

FIGAWA & DVGW
Informationsveranstaltung
Brunnenerhaltende Maßnahmen

05.11.2009, Kassel

- a **Vermeidung von Dimensionierungs- und Baufehlern**
 - b **Bedeutung der Filterkiesdimensionierung**
- Co-Referat Michael Tholen (a) & Kerry F. Paul (b)

Bedeutung der Filterkiesdimensionierung

Dipl.-Ing. Kerry F. Paul

IBB Ingenieur- und Beratungsbüro für Brunnenbetriebstechnik und –instandhaltung GmbH
Am Pichelssee 12, 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.

(Terzaghi, 1948)

Bedeutung der Filterkiesdimensionierung

Gliederung

- **Schüttgut-Dimensionierung nach W 113**
Vorschläge für Fortschreibung Regelwerk
- **Details**
 - Kugel-Zahlen**
 - Funktionsdarstellung von Schüttgütern**
 - „Angst“-Schüttung**
 - Fehl-Dimensionierung**
 - Bohrloch-Abweichung**
 - Partikel-(Um)Lagerung**
- **Definition neue Basis Kugelmodell-Theorie x_{area}**
Siebanalyse versus Digitale Partikelmessung / dynamische Bildanalyse
- **Beispiele Digitale Partikelmessung / dynamische Bildanalyse**
 - Bedeutung der Kornform**
 - div. Böden & Schüttgüter**
 - Vergleich div. Lieferanten Schüttgut Kornklasse 3,15 – 5,6 mm**
- **Zusammenfassung / Ausblick**

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

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

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

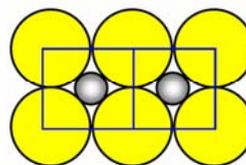
$$U = d_{60} / d_{10} = \text{Ungleichkörnigkeitszahl } C_u$$



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

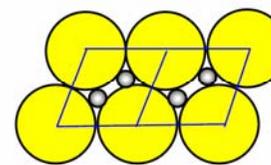
-  D = Kugel-Durchmesser
-  d = größtmöglicher Durchmesser einer passierenden Kugel

lockerste Kugelpackung



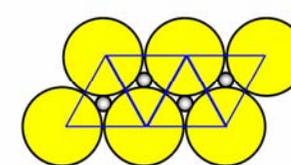
$$D / d_{\text{locker}} = 2,4$$

Kugelpackung, mittlere Lagerungsdichte
 arithmetisches Mittel für "d" zwischen



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

dichteste Kugelpackung



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

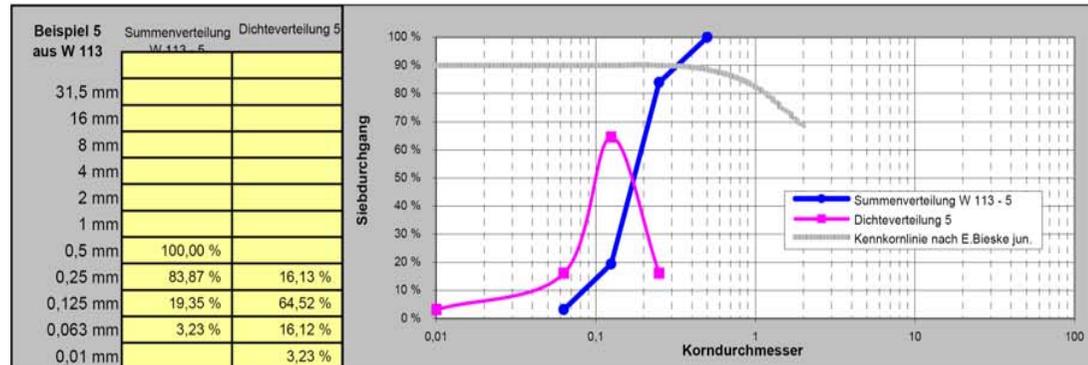
Autorenangaben
 Mitglieder des für die Erstellung fachlich verantwortlichen Gremiums:
 Christian Etschel, Hof
 Dr.-Ing. Attila Gàl, Haltern
 Uwe Hansen, Neetze
 Berthold Niehues, Bonn
 Kerry F. Paul, Berlin
 Lothar Schoka, Rostrup
 Michael Tholen, Oldenburg

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

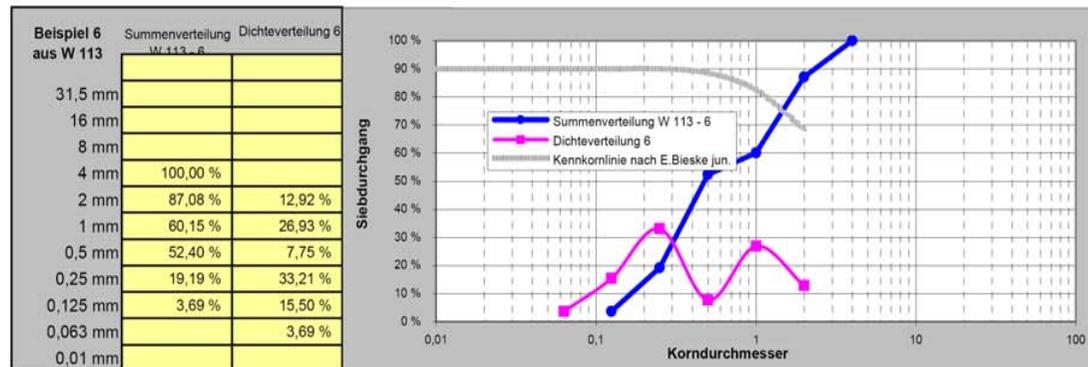


einfach gekrümmte Summenkurve
mit eindeutigem Maximum der Dichteverteilung

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

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

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

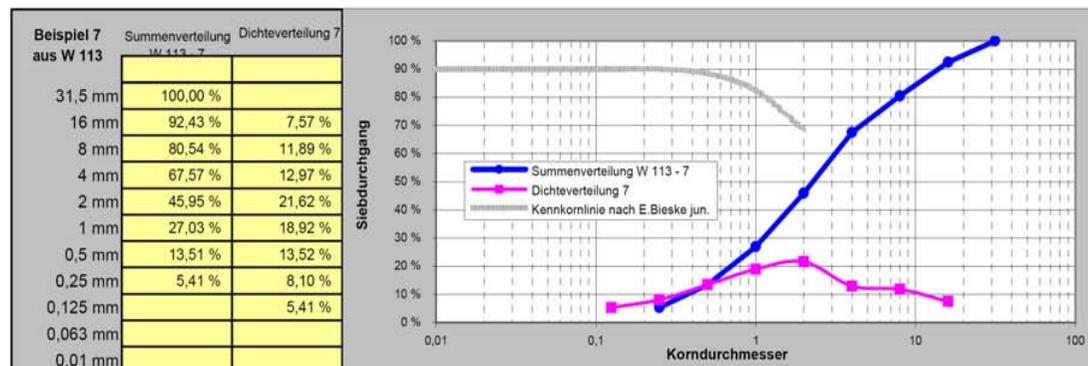


doppelt gekrümmte Summenkurve
mit zwei Maxima der Dichteverteilung

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

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

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



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

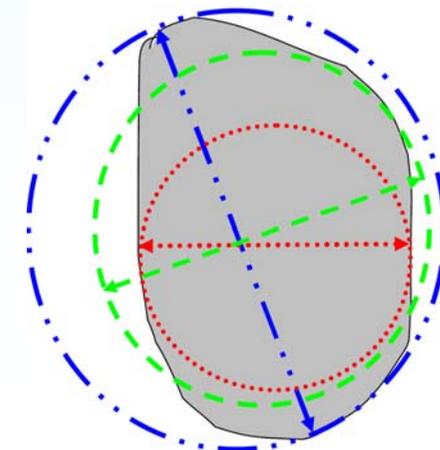
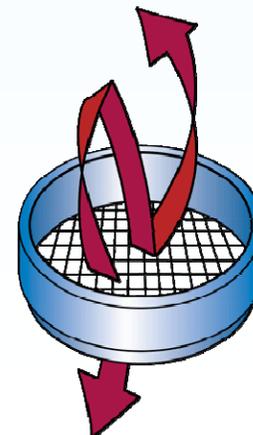
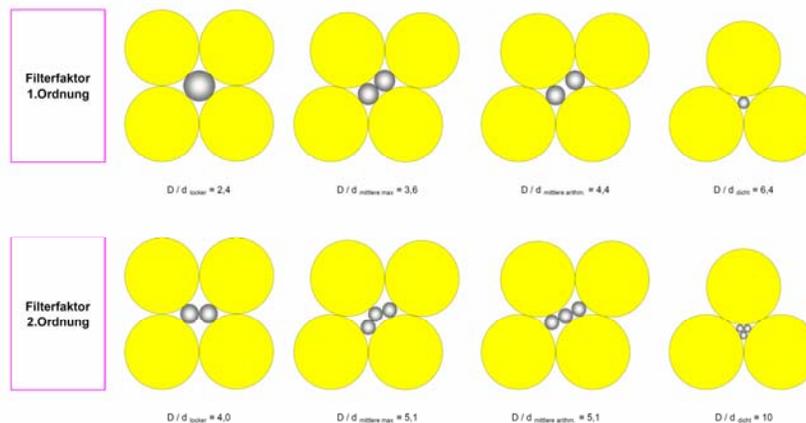
- ▶ Unterscheidung der Berechnungen für Sande und Kiese nach DIN 4924, Sonderfraktionen, Glaskugeln
- ▶ Berücksichtigung Filterfaktoren höherer Ordnung
- ▶ Berücksichtigung Einbaubedingungen, Lagerung & Umlagerung
- ▶ Definition Schüttgüter-Fraktionen mit engeren Abstufungen der Kornklassen-Breite um 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 $x_{c min}$)

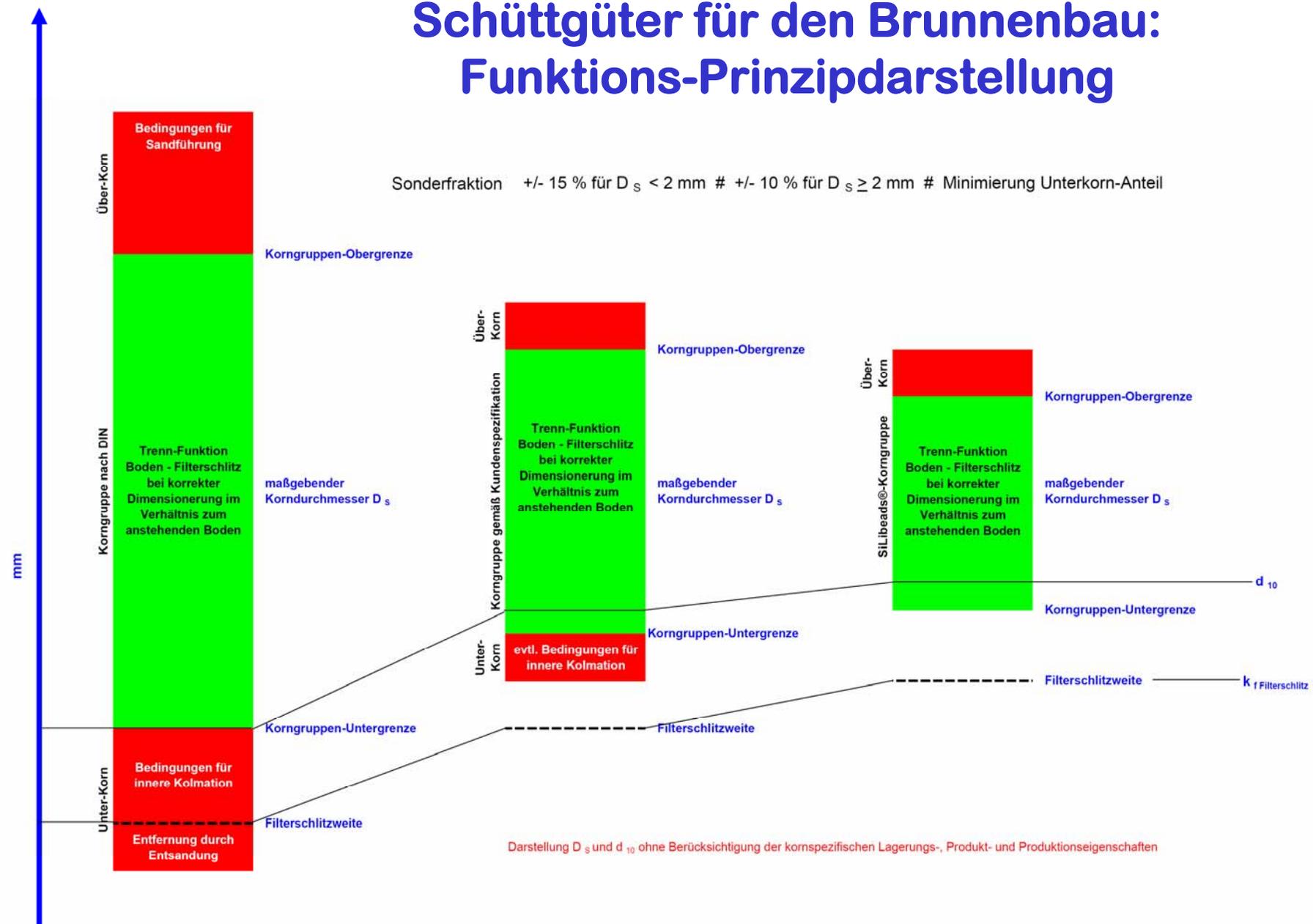


Schüttgut-Dimensionierung nach DVGW MB W 113 (2001) - Fortsetzung

"Zahlen"-Beispiele zur Kugel-Modelltheorie

	1 Kugel			(Kugeln in) Würfel mit Kantenlänge 1,0 m = 1 m ³			locker → dichte Kugel- Packung
Kugel-Durchmesser	10,0 mm	1,0 mm	0,1 mm	10,0 mm	1,0 mm	0,1 mm	
Kugel-Lagerungsart				lockerste Kugelpackung			
Anzahl Kugeln (auch: Anzahl Porenräume)	1			1.000.000 1/m ³ 1,00 E+06 1/m ³ 1 Million pro m³	1.000.000.000 1/m ³ 1,00 E+09 1/m ³ 1 Milliarde pro m³	1.000.000.000.000 1/m ³ 1,00 E+12 1/m ³ 1 Billion pro m³	+ 41,4 %
Gewicht <small>ρ = 2.650 kg/m³</small>	1,3875 g 1,39 E-03 kg	0,00138750 g 1,39 E-06 kg	0,00000138750 g 1,39 E-06 kg	1.387,5 kg/m³			+ 41,4 %
Oberfläche Kreis (= Fläche Kugel-Durchmesser bzw. senkrechter Ebenenschnitt)	0,0000785 m ² 7,85 E-05 m²	0,000000785 m ² 7,85 E-07 m²	0,00000000785 m ² 7,85 E-09 m²	0,7854 m ² /m ³	0,7854 m ² /m ³	0,7854 m ² /m ³	+ 15,5 % - 56,6%
Oberfläche Kugel (glatt, ohne Rauigkeit)	0,000314 m ² 3,14 E-04 m²	0,00000314 m ² 3,14 E-06 m²	0,0000000314 m ² 3,14 E-08 m²	314,2 m ² /m ³ 3,14 E+02 m ² /m ³ 0,04 Fußballfelder / m³	3.141,6 m ² /m ³ 3,14 E+03 m ² /m ³ 0,44 Fußballfelder / m³	31.415,9 m ² /m ³ 3,14 E+04 m ² /m ³ 4,40 Fußballfelder / m³	+ 41,4 %
Volumen	0,0000000524 m ³ 5,24 E-07 m³	0,000000000524 m ³ 5,24 E-10 m³	0,000000000000524 m ³ 5,24 E-13 m³	0,5236 m ³ /m ³	0,5236 m ³ /m ³	0,5236 m ³ /m ³	+ 41,4 % - 45,5 %
Porenfläche (senkrechter Ebenenschnitt)	1 Porenraum			0,00002146 m ² 2,15 E-05 m²	0,0000002146 m ² 2,15 E-07 m²	0,000000002146 m ² 2,15 E-09 m²	+ 41,4 %
Porenvolumen	1 Porenraum			0,000000476 m ³ 4,76 E-07 m³	0,000000000476 m ³ 4,76 E-10 m³	0,000000000000476 m ³ 4,76 E-13 m³	- 45,5 %
waagerechte Porenkanäle (senkrechter Ebenenschnitt)				10.000 1/m²	1.000.000 1/m²	100.000.000 1/m²	+ 130,9 %

Schüttgüter für den Brunnenbau: Funktions-Prinzipdarstellung



Sande und Kiese nach DIN 4924	Sande und Kiese Sonderfraktion	Glaskugeln als Schüttgut
-------------------------------	--------------------------------	--------------------------

„Angst“-Schüttung

DIN 4924		d_{10}	$k_{f \text{ Beyer}}$	Kreuzvergleich $k_{f \text{ Beyer}}$ ohne Unterkorn Durchlässigkeit "Angst-Schüttung" (Auswahl 1 Korngruppe kleiner als berechnet)		Verbesserung Durchlässigkeit mit → ohne Unterkorn
Korngruppe (mm)		ohne Unterkorn / ohne Überkorn				
0,4	0,8	0,44 mm	2,13 E-03 m/s			21,0 %
0,71	1,25	0,76 mm	6,42 E-03 m/s	48 %		15,8 %
1	2	1,10 mm	1,33 E-02 m/s	100 %	27 %	21,0 %
2	3,15	2,12 mm	4,92 E-02 m/s		100 %	11,8 %
3,15	5,6	3,40 mm	1,27 E-01 m/s	34 %		16,2 %
5,6	8	5,84 mm	3,75 E-01 m/s	100 %	44 %	8,8 %
8	16	8,80 mm	8,52 E-01 m/s		100 %	21,0 %

DIN 4924		D_s	Kugelmodell Durchmesser Porenfläche bei lockerster Kugel-Lagerung	Kreuzvergleich bei lockerster Lagerung Durchmesser Porenfläche "Angst-Schüttung" (Auswahl 1 Korngruppe kleiner als berechnet)		Veränderung Durchmesser Porenfläche locker → dicht
Korngruppe (mm)		ohne Unterkorn / ohne Überkorn Gleichverteilung				
0,4	0,8	0,60 mm	0,25 mm			- 62,5 %
0,71	1,25	0,98 mm	0,41 mm	65 %		- 62,5 %
1	2	1,50 mm	0,63 mm	100 %	58 %	- 62,5 %
2	3,15	2,58 mm	1,07 mm		100 %	- 62,5 %
3,15	5,6	4,38 mm	1,82 mm	64 %		- 62,5 %
5,6	8	6,80 mm	2,83 mm	100 %	57 %	- 62,5 %
8	16	12,00 mm	5,00 mm		100 %	- 62,5 %

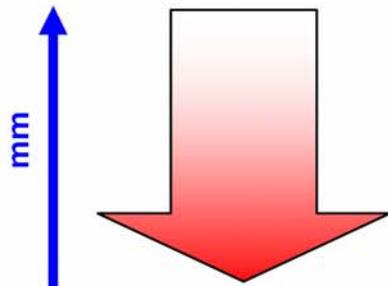
Kugelmodell, locker: $D / d = 2,4$

Kugelmodell, dicht: $D / d = 6,4$

„Angst“-Schüttung - Fortsetzung

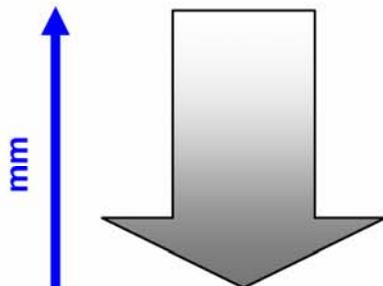
Bedeutung

- ▶ (sehr) häufig
- ▶ "gefördert" durch alte VOB



"Angst"-Schüttung
1 Korngruppe kleiner

- ▶ Erhöhung äußere & innere Kolmationsgefahr
- ▶ Verringerung maximale spezifische Ergiebigkeit
- ▶ Vergrößerung Anlagerungs-Oberfläche
- ▶ für $Q = \text{konst}$ => Erhöhung v => Erhöhung Brunnenalterungsgeschwindigkeit
- ▶ für $Q = \text{konst}$ => Erhöhung Absenkung = Erhöhung Energieaufwand



Filterschlitz kleiner als
Empfehlung W 118

- ▶ Probleme analog
"Angst"-Schüttung

Korngruppe nach DIN 4924	Schlitzweite nach DVGW AB W 118
--------------------------------	---------------------------------------

0,71 bis 1,25 mm	0,3 bis 0,5 mm
1,0 bis 2,0 mm	0,5 bis 0,75 mm
2,0 bis 3,15 mm	1,0 bis 1,5 mm
3,15 bis 5,6 mm	2,0 bis 2,5 mm
5,6 bis 8 mm	3,0 bis 4,0 mm
8 bis 16 mm	4,0 bis 5,0 mm

Schüttgüter: Bedarf & Kosten

Schüttdichte für Sande & Kiese und Glaskugeln ähnlich Durchschnitt 1.500 kg / m ³	Schüttgut-Kosten pro Tonne (Hersteller-Angaben; Basis 2009; Fraktions-abhängig; ohne Nebenkosten für Verpackung & Transport; ohne Sonderaufschläge oder Rabatte; ohne MWSt.)	Material	Spanne	Durchschnitt
		DIN 4924	50 - 100 €	75 €
		Sonderfraktion	100 - 200 €	150 €
		Glaskugeln	545 - 995 €	770 €

Durchmesser Filter	Bohrloch	Schüttgut- Schichtstärke	Schüttmenge pro Meter
300 mm	850 mm	275 mm	745 kg/m
	1.000 mm	350 mm	1.072 kg/m
	1.200 mm	450 mm	1.590 kg/m

400 mm	850 mm	225 mm	663 kg/m
	1.000 mm	300 mm	990 kg/m
	1.200 mm	400 mm	1.508 kg/m

500 mm	1.000 mm	250 mm	884 kg/m
	1.200 mm	350 mm	1.402 kg/m
	1.600 mm	550 mm	2.721 kg/m

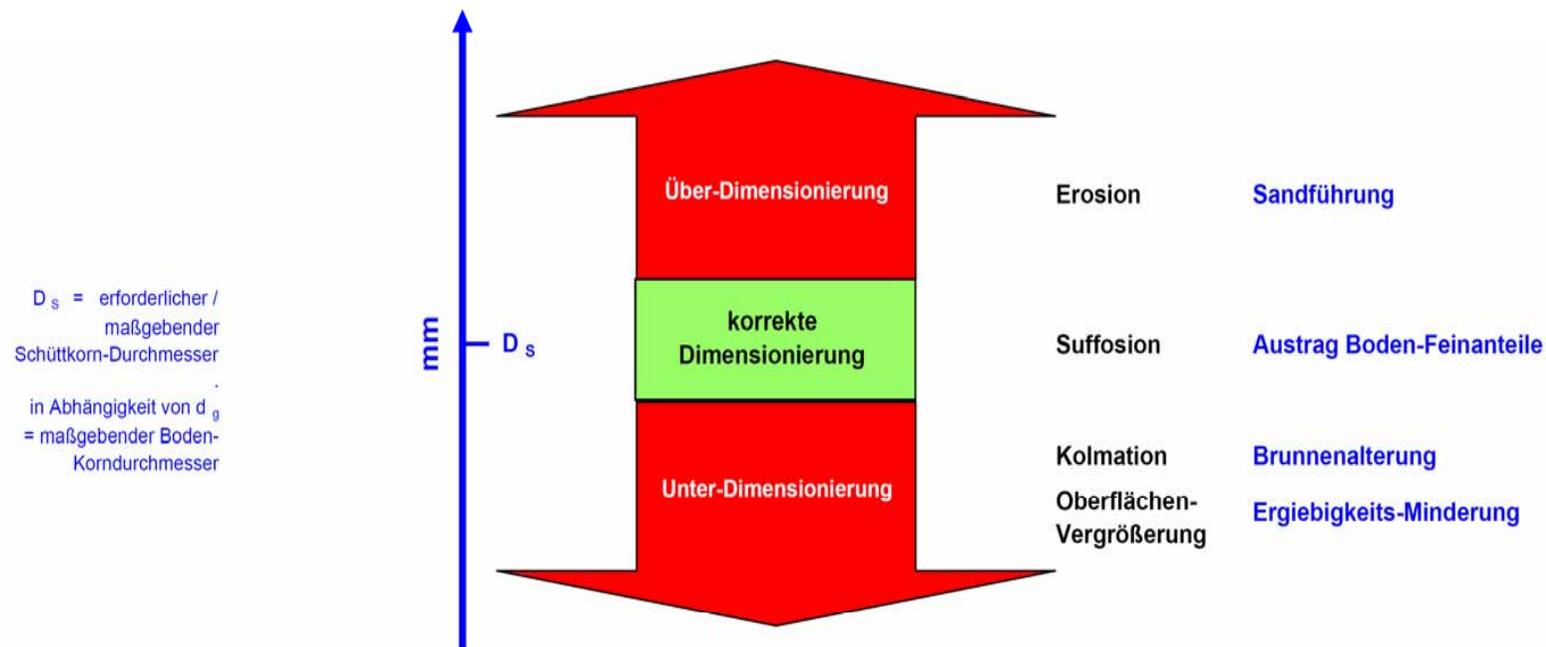
Kosten (gerundet) Schüttgut bei Schüttstrecke				
Material	pro Meter	10 m	50 m	100 m
DIN 4924	56 €	559 €	2.794 €	5.589 €
Sonderfraktion	112 €	1.118 €	5.589 €	11.177 €
Glaskugeln	574 €	5.738 €	28.688 €	57.376 €
DIN 4924	80 €	804 €	4.020 €	8.041 €
Sonderfraktion	161 €	1.608 €	8.041 €	16.081 €
Glaskugeln	825 €	8.255 €	41.275 €	82.549 €
DIN 4924	119 €	1.193 €	5.964 €	11.928 €
Sonderfraktion	239 €	2.386 €	11.928 €	23.857 €
Glaskugeln	1.225 €	12.246 €	61.232 €	122.463 €

DIN 4924	50 €	497 €	2.485 €	4.970 €
Sonderfraktion	99 €	994 €	4.970 €	9.940 €
Glaskugeln	510 €	5.103 €	25.513 €	51.026 €
DIN 4924	74 €	742 €	3.711 €	7.422 €
Sonderfraktion	148 €	1.484 €	7.422 €	14.844 €
Glaskugeln	762 €	7.620 €	38.100 €	76.200 €
DIN 4924	113 €	1.131 €	5.655 €	11.310 €
Sonderfraktion	226 €	2.262 €	11.310 €	22.620 €
Glaskugeln	1.161 €	11.611 €	58.057 €	116.114 €

DIN 4924	66 €	663 €	3.313 €	6.627 €
Sonderfraktion	133 €	1.325 €	6.627 €	13.254 €
Glaskugeln	680 €	6.804 €	34.018 €	68.035 €
DIN 4924	105 €	1.051 €	5.257 €	10.515 €
Sonderfraktion	210 €	2.103 €	10.515 €	21.029 €
Glaskugeln	1.079 €	10.795 €	53.975 €	107.949 €
DIN 4924	204 €	2.041 €	10.205 €	20.411 €
Sonderfraktion	408 €	4.082 €	20.411 €	40.821 €
Glaskugeln	2.095 €	20.955 €	104.774 €	209.549 €

- ▶ zur Kostenreduzierung werden teilweise geringere Schichtstärken werden gewählt
=> erhöhte Gefahr Sandführung bzw. Kolmation etc.; inkl. Folgeprobleme Regenerierung & Lebenszeit
- ▶ zur Rentabilität der Mehrkosten bessere Anpassung an inhomogenen Boden erforderlich;
Lagerung Boden und Schüttgut in der Schüttgut-Berechnung berücksichtigen
- ▶ Regenerierungstypen und deren Eigenarten
bei Rentabilitätsberechnungen "besserer" Schüttgüter berücksichtigen

Fehl-Dimensionierung von Schüttgütern



Bedeutung Fehl-Dimensionierung

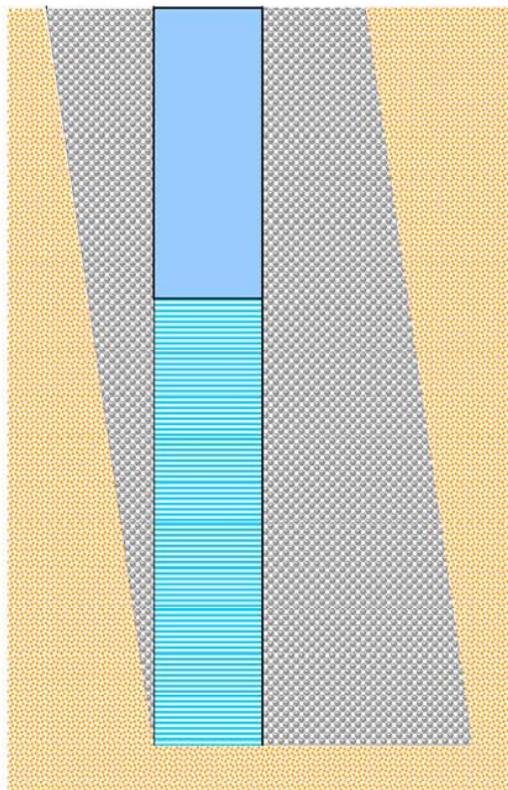
- ▶ unterschätzt, häufig
- ▶ Prämisse Sicherungstellung der Versorgungsbereitschaft
- ▶ Alternative zusätzlicher Brunnenbau
- oder Steigerung der Qualität in Erkundung-Planung-Ausführung

Gründe der Fehl-Dimensionierung

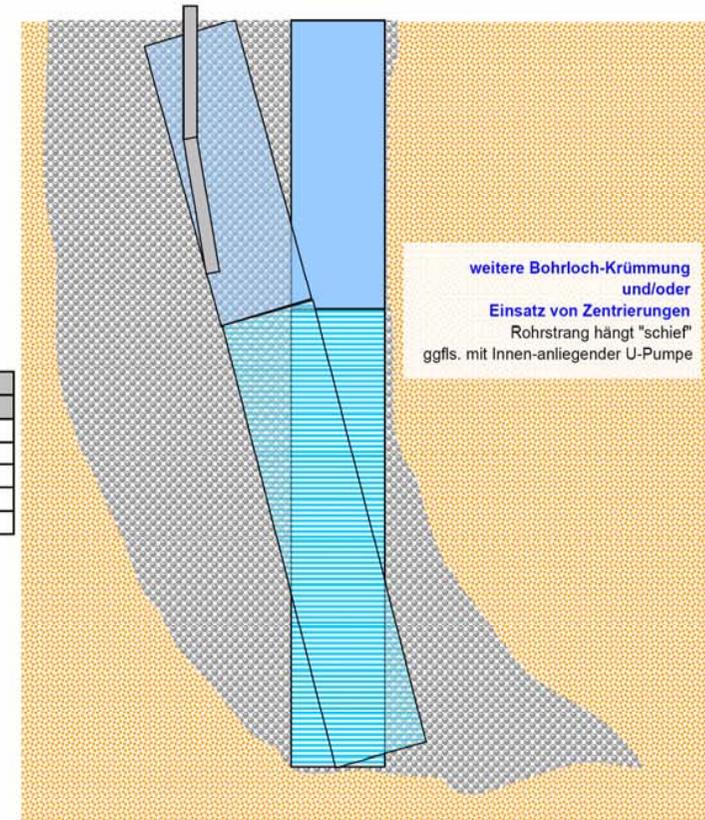
- | | |
|--|---|
| <p>Probennahme</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ Probengüte gemäß DIN 22475 Teil 1 zu niedrig gewählt ▶ Schichten-übergreifend /-vermischend | <p>Labor</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ zu geringe Probenmenge ▶ ungeeignete Abtrennung von Probenanteilen ▶ ungeeignete Messtechnik; Ausführungsfehler |
| <p>uswertung / Planung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ Angst ▶ falsche Methodik ▶ keine Berücksichtigung Schüttkorn-Setzungsverhalten | <p>Bau</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ nicht Schichten-angepasst / nicht teufendifferenziert ▶ geometr.-chem.-mechan. Schüttkorn-Produkteigenschaften ▶ fehlerbehaftete Kompromisse & fehlerhafte Umsetzung der Planung ▶ "Erfahrung" |

Bohrloch-Abweichung aus der Lotrechten

"schräger Bohrloch-Verlauf"



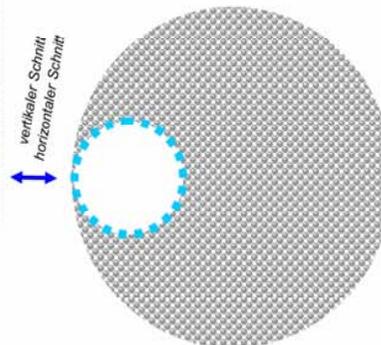
"gekrümmter Bohrloch-Verlauf"



vereinfachte Darstellung;
weitere Beispiele
"partiell gekrümmter Verlauf",
"mehrfach gekrümmter Verlauf",
"Spiral-Verlauf" etc.;
ohne Berücksichtigung Ringraumabdichtung

		Abweichung	
		1°	2°
Bohrteufe	5 m	9 cm	17 cm
Bohrteufe	10 m	17 cm	35 cm
Bohrteufe	20 m	35 cm	70 cm
Bohrteufe	50 m	87 cm	174 cm
Bohrteufe	100 m	174 cm	349 cm

gerundet



- Boden
- Bohrloch mit Schüttgut
- Rohrstrang mit Aufsatz- und Filterrohr

Bohrloch-Abweichung aus der Lotrechten - Fortsetzung

Relevanz unterschätzt, häufig

Ausbauzeichnung zeigt zentrischen Rohreinbau und impliziert rotationssymmetrisches Strömungsverhalten

resultierende Probleme Sandführung
Entsandungsfähigkeit
Betriebsfähigkeit
Regenerierfähigkeit
Ringraumabdichtung
ungleichmäßige Setzung

geophysikalische Kontrollmessungen

Bohrlochabweichung
selektives Gammalog
Ringraumscanner
Kamera (ohne Zentrierung)

"Reichweite" Entsandungsverfahren (gerader Verlauf)
(DVGW W 55/99, Vers. 1) max. Schichtstärke 150 mm

DVGW-Regelwerk

AB W 115 (2008) Kap. 5.3.1 Abweichung von der Bohrlochachse - Grundsätze

"... Die Kenntnisse über die Achsabweichung eines Bohrloches ist eine Voraussetzung für die richtige Auswertung der Bohrdaten, wie z.B. der Bohrproben oder der geophysikalischen Bohrlochmessdiagramme. ... Die Größe der Abweichungen darf nur so groß sein, dass die Bohrung ihrem vorgesehenen Zweck zugeführt und betrieben werden kann."

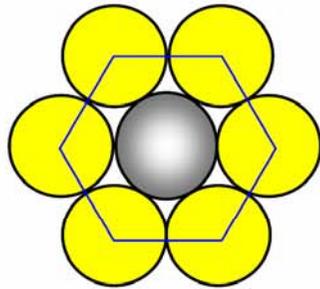
AB W 123 (2001) Kap. 5.1 Allgemeines

"... der Brunnenbauer muss gewährleisten ... • teufengerechtes Einbringen und konzentrisches Platzieren der Schüttgüter"

Kap. 5.2.3 Bohrlochgeometrie

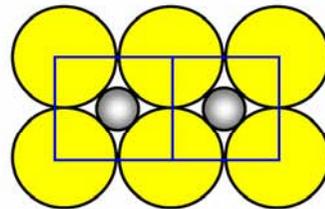
"Die Bohrlochgeometrie darf weder den Ausbau und den Betrieb noch die spätere Sanierung oder den Rückbau erschweren. Generell muss eine möglichst hohe Vertikalität und eine Kalibergerechtigkeit erreicht werden, damit ein sicherer und zentrischer Einbau der Ausbauperforierung und somit eine optimale Füllung des Ringraumes mit Schüttgütern gewährleistet ist."

Kugelpackung mit Kornbrücke



$$D / d \text{ "Kornbrücke"} = 1,0$$

lockerste Kugelpackung

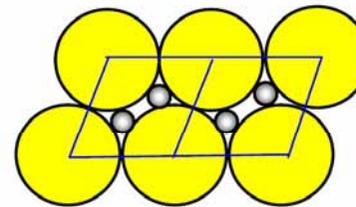


$$D / d_{\text{locker}} = 2,4$$

unabhängig von D

Lückengrad $\varepsilon = 47,64 \%$

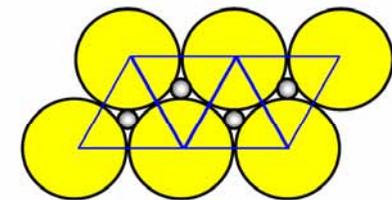
freie Durchlaßfläche = 21.46 %

Kugelpackung, mittlere Lagerungsdichte
arithmetisches Mittel für "d" zwischen
lockerer und dichter Kugelpackung

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

$$D / d = F_g$$

dichteste Kugelpackung



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

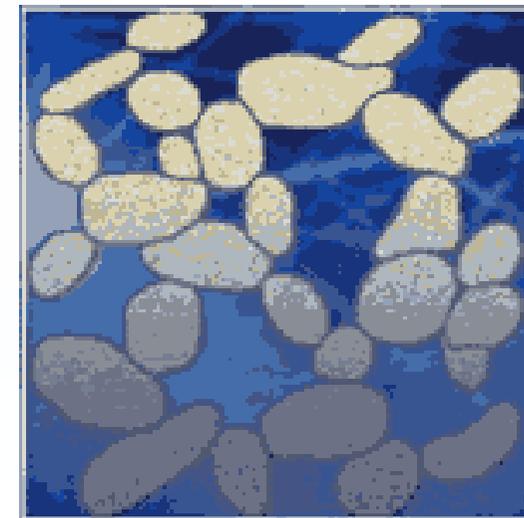
unabhängig von D

Lückengrad $\varepsilon = 25,95 \%$

freie Durchlaßfläche = 9,31 %

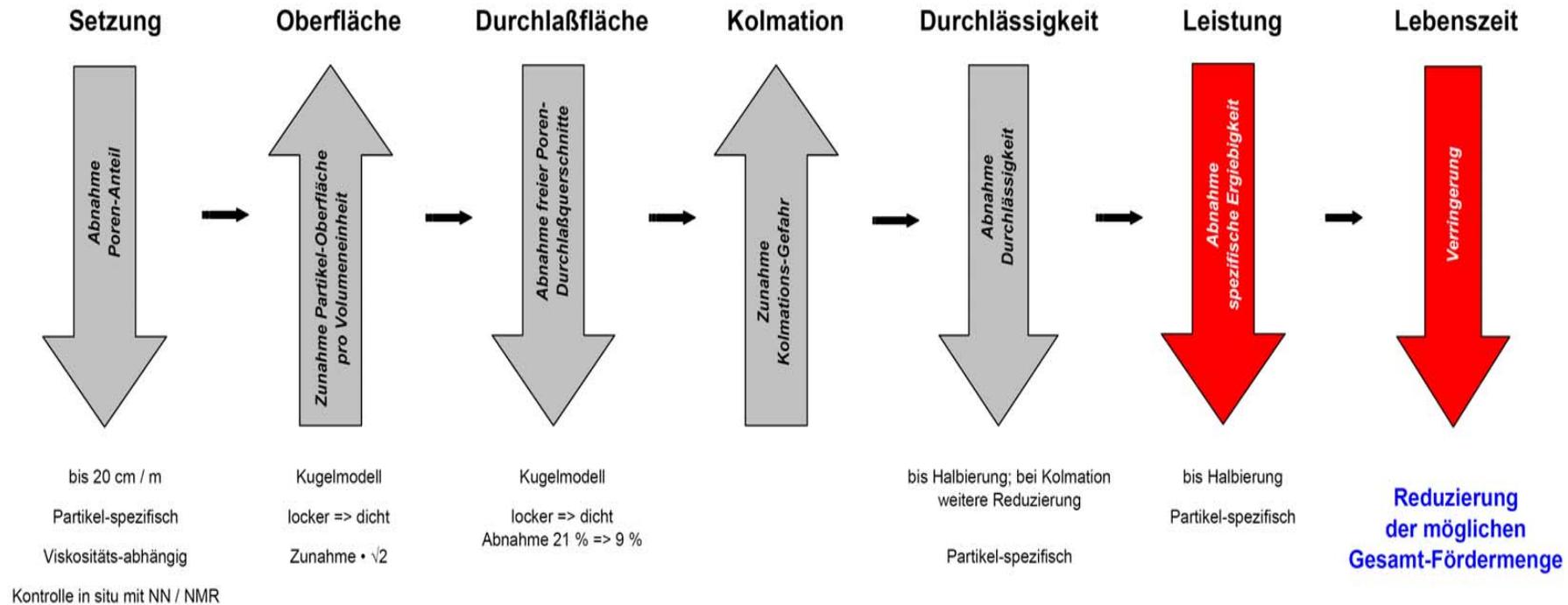
-  D = Kugel-Durchmesser
-  d = größtmöglicher Durchmesser einer passierenden Kugel
- F_g = Filterfaktor

Partikel – (Um) Lagerung



Quelle: www.sand-abc.de

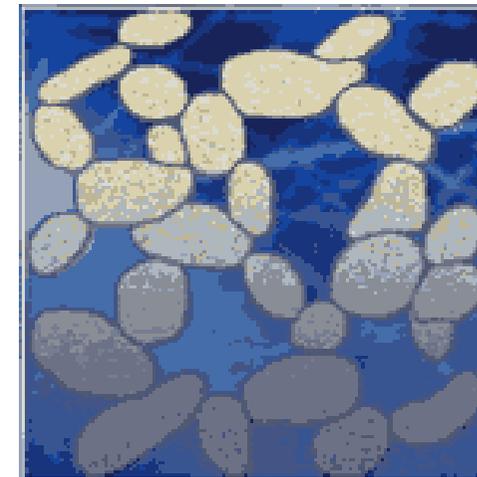
Partikel – (Um) Lagerung Fortsetzung

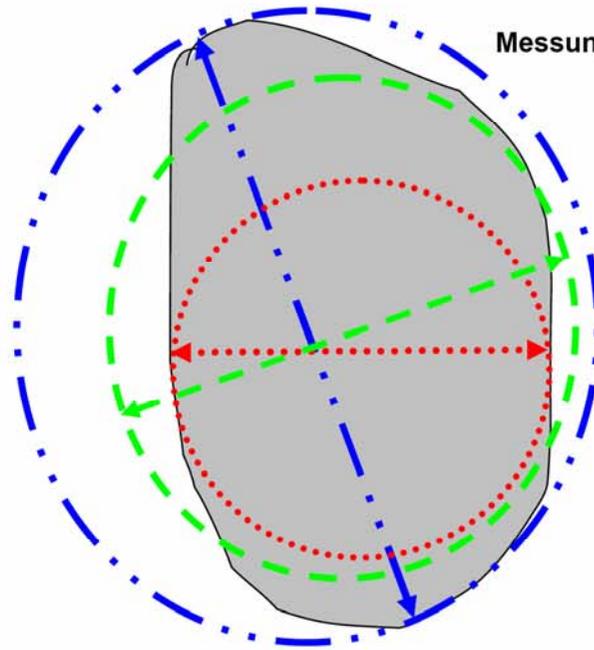


Bedeutung "Umlagerung"

- ▶ bei jedem Brunnen
- ▶ Brunnen-wertmindernd
- ▶ ggfls. weitere Brunnen erforderlich
- ▶ unterschiedlich durch Material - Bau - Betrieb - Maßnahmen

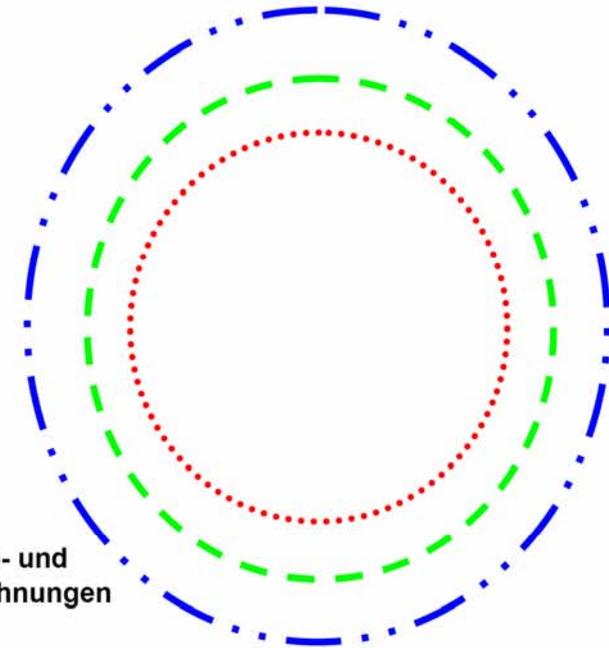
bestehende Brunnen: Setzungs-herbeiführende Maßnahmen vermeiden
 Brunnen-Neubau: systematische Untersuchungen erforderlich = F&E





Messung der Partikel-Größe

Durchmesser für hydro- und ingenieurgeologische Berechnungen



Messverfahren		Bezeichnung	
	Digitale Partikelmessung	$x_{Fe\ max}$	Länge
	Digitale Partikelmessung	x_{area}	Fläche
	Siebanalyse / Digitale Partikelmessung	$x_{c\ min}$	Breite
Durchmesser-Ermittlung			
	Partikeldurchmesser bestimmt aus dem längsten Feret-Durchmesser aller gemessenen Feret-Durchmesser eines Partikels		
	Partikeldurchmesser berechnet aus der Flächenmessung der Partikelprojektion		
	Partikeldurchmesser bestimmt aus der kleinsten aller maximalen Sehnen eines Partikels		

Siebanalyse versus Digitale Partikelmessung

mit digitaler Partikelmessung / dynamischer Bildanalyse weitere Messungen, z.B. B/L, SPHT, SYMM, CON, Anzahl, Oberfläche, Volumen etc.

Siebanalyse versus Digitale Partikelmessung - Fortsetzung

	bisher	"neu" TU Berlin FG Ingenieurgeologie & IBB -Berlin
Kugelmodell als Grundlage für Berechnungen	Partikel-Breite = Partikeldurchmesser bestimmt aus der kleinsten aller maximalen Sehnen eines Partikels	Partikel-Fläche = Partikeldurchmesser berechnet aus der Flächenmessung der Partikelprojektion
Messverfahren	Korngröße Siebanalyse gemäß DIN 18123	Korngröße und Kornform digitale Partikelmessung / dynamische Bildanalyse gemäß ISO 13322
Korngröße (Durchmesser)	<i>Durchmesser $x_{c\ min}$ = Partikel-Breite</i> Partikeldurchmesser bestimmt aus der kleinsten aller maximalen Sehnen eines Partikels	<i>Durchmesser $x_{c\ min}$ = Partikel-Breite</i> Partikeldurchmesser bestimmt aus der kleinsten aller maximalen Sehnen eines Partikels <i>Durchmesser x_{area} = Partikel-Fläche</i> Partikeldurchmesser berechnet aus der Flächenmessung der Partikelprojektion <i>Durchmesser $x_{Fe\ max}$ = Partikel-Länge</i> Partikeldurchmesser bestimmt aus dem längsten Feret-Durchmesser aller gemessenen Feret-Durchmesser eines Partikels
QM Korngröße (/ Kornform)	10 - 15 Siebe keine Berücksichtigung der Kornform, da Siebe mit quadratischen Maschen Summenkurve wird geglättet - Werte werden "abgelesen" ; z.B. Einteilung Korngrößen nach DIN EN ISO 14688 Teil 1 (01.2003), k_f mit d_{10} und Sonderaspekte (z.B. Unter-Überkornanteil DIN 4924)	Auflösung Korngröße bis 10^{-4} mm => bis ca. 30.000 Größenklassen (Meßbereich 30 μ bis 30 mm) für alle Korngrößen-Darstellungen und Kornformparameter frei wählbar; keine Interpolationen erforderlich; Rohdaten für zukünftige, derzeit noch nicht angewendete Auswertungen nutzbar
Kornform	qualitative Beschreibung gemäß DIN EN ISO 14688 Teil 1 (01.2003) z.B. durch mikroskopische Untersuchung	zielorientierte Messung unterschiedlicher Parameter z.B. Breite/-Längenverhältnis (b/l), Sphärizität (SPHT), Symmetrie (Symm), Konvexität (Conv), Partikelanzahl (PDN), Partikeloberfläche (S_v und S_m)

Siebanalyse versus Digitale Partikelmessung - Fortsetzung

	bisher	"neu" TU Berlin FG Ingenieurgeologie & IBB -Berlin
Korndichte & Lagerungsart	Korndichte gemäß DIN 18124 Porenanteil bei lockerer und dichter Lagerungsart gemäß DIN 18126	Hausnorm für vereinfachte Anwendung im Labor / im Feld Kombinationsmessung von Korndichte - Porenanteil bei kornspezifisch lockerer und dichter Lagerung - Schüttdichte in Abhängigkeit der Lagerungsart Messung wahlweise mit Simulation der Brunnenbaubedingungen, z.B. Bohrung mit Klarwasser, Spülungszusätzen etc.
Schüttgut-Setzung		Berechnung der Schüttgut-Setzung aus dem Hausnorm-Test zum Eingang in die Planungsgrundlagen / Bauausführung / Entwicklungs- und Entsandungsmaßnahmen
k_f	Berechnung aus Siebliendarstellung nach div. Berechnungsmethoden z.B. k_f nach Hazen, Beyer etc.	<i>F&E-Vorhaben beantragt</i> Berechnung aus gemessener Oberfläche (Rotationsellipsoide) pro Volumeneinheit unter Berücksichtigung von Koeffizienten aus Kornform und Lagerungsdichte
Wendepunkt(e) ein- und mehrgipfelig Kornsummenkurven	Ermittlung aus Kornverteilungskurve (W 113, Bild 5) Nachteil: "fester" Wert zwischen 2 Sieben und Abhängigkeit von Anzahl der Siebe	wg. 30.000 Größenklassen: bestimmter Wendepunkt = realer Wendepunkt
Schüttgut für Brunnenbau	DVGW W 113 (2001) Bestimmung d_g aus $x_{c \min}$, keine Berücksichtigung von Kornform und Lagerungsart	<i>vorläufig</i> Anwendung W 113 mit x_{area} für d_g und Schüttgut qualitative Beachtung von Besonderheiten aus verfeinerter Klassenmessung, Formmessungen und Untersuchung Lagerungsdichte <i>F&E-Vorhaben beantragt</i> DVGW W 113 (Überarbeitung) Bestimmung d_g aus x_{area} unter Berücksichtigung von Koeffizienten aus Kornform und Lagerungsdichte

Siebanalyse versus Digitale Partikelmessung - Fortsetzung

	bisher	"neu" TU Berlin FG Ingenieurgeologie & IBB-Berlin
Ziel(e) - Brunnenbau -	Vermeidung von Sandführung	Betriebungssicherheit (konstruktive Berücksichtigung von Setzungsvorgängen, keine Sandführung, keine Kolmation, Verringerung der Alterungsgeschwindigkeit) bei optimaler Leistung in Abhängigkeit inhomogener Böden und unterschiedlicher Ausbaumaterialien

Wikipedia (07.2009)

Der Informationsumfang, der durch Siebanalysen erhalten wird, ist relativ gering.

Es kann keine genaue Aussage über die genaue Größe der gemessenen Partikel gemacht werden, sondern sie werden lediglich in einen Größenkorridor eingordnet, der durch zwei Siebgrößen bestimmt ist ("ein Partikel ist < Siebgröße x und > Siebgröße y").

Zusätzlich ist keine Aussage zu ebenfalls relevanten Eigenschaften wie Form oder Opazität der gemessenen Partikel möglich.

Geräte, die mit digitaler Bildverarbeitung messen, ermöglichen es, zusätzlich auch diese Informationen und noch weitere (Oberflächenbeschaffenheit, etc.) abzurufen.

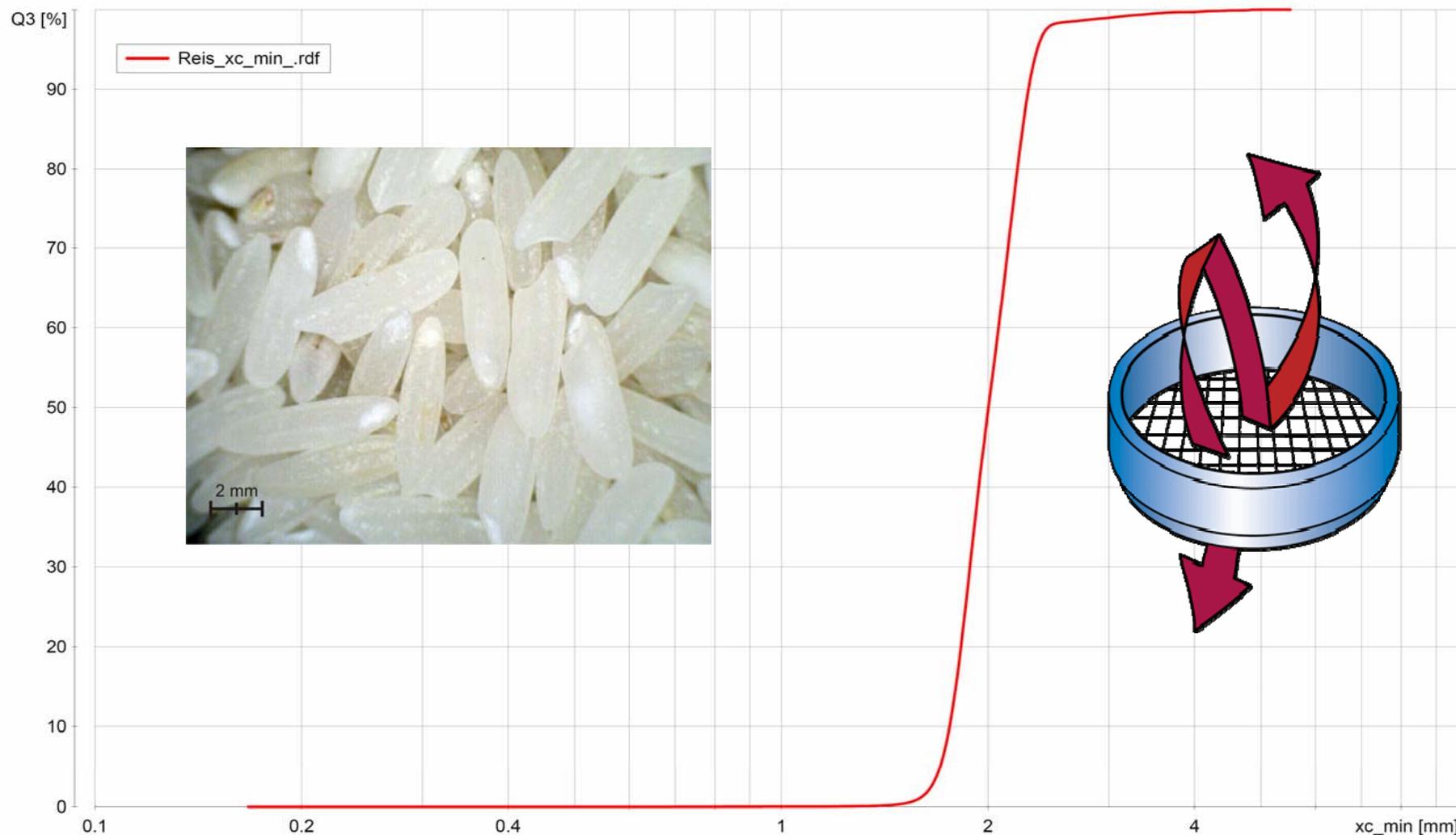
Die Ergebnisse können an die Siebanalyse angepasst werden, so dass jederzeit ein Vergleich zwischen den mittels unterschiedlicher Verfahren erlangten Messergebnissen möglich ist.

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

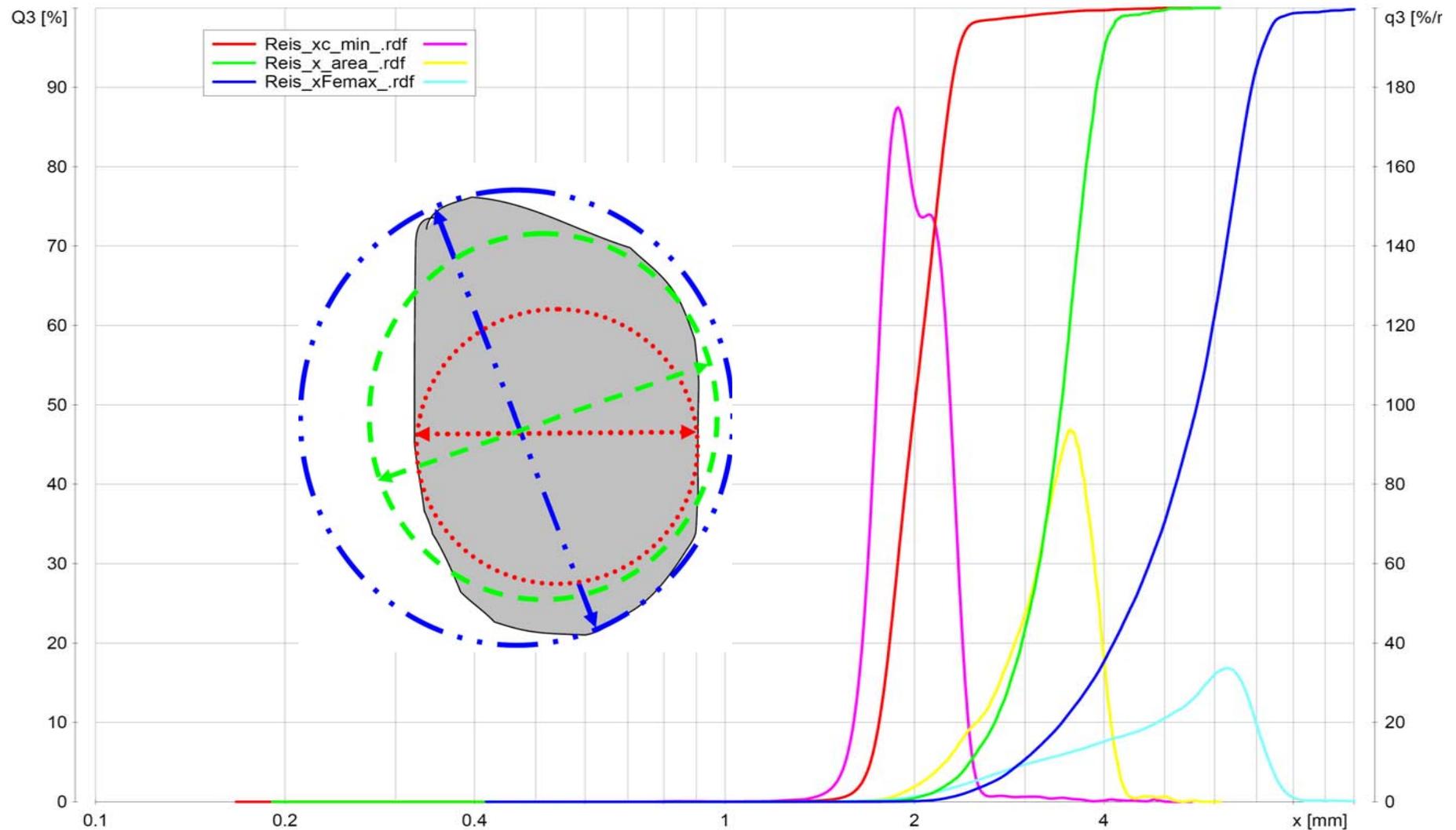
Fortsetzung 1

Korndurchmesser - Summenverteilung

Korndurchmesser - Dichteverteilung

Korndurchmesser-Messung als

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

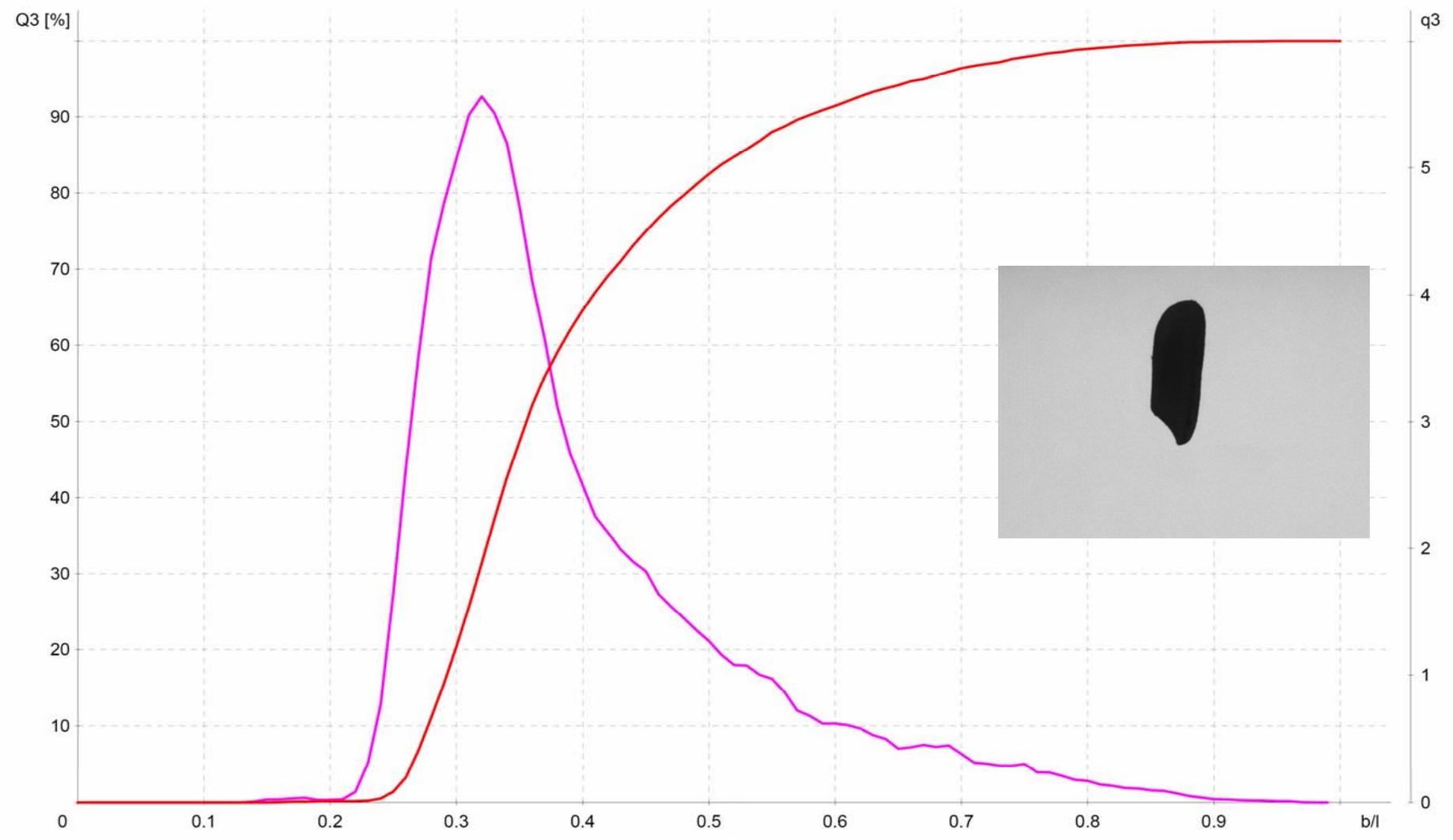


Beispiel 1

Fortsetzung 2

Breite zu Länge - Summenverteilung
Breite zu Länge - Dichteverteilung

Form-Vermessung
z.B. Breite zu Länge



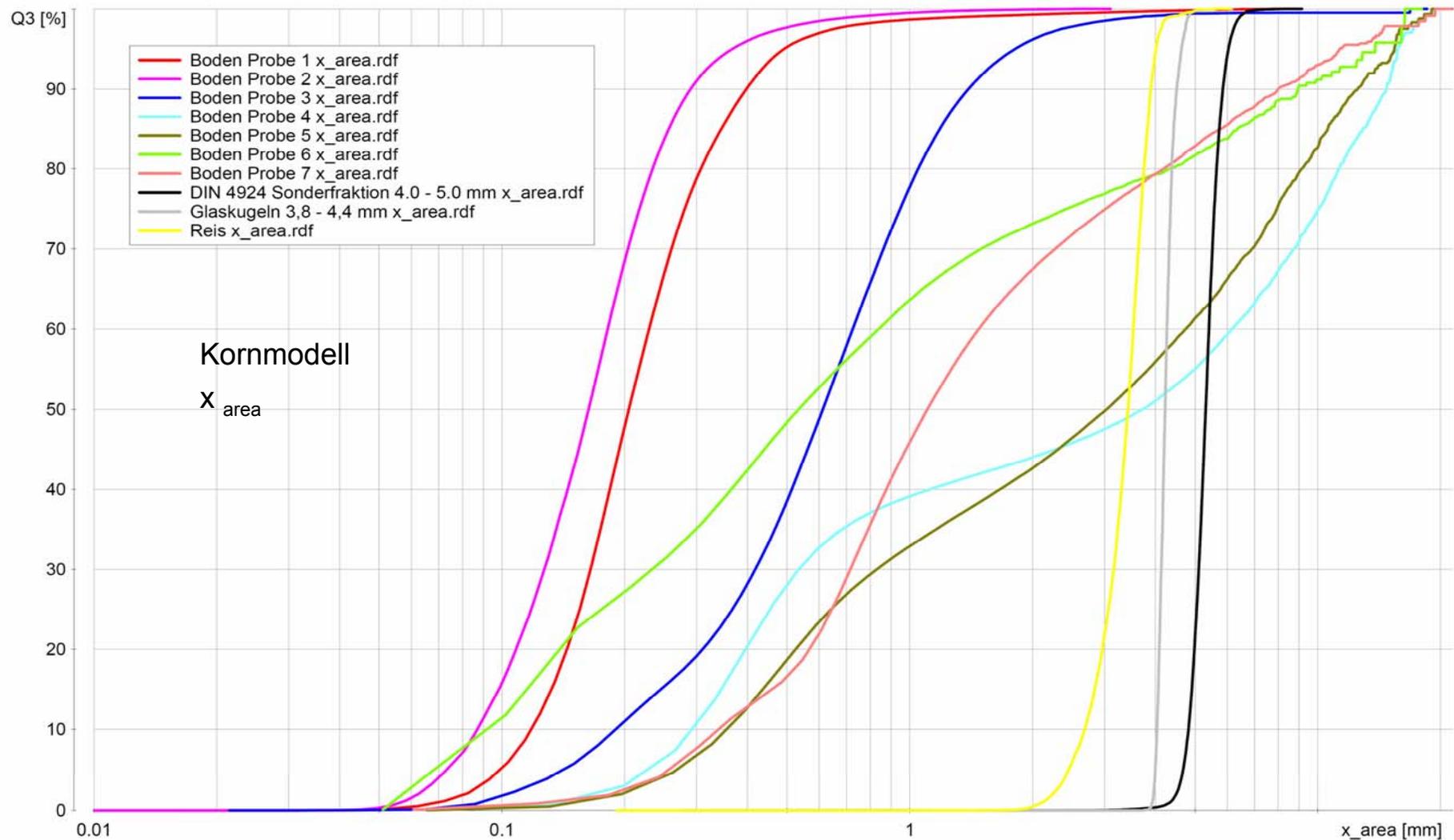
Beispiel 2

- ▶ 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

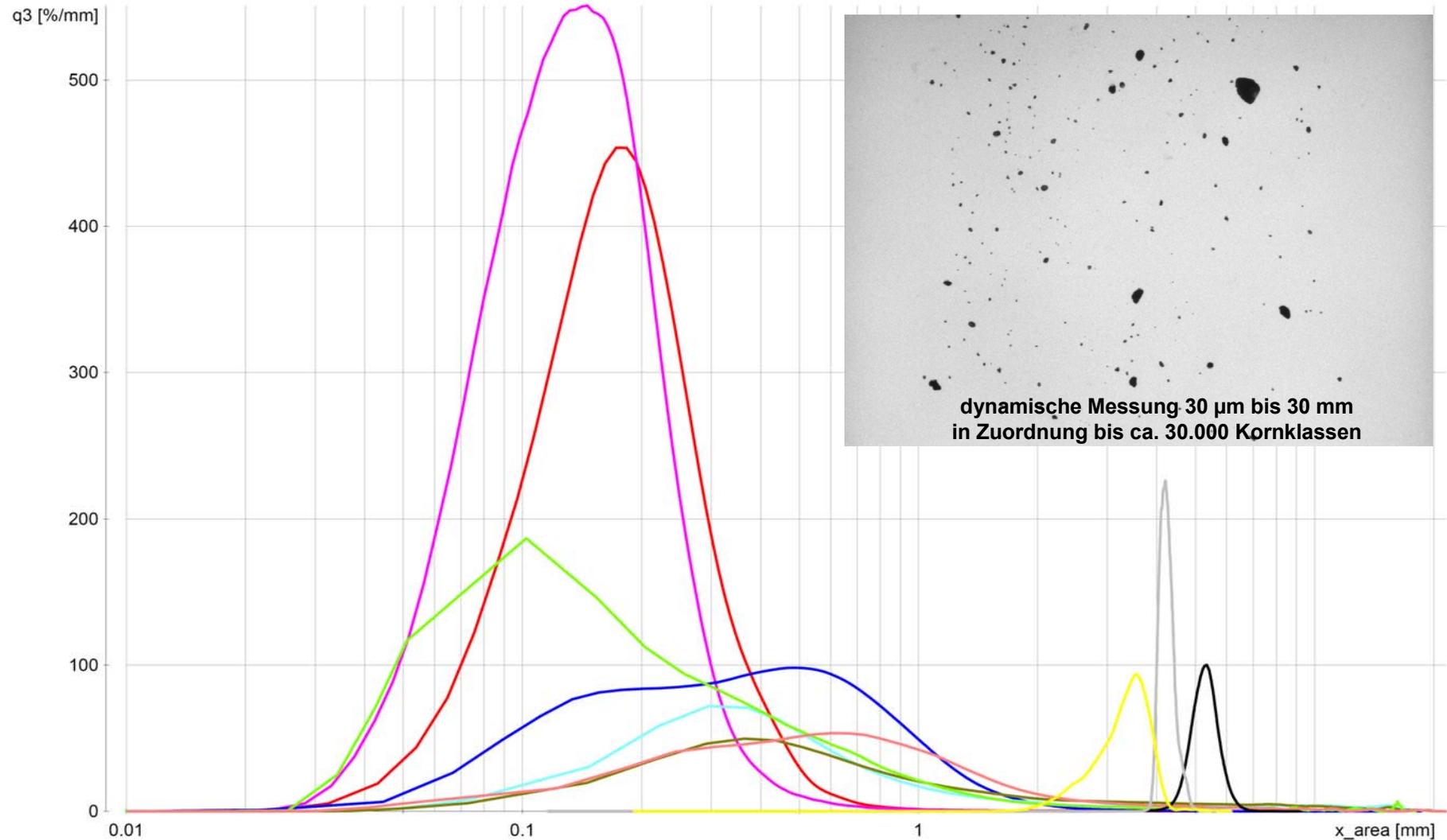
einfaches Ermitteln von $d_{gw 113}$

Schüttgüter

einfache Kontrolle D_s

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

Korndurchmesser - Dichteverteilung



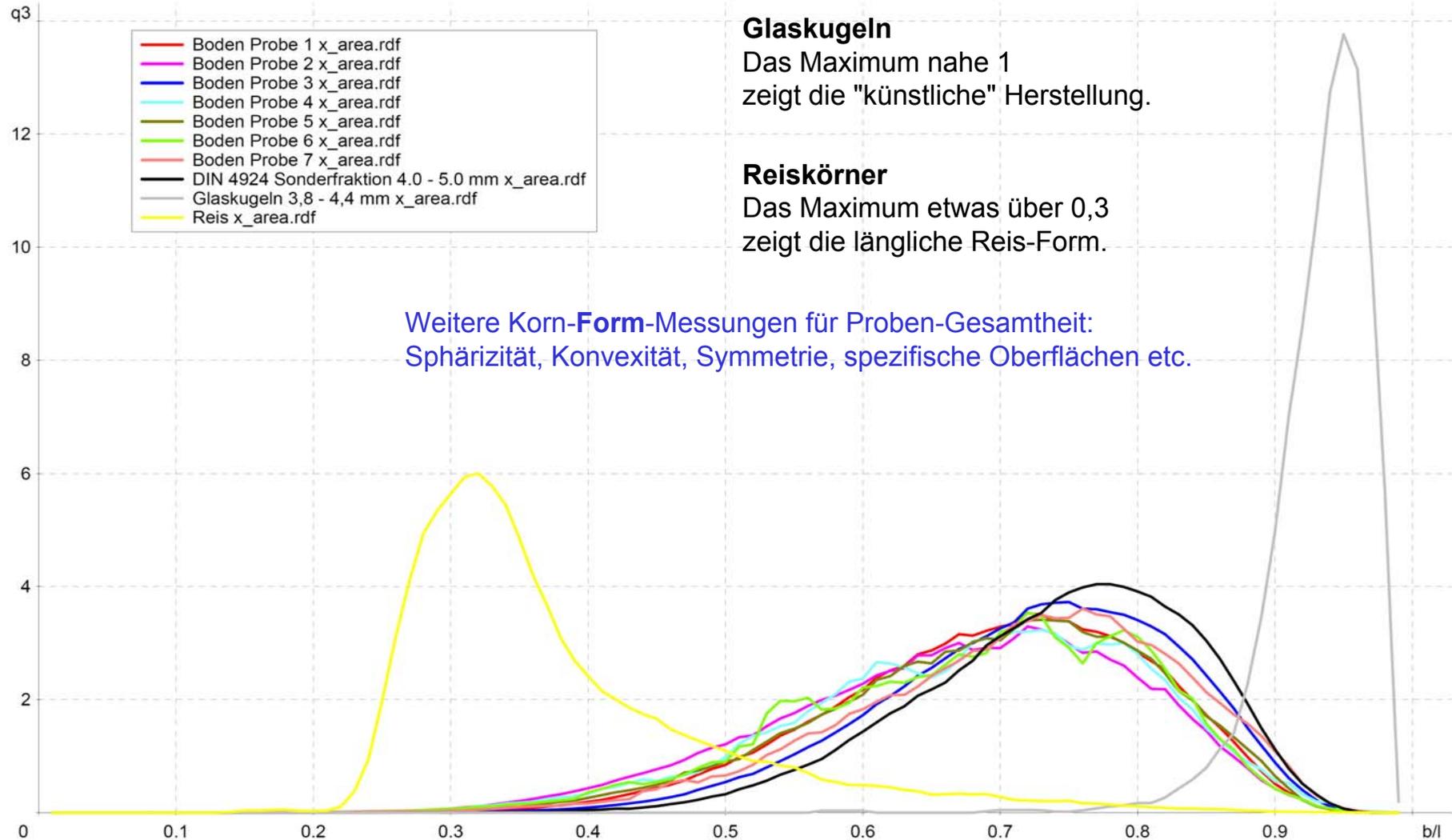
Beispiel 2

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

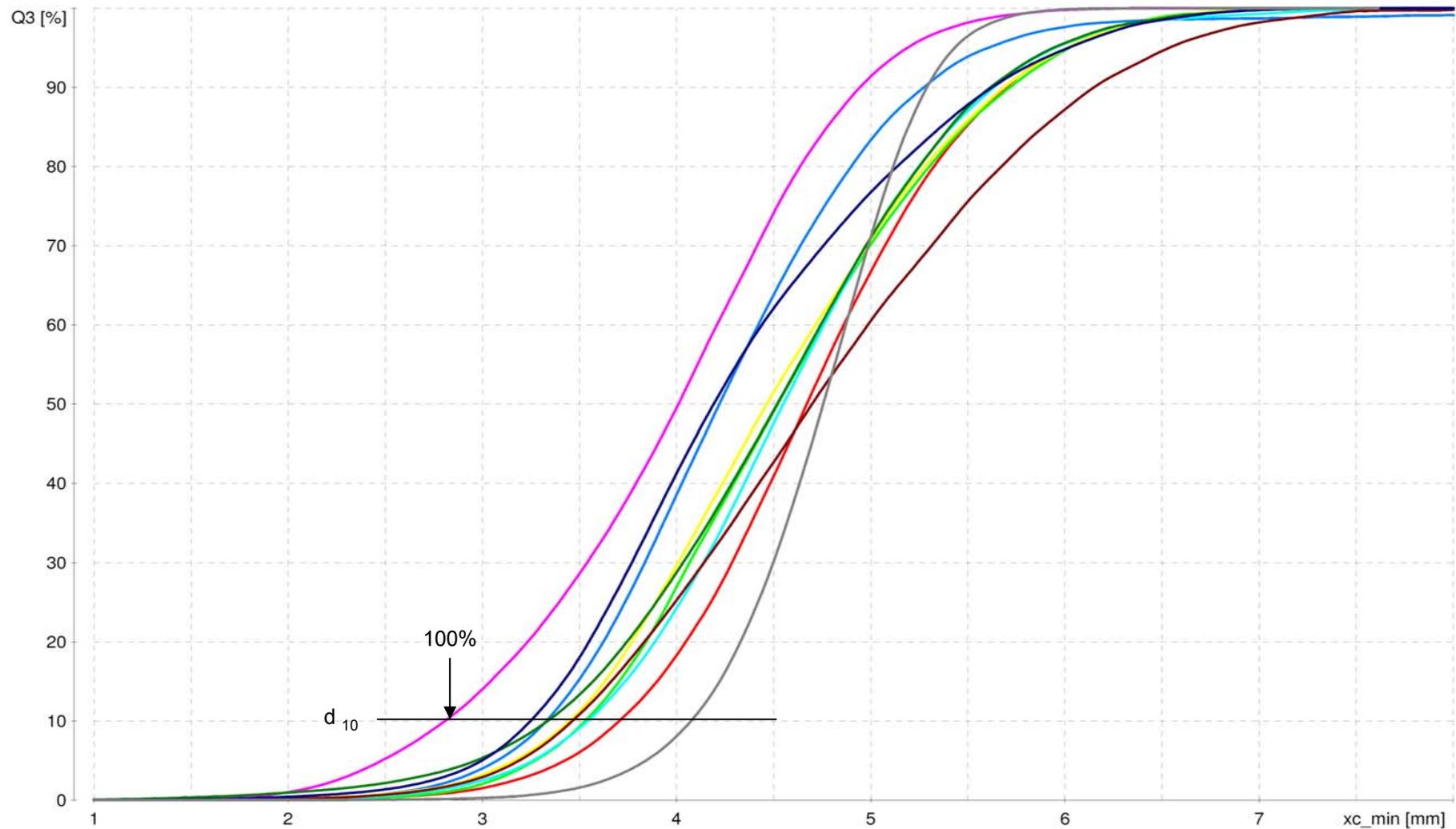
- ▶ DIN 4924 Kornklasse 3,15 – 5,6 mm
9 Lieferanten, anonymisiert
- ▶ Sonderfraktion 4,0 bis 5,0 mm
(GRAU)

$k_{f \text{ Beyer}}$

min = 100 % bis max = 175 %

bzw. Sonderfraktion = 210 %

Korndurchmesser - Summenverteilung



Beispiel 3 – Fortsetzung 1

Vergleich

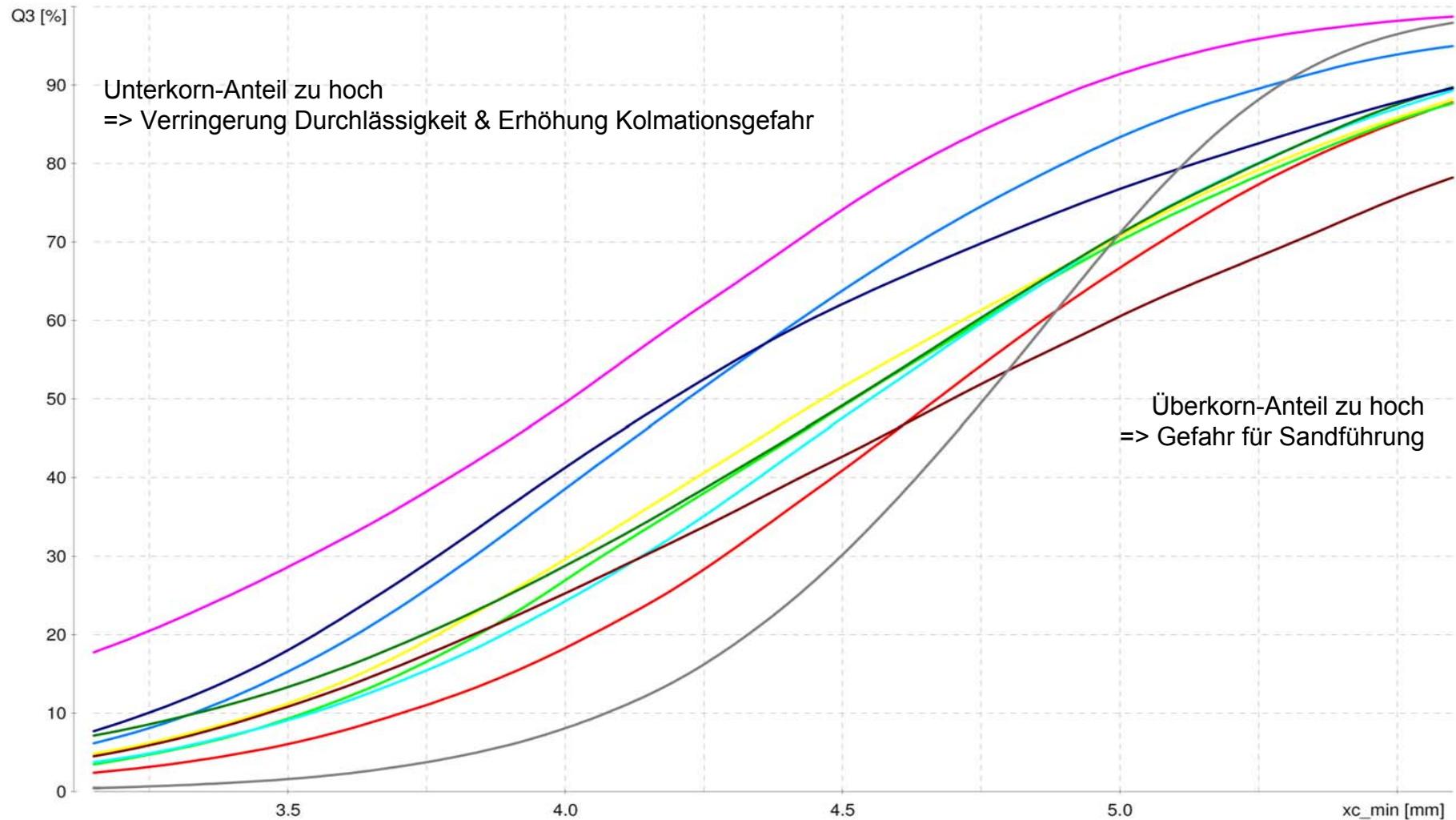
DIN 4924 Kornklasse 3,15 – 5,6 mm

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

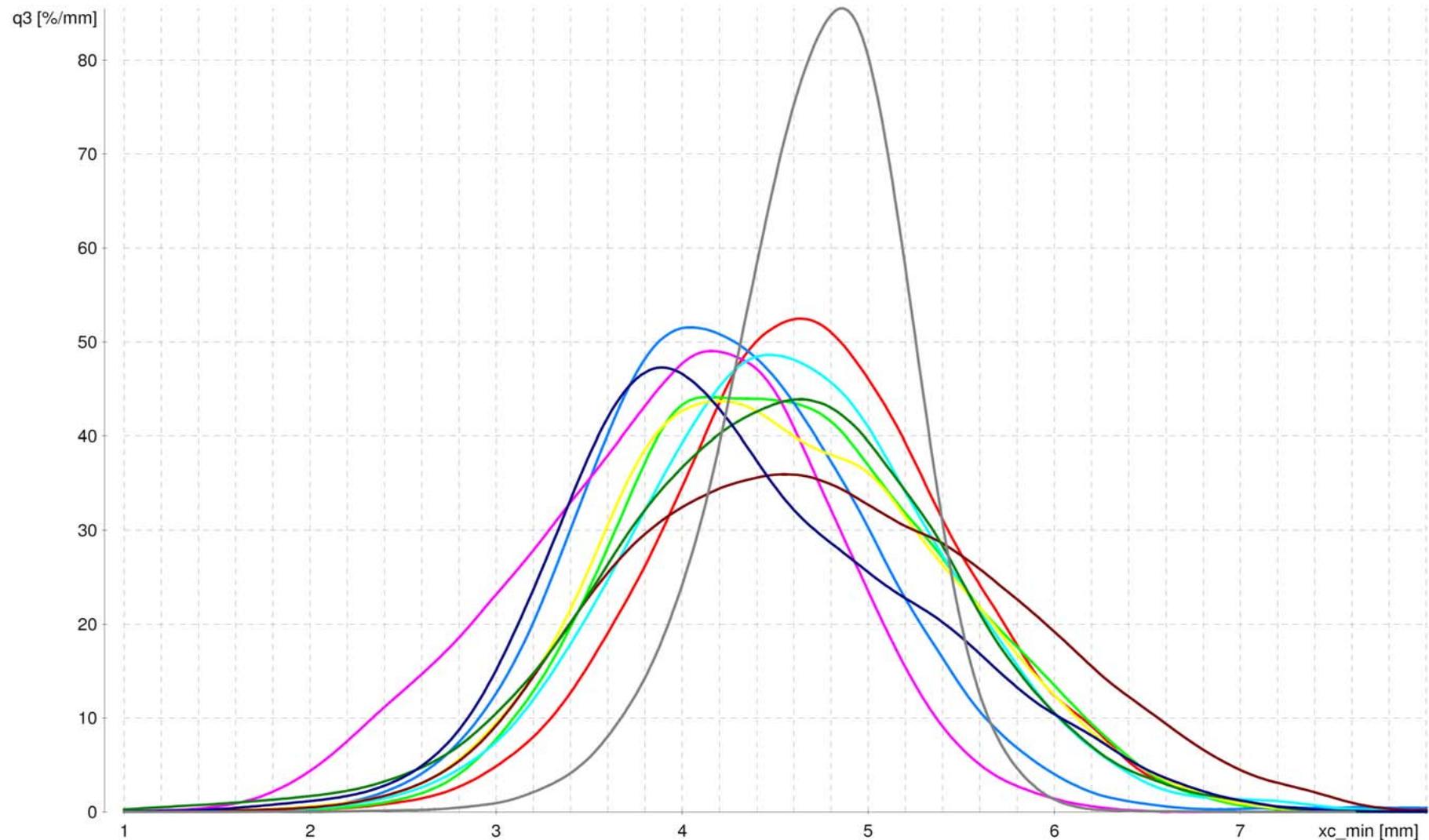
Sonderfraktion 4,0 bis 5,0 mm (GRAU)

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)

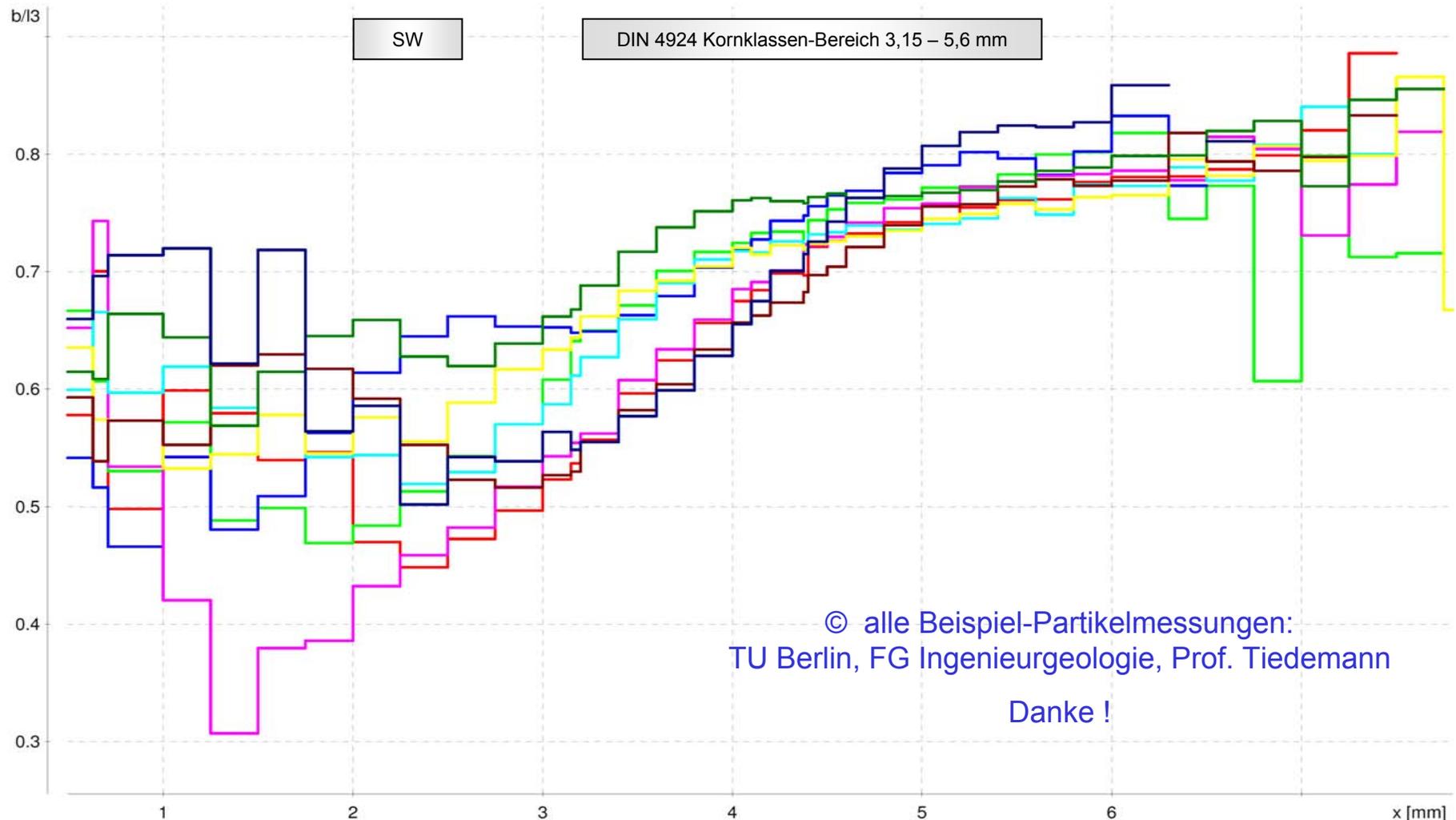
Breite zur Länge über Durchmesser klassenbezogene Verteilung

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:
TU Berlin, FG Ingenieurgeologie, Prof. Tiedemann

Danke !

Bedeutung der Filterkiesdimensionierung

Zusammenfassung / Ausblick

- **Digitale Partikelmessung für Böden und Schüttgüter**

- Korn**form** = Parameter für (innere) Kolmation und Durchfluß am Filterschlitz
 = Erkennung von Anomalien
 => Vermeidung von kostenintensiven Fehlern

Die Fehler-Folge-Kosten sind **signifikant höher als Kosten des erhöhten Meßaufwandes**

- **Optimierung Schüttgüter**

Sonderfraktionen Sande & Kiese und Glaskugeln => bessere Hydraulik als DIN 4924

- **Fehlerquellen**

„Angst“-Schüttung (= 1 Kornklasse kleiner) und „Umlagerung“ (= Setzung) des Schüttgutes
können die mögliche Brunnenleistung jeweils / zusammen halbieren
 => Sorgfalt bei allen Details (auch Bohrloch-Abweichung !)

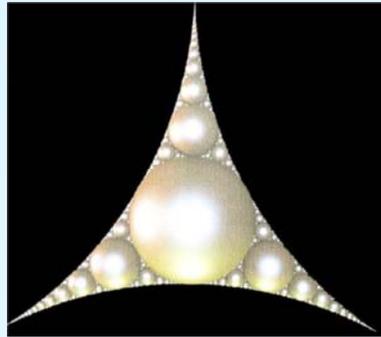
- **Praxis**

Zuerst umfassende quantitative Beschreibung für Böden und Schüttgüter
dann Reduzierung auf „begründeten“ (= Fehler-vermeidenden) Kompromiss

- **Ausblick**

- ▶ Wechsel Basis Kornmodell $x_{c \min} \rightarrow x_{\text{area}}$ + Berücksichtigung Lagerung / Umlagerung
 => Annäherung $Q_{\text{real}} \rightarrow Q_{\text{max}}$
- ▶ Fortschreibung Regelwerk & DIN

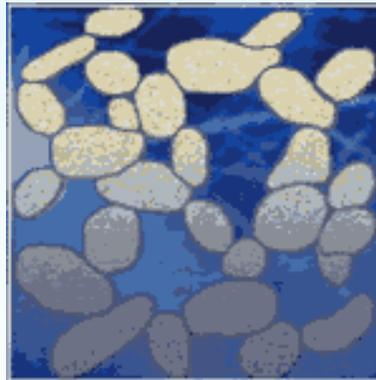
An TERZAGHI erinnern (... *Zahlenwerte statt Beschreibungen* ...) und an SCHNEIDER denken:



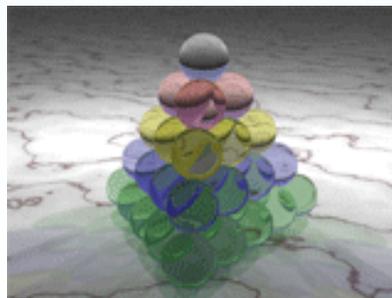
fraktale Kugelpackung
(nach Apollonius von Perge, ca. 200 v. Chr.)
= mehrfach gekrümmte Summenkurve mit mehreren Maxima

**Das Allerwichtigste für das Gelingen
eines Kiesschüttungsbrunnens
ist die richtige Wahl der Kieskörnung.**

Terzaghi & Peck (1948) 'Soil Mechanics in Engineering Practice'
Schneider (1988) 'Die Wassererschließung'



Partikel-Umlagerung



dichteste Kugelpackung
(nach Johannes Kepler 1571-1630)

***Vielen Dank
für Ihre
Aufmerksamkeit !***