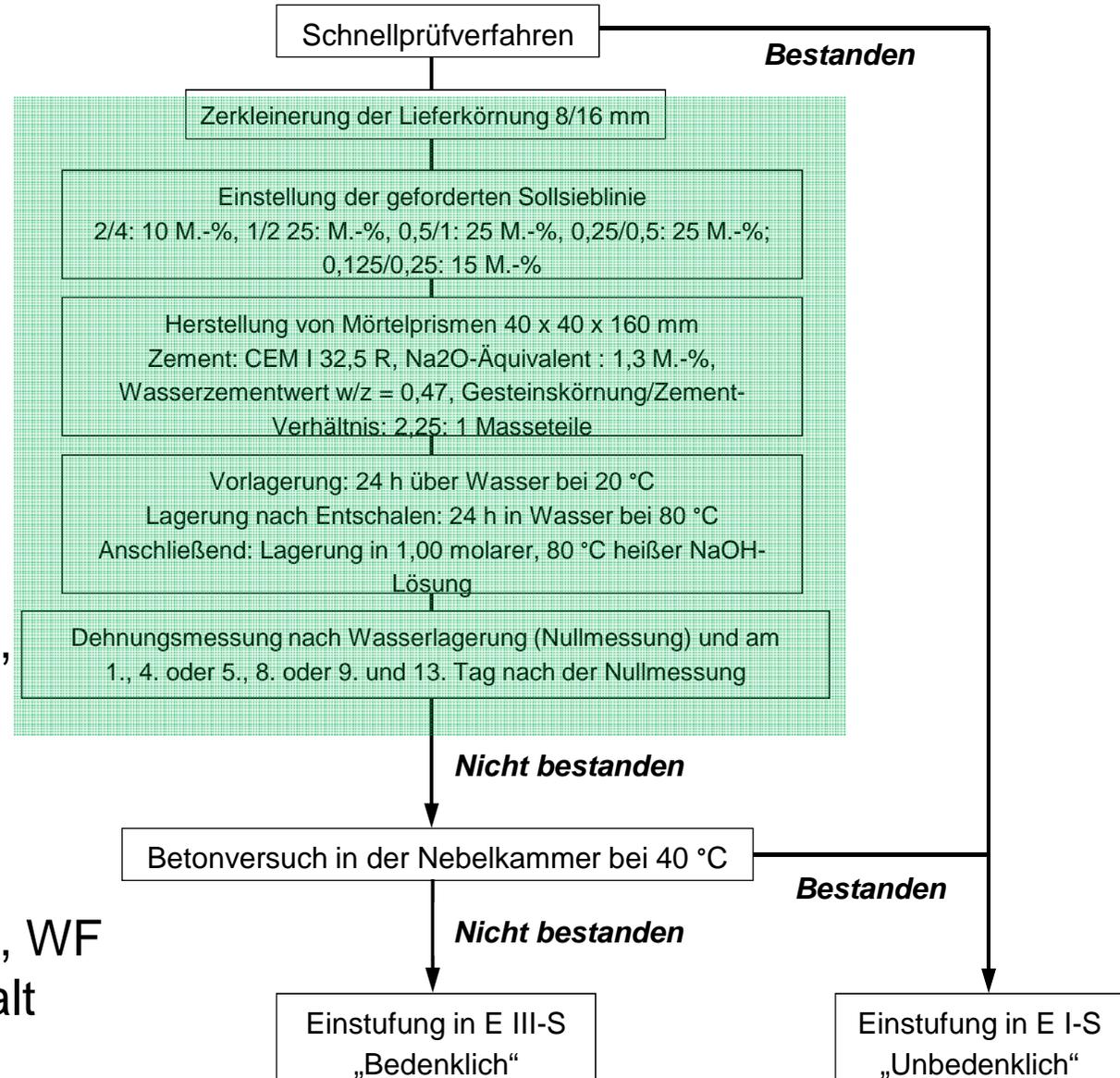
- WO: Innenbauteile des Hochbaus und geschützte Außenbauteile
- WF: ungeschützte Außenbauteile
- WA: Bauteile unter Tausalzeinwirkung ohne zusätzliche hohe dynamische Beanspruchung

## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

Prüfung der Alkaliempfindlichkeit nach folgendem Versuchsablauf

Bei Einstufung in E I-S und Einsatz in den Klassen WO, WF und WA keine zusätzlichen Anforderungen

Bei Einstufung in E III-S Einsatz in den Klassen WO, WF und WA, wenn Zementgehalt < 300 kg/m<sup>3</sup>



- 4 Wiederverwertung von Betonbruch
  - 4.1 Definitionen und Begriffe
  - 4.2 Verbrauch an Primärmaterial,  
Abfallentstehung
  - 4.3 Aufbereitung von Betonbruch
  - 4.4 Eigenschaften von Betonrezyklaten
    - 4.4.1 Merkmale des Primärmaterials
    - 4.4.2 Betonrezyklate
  - 4.5 Verwertungstechnologien
    - 4.5.1 Verwertung im Straßenbau
    - 4.5.2 Verwertung als rezyklierter Zuschlag
    - 4.5.3 **Anwendungsbeispiele**

## Praxisbeispiele

1994/1995

Verwaltungsgebäude der  
Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück  
Innenwände



1999/2000

Wohnanlage „Waldspirale“, Darmstadt  
Innenbauteile und Bodenplatte



## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

### Praxisbeispiele

2009

Wohnbebauung (Animation) des Projekts Rheinallee in Ludwigshafen mit markiertem Gästehaus und Baustelle am 16.06.2009

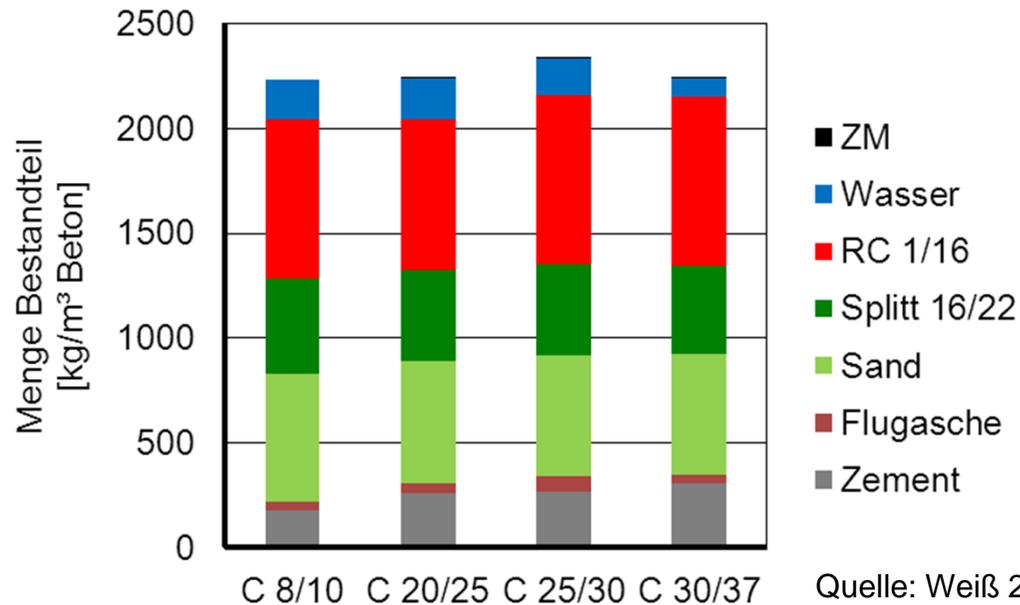


## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

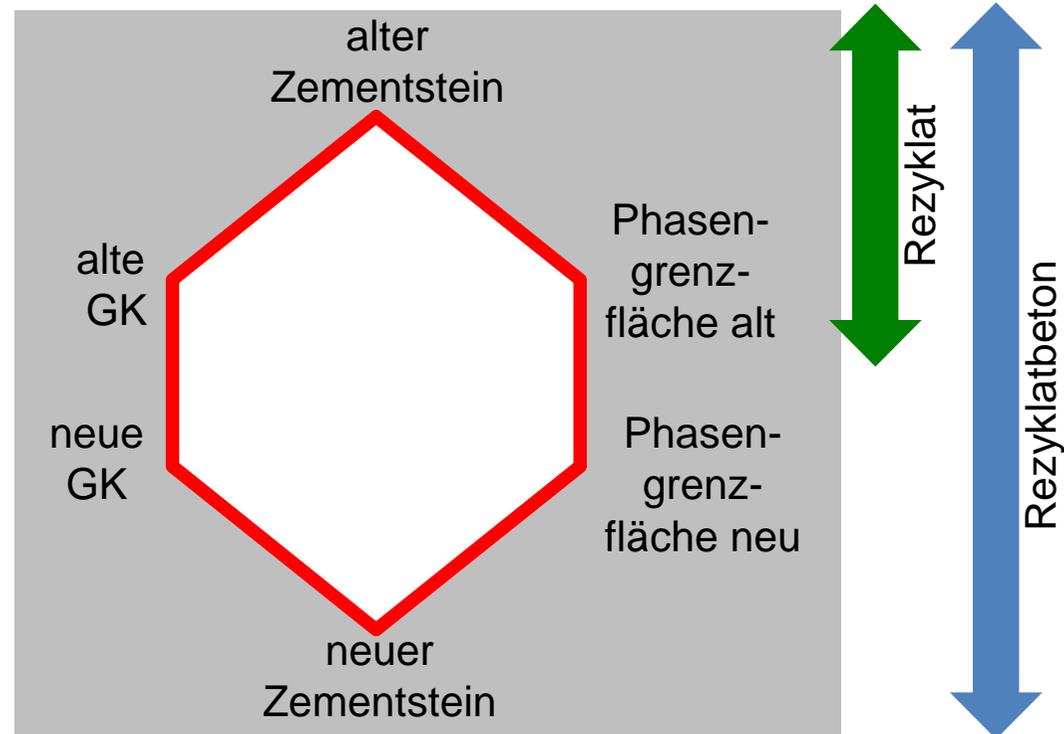
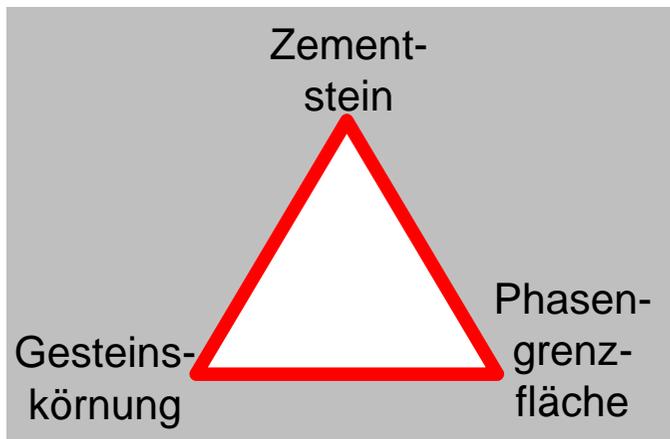
Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen stellt in Deutschland noch nicht den Stand der Technik dar

Beispiele für Betonrezepturen unter Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen in einem Transportbetonwerk

Gute Aussichten hat die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen in Ballungsgebieten und dort, wo grobe Gesteinskörnungen rar sind

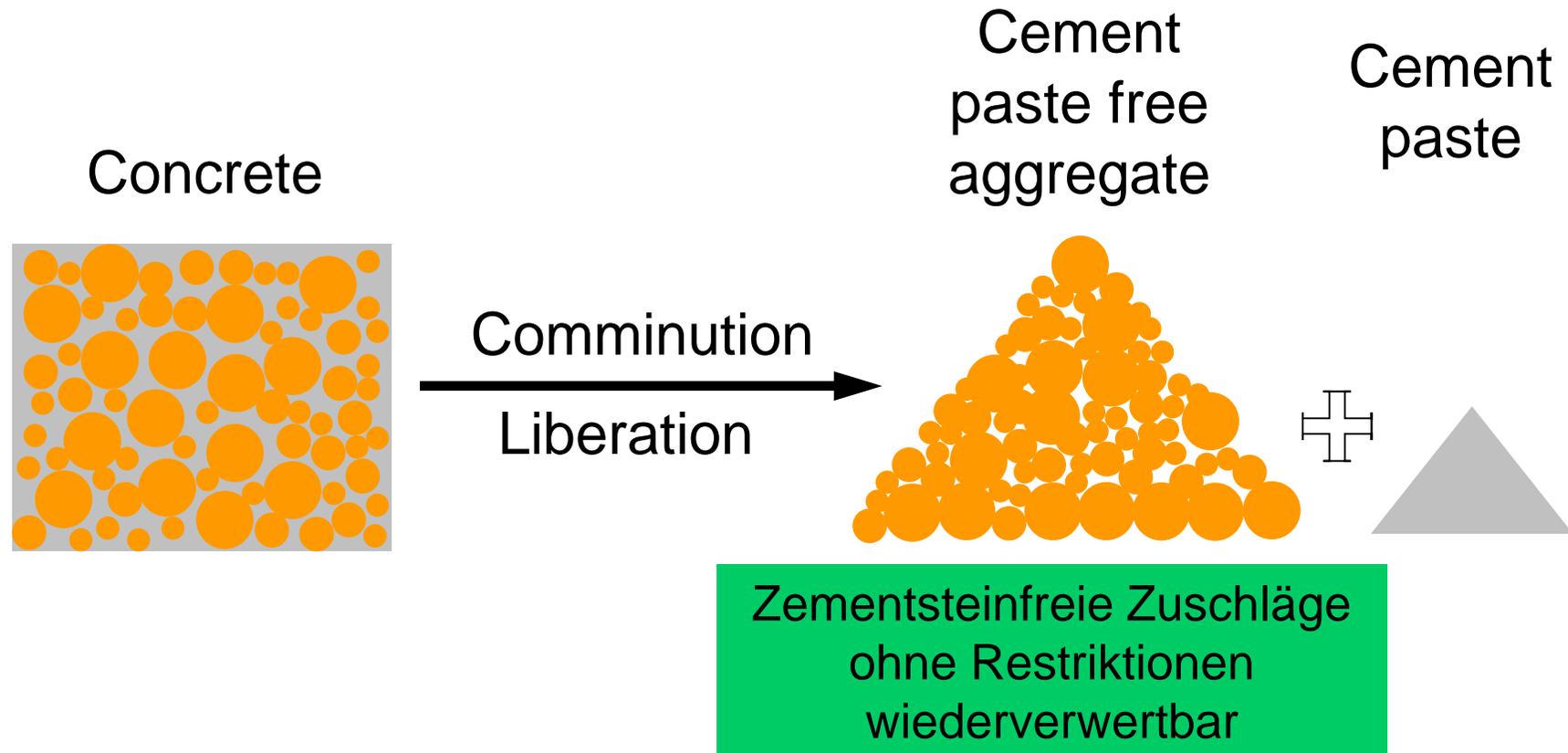


# Exkurs: Bausteine zur Modellierung von Rezyklatbetonen



## Exkurs: Bausteine zur Modellierung von Rezyklatbetonen

## Advanced Recycling: Fragmentierung mittels Unterwasserentladungen

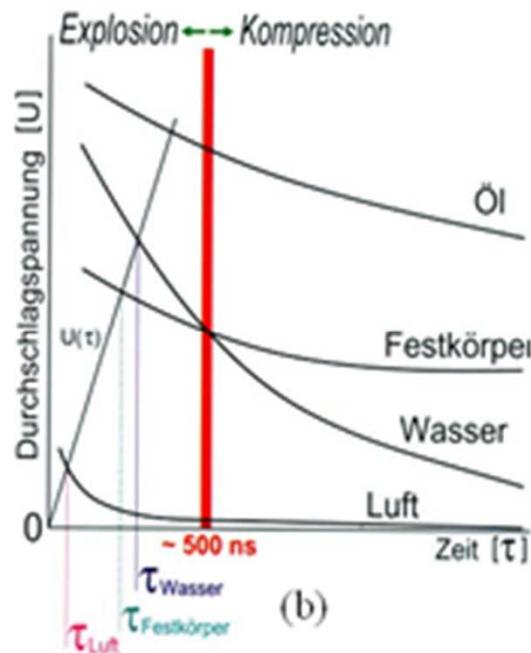


## Prinzip der elektrodynamischen im Vergleich zur elektrohydraulischen Zerkleinerung

Zerstörung durch Explosion  
 (elektrodynamischer Effekt)

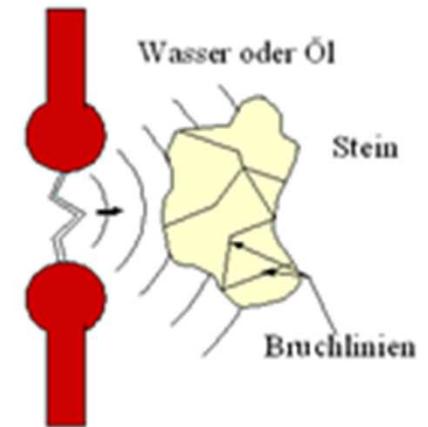


(a)



(b)

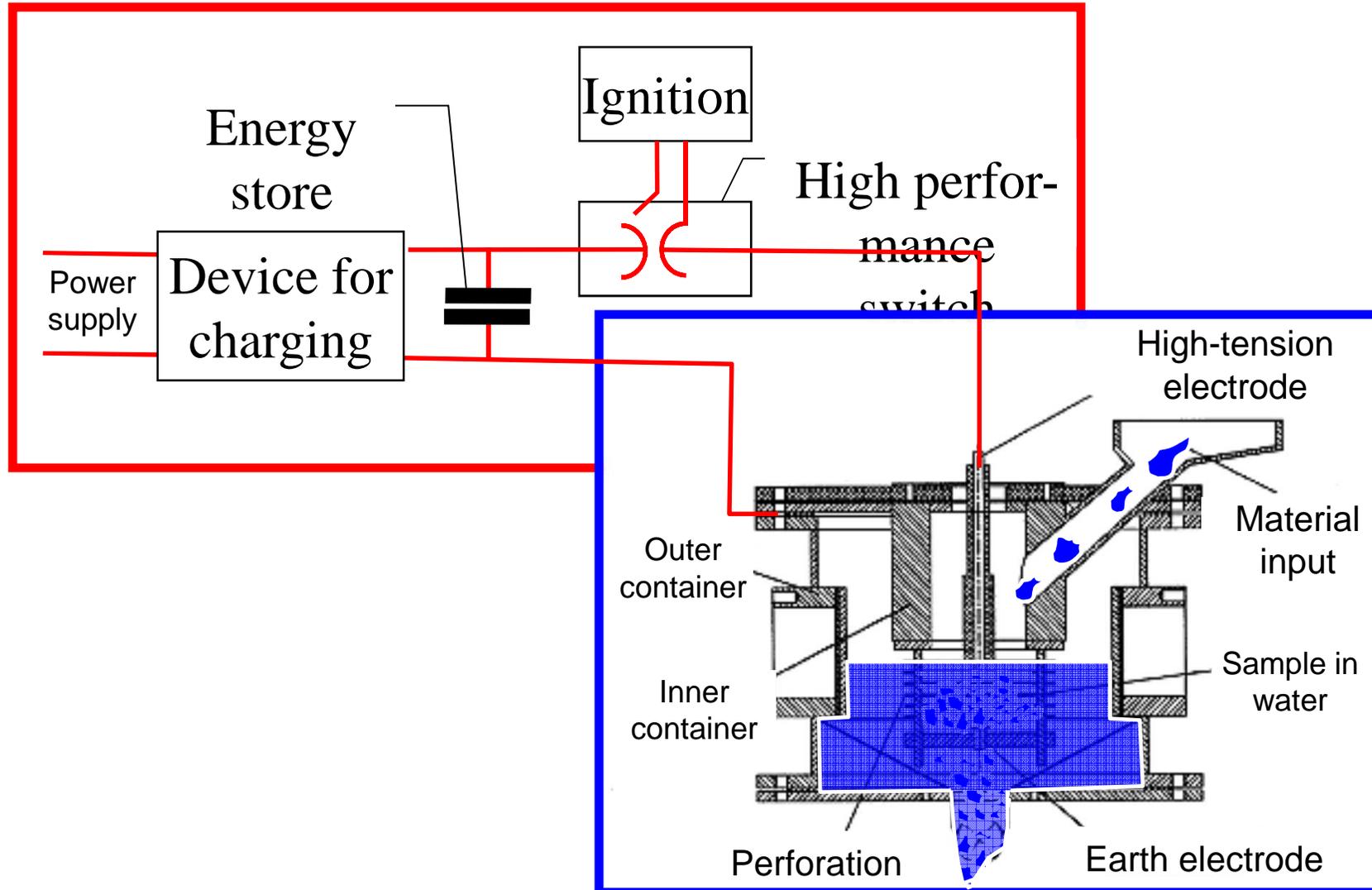
Zerstörung durch Kompression  
 (elektrohydraulischer Effekt)



(c)

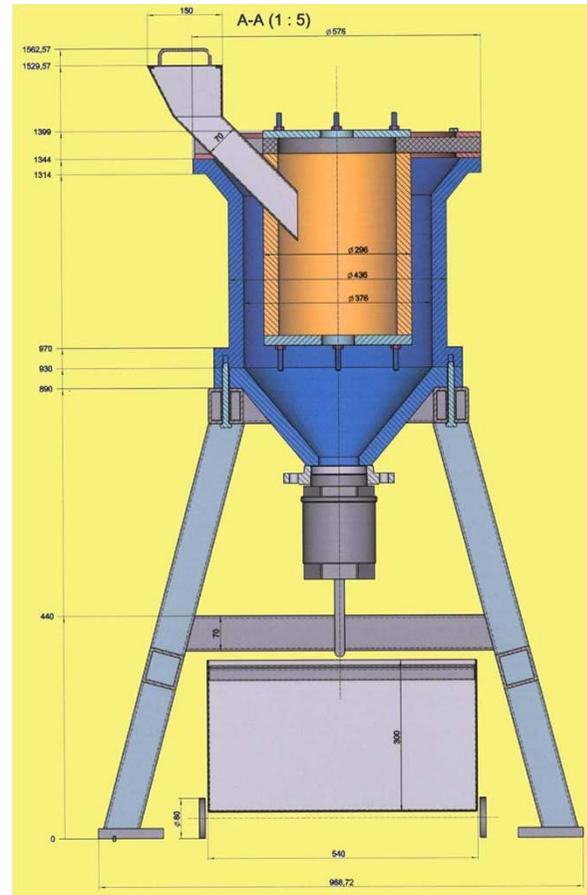
Mitte: Durchschlagsspannungen für verschiedene Materialien als Funktion der Impulsanstiegszeit

Laborversuchsanlage zur elektrodynamischen Zerkleinerung an der Uni Magdeburg



## Vorlesung D/Kapitel 10: Advanced Recycling

### Behandlungskammer der Versuchsanlage an der Uni Magdeburg



### Energiebedarf ✓

	Zerkleinerung	Zerkleinerung + Aufschluss
SIZ	0,05 MJ/kg	0,08 MJ/kg
Trad. Brecher	0,01-0,02 MJ/kg	-

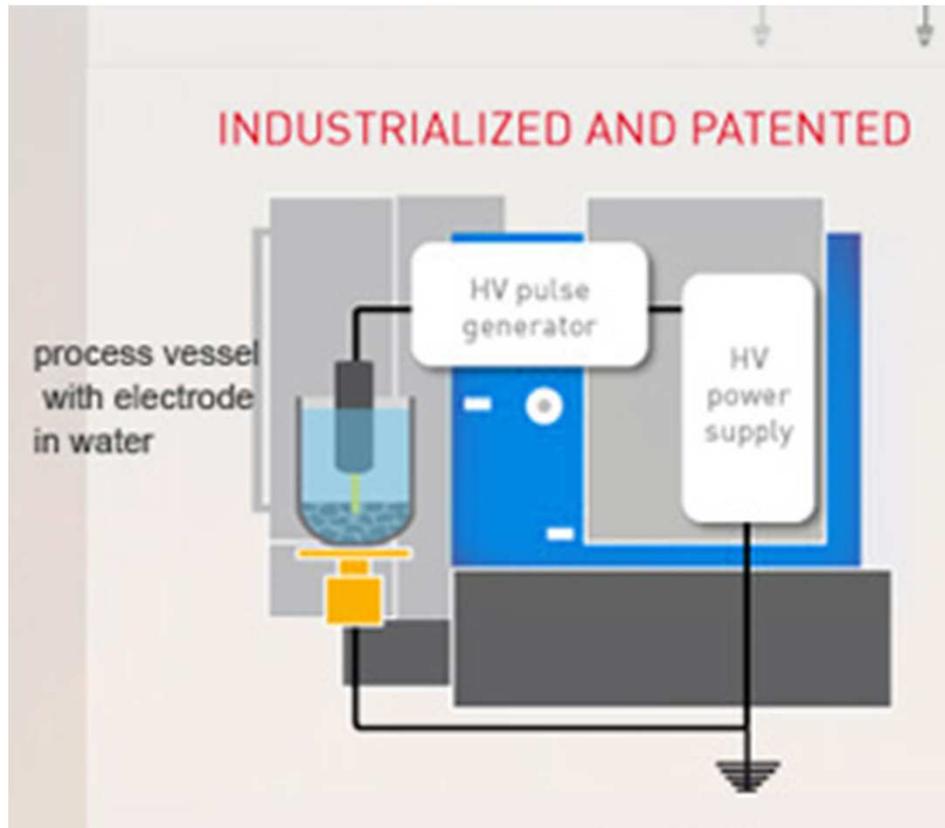
Durchsatz und Entwicklungsstadium sind völlig unterschiedlich !

### Produktqualität ✓



	Aufschlussgrad
Prallbrecher	29 %
Backenbrecher	21 %
SIZ 1	90,5 %
SIZ 2	95,7 %

Kommerzielles Gerät zur elektrodynamischen Zerkleinerung einer Schweizer der Firma



<http://www.selfrag.com/>



## Zerkleinerungsergebnis



## Vorlesung D/Kapitel 4: Beton

Aufbau einer kontinuierlichen Anlage mit einem Durchsatz von 2 t/h

