

## Bedeutung der Filterkiesdimensionierung

**Keywords:** Korn-Größe, Korn-Form, Korn-Eigenschaften, Korn-Modelltheorie  $x_{c \min} / a_{era} / Fe_{max}$   
Korn-Lagerung, Korn-Porenanteil, Korn-Setzung  
Brunnenbau, Entsandung, Bohrlochabweichung, Sande und Kiese, Sonderfraktion, Glaskugeln  
Bodenuntersuchungen, Siebanalyse, digitale Partikelmessung, dynamische Bildanalyse

**Regeln & Normen** DIN 4924, DIN 18123, DIN 18124, DIN 18126, ISO 13322  
DIN EN 12904, DIN EN ISO 14688, DIN EN ISO 22475  
DVGW-Regelwerk W 110, W 113, W 115, W 118, W 119, W 123, W 124

### Zusammenfassung

Die korrekte, ggfls. teufendifferenzierte Abstimmung (Dimensionierung) von Schüttgütern auf den inhomogen anstehenden Boden, optimale hydraulische Eigenschaften des Ausbaumaterials (Schüttgut und Filterrohr) sowie der sorgfältige Brunnen(aus)bau sind die beeinflussbaren Faktoren für die tatsächliche Ergiebigkeit eines Brunnens.

Als Schüttgut für den Brunnenbau werden hauptsächlich Quarzsande und Quarzkiese nach DIN 4924 verwendet. Die Schüttgut-Produkte gemäß dieser Norm unterscheiden sich, auch zwischen Lieferchargen desselben Produktes, erheblich, so dass dem Brunnenbauer / Brunnenbetreiber im Sinne der Brunnen-Werterhaltung Voruntersuchungen zu den geometrisch-hydraulischen Eigenschaften und mechanisch-chemische Qualitätsvergleiche zu jedem Brunnen-Neubau nicht erspart bleiben; der Bezug aus der nicht-nächstgelegenen Abbaustätte oder auch die Bestellung von Sonderfraktionen ist häufig gerechtfertigt. Als weiteres Schüttgut werden seit ca. 2 Jahren Glaskugeln verwendet, deren hydraulische Vorteile, auch hinsichtlich der Brunnenalterungsgeschwindigkeit, offensichtlich sind und für die derzeit umfangreiche Kosten-Nutzen-Untersuchungen durchgeführt werden.

Die Lockergesteins-Untersuchung zur Schüttgutdimensionierung wurde bisher ausschließlich für die „Korngröße“ mittels Siebanalyse zur Erstellung der Kornsummenkurve durchgeführt. Als „neue“ Meßmethodik, teilweise und in unterschiedlichen Qualitäten nunmehr auch für die „Kornform“, wird seit einigen Jahren die digitale Partikelmessung in verschiedenen Varianten eingesetzt: Mikroskopie, Laserbeugung und dynamische Bildanalyse.

WIKIPEDIA führt zur Siebanalyse und digitalen Partikelmessung aus (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 einem Größenkorridor eingeordnet, 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 der Siebanalyse angepasst werden, so dass jederzeit ein Vergleich zwischen den mittels unterschiedlicher Verfahren erlangten Messergebnissen möglich ist.“

In umfangreichen Messreihen werden derzeit repräsentative Boden- und Schüttgut-Proben untersucht (TU Berlin FG Ingenieurgeologie in Kooperation mit IBB-Berlin) und Vorschläge zur Fortschreibung des Regelwerks und der DINormen sowie für die Praxisanwendung vorbereitet.

Entsprechend der bisherigen Erkenntnisse soll u.a. als Basis des bisherigen Kornmodells der „minimale Korn-durchmesser“ ( $x_{c \min}$ , Messung z.B. mit Siebanalyse) durch den „Durchmesser der projizierten Partikel-Fläche“ ( $x_{area}$ ; Messung z.B. mit dynamischer Bildanalyse) ersetzt werden. In die neuen Berechnungsansätze sollen außerdem Koeffizienten-Ergänzungen, nach Bedarf unterteilt in bis zu 30.000 Kornklassen, z.B. durch die Kornform-Parameter Breite/Länge (b/l), Sphärizität (SPHT, Konvexität (Conv) und Symmetrie (Symm), aber auch spezifische Oberflächen und der Porenanteil des Schüttgutes sowie dessen Setzungsverhalten eingehen.

Ziel der „neuen“ (Filterkies) Schüttgutdimensionierung ist es, eine brunnen(wert)erhaltende Betriebssicherheit zu erhalten, die eine optimale Brunnenergiebigkeit in Anpassung unterschiedlichen Ausbaumaterialien an inhomogene Böden ermöglicht. Die neuen Berechnungsansätze berücksichtigen konstruktiv Schüttgut-Setzungsvorgänge, die Vermeidung von Sandführung und Kolmation und sollen die leistungsmindernde Brunnen-Alderungsgeschwindigkeit verringern.

### Kontakt Daten des Autors

Dipl.-Ing. Kerry F. Paul  
/BB Ingenieur- und Beratungsbüro für Brunnenbetriebstechnik und –instandhaltung GmbH  
Am Pichelssee 12 • 13595 Berlin • Tel. 030 – 36 28 63 50 • Fax 03212 – 99 66 333 • Mobil 01577 – 45 31 936 • Mail kfp@ibb-berlin.de

# Brunnenbau: Schüttgut-Dimensionierung nach DVGW-Regelwerk 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

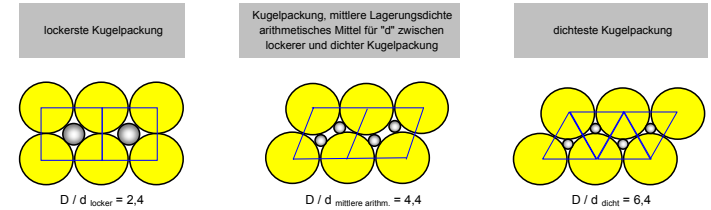
$$F_g = 5 + U \quad \text{mit } 1 < U < 5$$

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

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

  $D$  = Kugel-Durchmesser

  $d$  = größtmöglicher Durchmesser einer passierenden Kugel



## $d_{gW113}$ Bestimmung aus Kornsummenkurve und Dichteverteilung

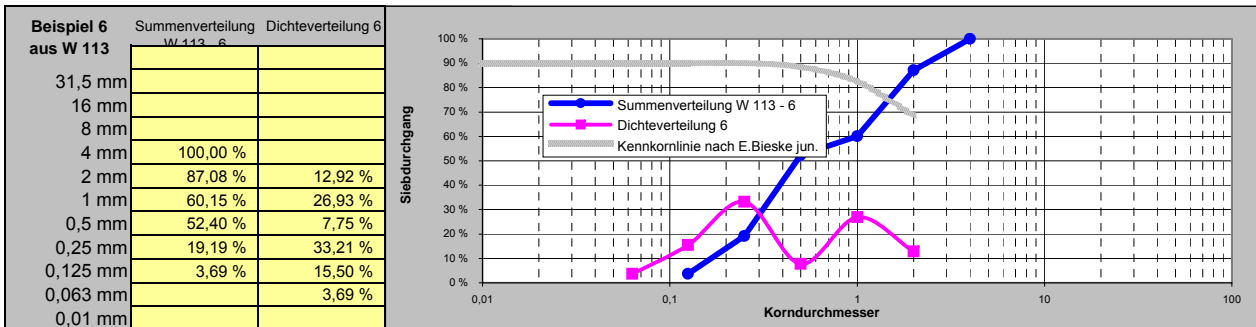
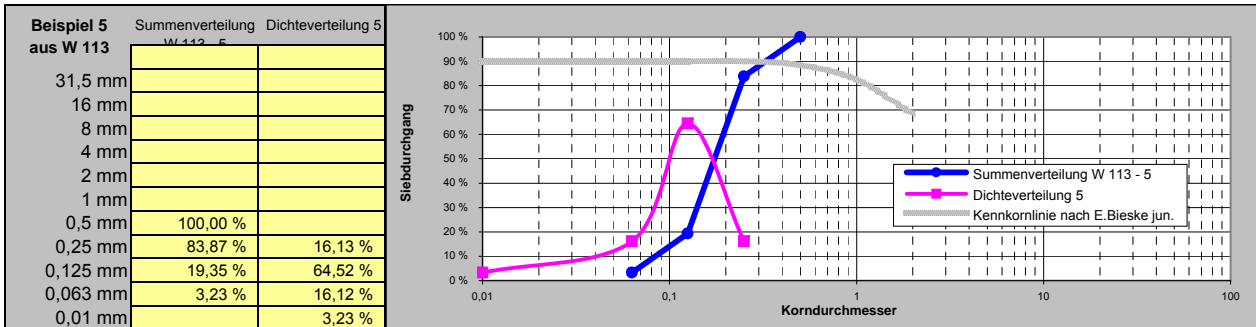
Mittelwert des Maximums der Dichteverteilung und des nächstgrößeren Korndurchmessers

einfach gekrümmte Summenkurve mit eindeutigem Maximum der Dichteverteilung

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

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

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

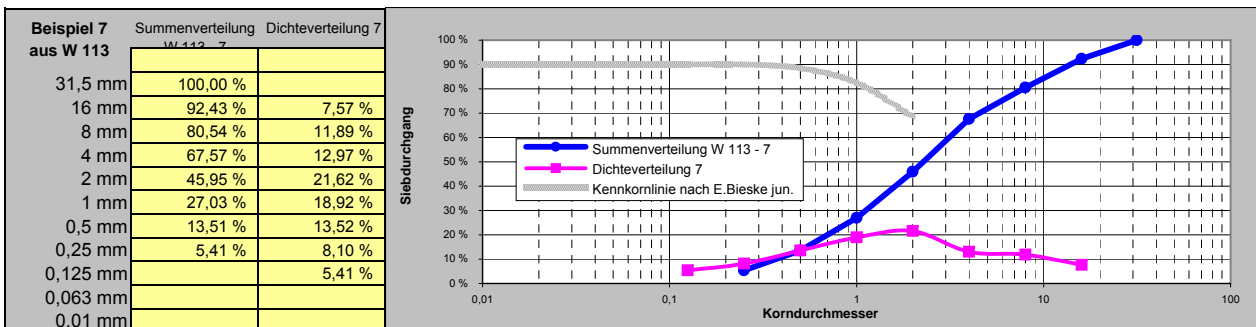


doppelt gekrümmte Summenkurve mit zwei Maxima der Dichteverteilung

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

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

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



Summenkurve ohne eindeutiges Maximum der Dichteverteilung

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

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

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

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

## Vorteil DVGW MB W 113

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

## bei Fortschreibung W 113 beachten

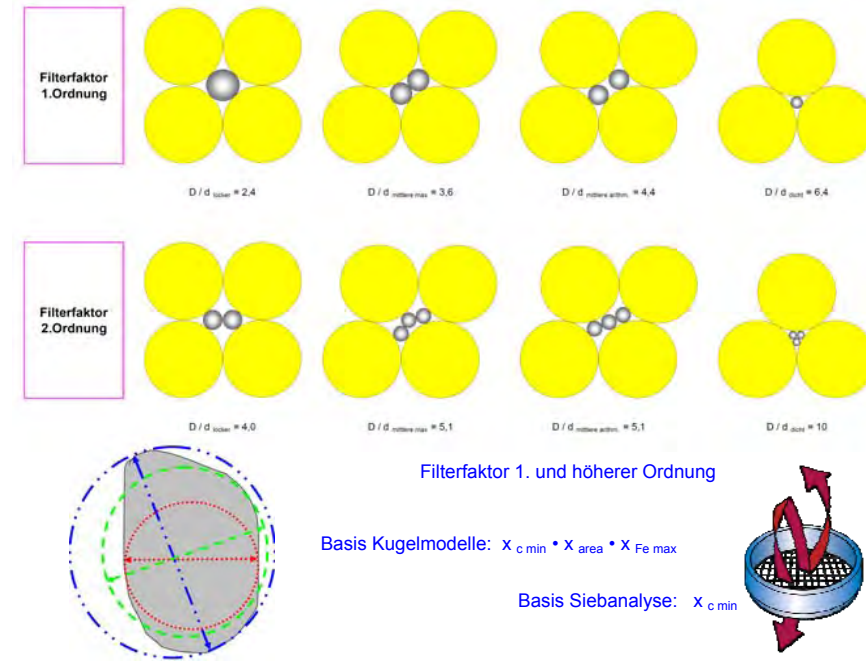
- ▶ Unterscheidung der Berechnungen für Sande und Kiese nach DIN 4924, Sonderfraktionen, Glaskugeln
- ▶ Berücksichtigung Filterfaktoren höherer Ordnung
- ▶ Berücksichtigung Einbaubedingungen, Lagerung & Umlagerung
- ▶ Definition Schüttgüter-Fraktionen mit engeren Abstufungen der Kornklassen-Breite um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

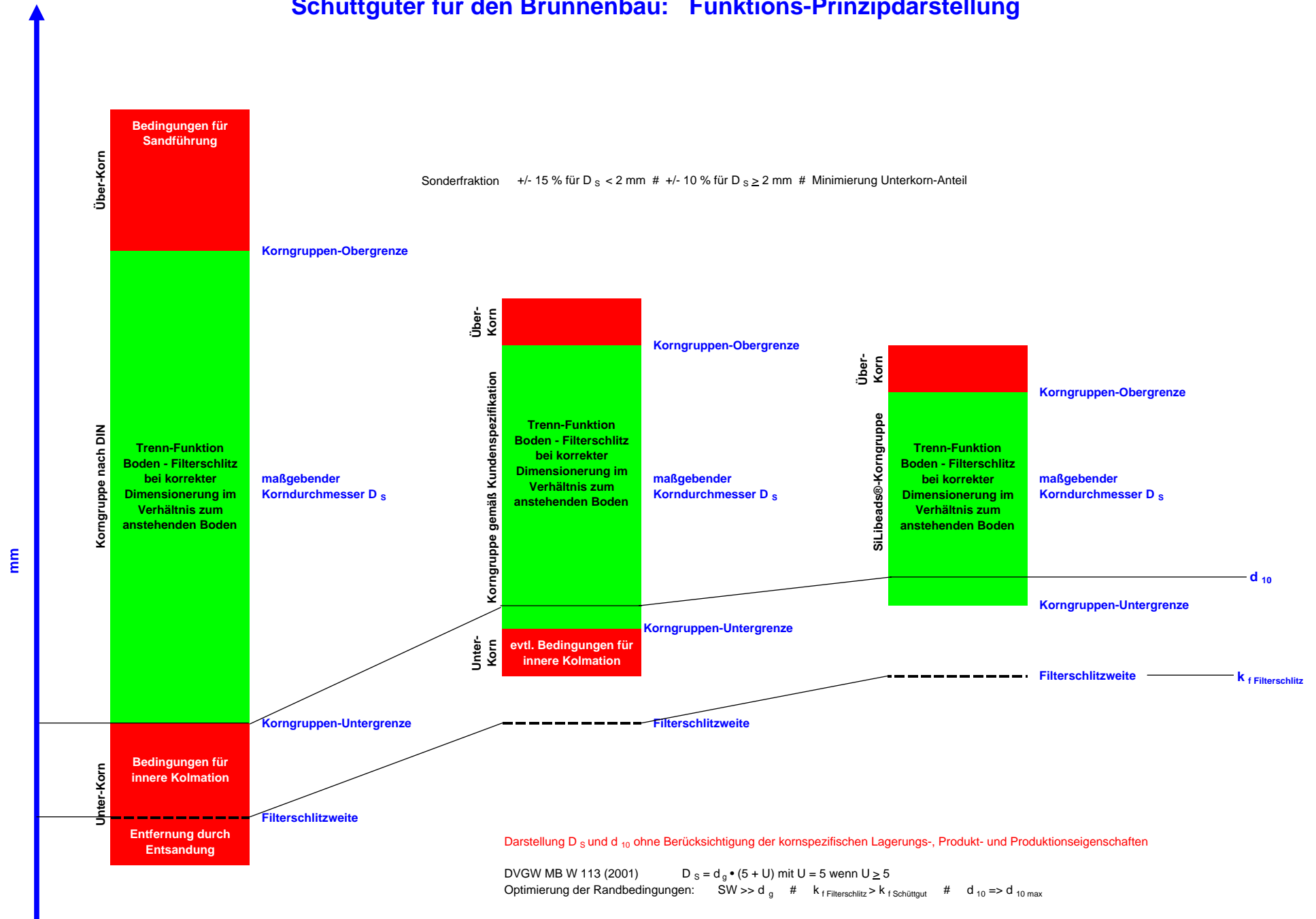


© JBB-Berlin, 2009

## "Zahlen" - Beispiele zur Kugel-Modelltheorie

	1 Kugel			(Kugeln in) Würfel mit Kantenlänge 1,0 m = 1 m <sup>3</sup>						locker → dicht
	10,0 mm	1,0 mm	0,1 mm	10,0 mm	1,0 mm	0,1 mm	10,0 mm	1,0 mm	0,1 mm	
<b>Kugel-Durchmesser</b> <b>Kugel-Lagerungsart</b>				lockerste Kugelpackung			dichteste Kugelpackung			
<b>Anzahl Kugeln</b> (auch: Anzahl Porenräume)	1			1.000.000 1/m <sup>3</sup> 1,00 E+06 1/m <sup>3</sup> 1 Million pro m <sup>3</sup>	1.000.000.000 1/m <sup>3</sup> 1,00 E+09 1/m <sup>3</sup> 1 Milliarde pro m <sup>3</sup>	1.000.000.000.000 1/m <sup>3</sup> 1,00 E+12 1/m <sup>3</sup> 1 Billion pro m <sup>3</sup>	1.414.214 1/m <sup>3</sup> 1,41 E+06 1/m <sup>3</sup>	1.414.213.562 1/m <sup>3</sup> 1,41 E+09 1/m <sup>3</sup>	1.414.213.562.373 1/m <sup>3</sup> 1,41 E+12 1/m <sup>3</sup>	+ 41,4 %
<b>Gewicht</b> $\rho = 2.650 \text{ kg/m}^3$	1,3875 g 1,39 E+00 kg	0,00138750 g 1,39 E-06 kg	0,00000138750 g 1,39 E-06 kg	1.387,5 kg/m <sup>3</sup>			1.962,2 kg/m <sup>3</sup>			+ 41,4 %
<b>Oberfläche Kreis</b> (= Fläche Kugel-Durchmesser bzw. senkrechter Ebenenschnitt)	0,0000785 m <sup>2</sup> 7,85 E-05 m <sup>2</sup>	0,000000785 m <sup>2</sup> 7,85 E-07 m <sup>2</sup>	0,00000000785 m <sup>2</sup> 7,85 E-09 m <sup>2</sup>	0,7854 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	0,7854 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	0,7854 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	0,9069 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	0,9069 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	0,9069 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	+ 15,5 % - 56,6%
<b>Oberfläche Kugel</b> (glatt, ohne Rauigkeit)	0,000314 m <sup>2</sup> 3,14 E-04 m <sup>2</sup>	0,00000314 m <sup>2</sup> 3,14 E-06 m <sup>2</sup>	0,0000000314 m <sup>2</sup> 3,14 E-08 m <sup>2</sup>	314,2 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> 3,14 E+02 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> 0,04 Fußballfelder / m <sup>3</sup>	3.141,6 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> 3,14 E+03 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> 0,44 Fußballfelder / m <sup>3</sup>	31.415,9 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> 3,14 E+04 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> 4,40 Fußballfelder / m <sup>3</sup>	444,3 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> 4,44 E+02 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> 0,06 Fußballfelder / m <sup>3</sup>	4.442,9 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> 4,44 E+03 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> 0,62 Fußballfelder / m <sup>3</sup>	44.428,9 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> 4,44 E+04 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> 6,22 Fußballfelder / m <sup>3</sup>	+ 41,4 %
<b>Volumen</b>	0,000000524 m <sup>3</sup> 5,24 E-07 m <sup>3</sup>	0,00000000524 m <sup>3</sup> 5,24 E-10 m <sup>3</sup>	0,00000000000524 m <sup>3</sup> 5,24 E-13 m <sup>3</sup>	0,5236 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0,5236 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0,5236 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0,7405 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0,7405 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0,7405 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	+ 41,4 % - 45,5 %
<b>Porenfläche</b> (senkrechter Ebenenschnitt)	<b>1 Porenraum</b>			0,00002146 m <sup>2</sup> 2,15 E-05 m <sup>2</sup>	0,0000002146 m <sup>2</sup> 2,15 E-07 m <sup>2</sup>	0,000000002146 m <sup>2</sup> 2,15 E-09 m <sup>2</sup>	0,000004031 m <sup>2</sup> 4,03 E-06 m <sup>2</sup>	0,00000004031 m <sup>2</sup> 4,03 E-08 m <sup>2</sup>	0,0000000004031 m <sup>2</sup> 4,03 E-10 m <sup>2</sup>	+ 41,4 %
<b>Volumen</b>	<b>1 Porenraum</b>			0,000000476 m <sup>3</sup> 4,76 E-07 m <sup>3</sup>	0,00000000476 m <sup>3</sup> 4,76 E-10 m <sup>3</sup>	0,00000000000476 m <sup>3</sup> 4,76 E-13 m <sup>3</sup>	0,0000000918 m <sup>3</sup> 9,18 E-08 m <sup>3</sup>	0,000000000918 m <sup>3</sup> 9,18 E-11 m <sup>3</sup>	0,00000000000918 m <sup>3</sup> 9,18 E-14 m <sup>3</sup>	- 45,5 %
<b>waagerechte Porenkanäle</b> (senkrechter Ebenenschnitt)				10.000 1/m <sup>2</sup>	1.000.000 1/m <sup>2</sup>	100.000.000 1/m <sup>2</sup>	23.094 1/m <sup>2</sup>	2.309.401 1/m <sup>2</sup>	230.940.108 1/m <sup>2</sup>	+ 130,9 %

# Schüttgüter für den Brunnenbau: Funktions-Prinzipdarstellung



Darstellung  $D_s$  und  $d_{10}$  ohne Berücksichtigung der kornspezifischen Lagerungs-, Produkt- und Produktionseigenschaften

DVGW MB W 113 (2001)  $D_s = d_g \cdot (5 + U)$  mit  $U = 5$  wenn  $U \geq 5$   
 Optimierung der Randbedingungen:  $SW \gg d_g$  #  $k_{f \text{ Filterschlitz}} > k_{f \text{ Schüttgut}}$  #  $d_{10} \Rightarrow d_{10 \text{ max}}$

$D_s$  = erforderlicher/maßgebender Durchmesser des Schüttgutes (real = Produkt-unterschiedlich)  $k_f$  = Durchlässigkeitsbeiwert #  $k_{f \text{ Beyer}} = C \cdot d_{10}^2$   
 $d_g$  = maßgebender Durchmesser des Bodens (teufendifferenziert)  $U$  = Ungleichkörnigkeitszahl  
 $d_{10}$  = Korndurchmesser bei 10%-Gewichtsdurchgang der Kornsummenkurve  $C$  = Konstante in Abhängigkeit  $U$   
 $SW$  = Filterschlitzweite mit Weitenmaß-abhängigem  $k_f$

# Brunnenbau: "Angst"-Schüttung

DIN 4924	
Korngruppe (mm)	
0,4	0,8
0,71	1,25
1	2
2	3,15
3,15	5,6
5,6	8
8	16

d <sub>10</sub>	K <sub>f Beyer</sub>	Kreuzvergleich k <sub>f Beyer</sub> ohne Unterkorn Durchlässigkeit "Angst-Schüttung" (Auswahl 1 Korngruppe kleiner als berechnet)	
		ohne Unterkorn / ohne Überkorn	
0,44 mm	2,13 E-03 m/s		33 %
0,76 mm	6,42 E-03 m/s	48 %	100 %
1,10 mm	1,33 E-02 m/s	100 %	27 %
2,12 mm	4,92 E-02 m/s		100 %
3,40 mm	1,27 E-01 m/s	34 %	100 %
5,84 mm	3,75 E-01 m/s	100 %	44 %
8,80 mm	8,52 E-01 m/s		100 %

d <sub>10</sub>	K <sub>f Beyer</sub>	Kreuzvergleich k <sub>f Beyer</sub> mit Unterkorn Durchlässigkeit "Angst-Schüttung" (Auswahl 1 Korngruppe kleiner als berechnet)	
		mit 10% Unterkorn / ohne Überkorn	
0,40 mm	1,76 E-03 m/s		32 %
0,71 mm	5,55 E-03 m/s	50 %	100 %
1,00 mm	1,10 E-02 m/s	100 %	25 %
2,00 mm	4,40 E-02 m/s		100 %
3,15 mm	1,09 E-01 m/s	32 %	100 %
5,60 mm	3,45 E-01 m/s	100 %	49 %
8,00 mm	7,04 E-01 m/s		100 %

Verbesserung Durchlässigkeit mit → ohne Unterkorn
+ 21,0 %
+ 15,8 %
+ 21,0 %
+ 11,8 %
+ 16,2 %
+ 8,8 %
+ 21,0 %

DIN 4924	
Korngruppe (mm)	
0,4	0,8
0,71	1,25
1	2
2	3,15
3,15	5,6
5,6	8
8	16

D <sub>s</sub>	Kugelmodell Durchmesser Porenfläche bei lockerster Kugel-Lagerung	Kreuzvergleich bei lockerster Lagerung Durchmesser Porenfläche "Angst-Schüttung" (Auswahl 1 Korngruppe kleiner als berechnet)	
		ohne Unterkorn / ohne Überkorn Gleichverteilung	
0,60 mm	0,25 mm		61 %
0,98 mm	0,41 mm	65 %	100 %
1,50 mm	0,63 mm	100 %	58 %
2,58 mm	1,07 mm		100 %
4,38 mm	1,82 mm	64 %	100 %
6,80 mm	2,83 mm	100 %	57 %
12,00 mm	5,00 mm		100 %

Kugelmodell: D / d = 2,4

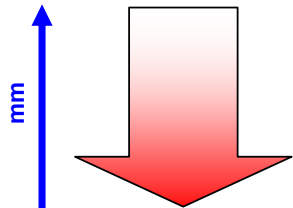
D <sub>s</sub>	Kugelmodell Durchmesser Porenfläche bei dichtester Kugel-Lagerung	Kreuzvergleich bei dichtester Lagerung Durchmesser Porenfläche "Angst-Schüttung" (Auswahl 1 Korngruppe kleiner als berechnet)	
		ohne Unterkorn / ohne Überkorn Gleichverteilung	
0,60 mm	0,09 mm		61 %
0,98 mm	0,15 mm	65 %	100 %
1,50 mm	0,23 mm	100 %	58 %
2,58 mm	0,40 mm		100 %
4,38 mm	0,68 mm	64 %	100 %
6,80 mm	1,06 mm	100 %	57 %
12,00 mm	1,88 mm		100 %

Kugelmodell: D / d = 6,4

Veränderung Durchmesser Porenfläche locker → dicht
- 62,5 %
- 62,5 %
- 62,5 %
- 62,5 %
- 62,5 %
- 62,5 %
- 62,5 %

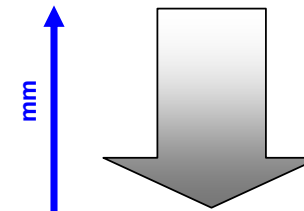
## Bedeutung

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



"Angst"-Schüttung  
1 Korngruppe kleiner

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



Filterschlitz kleiner als  
Empfehlung W 118

- ▶ Probleme analog "Angst"-Schüttung

Rohdichte Sande & Kiese: ca. 2.650 kg/m<sup>3</sup>  
 Sande & Kiese - lockere Lagerung, getrocknet: ca. 1.400 kg/m<sup>3</sup>  
 Sande & Kiese - dichte Lagerung, getrocknet: ca. 1.600 kg/m<sup>3</sup>  
 Rohdichte Glaskugeln: ca. 2.500 kg/m<sup>3</sup>  
 Glaskugeln, lockere Lagerung, ca. 1.475 kg/m<sup>3</sup>  
 Glaskugeln, dichte Lagerung: ca. 1.550 kg/m<sup>3</sup>

# Brunnenausbau mit unterschiedlichen Schüttgütern: Menge und Kosten

Schüttgut-Kosten pro Tonne <small>(Hersteller-Angaben; Basis 2009; Fraktions-abhängig; ohne Nebenkosten für Verpackung &amp; Transport; ohne Sonderaufschläge oder Rabatte; ohne MWSt.)</small>	Material	Spanne	Durchschnitt
	DIN 4924	50 - 100 €	75 €
	Sonderfraktion	100 - 200 €	150 €
	Glaskugeln	545 - 995 €	770 €

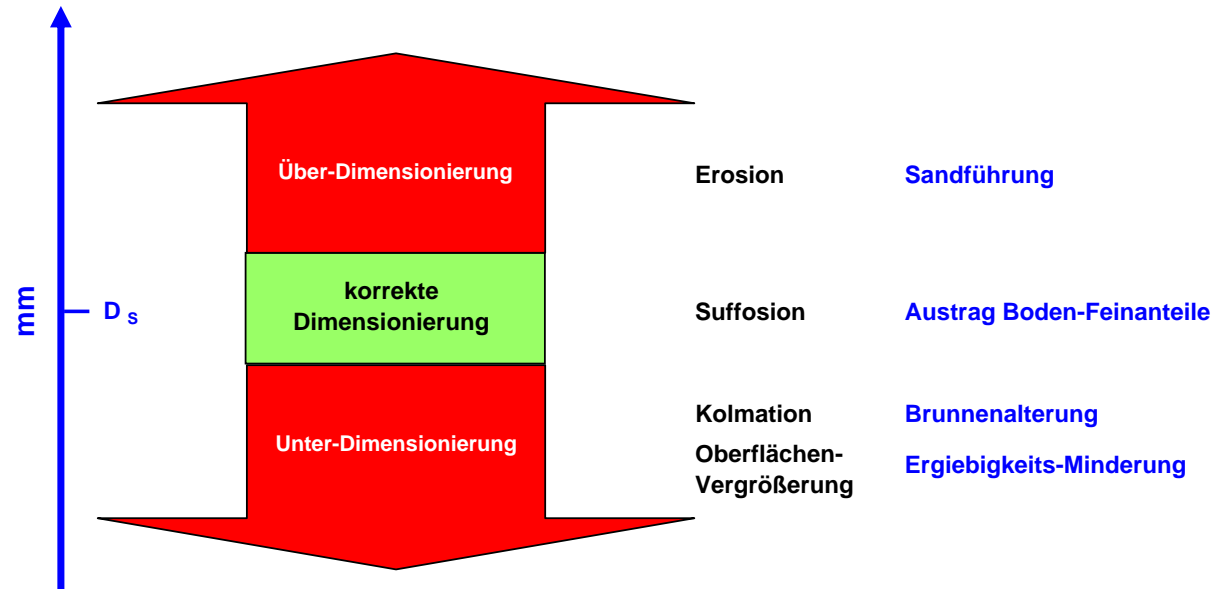
Durchmesser		Schüttgut-Schichtstärke	Dichte Schüttgut	Schüttmenge pro Meter
Filter	Bohrloch			
300 mm	500 mm	100 mm	1.500,0 kg/m <sup>3</sup>	188 kg/m
	600 mm	150 mm		318 kg/m
	850 mm	275 mm		745 kg/m
	1.000 mm	350 mm		1.072 kg/m
	1.200 mm	450 mm		1.590 kg/m
400 mm	600 mm	100 mm	1.500,0 kg/m <sup>3</sup>	236 kg/m
	850 mm	225 mm		663 kg/m
	1.000 mm	300 mm		990 kg/m
	1.200 mm	400 mm		1.508 kg/m
	1.600 mm	600 mm		2.827 kg/m
500 mm	850 mm	175 mm	1.500,0 kg/m <sup>3</sup>	557 kg/m
	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	15 m	25 m	50 m	100 m
DIN 4924	14 €	141 €	212 €	353 €	707 €	1.414 €
Sonderfraktion	28 €	283 €	424 €	707 €	1.414 €	2.827 €
Glaskugeln	145 €	1.451 €	2.177 €	3.629 €	7.257 €	14.514 €
DIN 4924	24 €	239 €	358 €	596 €	1.193 €	2.386 €
Sonderfraktion	48 €	477 €	716 €	1.193 €	2.386 €	4.771 €
Glaskugeln	245 €	2.449 €	3.674 €	6.123 €	12.246 €	24.493 €
DIN 4924	56 €	559 €	838 €	1.397 €	2.794 €	5.589 €
Sonderfraktion	112 €	1.118 €	1.677 €	2.794 €	5.589 €	11.177 €
Glaskugeln	574 €	5.738 €	8.606 €	14.344 €	28.688 €	57.376 €
DIN 4924	80 €	804 €	1.206 €	2.010 €	4.020 €	8.041 €
Sonderfraktion	161 €	1.608 €	2.412 €	4.020 €	8.041 €	16.081 €
Glaskugeln	825 €	8.255 €	12.382 €	20.637 €	41.275 €	82.549 €
DIN 4924	119 €	1.193 €	1.789 €	2.982 €	5.964 €	11.928 €
Sonderfraktion	239 €	2.386 €	3.578 €	5.964 €	11.928 €	23.857 €
Glaskugeln	1.225 €	12.246 €	18.370 €	30.616 €	61.232 €	122.463 €
DIN 4924	18 €	177 €	265 €	442 €	884 €	1.767 €
Sonderfraktion	35 €	353 €	530 €	884 €	1.767 €	3.534 €
Glaskugeln	181 €	1.814 €	2.721 €	4.536 €	9.071 €	18.143 €
DIN 4924	50 €	497 €	746 €	1.243 €	2.485 €	4.970 €
Sonderfraktion	99 €	994 €	1.491 €	2.485 €	4.970 €	9.940 €
Glaskugeln	510 €	5.103 €	7.654 €	12.757 €	25.513 €	51.026 €
DIN 4924	74 €	742 €	1.113 €	1.856 €	3.711 €	7.422 €
Sonderfraktion	148 €	1.484 €	2.227 €	3.711 €	7.422 €	14.844 €
Glaskugeln	762 €	7.620 €	11.430 €	19.050 €	38.100 €	76.200 €
DIN 4924	113 €	1.131 €	1.696 €	2.827 €	5.655 €	11.310 €
Sonderfraktion	226 €	2.262 €	3.393 €	5.655 €	11.310 €	22.620 €
Glaskugeln	1.161 €	11.611 €	17.417 €	29.028 €	58.057 €	116.114 €
DIN 4924	212 €	2.121 €	3.181 €	5.301 €	10.603 €	21.206 €
Sonderfraktion	424 €	4.241 €	6.362 €	10.603 €	21.206 €	42.412 €
Glaskugeln	2.177 €	21.771 €	32.657 €	54.428 €	108.856 €	217.713 €
DIN 4924	42 €	417 €	626 €	1.044 €	2.087 €	4.175 €
Sonderfraktion	83 €	835 €	1.252 €	2.087 €	4.175 €	8.350 €
Glaskugeln	429 €	4.286 €	6.429 €	10.716 €	21.431 €	42.862 €
DIN 4924	66 €	663 €	994 €	1.657 €	3.313 €	6.627 €
Sonderfraktion	133 €	1.325 €	1.988 €	3.313 €	6.627 €	13.254 €
Glaskugeln	680 €	6.804 €	10.205 €	17.009 €	34.018 €	68.035 €
DIN 4924	105 €	1.051 €	1.577 €	2.629 €	5.257 €	10.515 €
Sonderfraktion	210 €	2.103 €	3.154 €	5.257 €	10.515 €	21.029 €
Glaskugeln	1.079 €	10.795 €	16.192 €	26.987 €	53.975 €	107.949 €
DIN 4924	204 €	2.041 €	3.062 €	5.103 €	10.205 €	20.411 €
Sonderfraktion	408 €	4.082 €	6.123 €	10.205 €	20.411 €	40.821 €
Glaskugeln	2.095 €	20.955 €	31.432 €	52.387 €	104.774 €	209.549 €

"bessere" Schüttgüter: => 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 für den Brunnenbau

$D_s$  = erforderlicher /  
maßgebender  
Schüttkorn-Durchmesser  
  
in Abhängigkeit von  $d_g$   
= maßgebender Boden-  
Korndurchmesser



## Bedeutung Fehl-Dimensionierung

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

## Gründe der Fehl-Dimensionierung

### Probennahme

- ▶ Probengüte gemäß DIN 22475 Teil 1 zu niedrig gewählt
- ▶ Schichten-übergreifend /-vermischend

### Labor

- ▶ zu geringe Probenmenge
- ▶ ungeeignete Abtrennung von Probenanteilen
- ▶ ungeeignete Messtechnik; Ausführungsfehler

### Auswertung / Planung

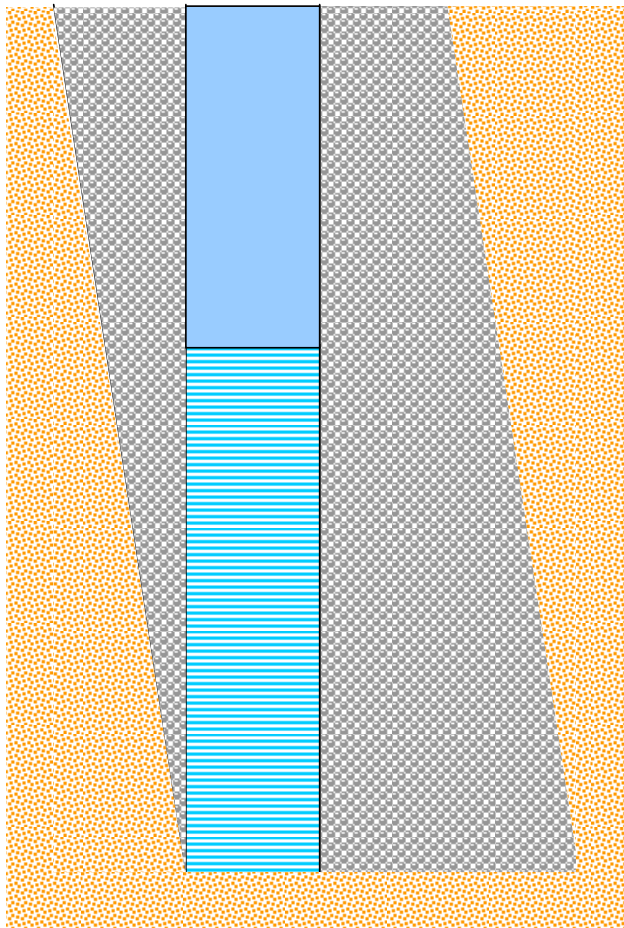
- ▶ Angst
- ▶ falsche Methodik
- ▶ keine Berücksichtigung Schüttkorn-Setzungsverhalten

### Bau

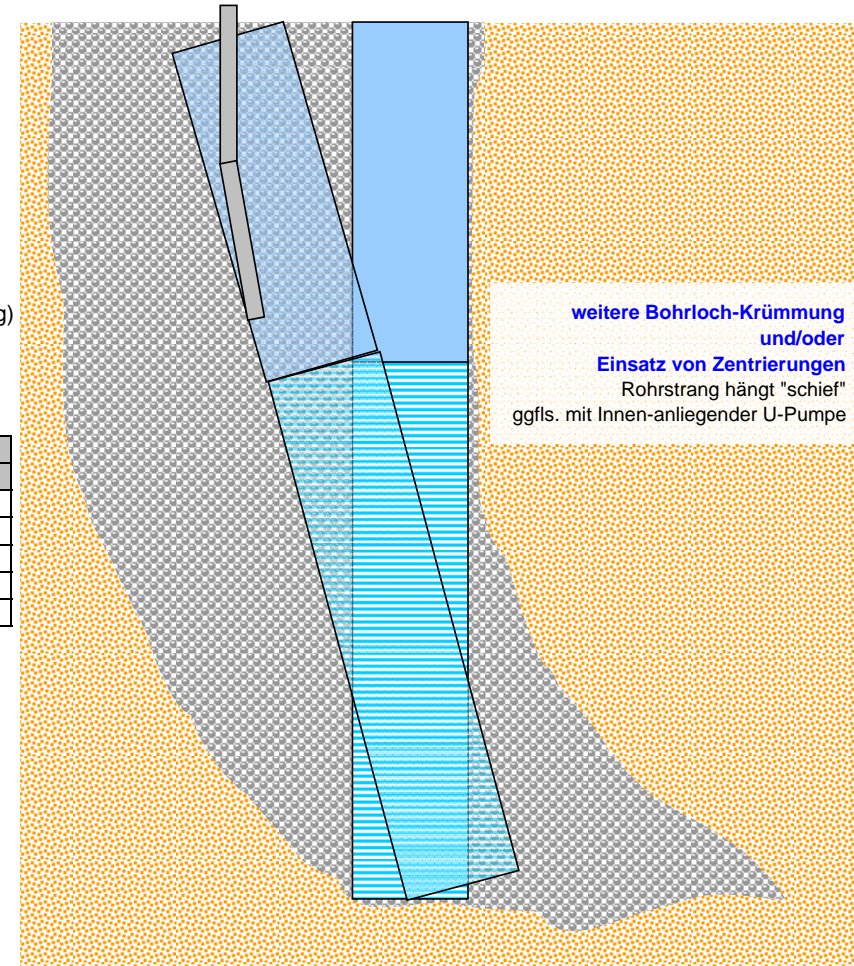
- ▶ nicht Schichten-angepasst / nicht teufendifferenziert
- ▶ geometr.-chem.-mechan. Schüttkorn-Produkteigenschaften
- ▶ fehlerbehaftete Kompromisse & fehlerhafte Umsetzung der Planung
- ▶ "Erfahrung"

# Bohrloch-Abweichung aus der Lotrechten

## "schräger Bohrloch-Verlauf"



## "gekrümmter Bohrloch-Verlauf"



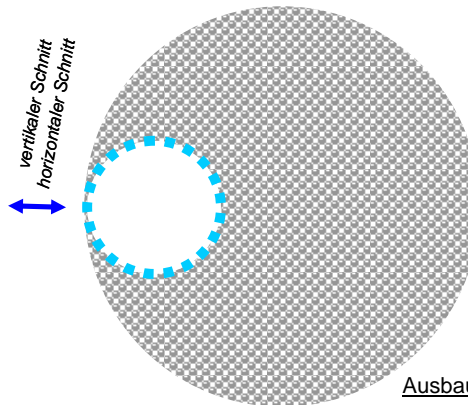
**resultierende Probleme** Sandführung  
Entsorgungsfähigkeit  
Betriebsfähigkeit  
Regenerierfähigkeit  
Ringraumabdichtung  
ungleichmäßige Setzung

**geophysikalische Kontrollmessungen**  
Bohrlochabweichung  
selektives Gammalog  
Ringraumscanner  
Kamera (ohne Zentrierung)

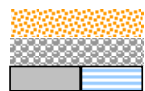
**"Reichweite" Entsandungsverfahren (gerader Verlauf)**  
(DVGW W 55/99, Vers. 1) max. Schichtstärke 150 mm

			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



Relevanz unterschätzt, häufig  
Ausbauzeichnung zeigt zentrischen Rohreinbau und impliziert rotations-symmetrisches Strömungsverhalten


 Boden  
Bohrloch mit Schüttgut  
Rohrstrang mit Aufsatz- und Filterrohr

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

### 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."

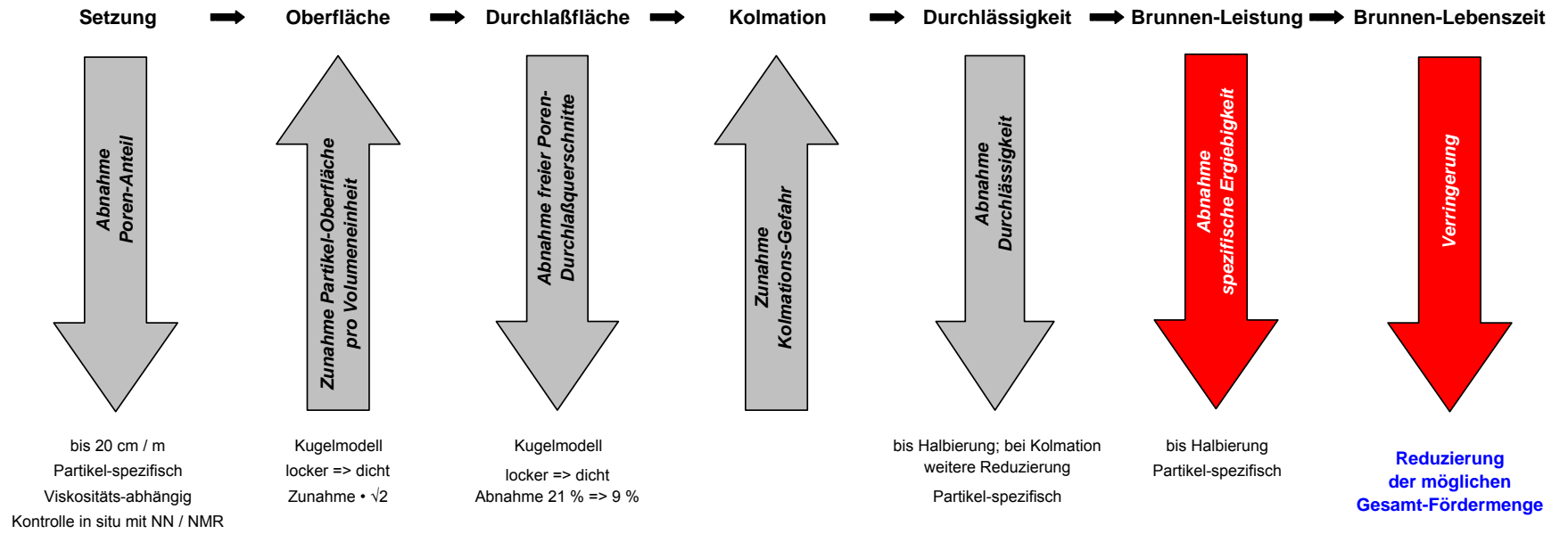
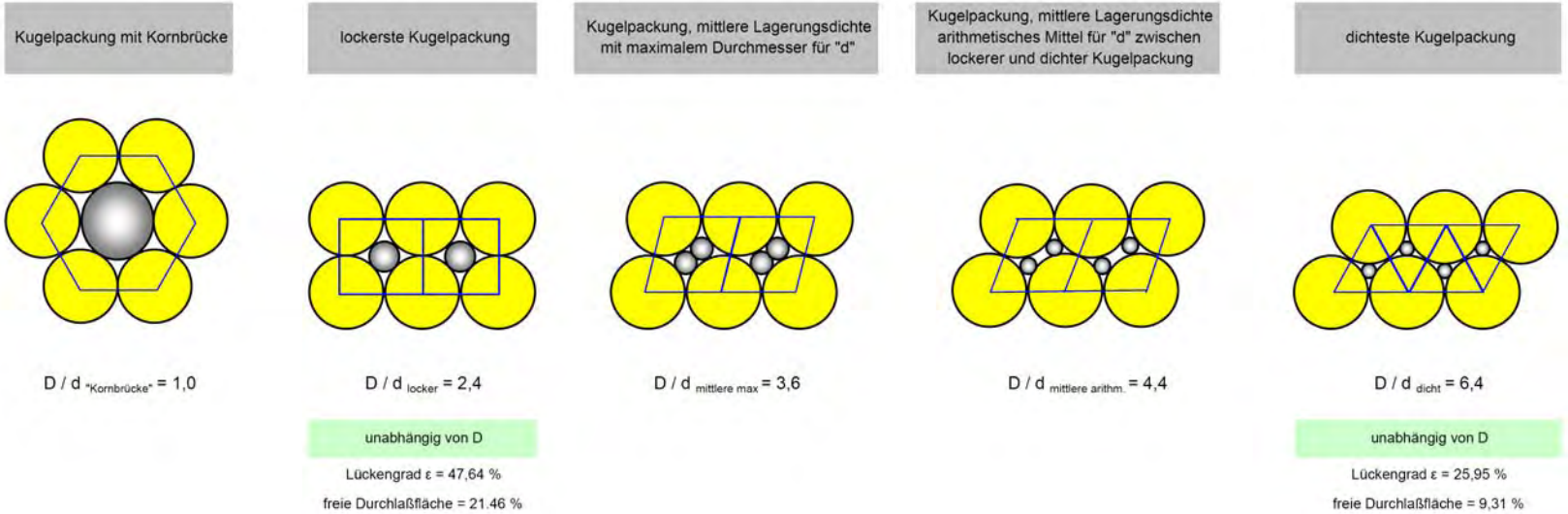
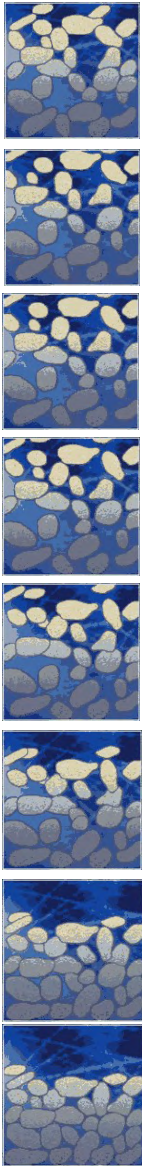
### DVGW-Regelwerk

### 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 Ausbaurohrung und somit eine optimale Füllung des Ringraumes mit Schüttgütern gewährleistet ist."



# Partikel - (Um) Lagerung



Kugelmodell = vereinfachte Darstellung; real abhängig vom Grad der Inhomogenität  
diverse zusätzliche Problemstellungen durch Partikel-Umlagerung, z.B.: Ringraumabdichtung, Hohlräume, Regenerierfähigkeit

Quelle:  
www.sand-abc.de

© IBB-Berlin, 2009

## Bedeutung "Umlagerung"

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



**bestehende Brunnen:  
Brunnen-Neubau:**

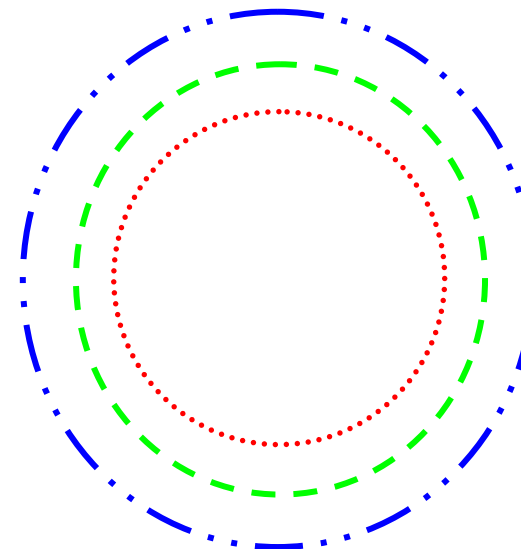
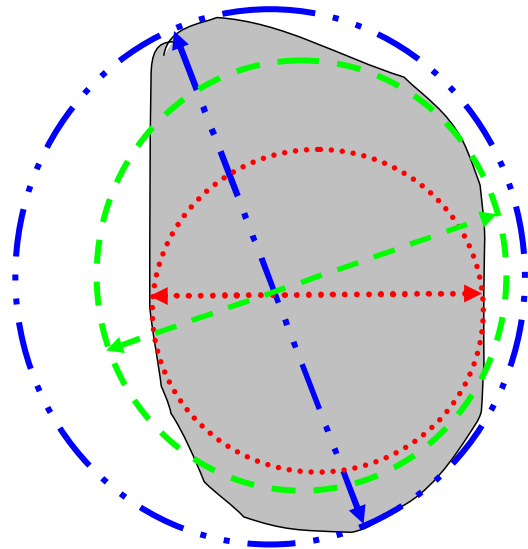
**Setzungs-herbeiführende Maßnahmen vermeiden  
systematische Untersuchungen erforderlich = F&E**

# Siebanalyse und digitale Partikelmessung

Messung der Partikel-Größe

Durchmesser für hydro- und ingenieurgeologische Berechnungen

© /BB-Berlin, 2009



**Messverfahren**

**Bezeichnung**

**Durchmesser-Ermittlung**



Digitale Partikelmessung

$X_{Fe\ max}$  Länge

Partikeldurchmesser bestimmt aus dem längsten Feret-Durchmesser aller gemessenen Feret-Durchmesser eines Partikels



Digitale Partikelmessung

$X_{area}$  Fläche

Partikeldurchmesser berechnet aus der Flächenmessung der Partikelprojektion



Siebanalyse / Digitale Partikelmessung

$X_{c\ min}$  Breite

Partikeldurchmesser bestimmt aus der kleinsten aller maximalen Sehnen eines Partikels

mit digitaler Partikelmessung / dynamischer Bildanalyse weitere Messungen, z.B. Breite/Länge, Sphärizität, Symmetrie, Konvexität, Anzahl, Oberfläche, Volumen etc.

**b/l** Breite/Länge # Verhältnis  $x_{c\ min}$  (Breite) zu  $x_{Fe\ max}$  (Länge) #  $b/l = 1$  => Kreis #  $b/l = 0,8$  => 1,25-fache Partikellänge #  $b/l = 0,666$  => 1,5-fache Partikellänge #  $b/l = 0,5$  => doppelte Partikellänge #  $b/l = 0,333$  => 3-fache Partikellänge

**SPHT** Sphärizität # gemessene Partikel-Fläche im Verhältnis zur Fläche eines Kreises mit dem Umfang des gemessenen Partikels # Quadrat: SPHT = 0,78 # gleichseitiges Dreieck: SPHT = 0,60

**Symm** Symmetrie # Abstand des Flächenschwerpunktes zum Partikelrand Angabe als minimaler Wert einer gemessenen Anzahl #  $Symm = 1$  => Kreis; für asymmetrische Partikel ist  $Symm < 1$  # liegt das Zentrum der Fläche außerhalb des Partikels, dann ist  $Symm < 0,5$

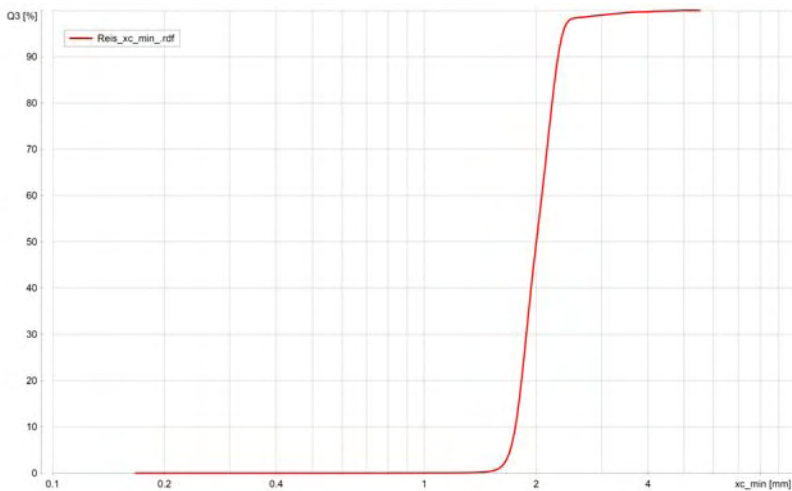
**Conv** Konvexität # (Quadratwurzel-) Verhältnis der realen zur konvexen Partikelfläche # „als würde man ein Gummiband um das Partikel legen und die Fläche messen, die innerhalb des Gummibandes liegt“ #  $Conv = 1$  => Kreis #  $Conv < 1$  => „Eindellungen“ am Partikel-Flächenrand

**Brunnenbau: Dimensionierung des erforderlichen Schüttgutes in Abhängigkeit vom anstehenden Boden  
Siebanalyse - digitale Partikelmessung # Korndichte und Lagerungsart**

© IBB-Berlin, 2009

	bisher	"neu" TU Berlin FG Ingenieurgeologie & IBB-Berlin
<b>Kugelmodell als Grundlage für Berechnungen</b>	Partikel-Breite = Partikeldurchmesser bestimmt aus der kleinsten aller maximalen Sehnen eines Partikels	Partikel-Fläche = Partikeldurchmesser berechnet aus der Flächenmessung der Partikelprojektion
<b>Messverfahren</b>	Korngröße Siebanalyse gemäß DIN 18123	Korngröße und Kornform digitale Partikelmessung / dynamische Bildanalyse gemäß ISO 13322
<b>Korngröße (Durchmesser)</b>	$Durchmesser \times c_{min} = Partikel-Breite$ Partikeldurchmesser bestimmt aus der kleinsten aller maximalen Sehnen eines Partikels	$Durchmesser \times c_{min} = Partikel-Breite$ Partikeldurchmesser bestimmt aus der kleinsten aller maximalen Sehnen eines Partikels $Durchmesser \times area = Partikel-Fläche$ Partikeldurchmesser berechnet aus der Flächenmessung der Partikelprojektion $Durchmesser \times Fe_{max} = Partikel-Länge$ Partikeldurchmesser bestimmt aus dem längsten Feret-Durchmesser aller gemessenen Feret-Durchmesser eines Partikels
<b>QM Korngröße (/ Kornform)</b>	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
<b>Kornform</b>	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 $S_m$ )
<b>Korndichte &amp; Lagerungsart</b>	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.
<b>Schüttgut-Setzung</b>		Berechnung der Schüttgut-Setzung aus dem Hausnorm-Test zum Eingang in die Planungsgrundlagen / Bauausführung / Entwicklungs- und Entsandungsmaßnahmen
<b><math>k_f</math></b>	Berechnung aus Siebliendarstellung nach div. Berechnungsmethoden z.B. $k_f$ nach Hazen, Beyer etc.	<i>F&amp;E-Vorhaben beantragt</i> Berechnung aus gemessener Oberfläche (Rotationsellipsoide) pro Volumeneinheit unter Berücksichtigung von Koeffizienten aus Kornform und Lagerungsdichte
<b>Wendepunkt(e) ein- und mehrgipfelig Kornsummenkurven</b>	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
<b>Schüttgut für Brunnenbau</b>	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 $d_g$ <u>und</u> Schüttgut qualitative Beachtung von Besonderheiten aus verfeinerter Klassenmessung, Formmessungen und Untersuchung Lagerungsdichte <i>F&amp;E-Vorhaben beantragt</i> DVGW W 113 (Überarbeitung) Bestimmung $d_g$ aus $x_{area}$ unter Berücksichtigung von Koeffizienten aus Kornform und Lagerungsdichte
<b>Ziel(e) - Brunnenbau -</b>	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

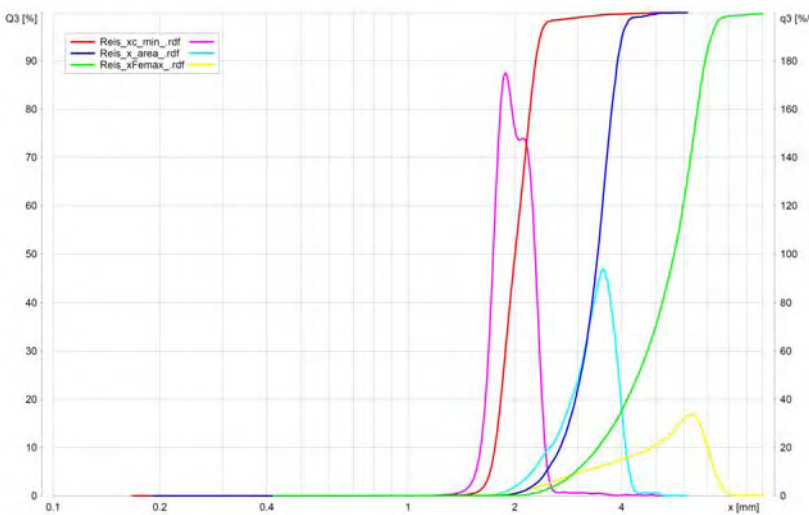
Wikipedia (07.2009): Der Informationsumfang, der durch Siebanalysen erhalten wird, ist relativ gering. Es kann keine genaue Aussage über die genaue Größe der gemessenen Partikel gemacht werden, sondern sie werden lediglich in einen Größenkorridor eingordnet, der durch zwei Siebgrößen bestimmt ist ("ein 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.



## Korndurchmesser - Summenverteilung

Die Messung entspricht dem Ergebnis der Siebanalyse.

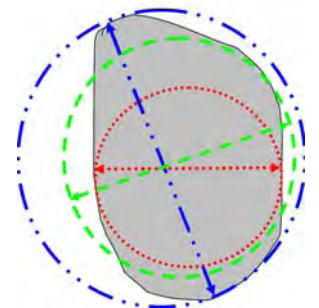
Der Kurvenverlauf vermittelt den Eindruck eines annähernd homogenen Gleichkorn-Gemisches. Tatsächlich handelt es sich um Reiskörner, die bei der Siebanalyse aufrecht das Sieb passieren und den o.a. Eindruck vermitteln.



## Korndurchmesser - Summenverteilung Korndurchmesser - Dichteverteilung

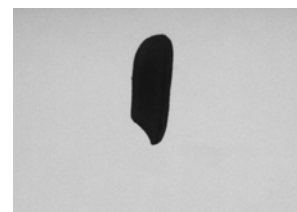
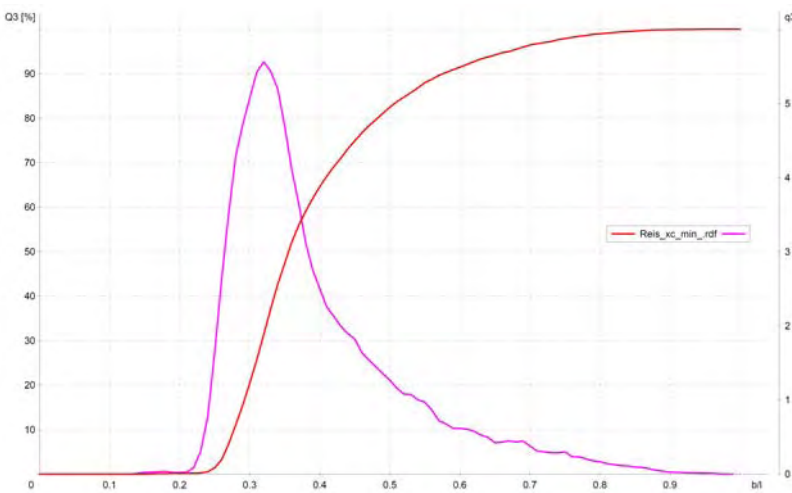
Korndurchmesser-Messung als

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

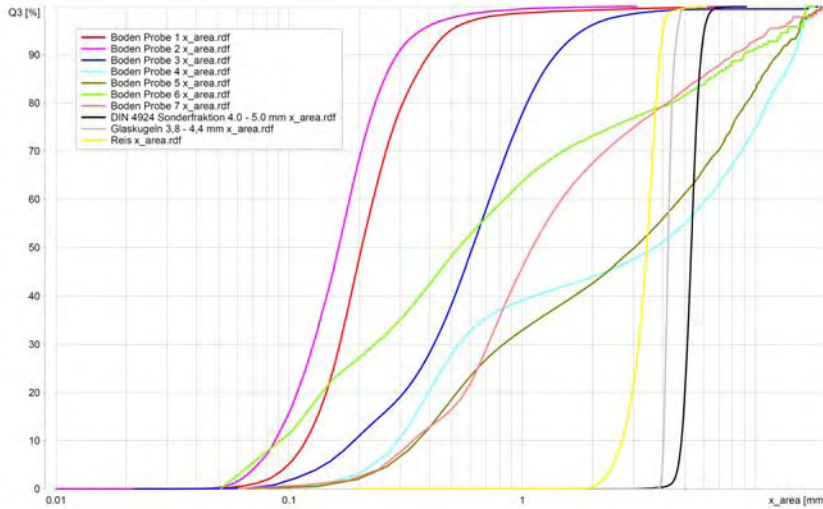


## Breite zu Länge - Summenverteilung Breite zu Länge - Dichteverteilung

Form-Vermessung, z.B. Breite zu Länge



Partikel-Projektionsdarstellung



**Kornmodell:  $x_{area}$**

**Durchmesser - Summenverteilung**

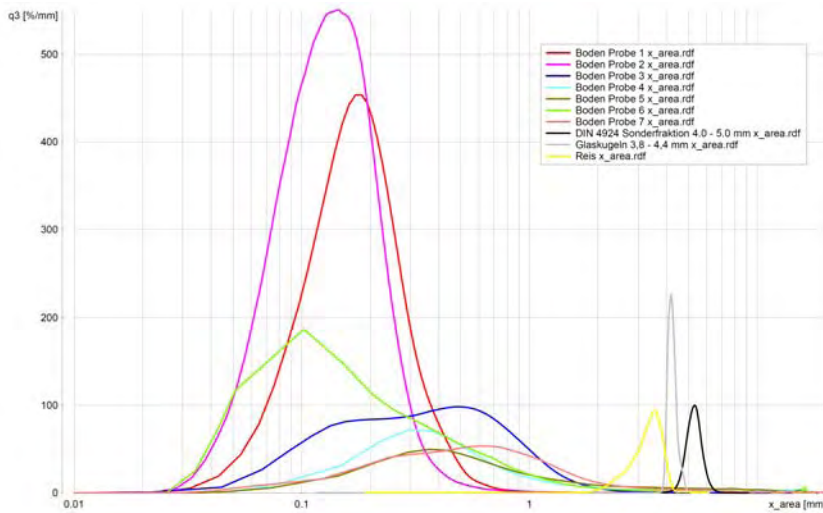
**Böden**

ein- und mehrfach gekrümmte Kornverteilung

**Sonderfraktion, Glaskugeln, Reiskörner**

relativ homogenes Korngemisch

Reiskörner-Interpretation vgl. Beispiel "Reiskörner"



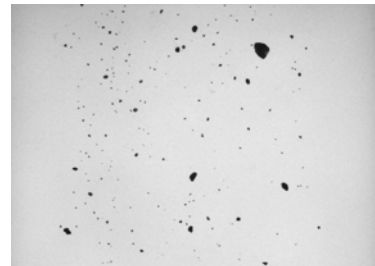
**Durchmesser - Dichteverteilung**

**Böden**

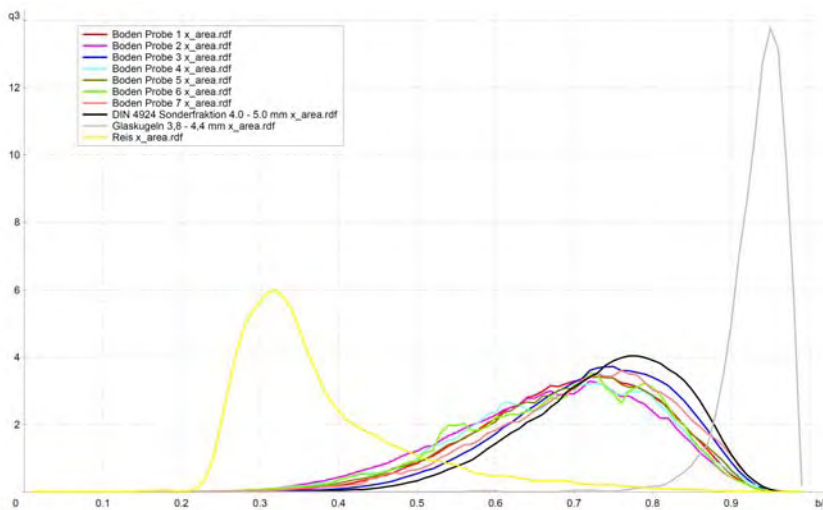
einfaches Ermitteln von  $d_{gw 113}$

**Schüttgüter**

einfache Kontrolle  $D_s$



dynamische Messung 30  $\mu$ m bis 30 mm



**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**

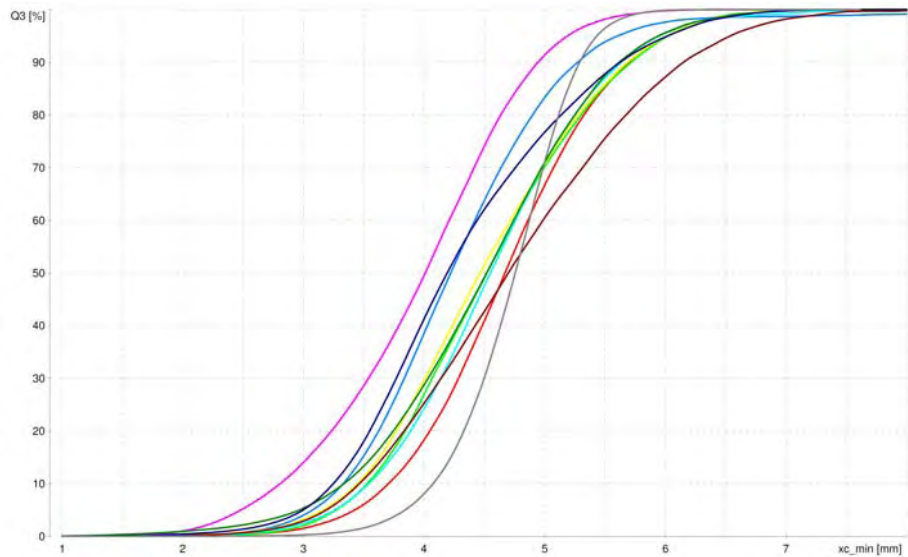
Das Maximum nahe 1 zeigt die "künstliche" Herstellung.

**Reiskörner**

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

**Beispiel digitale Partikelmessung - dynamische Bildanalyse**

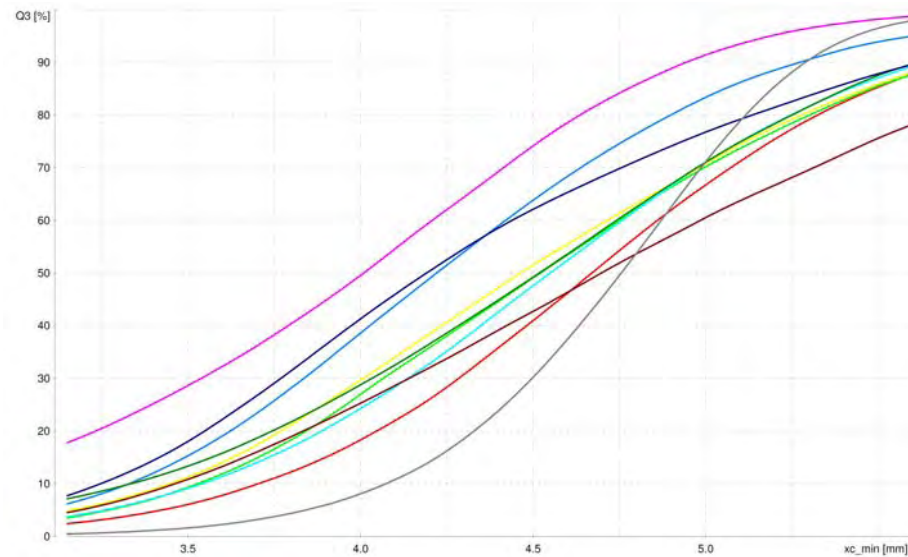
div. Böden - Sande & Kiese, Sonderfraktion 4,0 bis 5,0 mm - Glaskugeln 3,9 bis 4,3 mm - Reis



Durchmesser - Summenverteilung

$k_{f \text{ Beyer}}$ : min = 100 % bis max = 175 %

© TU Berlin, FG Ingenieurgeologie in Kooperation mit IBB-Berlin, 2009



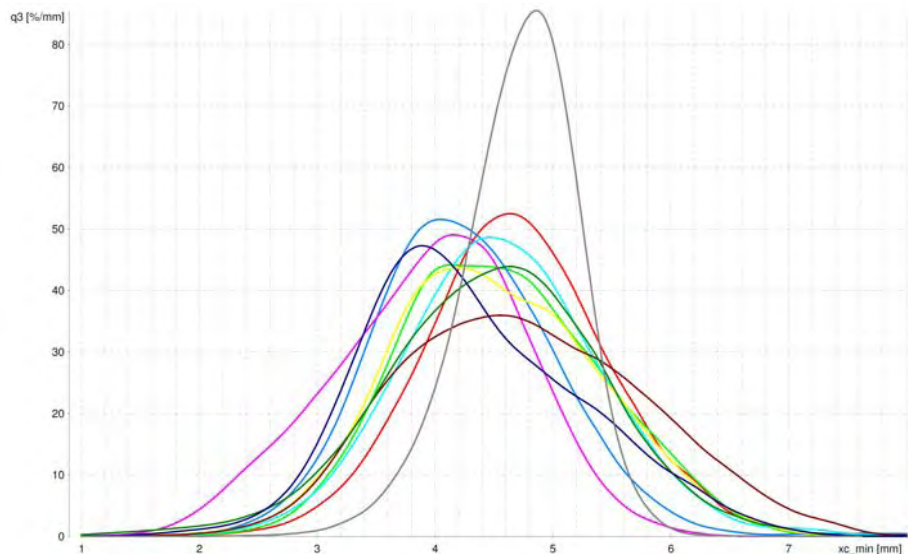
Durchmesser - Summenverteilung, Ausschnitt 3,15 bis 5,6 mm

leichtes Erkennen von Unter- und Überkorn-Anteil

**Beispiel digitale Partikelmessung - dynamische Bildanalyse** Kornmodell  $x_{c \text{ min}}$   
**Vergleich Schüttgüter nach DIN 4924 Kornklasse 3,15 bis 5,6 mm , div. Lieferanten & Sonderfraktion 4 bis 5 mm (grau) # anonymisiert**

$D_{s_5}$ : theoretisch Gleichverteilung ohne Unterkorn = 4,375 mm # gemessen 3,85 bis 4,65 mm

Durchmesser - Dichteverteilung



Beurteilung der Kornform in signifikanten Durchmesser-Bereichen, z.B. Schlitzweite nach W 118

Breite zu Länge über Durchmesser - klassenbezogene Verteilung

