

Bedeutung und praxismgerechte Bestimmung von Bodenkennwerten für den Brunnenbau

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

Keywords

Bodenkennwerte, Brunnenbau, Boden, Schüttgüter nach DIN 4924 und Glaskugeln, Digitale Partikelmessung mit dynamischer Bildanalyse, Korngröße, Korndurchmesser, $X_{c\ min}$, X_{area} , $X_{Fe\ max}$, Kornform, b/l, SPHT, Conv, Symm, Lagerungsart, Porenanteil, Durchlässigkeit, Schüttgut-Dimensionierung, Brunnenalterungsart Schüttgut-Setzung, Erosion, Suffosion, Kolmation, Brunnenlebenszeit

Übersicht	Seite
Einleitung	02
Wechsel von der zwei- zur dreidimensionalen Betrachtungsweise	04
Wichtige Bodenkennwerte für den Brunnenbau	
Bestimmung des d_g gemäß DVGW MB W 113	08
Durchlässigkeitsbeiwert	10
Bestimmung von Bodenkennwerten für den Brunnenbau	
Digitale Partikelmessung mit dynamischer Bildanalyse	14
Beschreibung der Partikel-Messtechnik	15
Partikel-Durchmesser	16
Partikelmodelle $X_{c\ min}$ – X_{area} – $X_{Fe\ max}$	18
Partikel-Form	21
Messung des Porenanteils	23
Weitere Untersuchungen von Böden und Schüttgütern	25
Anwendung der Kennwerte im Brunnenbau	
Zielvorgaben	25
Schüttgut-Dimensionierung	
a. aktuelle Schüttgut-Bemessung	25
b. neue Schüttgut-Bemessung	26
„Hydraulische Kette“	28
Exkurs - Brunnenalterungsart „Schüttgut-Setzung“	32
Ausblick	36
Zusammenfassung	37

Einleitung

Die Bestimmung von Bodenkennwerten für den Brunnenbau ist ein Teilgebiet aus dem Bereich der Ingenieurgeologie und Hydrogeologie. Zur Bestimmung der Partikel-Form und Lagerungsbedingungen für nichtbindige Böden werden Mess- und Anwendungsmöglichkeiten neuer Messtechniken und –methoden seit August 2008 in einem Kooperationsvorhaben der Technischen Universität Berlin, Fachgebiet Ingenieurgeologie (Leitung Prof. Dr. J.Tiedemann) und Fachgebiet Hydrogeologie (Leitung Prof. Dr. U.Tröger) sowie der IBB-Berlin durchgeführt. Aufgabe der IBB-Berlin ist es dabei, Brunnenbau-relevante Parameter exakter zu bestimmen und zusätzlich neue Erkenntnisse zur Optimierung des Brunnenbaus zu erhalten.

Derzeit werden diverse (Forschungs-) Vorhaben durchgeführt, die sich aus unterschiedlicher Veranlassung / Zielsetzung im Kontext mit der Leistungsfähigkeit von Brunnen befassen (vgl. Tab. 1).

Tabelle 1 aktuelle (Forschungs-) Vorhaben zur Brunnenbau-Optimierung

Titel	Ausführung	Finanzierung	Ziel(e)	Sonstiges
<i>Abstützung von Bohrlöchern zur Wassergewinnung – Glaskugeln als Verfüll-, Stütz- bzw. Filtermaterial für den modernen Brunnenbau; Untersuchung des Sandrückhalteverhaltens (Filterwirkung) der Glaskugeln im Vergleich zu Kies, Verockerungsneigung der Glaskugeln in Brunnen und unter Laborbedingungen, Einbauverhalten der Glaskugeln in gebohrten Brunnen</i>	Ochs Bohrgesellschaft mbH (Nürnberg), Sigmund Lindner GmbH (Warmensteinach), Bieske und Partner Beratende Ingenieure GmbH (Lohmar)	Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie	Förderung des Produktes „Glaskugeln“	Patentanmeldung (03.09.2007) „Verwendung von Glaskugeln zur Füllung des Ringraumes zwischen Filterrohr und Bohrlochwand bei Bohrungen zur Wassergewinnung“
<i>Durchführung von Filterversuchen – Wissenschaftliche Untersuchungen zur Optimierung der Brunnenfilter</i>	RWTH Aachen, Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft	RWE Power AG (Essen)	Optimierung des Brunnenausbaus (Filterrohre und Filterkies) für die Verhältnisse im Tagebau	
<i>Intensiventsandung / Hochleistungsentsandung (HLE)</i>	GCI GmbH (Königs Wusterhausen), pigadi GmbH (Berlin), Teforec GmbH (Moers)	?	Förderung des Produktes / der Dienstleistungsausführung mit „Symmetrischer Doppelkolbenkammer“	Patentanmeldung (23.10.2007) „Vorrichtung und Verfahren zum Aktivieren oder Reinigen von Brunnen“
<i>WellMa: Betrieb und Pflege von Trinkwasserbrunnen zur Optimierung der Leistung und der Wasserqualität – Phase 1 und 2 in Ergänzung mit dem Projekt WellMaDNA</i>	Phase 1: Kompetenzzentrum Wasser (Berlin), Freie Universität Berlin - AG Hydrogeologie, Technische Universität Berlin – AG Mikrobiologie, pigadi GmbH (Berlin), Umwelttechnik Dr. Bartetzko GmbH (Berlin), Kiwa Water Research (NL) # Phase 2: Kompetenzzentrum Wasser (Berlin), Freie Universität Berlin - AG Hydrogeologie, Technische Universität Berlin – AG Mikrobiologie, pigadi GmbH (Berlin)	Veolia Water, Berliner Wasserbetriebe	Untersuchung der Alterungsursachen speziell bei Berliner Brunnen mit Methodenempfehlungen für Bau, Betrieb und Instandhaltung dieser Brunnen	Phase 1 in 12.2008 beendet
<i>Untersuchung zur Bewertung von Gerätetechnik auf die Wirksamkeit in der Kiesschüttung</i>	Dresdner Grundwasserforschungszentrum e.V.	DVGW (Bonn), E+M Bohr GmbH (Hof), IBB GmbH (Berlin), DGC GmbH (Dresden)	Untersuchung mechanischer Regenerierverfahren zur Aufnahme in das DVGW-Regelwerk	DVGW-F&E-Vorhaben W 55/99 - Abschlussbericht Vers. 1 in 06.2002 Abschlussbericht Vers. 2 in 07.2003
<i>Partikel-Form & -Lagerungsbedingungen von nichtbindigen Böden</i>	Technische Universität Berlin - FG Ingenieurgeologie & FG Hydrogeologie, IBB GmbH (Berlin)	Eigenmittel, Studien- und Abschlussarbeiten, Dissertationen, WVU- und Industriekooperationen	Verbesserung der Datengrundlage für die Baugrundbeurteilung # Brunnenbau: Optimierung der Schüttgut-Dimensionierung (DIN 4924 & Glaskugeln) # Ausführung von Messungen zur Bestimmung von Kennwerten für Boden und Brunnenbau-Schüttgüter	

Auflistung ohne Anspruch auf Vollständigkeit; Reihenfolge ohne Gewichtung der Bedeutung

Der forcierte Einsatz von Glaskugeln als Schüttgut für den Brunnenbau stellt besondere Anforderungen an die exakte Bestimmung von Bodenkennwerten; insgesamt ist aber bei jeder Schüttgut-Fehldimensionierung, also nicht nur bei Glaskugeln, die Brunnenbau-Wirtschaftlichkeit in Frage gestellt.

Zur (besseren) Bestimmung der erforderlichen Bodenkennwerte für die Schüttgut-Dimensionierung steht heute die Digitale Partikelmessstechnik mit dynamischer Bildanalyse mit Anwendung des x_{area} -Partikelmodells zur Bestimmung des maßgebenden Korndurchmessers und der Formparameter b/l (Quotient Breite zu Länge), SPHT (Sphärizität), $Symm$ (Symmetrie) und $Conv$ (Konvexität) zur Verfügung.

Die Bestimmung des maßgebenden Korndurchmessers im Kugelmodell $x_{c\ min}$ durch Siebanalysen kann mit der neuen Messtechnik und dem geänderten Partikelmodell realitätsnäher substituiert werden.

Ein weiterer, wichtiger Parameter für die Schüttgut-Dimensionierung ist die Messung des Porenanteils bei partikelspezifisch lockerer und dichter Lagerungsart unter Berücksichtigung der Viskositätsbedingungen der Schüttgut-Einbaubedingungen. Hier hat sich die Bestimmungsmethode nach DIN 18126 (1996) „Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung“ speziell zur Messung der lockeren Lagerung unter Brunnenbaubedingungen als nur bedingt geeignet herausgestellt und ein geändertes Messverfahren wurde entwickelt; dieses Messverfahren wird derzeit in einer umfassenden Vergleichsstudie getestet.

Zusätzlich ist auch die mechanische Beständigkeit des Schüttgutes von Bedeutung; dabei ist jedoch nicht der Vergleich der maximalen Bruchlast eines unspezifisch ausgewählten Partikels sondern das Bruchverhalten probenrepräsentativ-ausgewählter Partikel unter verschiedenen Belastungssituationen bewertungsentscheidend. Vorversuche zur Beurteilung der mechanischen Schüttgut-Beständigkeit unter unterschiedlichen Belastungssituationen haben signifikante Unterschiede bei gleicher Spezifikation nach DIN 4924 jedoch unterschiedlicher Herkunft gezeigt; systematische Reihenuntersuchungen sind hierzu in Vorbereitung.

Als mitentscheidend für die optimale Schüttgut-Dimensionierung hat sich der Wechsel von der zweidimensionalen hin zur dreidimensionalen Betrachtung unter Berücksichtigung regelloser Strukturen beeinflusst durch die **Form**parameter der jeweiligen Bodenschicht und der unterschiedlichen Schüttgüter, z.B. nach DIN 4924 bzw. Glaskugeln herausgestellt. Derzeit wird dieser Zusammenhang kausal in Laborversuchen und im praktischen Einsatz mit kooperierenden Brunnenbau-Unternehmen überprüft.

Weiterer Bestandteil der Ausbau-Planung ist die Überprüfung der „hydraulischen Kette“, bei der in Fließrichtung (Boden → Schüttgut → Filterrohr) kein durchflussbehindernder Rückgang des Durchlässigkeitsbeiwertes auftreten darf. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass überhöhte Steigerungen in dieser hydraulischen Kette für den Neubau-Pumptest irrelevant sind, aber für die nachfolgende Brunnenalterung (z.B. „biologische Verockerung“ und „Kolmation“) ein wesentliches Kriterium für die Verzögerung des Leistungsrückgangs darstellen.

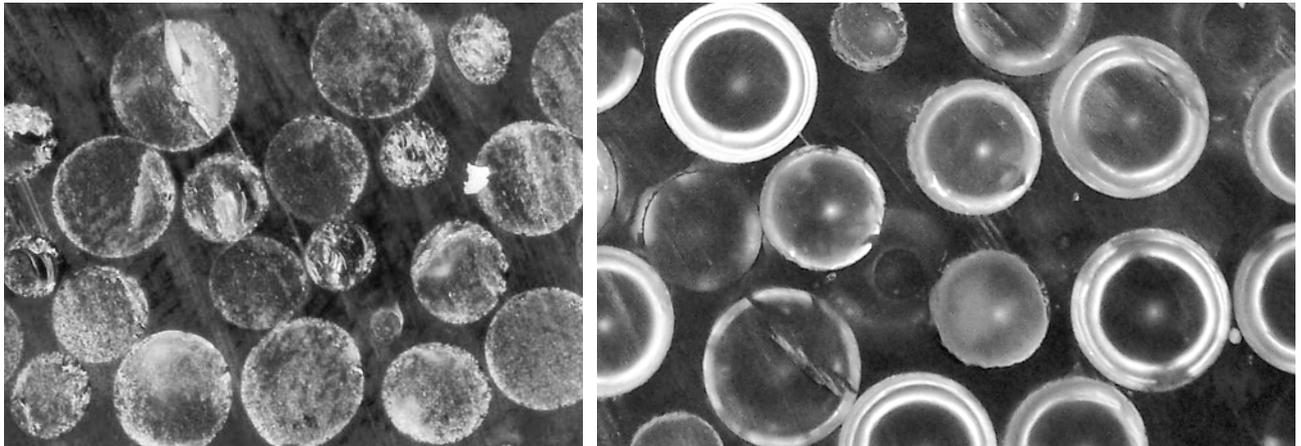
Die tiefendifferenziert berechnete Schüttgut-Dimensionierung stellt immer nur Basiswerte für eine erforderliche Kompromissfindung, die die technischen und wirtschaftlichen Ausführungsmöglichkeiten berücksichtigt, zur Verfügung. Die Überprüfung der „hydraulischen Kette“ stellt dabei sicher, dass die Voraussetzungen der Forderung nach einer möglichst langen Brunnenlebenszeit geprüft / eingehalten werden.

Als zusätzliches Ergebnis der Untersuchungen wird die „neue“ Brunnenalterungsart „Schüttgut-Setzung“ definiert.

Wechsel von der zwei- zur dreidimensionalen Betrachtungsweise

Zur Visualisierung der Lagerungsverhältnisse wurden auf Vorschlag von Dr. Lutz Wittmann, FIGAWA, in Anlehnung an seine Dissertation „Filtrations- und Transportphänomene in porösen Medien“ (1980) Proben vergossen und nach Aushärtung aufgeschnitten.

Im aktuellen Vorhaben wurden zunächst Glaskugeln, d.h. Partikel mit gleichem Durchmesser, für die Schnittversuche eingesetzt.



Schnitt durch Verguss mit Glaskugeln einer Korngruppe mit geringer Durchmesser-Varianz; verdichtete Lagerung
Bild 1a **3,8 bis 4,4 mm** **Bild 1b** **11,5 bis 12,5 mm**

Die Bilder 1a und 1b lassen zunächst glauben, hier wären Partikel unterschiedlichen Durchmessers zu sehen. Da jedoch die Partikel alle den ähnlichen Durchmesser aufweisen, wird offensichtlich, dass eine signifikant regellose Struktur in Verbindung mit Stapelfehlern und Partikelbrückenbildung vorliegt. Dementsprechend liegen die Partikelmittelachsen nicht in denselben Ebenen und die Porenquerschnitte sind sehr unregelmäßig.

Die Bilder 2a und 2b zeigen Glaskugeln der Korngruppen 11,5 bis 12,5 mm und 1,0 bis 1,3 mm ineinander bzw. gemischt, d.h., bei unterschiedlichen Genese-Bedingungen:

- Für Bild 2a wurde ein 2.000 ml Messkolben mit 1.000 ml Glaskugeln locker gefüllt; der Porenanteil lag wegen Randgängigkeitsproblematik von Kugeln anliegend am Probengefäß geringfügig erhöht bei 41 %. In diese Glaskugelschüttung wurden Glaskugeln 1,0 bis 1,3 mm sukzessive bis zur „Sättigung“ des Porenraumes der größeren Korngruppe eingerieselt, ohne das Gesamt-Volumen von 1.000 ml zu erhöhen. Der Porenanteil sank infolge der Zugabe auf ca. 21 %. Der Gewichtsanteil der größeren Fraktion betrug ca. $\frac{3}{4}$ der Gesamtmasse, der der feinen Fraktion dementsprechend gerundet $\frac{1}{4}$ der Gesamtmasse.
- Für Bild 2b wurden die beiden getrennt ineinander liegenden Fraktionen aus Bild 2a im Messkolben mehrfach hin- und hergedreht, wobei sich ohne Änderung der Masse das Gesamt-Füllvolumen auf 1.200 ml erhöhte. D.h., die vorher eindeutig fraktale Lagerung (große Partikel mit ausschließlich im Lückenvolumen eingelagerten kleinen Partikeln) haben nach der Mischung teilweise Positionen zwischen den Berührungspunkten der großen Partikel eingenommen und damit den Porenanteil (unter bleibender Berücksichtigung des Randgängigkeitsproblems) auf 34 % erhöht.

Die vergleichende Betrachtung von Bild 2a und 2b spiegelt den veränderten Porenanteil bzw. das um mehr als 60 % erhöhte Speichervolumen nicht wider und auch der Porenanteil aus Bild 3 (Kiese nach DIN 4924 mit Korngruppe 2 – 3,15 mm), bei mittlerer Lagerung mit gerundet 39 % gemessen, lässt sich im Vergleich zu den Porenanteilen der Bildern 2a und 2b nur im Kontext einer räumlichen Betrachtungsweise erklären.

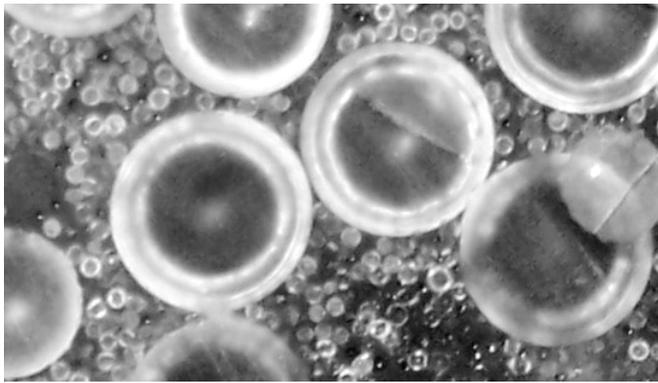


Bild 2a

Schnitt durch Verguss mit Glaskugeln der Korngruppen 11,5 – 12,5 mm und 1,0 – 1,3 mm
fraktal ineinander gelagert; V = 1.000 ml
Porenanteil ca. 21 %

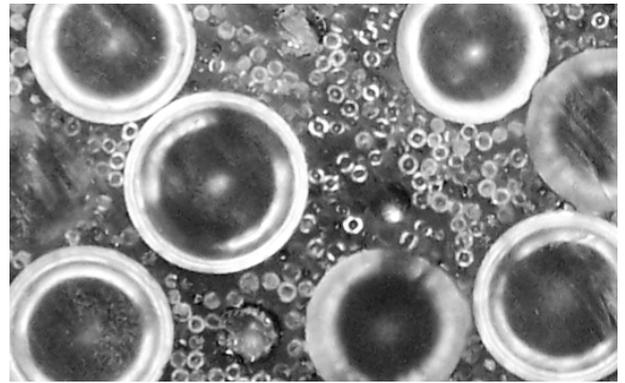


Bild 2b

gemischt, V = 1.200 ml
Porenanteil ca. 34 %

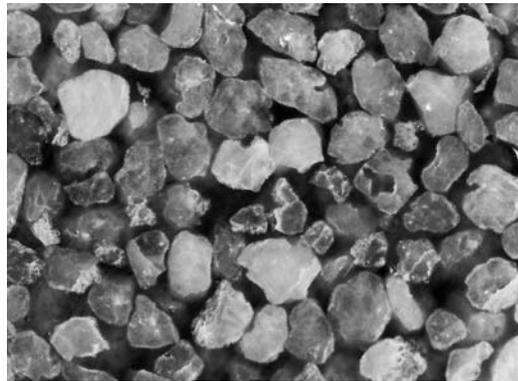


Bild 3 Schnitt durch Verguss mit Kies nach DIN 4924 Korngruppe 2 – 3,15 mm
Porenanteil ca. 39 %

Aus den in den Bildern 1 bis 3 dargestellten Erscheinungen ergibt sich ein Bedarf, die üblicherweise zweidimensionalen, idealisierenden Stapelungsmodelle (Bild 4) durch dreidimensionale Betrachtungen zu ersetzen, da hiervon Maßnahmen, die mit dem Bau und Betrieb von Brunnen einhergehen, unmittelbar betroffen sind.

Unter Betrachtung der Bilder 1a und 1b ist nunmehr auch nachvollziehbar, warum Glaskugeln den theoretischen Wert der dichtesten Kugelpackung mit 25,95 % real nicht einnehmen können. Der Wert der lockersten Kugelpackung mit 47,64 % ist eben wegen der Kugelform mit (Glas-) Kugeln stapeltechnisch ebenfalls real nicht erreichbar.

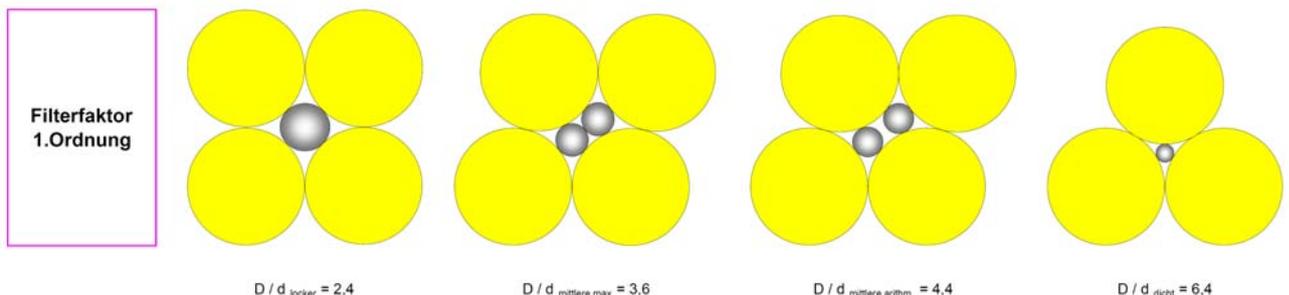


Bild 4 „klassische“, zweidimensionale Betrachtung von Partikeln als Kreise;
Partikelmittelachse in einer Ebene mit gleichmäßigen Porenquerschnitten

Die erkannten Realbedingungen der Partikellagerung bedürfen nunmehr räumlicher Modelltheorien und Berechnungen bei zugleich sehr unregelmäßigen Porenquerschnitten bzw. Lagerungsstrukturen.

Eine weitere Komponente des räumlichen Porenanteils stellt die Kornform dar. Infolge der Abweichung des natürlichen Bodenkorns von der Kugelform erfolgt eine relative Erhöhung des Porenanteils (Randbedingung: kleiner Ungleichkörnigkeitsfaktor; keine bindigen Anteile).

Nachfolgend einige Angaben zu in Vorversuchen gemessenen Porenanteilen für die Schüttgüter Glaskugeln und Sande & Kiese nach DIN 4924 sowie für Böden repräsentativer WVU-Standorte.

Diese Messungen dienten der Klärung partikelspezifischer Porenanteile unterschiedlicher Böden und Schüttgüter für die Lagerungsbedingungen „locker“ und „dicht“ sowie der Entwicklung einer vereinfachten Porenanteils-Messtechnik, die zugleich die Brunnenbau-Bedingungen bei den Messung berücksichtigt (vgl. Kap. Porenanteil).

Messungen mit Glaskugeln ergaben für die partikelspezifisch dichte Lagerung einen Porenanteil 34 ... 35 % und für die partikelspezifisch lockere Lagerung einen Porenanteil 37 ... 40 % (dicht → locker + 3 ... 5 %).

Im Verständnis der Dreidimensionalität weisen Schüttgüter nach DIN 4924 als Gemisch mit einem relativ geringen C_U entsprechend ihrer Form (speziell b/l und SPHT) für die partikelspezifisch dichte Lagerung ein um etwa 1 ... 3 % größeren Porenanteil als Glaskugeln auf (= 35 ... 38 %) und haben damit eben wegen ihrer Form einen durchaus erheblichen größeren Porenanteil bei lockerer Lagerung als Glaskugeln.

Bei der partikelspezifisch lockeren Lagerung von Schüttgütern nach DIN 4924 hat die Art der „Lagerungsherstellung“ auf den maximalen Porenanteil den maßgebenden Einfluss;

- „trocken hergestellt“ (gemäß DIN 18126) werden Porenanteile für kornspezifisch lockere Lagerungen im Bereich 40 ... 45 % erreicht,
- „nass hergestellt“ (nach „Hausnorm“), d.h. unter Simulation der Medienviskosität beim Schüttgut-Einbau in den Ringraum zwischen Filterrohr und Bohrlochwand Brunnenbau sowie in Abhängigkeit der Partikel-Form / -Inhomogenität, werden Porenanteile gegenüber „trocken hergestellt“ + 1... 3 % gemessen.

Ähnliche Porenanteile wie die Schüttgüter nach DIN 4924 zeigen Böden mit einem geringen C_U .

Für Böden mit größeren C_U -Werten ($>$ bis $>> 5$) werden zwei Varianten beobachtet:

- Einerseits kann eine Fraktalitäts-Bildung vorliegen, bei der in einem gröberen Skelett feinere Partikel eingelagert sind.
Dabei werden entsprechend der eingelagerten Partikelgröße, der Formbedingungen sowie der physikalischen Genese für die dichte Lagerung Porenanteile um 20 % und geringer gemessen, während die partikelspezifisch lockere Lagerung derselben Probe einen Porenanteil 7 ... 10 % höher als die dichte Lagerung aufweist.
- Andererseits treiben bindige Boden-Anteile aufgrund ihres plattigen Partikelbaus den Porenanteil der partikelspezifisch dichten Lagerung auf Werte oberhalb des Wertes der theoretisch lockersten Kugelpackung (47,64 %) und können Werte $>$ bis $>> 50$ % einnehmen.
Der Porenanteil der lockeren Lagerung liegt dann ebenfalls 7 ... 10 % höher als bei der probenzugehörigen dichten Lagerung.

Exakte Werte des Porenanteils bei partikelspezifisch lockerer und dichter Lagerung können nur durch (geeignete, die Realbedingungen simulierende) Messungen für jede Probe (Boden oder Schüttgut) festgestellt werden, um dann in die Berechnungen einzugehen.

Damit ist auch gezeigt,

- warum die Angaben zum Porenanteil von Beyer und Schweiger (1969) zum aus der Ungleichkörnigkeit abgeleiteten Wert für lockere – mittlere – dichte Lagerung die bereits erwähnten Gültigkeitsgrenzen aufweisen (vgl. Kap. „Durchlässigkeit“);
- warum die Behauptung, dass Glaskugeln einen höheren Porenanteil als Sande und Kiese nach DIN 4924 aufweisen, falsch ist.
Hierbei ist auch noch anzumerken, dass Glaskugeln gerade bei Berücksichtigung der viskositätsabhängigen Einbaubedingungen sofort eine dichtere Lagerung als Sande und Kiese nach DIN 4924 einnehmen und auch sehr viel einfacher / eher in die partikelspezifisch dichteste Lagerungsart überführt werden können.
- warum die bisherigen Berechnungen zur Schüttgut-Dimensionierung bei zweidimensionaler Betrachtung in der Praxis immer wieder Probleme für Kolmation oder Sandführung aufweisen / analog bei Baugrund-Berechnungen große Sicherheitszu-/abschläge erfordern.

Wichtige Bodenkennwerte für den Brunnenbau

Viele Bodenkennwerte werden für den Brunnenbau nicht genutzt, weil ihre Bestimmung

- zu aufwendig
(Zeit, Verfügbarkeit **und** Spezialwissen)
 - und / oder
 - zu ungenau
(ungeeignete Probennahme – Probenmenge - Meßmethode - Auswerte-Methode/-Software)
- ist.

Für den Brunnenbau ist die Bodenkennwert-Bestimmung der nachfolgenden Parameter von wesentlicher Bedeutung.

Bestimmung des d_g gemäß DVGW MB W 113 (2001)

Die Probensiebung (Siebanalyse) ist wegen der zumeist zu großen Abstände der Maschenweiten für die Bestimmung des maßgebenden Bodenkorndurchmessers d_g nur bedingt geeignet, da nicht genügend Siebmaschen-Differenzierungen erreicht werden.

Tabelle 2 **Schüttgut-Auswahl nach DVGW MB W 113 (2001)**

Siebsätze nach DVGW MB W 113 (2001)	d_g W 113: Mittelwert des Maximums der Dichteverteilung und des nächstgrößeren Korndurchmessers	W 113: $D_s = d_g \cdot (5 + C_U)$	Schüttgut-Auswahl
[mm]	d_g [mm]	d_g $C_U = 1$ $C_U = 5$ D_s [mm]	D_s Korngruppen gemäß DIN 4924 (1998) $C_U = 1$ $C_U = 5$
0,063	0,094	0,094 0,564 0,940	0,4 ... 0,8 mm 0,71 ... 1,25 mm
0,125	0,188	0,188 1,125 1,875	0,71 ... 1,25 mm oder 1 ... 2 mm 1 ... 2 mm
0,25	0,375	0,375 2,250 3,750	2 bis 3,15 mm 3,15 bis 5,6 mm
0,5	0,750	0,750 4,5 7,5	3,15 bis 5,6 mm 5,6 bis 8 mm
1	1,5	1,5 9,0 15,0	8 bis 16 mm 8 bis 16 mm
2	3,0	3,0 18,0 30,0	16 bis 31,5 mm 16 bis 31,5 mm
4	6,0	6,0 36,0 60,0	
8	12,0	12,0 72,0 120,0	
16	23,75	23,75 142,5 237,5	
31,5			

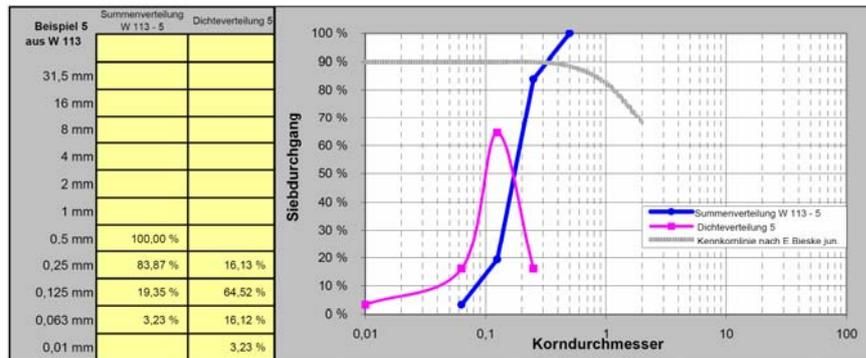
W 113: $C_U > 5 \implies D_s = d_g \cdot (5 + 5)$

d_g [mm] maßgebender Boden-Korndurchmesser
 D_s [mm] maßgebender Schüttgut-Korndurchmesser für Filtersande/-kiese nach DIN 4924
 C_U [-] Ungleichkörnigkeitsfaktor (d_{60} / d_{10})

Aus Tabelle 2 ist ersichtlich, dass die Auswahl der Siebsätze gerade im Bereich feinkörniger Böden bzw. Böden mit relevanten Feinkornanteilen mit einem tatsächlichen d_g 0,063 ... 0,5 mm (Fein- und Mittelsand) viel zu

weit auseinander liegen und sich dadurch für real sehr „breite“ d_g – Bereiche nach W 113 „starre Fest-Werte“ ergeben, die dann in der Weiterberechnung wiederum in die nur sehr gering differenzierten, hydraulisch sehr unterschiedlichen Korngruppen nach DIN 4924 (1998) übergehen.

Bild 5 zeigt die Schwierigkeiten der d_g – Mittelwert-Bestimmung nach W 113 (2001) mit Siebanalysen, wenn nicht genügend Siebe / im d_g – Bereich ungeeignete Maschenweiten eingesetzt werden.



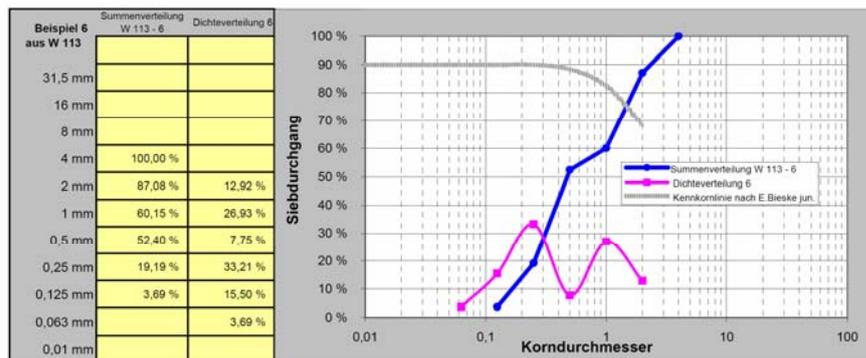
einfach gekrümmte Summenkurve mit eindeutigem Maximum der Dichteverteilung

$$d_{60} = 0,19 \text{ mm} \quad d_{10} = 0,091 \text{ mm} \quad C_U = 2,1$$

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

$$D_s = 0,1875 \text{ mm} \cdot (5 + 2,1) = 1,33 \text{ mm} \quad \text{Auswahl DIN 4924 (1998) 1 ... 2 mm}$$

© IBS-Berlin, 2010

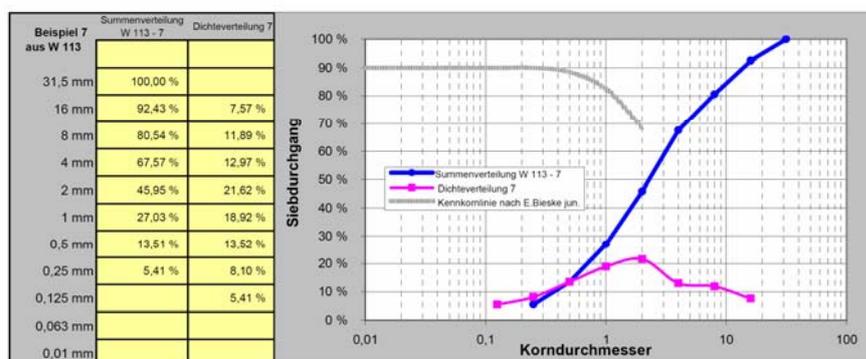


doppelt gekrümmte Summenkurve mit zwei Maxima der Dichteverteilung

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

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

$$D_s = 0,375 \text{ mm} \cdot (5 + 5) = 3,75 \text{ mm}$$



Summenkurve ohne eindeutiges Maximum der Dichteverteilung

$$d_{60} = 3,15 \text{ mm} \quad d_{10} = 0,38 \text{ mm} \quad C_U = 8,3 \quad \text{W 113: } C_U > 5 \Rightarrow C_{U \max} = 5$$

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

$$D_s = 1,12 \text{ mm} \cdot (5 + 5) = 11,2 \text{ mm} \quad \text{Auswahl DIN 4924 (1998) 8,0 ... 16,0 mm}$$

Bild 5 d_g W 113 (2001) Bestimmung aus Kornsummenkurve und Dichteverteilung mit Siebanalyse
Mittelwert des Maximums der Dichteverteilung und des nächstgrößeren Korndurchmessers

Die W 113-Darstellung der Dichteverteilung ist zudem nur bedingt korrekt, da die zugehörigen Histogramme keine einheitlich gleiche Klassenbreite aufweisen und demzufolge die gemäß W 113 angenommenen Maxima nur stark eingeschränkt die realen Maxima aufzeigen.

Demgegenüber ist die „korrekte“ d_g -Bestimmung nach W 113 (2001) mit der Digitalen Partikelmessung / dynamischen Bildanalyse einfach, den Real-Wert abbildend und für beide Partikelmodelle, $x_{c\ min}$ und x_{area} , durchführbar (vgl. Bild 6); weitere Erläuterungen siehe Kapitel „Partikelmodelle $x_{c\ min}$ – x_{area} – $x_{Fe\ max}$ “.

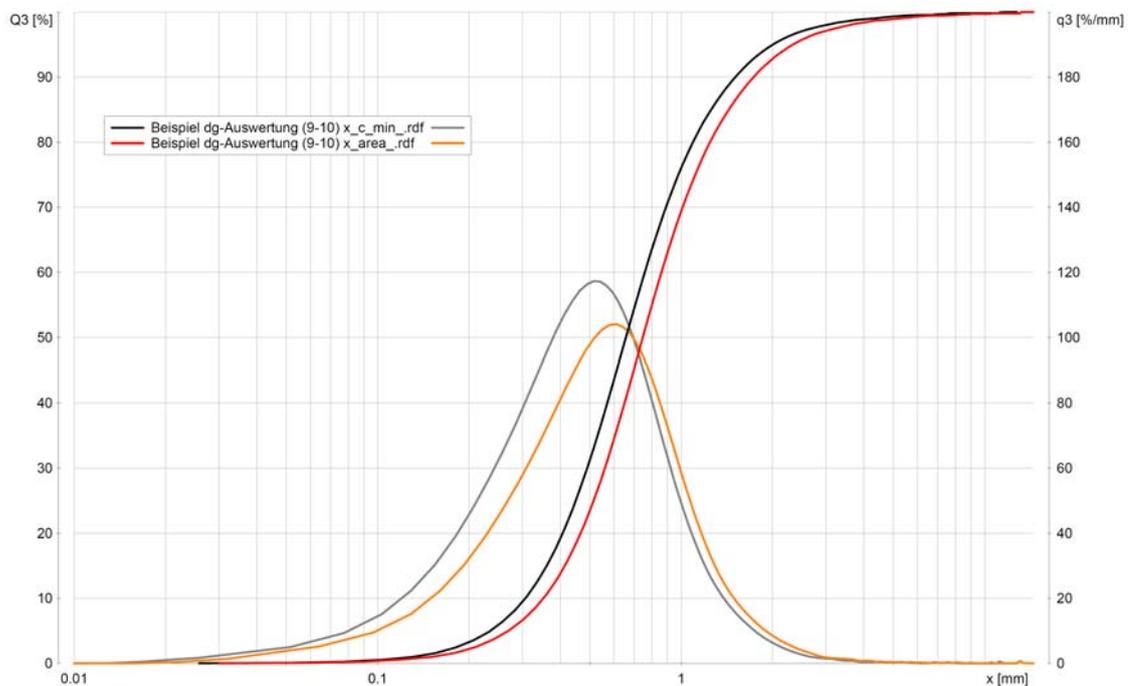


Bild 6 d_g W 113 (2001) Bestimmung aus Kornsummenkurve und Dichteverteilung mit digitaler Partikelmessung / dynamischer Bildanalyse

Bestimmung des realen d_g -Wertes direkt aus der Dichteverteilung für Partikelmodell $x_{c\ min}$ und x_{area}
Q3 = Summenverteilung, volumenabhängig # schwarz = $x_{c\ min}$ / rot = x_{area}
q3 = Dichteverteilung, volumenabhängig # grau = $x_{c\ min}$ / orange = x_{area}

Gerade bei der Schüttgut-Dimensionierung für den Glaskugel-Brunnenbau im Lockergestein liegen die grundsätzlichen Problembereiche „Sandführung“ und „Kolmation“ wegen der dichten Lagerungsart und der Formeigenschaften dieses Schüttgutes dicht beieinander und eine Dimensionierung „nach Erfahrung“ birgt ein hohes Risiko. Die Anwendung der Digitalen Partikelmesstechnik mit dynamischer Bildanalyse ermöglicht eine exakte d_g – Bestimmung tiefendifferenziert ausgewählter Bodenproben, um eine sichere Auswahl der „richtigen“ Glaskugel-Fraktion durchführen zu können.

Durchlässigkeitsbeiwert

Zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes wird überwiegend, beginnend mit Hazen (1893), der Partikeldurchmesser bei 10%-Gewichtsanteil (d_{10}) als Basis zur Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes aus Kornsummenlinien verwendet.

Kozeny (1927; später in Modifizierung mit Carman, 1948, und mit Köhler, 1965) führte zur Durchlässigkeitsbeiwert-Berechnung weitere Basiswerte (u.a. die spezifische Oberfläche, die Porenzahl, die wirksame Korn-

größe, ermittelt aus mehreren Kornklassen, etc.) ein; Nachteil dieser Berechnung(en) ist, dass den Partikeln eine Kugelform unterstellt wird, und der hohe Bestimmungs- und Berechnungsaufwand. Deshalb hat sich diese Berechnungsmethode im Brunnenbau nicht durchgesetzt.

Die häufig verwendete Durchlässigkeitsberechnung nach Beyer hat dessen Veröffentlichung von 1964 „Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve“ zur Basis (auch im DVGW-Regelwerk zitiert) und berechnet mit dem d_{10} den k_f -Wert „nur“ bei mittlerer Lagerungsdichte in Abhängigkeit des Ungleichkörnigkeitsfaktors und des daraus resultierenden Proportionalitätsfaktors „C“; für C werden tabellarisch Werte in den Bereichen C_U 1 bis 1,9 = 0,011 / 2,0 bis 2,9 = 0,010 / 3,0 bis 4,9 = 0,009 / 5,0 bis 9,9 = 0,008 / 10,0 bis 19,9 = 0,007 und 20 = 0,006 angegeben.

1969 modifizierte Beyer gemeinsam mit Schweiger („Zur Bestimmung des entwässerbaren Porenanteils der Grundwasserleiter“) diese Berechnungsmethode mit dem Eingang der Lagerungsart „locker – mittel – dicht“ in den Proportionalitätsfaktor „C“.

Die benötigten Basiswerte für d_{10} und C_U zur Berechnung der lagerungsabhängigen Durchlässigkeitsbeiwerte nach Beyer & Schweiger (1969) sind einfach zu bestimmen (Siebanalyse; besser Digitale Partikelmessung / dynamische Bildanalyse). Der gesuchte Proportionalitätsfaktor „C“ lässt sich aus Bild 7 einfach ermitteln.

Nach den Ergebnissen verschiedener Arbeiten (z.B. D.Lang „Durchlässigkeit von Böden - übliche Verfahren und deren Überprüfung im Labor“, Diplomarbeit FH Gießen 2008 und N.Dupke „Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes aus Korngrößenverteilungskurven“, Semesterarbeit TU Berlin 2009) zeigt sich die Berechnungsmethode nach Beyer & Schweiger (1969) für den Durchlässigkeitsbeiwert mit Ergebnisangabe bei verschiedenen Lagerungsarten in Abhängigkeit des Ungleichkörnigkeitsfaktors für Bemessungen beim Brunnenbau als am besten geeignet:

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

mit C = Proportionalitätsfaktor in Abhängigkeit C_U und Lagerungsart

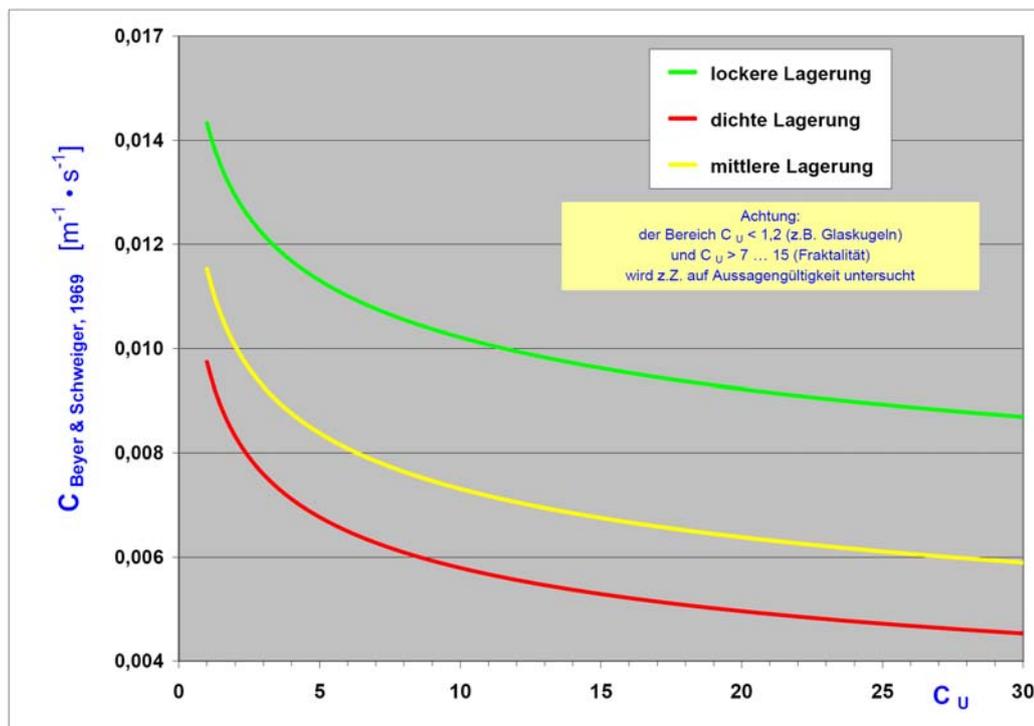


Bild 7 Proportionalitätsfaktor „C“ nach Beyer & Schweiger (1969) in Abhängigkeit der Lagerungsdichte und des Ungleichkörnigkeitsfaktors C_U

Besonders für relativierende Kreuzvergleiche (siehe Kap. „hydraulische Kette“) ist die Methode der Durchlässigkeitsbeiwerte nach Beyer & Schweiger (1969) zur Optimierung des Brunnenausbaus für die Berücksichtigung erwarteter Alterungsvorgänge sehr geeignet.

Im grafischen und tabellarischen Kreuzvergleich mit Berechnungen zur Durchlässigkeit werden die Vorteile der Methode nach Beyer & Schweiger (1969) offensichtlich:

- Bild 8 zeigt die prozentuale Durchlässigkeit jeweils für die Lagerungsarten locker – mittel – dicht in Abhängigkeit des Ungleichkörnigkeitsfaktors in Bezug auf eine Durchlässigkeit von 100 % bei $C_U = 1,25$.
- Tabelle 2 zeigt die signifikant unterschiedliche Durchlässigkeit desselben $d_{10} = 0,125$ mm bei unterschiedlichem $C_U = 1,5$ und 20 sowie Aufgliederung in die Lagerungsarten locker – mittel – dicht.

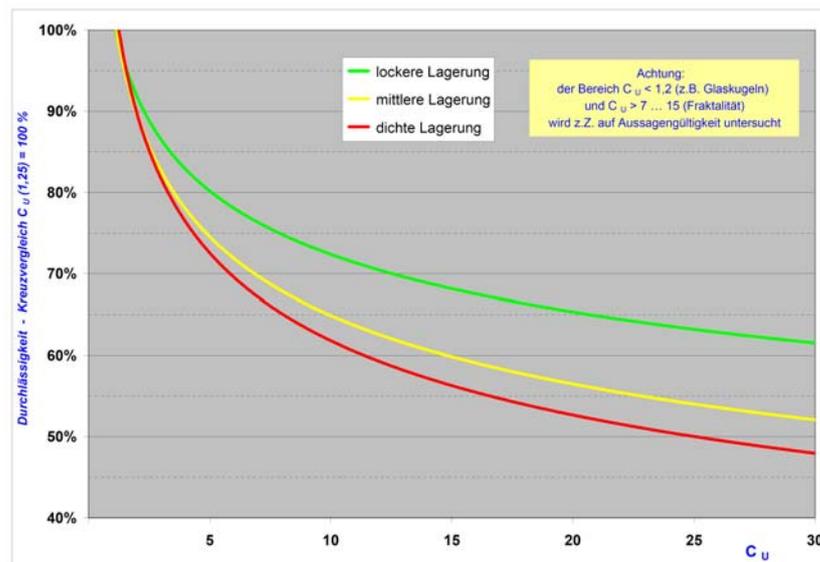


Bild 8 Veränderungen der Durchlässigkeit natürlicher Sedimente nach Beyer & Schweiger (1969) in Abhängigkeit des Ungleichkörnigkeitsfaktors C_U

- grafischer Kreuzvergleich der Lagerungsdichten locker, mittel, dicht mit $C_U(1,25) = 100\%$ -

Tabelle 2 Bedeutung der Durchlässigkeitsbeiwert-Bestimmung nach Beyer & Schweiger (1969) Randbedingungen: $d_{10} = \text{konst}$ # $C_U = 1,5$ bzw. 20 # Lagerungsart: dicht - mittel - locker

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

k_f Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
 $C_{\text{Beyer \& Schweiger}}$ Proportionalitätsfaktor [$\text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]; mit $C = f(C_U; \text{Lagerungsart})$
 C_U Ungleichkörnigkeitsfaktor [-]; mit $C_U = d_{60} / d_{10}$
 $d_{10}; d_{60}$ Partikeldurchmesser bei Index-% Gewichtsanteil [mm]; im Kornmodell $x_{c, \text{min}}$

d_{10}
0,125 mm

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

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

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

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

Gemäß Beyer & Schweiger (1969) kann entsprechend des Ungleichkörnigkeitsfaktors und der Lagerungsart locker – mittel – dicht auch der tatsächliche Porenanteil nach Bild 9 abgeschätzt werden.

Es werden jedoch Einschränkungen zu den Gültigkeitsbereichen der Porenanteil-Angaben nach Beyer und Schweiger (1969) angenommen:

- $C_U < \text{ca. } 1,2$
speziell bei Glaskugeln; Kontrollmessungen ergaben für die dichte Glaskugellagerung einen Porenanteil 34 .. 35 % und lockere Glaskugellagerung einen Porenanteil 37 ... 40 %; demgegenüber weisen Schüttgüter nach DIN 4924 als inhomogenes Gemisch entsprechend ihrer Form und bei einem relativ geringen C_U , i.a. 1,35 – 1,6, für die partikelspezifisch dichte Lagerung ein um etwa 1 ... 3 % größeren Porenanteil als Glaskugeln auf, = 35 ... 38 %, und bei partikelspezifisch lockerer Lagerung entsprechend Art der „Lagerungsherstellung“ (vgl. Kap. „zwei-/dreidimensionale Betrachtungsweise“) einen Porenanteil 40 ... 46 %.
- $C_U > 7 \dots 15$
Fraktalität bzw. bindige Anteile; hier werden Versatz-Sprünge im Kurvenverlauf vermutet.

Untersuchungen zur Verifizierung dieser Annahme(n), auch unter Berücksichtigung der dreidimensionalen Betrachtungsweise und der Kornform, werden derzeit durchgeführt.

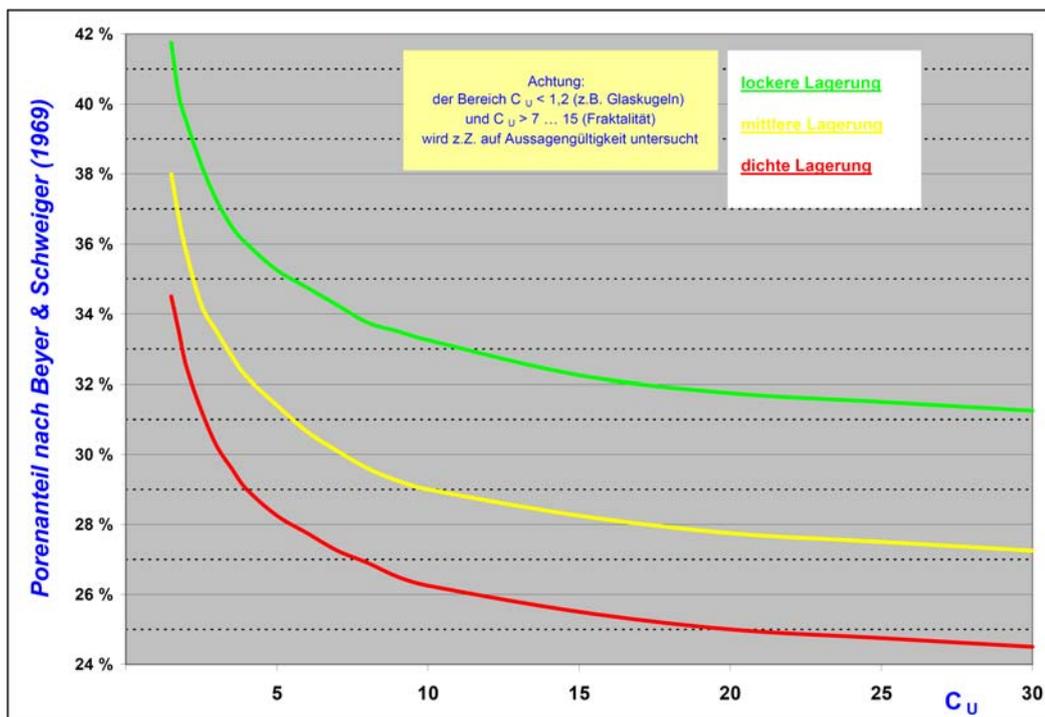


Bild 9 Porenanteil nach Beyer und Schweiger (1969) in Abhängigkeit der Lagerungsdichte und des Ungleichkörnigkeitsfaktors C_U

Bestimmung von Bodenkennwerten für den Brunnenbau

Digitale Partikelmessung mit dynamischer Bildanalyse

Zur geometrischen Beschreibung des Lockergesteins wird seit mehr als 100 Jahren die Kugelmodelltheorie bzw. die zeichnerische Darstellung als Schnitt durch die Mittelachse (= Kreis) angewendet.

Die Kugel zur theoretischen Beschreibung von Sedimenten wurde gewählt, weil bisher ausschließlich Messtechniken zur Verfügung standen, die für größere Mengen eines Bodens nur die Durchmesser-Summenverteilung messen konnten. Bedingt durch diese Messtechnik (Siebung) wurde zudem nur der geringste Partikel-Durchmesser gemessen und, durch die Beschränkung auf runde Geometrien, ein zweidimensionaler Form-Messfehler akzeptiert.

Die Digitale Partikelmessung mit dynamischer Bildanalyse wurde Mitte der 90er Jahre für die Produktions-Überwachung bzw. deren Qualitätskontrolle entwickelt, z.B. Pharmazie, Lebensmittel, Granulate und (auch) Glaskugeln (dort jedoch „nur“ zur Durchmesser-Produktionskontrolle). Die dynamische Bildanalyse kann inhomogene Proben annähernd vollständig in ihrer zweidimensionalen (Schattenprojektions-) Form erfassen und ihnen durch Berechnung von Rotationsellipsoiden eine dreidimensionale Form als Einzel-Partikel und in der Verteilung der Proben-Gesamtheit zuzuweisen.

Die (für die Anwendung im Brunnenbau neuartige) quantitative Beschreibung der Kornform erfolgt u.a. mit der Erfassung der Geometrie-Parameter Martin- und Feret-Durchmesser, der Sehnenlänge (kürzeste Sehne entspricht dem Ergebnis einer Siebung), der Breiten-/Längenverhältnisse, der Sphärizität, der Symmetrie und der Konvexität sowie der Parameter Kornvolumen und Oberfläche aus der Berechnung von Rotationsellipsoiden (vgl. Tabelle 3).

Die Kornform-Messergebnisse können unterschiedlich flächen-, volumen- und/oder anzahlbezogen in ihrer Summen- und Dichteverteilung sowie mit statistischen Auswertemethoden in einer frei wählbaren Kornklassen-Auftrennung bis Pixelgröße 15 µm im Messbereich (derzeit 0,03 mm bis 30 mm) mit theoretisch unbegrenzter Menge / Partikelanzahl in einer Messung quantifiziert werden. Zum Vergleich: mit Siebanalysen werden „nur“ geringste Durchmesser als Kugeln bestimmt (i. a. 7 bis 15 feste Kornklassen).

Zur Digitalen Partikelmesstechnik ist weiterhin die Messung mit Laserbeugung und die Mikroskopie mit digitaler Bildauswertung zu zählen.

Die Laserbeugung kann jedoch nur Durchmesser in begrenzter Messklasseneinteilung bestimmen, dafür aber auch bindige Anteile bis in den Nanobereich hinein. Diese Messtechnik wird z.B. für Messungen von Feinstpartikeln beim Brunnenanfahren (intermittierender Brunnenbetrieb) eingesetzt; für die Schüttgut-Dimensionierung ist die Laserbeugungs-Messtechnik wegen ihres nach oben hin eingeschränkten Messbereiches und der Tatsache, dass bindige Bereiche zur Wassergewinnung nicht verfiltert werden, von geringem Interesse. Die Mikroskopie mit (statistischer) digitaler Bildauswertung ist in der Probenmenge und damit der Messrepräsentativität beschränkt.

Zur Untersuchung der Kenngrößen für Partikeldurchmesser („Größe“) und der weiteren Partikelgeometrien („Form“) von nichtbindigen Böden und Brunnenbau-Schüttgüter stellt die Digitale Partikelmessung mit dynamischer Bildanalyse den „Stand der Technik“ dar; es wird angestrebt, diese Messtechnik zur Boden- und Schüttgutuntersuchung in die „Regeln der Technik“ zu überführen. Die „neue“ Messtechnik soll dazu beitragen, Dimensionierungsberechnungen durch differenzierte Kornformbeschreibungen realitätsnäher zu gestalten und dadurch auch eine bessere Datenbasis für unterschiedliche Anwendungszwecke, z. B. für einen wirtschaftlicheren Brunnenbau, zur Verfügung zu stellen.

Beschreibung der Partikel-Messtechnik

Für das Kooperationsvorhaben der TU Berlin FG Ingenieurgeologie / IBB Berlin wurde der „Camsizer®“ von der Fa. Retsch Technology zur Messung der Korngrößen und Kornformen ausgewählt.

Beim Camsizer® wird die trockene / getrocknete Probe über eine Zulauftrinne der Messung zugeführt. Am Ende der vibrierenden Rinne liegen die Partikel nebeneinander und „rieseln“, immer nebeneinander, in den Mess-Schacht (Bild 10 links). Im Mess-Schacht befindet sich eine Lichtquelle und ein Full-Frame-Kamerasystem, zwischen denen die Partikel hindurchrieseln (Bild 10 mitte), als Einzel-Schatten optisch erfasst und digitalisiert sowie die Messdaten im angeschlossenen Computer verarbeitet werden (Bild 10 rechts).

Die berührungslose, optische Vermessung erfolgt in Echtzeit und ermittelt simultan alle gewünschten Basisdaten zur Korngröße und Kornform. Mit der projektspezifischen Messklasseneinteilung erfolgt anschließend die Datenweiterverarbeitung entsprechend der Aufgabenstellung (Baugrund, Hydrogeologie, Brunnenbau).

„Ungenutzte“ Basisdaten sind abgespeichert und können bei später neuen Erkenntnissen (auch nach Jahren) genutzt werden.



Bild 10 **Partikelmessung mit Camsizer®**

links: **Probenezuführung über Rinne**
mitte: **Schattenprojektion und optisches Meßsystem**
rechts: **simultane Auswertung der Messdaten**
Fotos: Retsch Technology

Zur Erfassung der Basisdaten vermisst der Camsizer® die Partikelprojektionen jedes Partikels (Bild 11 links) nach diversen Flächen-, Umfangs- und Längenmaßen. Dafür wird jedes einzelne Partikel (bei theoretisch unbegrenzter Probenmenge / Partikelanzahl) mit einer Pixelauflösung von 15 µm gescannt; durch ein Messraster in 64 Richtungen werden die Partikel-Größen- und Formdaten ermittelt (Bild 11 rechts).

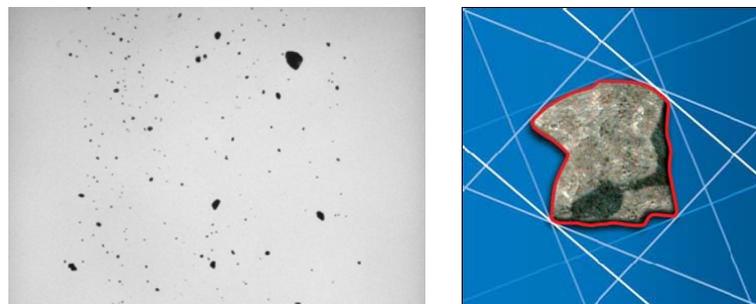


Bild 11 **Messung der Partikelgröße und -form durch Camsizer®-Scan**

links: Projektionsbild - Bodenprobe während der Messung
rechts: Kennwert-Messprinzip # Foto: Retsch Technology

Die Güte der Messtechnik und die Bedeutung der Messungen setzt für einwandfreie Messergebnisse eine einwandfreie Probennahme der Entnahmekategorie A mit Güteklasse 2 oder besser (gemäß DIN EN ISO 22475-1, 2007) voraus; geringere Güteklassen verringern den Aussagegrad.

Nach Aussage des Geräteherstellers wurde der Camsizer® bei der Untersuchung von Böden vor Beginn des o.a. Kooperationsvorhabens zunächst „nur“ als Ersatz für die Siebanalyse eingesetzt, ohne die eigentlichen Möglichkeiten (möglichst vollständig) zu nutzen.

Partikel-Durchmesser

Die Messungen der Partikel-Durchmesser (= Partikel-„Größe“) erfolgen im Messbereich 0,03 mm bis 30 mm bei frei wählbarer Klasseneinteilung, z.B. zur Beurteilung der Partikel-Passierbarkeit von Schüttgut und Filterschlitz, der exakten Bestimmung der zugeordneten Verteilungsgrößen wie z.B. d_{10} , C_u , C_c und auch der Einteilung „Korngrößenfraktionen“ gemäß DIN EN 14688-1 (2003) etc. .

Besonders einfach und für den Brunnenbau geradezu ideal (= praxistauglich) erfolgt

- die tiefdifferenzierte d_g – Bestimmung (maßgebender Korndurchmesser des Bodens) zur Anwendung des DVGW-Regelwerkes für die Schüttgut-Dimensionierung;
- ein Erkennen von „versteckten“ (zwischen 2 Maschenweiten der Siebanalyse) gelegenen Wendepunkten, die eine Schüttgut-Fehldimensionierung und die von Brunnenbauer gefürchtete Sandführung herbeiführen können

und

- erstmals die $D_{s,ist}$ -Bestimmung (gemessener, maßgebender Korndurchmesser des Schüttgutes), der normalerweise als D_{50} der jeweiligen DIN 4924 (1998) – Kornklasse bei Normalverteilung ohne Unter-/Überkornanteil angenommen wird, real jedoch aufgrund der unterschiedlichen Lagerstätten-Eigenschaften und Hersteller-spezifischen Aufbereitung signifikant vom rechnerischen Mittelwert abweicht.

Im Rahmen von Reihenuntersuchungen mit dem Camsizer® wurden z.B. Brunnenbau-Schüttgüter nach DIN 4924 (1998) Kornklasse 3,15 bis 5,6 mm aus verschiedenen Lagerstätten, von unterschiedlichen Lieferanten und aus unterschiedlichen Lieferchargen derselben Lagerstätte / desselben Lieferanten untersucht.

Diese Untersuchungen ergaben signifikante Unterschiede / Abweichungen von den DIN-Vorgaben und auch zwischen den Lieferchargen derselben Lagerstätte / desselben Lieferanten, leider sehr häufig mit signifikanten Abweichungen zum Nachteil der Brunnen-Hydraulik und der Brunnen-Haltbarkeit.

Drei Ergebnisse aus diesen Messungen dazu beispielhaft: (Bild 11 a, b, c) :

- Im Kreuzvergleich ergibt die rechnerische Durchlässigkeit (Beyer & Schweiger; 1969; Lagerungs-gleichbleibend) bei Gleichverteilung sowie ohne Unter- und Überkorn 100 % .
Bei 10 % Unterkorn (zulässig 12 %), ohne Unterkorn (zulässig 15 %) sowie bei angenommener Gleichverteilung nimmt die rechnerische Durchlässigkeit in der Korngruppe 3,15 - 5,6 mm auf gerundet 75 % ab.

Beim untersuchten „schlechtesten“ Schüttgut der Kornklasse 3,15 - 5,6 mm gemäß DIN 4924 sank die Durchlässigkeit schließlich auf den Kreuzvergleichswert 55 % ab.

D.h. die reale Durchlässigkeit halbierte sich annähernd gegenüber dem „gewünschten“ Schüttgut und im Kontext der Verschlechterung der Durchlässigkeit erhöhen sich die Kolmationsgefahr sowie die Verockerungsgeschwindigkeit und in Konsequenz wird die Brunnenlebenszeit / Nutzungszeit verkürzt.

- Der rechnerische D_s (maßgebender Durchmesser) dieser Schüttgut-Kornklasse beträgt (ohne Unter- / Überkorn, Gleichverteilung) 4,375 mm; gemessen wurden D_s – Werte 3,85 ... 4,65 mm.
- Für die Kornklasse 3,15 – 5,6 mm ist gemäß DVGW AB W 118 eine Schlitzweite 2,0 ... 2,5 mm einzubauen.

Im Messklassenbereich für diesen Schlitzweite wurde ein klassenbezogenes Breite-zu-Längen-Verhältnis des „schlechtesten“ Schüttgutes von gerundet 0,4 gemessen, d.h., dieses Schüttgut war im Größenbereich des Filterschlitzes 2 ½ mal so lang wie breit:

Damit sinkt für diese Schüttgut-Probe die Wahrscheinlichkeit einer Passage des Unterkornanteils bei gleichzeitiger Zunahme der Wahrscheinlichkeit einer inneren Kolmation, wiederum mit der Konsequenz einer Verkürzung der Brunnenlebenszeit.

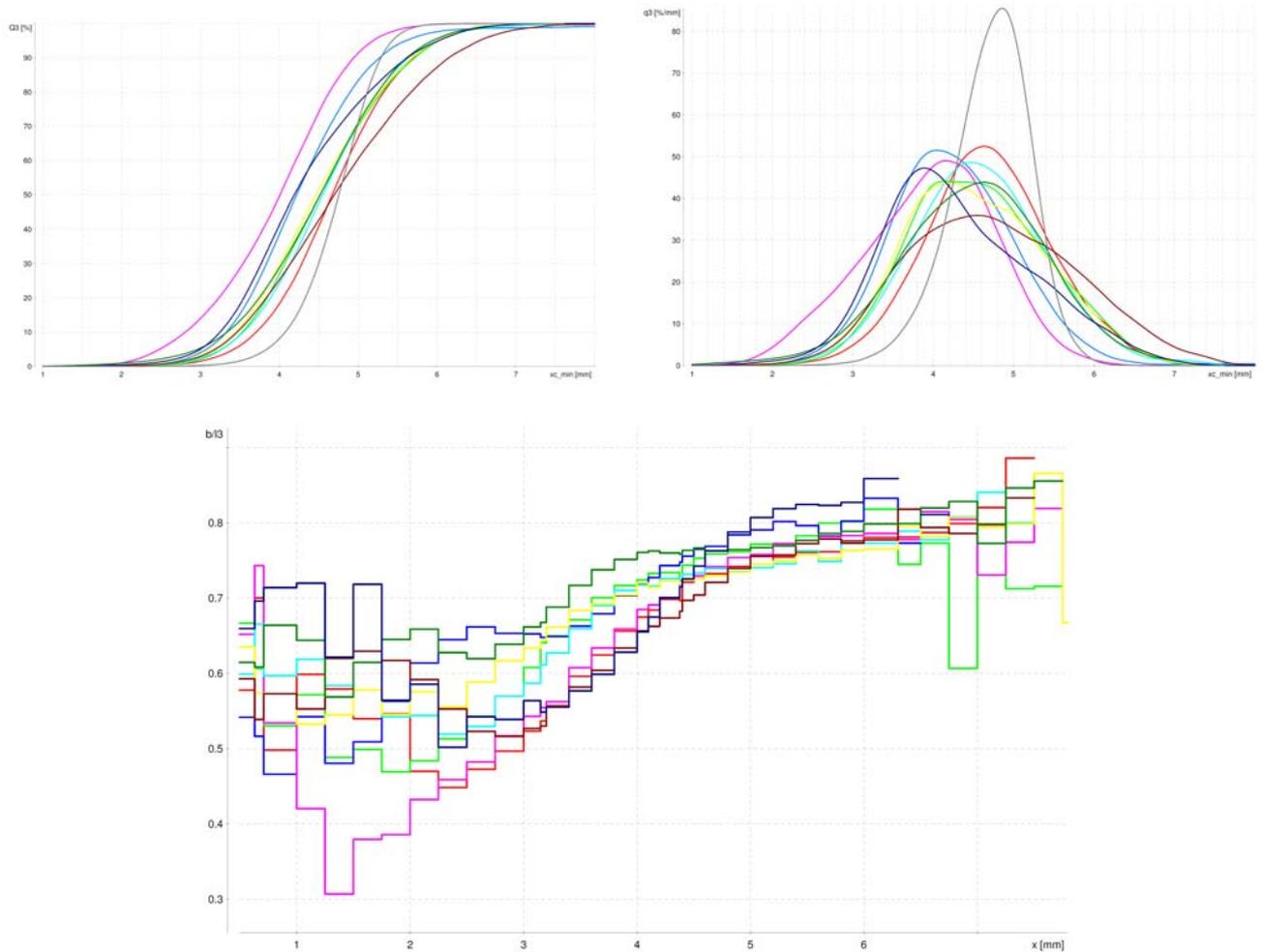


Bild 11 a, b, c **Untersuchung verschiedener Brunnenbau-Schüttgüter nach DIN 4924 (1998) , Korngruppe 3,15 bis 5,6 mm und Sonderfraktion 4 ... 5 mm (Messreihe 2009)**

- a - oben links **Summenverteilung**
Bestimmung Durchmesser-abhängiger Kenngrößen, z.B. d_{10} , C_U etc.
- b – oben rechts **Dichteverteilung**
Bestimmung D_s
- c – unten **klassenbezogene Verteilung**
Breite / Länge (b/l, volumenbezogen) über Durchmesser;
Beurteilung der Kornform in signifikanten Durchmesser-Bereichen,
z.B. Schlitzweite nach DVGW AB W 118 (2005)

Als Konsequenz dieser Messung ergibt sich die Empfehlung, dass **jede** Schüttgut-Liefercharge von Sanden & Kiesen vor Einbau einer Untersuchung bedarf und gegebenenfalls Lieferchargen abgelehnt bzw. Lieferanten gewechselt werden müssen.

Dazu das DVGW AB 123 (2001): „Sande und Kiese müssen (den) ... zulässigen (nach DIN 4924) Über- bzw. Unterkornanteil einhalten ... und ... (sind) ... vor Einbau zu überprüfen, um ein großes Porenvolumen in der Kiesschüttung zu ermöglichen und Setzungen zu minimieren. Rückstellproben werden empfohlen.“

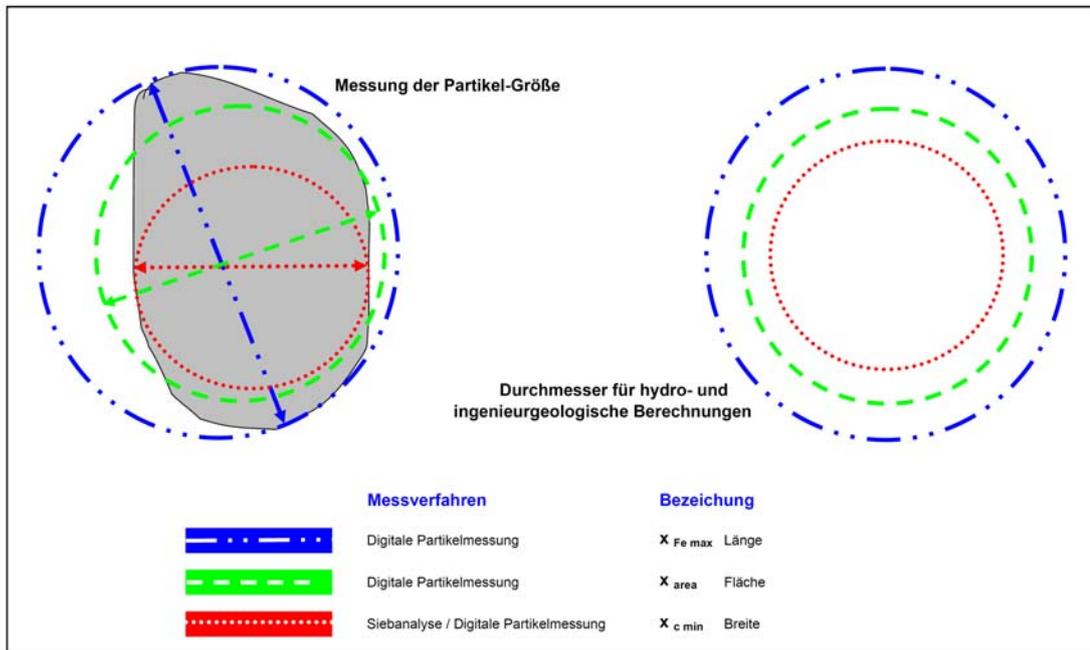
Glaskugeln haben demgegenüber den Vorteil, dass Lieferchargen eine relativ gute Daten-Konstanz aufweisen und Messungen aus der Produktionsüberwachung zumeist ausreichen.

Partikelmodelle $x_{c\ min}$ – x_{area} – $x_{Fe\ max}$

Wesentlicher Vorteil der Durchmesser-relevanten d_g – Bestimmung (vgl. DVGW MB W 113, 2001) ist die Camsizer®-Messung / Berechnung in den verschiedenen Partikelmodellen $x_{c\ min}$ – x_{area} – $x_{Fe\ max}$.

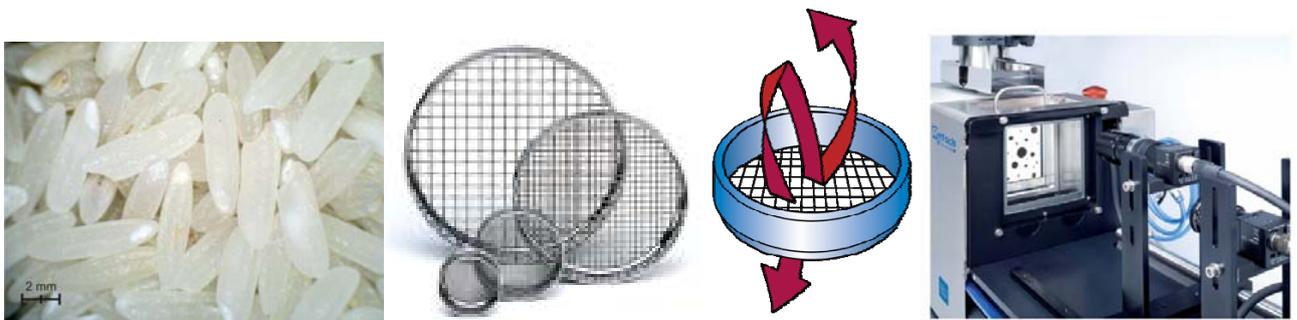
Dabei ist (vgl. Bild 12):

- $x_{c\ min}$ Partikeldurchmesser bestimmt aus der kleinsten aller maximalen Sehnen eines Partikels
- x_{area} Partikeldurchmesser berechnet aus der Flächenmessung der Partikelprojektion
- $x_{Fe\ max}$ Partikeldurchmesser bestimmt aus dem längsten Feret-Durchmesser aller gemessenen Feret-Durchmesser eines Partikels
- $b/l = x_{c\ min} / x_{Fe\ max}$ Quotient Breite zu Länge
Anmerkung: der b/l-Quotient ist **kein** Maß der Rundheit;
b/l = 1 beschreibt sowohl eine Kugel als auch einen Würfel



**Bild 11 Partikel - Größen /Durchmesser – Messung
Prinzip-Darstellung**

Nachfolgend als Beispiel 1 zur Darstellung der Bedeutung der Anwendung des Partikelmodells x_{area} die Vermessung von Reiskörnern.



**Bild 12 Bedeutung x_{area} – Beispiel 1
Reiskörner - Siebanalyse - dynamische Bildanalyse**

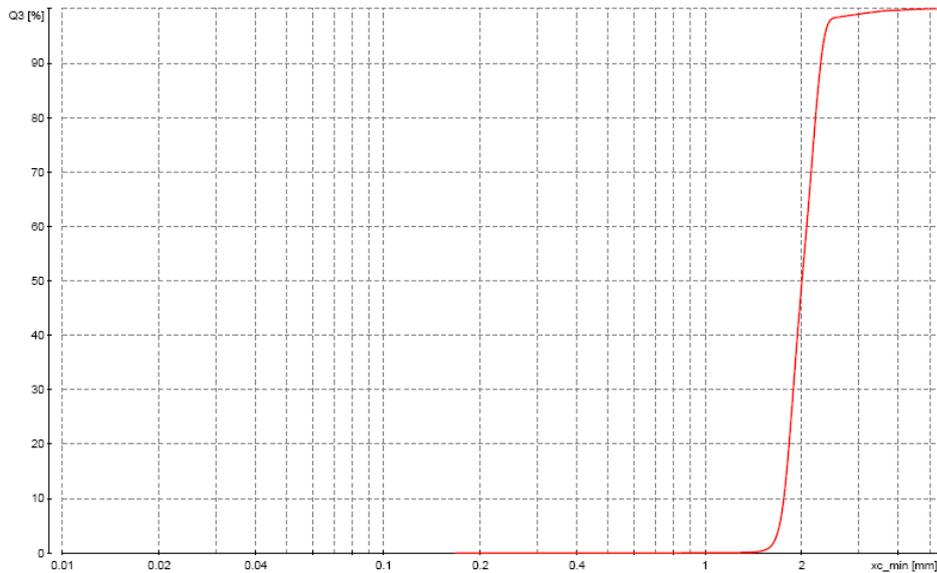


Bild 13 Siebanalyse für Reiskörner

x-Achse = Reiskorn-Durchmesser $x_{c\ min}$ / y-Achse = Sieb-Summendurchgang, volumenbezogen

Die Siebanalyse zur Reiskorn-Größenverteilung hat die Summenkurve in Bild 13 ergeben:

In der Auswertung dieser Kornsummenkurve wird der Eindruck vermittelt, es handle sich um eine relativ homogene Probe, die, in Anwendung der Kugelmodelltheorie der Siebanalyse, aus nahezu kugelförmigen Körnern besteht.

Die dynamische Bildanalyse zeigt dagegen, dass längliche Partikel untersucht wurden (Bild 14).

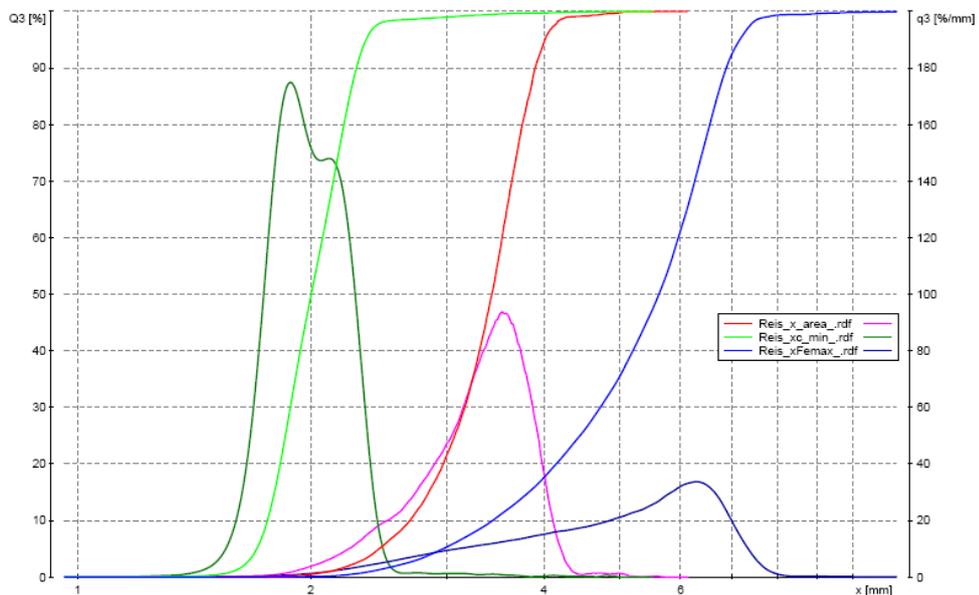


Bild 14

**Bedeutung des x_{area} - Partikelmodells
Digitale Partikelmessung mit dynamischer Bildanalyse für Reiskörner**

x-Achse = Reiskorn-Durchmesser

y-Achse 1 = Durchgangs-Verteilung (Q3, volumenbezogen)

y-Achse 2 = Dichteverteilung (q3, volumenbezogen)

links grün, hell & dunkel

rechts blau, hell & dunkel

mitte rot / violett

Bezug $x_{c\ min}$ (Breite)

Bezug $x_{Fe\ max}$ (Länge)

Bezug x_{area} (Fläche)

Die Reiskörner-Vermessung zeigt ein längliches Korn mit folgenden durchschnittlichen Abmessungen (= Wendepunkte der Durchgangs-Verteilung bzw. Maxima der zugehörigen Dichteverteilung):

- Breite 1 = 1,878 mm
Breite 2 = 2,127 mm

Die zwei Maxima geben die statistische Verteilung der Reiskörner-Ovalität an.

- Länge 1 = 6,360 mm
Länge 2 = 4,208 mm

Die zwei Maxima zeigen die vollständige Länge des Reiskornes und eine naturbedingt kürzere Kante (vgl. Bild 15).

- Durchmesser $x_{area} = 3,534$ mm

Der Durchmesser wird als Kreisdurchmesser aus dem Umfang der Projektionsfläche berechnet.

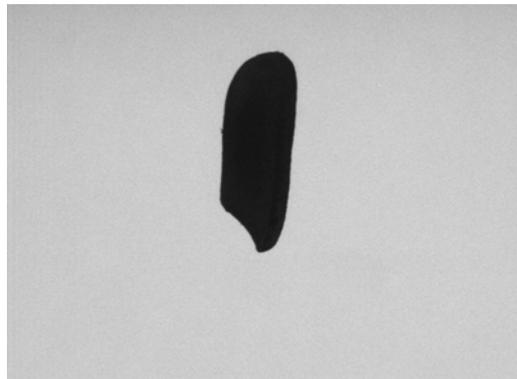


Bild 15 Länge 1 und 2 eines Reiskornes

Als Beispiel 2 zur Bedeutung des Partikelmodells x_{area} , nunmehr für den Brunnenbau, dient Bild 16, in dem die Messung von Glaskugeln 3,8 ... 4,4 mm, einer beliebig ausgewählten DIN 4924 Korngruppe 3,15 ... 5,6 mm und einer Kies-Sonderfraktion 4 ... 5 mm in den beiden Partikelmodellen $x_{c\ min}$ und x_{area} gegenüber gestellt werden.

Es ist offensichtlich, dass die D_s -Werte für $x_{c\ min}$ und x_{area} bei Glaskugeln relativ dicht beieinander liegen ($x_{c\ min} \rightarrow x_{area}$ ca. + 1,7 %), während sich beim Schüttgut nach DIN 4924 ($x_{c\ min} \rightarrow x_{area}$ ca. + 13 %) und bei der Sonderfraktion ($x_{c\ min} \rightarrow x_{area}$ ca. + 9 %) schon signifikante Unterschiede zwischen $x_{c\ min}$ und x_{area} ergeben.

In einer erweiterten Diskussion ergibt sich aber auch die Fragestellung zur Brunnenbau-Schüttgut-Dimensionierung von Glaskugeln und Schüttgütern nach DIN 4924.

- Wird der x_{area} zur Schüttgut-Berechnung herangezogen, dann werden DIN 4924 – Materialien (unter der Maßgabe, dass die lieferbaren Fraktionen frei wählbar sind) immer etwas gröber gewählt als Glaskugeln (ebenfalls in frei wählbarem Liefer-Durchmesser).
- Als weitere Bemessungsparameter gehen die Partikelform und der Porenanteil entsprechend der realen / vermuteten Lagerungsart in die Schüttgut-Dimensionierung ein (vgl. Kap. „Schüttgut-Dimensionierung“).

Als Beispiel 3 zur Bedeutung des Partikelmodells x_{area} ist für die d_g -Bestimmung von Böden bereits Bild 6 gezeigt worden.

Für die Baugrund-Begutachtung, z.B. zur Beurteilung der Erosionssicherheit, bietet das x_{area} -Partikelmodell ebenfalls eine bessere Berechnungssicherheit.

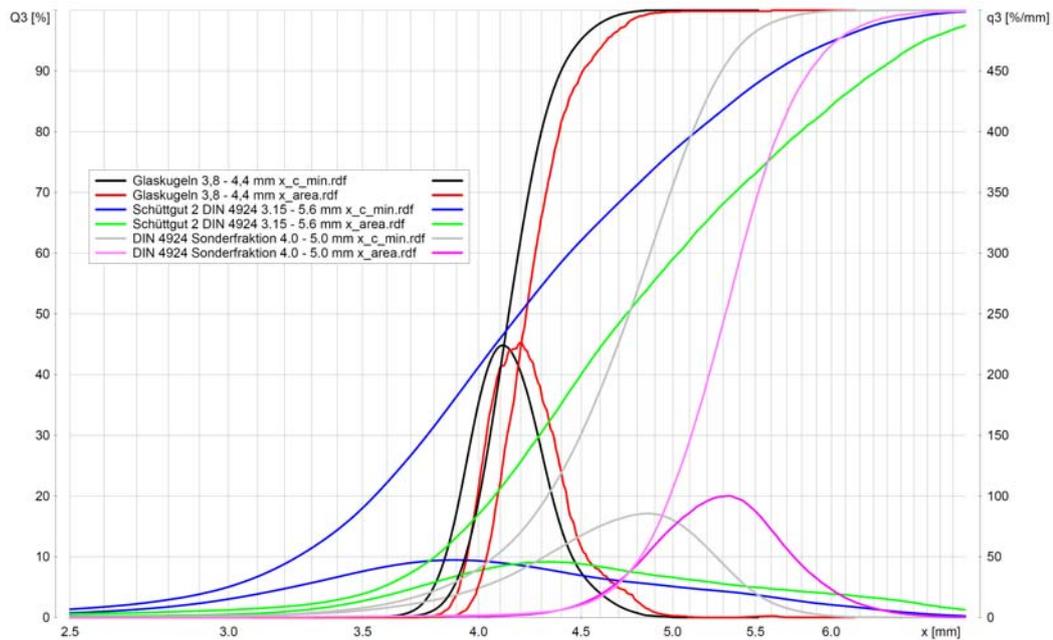


Bild 16

Bedeutung des x_{area} - Partikelmodells

Digitale Partikelmessung mit dynamischer Bildanalyse für Schüttgüter

x-Achse = Schüttgut-Durchmesser

y-Achse 1 = Durchgangs-Verteilung (Q_3 , volumenbezogen)

y-Achse 2 = Dichteverteilung (q_3 , volumenbezogen)

schwarz

Glaskugeln 3,8 ... 4,4 mm Partikelmodell $x_{c_{min}}$

rot

Glaskugeln 3,8 ... 4,4 mm Partikelmodell x_{area}

blau

DIN 4924 Kies 3,15 ... 5,6 mm Partikelmodell $x_{c_{min}}$

grün

DIN 4924 Kies 3,15 ... 5,6 mm Partikelmodell x_{area}

grau

Sonderfraktion Kies 4 ... 5 mm Partikelmodell $x_{c_{min}}$

lila

Sonderfraktion Kies 4 ... 5 mm Partikelmodell $x_{c_{area}}$

Partikel-Form

Die DIN EN ISO 14688-1 (2003) führt zur Kornform aus: „Bei größeren Kornfraktionen werden die Kornform (geometrische Form) und der Rundungsgrad beschrieben. Gewöhnlich wird die Kornform durch Vergleich mit einer Vorlage abgeschätzt.“ Als Begriffe für die Bezeichnung werden in der DIN 14688 tabellarisch aufgelistet:

- Rundung - scharfkantig, kantig, kantengerundet, angerundet, gerundet, gut gerundet
- Form – kubisch, flach (plattig), länglich (stängelich)
- Oberflächenstruktur – rau, glatt

Durch die Digitale Partikelmessung erfolgt die quantitative Beschreibung der Kornform. Bei der Camsizer®-Messung wird die Formmessung jedes Partikels parallel zur Messung des Partikel-Durchmessers durchgeführt.

Die Partikel-Form hat (neben dem grundsätzlichen Einfluss der regellosen Struktur und Stapelfehlern sowie der Probenzusammensetzung, repräsentiert durch den Ungleichkörnigkeitsfaktor C_U) erheblichen Einfluss auf den Porenanteil entsprechend der realen Lagerungsart.

Eine Berechnung des Porenanteils aus den Formkennwerten ist wegen der Vielzahl und Unterschiedlichkeit der Variablen sowie ihrer konträren Wechselbeziehungen (leider) nicht möglich.

Für den Brunnenbau, speziell die Schüttgut-Dimensionierung, können jedoch Formparameter der Bodenprobe und des Schüttgutes zur Berechnung des erforderlichen Schüttgutes angewendet werden, so wie dies bereits mit Anwendung des C_U in der Schüttgut-Berechnung nach DVGW MB W 113 (2001) erfolgt.

Aus den Möglichkeiten des Camsizers® zur Partikelform-Messung werden die Sphärizität (SPHT), Symmetrie (Symm) und Konvexität (Conv) genutzt. Die Partikelform-Messwerte der Bodenproben und des Schüttgutes finden mit ihren Durchschnittswerten Eingang in die Schüttgut-Dimensionierung. Eine Erklärung der gewählten Formparameter erfolgt in Tabelle 3.

Zusätzlich wird bei der Messung der Bodenkenwerte die prozentuale Zuteilung in Kornformfraktionen analog der Einteilung der Korngrößenfraktionen gemäß DIN EN ISO 14688-1 (2003) vorgenommen, um Anomalien tiefendifferenziert-vergleichend erkennen und beurteilen / bewerten zu können. Ein Vorschlag zur Einteilung dieser Partikelform-Messklassen wird in Tabelle 4 gezeigt. Vergleichend können ähnliche Messungen / Einteilungen auch für den Vergleich von Schüttgütern durchgeführt werden.

Entsprechend des Untersuchungsanspruchs können weitere Kennwerte angegeben werden, z.B.

- SPHT, Conv, Symm, b/l bei den Durchmesser-Kennwerten d_{10} , d_{60} , d_g , Filterschlitzweite etc.
- spezifische (volumenbezogene) Oberfläche S_v [mm²/mm³] bei lockerer und dichter Lagerung, massenbezogene Oberfläche S_m [cm²/g], relative Dichte r_D [g/cm³]
- probenspezifische Oberfläche bei partikelspezifisch lockerer / dichter Lagerung [m²/m³].

Tabelle 3 Übersicht der Formparameter zur Bestimmung von Boden- und Schüttgut-Kennwerten

Parameter	Abkürzung	Formel	Erklärung	Beispiele
Sphärizität	SPHT	$(4 \cdot \pi \cdot A) / P^2$	gemessene Partikel-Fläche im Verhältnis zur Fläche eines Kreises mit dem Umfang des gemessenen Partikels	Kreis: SPHT = 1,0 Quadrat: SPHT = 0,78 gleichseitiges Dreieck: SPHT = 0,60
Konvexität	Conv	$(A / A_c)^{0,5}$	(Quadratwurzel-) Verhältnis der realen Partikelfläche zur konvexen Partikelfläche (konvexe Partikelfläche = „als würde man ein Gummiband um das Partikel legen und die Fläche messen, die innerhalb des Gummibandes liegt“)	Conv = 1 => Kreis, Quadrat Conv < 1 entsprechend „Eindellungen“ am Partikel-Flächenrand
Symmetrie	Symm	$0,5 \cdot (1 + \min(r_1 / r_2))$	Abstand des Flächenschwerpunktes zum Partikelrand Angabe als minimaler Wert einer gemessenen Anzahl	Symm = 1 => Kreis, Quadrat für asymmetrische Partikel ist Symm < 1 liegt das Zentrum der Fläche außerhalb des Partikels, dann ist Symm < 0,5
Breite zu Länge	b / l	$X_{c \min} / X_{Fe \max}$	Verhältnis Breite zu Länge	b/l = 1 => Kreis, Quadrat 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
Angaben wahlweise in den Partikelmodellen $X_{c \min}$ - X_{area} - $X_{Fe \max}$ mit Bezug auf: Anzahl, Volumen oder Fläche				
Software-Auswertung u.a. für Kenngrößen (z.B. C_U , vertikale Wendepunkte Summenverteilung = d_g), Statistiken (z.B. Mittelwert, Trend), Sonderverfahren (z.B. RRSB)				
weitere Camsizer®-Messgrößen, z.B.: Partikel-Anzahl, Partikel-Oberfläche & Partikel-Volumen (aus Berechnung Rotationsellipsoid) etc.				

Quelle: Zusammenstellung nach Retsch - Camsizer® Bedienungsanleitung (2009)

Tabelle 4 Einteilung der Kornformfraktionen

Korn-Modell $x_{c \min}$ oder x_{area}	b / l (%)	Korn-Modell $x_{c \min}$ oder x_{area}	SPHT (%)
Q3 bis 0,3333		Q3 bis 0,6	
Q3 bis 0,5		Q3 bis 0,7	
Q3 bis 0,6667		Q3 bis 0,8	
Q3 bis 0,8		Q3 bis 0,9	

Korn-Modell $x_{c \min}$ oder x_{area}	Symm (%)	Korn-Modell $x_{c \min}$ oder x_{area}	Conv (%)
Q3 bis 0,5		Q3 bis 0,9	
Q3 bis 0,7		Q3 bis 0,925	
Q3 bis 0,9		Q3 bis 0,95	
Q3 bis 0,95		Q3 bis 0,975	

Messung des Porenanteils

Die Messung des Porenanteils für die partikelspezifisch lockere und dichte Lagerung von Böden und Schüttgütern hat für den „ordnungsgemäßen“ Brunnenbau parallel zur Korngrößen- und Kornformmessung höchste Priorität.

Die Ergebnisse der Messung des Porenanteils (nach Hausnorm) werden benötigt zur

- Erkennung von Boden-Lagerungsanomalien im tiefendifferenzierten Vergleich;
- Überprüfung der Probennahme-Güte;
- Schüttgut-Dimensionierung im Kontext der Berücksichtigung der Dreidimensionalität;
- Kompromissfindung bei der tatsächlichen Ausführungsdimensionierung;
- Beurteilung der Entsandungs- / Entwicklungsfähigkeit;
- Abschätzung des Setzungsverhaltens im Kontext mit der Brunnenalterung und der Brunnenlebenszeit.

Zur Messung des Porenanteils bei partikelspezifisch lockerer und dichter Lagerung steht die DIN 18126 (1996) „Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung“ zur Verfügung.

In Anlehnung an diese und weiterer DIN Normen wurde ein Test nach „Hausnorm“ im Rahmen der Kooperation TU Berlin FG Ingenieurgeologie / IBB Berlin entwickelt, der die verschiedener Vorschriften zusammenfasst, Brunnenbau-spezifische Bedingungen berücksichtigt (Viskositätsbedingungen beim Einbau des Schüttgutes), den Zeit- / Kostenaufwand um ein Vielfaches gegenüber den DIN-Versuchen verringert und bei Bedarf auch direkt auf der Baustelle in wenigen Minuten ausgeführt werden kann.

Derzeit werden Untersuchungen im Rahmen von Semesterarbeiten durchgeführt, die die Abweichungen der Hausnorm-Ergebnisse als „Schnellversuch“ von den DIN-Vorschriften im Maß und auf Reproduzierbarkeit untersuchen. Nach Beendigung dieser Untersuchungen soll eine „Test-Vorschrift“ erarbeitet werden.

Im Ergebnis der Boden-/Schüttgut-Messung „Porenanteil nach Hausnorm“ (zweiteiliger Versuch) werden die Kennwerte gemäß Tabelle 5 bestimmt.

Dabei geben die Viskositätsbedingungen „trocken“ die Bedingungen gemäß DIN 18126 wider, während die Viskositätsbedingung „nass“ die Schüttgut-Einbaubedingungen simulieren. Die Versuchsdurchführung „nass“ auch für Böden erhöht den Informationsgehalt zum Erkennen von Anomalien.

Weiterhin gilt es, bei „Hausnorm-Messungen“ die Prüfbedingungen gemäß DIN 18126 (vgl. Tabelle 6) einzuhalten.

„Gerundet“ gelten diese Prüfbedingungen als eingehalten, wenn für Böden und Schüttgüter der Randbedingungsfaktor (Quotient Durchmesser Prüfgefäß / d_{90} der zu untersuchenden Probe) > 20 / eingeschränkt 15 ist. Wegen der Form von Glaskugeln ist der Randbedingungsfaktor für Glaskugeln auf mindestens 25 zu erhöhen.

Tabelle 5 Kennwerte der Boden- / Schüttgut-Messung „Porenanteil nach Hausnorm“

Viskositätsbedingung	"trocken"	"nass"	Einheit
		<input type="checkbox"/> Klarwasser <input type="checkbox"/> Spülung	
Probenmasse			g
Randbedingungs-Faktor $D_{\text{Gefäß}} / d_{90 \text{ Probe}}$			mm / mm
Porenanteil <small>probenspez. lockere Lagerung</small>			%
Porenanteil <small>probenspez. mittlere Lagerung</small>			%
Porenanteil <small>probenspez. dichte Lagerung</small>			%
Abnahme Porenanteil <small>von locker nach dicht</small>			%
Volumenrückgang Porenanteil			%
Setzung <small>von locker nach dicht</small>			cm / m
Porenzahl <small>probenspez. lockere Lagerung</small>			--
Porenzahl <small>probenspez. lockere Lagerung</small>			--
Korndichte			g / cm ³
Lagerungs-/Schüttdichte <small>locker</small>			kg / Liter
mittlere Lagerungs-/Schüttdichte			kg / Liter
Lagerungs-/Schüttdichte <small>dicht</small>			kg / Liter
Zunahme Lagerungsdichte <small>von locker nach dicht</small>			%

Tabelle 6 Prüfbindungen zur Messung des Porenanteils nichtbindiger Böden gemäß DIN 18126: „zulässiges Größtkorn und erforderliche Probenmasse in Abhängigkeit vom Versuchszylinder“

ZylinderØ	max. PartikelØ	C_u	Randbedingungs-Faktor	erforderliche Probenmasse
71 mm	5,0 mm	≥ 3	14	1.000 g
	2,0 mm	< 3	36	1.000 g
100 mm	10,0 mm	≥ 3	10	6.000 g
	5,0 mm	< 3	20	mind. 2.000 g

Über die Ergebnisse / Interpretation einiger Messungen des Porenanteils von Böden und Schüttgütern wurde bereits im Kap. „Wechsel von der zwei- zur dreidimensionalen Betrachtungsweise“ berichtet.

Weitere Untersuchungen von Böden und Schüttgütern

Nach Bedarf / entsprechend Aufgabenstellung werden, unter Berücksichtigung der besonderen Bedingungen beim Bau und Betrieb von Brunnen, weitere Untersuchungen durchgeführt:

- Untersuchung der mechanischen Beständigkeit;
- Untersuchung der chemischen Beständigkeit;
- Labor-Test zur Ermittlung des vertikalen Filterfaktors;
- Labor-Test zur Messung der Durchlässigkeit.

Die Messungen werden entweder DIN-konform oder auch vereinfachend / kostenreduziert nach eigenen Prüfvorschriften, ebenfalls mit „Hausnorm“ bezeichnet, durchgeführt.

Anwendung der Kennwerte im Brunnenbau

Zielvorgaben

Für die Planung und den Ausbau von Brunnen sind folgende Ziele vorgegeben:

- möglichst vollständige Nutzung der Standort-Ergiebigkeit
und
- Sandfreiheit / Vermeidung Erosion
und
- „überhöhte“ Schüttgut-Durchlässigkeit als Reserve für die Brunnenalterung / möglichst lange Lebenszeit.

Zum Erreichen der Zielvorgaben werden die ermittelten Kennwerte eingesetzt.

Schüttgut-Dimensionierung

a. aktuelle Schüttgut-Bemessung

Für die Bemessung des Brunnenbau-Schüttgutes mit Sanden & Kiesen nach DIN 4924 stellt das DVGW MB W 113 (2001) „Bestimmung des Schüttkorndurchmessers und hydrogeologischer Parameter aus der Korngrößenverteilung für den Bau von Brunnen“ derzeit den Maßstab einwandfreien technischen Handelns dar:

$$D_s = d_g \cdot F_g$$

D_s Schüttkorndurchmesser für Fraktion nach DIN 4924 (mm)

d_g = maßgebender Korndurchmesser des anstehenden Bodens (mm)

F_g = Filterfaktor mit $F_g = 5 + U$ für $1 < U < 5$
 $F_g = 10$ für $U \geq 5$
 $U = d_{60} / d_{10}$ Ungleichkörnigkeitsfaktor ; normgerecht $U = C_u$

==> $D_s = d_g \cdot (5 + C_u)$ unter Beachtung der Gültigkeitsgrenzen für C_u

Über die Anwendung des W 113 und die Probleme im Zusammenhang mit der Siebsatz-Auswahl wurde bereits ausgiebig im Kap. „Bestimmung d_g gemäß DVGW MB W 113 (2001)“ berichtet.

Die Aspekte der Räumlichkeit und der Vorteile bei Anwendung des x_{area} – Partikelmodells wurden im erwähnten Kapitel ausführlich diskutiert.

In Summe der Aspekte / Diskussion ergibt sich ein Anpassungsbedarf der aktuellen Schüttgut-Bemessungsformel an die Räumlichkeit und die Berücksichtigung der partikelspezifischen Besonderheiten.

b. neue Schüttgut-Bemessung

Derzeit wird eine Bemessungsformel auf der Basis der bisherigen d_g - Bestimmung „entwickelt“, die die Lagerungsart sowie die individuellen Formeigenschaften von Boden und Schüttgut berücksichtigt.

Die Anwendung der „neuen“, konsolidierten Schüttgut-Bemessungsformel kann sowohl für Boden → Sande & Kiese nach DIN 4924 (1998) als auch für Boden → Glaskugeln erfolgen.

Auch die Abstimmung von untereinander abgestuften Schüttgut-Fractionen („doppelte Kiesschüttung“) kann nunmehr rechnerisch erfolgen.

Änderungen in der DIN 4924 oder die Verwendung von Sanden & Kiesen als Sonderfraktion sind unproblematisch.

Die „neue“ Schüttgut-Bemessung ergibt sich aus folgender Funktion:

$$D_{S \ x \ area} = f (d_{g \ x \ area} , C_U , n_{au\beta en} , n_{innen} , SPHT_{au\beta en} , SPHT_{innen} , SYMM_{au\beta en})$$

$D_{S \ x \ area}$ Maximum der Dichteverteilung des gewählten Schüttgutes

Berücksichtigung

1. Verteilung über gesamtes Probenspektrum inkl. produktionsbedingter Unter- & Überkornanteile
2. Kornmodell x_{area} inkl. Berücksichtigung Partikelform (anstatt $x_{c \ min}$)

(wichtig: auch für das Schüttgut muss eine Partikel-Größen und –Form-Messung sowie Ermittlung des Porenanteils bei partikelspezifisch viskositätsabhängig-lockerer / dichter Lagerung der jeweiligen Liefercharge erfolgen !

Wegen annähernd konstanter Produktionsbedingungen können für Glaskugeln ermittelte Standardwerte verwendet werden.)

$d_{g \ x \ area}$ maßgebender Proben-Korndurchmesser
dargestellt durch das (erste) Maximum der Dichteverteilung ;

Berücksichtigung

1. Verteilung über gesamtes Probenspektrum inkl. Berücksichtigung inhomogener Probenzusammensetzung (mehrgipfelige Verteilung)
2. Kornmodell x_{area} inkl. Berücksichtigung Partikelform (anstatt $x_{c \ min}$)

C_U Ungleichkörnigkeitsfaktor d_{60} / d_{10}
eventuell größenbegrenzt ; vgl. W 113 (2001)

$n_{au\beta en}$ Porenanteil bei partikelspezifisch dichter Lagerung des in Strömungsrichtung erst-gelegenen Materials (meistens Boden bzw. bei doppelter Schüttung äußeres Schüttgut)

Es können innen und außen unterschiedliche (gemessen / geschätzt) Lagerungsdichten eingesetzt werden.

- n_{innen}** Porenanteil bei partikelspezifisch gewählter Lagerung des in Strömungsrichtung innen liegenden Materials (meistens Schüttgut bzw. bei doppelter Schüttung = inneres Schüttgut)
- SPHT_{außen}** durchschnittliche Sphärizität der Probe (außen),
bei mehrgipfelter Verteilung bis zum 1.horizontalen Wendepunkt;
berücksichtigt die Partikelform „Rundheit“
- SPHT_{innen}** durchschnittliche Sphärizität des Schüttgutes (innen),
berücksichtigt die Partikelform „Rundheit“
- SYMM_{außen}** durchschnittliche Symmetrie der Gesamtprobe (Boden, außen) :
bei mehrgipfelter Verteilung bis zum 1.horizontalen Wendepunkt
berücksichtigt den Bewegungs-einschränkenden Partikel-Schwerpunkt

Die Koeffizienten zur Angabe der Funktion als Bemessungsformel werden derzeit in Laborversuchen ermittelt und in Auftrags-Projekten mit Brunnenbauern und Wasserversorgungsunternehmen praxisnah angepasst.

Anschließend wird die Bemessungsformel im Regelwerks-bearbeitenden Technischen Komitee TK 1.1 des DVGW beraten und erst dann der Fachwelt vorgestellt.

Dieses Vorgehen ist notwendig, um eine Konfusion aus „Zwischenergebnissen“ zu vermeiden.

Die „neue“ Schüttgut-Bemessung erscheint auf den ersten Blick kompliziert; es wurde jedoch darauf geachtet, die Möglichkeiten neuer Messtechniken auf den notwendigen Bedarf zu komprimieren und die notwendigen Kennwerte praxisnah und preiswert zu bestimmen.

Letztlich wird der sehr komplexe Vorgang der Bemessung von sehr unterschiedlichen Böden und Brunnenbau-Schüttgütern auf den geringst-möglichen / geringst-notwendigen Aufwand im Kontext „Erosion – Suffosion – Kolmation – Lagerungsverhalten“ zur Einhaltung der Zielvorgaben des Brunnenbaus begrenzt.

Der „Prototyp“ der neuen Schüttgut-Bemessungsformel, mit Koeffizienten nach den bisherigen Erfahrungen, zeigt z.B.,

- dass Glaskugeln im Lockergestein aufgrund ihres nahe beieinander liegenden $d_{g \times aera} \leftrightarrow d_{g \times c \min}$ (vgl. Bild 16), ihrer Formeigenschaften (SPHT und Symm annähernd = 1; vgl. Tabelle 3) sowie ihres Lagerungsverhaltens bzw. Porenanteils „n“ (vgl. Kap. „Wechsel von der zweidimensionalen zur dreidimensionalen Betrachtungsweise“) geringer dimensioniert werden müssen als Sande & Kiese nach DIN 4924.

Anmerkung: damit ist auch begründet, warum die Autorenberechnung im Beitrag zur geofora 2009 „Anmerkungen zur Dimensionierung von Sanden, Kiesen oder Glaskugeln zum Ausbau von Vertikalfilterbrunnen im Lockergestein“ aufgrund der eingeschränkter Annahmen (zweidimensionale, flächige Kugel- / Kreis-Berechnung) zum falschen Ergebnis einer gegenüber Sanden & Kiesen größeren Glaskugel Dimensionierung führte.

- dass Glaskugeln untereinander (im Gegensatz zum bisher angenommen Filterfaktor 4 und höher) mit einem gerundeten Filterfaktor 3 ($D_s \cdot ca. 3$) abzustimmen sind.

Bei der Abstimmung einer doppelten Glaskugelpackung mit einem größeren Faktor untereinander „dringt“ die kleinere (feinere) Fraktion tief in die größere (gröbere) Fraktion ein, erzeugt dort einen Rückgang des Porenanteils und führt damit zur Kolmation (= Selbstabdichtung) inkl. einer Erhöhung der Verockerungsgefahr; in Konsequenz wird die Brunnenlebenszeit / Gesamtnutzungszeit signifikant verkürzt.

Diskussionsfähig ist mit Sicherheit noch, in wie weit die Sand/Kies nach DIN 4924- und Glaskugel-Lieferanten in der Lage sind, Schüttgüter zu liefern, die mit den gemessenen $D_{s \times area}$ -Lieferwerten möglichst nahe an die berechneten D_s -Werte herangelangen; auch hier wird wieder eine (Brunnenlebenszeit-verkürzende) Kompromissfindung erforderlich sein.

Fazit: Die „neue“ Schüttgut-Berechnung ist „nur“ eine Modifizierung der aktuellen („alten“) Berechnung nach DVGW MB W 113 (2001); allerdings mit weit reichenden Konsequenzen: der Schüttgut-Material- oder Lieferanten-Wechsel hat im Rahmen der „neuen“ Schüttgut-Berechnung, ohne Berücksichtigung anderer Materialeigenschaften, erheblichen Einfluss im Zusammenwirken tatsächliche Bauausführung \Leftrightarrow Brunnenalterung und damit letztlich auf die Brunnenlebenszeit.

„Hydraulische Kette“

„Den größten Einfluss auf die Brunnenbemessung hat der k_f -Wert. Er kann zwar nicht wirklich beeinflusst werden, aber eine genaue Bestimmung, vor allem teufendifferenziert, kann nur bei guter Probennahme erfolgen.“ (M.Tholen ‚Vermeidung von Dimensionierungs- und Baufehlern‘, 2009.11., Vortrag in Kassel)

Der Begriff „hydraulische Kette“ bezeichnet einen Kreuzvergleich der Durchlässigkeitsbeiwerte in der Brunnen-Anströmungsrichtung Boden \rightarrow Schüttgut \rightarrow Filterrohr mit Bezug auf einen frei wählbaren k_f -Referenzwert, der seinerseits mit seinem Durchlässigkeitsbeiwert = 100 % gesetzt wird.

Zweckmäßigerweise wird dieser Referenzwert = 100 % als die Bodenschicht in Teufe der Filterrohroberkante gewählt; alternativ kann auch das (äußere) Schüttgut in derselben Teufenlage gewählt

Die teufendifferenziert berechnete Schüttgut-Dimensionierung stellt immer nur Basiswerte für eine erforderliche Kompromissfindung, die die technischen und wirtschaftlichen Ausführungsmöglichkeiten berücksichtigt, zur Verfügung.

Wesentlicher Bestandteil dieser Kompromissfindung ist die Überprüfung der „hydraulischen Kette“, bei der in Fließrichtung (Boden \rightarrow Schüttgut \rightarrow Filterrohr) kein durchflussbehindernder Rückgang des Durchlässigkeitsbeiwertes auftreten darf.

Dabei ist zu beachten, dass überhöhte Steigerungen in den einzelnen Stufen der „hydraulischen Kette“ für den Neubau-Pumptest irrelevant sind, aber für die nachfolgende Brunnenalterung (z.B. „biologische Verockerung“ und „Kolmation“) ein wesentliches Kriterium für die Verzögerung des Leistungsrückgangs darstellen.

Die Überprüfung der „hydraulischen Kette“ stellt demnach sicher, dass die Zielvorgabe einer möglichst langen Brunnenlebenszeit geprüft / eingehalten wird.

Die für den Kreuzvergleich benötigten Durchlässigkeitsbeiwerte für Boden und Sande & Kiese nach DIN 4924 werden mittels Berechnung aus Kornverteilungskurven (Siebung bzw. Digitale Partikelmessung) bestimmt.

Im Kap. „Durchlässigkeitsbeiwert“ wurden bereits ausführlich die Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes nach der Methode von Beyer & Schweiger (1969) berichtet:

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

mit C = Proportionalitätsfaktor in Abhängigkeit C_U und Lagerungsart

Für Böden sollte dabei die Lagerungsart „mittel“ oder „dicht“ (sofern sie nicht geeignet gemessen wurde), für Sande & Kiese nach DIN 4924 wegen der viskositätsabhängigen Einbautechnik „locker“ oder „mittel“ für den Kreuzvergleich gewählt werden.

Für Glaskugeln ist zwar noch nicht die Gültigkeit der Durchlässigkeitsbeiwertberechnung nach Beyer & Schweiger (1969) nachgewiesen / bestätigt worden, aber hilfsweise für den Kreuzvergleich kann sie zunächst angenommen werden; für den Kreuzvergleich wird als Lagerungsart der Glaskugeln die Eingabe „dicht“ empfohlen.

Für den Durchlässigkeitsbeiwert des Filterrohres werden die von D.Klotz im Forschungsbericht „Berechnete Durchlässigkeiten handelsüblicher Brunnenfilterrohre und Kunststoff-Kiesbelagfilter“ (1990) aufgelisteten Werte für die heute üblichen Filtertypen Wickeldraht – Schlitzbrücke – PVC Querschlitz und Schlitzweiten bis 3 mm empfohlen. Für Wickeldrahtfilter wird in die Schlitztypen „Runddraht“ , Profildraht“ und „Profildraht Hochleistung“ in „Standard“ und „schwere Konstruktion“ unterschieden.

So sind Steigerungen der Durchlässigkeitsbeiwerte in der „hydraulischen Kette“ bei richtiger Schüttgut-Dimensionierung mit Sanden & Kiesen nach DIN 4924

- mit einfacher Kiesschüttung Boden (dichte Lagerung) → Schüttgut (mittlere Lagerung)
100 % → > 10.000 %
- mit doppelter Kiesschüttung Boden (dichte Lagerung) → Schüttgut außen (mittlere Lagerung) → Schüttgut innen (mittlere Lagerung)
100 % → > 10.000 % → > 100.000 %

nicht übertrieben, sondern für eine möglichst lange Brunnennutzung erwünscht / gefordert.

Tabelle 7 zeigt beispielhaft die Durchlässigkeiten „normgerechter“ Sande & Kiese bei einem Unterkornanteil = 10 % in Abhängigkeit der Lagerungsart locker – mittel – dicht für die einzelnen Korngruppen nach DIN 4924 (1998). Von der Übernahme dieser „idealen“ Durchlässigkeitsbeiwerte normgerechter Schüttgüter wird dringend abgeraten; der Durchlässigkeitsbeiwert der jeweiligen Schüttgut-Liefercharge ist immer in Ergänzung der Bodenkennwerte zu überprüfen.

Im Kreuzvergleich der Tabelle 7 zeigt sich,

- wie sich der Durchlässigkeitsbeiwert durch Veränderung der Lagerungsart verändert (bei Verdichtung ergibt sich eine Verringerung der freien Durchlassquerschnitte mit Folge der Kolmations-Gefahr und Erhöhung der Verockerungsgeschwindigkeit ; in Konsequenz mit Verkürzung der Brunnenlebenszeit);
- dass „Angstschüttungen“ (= Wahl kleinerer Korngruppen als maximal bei „Sandfreiheit“ möglich) Durchlässigkeitsbeiwerte signifikant verringern (= Verringerung der Durchlassquerschnitte mit Folgen und Konsequenzen wie zuvor beschrieben).

Bei Überprüfungen der „hydraulischen Kette“ im Rahmen von Zustandsanalysen für bestehende Brunnen ist häufig zu bemerken, dass die Forderung der Durchlässigkeitsbeiwert-Steigerung im Strömungsverlauf gerade beim Filterrohr selten eingehalten wurde. Häufig wurde ein gegenüber dem anliegenden Schüttgut geringer durchlässiger Schlitztyp und fast immer geringer durchlässige Schlitzweiten, als im DVGW AB W 118 (2005) empfohlen, eingebaut. Eine Aufstellung mit Kreuzvergleich der Filterrohr-Kennwerte unterschiedlicher Art und Hersteller für den Filterrohrdurchmesser 300 mm ist in Tabelle 8 zusammengestellt.

Ebenso ist die nachträgliche Überprüfung (Brunnen-Zustandsüberprüfung) der „hydraulischen Kette“ wesentlicher Bestandteil in der Bewertung, ob der Brunnen hätte länger genutzt werden können.

Für die Brunnenoptimierung genügt es nicht, nur stichprobenartig die hydraulische Kette zu überprüfen; vielmehr müssen die Durchlässigkeitsbeiwerte (aus Kornsummenverteilungen) schichtenweise über den gesamten Grundwasserleiter bestimmt werden. Weiterer Vorteil dieser Vorgehensweise ist die Bestimmung der „geeigneten“ Filterstreckenlänge, soweit nicht hydrochemische Bedingungen Einschränkungen erfordern .

Bei einer tiefendifferenziert vollständig erstellten „hydraulischen Kette“ (Filterrohrbereich + Überschüttung) empfiehlt sich der Soll-Ist-Vergleich mit den geophysikalischen Messungen (vorrangig Flowmeter zur Messung der Zuflussverteilung und Neutron-Neutron-Log zur Porositäts- und Wassergehaltseinschätzung im Ring-

raum), um Störungen (z.B. durch das Bohrverfahren an der Bohrlochwand), Anomalien sowie Bau- und Betriebsfehler erkennen / lokalisieren zu können.

Tabelle 7 Sande & Kiese nach DIN 4924: Durchlässigkeitsbeiwerte und Kreuzvergleich
 k_f – Berechnung nach Beyer & Schweiger (1969)

Annahme: 10 % Unterkorn - kein Überkorn - Gleichverteilung				Kreuzvergleich				Kreuzvergleich			
Sande & Kiese nach DIN 4924 (1998)	k_f nach Beyer & Schweiger (1969)			Korngruppe	Lagerungsart			Korngruppe	Lagerungsart		
	locker	mittel	dicht		locker	mittel	dicht		locker	mittel	dicht
0,71 - 1,25 mm	7,09 E-03 m/s	5,60 E-03 m/s	4,66 E-03 m/s	0,71 - 1,25 mm	100 %	79 %	66 %	0,71 - 1,25 mm	127 %	100 %	83 %
1,0 - 2,0 mm	1,39 E-02 m/s	1,09 E-02 m/s	9,05 E-03 m/s	1,0 - 2,0 mm	196 %	154 %	128 %	1,0 - 2,0 mm	248 %	195 %	162 %
2,0 - 3,15 mm	5,69 E-02 m/s	4,51 E-02 m/s	3,76 E-02 m/s	2,0 - 3,15 mm	802 %	636 %	530 %	2,0 - 3,15 mm	1.016 %	805 %	671 %
3,15 - 5,6 mm	1,39 E-01 m/s	1,10 E-01 m/s	9,15 E-02 m/s	3,15 - 5,6 mm	1.966 %	1.552 %	1.291 %	3,15 - 5,6 mm	2.490 %	1.966 %	1.635 %
5,6 - 8,0 mm	4,50 E-01 m/s	3,58 E-01 m/s	2,99 E-01 m/s	5,6 - 8,0 mm	6.349 %	5.049 %	4.217 %	5,6 - 8,0 mm	8.039 %	6.394 %	5.340 %

Durchlässigkeitsbeiwert nach Beyer & Schweiger (1969)

Korngruppe nach DIN 4924

Lieferchargen von Brunnenbau-Schüttgütern nach DIN 4924 (1998) weisen durch signifikante Anteile an Unter-/Überkorn sowie Ungleichverteilung teilweise erhebliche Abweichungen von der berechneten berechneten Durchlässigkeit auf. Proben-Verteilungsuntersuchungen sind mit Digitaler Partikelmesstechnik / dynamischer Bildanalyse durchzuführen. Siebanalysen sind zur Untersuchung ungeeignet.

	locker	mittel	dicht		locker	mittel	dicht
0,71 - 1,25 mm	51 %	40 %	34 %	0,71 - 1,25 mm	65 %	51 %	43 %
1,0 - 2,0 mm	100 %	79 %	65 %	1,0 - 2,0 mm	127 %	100 %	83 %
2,0 - 3,15 mm	410 %	325 %	271 %	2,0 - 3,15 mm	521 %	413 %	344 %
3,15 - 5,6 mm	1.004 %	793 %	659 %	3,15 - 5,6 mm	1.278 %	1.009 %	839 %
5,6 - 8,0 mm	3.242 %	2.579 %	2.154 %	5,6 - 8,0 mm	4.125 %	3.281 %	2.740 %

	locker	mittel	dicht		locker	mittel	dicht
0,71 - 1,25 mm	12 %	10 %	8 %	0,71 - 1,25 mm	16 %	12 %	10 %
1,0 - 2,0 mm	24 %	19 %	16 %	1,0 - 2,0 mm	31 %	24 %	20 %
2,0 - 3,15 mm	100 %	79 %	66 %	2,0 - 3,15 mm	126 %	100 %	83 %
3,15 - 5,6 mm	245 %	193 %	161 %	3,15 - 5,6 mm	309 %	244 %	203 %
5,6 - 8,0 mm	791 %	629 %	526 %	5,6 - 8,0 mm	998 %	794 %	663 %

	locker	mittel	dicht		locker	mittel	dicht
0,71 - 1,25 mm	5 %	4 %	3 %	0,71 - 1,25 mm	6 %	5 %	4 %
1,0 - 2,0 mm	10 %	8 %	6 %	1,0 - 2,0 mm	13 %	10 %	8 %
2,0 - 3,15 mm	41 %	32 %	27 %	2,0 - 3,15 mm	52 %	41 %	34 %
3,15 - 5,6 mm	100 %	79 %	66 %	3,15 - 5,6 mm	127 %	100 %	83 %
5,6 - 8,0 mm	323 %	257 %	214 %	5,6 - 8,0 mm	409 %	325 %	272 %

	locker	mittel	dicht		locker	mittel	dicht
0,71 - 1,25 mm	2 %	1 %	1 %	0,71 - 1,25 mm	2 %	2 %	1 %
1,0 - 2,0 mm	3 %	2 %	2 %	1,0 - 2,0 mm	4 %	3 %	3 %
2,0 - 3,15 mm	13 %	10 %	8 %	2,0 - 3,15 mm	16 %	13 %	11 %
3,15 - 5,6 mm	31 %	24 %	20 %	3,15 - 5,6 mm	39 %	31 %	26 %
5,6 - 8,0 mm	100 %	80 %	66 %	5,6 - 8,0 mm	126 %	100 %	84 %

Tabelle 8 Kennwerte und Kreuzvergleich verschiedener Filterrohre für den Durchmesser 300 mm
 Quelle Kennwerte: D.Klotz (1990)

Rohrdurchmesser	Schlitzweite		
300 mm	1 mm	2 mm	3 mm
Wickeldraht Runddraht Standard	2,20 E-02 m/s	4,90 E-02 m/s	7,30 E-02 m/s
Wickeldraht Profildraht Standard	4,60 E-02 m/s	9,30 E-02 m/s	1,41 E-01 m/s
Wickeldraht Profildraht schwere Konstruktion	3,90 E-02 m/s	8,60 E-02 m/s	1,34 E-01 m/s
Wickeldraht Profildraht Hochleistung	1,07 E-01 m/s	2,13 E-01 m/s	
Schlitzbrücke	1,80 E-02 m/s	3,50 E-02 m/s	5,20 E-02 m/s
PVC glatt horizontale Schlitz	3,80 E-03 m/s	5,20 E-03 m/s	6,10 E-03 m/s

Kreuzvergleich		
1 mm	2 mm	3 mm
100 %	223 %	332 %
100 %	202 %	307 %
100 %	221 %	344 %
100 %	199 %	
100 %	194 %	289 %
100 %	137 %	161 %

Wickeldraht Runddraht Standard	48 %	53 %	52 %
Wickeldraht Profildraht Standard	100 %	100 %	100 %
Wickeldraht Profildraht schwere Konstruktion	85 %	92 %	95 %
Wickeldraht Profildraht Hochleistung	233 %	229 %	
Schlitzbrücke	39 %	38 %	37 %
PVC glatt horizontale Schlitz	8 %	6 %	4 %

Kreuzvergleich

	freie Eintrittsfläche		
	1 mm	2 mm	3 mm
Wickeldraht Runddraht Standard	12,7 %	21,5 %	27,9 %
Wickeldraht Profildraht Standard	14,0 %	23,3 %	30,0 %
Wickeldraht Profildraht schwere Konstruktion	11,9 %	20,5 %	26,8 %
Wickeldraht Profildraht Hochleistung	25,8 %	38,6 %	
Schlitzbrücke	9,0 %	18,1 %	27,3 %
PVC glatt horizontale Schlitz	7,7 %	9,8 %	12,0 %

Exkurs - Brunnenalterungsart „Schüttgut-Setzung“

Im DVGW-Regelwerk zum Brunnenbau und -betrieb sowie zur Brunnenregenerierung wird an verschiedenen Stellen von „Setzung / Umlagerung möglich“ berichtet, ohne quantitative Erläuterungen der (Schüttgut-) Setzungskonsequenzen zu geben.

G.Houben & C.Treskatis führen aus („Regenerierung und Sanierung von Brunnen“, 2003):
„Systematische Untersuchungen zur Lagerungsdichte von Schüttgütern im Ringraum von Brunnenbohrungen und deren Setzungsverhalten im Brunnenbetrieb sind nicht bekannt.“

Das DVGW AB W 130 „Brunnenregenerierung“ (2007) definiert die Abnahme der Leistungsfähigkeit als Brunnenalterung und führt als Alterungsarten „Verockerung“ (biologisch und chemisch), „Versandung“ (Sandführung, Auflandung, Kolmation = Selbstabdichtung), „Versinterung“, „Verschleimung“, „Aluminiumausfällungen“ und „Korrosion“ auf.

Anmerkung: Der Begriff der „biologischen Brunnenverockerung“ ist das Synonym synergetischer Vorgänge

- für eine Biofilm-indizierte (strömungsbehindernde) Erhöhung der Widerstandsbeiwerte durch Veränderung der Oberflächen-Rauheit; raue Oberflächen werden dabei zunächst geglättet während glatte Oberflächen einen Rauheit erlangen;
- und
- für eine mikrobiologisch-indizierte (durchflussbehindernde) Erhöhung des Durchlässigkeitsbeiwertes durch querschnittseinschränkende Ausfällungen.

Als Verfahren, bei denen eine „Veränderung der Kiesschüttungs-Lagerungsdichte möglich“ ist, werden im W 130 aufgelistet:

Intensiventnahme, Kolben, CO₂-Injektion, Niederdruck-Innenspülung, Hochdruckspülverfahren Innen- und Aussenspülung, Druckwellen-/Impulsverfahren – Erzeugung durch Wasserhochdruck, Druckwellen-/Impulsverfahren – Erzeugung durch Knallgas, Wasser- oder Luftkomprimierung, Druckwellen-Impulsverfahren – Erzeugung durch Sprengladungen

Dabei wird keine Differenzierung zu verfahrensunterschiedlichen Bedingungen und „Setzungsergebnissen“ gegeben.

In der Ingenieurgeologie wird die Setzung auch als „Verfestigung“ bzw. „Diagenese“ beschrieben.

Die vorliegenden Ergebnisse des Kooperationsvorhabens der TU Berlin FG Ingenieurgeologie / IBB GmbH führen dazu, die „Schüttgut-Setzung“ als zusätzliche Brunnenalterungsart einzuführen.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde festgestellt, dass Sande & Kiese nach DIN 4924 aufgrund der Viskositätsbedingungen beim Schüttgut-Einbau (fast) immer in die partikelspezifisch lockere Lagerung fallen.

Die Berechnungen zur Schüttgut-Durchlässigkeit zeigen für die partikelspezifisch lockere Lagerung die höchsten / günstigsten k_F Werte auf.

Durch verschiedene Ursachen

- Inbetriebnahme mit Klarpumpen und Entsandung (vgl. DVGW MB W 119, 2002),
- Brunnenbetrieb, z.B. intermittierender Brunnenbetrieb mit häufigen Ein-/Aus-Schaltzyklen, Vibrationen durch anliegende Pumpeinheit etc.,

und / oder

- diverse Regenerierverfahren
- wird eine Schüttgut-Setzung herbeigeführt.

Die Schüttgut-Setzung kann, ausgehend von der lockeren Lagerungsart von Sanden und Kiesen bei der Einbringung, in zwei Arten eingeteilt werden:

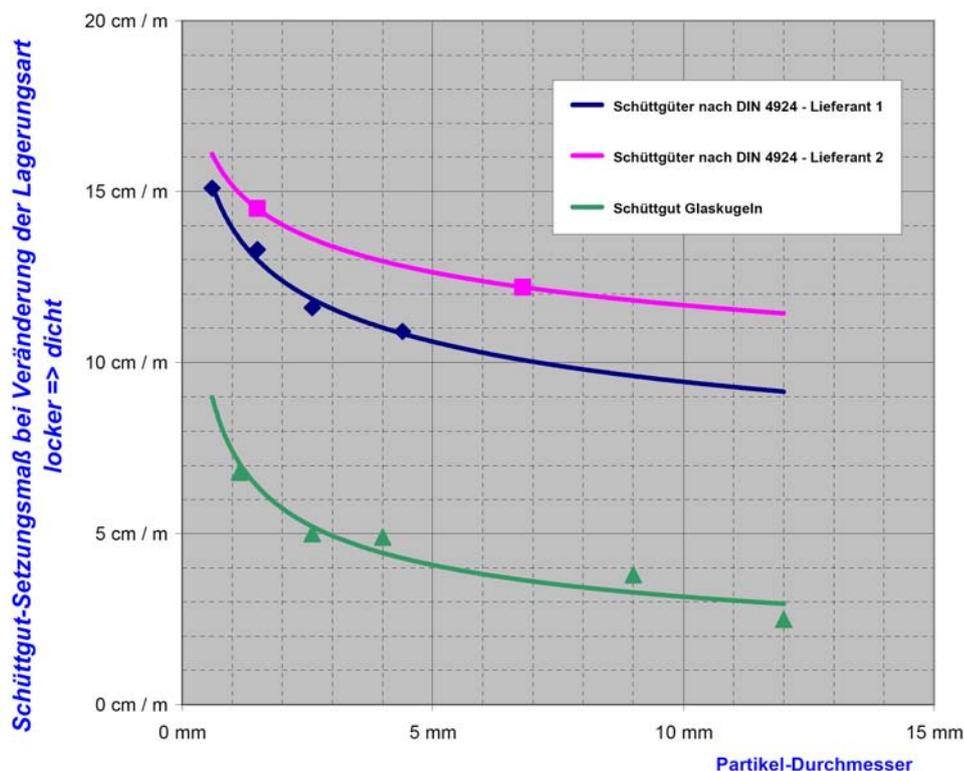
- **unvermeidbare Schüttgut-Setzung**
in den Bereich der mittleren Lagerungsdichte
- **vermeidbare Schüttgut-Setzung**
bis in den Bereich der partikelspezifisch dichten Lagerung.

Entsprechend der herbeigeführten Schüttgut-Setzung geht der rechnerische Durchlässigkeitsbeiwert für Sande & Kiese auf bis ca. 50 % bei partikelspezifisch dichter Lagerung im Vergleich zur lockeren Lagerung zurück.

Als Folge der Schüttgut-Setzung werden die freien Durchlassquerschnitte zwischen den Partikel geringer und mit zunehmender Schüttgut-Setzung steigt die Kolmationsgefahr (= Selbstabdichtung durch Partikeleinlagerung) und die Verockerungsgeschwindigkeit (bei konstanter Fördermenge wird die Strömungsgeschwindigkeit im Einzel-Porenkanal erhöht und damit die Nahrungsbedingungen für die Biofilm-mikrobiologisch-indizierte Verockerung „verbessert“). In Folge erhöht sich der Regenerieraufwand durch Verkürzung der Regenerierzyklen und die Brunnenlebenszeit wird signifikant verringert.

In der einschlägigen Literatur zur Brunnenalterung und Brunnenregenerierung werden immer wieder so genannte „absteigende Sägezahnkurven“ gezeigt; der „Abstieg“ ist im Wesentlichen die Abbildung einer voranschreitenden „Schüttgut-Setzung“.

Im Kooperationsvorhaben wurde im Rahmen der Laborvorversuche zur Messung der Porenanteile bei partikelspezifisch lockerer und dichter Lagerung speziell auch die Schüttgut-Setzung untersucht. Dabei wurden bisher für Schüttgüter nach DIN 4924 Setzungen 9 ... 15 cm / m in Abhängigkeit der Korndurchmessers und Schüttgut-Materials/-Lieferanten ermittelt (kleine Partikel = höchstes Setzungsmaß). Für Glaskugeln wurden signifikant geringere Setzungsmaße ermittelt: 3 ... 7 cm / m; Glaskugeln nehmen aber auch bereits beim Brunnen-Einbau im Vergleich zu Sanden und Kiesen eine relativ dichtere Lagerung ein.



Versuchsdatum: 22.03.2009

Bild 17 Laborversuch "Klarwasser" zum Setzungsverhalten verschiedener Brunnenbau-Schüttgüter Einbringung Schüttgut durch Absinken in Wasser

Ungeklärt ist bisher, wie der durch die Schüttgut-Setzung entstehende Hohlraum gefüllt wird oder ob er (teilweise) offen bleibt. Vermutet wird ein Zusammenspiel von Nachsacken der Schüttgutsäule und Eindringen von Boden.

Gelegentlich, vor allem in Firmeninformationen, wird von „Auflockerungen“ (= erwartete Vergrößerung des Porenanteils im Schüttgut) durch verschiedene Verfahren zu Brunnenentsandung / -regenerierung berichtet. Versuche in Plexi-Brunnenmodellen haben gezeigt, dass diese „Auflockerungen“ nur für Millisekundenbereich (entsprechend Technologie eventuell mehrfach nacheinander) Bestand haben und durch die „Auflockerung“ eine Partikeldrehung in Folge mit Schüttgut-Setzung, teilweise bis zur partikelspezifisch dichten Lagerung, herbeiführen. Über die exakten Vorgänge wird demnächst in einer separaten Veröffentlichung berichtet.

Im Rahmen von Entsandungs- / Regenerierarbeiten werden häufig Schüttgut-Setzungen infolge Volumenverlust beobachtet. Die „Wirkung“ dieser Arbeiten kann in zwei Kategorien eingeteilt werden:

a. Masseverlust

Masseverlust entsteht durch Unterkornaustrag mit $d < \text{Schlitzweite}$ entweder aus dem anstehenden Boden oder aus dem Schüttgut ohne Volumenverlust, d.h. die Partikel werden aus dem Zwickelraum entfernt und der Porenanteil dadurch erhöht; i.a. wird dieser Vorgang als „Suffosion“ bezeichnet.

Durch „Masseverlust“ wird die Durchlässigkeit erhöht.

Beispiel 1

Schüttgut nach DIN 4924 mit einer idealisierten Kornverteilung innerhalb der Korngruppe kann durch vollständige Entfernung eines angenommenen Unterkornanteils von 10 % in seinem rechnerischen Durchlässigkeitsbeiwert je nach Fraktion zwischen 11 und 22 % gesteigert werden.

In der Realität der Brunnenbau-Entsandung ist der erwünscht hohe Unterkornaustrag jedoch nicht möglich, da der größte Teil des Unterkorns den Filterschlitz nicht passieren kann. Er größer ist als dieser und hat überwiegend einen Durchmesser zwischen der definierten Untergrenze der Korngruppe und der Filterschlitzweite; d.h., wird Schüttgut-Unterkorn in Richtung Filterschlitz transportiert, kann diesen aber nicht passieren, so erfolgt eine entsprechende Verdichtung / Blockierung, die definitionsgemäß eine „innere Kolmation“ ist.

Beispiel 2

Werden größere Mengen Feinpartikel bei der Entsandung entfernt, so liegt in den meisten Fällen entweder eine Schüttgut-Fehldimensionierung oder eine signifikante Bohrlochabweichung mit am Boden anliegendem Filterrohr ohne Trennschicht vor.

Die Identifikation erfolgt mittels Partikel-Größen- und -Formvergleich des entfernten Materials mit den Boden- und Schüttgut-Proben.

Beispiel 3

Wird durch die Brunnenbau-Entsandung die Förderleistung signifikant erhöht, so hat dies in erster Linie seine Ursache in der Entfernung von durchflussbehindernden Störungen durch das Bohrverfahren an der Bohrlochwand. Dieser Vorgang ist im DVGW MB W 119 (2002) als „Klarpumpen“ definiert und gegenüber dem Begriff „Entsanden“ eindeutig abgegrenzt.

Zur Erinnerung: beim Brunnenbau entferntes Unterkorn-Schüttgut kann keine Förderleistungserhöhung bewirken, da der Durchlässigkeitsbeiwert der Kiesschüttung inklusive Unterkornanteil bereits um ein Vielfaches höher ist als der Durchlässigkeitsbeiwert des anstehenden Bodens.

b. Volumenverlust

Durch Volumenverlust entsteht eine Schüttgut-Setzung in Verbindung mit dem Rückgang des Porenanteils.

Volumenverlust entsteht

- durch Partikelumlagerung ohne Masseverlust;
- durch Partikelumlagerung wegen Masseverlust.

Bei der Partikelumlagerung wegen Masseverlust werden Unterkorn-Partikel ($d < \text{Schlitzweite}$) entfernt, die Bestandteil des Korngerüstes sind, d.h. nicht im Zwickelraum eingelagert sind.

Durch Volumenverlust wird wegen Rückgang des Porenanteils die Durchlässigkeit verringert. Dadurch werden, wie bereits erwähnt, die freien Durchlassquerschnitte zwischen den Partikel geringer und mit zunehmender Setzung steigt die Kolmationsgefahr und die Verockerungsgeschwindigkeit. Letztlich kann sich die Förderleistung, für diesen Vorgang am besten durch die Berechnung der spezifischen Ergiebigkeit (= Fördermenge pro m Absenkung) beschrieben, annähernd halbieren ($Q_{\text{spez. Ergiebigk.}} = 100\%$ bei Neubau wird zu $Q_{\text{spez. Ergiebigk.}} = 50\%$ durch vollständige Setzung und Folgeerscheinungen !)

Bei Volumenverlust mit Masseverlust (bei $d > \text{Filterschlitz}$) kann ein zusätzlicher Leistungsverlust durch innere Kolmation erfolgen !

„Grundlage“ des Schüttgut-Volumenverlustes bzw. der Schüttgut-Setzung ist die bereits mehrfach erwähnte Art der Schüttgut-Einbringung, die im flüssigkeitsgefüllten Bohrloch aufgrund der Auftriebskräfte beim Partikelabsinken immer annähernd die kornspezifisch lockerste Lagerungsart zur Folge hat.

Die Medienviskosität (mit / ohne Spülmittelzusätze) „fördert“/erhöht zwar die Bildung der kornspezifisch lockeren Lagerungsart, aber zumeist genügt auch die Klarwasser-Viskosität zur Herstellung der lockeren Lagerungsart.

Anmerkung: versuchstechnisch wird in Untersuchungen gemäß DIN 18126 ein geringerer Porenanteil für die kornspezifisch lockere Lagerung erreicht, da die Messung normgemäß „trocken“ (= Viskosität von Luft) durchgeführt wird.



Bild 18 Untersuchung der Porenanteils für die partikelspezifisch lockere Lagerung gemäß DIN 18126 „trocken“

Bei der Brunnen-Inbetriebnahme (inkl. Entsandung), beim Brunnenbetrieb (z.B. durch anliegendes Pumpensteigerrohr, intermittierenden Betrieb, sonstige Erschütterungen etc.) und auch bei der Brunnenregenerierung erfolgen dann Umlagerungen / Volumenverlust / Setzung, die eine Verringerung des Porenanteils (= Verringerung der möglichen Förderleistung) zur Folge haben.

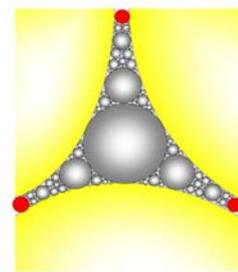
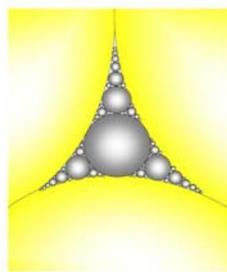
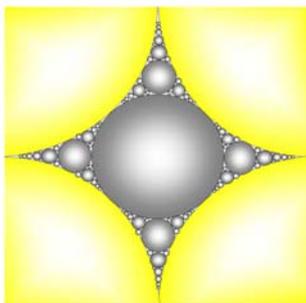
Es ist davon auszugehen, dass die Häufigkeit der Schüttgut-Umlagerungen / des -Volumenverlust / der -Setzung ist höher als das Auftreten der Brunnenalterungsart „Verockerung“.

Der Vorgang der Schüttgut-Setzung ist irreversibel.

Konstruktiv kann die Schüttgut-Setzung bei der Dimensionierung und einer „Setzungs-Provokation“ beim Brunnenbau einbezogen werden; Untersuchungen / Erfahrungen dazu stehen noch aus.

Bild 19 zeigt eine Zusammenstellung der Vorgänge bei der Suffosion, ohne und mit Volumenverlust = Setzung, leider zweidimensional, aber dadurch einfacher verständlich. Im Fall der Suffosion mit Setzung besteht die Gefahr, dass die erwünschte Durchlässigkeitsverbesserung durch die Durchlässigkeitsverringering der Setzung verringert / sogar übertroffen wird und damit insgesamt eine irreversible Verschlechterung der Brunnenleistungsfähigkeit erreicht wird.

Aus Bild 19 ist auch offensichtlich, dass eine Entsandung mit der Entfernung von eingelagerten Partikeln aus dem brunnennah anstehenden Boden erst ab einer bestimmten Korngröße des stehen-bleibenden Skeletts möglich ist. Beschrieben wird die Suffosionsfähigkeit durch die Kornsummenkurve mit Bestimmung des Ungleichkörnigkeitsfaktors C_u . Entsandungen mit $C_u < 5$ (evtl. auch höher) haben immer Masseverlust **und** Boden-Erosion (=> Boden-Setzung) zur Folge !



© IBB Berlin 2010

Kugelpackungen in verschiedenen Lagerungsformen

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

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

fraktale Kugelpackung mit "spitzenberührter Einlagerung"

suffosionsfähig ohne Setzung

suffosionsfähig mit Setzungsgefahr

Bild 19 Suffosion / Entsandung ohne und mit Setzung(sgefahr)

Aussicht

Die Individualität der Bodenkennwerte bedarf für jeden Brunnen individueller Betrachtungen und Kompromisse / Lösungen für die Dimensionierung und Bauausführung. Eine verallgemeinernde Regelwerkssetzung der individuellen Details und die Beschreibung für Kompromisse zur / in der Bauausführung ist schwierig und daher nur bedingt mit Auflistung der Randbedingungen, begleitenden Untersuchungen und unbedingt zu vermeidenden Fehlern möglich.

Die Fortführung des Kooperationsvorhabens TU Berlin / IBB-Berlin wird weitere Erkenntnisse zur Brunnenbau-Optimierung bzw. Fehler-Minimierung aufzeigen. Wesentlicher Bestandteil der gemeinsamen Arbeit ist dabei die Praxisnähe inklusive der Entwicklung von Messtechniken, die bei gleichem bzw. für den Anwendungszweck ausreichendem Ergebnis, die kosten- und zeitaufwendige Untersuchungen nach DIN, z.B. für die Bestimmung der Lagerungsdichte, ersetzen.

Zusammenfassung

Der vorgelegte Beitrag „Bedeutung und praxisgerechte Bestimmung von Bodenkennwerten für den Brunnenbau“

- ist nicht kompliziert sondern komplex;
- ist praxisgerecht weil realitätsnah;
- fordert zum Umdenken von zweidimensionalen (Minimal-Durchmesser flächenorientierten) zu dreidimensionalen (Durchschnitts-Kugel mit Formparameter-Ergänzungen und lagerungsart-abhängigen Porenanteilen = räumlich-orientierten) Berechnungen für den Brunnenbau auf;
- berichtet über einige Untersuchungsergebnisse zur Bestimmung von Boden- und Schüttgut-Kennwerten für den Brunnenbau;
- zeigt erste Lösungsvorschläge für dreidimensionale Schüttgut-Berechnungen;
- weist auf die Bedeutung und Konsequenzen der Schüttgut-Setzung hin;
- erhöht den wirtschaftlichen Nutzen durch die Verlängerung der Brunnenlebenszeit inklusive Verringerung der Instandhaltungskosten durch verlängerte Regenerierzyklen.

Selbstverständlich bedürfen die gemessenen Bodenkennwerte und die daraus abgeleitete Schüttgut-Dimensionierung einer praxisgerechten Kompromissfindung für die tatsächliche Ausführung.

Diese Kompromissfindung findet im Spannungsdreieck „Vermeidung Sandführung – lange Brunnenlebenszeit – Ausführbarkeit“ statt und kann nur in Gemeinsamkeit Auftraggeber – Auftragnehmer – Ingenieurbüro / versierter Berater unter Diskussion der technischen und wirtschaftlichen Aspekte entschieden werden.

Dieser Beitrag soll außerdem, auch wenn bzw. weil noch einige Fragestellung zur Beantwortung anstehen, dazu beitragen, neuen und den in der Einleitung erwähnten (Forschungs-) Vorhaben Impulse zu geben und Doppelforschung zu vermeiden. Wünschenswert wären Kooperationen.

Hinweis: Dieser Beitrag und die Vortragsfolien sind als PDF im Download-Bereich unter www.ibb-berlin.de verfügbar.