

# 13. Berlin-Brandenburger Brunnentage

Potsdam, 04./05.06.2018

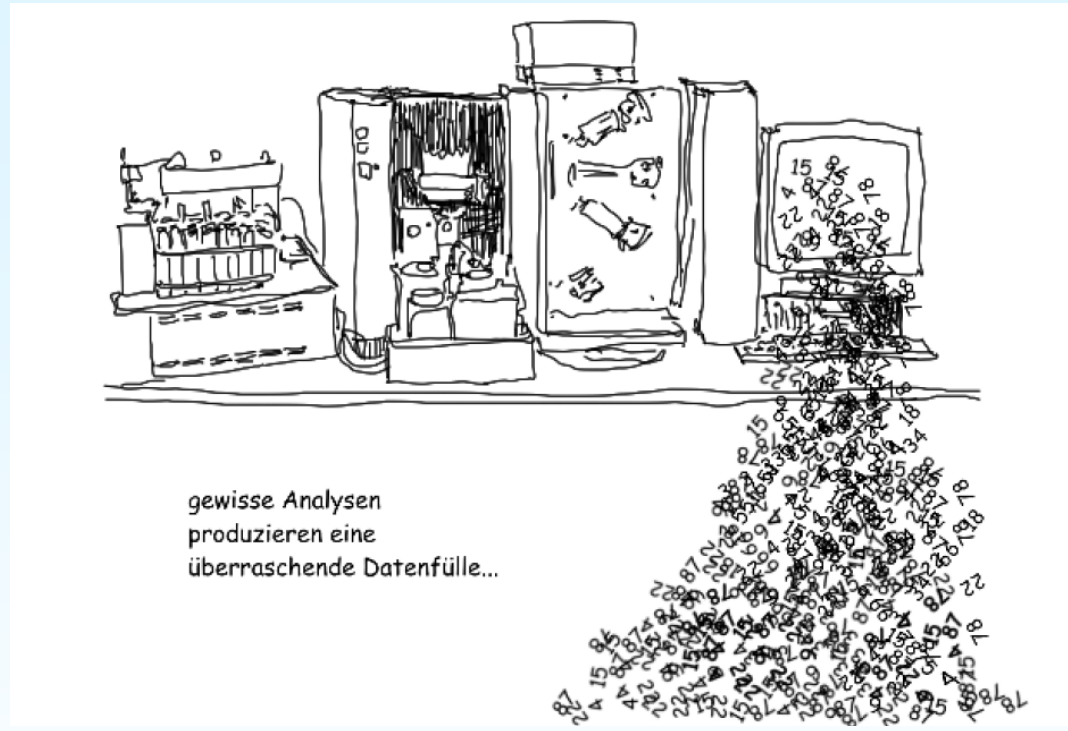


Abb. ETH Zürich, Labor für Umweltingenieurwissenschaften

## Korngrößenverteilung für die Schüttgutbemessung – wissenschaftlich oder praxisgerecht ?

**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

## Gliederung

- **Themenerweiterung**

praxisgerecht ↔ wissenschaftlich → Praxis ↔ praxisgerecht ↔ wissenschaftlich

- **Grundlagen**

schichtengerecht # Entnahmekategorie # Güteklasse #  $d_g$  #  $D_S$  #  $k_f$  #  $SA_{\leq 0,063 \text{ mm}}$   
# Unstetigkeit # W113:1983/2001/neu: Bestimmung  $d_g$  & Berechnung  $D_S$  #  
Standard-Siebsatz # erweiterter, angepasster Siebsatz # klassenbezogene  
Dichteverteilung # Inhomogenitätsfaktor # hydraulische Kette

- **Sediment-Probenqualität**

Bedeutung # Praxis ↔ praxisgerecht ↔ wissenschaftlich

- **Sedimentanteil  $SA_{\leq 0,063 \text{ mm}}$**

Bedeutung # Praxis ↔ praxisgerecht ↔ wissenschaftlich # Messtechniken

- **$d_g$  aus der Sediment-Korngrößenverteilung**

Bedeutung # Praxis ↔ praxisgerecht ↔ wissenschaftlich # Messtechniken

- **$k_f$  aus der Sediment-Korngrößenverteilung**

Bedeutung # Praxis ↔ praxisgerecht ↔ wissenschaftlich

- **Vergleich Messtechniken & Auswertung**

durch Untersuchung von 5 Bohrproben

- **Zusammenfassung**

# Sediment-Korngrößenverteilung für die Schüttgutbemessung praxisgerecht $\Leftrightarrow$ wissenschaftlich

## Themenweiterung



# Sediment-Korngrößenverteilung für die Schüttgutbemessung Praxis $\Leftrightarrow$ praxisgerecht $\Leftrightarrow$ wissenschaftlich

### Praxis

„üblich“;  
(nach neueren Erkenntnissen) mit Risiken behaftet;  
zumeist „billig“

### praxisgerecht

hinreichend genau;  
Kosten  $\Leftrightarrow$  Nutzen okay

### wissenschaftlich

präzise;  
mit Zusatzinformationen zur Klärung von Zusammenhängen

# Grundlagen

## schichtengerecht

es gibt keinen homogenen, isotropen Grundwasserleiter #  
die Einzelschichten in einem GWL haben eine unterschiedliche, Genese-abhängige Mächtigkeit von zumeist < 1 m

## Entnahmekategorie

Bohrverfahren zur Probengewinnung  
*vgl. DIN EN ISO 22475-1*

## Güteklasse

Probenentnahme aus Bohrproben für Laboruntersuchungen  
*vgl. DIN EN 1997-2 Eurocode 7*

$d_g$

maßgebender Sedimentkorndurchmesser zur Schüttgutbemessung [mm]

$D_s$

maßgebender Korndurchmesser [mm] zur Auswahl Schüttgut nach DIN 4924  
*vgl. DVGW W 113 seit 1983 & in Überarbeitung*

$k_f$

Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]  
nach BEYER&SCHWEIGER (1969) mit Berücksichtigung  $C_U$  & Lagerungsart  
*vgl. W 113 in Überarbeitung*

$SA_{\leq 0,063 \text{ mm}}$

Sedimentanteil  $\leq 0,063 \text{ mm}$   
Bestimmung mit Nassabtrennung  
*vgl. W 113 in Überarbeitung*

# Grundlagen

**Unstetigkeit** multimodaler Kurvenverlauf der Korngrößenverteilung  
genese-bedingt und genese-abhängig

## W 113:1983/2001/neu: Bestimmung $d_g$ & Berechnung $D_S$

$d_g$  aus Summen-Verteilung: vertikaler Wendepunkt (schwer zu erkennen wg. Logarithmus)

$d_g$  aus Dichte-Verteilung: Maximum (gut zu erkennen, besonders bei linearer Auflösung)

einmodal:  $d_g = d_{50}$  bzw. Maximum

multimodal: kleinste Korngruppe ist maßgebend für Schüttgutbemessung

$d_g = d_{50}$  kleinste Korngruppe (Summen-Vertell.) bzw. 1.Maximum (Dichteverteil.)

W 113:  $D_S = d_g \cdot \text{Filterfaktor} = d_g \cdot (5 + C_U)$  mit  $C_{U \max} = 5$

**Standard-Siebsatz** DIN 18123: 0-0,063-0,125-0,25-0,5-1-2-4-8-16 mm;  
i. Allg. 8 bis 10 Siebe weitere Siebe nach Bedarf

DIN EN ISO 17892-4: 0-0,063 -0,2-0,63-2-6,3-20 mm;  
weitere Siebe entsprechend Unstetigkeit

**erweiterter, angepasster Siebsatz** DIN EN ISO 17892-4 plus Ergänzung für  
i. Allg. 17 – 20 Siebe 1.Maximum Dichteverteilung & Gesamtprobe

Randbedingung: Einzelsieb-Rückstand max. 20 %

# Grundlagen

## klb Dv

= „klassenbezogene Dichteverteilung“ [%/mm]  
Relativierung nicht-gleichmäßiger Siebabstände zur sicheren  $d_g$ -Bestimmung bei un stetiger Sedimentkorngrößenverteilung durch Quotientenbildung:  
„Einzelrückstand [%] / Maß des zugehörigen Siebabstandes [mm]“  
*vgl. W 113 in Überarbeitung*

**Inhomogenitätsfaktor** Vergleich der Durchlässigkeitsbeiwerte der Einzelschichten  
 $I = \text{höchster kf-Wert} / \text{niedrigster kf-Wert}$   
 $I \geq 4$ : Prüfung auf teufendifferenzierten Schüttgutausbau

## hydraulische Kette

= „Durchlässigkeitskontrast“  
Steigerung des Durchlässigkeitsbeiwertes in Fließrichtung:  
Sediment → Schüttgut → Filterschlitz  
1 : 70 ...130 : mind. Schüttgut

doppelte Kiesschüttung: aussen → innen  
1 : 1 ... 10

# Sediment-Probenqualität

## Bedeutung Probenqualität

Da im Brunnenbau **keine** Sicherheitszuschläge bei „schlechter“ Probenqualität (z. B. durch „Mischung“ verschiedener Sedimentschichten ) durchgeführt werden können, kommt der Probenqualität bei der Bestimmung von Kennwerten für die Brunnenausbauplanung eine sehr hohe Bedeutung zu.

„Garbage in – garbage out“ („Müll rein – Müll raus“)

„Falsche“ Kennwerte führen bei der Schüttgutbemessung irreversibel

- zur inneren Kolmation

(= Durchflussbehinderung durch Sedimenteinträgerung im Schüttgut)

oder

- zur äußeren Kolmation

(= Durchflussbehinderung durch „Sedimentstau“ vor dem Schüttgut)

und verringern damit einen nachhaltigen Brunnenbetrieb / die Nutzungszeit.

# Sediment-Probenqualität

## Entnahmekategorie A-B-C

Bohrverfahren zur Probengewinnung  
*DIN EN ISO 22475-1*

## Güteklasse 1-2-3-4-5

Probenentnahme aus Bohrproben für Laboruntersuchungen  
*DIN EN 1997-2 Eurocode 7 (mit Ergänzungen für Brunnenbau)*

### Praxis:

Entnahmekategorie „B“ oder „C“

Güteklasse „3“ – „5“

Mischprobe „3“ + „4“ aus einer Schicht # „5“ schichtenübergreifend  
zumeist verbunden mit Probenteilung

### praxisgerecht:

Entnahmekategorie „A“

Güteklasse „2“

segmentierte Probe aus jeder Einzelschicht

keine Probenteilung; 10 cm Segment aus Liner = ca. 1 kg

### wissenschaftlich:

Entnahmekategorie „A“

Güteklasse „1“

Schicht = vollständige Probe = hohe Masse



# Sediment-Probenqualität

## Sedimenteigenschaften, die unverändert sind:

Korngrößenverteilung
Wassergehalt
Dichte, Lagerungsdichte, Durchlässigkeit
Zusammendrückbarkeit, Scherfestigkeit

## Eigenschaften, die bestimmt werden können:

Schichtenfolge
Schichtgrenzen, grobe Einteilung
Schichtgrenzen, feine Einteilung
Konsistenzgrenzen, Korndichte, organische Bestandteile
Wassergehalt
Dichte, Lagerungsdichte, Porosität, Durchlässigkeit
Zusammendrückbarkeit, Scherfestigkeit

zugehörige Kategorien der zur Verfügung stehenden Bohrverfahren entsprechend Einteilung in DIN EN ISO 22475-1

## Ergänzung der Eigenschaften gemäß DIN EN 1997-2 mit Brunnenbau-relevanten Parametern

vollständige Erfassung & teufendifferenzierte Zuordnung Sedimentanteile $\leq 0,063$ mm
teufendifferenzierte Zuordnung $d_g$ (maßgebender Sedimentkorndurchmesser)

Laboruntersuchung: Probenzuordnung entsprechend Güteklasse

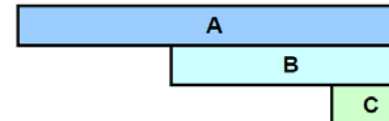
Zuordnung Brunnenbau

erforderliche Güteklassen von Sedimentproben nach DIN EN 1997-2 für Laboruntersuchungen

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

☺	☺	☺	☺	
☺	☺	☺		
☺	☺			
☺				

☺	☺	☺	☺	☺
☺	☺	☺	☺	
☺	☺			
☺	☺	☺	☺	
☺	☺	☺		
☺	☺			
☺				



☺	☺			
☺	☺			

gesamte Schicht	Segment aus 1 Schicht	Mischprobe aus 1 Schicht	Mischprobe Schichtenübergreifend
-----------------	-----------------------	--------------------------	----------------------------------

wissenschaftlich	praxisgerecht	Praxis
------------------	---------------	--------



Entnahmekategorie „C“  
Güteklasse „5“  
Misch-Probe schichtenübergreifend  
**„Praxis“**



Entnahmekategorie „B“  
Güteklasse „3-4“  
Misch-Probe aus 1 Schicht &  
schichtenübergreifend  
**„Praxis“**

Entnahmekategorie „A“  
Güteklasse „1“  
vollständige Probe aus 1 Schicht  
**„wissenschaftlich“**



Entnahmekategorie „A“  
Güteklasse „2“  
Segment-Probe aus 1 Schicht  
**„praxisgerecht“**



# Sedimentanteil $SA_{\leq 0,063 \text{ mm}}$

## Bedeutung Sedimentanteil $SA_{< 0,063 \text{ mm}}$

- kein Einfluss auf  $d_g$ -Bestimmung
- signifikanter Einfluss auf  $k_f$ -Bestimmung,  
d. h., durch Mobilisierung bei Brunnenentwicklung  
⇒ (teilweise signifikante) Verbesserung der Leistungsfähigkeit
- hydraulische Beurteilung der einzelnen Schichten innerhalb eines Grundwasserleiters zur Entscheidung eines teufendifferenzierten Schüttgutausbau
- bei erhöhten  $SA_{\leq 0,063 \text{ mm}}$  kein Filterausbau in diesen Bereichen
- Einfluss auf die Brunnenalterung durch Einlagerung in Skin und andere Alterungsarten
- hydraulische Beeinträchtigung in Rohrleitungen durch Wandanlagerung (Steigrohr & Zuleitung zum Wasserwerk)
- signifikante Beeinträchtigung Aufbereitung im Wasserwerk
- unqualifiziert: ohne Nassabtrennung ⇒ „staubiges“ Labor

# Sedimentanteil $SA_{\leq 0,063 \text{ mm}}$

„analog“

**Nassabtrennung,  
Sedimentation**

DIN 18123:2011 (*gültig bis 04.2017*)

DIN EN ISO 17892-4:2017

(*gültig seit 04.2017; mit Ergänzungen für den Brunnenbau*)

**Praxis:** gesamtes Spektrum mit Trockensiebung  
Standard-Siebsatz

**DIN EN ISO 17892-4:** Nassabtrennung Anteil  $\leq 0,063 \text{ mm}$   
Baugrund: keine Beachtung  $SA_{\leq 0,063 \text{ mm}}$  Anteil  $< 10\%$

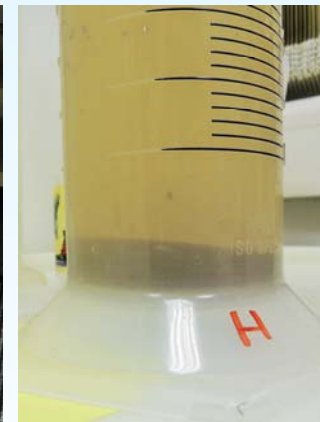
**praxisgerecht:** Nassabtrennung Anteile  $\leq 0,063 \text{ mm}$  &  $> 20 \text{ mm}$   
quantitative Bestimmung Anteile  
Berücksichtigung Anteil  $\leq 0,063 \text{ mm}$  in der Kornverteilung  
Vernachlässigung Anteil  $> 20 \text{ mm}$  („Störung“)

**wissenschaftlich:** erst Nassabtrennung Anteile  $\leq 0,063 \text{ mm}$  &  $> 20 \text{ mm}$   
dann Sedimentation Anteil  $\leq 0,063 \text{ mm}$   
Verteilungsberechnung nach Stoke'schem Gesetz



## „Nassabtrennung“ - Abtrennung $\leq 0,063$ & $> 20$ mm

Probentrocknung und Auswiegen –  
„Auswaschen“ jeweiliges Sieb „gezielt“ mit  
Spritzflasche (sonst „Wurstbildung“) –  
jeweiliges Sieb: Kontrolle bis klarer Ablauf –  
Trocknung „Rest“ (für „Trockensiebung“) –  
Anteil  $\leq 0,063$  mm nach Auswiegen + Mörsern  
& Anteil 20 mm in separate Probengefäße –  
summarische Berücksichtigung  $\leq 0,063$  mm  
bei Trockensiebung



# $d_g$ aus der Sediment-Korngrößenverteilung

## Bedeutung des maßgebenden Korndurchmessers $d_g$

- $d_g$  ist signifikant abhängig von der Genese, d. h., jede einzelne Sedimentschicht stellt zumeist ein „Gemisch“ in der Korngrößenverteilung dar („multimodale Verteilung“ bzw. „Unstetigkeit“), für das es gilt,
  - die kleinste zusammenhängende Korngruppe zu „identifizieren“,
  - für diese Korngruppe den Kennwert  $d_g$  hinreichend genau zu bestimmen
  - und mit  $d_g$  das Schüttgut zu bemessen.
- mit  $d_g$ : (schichtengerechte) Anpassung Sediment  $\Rightarrow$  Schüttgut  
ab  $I \geq 4$ : Prüfung auf Notwendigkeit tieferdifferenzierter Ausbau  
( $I$  = Inhomogenitätsfaktor = höchster  $k_f$  im GWL / niedrigster  $k_f$  im GWL)
- Problem:  $d_g$ -Bestimmung mit Siebung bei ungleichmäßigen Abstände der Siebdurchgänge  
(z. B. 0,150 – 0,200 mm  $\Rightarrow$  Siebabstand 0,05 mm  
0,200 – 0,300 mm  $\Rightarrow$  Siebabstand 0,10 mm)  
Lösung: Relativierung durch „klassenbezogene Dichteverteilung“

# Messtechniken zur Bestimmung der Sediment-Korngrößenverteilung

„analog“:

**Nassabtrennung,  
Trockensiebung,  
Sedimentation**

DIN 18123:2011 (*gültig bis 04.2017*)

DIN EN ISO 17892-4:2017

(*gültig seit 04.2017; mit Ergänzungen für den Brunnenbau*)

„digital“:

Dynamische Bildanalyse mit Camsizer®

**Praxis:** gesamtes Probenspektrum mit Trockensiebung  
Standard-Siebsatz

**praxisgerecht:** Nassabtrennung für  $\leq 0,063$  mm &  $> 20$  mm  
Trockensiebung für  $> 0,063$  mm bis  $\leq 20$  mm  
Trockensiebung mit erweitertem angepassten Siebsatz  
Auswertung mit klassenbezogener Dichteverteilung

**wissenschaftlich:** Nassabtrennung für  $< 0,063$  mm &  $> 20$  mm  
Sedimentation  $\leq 0,063$  mm  
digitale Partikelmessung für  $> 0,063$  mm bis  $< 20$  mm

## Messtechniken zur $d_g$ -Bestimmung

### Praxis



Die **visuelle Bodenansprache** ist von Erfahrung geprägt. (Langjährige) Erfahrung ist zwar wichtig (z. B. zur Erstellung des Schichtenverzeichnisses, sie kann aber das „Messen“ bei der  $d_g$ -Bestimmung nicht ersetzen.

Häufig werden die Ergebnisse des Standard-Siebsatzes (begründet bei erhöhtem  $C_U$ ) angezweifelt und mit Erfahrung „nach unten“ korrigiert.

„Mit der Hand“ ist zwar überprüfbar, ob Anteile  $\leq 0,063$  mm vorhanden sind, aber die Auswirkungen sind nicht einschätzbar.



Der **Standard-Siebsatz** (8-10 Siebe) hat teilweise massiv überhöhte Einzelrückstände („Spitzenreiter“ 84,6 % auf einem Sieb => fast alle Kennwerte auf einem Sieb), erkennt daher sehr häufig keine bi- / multi-modalen Verteilungen, deren Erkennung für die Bestimmung des „wahren  $d_g$ “ zwingend erforderlich ist.

Er lässt keine statistisch benötigten Siebmengen zu (1 – 1,5 kg), da einzelne Siebe schnell überlastet sind.

### praxisgerecht



Der **erweiterte, angepasste Siebsatz** (17 – 20 Siebe) ist mittlerweile bei der Bestimmung des „wahren  $d_g$ “ durch die „klassenbezogene Auswertung“ der Camsizer®-Messung ebenbürtig.

### wissenschaftlich



Die **Camsizer®-Messung** liefert sehr gute Kennwerte (zusätzlich auch Formparameter & in anderen Kornmodellen). Allerdings hat sie den höchsten Preis und bedarf (zusätzlich) vorab immer einer Abtrennung der Anteile  $\leq 0,063$  mm. Die „richtige“ Geräte-Konfiguration erfordert sehr viel Erfahrung. Ungeklärt ist, ob die „normalen“ Brunnen-Bemessungsformeln uneingeschränkt anwendungs-fähig sind.



# $k_f$ aus der Korngrößenverteilung

## Bedeutung des Durchlässigkeitsbeiwertes $k_f$

- $k_f$  aus Korngrößenverteilungen nur für Sediment-Einzelschichten im GWL  
**unzulässig:** Berechnung  $k_f$ -GWL aus  $k_f$  Sediment-Einzelschichten  
Berechnung  $k_f$ -GWL nur aus Pumpversuchen gemäß DVGW W 111 unter Beachtung der Störparameter
- $k_f$  jede Einzelschicht für
  1. Berechnung Inhomogenitätsfaktor  
 $I = \text{höchster Schichten-}k_f / \text{geringster Schichten-}k_f$   
zur Überprüfung auf die **Notwendigkeit** eines teufendifferenzierten Schüttgutausbaus
  2. optimale Anpassung Schüttgut an anstehende Sedimentschicht mit Überprüfung der „hydraulischen Kette“,  
**sonst** Kolmationsgefahr = Verringerung der Nachhaltigkeit !
- $d_{10}$  der Sediment-Korngrößenverteilung = massenbezogene Messung; anzahlbezogen haben bei  $d_{10}$  ca. 60 bis 90 % aller Partikel passiert !

# $k_f$ aus der Sediment-Korngrößenverteilung

**Praxis:**  $k_f$ -Berechnung nach HAZEN (1893)  
→  $k_f$  für lockere bis mittlere Lagerungsart

$k_f$ -Berechnung nach BEYER (1964)  
→  $k_f$  für mittlere Lagerungsart

**praxisgerecht:**  $k_f$ -Berechnung nach BEYER & SCHWEIGER (1969)  
→  $k_f$  wahlweise für lockere, mittlere oder dichte Lagerung

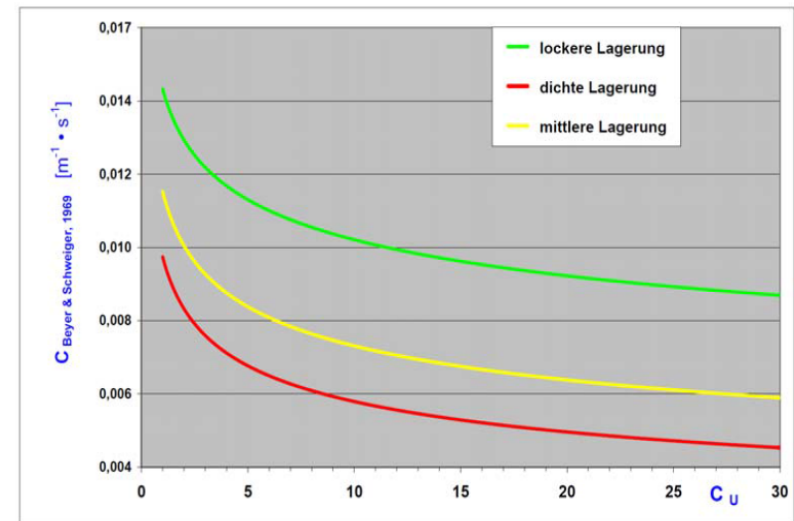
$$k_f \text{ BEYER \& SCHWEIGER, 1969} = C \cdot d_{10}^2$$

mit  $C = f(C_U, \text{Lagerungsart})$

$k_f$  [m/s] Durchlässigkeitsbeiwert  
 $C$  [-] Proportionalitätsfaktor  
 $d_{10}$  [mm] Korndurchmesser bei 10% Gewichtsanteil der Korngrößen-Summenverteilung  
 $C_U$  [-] Ungleichkörnigkeitsfaktor;  $C_U = d_{60}/d_{10}$

### Koeffizienten zur Bestimmung des Proportionalitätsfaktors

$$\begin{aligned} C_{\text{lockere Lagerung}} &= 0,0148 \cdot C_U^{-0,1493} \quad \# \quad R^2 = 0,9973 \\ C_{\text{mittlere Lagerung}} &= 0,0119 \cdot C_U^{-0,2016} \quad \# \quad R^2 = 0,9989 \\ C_{\text{dichte Lagerung}} &= 0,01 \cdot C_U^{-0,2313} \quad \# \quad R^2 = 0,9981 \end{aligned}$$



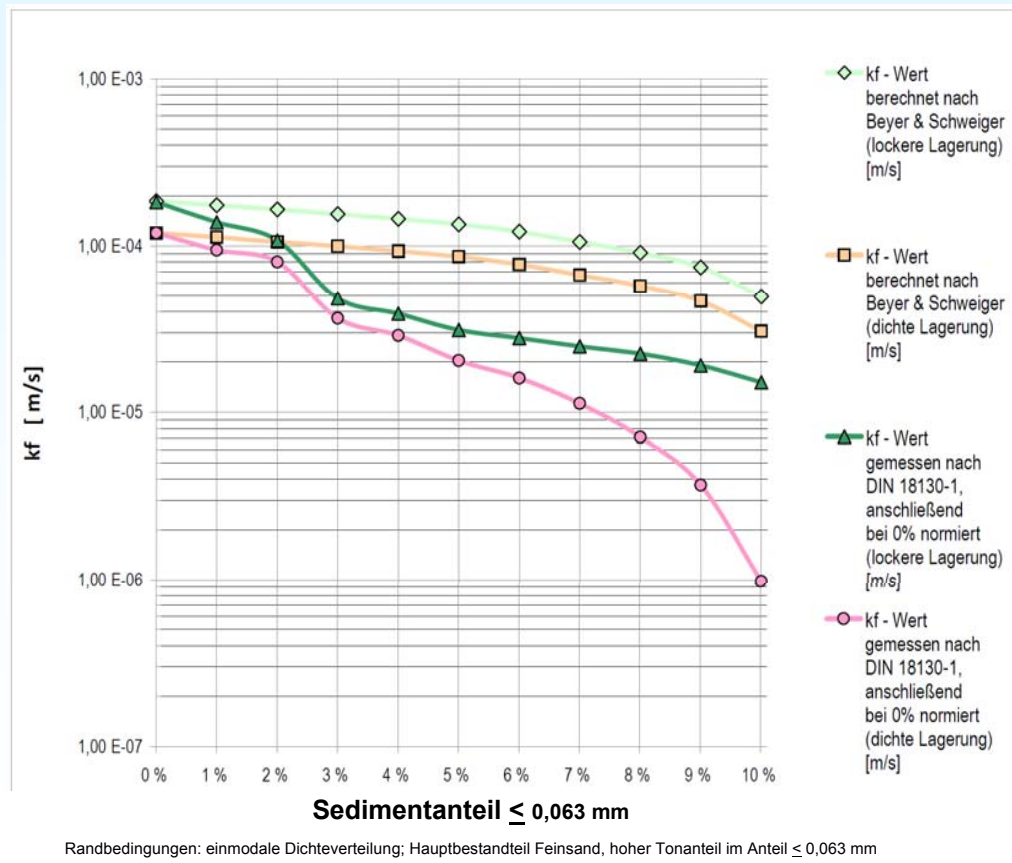
**wissenschaftlich:**  $k_f$ -Bestimmung nach DIN 18130-1 mit Laborversuchen  
→  $k_f$  je nach Versuchsausführung lockere/dichte Lagerung

## $k_f$ aus der Sediment-Korngrößenverteilung

Anmerkung: alle Bemessungsformeln ohne Berücksichtigung  $SA \leq 0,063$  mm

**ABER:**

real ist in jeder Sedimentprobe ein mehr oder minder großer Anteil  $\leq 0,063$  mm vorhanden, der entsprechend der Korngrößenverteilung einen mehr oder minder großen Einfluß auf die Sediment-Durchlässigkeit hat.



**Messung bis 3% bindiger Anteil**  
zunehmende, durchflußbehindernde Verstopfung von Engstellen

**Messung über 3% bindiger Anteil**  
Textur-bedingte Anlagerung auf den Oberflächen des Trägermaterials „Feinsand“, die sich in der dichten Lagerung bei geringerem Porenanteil stärker bemerkbar macht

Quelle: BA Netzker (2014)

**Austrag  $\leq 0,063$  mm**

⇒  $k_f$ -Verbesserung

⇒ aus „Entsandung“ wird „Entwicklung“

# Vergleich zur Schüttgutbemessung durch Untersuchung von 5 Bohrproben

Praxis  $\Leftrightarrow$  praxisgerecht  $\Leftrightarrow$  wissenschaftlich

## Praxis

- **Standard-Siebsatz**  
 $d_g$  aus Dichteverteilung

## praxisgerecht

- **Standard-Siebsatz**  
 $d_g$  aus klassenbezogener Dichteverteilung
- **erweiterter, angepasster Siebsatz**  
 $d_g$  aus Dichteverteilung
- **erweiterter, angepasster Siebsatz**  
 $d_g$  aus klassenbezogener Dichteverteilung

## wissenschaftlich

- **Digitale Partikelmessung mit Camsizer<sup>®</sup>**  
 $d_g$  aus klassenbezogener Dichteverteilung

# Vergleich Messtechniken & Auswertung durch Untersuchung von 5 Bohrproben



teufendifferenzierter $k_f$ -Kreuzvergleich	5,12 E-04 50 %	1,02 E-03 100 %	2,51 E-04 25 %	1,21 E-04 12 %	3,87 E-04 38 %	[m/s] dichte La. l = 8,4
--	-------------------	--------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-----------------------------



10 - 11 m



14 - 15 m



20 - 21 m



25 - 26 m



30 - 31 m

# Vergleich Messtechniken: Messdauer in Abhängigkeit der Probenzusammensetzung

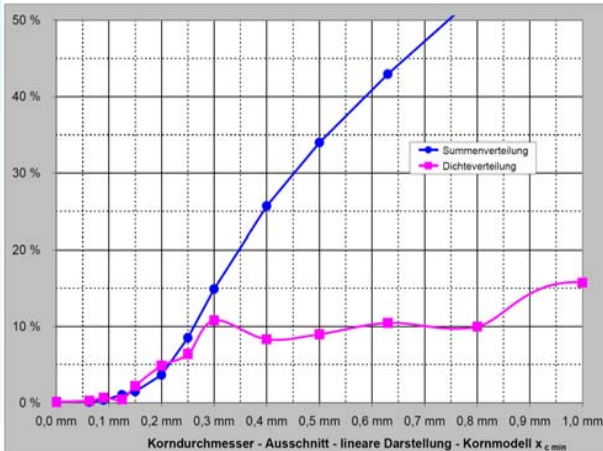
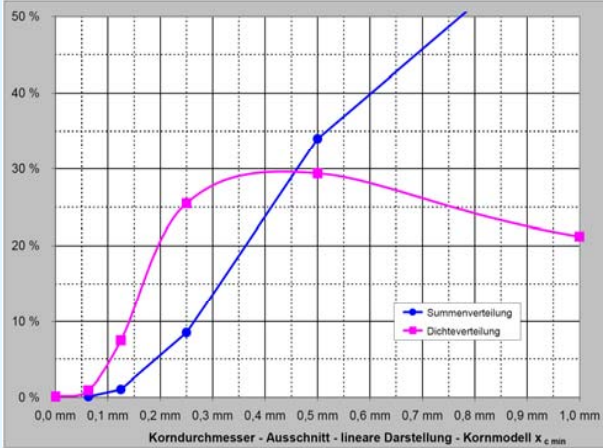
Teufe [m u MNP]	Messtechnik zur Korngrößenbestimmung	Anzahl Siebe inkl. Bodenschale	Messdauer [ Minuten ]	Gewicht Probe [ Gramm ]	Hauptanteil	1.Nebenanteil	2.Nebenanteil
10 - 11 m	Schichtenverzeichnis	visuell aus Bohrprobe	?	1.388,4 g inkl. bindigem Anteil 0,1 % Siebverlust 0,24 %	<i>Feinkies</i>	<i>grobsandig</i>	<i>mittelkiesig</i>
	Standard-Siebsatz	9	40 min		Grobsand 42,8 %	Mittelsand 36,2 %	Feinkies 12,4 %
	erweiterter, angepasster Siebsatz	17	75 min		Grobsand 41,6 %	Mittelsand 39,3 %	Feinkies 12,4 %
	Camsizer®	freie Auswahl bis 300 Messklassen	89 min		Grobsand 41,6 %	Mittelsand 39,2 %	Feinkies 13,4 %
14 - 15 m	Schichtenverzeichnis	visuell aus Bohrprobe	?	1.200,1 g inkl. bindigem Anteil 0,1 % Siebverlust 0,16 %	<i>Feinkies</i>	<i>grobsandig</i>	<i>mittelkiesig</i>
	Standard-Siebsatz	9	40 min		Grobsand 54,4 %	Mittelsand 29,9 %	Feinkies 6,6 %
	erweiterter, angepasster Siebsatz	17	75 min		Grobsand 53,4 %	Mittelsand 31,7 %	Feinkies 6,6 %
	Camsizer®	freie Auswahl bis 300 Messklassen	64 min		Grobsand 54,5 %	Mittelsand 31,5 %	Feinkies 7,2 %
20 - 21 m	Schichtenverzeichnis	visuell aus Bohrprobe	?	1.008,2 g inkl. bindigem Anteil 0,2 % Siebverlust 0,18 %	<i>Grobsand</i>	<i>stark kiesig</i>	<i>stark feinsandig</i>
	Standard-Siebsatz	9	40 min		Mittelsand 41,6 %	Grobsand 26,8 %	Feinsand 13,5 % Feinkies 10,7 %
	erweiterter, angepasster Siebsatz	17	75 min		Mittelsand 44,7 %	Grobsand 25,5 %	Feinsand 11,8 % Feinkies 10,7 %
	Camsizer®	freie Auswahl bis 300 Messklassen	101 min		Mittelsand 44,2 %	Grobsand 25,6 %	Feinsand 12,7 % Feinkies 10,7 %
25 - 26 m	Schichtenverzeichnis	visuell aus Bohrprobe	?	1.097,2,8 g inkl. bindigem Anteil 0,4 % Siebverlust 0,24 %	<i>Mittelsand</i>	<i>feinsandig</i>	---
	Standard-Siebsatz	9	40 min		Mittelsand 62,6 %	Feinsand 30,8 %	Grobsand 5,7 %
	erweiterter, angepasster Siebsatz	17	75 min		Mittelsand 66,7 %	Feinsand 28,3 %	Grobsand 4,0 %
	Camsizer®	freie Auswahl bis 300 Messklassen	207 min		Mittelsand 62,6 %	Feinsand 31,9 %	Grobsand 4,4 %
30 - 31 m	Schichtenverzeichnis	visuell aus Bohrprobe	?	1.471,9 g inkl. bindigem Anteil 0,2 % Siebverlust 0,18 %	<i>Feinkies &amp; Kies</i>	<i>grobsandig</i>	<i>mittelkiesig</i>
	Standard-Siebsatz	9	40 min		Grobsand 30,4 %	Mittelsand 24,0 %	Feinkies 20,8 % Mittelkies 15,8 %
	erweiterter, angepasster Siebsatz	17	75 min		Grobsand 29,2 %	Mittelsand 25,7 %	Feinkies 20,8 % Mittelkies 15,8 %
	Camsizer®	freie Auswahl bis 300 Messklassen	83 min		Grobsand 31,5 %	Mittelsand 27,3 %	Feinkies 21,0 % Mittelkies 12,2 %



## Vergleich Messtechniken: Messdauer in Abhängigkeit der Probenzusammensetzung

### Erläuterungen & Interpretation

- Für alle Siebungen gilt: die Messdauer ist unabhängig von der Probenzusammensetzung und (weitgehend) von der Probenmenge. Erhöhte Probenmengen (1 – 1,5 kg) erhöhten die statistische Sicherheit.
- Der Messzeit-Unterschied „Standard-Siebsatz“ ↔ „erweiterter, angepasster Siebsatz“ resultiert aus dem Zeitaufwand für
  - die Siebdauer (Anzahl der Siebe, inkl. Boden = ... Minuten),
  - die Siebwägung vor & nach Siebung (8 - 10 Siebe ↔ 17 – 20 Siebe) und
  - die Siebreinigung
- Die teilweise sehr lange Camsizer<sup>®</sup>-Messzeit resultiert aus der verwendeten Camsizer<sup>®</sup>-Dichteeinstellung (0,5 % ⇒ bessere Erfassung der Messwerte) und nimmt mit abnehmendem Partikeldurchmesser und zunehmender Probenmenge signifikant zu. Probenteilungen sind aus Statistikgründen nur bedingt empfehlenswert. Nach Start der Camsizer<sup>®</sup>-Messung ist bis zum Ende der Messung kein weiterer Bedienerereinsatz erforderlich.
- Im Vergleich aller aufgeführten Messungen zeigt der „erweiterte, angepasste Siebsatz“ das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis.



### Standard-Siebsatz

↔ Summen- & Dichte-Verteilung #  $Q_3$  &  $q_3$   
 $d_g = (0,5 \text{ mm} + 1,0 \text{ mm}) / 2 = 0,75 \text{ mm}$   
 $C_U = 3,56 \Rightarrow D_S = 6,42 \text{ mm}$   
 $\Rightarrow$  Korngruppe 5,6 – 8 mm

### Standard-Siebsatz

„klassenbezogene“ Dichte-Verteilung  $q_3$  ↔  
 $d_g = (0,25 \text{ mm} + 0,5 \text{ mm}) / 2 = 0,375 \text{ mm}$   
 $C_U = 3,56 \Rightarrow D_S = 3,21 \text{ mm}$   
 $\Rightarrow$  Korngruppe 3,15 – 5,6 mm

### erweiterter, angepasster Siebsatz

↔ Summen- & Dichte-Verteilung #  $Q_3$  &  $q_3$   
 $d_g = (0,3 \text{ mm} + 0,4 \text{ mm}) / 2 = 0,35 \text{ mm}$   
 $C_U = 3,56 \Rightarrow D_S = 3,00 \text{ mm}$   
 $\Rightarrow$  Korngruppe 2 – 3,15 mm

### erweiterter, angepasster Siebsatz

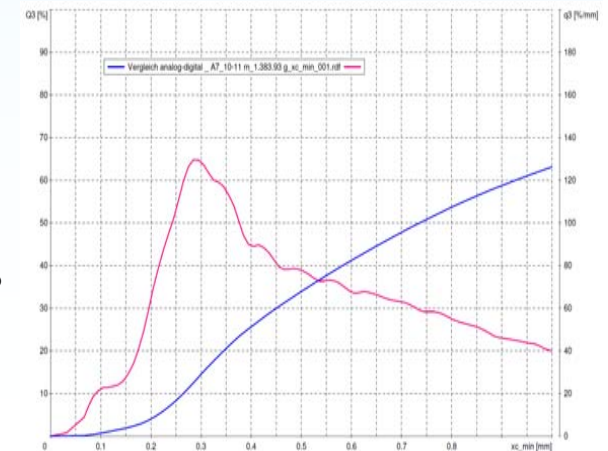
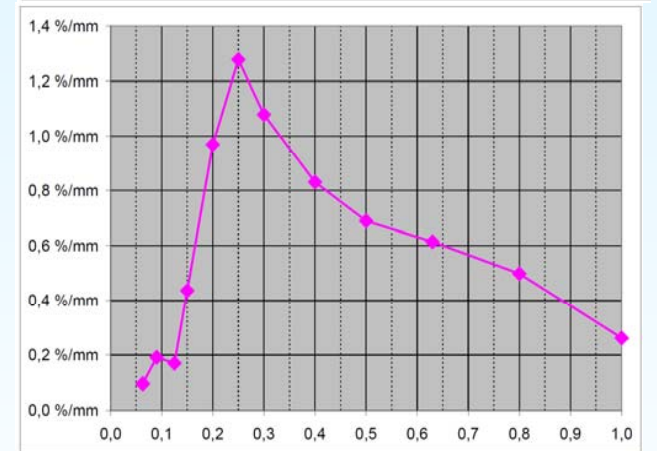
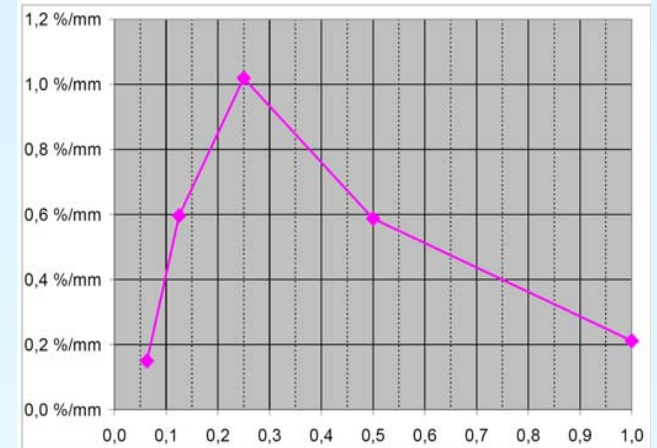
„klassenbezogene“ Dichte-Verteilung  $q_3$  ↔  
 $d_g = (0,25 \text{ mm} + 0,3 \text{ mm}) / 2 = 0,275 \text{ mm}$   
 $C_U = 3,56 \Rightarrow D_S = 2,35 \text{ mm}$   
 $\Rightarrow$  Korngruppe 2 – 3,15 mm

## Vergleich $d_g$ -Bestimmung und Schüttkorn-Bemessung

10 – 11 m

### Camsizer®

$Q_3$  & „klassenbezogene“ Dichte-Verteilung  $q_3$  ↔  
 $d_g = (0,285 \text{ mm} + 0,295 \text{ mm}) / 2 = 0,29 \text{ mm}$   
 $C_U = 3,52 \Rightarrow D_S = 2,47 \text{ mm}$   
 $\Rightarrow$  Korngruppe 2 – 3,15 mm





## Vergleich Messtechniken: d<sub>g</sub>-Bestimmung & Auswertung zur Schüttkorn-Bemessung / -Auswahl

Teufe [m u MNP]	Messtechnik zur Korngrößenbestimmung	Bohrprobe		ausgewähltes Schüttgüt			ausgewähltes Schüttgüt		
		k <sub>f</sub> nach BEYER & SCHWEIGER (1969)	k <sub>f</sub> -Kreuzvergleich	Dichteverteilung		k <sub>f</sub> - Kreuzvergleich	klassenbezogene Dichteverteilung		k <sub>f</sub> - Kreuzvergleich
		dichte Lagerung	Korngruppe		k <sub>f</sub> nach B&S		Korngruppe		
					mittlere Lagerung			mittlere Lagerung	
10 - 11 m	Standard-Siebsatz	5,23 E-04 m/s	100 %	5,6 - 8 mm	3,91 E-01 m/s	74.696 %	3,15 - 5,6 mm	1,29 E-01 m/s	24.644 %
	erweiterter, angepasster Siebsatz	5,12 E-04 m/s	100 %	2 - 3,15 mm	5,07 E-02 m/s	9.908 %	2 - 3,15 mm	5,07 E-02 m/s	9.908 %
	Camsizer®	5,21 E-04 m/s	100 %				2 - 3,15 mm	5,07 E-02 m/s	9.729 %
14 - 15 m	Standard-Siebsatz	8,74 E-04 m/s	100 %	5,6 - 8 mm	3,91 E-01 m/s	44.756 %	5,6 - 8 mm	3,91 E-01 m/s	44.756 %
	erweiterter, angepasster Siebsatz	1,02 E-03 m/s	100 %	3,15 - 5,6 mm	1,29 E-01 m/s	12.648 %	3,15 - 5,6 mm	1,29 E-01 m/s	12.648 %
	Camsizer®	1,01 E-03 m/s	100 %				3,15 - 5,6 mm	1,29 E-01 m/s	12.737 %
20 - 21 m	Standard-Siebsatz	2,17 E-04 m/s	100 %	3,15 - 5,6 mm	1,29 E-01 m/s	59.535 %	1,6 - 2,5 mm	3,24 E-02 m/s	14.953 %
	erweiterter, angepasster Siebsatz	2,51 E-04 m/s	100 %	2 - 3,15 mm	5,07 E-02 m/s	20.173 %	1,6 - 2,5 mm	3,24 E-02 m/s	12.892 %
	Camsizer®	2,24 E-04 m/s	100 %				1,6 - 2,5 mm	3,24 E-02 m/s	14.486 %
25 - 26 m	Standard-Siebsatz	1,14 E-04 m/s	100 %	2 - 3,15 mm	5,07 E-02 m/s	44.552 %	1 - 2 mm	1,34 E-02 m/s	11.775 %
	erweiterter, angepasster Siebsatz	1,21 E-04 m/s	100 %	0,71- 1,25 mm	6,53 E-03 m/s	5.377 %	1 - 1,6 mm	1,27 E-02 m/s	10.458 %
	Camsizer®	1,03 E-04 m/s	100 %				0,71- 1,25 mm	6,53 E-03 m/s	6.370 %
30 - 31 m	Standard-Siebsatz	3,81 E-04 m/s	100 %	5,6 - 8 mm	3,91 E-01 m/s	102.549 %	1,6 - 2,5 mm	3,24 E-02 m/s	8.498 %
	erweiterter, angepasster Siebsatz	3,87 E-04 m/s	100 %	1,6 - 2,5 mm	3,24 E-02 m/s	8.370 %	1,6 - 2,5 mm	3,24 E-02 m/s	8.370 %
	Camsizer®	3,43 E-04 m/s	100 %				1,6 - 2,5 mm	3,24 E-02 m/s	9.440 %

"hydraulische Kette": Steigerung k<sub>f</sub> Bohrprobe ⇒ k<sub>f</sub> Schüttgut # angestrebter Bereich: k<sub>f</sub> Bohrprobe 100 % ⇒ k<sub>f</sub> Schüttgut 10.000 % mit Toleranzbereich 100 % ⇒ 7.000 ... 13.000 %

# Vergleich Messtechniken

## $d_g$ -Bestimmung & Auswertung zur Schüttkorn-Bemessung / -Auswahl

### Erläuterungen & Interpretation

- Ist für den berechneten  $D_S$ -Wert die Auswahl mehrerer Korngruppen möglich, so wird entsprechend der Plausibilitätsüberprüfung mit der "hydraulischen Kette" die „geeigneter“ Korngruppe (= die Korngruppe, die innerhalb des Toleranzbereiches der "hydraulischen Kette" liegt) gewählt.
- In der „Kompromiss-Findung“ der Korngruppenauswahl für den tatsächlichen, ausführungsfähigen Brunnen-Ausbau kann dann aber auch wiederum zwischen möglichen Korngruppen gewechselt werden.
- Die Anwendung der "klassenbezogenen Dichteverteilung" für die  $d_g$ -Bestimmung zeigt (teilweise bei Reihenuntersuchungen / hier in den Beispielen entsprechend ausgewählt häufig) signifikante Unterschiede zur  $d_g$ -Bestimmung aus der Dichteverteilung (W 113; 2001).
- Die Plausibilitätsüberprüfung mit der "hydraulischen Kette" zeigt die Notwendigkeit auf, bei der Schüttgut-Korngruppen-Auswahl generell die  $d_g$ -Bestimmung mit der "klassenbezogenen Dichteverteilung" zu nutzen.
- Die Anwendung des „Standard-Siebsatzes“ ist zur Kennwertbestimmung für den Brunnenbau offensichtlich nur stark eingeschränkt geeignet. Die Anwendung des „erweiterten, angepassten Siebsatz“ ist nicht nur empfohlen sondern erforderlich (!) und digitalen Messungen (mit Camsizer®) durchaus ebenbürtig.
- *Weitere Erläuterungen / Interpretationen: siehe "hydraulische Kette"*

# Vergleich Messtechniken: Überprüfung / Optimierung der Schüttkorn-Auswahl mit „hydraulischer Kette“

Teufe [m u MNP]	Messtechnik zur Korngrößenbestimmung	Bohrprobe		ausgewähltes Schüttgüt			ausgewähltes Schüttgüt		
		$k_f$ nach BEYER & SCHWEIGER (1969)	$k_f$ -Kreuzvergleich	Dichteverteilung		$k_f$ - Kreuzvergleich	klassenbezogene Dichteverteilung		$k_f$ - Kreuzvergleich
		dichte Lagerung		Korngruppe	$k_f$ nach B&S mittlere Lagerung			Korngruppe	
10 - 11 m	Standard-Siebsatz	5,23 E-04 m/s	100 %	5,6 - 8 mm	3,91 E-01 m/s	74.696 %	3,15 - 5,6 mm	1,29 E-01 m/s	24.644 %
	erweiterter, angepasster Siebsatz	5,12 E-04 m/s	100 %	2 - 3,15 mm	5,07 E-02 m/s	9.908 %	2 - 3,15 mm	5,07 E-02 m/s	9.908 %
	Camsizer®	5,21 E-04 m/s	100 %				2 - 3,15 mm	5,07 E-02 m/s	9.729 %
14 - 15 m	Standard-Siebsatz	8,74 E-04 m/s	100 %	5,6 - 8 mm	3,91 E-01 m/s	44.756 %	5,6 - 8 mm	3,91 E-01 m/s	44.756 %
	erweiterter, angepasster Siebsatz	1,02 E-03 m/s	100 %	3,15 - 5,6 mm	1,29 E-01 m/s	12.648 %	3,15 - 5,6 mm	1,29 E-01 m/s	12.648 %
	Camsizer®	1,01 E-03 m/s	100 %				3,15 - 5,6 mm	1,29 E-01 m/s	12.737 %
20 - 21 m	Standard-Siebsatz	2,17 E-04 m/s	100 %	3,15 - 5,6 mm	1,29 E-01 m/s	59.535 %	1,6 - 2,5 mm	3,24 E-02 m/s	14.953 %
	erweiterter, angepasster Siebsatz	2,51 E-04 m/s	100 %	2 - 3,15 mm	5,07 E-02 m/s	20.173 %	1,6 - 2,5 mm	3,24 E-02 m/s	12.892 %
	Camsizer®	2,24 E-04 m/s	100 %				1,6 - 2,5 mm	3,24 E-02 m/s	14.486 %
25 - 26 m	Standard-Siebsatz	1,14 E-04 m/s	100 %	2 - 3,15 mm	5,07 E-02 m/s	44.552 %	1 - 2 mm	1,34 E-02 m/s	11.775 %
	erweiterter, angepasster Siebsatz	1,21 E-04 m/s	100 %	0,71- 1,25 mm	6,53 E-03 m/s	5.377 %	1 - 1,6 mm	1,27 E-02 m/s	10.458 %
	Camsizer®	1,03 E-04 m/s	100 %				0,71- 1,25 mm	6,53 E-03 m/s	6.370 %
30 - 31 m	Standard-Siebsatz	3,81 E-04 m/s	100 %	5,6 - 8 mm	3,91 E-01 m/s	102.549 %	1,6 - 2,5 mm	4,08 E-02 m/s	10.701 %
	erweiterter, angepasster Siebsatz	3,87 E-04 m/s	100 %	1,6 - 2,5 mm	4,08 E-02 m/s	10.540 %	1,6 - 2,5 mm	4,08 E-02 m/s	10.540 %
	Camsizer®	3,43 E-04 m/s	100 %				1,6 - 2,5 mm	4,08 E-02 m/s	11.887 %

## Vergleich Messtechniken:

### Überprüfung / Optimierung der Schüttkorn-Auswahl mit „hydraulischer Kette“

#### Erläuterungen & Interpretation (1 / 2)

- Die Kennwerte der "hydraulischen Kette" (inkl. „Toleranzbereich“) wurden empirisch aus Projekten zur Schüttgutbemessungen (seit 2009) für "Siebanalysen" abgeleitet. Sie sind ggfls. / im Bedarfsfall / für Camsizer<sup>®</sup>-Messungen (die aufgrund der Formabhängigkeit andere Durchgangs-Werte aufweisen) durch Versuche und dementsprechend geänderten  $F_g$ -Faktor (jetzt:  $5 + C_U$ ) zu verifizieren.
- Sind aufgrund der  $D_S$ -Berechnung mehrere Korngruppen-Zuordnungen möglich (z. B. 1,6 – 2,5 mm oder 2 – 3,15 mm), so wird mit Anwendung der Toleranzvorgaben ( $k_{f-Bohrprobe} = 100\% \Rightarrow$  Steigerung  $k_{f-Korngruppe}$  7.000 .... 13.000 %) die Korngruppe gewählt, die dem Toleranzbereich zuordnungsfähig ist.
- Der "Standard-Siebsatz" erbringt (auch bei Anwendung der "klassenbezogenen Dichteverteilung" für die  $d_g$ -Bestimmung) nicht immer / selten die "richtige" Schüttkorn-Auswahl (= Einhaltung des Toleranzbereiches der „hydraulischen Kette“). Es wird angenommen, dass es bei zu „grober“ Korngruppen-Auswahl (bevor eine Erosion / Sandführung erfolgt) eine (weitgehend irreversible) „innere Kolmation“ stattfindet, die im Neubau-Pumptest zunächst keine Leistungseinschränkung - später aber eine insgesamt verkürzte Nutzungszeit zur Folge hat.
- Geringfügige Über- / Unterschreitungen des Toleranzbereiches müssen im Rahmen der Kompromiss-Findung für die baufähige Umsetzung akzeptiert werden.

## Vergleich Messtechniken:

### Überprüfung / Optimierung der Schüttkorn-Auswahl mit „hydraulischer Kette“

#### Erläuterungen & Interpretation (2 / 2)

- Erhebliche Unter- bzw. Überschreitungen des Toleranzbereiches haben (zunehmend mit dem Grad der Unter- /Überschreitung) die äußere bzw. innere Kolmation mit entsprechend verkürzter Nutzungszeit zur Folge.
- Die Korngruppen-Auswahl der Probe 25 - 26 m mit der Camsizer®-Messung fällt gemäß der Plausibilitätsüberprüfung mit der "hydraulischen Kette" zu gering aus; im Vergleich mit dem  $D_S$ -Wert der Siebanalyse (erweiterter, angepasster Siebsatz / "klassenbezogene Dichteverteilung") zeigt sich nur ein geringfügiger Unterschied (0,99 mm  $\Leftrightarrow$  1,02 mm), der dann aber (speziell unter Beachtung des für die Camsizer®-Messung niedriger bestimmten  $k_f$ -Wertes der Bodenprobe) hier zu einer „Unterdimensionierung“ des Schüttgutes führt.
- Der Steigerungswert der Camsizer®-Messungen übersteigen in Probe 20 - 21 m geringfügig den definierten Toleranzbereich (7.000 ... 13.000 %); Ursache ist ein für diese Probe vermutlich zu gering bestimmter  $d_{10}$ -Kennwert der Bohrprobe aufgrund der Formeigenschaften (speziell der Sphärizität und der Konvexität im  $d_{10}$ -Bereich = 0,175 mm) dieser Probe.  
Ebenso liegt in derselben Probe 20 - 21 der Steigerungswert des Standard-Siebsatzes geringfügig außerhalb des Toleranzbereiches; Ursache hierfür ist ebenfalls der  $d_{10}$ -Kennwert, der hier aufgrund der Siebzusammenstellung des Standard-Siebsatzes und der erforderlichen Interpolation entsprechend niedrig (im Vergleich zum erweiterten, angepassten Siebsatz) ausfällt.

# Zusammenfassung

## Praxis

- Probenqualität: Entnahmekategorie „A“, „B“ oder „C“ Güteklasse „1“ bis „5“
- Korngrößenuntersuchung analog „Trockensiebung“
  - mit Standardsiebsatz (8 – 10 Siebe)
  - ➔ überwiegend falsche  $d_g$ -Bestimmung (zu groß)
- vorab ohne Nassabtrennung (mit ungenügender Anteilsbestimmung  $SA_{\leq 0,063 \text{ mm}}$ )
- Ausbau (ohne Teufendifferenzierung) angepasst auf Schicht mit kleinstem  $d_g$ -Wert (bzw. „geringstem  $k_f$ -Wert“ / „Angstschüttung“)

## praxisgerecht

- Probenqualität: Entnahmekategorie „A“ Güteklasse „2“
- Korngrößenuntersuchung analog „Trockensiebung“
  - mit erweitertem, angepassten Siebsatz (17 – 20 Siebe)
  - ➔ hinreichend genaue  $d_g$ -Bestimmung
    - unter Anwendung der klassenbezogenen Dichteverteilung
- vorab Nassabtrennung mit quantitativer Anteilsbestimmung  $SA_{\leq 0,063 \text{ mm}} \& > 20 \text{ mm}$
- Ausbau teufendifferenziert mit Kompromissfindung,  
optimiert auf Schicht mit größtem  $d_g$ -Wert (bzw. „höchstem  $k_f$ -Wert“)

## wissenschaftlich

- Probenqualität: Entnahmekategorie „A“ Güteklasse „1“
- Korngrößenuntersuchung digital „Dynamische Bildanalyse“
  - z. B. mit Camsizer® (Simulation bis zu 3.000 Siebe)
  - ➔ präzise  $d_g$ -Bestimmung
- vorab Nassabtrennung erforderlich (technisch bedingt / erforderlich)
- Ausbau angepasst auf jede Sedimentschicht / wie „praxisgerecht“

...  $k_f$ -Wert in Abhängigkeit  $SA \leq 0,063 \text{ mm}$ ,  
klassenbezogene Dichteverteilung,  
hydraulische Kette ...

## Literatur zur Vertiefung dieses Vortrages

5.6.3	Schüttgutbemessung .....	292
5.6.3.1	Grundlagen .....	292
5.6.3.2	Modelltheorien zur Bestimmung der Schüttkorngröße.....	296
5.6.3.3	Historie der Schüttgutbemessung.....	310
5.6.3.4	Aufgabe von Ringraumschüttungen im Festgestein.....	319
5.6.4	Schüttkornbestimmung nach DVGW-Merkblatt W 113.....	321
5.6.4.1	Entwicklung der Bestimmungsmethoden .....	321
5.6.4.2	Empfehlungen zur Schüttkornbestimmung .....	331
5.6.4.3	Überprüfung der Schüttgutbestimmung mit der „hydraulischen Kette“	345
5.6.4.4	Darstellung der Ergebnisse zur Schüttkornbestimmung .....	356

**2017**

**9., vollständig überarbeitete Auflage**

Christoph Treskatis

# Bohrbrunnen

Planung | Ausbau | Betrieb



## 13. Berlin-Brandenburger Brunnentage

Potsdam 04./05.06.2018



Quelle: WhatsApp Lothar Schoka vom 27.03.2018

### Korngrößenverteilung für die Schüttkornbemessung

wissenschaftlich → praxisgerecht ← Praxis

mit Nassabtrennung für Sedimentanteil  $\leq 0,063$  mm &  $> 20$  mm  
Trockensiebung für Sedimentanteil 0,063 mm bis 20 mm  
 $d_g$ -Bestimmung aus klassenbezogener Dichteverteilung