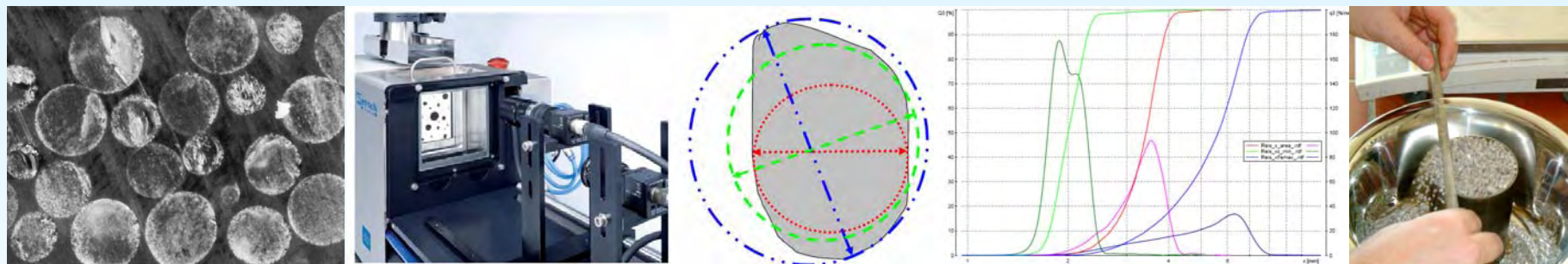


figawa Service

**Geofora 2010**

Fachkongress zur Bohrtechnik, Brunnenbau und Geothermie

Hof, 17./ 18.06.2010



# Bedeutung und praxisgerechte Bestimmung von Bodenkennwerten für den Brunnenbau

**Dipl.-Ing. Kerry F. Paul**

IBB Ingenieur- und Beratungsbüro für Brunnenbetriebstechnik und –instandhaltung GmbH  
Am Pichelssee 12, D- 13595 Berlin, Tel. 030 – 36 28 63 50 / 01577 – 45 31 936, kfp@ibb-berlin.de



Jeder Ingenieur sollte sich angewöhnen, seine Beurteilung der Plastizität und der Kornzusammensetzung der Erdstoffe, mit denen er zu tun hat, durch Zahlenwerte statt durch Beschreibungen auszudrücken.

Die Verwendung von Zahlenwerten verhindert Missverständnisse und ist Anreiz, von Zeit zu Zeit den Genauigkeitsgrad der Schätzungen zu überprüfen.

(Terzaghi, 1948)



Abb. ETH Zürich, Labor für Umweltingenieurwissenschaften

# Gliederung

- **Einleitung**  
Abkürzungen – Begriffe – Regelwerk & Normen – F&E - Definitionen zur Partikelmessung
- **Wechsel von der zwei- zur dreidimensionalen Betrachtungsweise**  
Musterschnitte - Porenanteil
- **Bestimmung & Anwendung Bodenkennwerte für den Brunnenbau**  
Durchlässigkeitsbeiwert – Bestimmung  $d_g$  – Schüttgut-Auswahl
- **Digitale Partikelmessung**  
Beschreibung - Beispiele
- **„Hydraulische Kette“**
- **Exkurs - Brunnenalterungsart „Schüttgut-Setzung“**
- **Zusammenfassung**

## Einleitung „Abkürzungen“

<b>d</b> Index Zahlenwert	Partikel-Durchmesser bei ... % der Partikel-Summenverteilung [ mm ]; wahlweise entsprechend weiterer Verwendung als Angabe im Partikelmodell $x_{c \min}$ oder $x_{area}$
<b>d<sub>g</sub></b>	maßgebender Boden-Partikeldurchmesser [ mm ] als Wert des vertikalen Wendepunktes der Summenverteilung bzw. des Maximums der Dichteverteilung; bei mehrgipfelter Verteilung 1.Wendepunkt bzw. 1.Maximum; realitätsnah als Angabe im Partikelmodell $x_{area}$
<b>D<sub>S</sub></b>	maßgebender Schüttgut-Partikeldurchmesser [ mm ], der separat gemessen werden muß; D <sub>S</sub> ist nicht D <sub>50</sub> !!! realitätsnah als Angabe im Partikelmodell $x_{area}$ <b>DVGW MB W 113 (2001)</b> $D_S = d_g \cdot F_g$ ( $F_g$ : siehe "Filterfaktor")
<b>C<sub>U</sub></b>	Ungleichkörnigkeitsfaktor [---] früher "U" ; überwiegend "Ungleichförmigkeitsfaktor" genannt ; Angabe zumeist im Partikelmodell $x_{c \min}$ <b>Hazen</b> $C_U = d_{60} / d_{10}$ <b>Terzaghi</b> $C_U = d_{70} / d_{20}$

# Einleitung „Begriffe“

<p><b>Filterfaktor</b></p>	<p>Der Filterfaktor [ --- ] beschreibt das Verhältnis von zwei aneinanderliegenden Fraktionen unter der Maßgabe, dass die kleinere Fraktion nicht in die größere Fraktion eindringt bzw. diese passiert. Früher wurde der Filterfaktor als Konstante angegeben (4 ... 5); das W 113 definiert den Filterfaktor in Abhängigkeit <math>C_U</math>.</p> <p><b>DVGW MB W 113 (2001)</b> Filterfaktor <math>F_g = (5 + C_U)</math>; mit <math>C_U &gt; 5 \implies C_{U_{max}} = 5</math> # Partikelmodell <math>x_{c_{min}}</math> <b>Kennkornglinien</b> z.B. "nach Biekse", "Körnungslinie" etc.; <math>d_K</math> - Wert im Schnittpunkt der Summenverteilung mit Kennlinie; durch Multiplikation <math>d_K</math> (= "Kennkorndurchmesser") mit Filterfaktor 4 ... 5 wird <math>D_S</math> gesucht / bestimmt # Partikelmodell <math>x_{c_{min}}</math> <b>Terzaghi (1948)</b> bei <math>D_{15} / d_{85} &lt; \text{Filterfaktor } 4</math> ist Erosionssicherheit gegeben (<math>d</math> = Boden ; <math>D</math> = Schüttgut ; Erosionssicherheit im Brunnenbau = Sandfreiheit) # Partikelmodell <math>x_{c_{min}}</math> <b>TU Berlin &amp; IBB Berlin (2010)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• der Filterfaktor ist abhängig von <math>C_U</math> <b>und</b> div. Formparametern <b>und</b> Lagerungsart bzw. Porenanteil</li> <li>• bei doppelter Glaskugel-Packung wird entsprechend experimenteller Ergebnisse der Filterfaktor "3" angewendet</li> <li>• bevorzugte Anwendung im Partikelmodell <math>x_{area}</math></li> </ul>
<p><b><math>k_f</math> - Wert</b></p>	<p>Durchlässigkeitsbeiwert [ m/s ] <b>Bestimmung im Laborversuch</b> nach Darcy / DIN 18130-1 (1998) <b>Bestimmung aus Partikel-Summenverteilung</b> (Siebung oder Digitale Partikelmessung) "beste <math>k_f</math>-Ergebnisse" mit der Berechnung nach Beyer &amp; Schweiger (1969) mit den Kennwerten <math>d_{10}</math> <b>und</b> <math>C_U</math> <b>und</b> Lagerungsart (locker - mittel - dicht); <math>d_{10}</math> wird häufig auch als <math>d_w</math> (= "wirksamer Korndurchmesser") bezeichnet ; Angabe bisher ausschließlich im Partikelmodell <math>x_{c_{min}}</math></p>
<p><b>Porenanteil</b></p>	<p>[ --- ] oder als "offener" Anteil der Gesamtprobe [ % ] in der Ingenieur- &amp; Hydrogeologie "n", in der Umwelt- und Verfahrenstechnik "ε" ("Lückengrad") <b>Bestimmung im Laborversuch</b> Messung des Porenanteils für nichtbindige Böden <b>und</b> Schüttgüter bei partikelspezifisch lockerer und dichter Lagerungsart nach DIN 18126 (1996); zusätzlich Messungen nach <b>Hausnorm</b> für Brunnenbau-viskositätsabhängige lockere Schüttgut-Lagerung</p>

# Einleitung „Regelwerk & Normen“

<b>DVGW MB W 113</b>	(2001) <i>Bestimmung des Schüttkorndurchmessers und hydrogeologischer Parameter aus der Korngrößenverteilung für den Bau von Brunnen</i>
<b>DVGW AB W 118</b>	(2005) <i>Bemessung von Vertikalfilterbrunnen</i>
<b>DVGW MB W 119</b>	(2002) <i>Entwickeln von Brunnen durch Entsandern - Anforderungen, Verfahren, Restsandgehalte</i>
<b>DVGW AB W 123</b>	(2001) <i>Bau und Ausbau von Vertikalfilterbrunnen</i>
<b>DVGW AB W 130</b>	(2007) <i>Brunnenregenerierung</i>
<b>DIN 4924</b>	(1998) <i>Sande und Kiese für den Brunnenbau</i>
<b>DIN EN 12904</b>	(2005) <i>Produkte zur Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch - Quarzsand und Quarzkies</i>
<b>DIN EN ISO 14688 - 1</b>	(2003) <i>Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 1: Benennung und Beschreibung</i>
<b>DIN EN ISO 14688 - 2</b>	(2004) <i>Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen</i>
<b>DIN 18196</b>	(2006) <i>Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke</i>
<b>DIN EN ISO 22475 - 1</b>	(2007) <i>Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Probenentnahmeverfahren und Grundwassermessungen, Teil 1: Technische Grundlagen der Ausführung</i>
<b>DIN 18124</b>	(1997) <i>Bestimmung der Korndichte, Kapillarpyknometer - Weithalspyknometer</i>
<b>DIN 18126</b>	(1996) <i>Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung</i>
<b>DIN 18130 - 1</b>	(1998) <i>Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes - Teil 1: Laborversuche</i>
<b>DIN ISO 9276 - 1</b>	(2004) <i>Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen, Teil 1: Grafische Darstellung</i>
<b>DIN ISO 9276 - 2</b>	(2006) <i>Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen, Teil 2: Berechnung von mittlere Partikelgrößen / -durchmessern und Momenten aus Partikelgrößenverteilungen</i>
<b>DIN ISO 9276 - 4</b>	(2006) <i>Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen, Teil 4: Charakterisierung eines Trennprozesses</i>
<b>DIN ISO 9276 - 6</b>	(2010) <i>Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen, Teil 6: Die Beschreibung und Quantifizierung von Partikelform und Morphologie</i>
<b>DIN 18123</b>	(1996) <i>Bestimmung der Korngrößenverteilung</i>
<b>DIN 52098</b>	(2005) <i>Prüfverfahren für Gesteinskörnungen - Bestimmung der Korngrößenverteilung durch Nasssiebung</i>
<b>DIN 66111 + Beiblatt 1</b>	(1989) <i>Partikelgrößenanalyse - Sedimentationsanalyse - Grundlagen</i> Beiblatt 1 (1989) <i>Auswertgleichungen zur Mengenmessung im Fließkraftfeld</i>
<b>DIN 66118</b>	(1984) <i>Partikelgrößenanalyse - Sichtanalyse - Grundlagen</i>
<b>DIN 66160</b>	(1992) <i>Messen disperser Systeme - Begriffe</i>
<b>DIN 66161</b>	(2010) <i>Partikelgrößenanalyse - Formelzeichen, Einheiten</i>
<b>DIN 66165 - 1</b>	(1987) <i>Partikelgrößenanalyse - Siebanalyse - Grundlagen</i>
<b>DIN 66165 - 2</b>	(1987) <i>Partikelgrößenanalyse - Siebanalyse - Durchführung</i>
<b>ISO 13322 - 1</b>	(2002) <i>Particle size analysis, Image analysis methods Part 1 Static image analysis methods</i>
<b>ISO 13322 - 2</b>	(2006) <i>Particle size analysis, Image analysis methods Part 2 Dynamic image analysis methods</i>

# Einleitung „Übersicht (F&E-) Vorhaben“

Titel	Ziel(e)
<p><i>Abstützung von Bohrlöchern zur Wassergewinnung – Glaskugeln als Verfüll-, Stütz- bzw. Filtermaterial für den modernen Brunnenbau; Untersuchung des Sandrückhalteverhaltens (Filterwirkung) der Glaskugeln im Vergleich zu Kies, Verockerungsneigung der Glaskugeln in Brunnen und unter Laborbedingungen, Einbauverhalten der Glaskugeln in gebohrten Brunnen</i></p>	<p>Förderung des Produktes „Glaskugeln“</p>
<p><i>Durchführung von Filterversuchen – Wissenschaftliche Untersuchungen zur Optimierung der Brunnenfilter</i></p>	<p>Optimierung des Brunnenausbaus (Filterrohre und Filterkies) für die Verhältnisse im Tagebau</p>
<p><i>Intensiventsandung / Hochleistungsentsandung (HLE)</i></p>	<p>Förderung des Produktes / der Dienstleistungsausführung mit „Symmetrischer Doppelkolbenkammer“</p>
<p><i>WellMa: Betrieb und Pflege von Trinkwasserbrunnen zur Optimierung der Leistung und der Wasserqualität – Phase 1 und 2 in Ergänzung mit dem Projekt WellMaDNA</i></p>	<p>Untersuchung der Alterungsursachen speziell bei Berliner Brunnen mit Methodenempfehlungen für Bau, Betrieb und Instandhaltung dieser Brunnen</p>
<p><i>Untersuchung zur Bewertung von Gerätetechnik auf die Wirksamkeit in der Kiesschüttung</i></p>	<p>Untersuchung mechanischer Regenerierverfahren zur Aufnahme in das DVGW-Regelwerk</p>
<p><i>Partikel-Form &amp; -Lagerungsbedingungen von nichtbindigen Böden</i></p>	<p>Verbesserung der Datengrundlage für die Baugrundbeurteilung # Brunnenbau: Optimierung der Schüttgut-Dimensionierung (DIN 4924 &amp; Glaskugeln) # Ausführung von Messungen zur Bestimmung von Kennwerten für Böden und Brunnenbau-Schüttgüter</p>

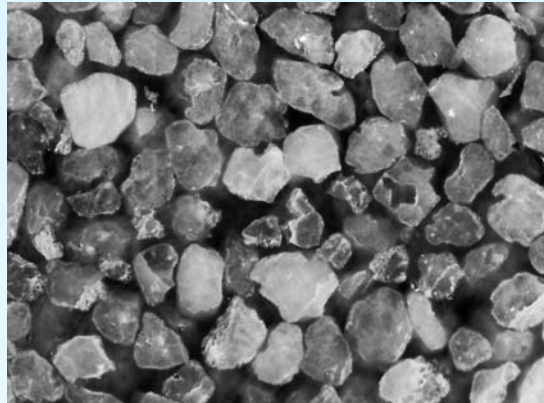
# Einleitung „Definitionen zur Partikelmessung“

<p><b>Partikelmodelle</b> (Durchmesser-bezogen)</p>	<p>Boden- und natürliche Schüttgut-Partikel weisen eine Form auf, die sich signifikant von der Kugel-Form unterscheidet. Ingenieurgeologische und hydrogeologische Berechnungen verwenden hauptsächlich den Partikel-Durchmesser ("Korn-Größe") als Grundlage ihrer Bemessungen. Entsprechend der Durchmesser-Basis wird in drei Partikel-Modelle unterteilt. Für den Brunnenbau bildet das Partikelmodell <math>x_{area}</math> am ehesten die Eigenschaften der Boden-Partikel ab.</p>								
<p><math>x_{c\ min}</math></p>	<p>Partikelmodell mit dem minimalen Partikeldurchmesser als Basis</p>								
<p><math>x_{area}</math></p>	<p>Partikelmodell mit dem Durchmesser des flächengleichen Kreises der Partikelprojektion als Basis</p>								
<p><math>x_{Fe\ max}</math></p>	<p>Partikelmodell mit dem maximalen Partikeldurchmesser als Basis</p>								
<p><b>Partikel-Durchmesser</b></p>	<table border="1" data-bbox="1120 678 1724 957"> <thead> <tr> <th>Messverfahren</th> <th>Bezeichnung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> Digitale Partikelmessung</td> <td><math>x_{Fe\ max}</math> Länge</td> </tr> <tr> <td> Digitale Partikelmessung</td> <td><math>x_{area}</math> Fläche</td> </tr> <tr> <td> Siebanalyse &amp; Digitale Partikelmessung</td> <td><math>x_{c\ min}</math> Breite</td> </tr> </tbody> </table>	Messverfahren	Bezeichnung	Digitale Partikelmessung	$x_{Fe\ max}$ Länge	Digitale Partikelmessung	$x_{area}$ Fläche	Siebanalyse & Digitale Partikelmessung	$x_{c\ min}$ Breite
Messverfahren	Bezeichnung								
Digitale Partikelmessung	$x_{Fe\ max}$ Länge								
Digitale Partikelmessung	$x_{area}$ Fläche								
Siebanalyse & Digitale Partikelmessung	$x_{c\ min}$ Breite								
<p><b>Partikel-Formeigenschaften</b></p>	<p>Zur quantitativen Partikel-(Korn-) Beschreibung hat sich die "Form"-Beschreibung als notwendig erwiesen. Auch hierfür werden die Partikelmodelle <math>x_{c\ min}</math> - <math>x_{area}</math> und <math>x_{Fe\ max}</math> angewendet.</p>								
<p><b>b / l</b></p>	<p>Quotient Breite zu Länge; max. 1,0 [ --- ] "Länglichkeit"</p>								
<p><b>SPHT</b></p>	<p>Sphärizität; max 1,0 [ --- ] "Rundheit"</p>								
<p><b>Conv</b></p>	<p>Konvexität; max. 1,0 [ --- ] "Eindellungen"</p>								
<p><b>Symm</b></p>	<p>Symmetrie; max. 1,0 [ --- ] "Schwerpunkt"</p>								
<p>weitere Messgrößen</p>	<p>Partikel-Anzahl, Partikel-Oberfläche &amp; Partikel-Volumen (aus Berechnung Rotationsellipsoid) etc.</p>								
	<p>Weitere Angaben zur Erklärung der Partikel-Formeigenschaften: siehe Handout-Text Tabelle 3</p>								



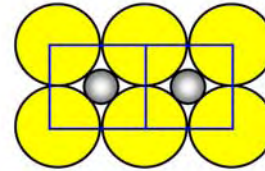
## Wechsel von der flächigen ...

Durch ungleichmäßig große Partikel kein Erkennen der Real-Bedingungen



Schnitt durch Verguss mit Kies  
DIN 4924 Korngruppe 2 – 3,15 mm  
Porenanteil ca. 39 %

lockerste  
Kugelpackung



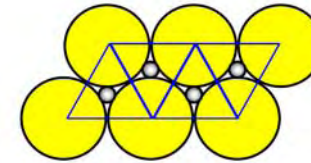
$$D / d_{\text{locker}} = 2,4$$

unabhängig von D

Lückengrad  $\epsilon = 47,64 \%$

freie Durchlaßfläche = 21,46 %

dichteste  
Kugelpackung



$$D / d_{\text{dicht}} = 6,4$$

unabhängig von D

Lückengrad  $\epsilon = 25,95 \%$

freie Durchlaßfläche = 9,31 %

$$D / d = F_g$$

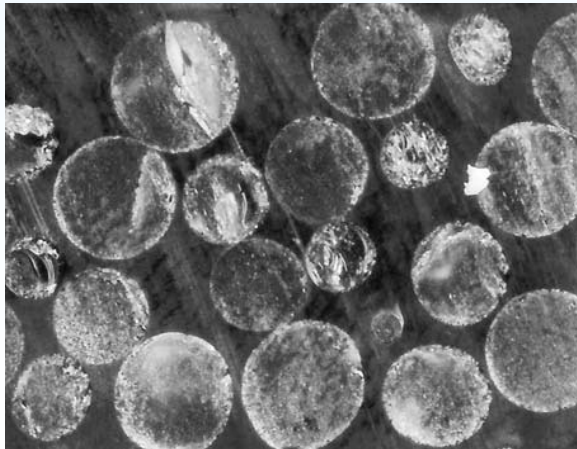


D = Kugel-Durchmesser

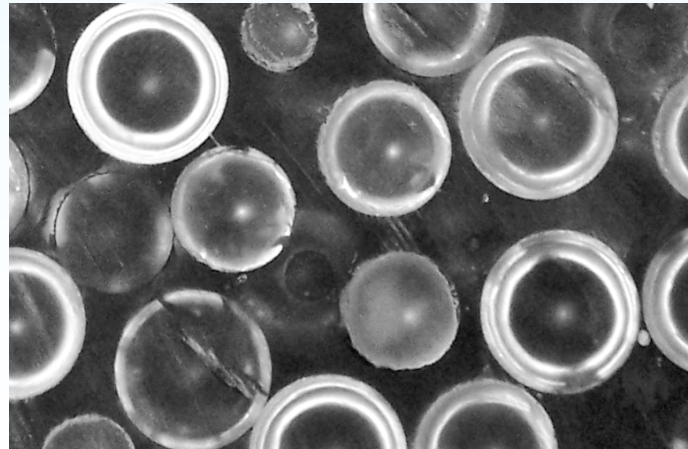
d = größtmöglicher Durchmesser einer passierenden Kugel

$F_g$  = Filterfaktor

## ... zur räumlichen Betrachtung



3,8 bis 4,4 mm



11,5 bis 12,5 mm

- regellose Struktur
- Stapelfehler
- Partikelbrückenbildung
- Partikelmittelachsen nicht in denselben Ebenen
- Porenquerschnitte sehr unregelmäßig.

Theorie

Realität

## Porenanteil bei (partikelspezifisch) lockerer & dichter Lagerung

### Schüttgut nach DIN 4924

locker 40 ... 46 %      dicht 35 ... 38 %

### Glaskugeln

locker 37 ... 40 %      dicht 34 ... 36 %

### Boden mit kleinem $C_U$

ähnlich Schüttgüter nach DIN 4924

### Boden

dicht 20 % und kleiner → Fraktalität (großes  $C_U$ )

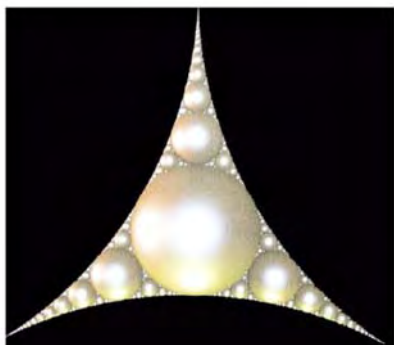
dicht 50 % und größer → bindige Anteile

locker i.a. + 7 ... 10 %

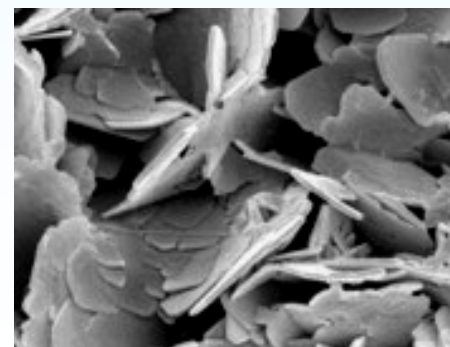
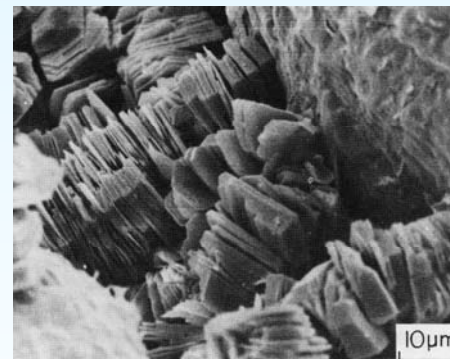
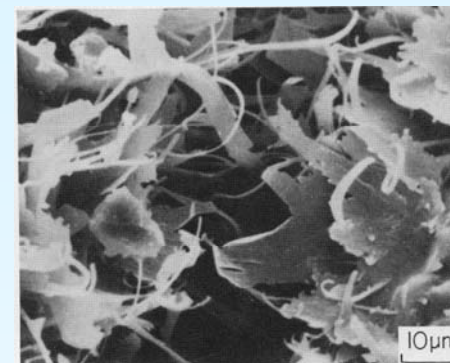
### Unterschiede (= partikelspezifisch)

**dicht**       $C_U$  und Partikelform (Messung nach DIN 18126)

**locker**      Viskositätsbedingungen beim Brunnenbau (Hausnorm)



fraktale Kugelpackung  
nach Apollonius von Perge  
(ca. 200 v.Chr.)



REM-Aufnahmen von Ton-Mineralien  
(Illit – Kaolinit – Montmorillonit; von oben nach unten)

Fotos: Tucker (1985) „Einführung in die Sedimentpetrologie“

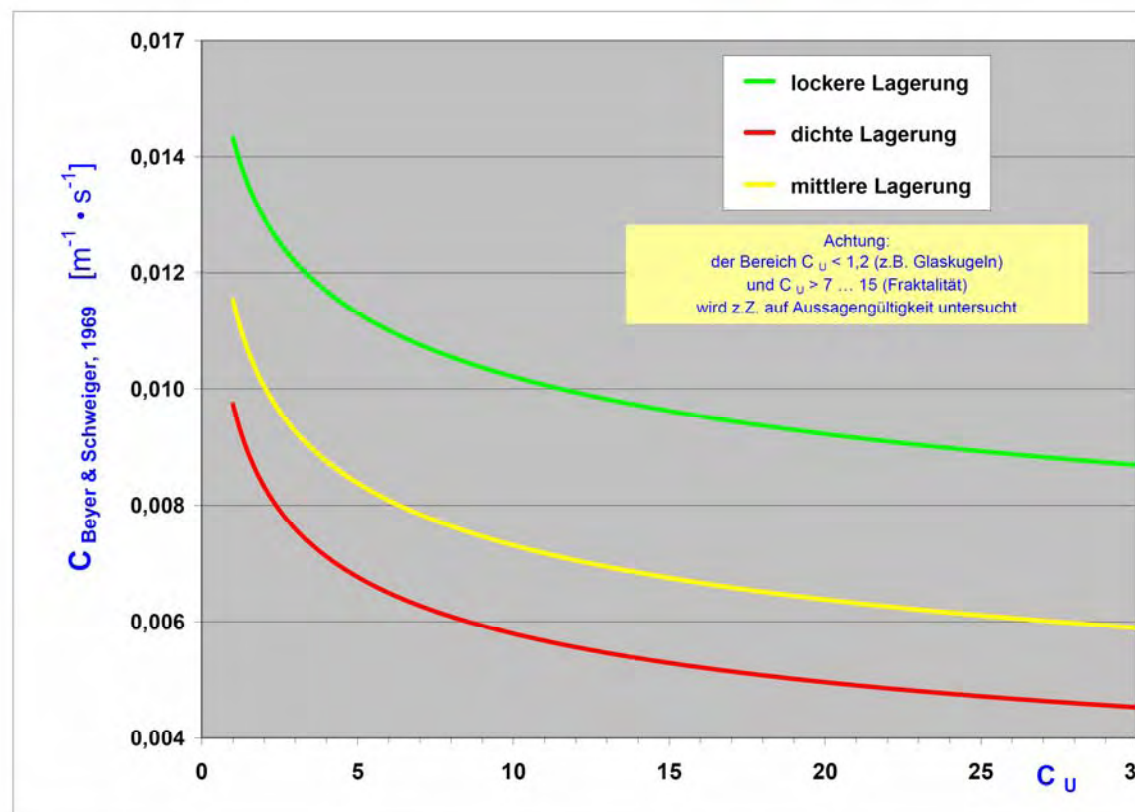
## Wichtige Bodenkennwerte für den Brunnenbau

### Durchlässigkeitsbeiwert aus (Korn-) Summenlinien

- 1. Berechnungsformel von Hazen (1893)
- im DVGW Regelwerk Berechnung bevorzugt nach Beyer (1964)
- inkl. Berücksichtigung Ungleichkörnigkeit und Lagerungsart:  
„einfachste“ Methode nach **Beyer & Schweiger (1969)**

$$k_{f \text{ Beyer \& Schweiger, 1969}} = C \cdot d_{10}^2$$

mit C = Proportionalitätsfaktor in Abhängigkeit  $C_u$  und Lagerungsart



# Beyer & Schweiger (1969)

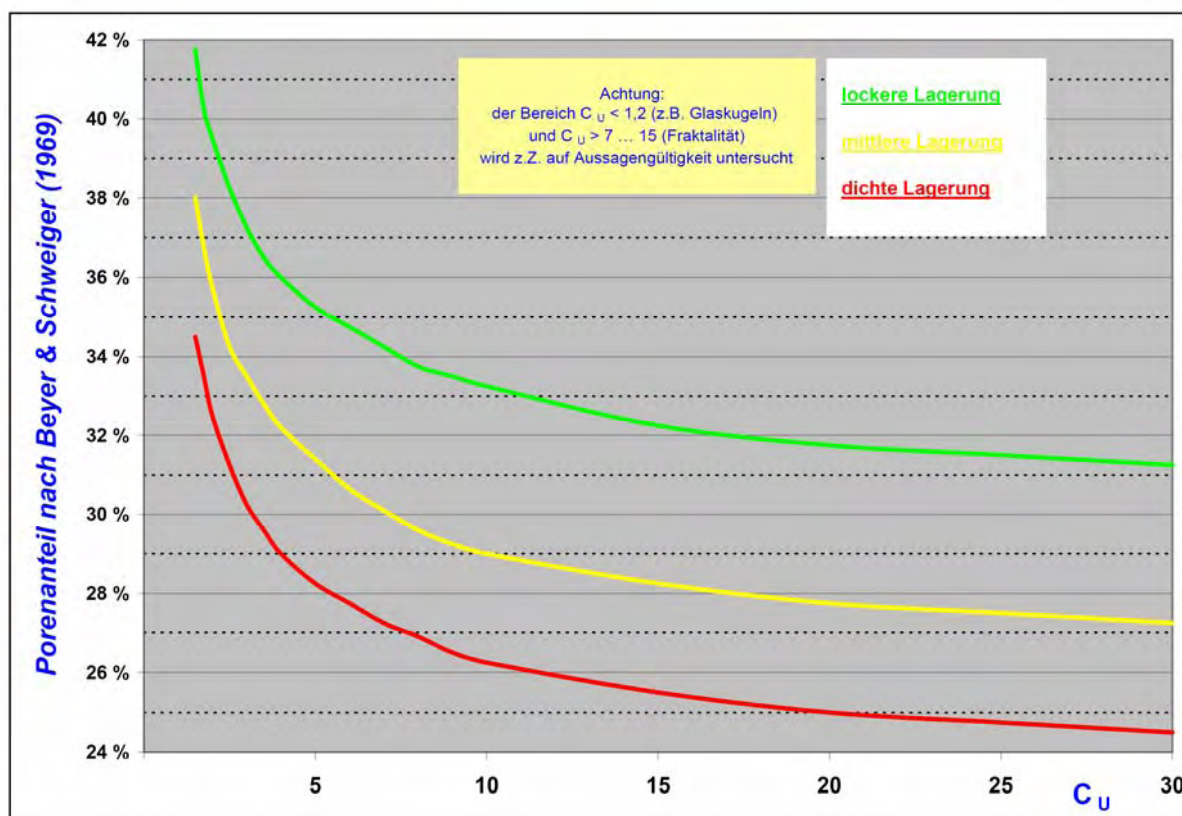
- Porenanteil in Abhängigkeit Lagerungsart und Ungleichkörnigkeit
- Bedeutung der Berechnungsmethode bei  $d_{10} = \text{konst}$

$k_f$ nach Beyer & Schweiger (1969)
$k_f = C_{\text{Beyer \& Schweiger}} \cdot d_{10}^2$

$d_{10}$
0,125 mm

$C_u$	1,5	
$k_f$ Beyer & Schweiger		
Lagerungsart		
locker	mittel	dicht
2,31 E-04 m/s	1,71 E-04 m/s	1,42 E-04 m/s

$C_u$	20	
$k_f$ Beyer & Schweiger		
Lagerungsart		
locker	mittel	dicht
2,23 E-04 m/s	1,02 E-04 m/s	7,81 E-05 m/s



Kreuzvergleich 1		
locker	mittel	dicht
100 %	74 %	61 %
locker	mittel	dicht
96 %	44 %	34 %

Kreuzvergleich 2		
locker	mittel	dicht
296 %	219 %	182 %
locker	mittel	dicht
285 %	130 %	100 %

# Schüttgut-Dimensionierung nach DVGW MB W 113 (2001)

$$D_s = d_g \cdot F_g$$

$D_s$  = erforderlicher Schüttkorn-Durchmesser

$d_g$  = maßgebender Korn-Durchmesser des Bodens / der untersuchten Probe

$F_g$  = Filterfaktor

$$D_s = d_g \cdot (5 + U)$$

Annahme: alle Körner etwa gleich groß, rund, gleichförmig  
 $D / d$  bei mittlerer Lagerungsdichte 4,4



$$F_g = 5 + U \quad \text{mit } 1 < U < 5$$

$$F_g = 10 \quad \text{mit } U \geq 5$$

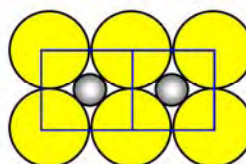
$$U = d_{60} / d_{10} = \text{Ungleichkörnigkeitszahl } C_u$$



Bestimmung des Schüttkorn-durchmessers und hydrogeologischer Parameter aus der Korngrößenverteilung für den Bau von Brunnen

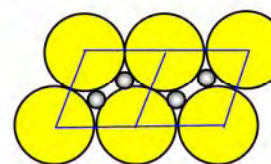
-   $D$  = Kugel-Durchmesser
-   $d$  = größtmöglicher Durchmesser einer passierenden Kugel

lockerste Kugelpackung



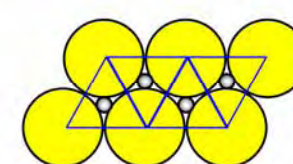
$$D / d_{\text{locker}} = 2,4$$

Kugelpackung, mittlere Lagerungsdichte  
 arithmetisches Mittel für "d" zwischen



$$D / d_{\text{mittlere arithm.}} = 4,4$$

dichteste Kugelpackung



$$D / d_{\text{dicht}} = 6,4$$

**Autorenangaben**  
 Mitglieder des für die Erstellung fachlich verantwortlichen Gremiums:  
 Christian Etschel, Hof  
 Dr.-Ing. Attila Gàl, Haltern  
 Uwe Hansen, Neetze  
 Berthold Niehues, Bonn  
 Kerry F. Paul, Berlin  
 Lothar Schoka, Rostrup  
 Michael Tholen, Oldenburg

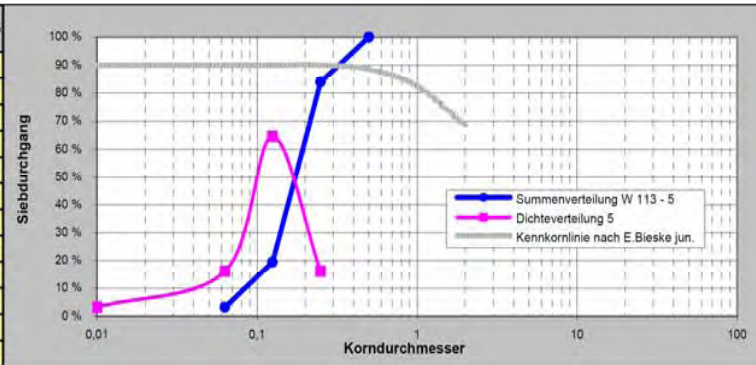
# Schüttgut-Dimensionierung nach DVGW MB W 113 (2001) - Fortsetzung

$$D_s = d_g \cdot (5 + U)$$

$d_{gW113}$  Bestimmung aus Kornsummenkurve und Dichteverteilung  
 Mittelwert des Maximums der Dichteverteilung und des nächstgrößeren Korndurchmessers

**Beispiel 5**  
aus W 113

Siebdurchgang	Summenverteilung W 113 - 5	Dichteverteilung 5
31,5 mm		
16 mm		
8 mm		
4 mm		
2 mm		
1 mm		
0,5 mm	100,00 %	
0,25 mm	83,87 %	16,13 %
0,125 mm	19,35 %	64,52 %
0,063 mm	3,23 %	16,12 %
0,01 mm		3,23 %



einfach gekrümmte Summenkurve  
 mit eindeutigem Maximum der Dichteverteilung

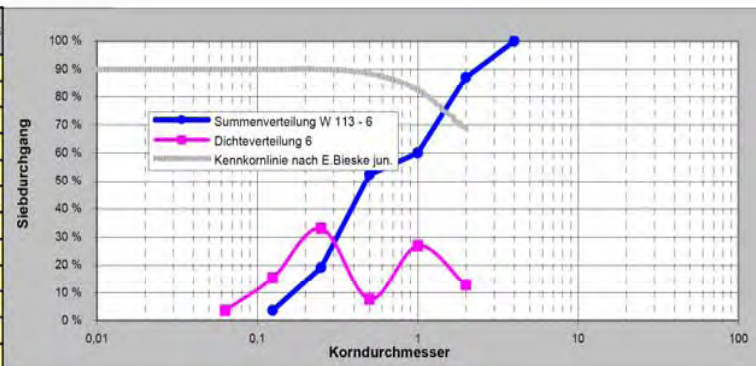
$$d_{60} = 0,19 \text{ mm} \quad d_{10} = 0,091 \text{ mm} \quad U = 2,1 \rightarrow F_g = 5 + 2,1$$

$$d_g = (0,125 \text{ mm} + 0,25 \text{ mm}) / 2 = 0,1875 \text{ mm}$$

$$D_s = 0,1875 \text{ mm} \cdot (5 + 2,1) = 1,33 \text{ mm}$$

**Beispiel 6**  
aus W 113

Siebdurchgang	Summenverteilung W 113 - 6	Dichteverteilung 6
31,5 mm		
16 mm		
8 mm		
4 mm	100,00 %	
2 mm	87,08 %	12,92 %
1 mm	60,15 %	26,93 %
0,5 mm	52,40 %	7,75 %
0,25 mm	19,19 %	33,21 %
0,125 mm	3,69 %	15,50 %
0,063 mm		3,69 %
0,01 mm		



doppelt gekrümmte Summenkurve  
 mit zwei Maxima der Dichteverteilung

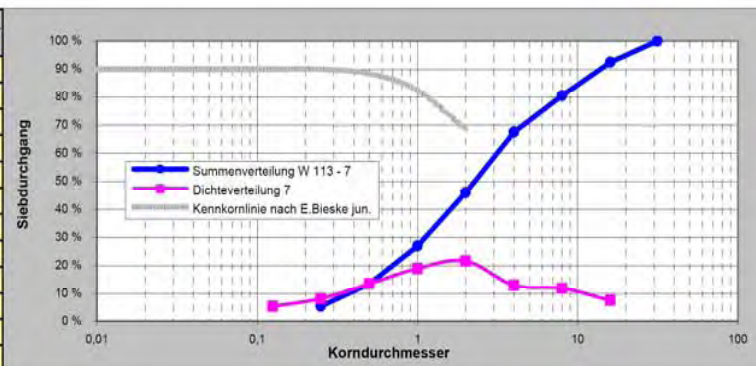
$$d_{60} = 0,99 \text{ mm} \quad d_{10} = 0,18 \text{ mm} \quad U = 5,5 \rightarrow F_g = 10$$

$$d_g = (0,25 \text{ mm} + 0,5 \text{ mm}) / 2 = 0,375 \text{ mm}$$

$$D_s = 0,375 \text{ mm} \cdot (10) = 3,75 \text{ mm}$$

**Beispiel 7**  
aus W 113

Siebdurchgang	Summenverteilung W 113 - 7	Dichteverteilung 7
31,5 mm	100,00 %	
16 mm	92,43 %	7,57 %
8 mm	80,54 %	11,89 %
4 mm	67,57 %	12,97 %
2 mm	45,95 %	21,62 %
1 mm	27,03 %	18,92 %
0,5 mm	13,51 %	13,52 %
0,25 mm	5,41 %	8,10 %
0,125 mm		5,41 %
0,063 mm		
0,01 mm		



Summenkurve  
 ohne eindeutiges Maximum der Dichteverteilung

$$d_{60} = 3,15 \text{ mm} \quad d_{10} = 0,38 \text{ mm} \quad U = 8,3 \rightarrow F_g = 10$$

$$d_g = d_{30} = 1,12 \text{ mm}$$

$$D_s = 1,12 \text{ mm} \cdot (10) = 11,2 \text{ mm}$$

# Schüttgut-Dimensionierung nach DVGW MB W 113 (2001) - Fortsetzung

## Vorteil DVGW MB W 113

- ▶ einziges Verfahren mit Berücksichtigung einfach-mehrfach-gekrümmter Verteilungen

## bei Fortschreibung W 113 beachten

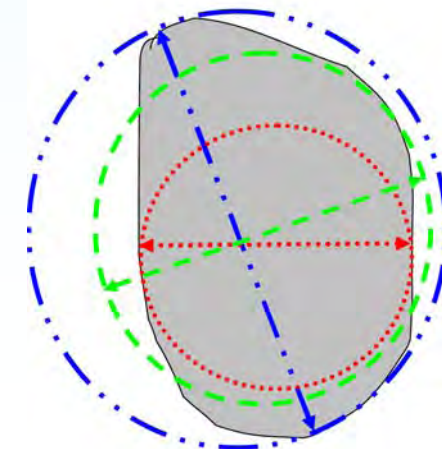
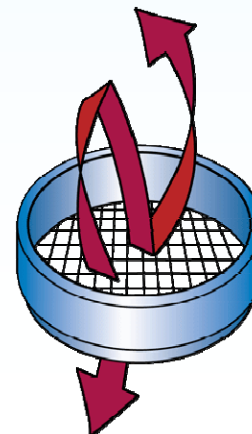
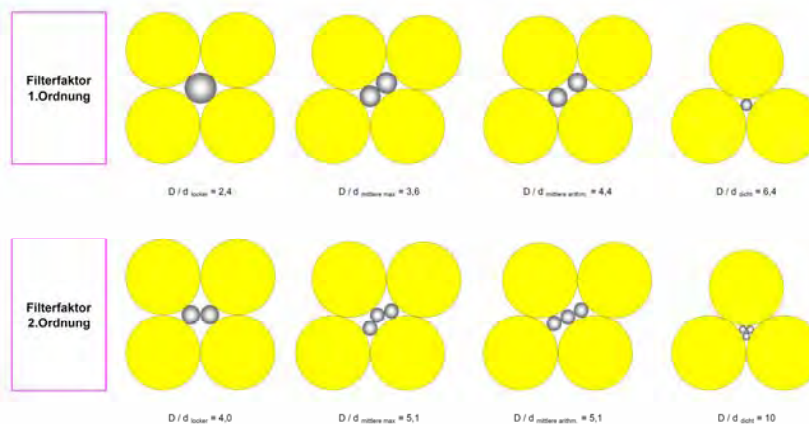
- ▶ Unterscheidung der Berechnungen für Sande und Kiese nach DIN 4924, Sonderfraktionen, Glaskugeln
- ▶ Berücksichtigung Filterfaktoren höherer Ordnung
- ▶ Berücksichtigung Einbaubedingungen, Lagerung & Umlagerung
- ▶ Definition Schüttgüter-Fraktionen mit engeren Abstufungen der Kornklassen-Breite um berechnetes  $D_s$
- ▶ Definition der geometrischen, mechanischen und chemischen Qualitätsanforderungen an Schüttgüter
- ▶ Hinweise zur erforderlichen Probengüte
- ▶ Hinweise zur Notwendigkeit und quantitative Bedeutung teufendifferenzierter Schüttgut-Einbau
- ▶ Hinweise zu Fehlerquellen bei Planung und Bau (qualitative und quantitative Konsequenzen)

## Anwendung Siebanalysen

- ▶ Sieb-Abstände zu groß; Aufforderung, erheblich mehr Siebe über Proben-Summenverteilung zu verwenden

## Anwendung digitale Partikelmessung

- ▶ Anwendung "dynamische Bildanalyse"
- ▶ formelmäßige Berücksichtigung der Kornform, z.B. Breite/Länge, Sphärizität, Symmetrie, Konvexität
- ▶ Wechsel zum Kornmodell  $x_{area}$  (Siebanalyse = Kornmodell  $x_{c min}$ )



# Schüttgut-Auswahl

- **DIN 4924 (1998)**

Erforderliche Angaben zur Qualitätsbeurteilung und für Schüttgut-Dimensionierung:

$d_{03}$ ,  $d_{05}$ ,  $d_{95}$ ,  $d_{97}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{S\ area}$ ,  $d_{10}$ ,  $d_{60}$ ,  $C_U$

Angabe für **jede** Liefercharge

**In Vorbereitung: Überarbeitung DIN 4924**

Vorschlag: maximal 3 % Unter- & Überkorn; engere Fraktionen & Überlappung Fraktionen

- **alternativ DIN 19623 (1978) gemäß DVGW W 113**

**ersetzt durch DIN EN 12904 (2005)** „Produkte zur Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch – Quarzsand und Quarzkies“

*„Generell beträgt der maximal zulässige Gehalt an Unter- und Überkorn 5 % Massenanteil bei Einsatz als Filterschicht in Mehrschichtfiltern“*

Brunnen wg. Boden + Schüttgut = „Mehrschichtfilter“

Erforderliche Angaben zur Qualitätsbeurteilung und für Schüttgut-Dimensionierung:

$d_{03}$ ,  $d_{05}$ ,  $d_{95}$ ,  $d_{97}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{S\ area}$ ,  $d_{10}$ ,  $d_{60}$ ,  $C_U$

Angabe für **jede** Liefercharge

- **Glaskugeln**

hydraulische Untersuchung steht noch aus;

„normale“  $k_f$ -Berechnung vermutlich nur bedingt geeignet.

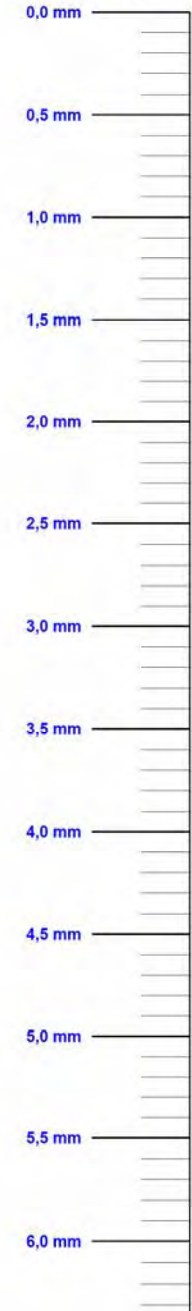
Erforderliche Angaben zur Qualitätsbeurteilung und für Schüttgut-Dimensionierung:

$d_{03}$ ,  $d_{05}$ ,  $d_{95}$ ,  $d_{97}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{S\ area}$ ,  $d_{10}$ ,  $d_{60}$ ,  $C_U$

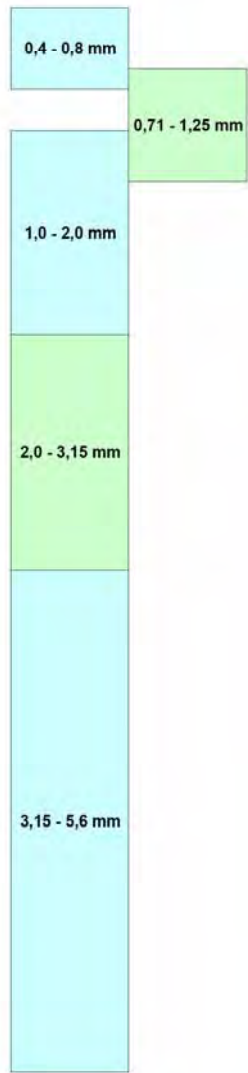
Messung für **Produktionscharge**



Partikel-Durchmesser  
Kornmodell  $x_c$  mm



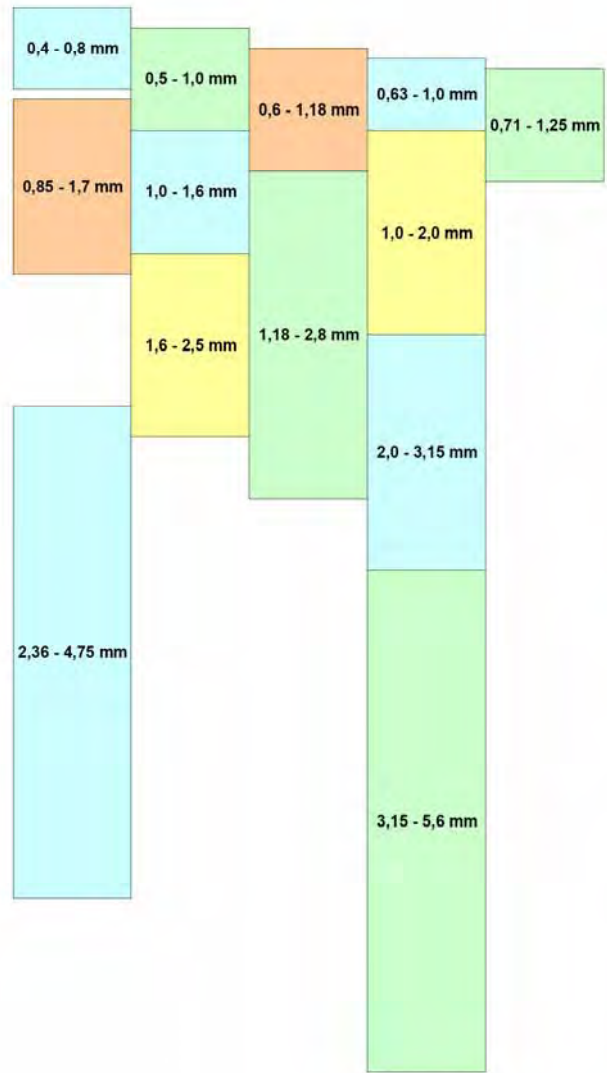
DIN 4924 (1998)



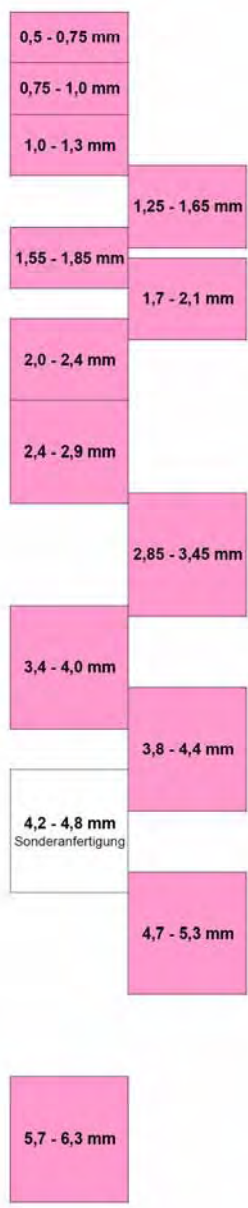
Vorschlag für  
Überarbeitung DIN 4924



vgl. DVGW MB.W.113 (2001) DIN EN 12904 (2005) Ersatz für DIN 19623 (1978)



Glaskugeln



# Schüttgut-Übersicht

# Digitale Partikelmessung

## Messung mit Laserbeugung

„nur“ Durchmesser; überwiegend bei Feinstpartikeln

## Mikroskopie mit digitaler Bildauswertung

Beschränkung in Probenmenge = eingeschränkte Repräsentativität

## Messung mit dynamischer Bildanalyse

Durchmesser  $x_{c\ min}$  –  $x_{area}$  –  $x_{Fe\ max}$  **und** Form, z.B. b/l, SPHT, Conv, Symm

Anwendung seit ca. 15 Jahren

hauptsächliches Einsatzgebiet Produktionsüberwachung

(z.B. Pharmazie, Lebensmittel, Granulate)

für Bodenuntersuchungen bisher nur als Ersatz Siebanalyse

(ohne Nutzung der Möglichkeiten !)

Mehrere Hersteller; im Kooperationsvorhaben TU Berlin / IBB-Berlin Auswahl des Systems „Camsizer“ der Fa. Retsch Technology



Probenzuführung  
über Rinne



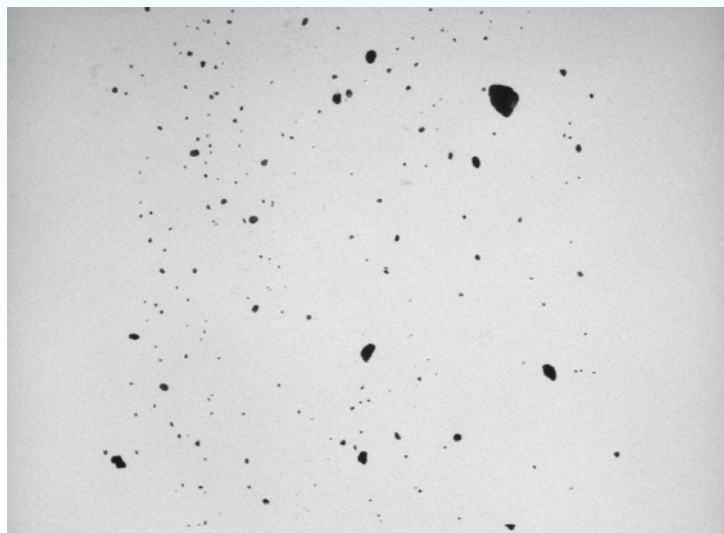
Schattenprojektion und optisches Meßsystem



simultane  
Auswertung der  
Meßdaten

## Partikelmessung mit Camsizer®

Projektionsbild –  
Bodenprobe während der Messung



Kennwert-Meßprinzip

Auflösung 15  $\mu\text{m}$   
Messbereich 30  $\mu\text{m}$  bis 30 mm

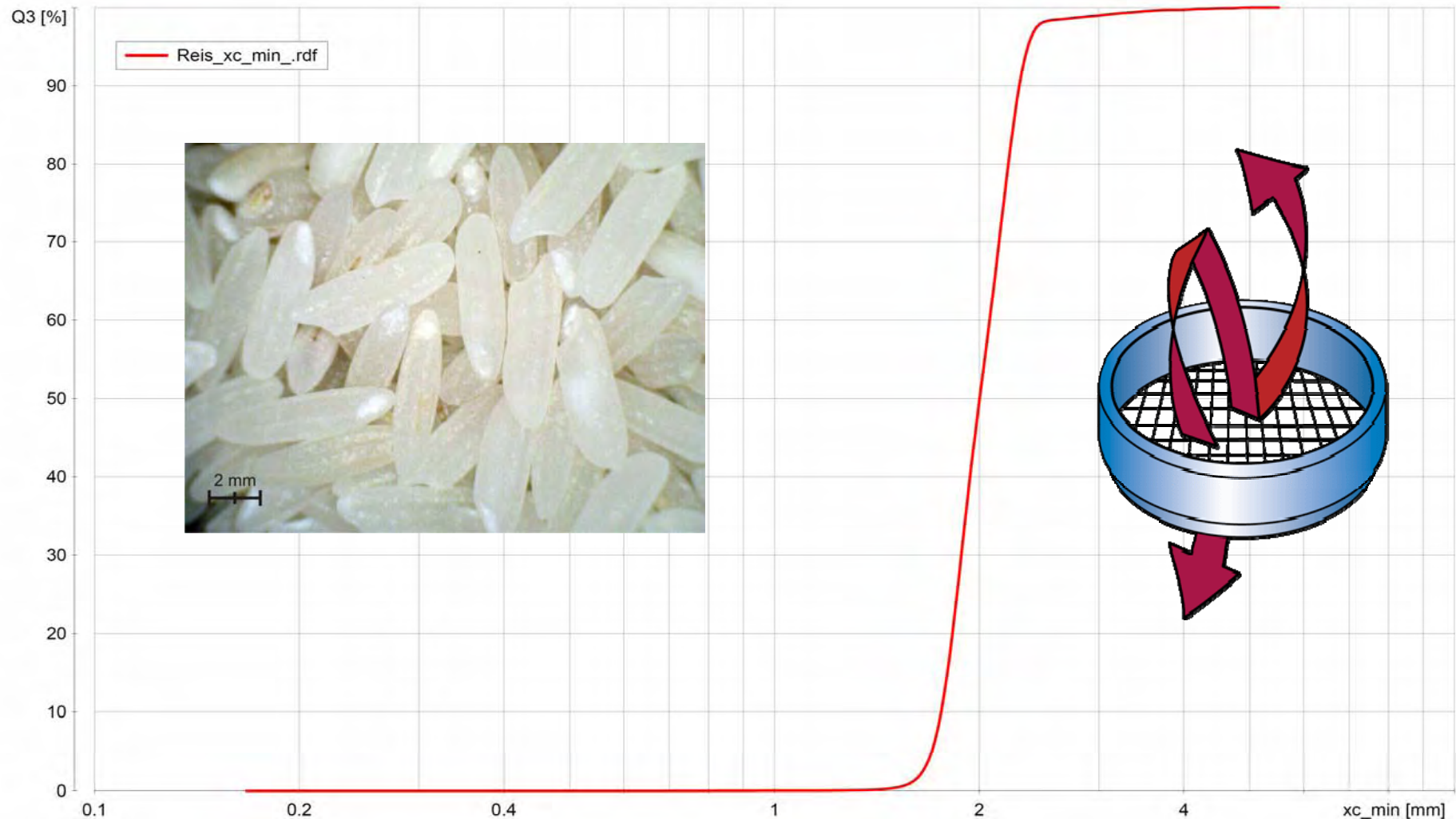


## Beispiel 1

Die Messung entspricht dem Ergebnis der Siebanalyse.

Der Kurvenverlauf vermittelt den Eindruck eines annähernd homogenen Gleichkorn-Gemisches. Tatsächlich handelt es sich um Reiskörner, die bei der Siebanalyse aufrecht das Sieb passieren und den o.a. Eindruck vermitteln.

## Korndurchmesser - Summenverteilung



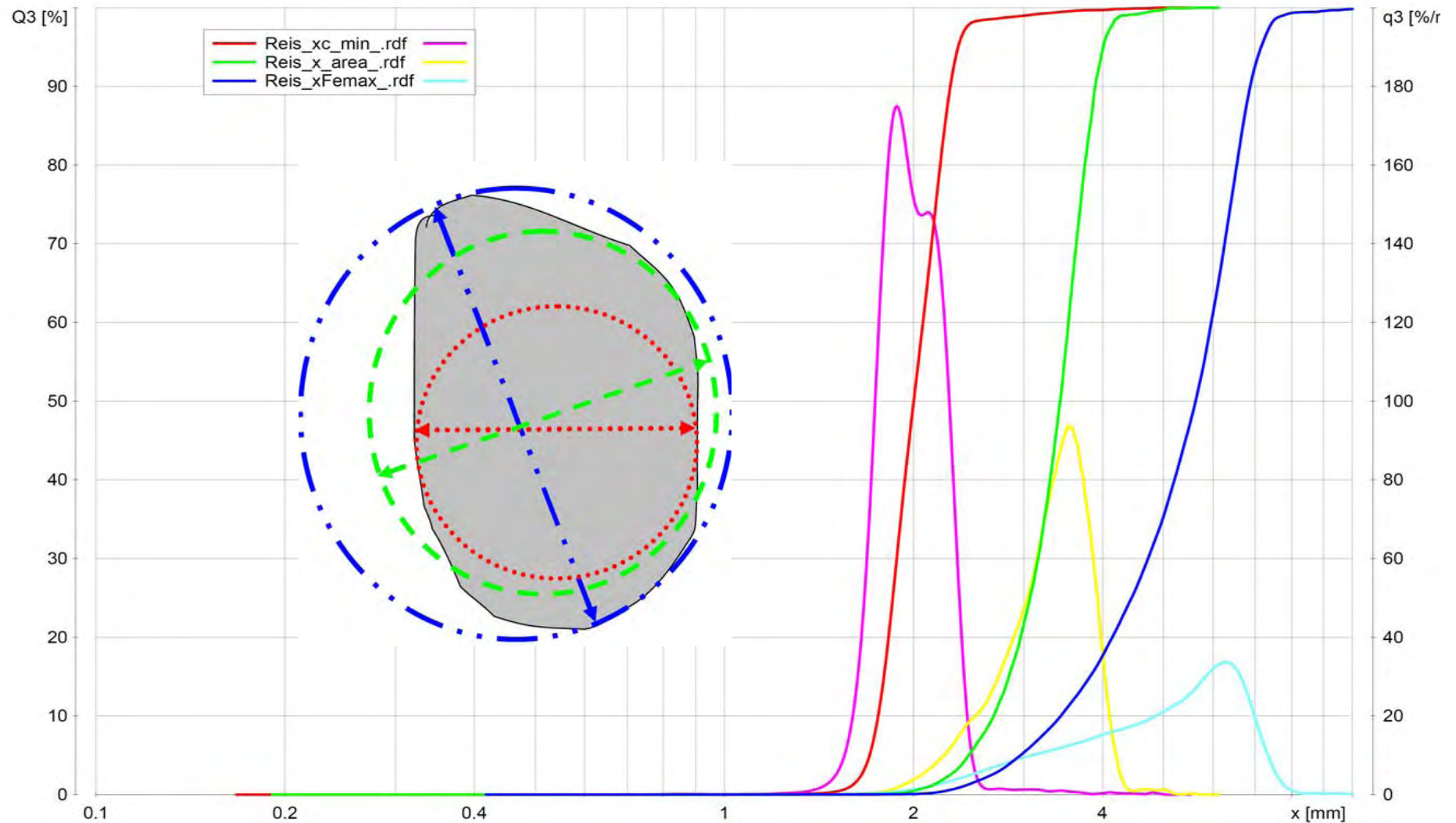
# Beispiel 1

## Fortsetzung 1

### Korndurchmesser - Summenverteilung Korndurchmesser - Dichteverteilung

Korndurchmesser-Messung als

- Partikel-Breite  $x_{c \min}$
- flächengleicher Kreis  $x_{\text{area}}$
- Partikel-Länge  $x_{\text{Fe max}}$

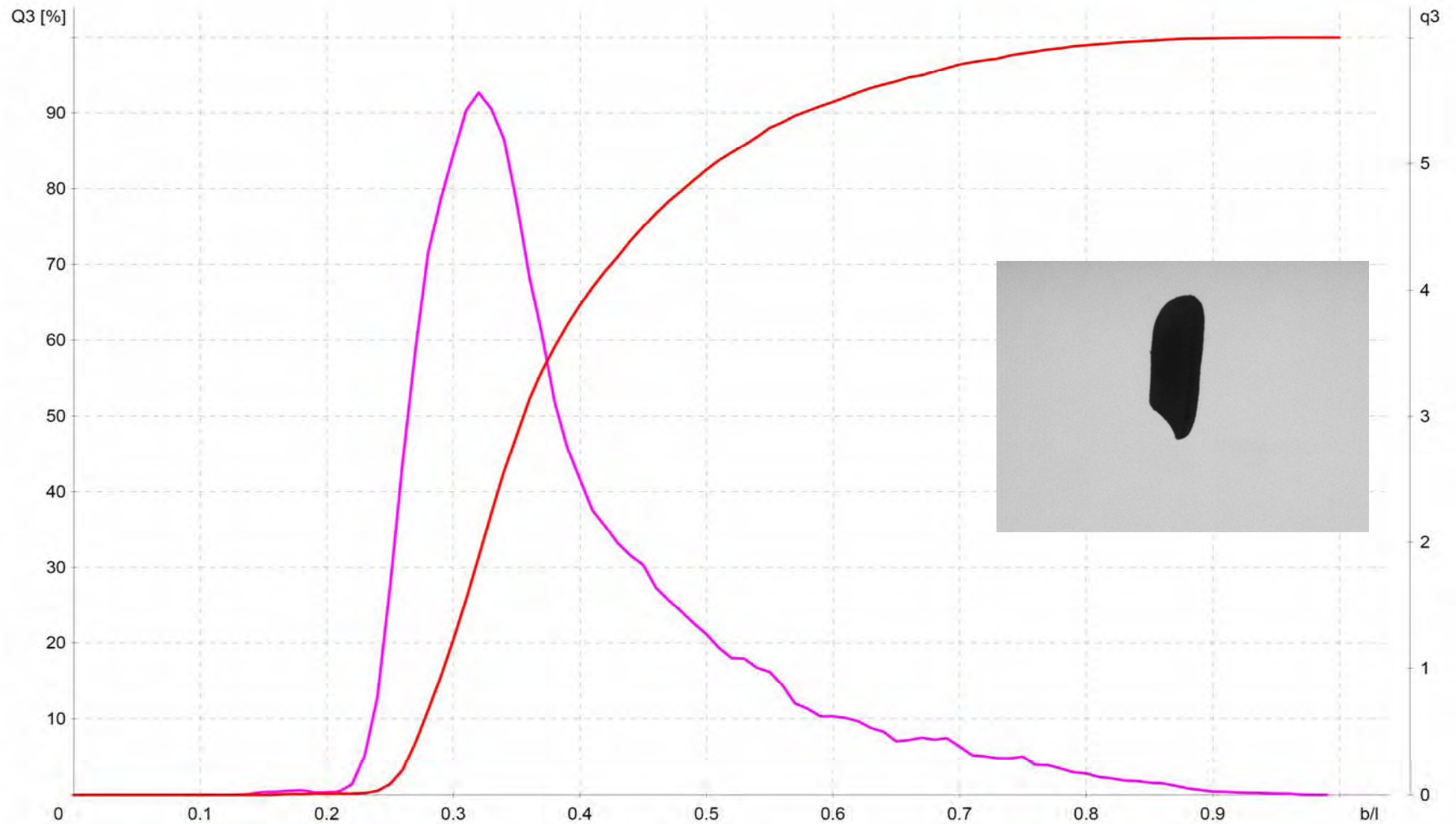


# Beispiel 1

## Fortsetzung 2

Breite zu Länge - Summenverteilung  
Breite zu Länge - Dichteverteilung

Form-Vermessung  
z.B. Breite zu Länge



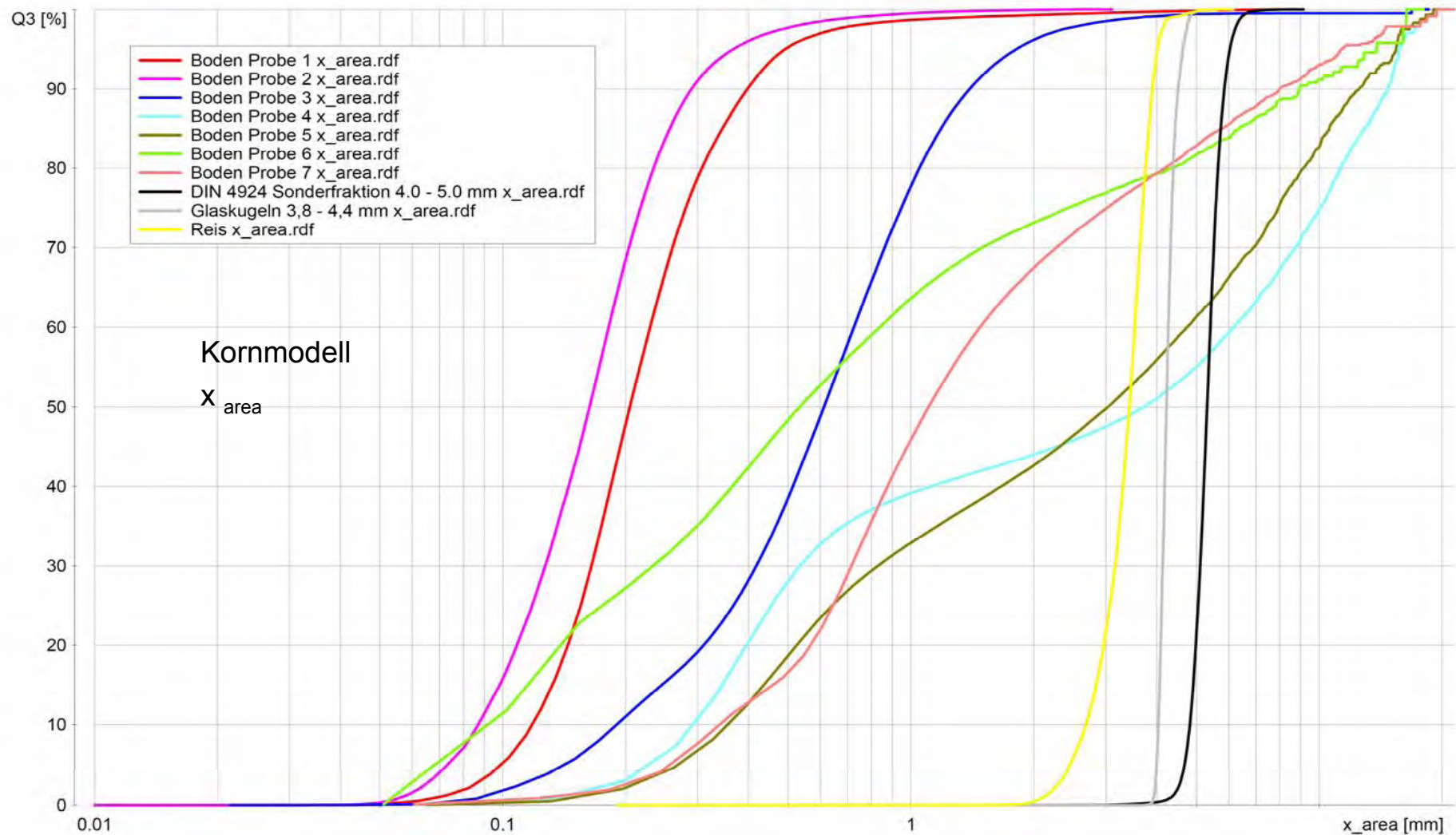
## Beispiel 2

- ▶ Böden
- ▶ Sonderfraktion 4,0 – 5,0 mm
- ▶ Glaskugeln 3,9 – 4,3 mm
- ▶ Reiskörner

**Böden**  
ein- und mehrfach  
gekrümmte Kornverteilung

**Sonderfraktion, Glaskugeln,  
Reiskörner**  
relativ homogenes Korngemisch  
Reiskörner-Interpretation vgl. Beispiel  
"Reiskörner"

## Korndurchmesser - Summenverteilung



# Beispiel 2

## Fortsetzung 1

**Böden**

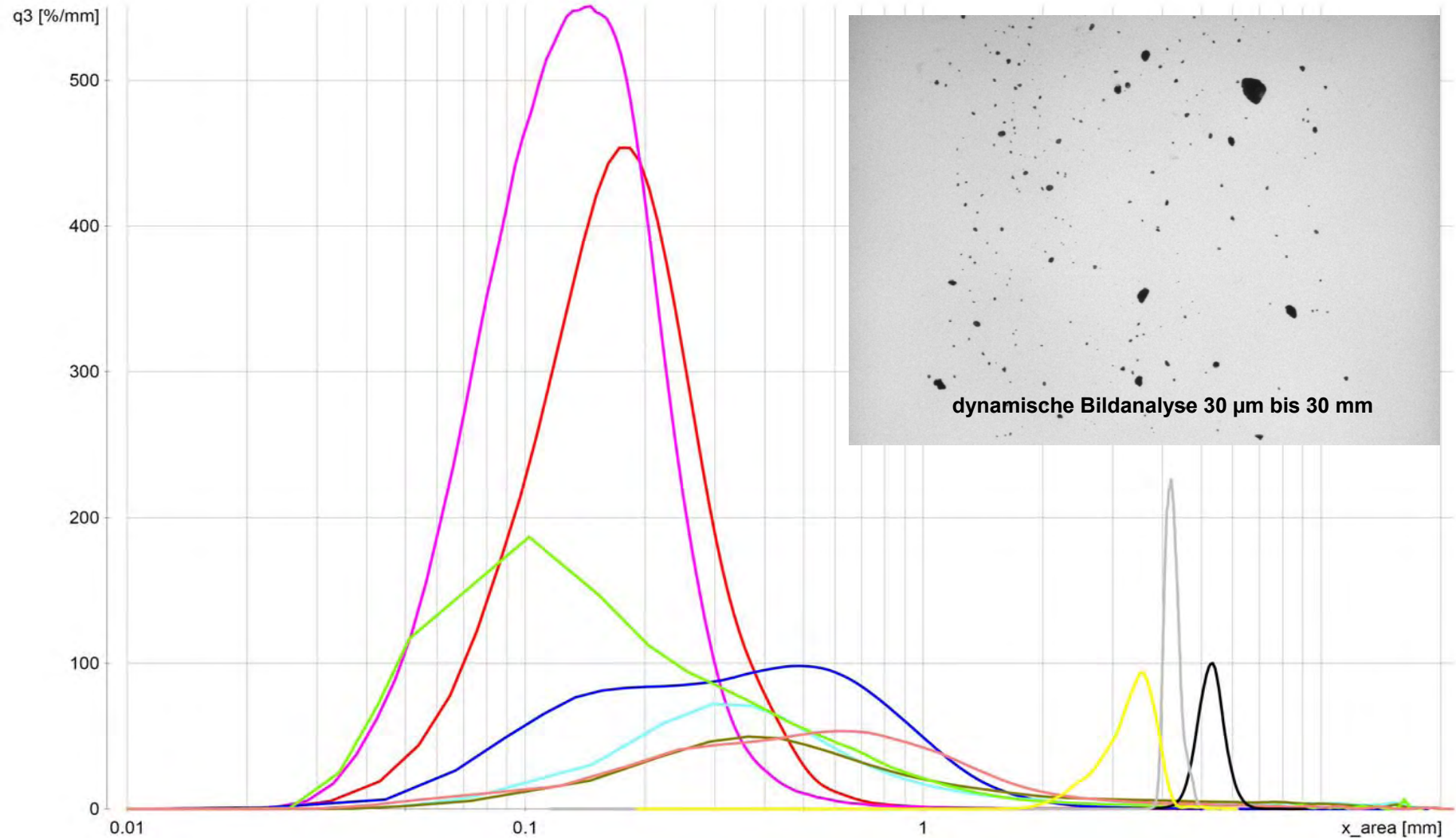
einfaches Ermitteln von  $d_{gw 113}$

**Schüttgüter**

einfache Kontrolle  $D_s$

Digitale Partikelmessung / **dynamische Bildanalyse**:  
derzeit einziges Verfahren zur Messung Korn-**Form**  
der Proben-Gesamtheit

### Korndurchmesser - Dichteverteilung





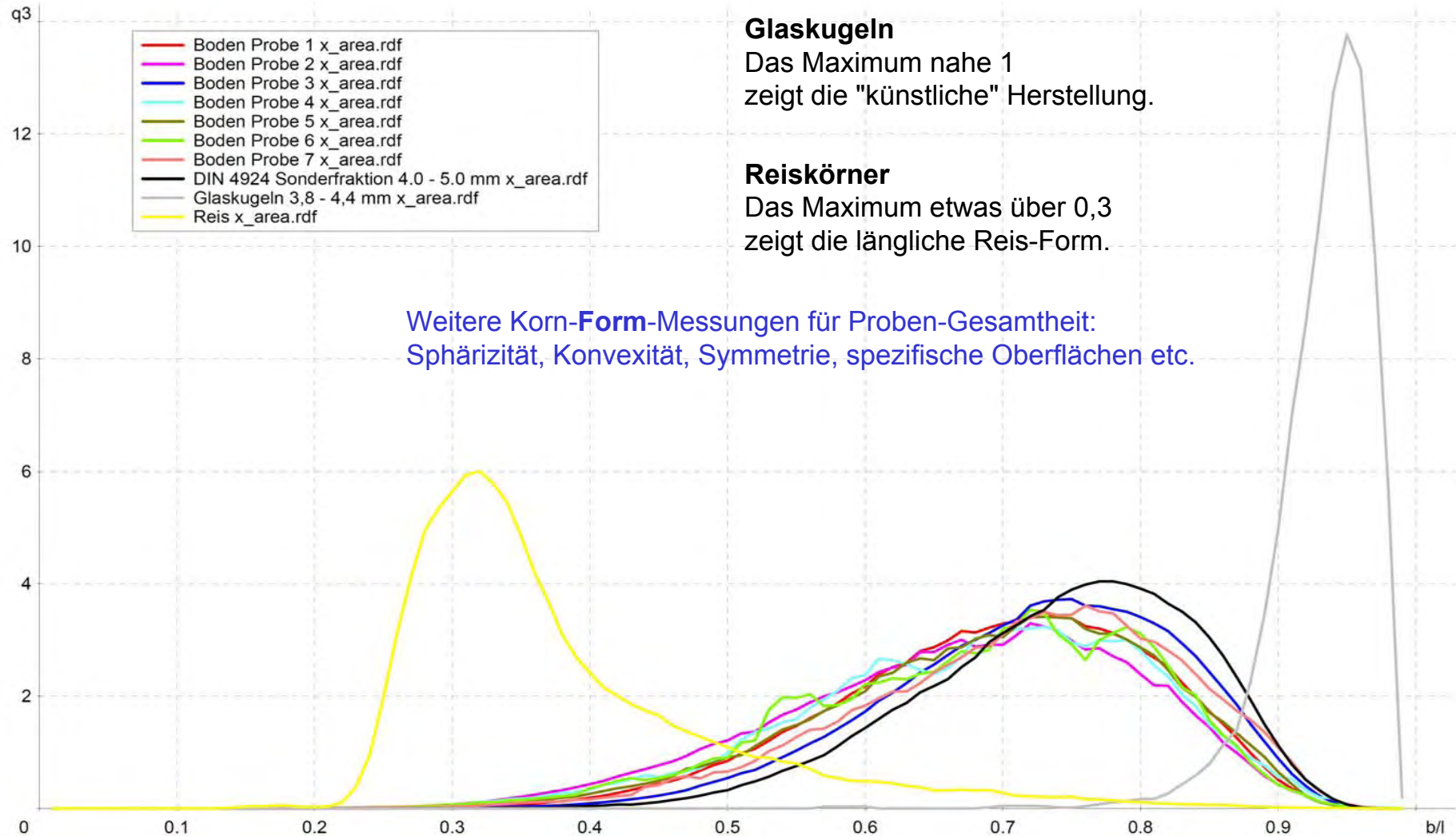
## Beispiel 2

### Fortsetzung 3

## Breite zu Länge - Dichteverteilung

### Böden und Sonderfraktion

Das ähnliche Maximum zeigt die "natürliche" Genese und verdeutlicht, weshalb das Kugelmodell mit Basis  $x_{c \min}$  durch das Kugelmodell mit Basis  $x_{area}$  zu ersetzen ist.



### Glaskugeln

Das Maximum nahe 1 zeigt die "künstliche" Herstellung.

### Reiskörner

Das Maximum etwas über 0,3 zeigt die längliche Reis-Form.

Weitere Korn-Form-Messungen für Proben-Gesamtheit:  
Sphärizität, Konvexität, Symmetrie, spezifische Oberflächen etc.

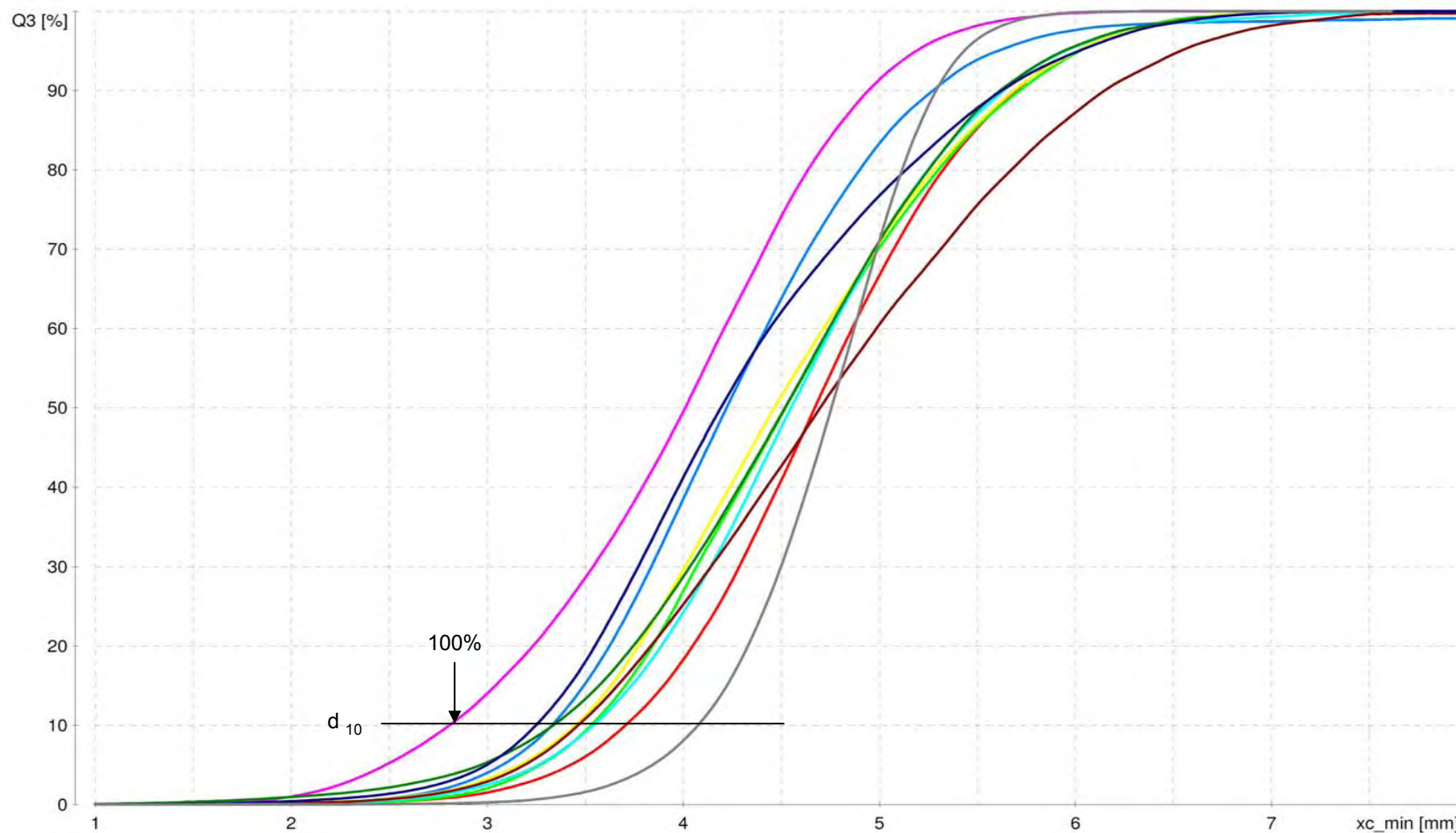
## Beispiel 3

### Vergleich

- ▶ DIN 4924 Kornklasse 3,15 – 5,6 mm  
9 Lieferanten, anonymisiert
- ▶ Sonderfraktion 4,0 bis 5,0 mm  
(GRAU)

$k_f$  Beyer & Schweiger / Lagerungsart vergleichbar  
min = 100 % bis max = 175 %  
bzw. Sonderfraktion = 210 %

## Korndurchmesser - Summenverteilung



# Beispiel 3 – Fortsetzung 1

Vergleich

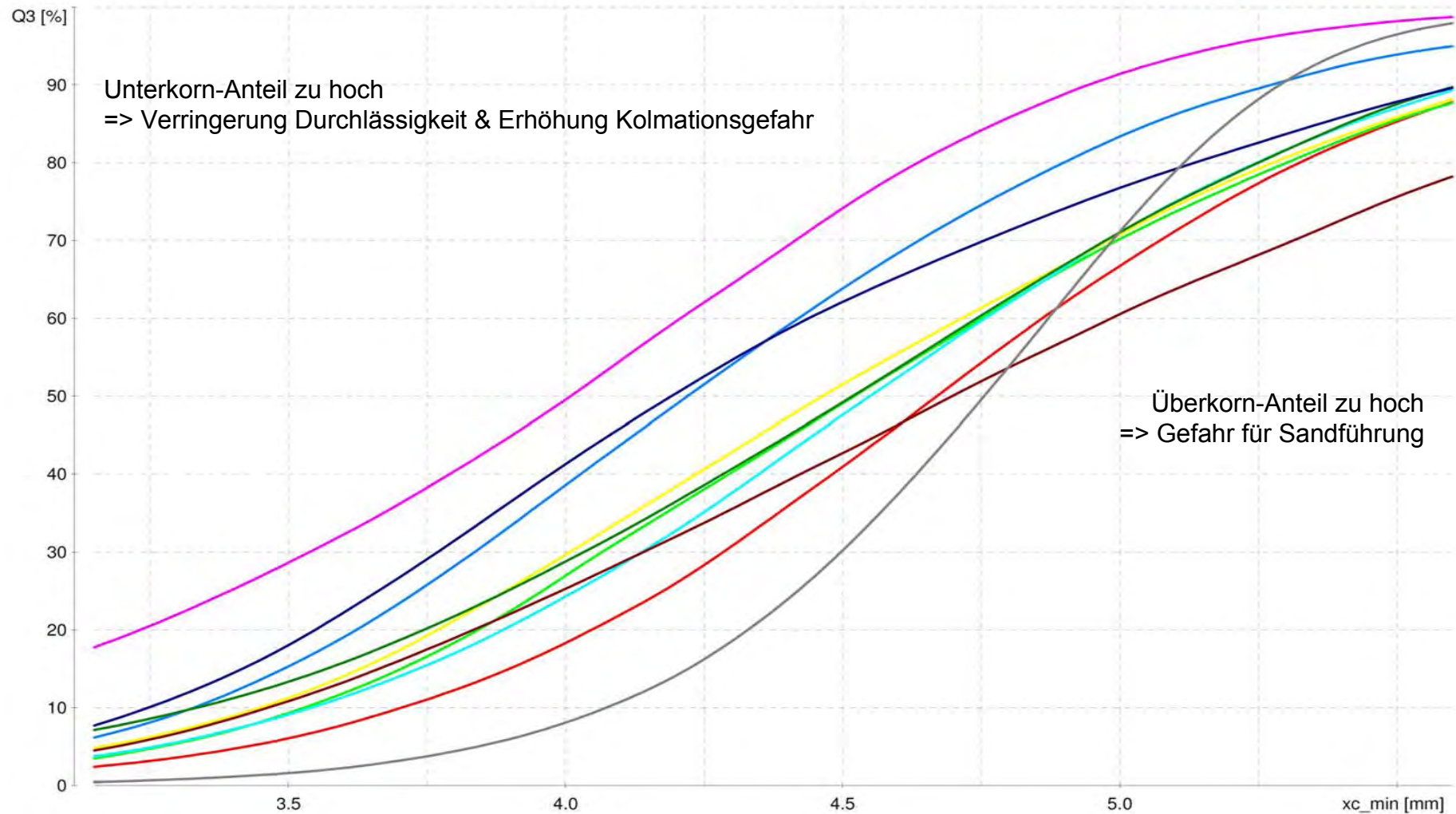
DIN 4924 Kornklasse 3,15 – 5,6 mm

Sonderfraktion 4,0 bis 5,0 mm (GRAU)

leichtes Erkennen von  
Unter- und Überkorn-Anteil

## Korndurchmesser – Summenverteilung

### Ausschnitt 3,15 – 5,6 mm



## Beispiel 3 – Fortsetzung 2

Vergleich

DIN 4924 Kornklasse 3,15 – 5,6 mm

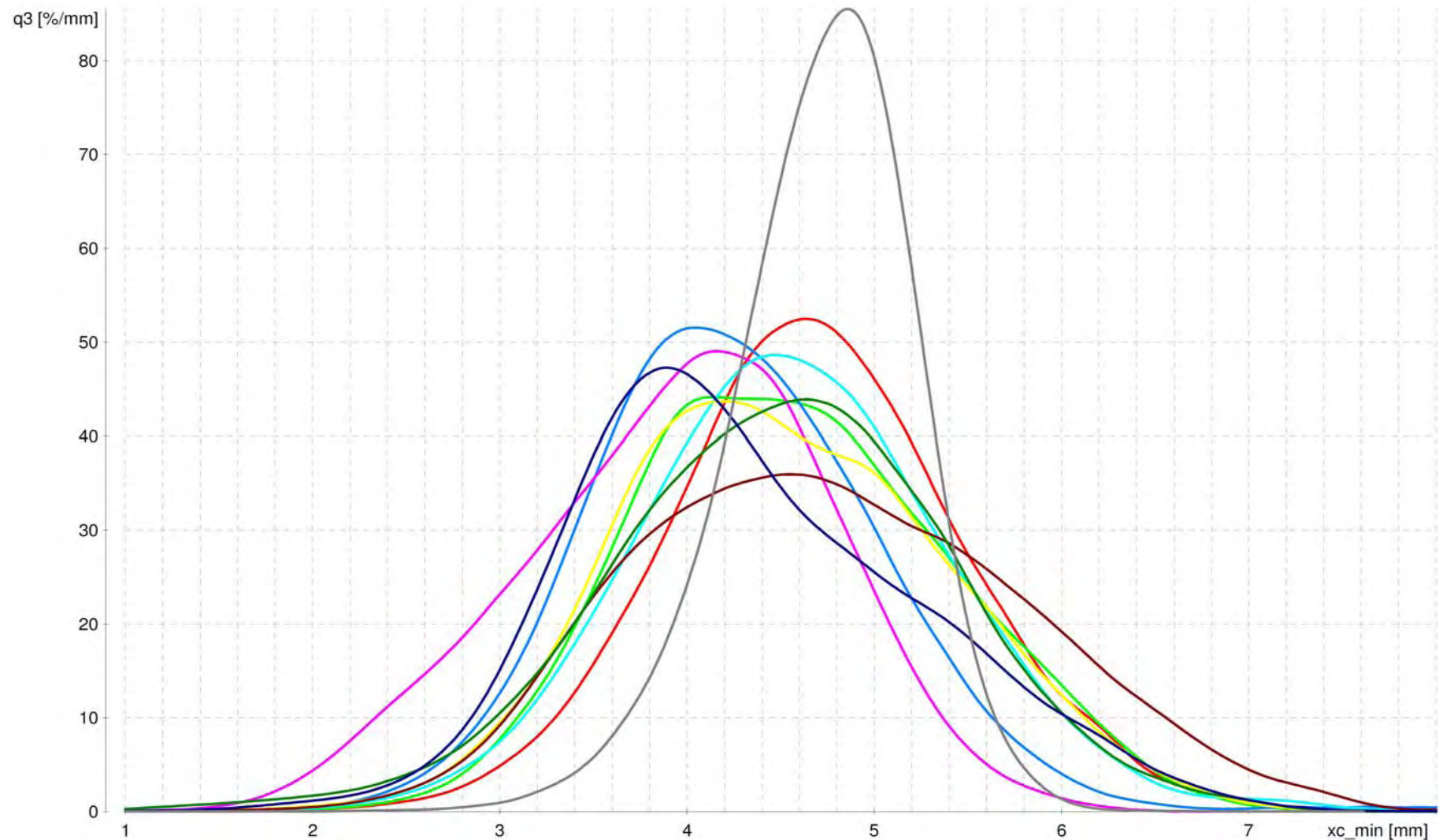
Sonderfraktion 4,0 bis 5,0 mm (GRAU)

### Korndurchmesser - Dichteverteilung

$D_s$  DIN-Vorgabe: Gleichverteilung  
ohne Unterkorn = 4,375 mm

gemessen 3,85 bis 4,65 mm

=> Konsequenzen für Berechnung  $D_s$



## Beispiel 3 – Fortsetzung 3

Vergleich

DIN 4924 Kornklasse 3,15 – 5,6 mm

Sonderfraktion 4,0 bis 5,0 mm (GRAU)

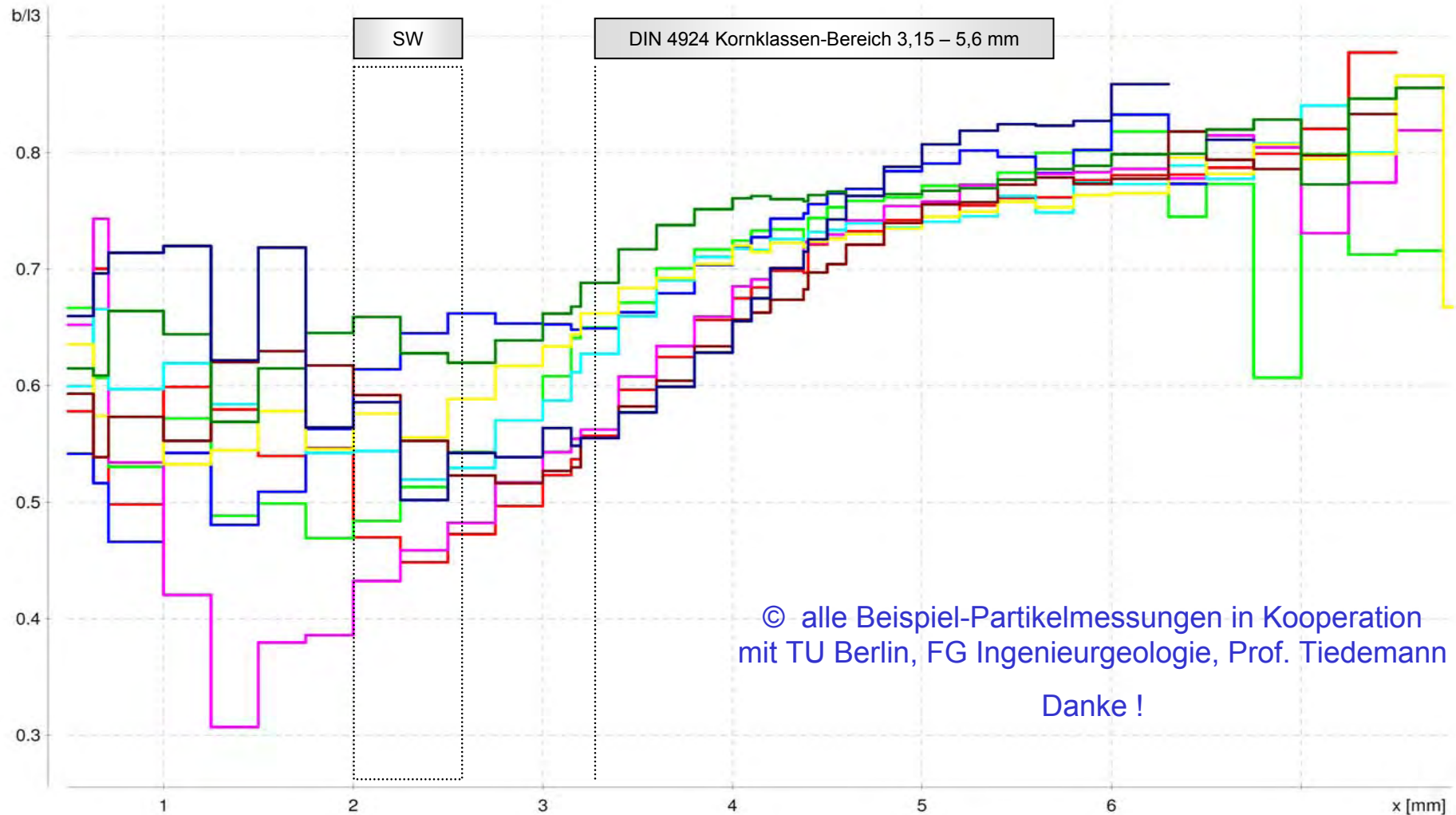
### Breite zur Länge über Durchmesser klassenbezogene Verteilung

Beurteilung der Kornform

in signifikanten Durchmesser-Bereichen

z.B. Schlitzweite nach W 118 = 2,0 bis 2,5 mm

z.B. zur Berechnung  $D_s$



© alle Beispiel-Partikelmessungen in Kooperation  
mit TU Berlin, FG Ingenieurgeologie, Prof. Tiedemann

Danke !

## Beispiel 4

### Mischung von Glaskugeln

Herstellung einer Fraktion ähnlich Sande nach DIN 4924 Fraktion 1,0 bis 2,0 mm

**Auswahl und Mischung Glaskugeln**  
gleiche Gewichtsanteile

1,0 bis 1,3 mm

1,25 bis 1,65 mm

1,55 bis 1,85 mm

**Fragen**

1. Porenanteil ?

2.  $D_s$  ?

Empfehlenswert ?

**Antwort zu 1**

Porenanteil Einzelsorte locker 39 % / dicht 36 %

Porenanteil Mischung im Vergleich locker + 1 % / dicht – 1 %

(gerundete Werte)

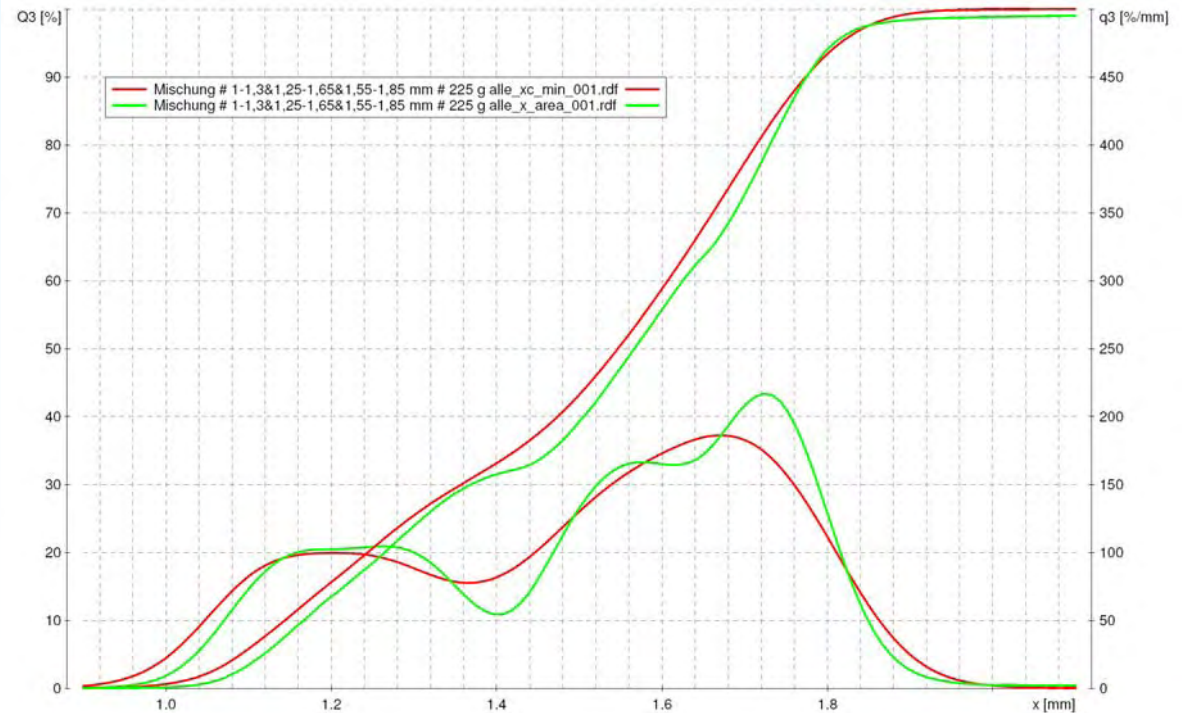
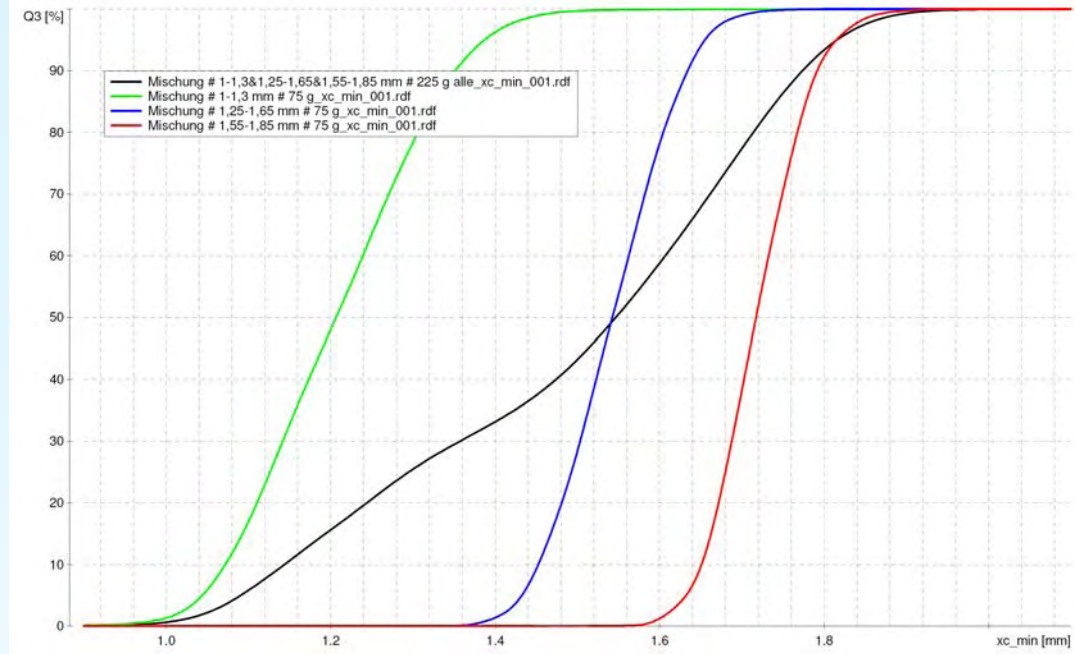
→ Mischung nicht empfehlenswert, da bei dichter Lagerung erhöhte Kolmationsgefahr und geringes Speichervolumen für die Brunnenalterung

# Beispiel 4

## Fortsetzung 1

Mischung von Glaskugeln  
 $D_s$  ?

**Summenverteilung**  
 Einzel-Sorten und Mischung  
 Kornmodell  $x_{c\ min}$



**Summen- und Dichteverteilung**  
 Mischung  
 Vergleich Kornmodell  $x_{c\ min}$  und  $x_{area}$

# Beispiel 4

## Fortsetzung 2

Mischung von Glaskugeln  
 $D_s$  ?

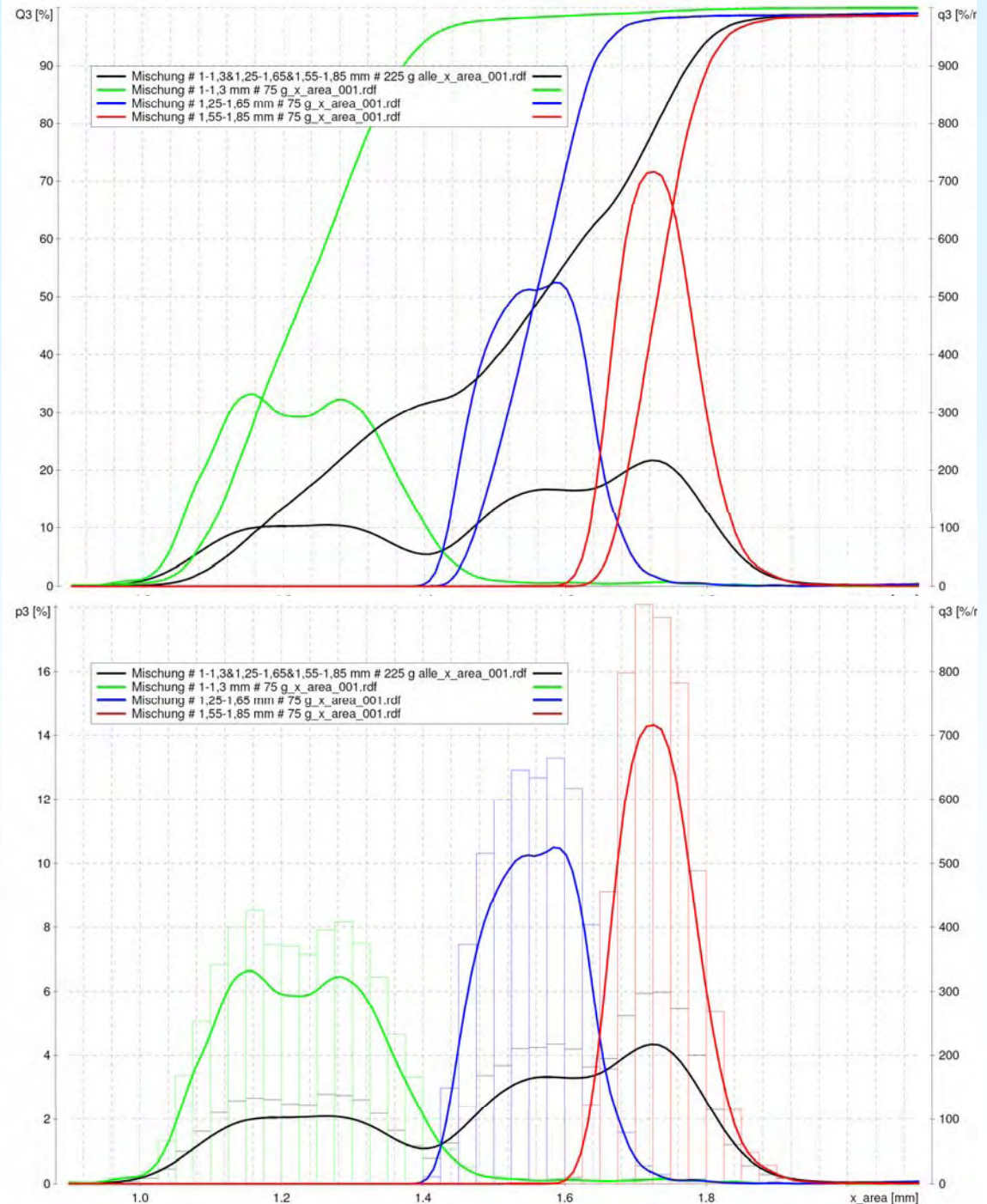
**Summen- und Dichteverteilung**  
 Einzel-Sorten und Mischung  
 Kornmodell  $x_{area}$

### Antwort zu 2

Mischung nicht empfehlenswert,  
 da  $D_{s\ area} = 1,144$  mm weit  
 unterhalb des arithmetischen  
 Mittels 1,425 mm

**Histogramm- und Dichteverteilung**  
 Einzel-Sorten und Mischung  
 Vergleich Kornmodell  $x_{area}$

$D_{03\ area} = 1,095$  mm     $D_{97\ area} = 1,835$  mm  
 $D_{10\ cmin} = 1,144$  mm     $C_{U\ cmin} = 1,406$





# „Hydraulische Kette“

**Kreuzvergleich** der Durchlässigkeitsbeiwerte in der Brunnen-Anströmungsrichtung

**Boden** (→ Bohrlochwand) → **Schüttgut** → **Filterrohr**

mit Bezug auf einen frei wählbaren  $k_f$ -Referenzwert,  
der seinerseits mit seinem Durchlässigkeitsbeiwert = 100 % gesetzt wird.

$k_f$ -Referenzwert z.B. Bodenschicht bei Filterrohroberkante

Überprüfung der „hydraulischen Kette“ als Matrix (horizontal und vertikal)  
für Brunnenplanung, Abgleich mit geophysikalischen Messungen und Zustandsüberprüfung.

- einfache Kiesschüttung nach DIN 4924  
 $k_f$  Boden (dichte Lagerung) →  $k_f$  Schüttgut (mittlere Lagerung)  
= 100 % → 10.000 %
- doppelte Kiesschüttung nach DIN 4924  
= 100 % → 10.000 % → 100.000 %

**keine Übertreibung sondern Sicherung einer möglichst langen Brunnen-Nutzungszeit**

# „Hydraulische Kette“ (2)

## Relevanz „Hydraulische Kette“

### ► Brunnen-Neubau

Durchlässigkeitsbeiwerte Schüttgut und Filterrohr >> Boden

- ➔ Unterschiede zwischen verschiedenen Schüttgut-Materialien und Schüttgut-Durchmessern im Pumpstest nicht messbar
- ➔ werden dennoch Unterschiede gemessen, so wurden Widerstände (= „Störungen“ durch das Bohrverfahren) an der Bohrlochwand aufgebaut oder entfernt

### ► Brunnen-Alterung

„bessere“ Durchlässigkeitsbeiwerte

(= optimale Schüttgut-Dimensionierung **und**  $k_f$  – Filterrohr >  $k_f$  - Schüttgut)  
verringern Kolmationsgefahr und Alterungsgeschwindigkeit

- ➔ Verringerung der Regenerierzyklen und Verlängerung Brunnenlebenszeit

# Exkurs Schüttgut-Setzung

## „neue“ Brunnenalterungsart

noch nicht im DVGW-Regelwerk

## Höhenverlust der Kiesschüttung

durch Viskositätseffekte bei Schüttgut-Einbringung kornspezifisch sehr lockere Lagerung

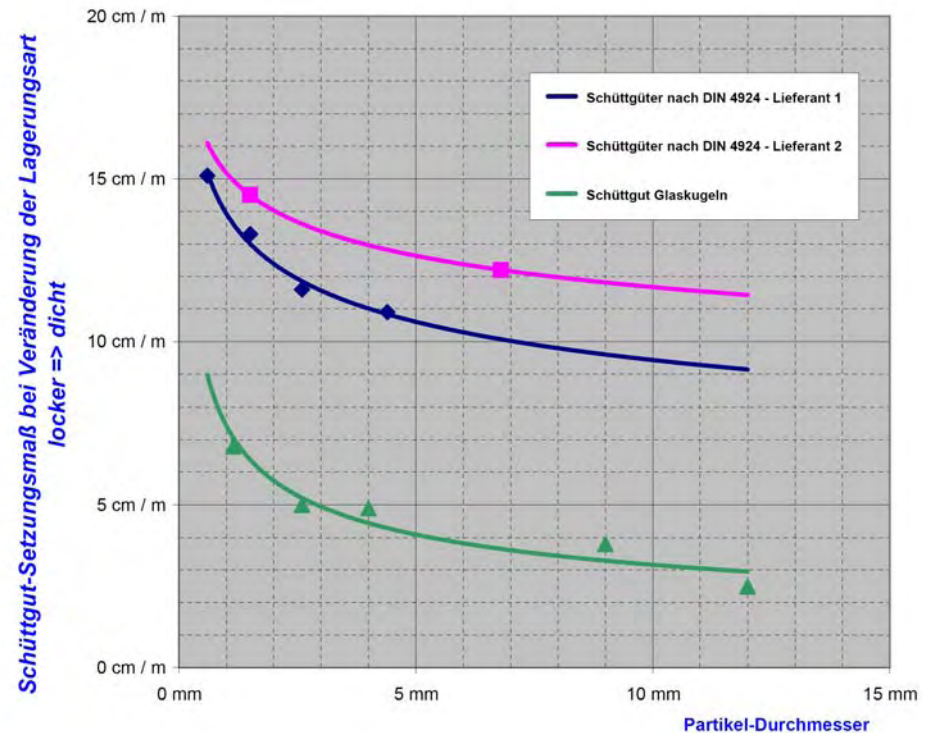
Umlagerung **bis** zur kornspezifisch dichten Lagerung

durch

- Inbetriebnahme
- Betrieb
- Regenerierung

## Unterscheidung

- unvermeidbare Schüttgut-Setzung bis in mittlere Lagerungsdichte
- vermeidbare Schüttgut-Setzung bis in partikelspezifisch dichte Lagerung



# Schüttgut-Setzung (Fortsetzung 1)

## Entsandungs- & Regenerierarbeiten

- „Masseverlust“  
Unterkornaustrag mit  $d < \text{Schlitzweite}$   
= Suffosion → Erhöhung der Durchlässigkeit
- „Volumenverlust“  
durch Partikelumlagerung ohne Masseverlust  
durch Partikelumlagerung wegen Masseverlust (= Erosion)

## Primäreffekt Schüttgut-Setzung

- Rückgang des Kiesschüttungs-Durchlässigkeitsbeiwertes um bis zu 50 %
- zunächst ohne Folgen,  
da in „hydraulischer Kette“ Boden → Schüttgut → Filterrohr  $k_{f \text{ Schüttgut}} > \text{bzw. } \gg k_{f \text{ Boden}}$

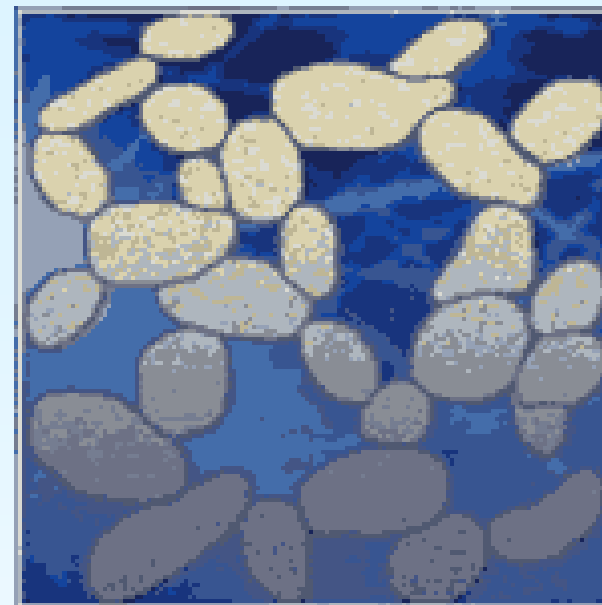
## Sekundäreffekt Schüttgut-Setzung

- signifikante Erhöhung  
der Kolmation / Selbstabdichtung(sgefahr) und Verockerung / Alterung(sgeschwindigkeit)
- signifikante Verschlechterung der Entsandungs-, Entwicklungs- & Regenerierfähigkeit

=> **signifikant verkürzte Brunnen-Lebenszeit**

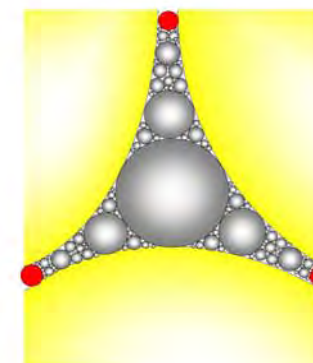
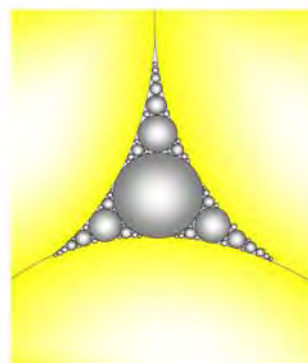
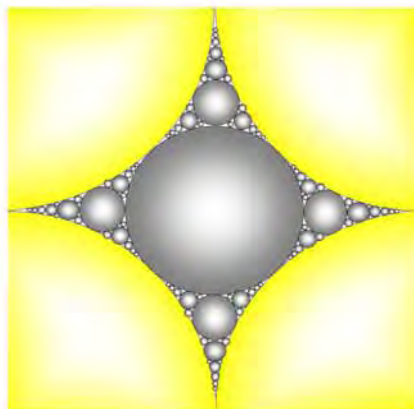
# Schütt-Setzung (Fortsetzung 2)

„Umlagerung“



mit freundlicher Genehmigung: www.sand-abc.de

Masseverlust (Suffosion) + Volumenverlust (Setzung)



Kugelpackungen in verschiedenen Lagerungsformen

- Schnitt in einer Lage, Ausrichtung der Kugel-Mittelachse senkrecht zur Schnittebene / zweidimensionales Kugelmodell -

© IBB-Berlin, 2010

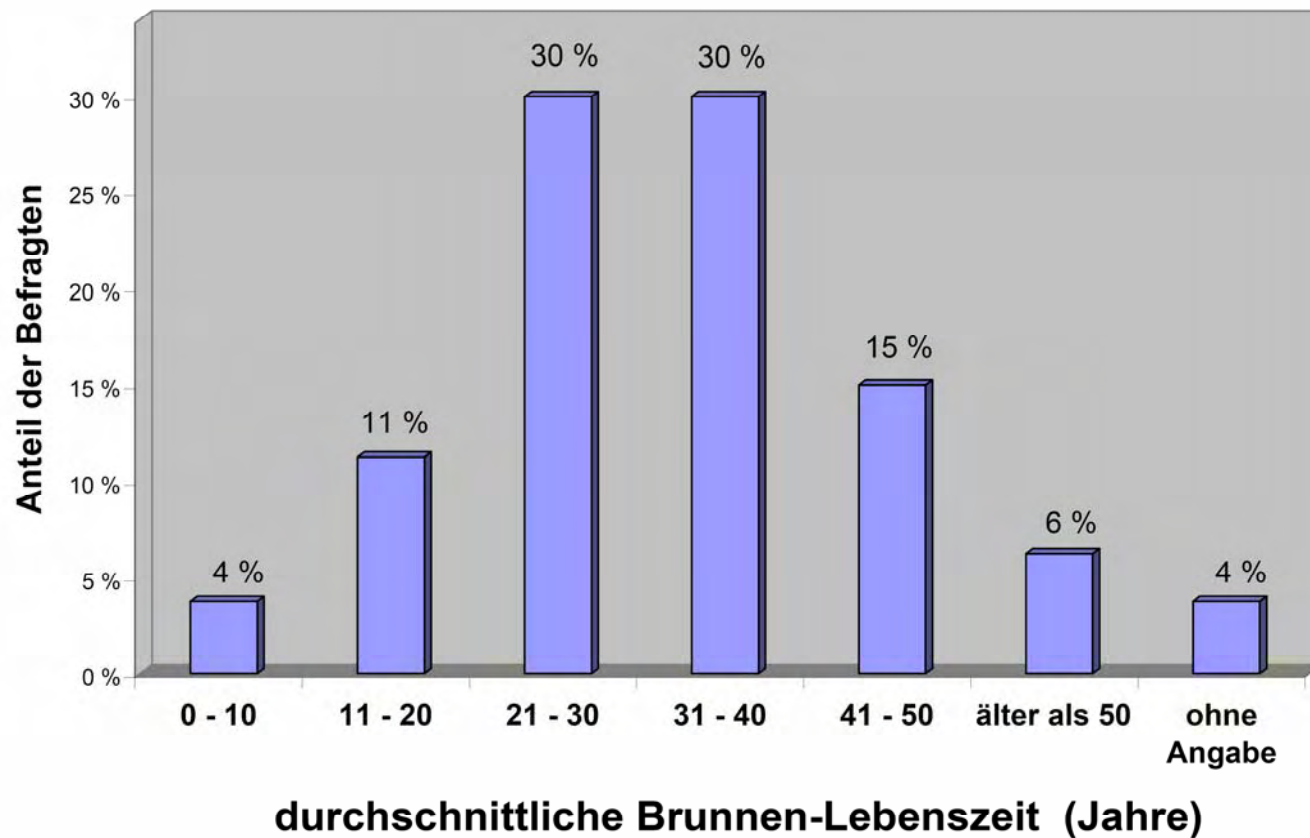
fraktale Kugelpackungen (nach Apollonius von Perge, ca. 200 v. Chr. )

fraktale Kugelpackung mit "spitzenberührter Einlagerung"

suffosionsfähig ohne Setzung

suffosionsfähig mit Setzungsgefahr

## Brunnen - „Haltbarkeit“



DVGW-Umfrage bei dt. WVU, 2009 – 400 Fragebogen, Rücklauf ca. 26 %

Quelle: BWB 2009; überarbeitet

**Problemstellung** Fast die Hälfte aller Brunnen hat eine kürzere Lebenszeit als die Dauer der Abschreibungszeit beträgt (i.a. 25 Jahre)

**Ziel** Die Brunnenlebenszeit sollte signifikant länger sein als die Abschreibungszeit, d.h., in der Planung müssen entsprechend geeignete Maßnahmen erfolgen.

# Zusammenfassung (1/2)

- geeignete Probennahme mit Vor-/Probe-Bohrung
- sorgfältige geologische Beschreibung und Foto-Dokumentation der Probe(n)
- Abtrennung & Quantifizierung bindige Anteile
- Messung Boden-Porenanteil mit / ohne bindige Anteile (inkl. Rohdichte)
- Messung Schüttgut-Porenanteil (inkl. viskositätsabhängiges max. Setzungsmaß)
- Messung Boden-Kennwerte mit digitaler Partikelmessung (Durchmesser im Aera-Modell, Formparameter)
- Messung Schüttgut-Kennwerte mit digitaler Partikelmessung
- Schüttgutberechnung  
**inkl.** „Angst-befreiter“ Kompromissfindung für die bauliche Umsetzung (mit Wendepunkt-Methode; im Aera-Modell modifiziert mit Formparametern; bei „provozierter“ Setzung geänderte Schüttgut-Dimensionierung)
- Aufstellung der „hydraulischen Kette“ (teufendifferenziert inkl. Geophysik-Verifizierung zur Beurteilung der baulichen Ausführung)
- beachten:
  - > Entsandern möglich ? (siehe  $C_u$  bzw. mehrgipfelige Dichte-Verteilung)
  - > Entfernung Störungen an der Bohrlochwand **ohne** Setzung & Kolmation
- bei Bedarf zusätzlich: mechanische & chemische Beständigkeit, Glühverlust etc.

# Zusammenfassung (2/2)

- **Ziel**

Optimierung bzw. Fehlerminimierung bei Brunnenplanung und beim Brunnenbau  
= Verringerung Regenerieraufwand & Verlängerung Brunnenlebenszeit

- **Kosten**

Die Kosten-Konsequenzen für einen erhöhten Regenerieraufwand und eine verringerte Brunnenlebenszeit sind signifikant höher

als der Kosten-Mehraufwand für **notwendige** Erkundungs-Vorarbeiten, eine **qualifizierte** Brunnenplanung aus mehreren Fachbereichen, die Auswahl eines **geeigneten** Schüttgutes und einen **sorgfältigen** Brunnenbau .

- **Motivation**

Die Thematik ist nicht kompliziert sondern komplex und berücksichtigt das „Gesamt-System Brunnen“  
(= Planung, Bau, Betrieb, Instandhaltung, Rückbau, Lebenszeit).

Wegen der Komplexität unterscheiden sich Handout (Grundlagen & Zusammenhänge) und Vortrag (nur bedingte Zusammenfassung des Handouts; Ergänzungen zum Handout).

Beides ist unter [www.ibb-berlin.de](http://www.ibb-berlin.de) im Download-Bereich verfügbar.





**Bedeutung und praxisgerechte Bestimmung von Bodenkennwerten für den Brunnenbau**



*Vielen Dank  
für Ihre  
Aufmerksamkeit !*

