

ANWENDUNGSHANDBUCH ZU DEN MERKBLÄTTERN

DWA-M 511 Filtern mit Geokunststoffen

BAW-Anwendung von geotextilen Filtern
an Wasserstraßen (MAG)

Januar 2019

PROF. DR.-ING. UWE GLABISCH



Mit freundlicher
Empfehlung
überreicht von





Die frische Wissensplattform für GGU-Software im Internet.

Mobiler, innovativer, informativer:
Willkommen auf unserer neuen Webseite.
www.ggu-software.com

... und falls Sie's lieber menschlich mögen: Rufen Sie uns einfach an, dann erläutern wir Ihnen die Vorzüge unserer **Softwarelösungen für Umwelttechnik, Grundbau und Bodenmechanik** gerne persönlich!

Inhalt

1	Einleitung.....	5
2	Planungsgrundlagen für geotextile Filter	6
2.1	Baugrund	6
2.2	Einwirkungen	6
2.3	Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwerts k_f aus der Kornverteilungslinie	6
3	Filterbemessung gemäß Merkblatt „Filtern mit Geokunststoffen“, DWA-M 511.....	9
3.1	Flussdiagramm	9
3.2	Unterscheidung in kohäsive und nicht kohäsive Böden.....	9
3.3	Notwendigkeit eines (geotextilen) Filters	9
3.3.1	Kriterium für nicht kohäsive Böden nach Cistin/Ziems	9
3.3.2	Kohäsive Böden nach Ansatz MMB 2013	11
3.4	Mechanische Filterwirksamkeit.....	11
3.4.1	Mechanische Filterwirksamkeit für nicht kohäsive Böden.....	12
3.4.1.1	Statische hydraulische Belastungen	12
3.4.1.2	Dynamische hydraulische Belastungen	13
3.4.2	Mechanische Filterwirksamkeit für suffosionsgefährdete Böden	13
3.4.2.1	Vereinfachter Nachweis.....	14
3.4.2.2	Nachweis der Suffosionssicherheit nach Ziems.....	14
3.4.2.3	Nachweis der Suffosionssicherheit nach Kenney/Lau	17
3.4.2.4	Nachweis der Suffosionssicherheit nach Burenkova	21
3.4.3	Bemessung Filter für suffosionsgefährdete Böden	22
3.4.4	Mechanische Filterwirksamkeit für kohäsive Böden.....	24
3.5	Hydraulische Filterstabilität	24
3.6	Filterdicken	25
3.7	Robustheit.....	25
3.8	Abschließendes Beispiel 11 zur Filterbemessung gemäß DWA-M 511	26
3.8.1	Kontrolle der Notwendigkeit eines Filters	26
3.8.2	Untersuchung der Suffosionssicherheit des Bodens nach Kenney/Lau.....	27
3.8.3	Filterbemessung – charakteristische Öffnungsweite	28
3.8.4	Untersuchung der hydraulischen Filterwirksamkeit	29
3.8.5	Filterdicke	30
3.8.6	Robustheit.....	30

4	Filterbemessung nach Merkblatt „Anwendung von geotextilen Filtern an Wasserstraßen“, MAG.....	31
4.1	Flussdiagramm	31
4.2	Baugrund als Planungs- und Bemessungsgrundlage.....	31
4.2.1	Nichtbindige Böden	31
4.2.2	Bindige Böden.....	31
4.2.3	Suffosionsgefährdete Böden	31
4.3	Filter- und Deckschichtbauweisen.....	32
4.4	Notwendigkeit eines geotextilen Filters nach Cistin/Ziems	33
4.5	Bemessung des Geotextils	33
4.5.1	Filterwirksamkeit	34
4.5.1.1	Bodentyp-Verfahren der BAW.....	34
4.5.1.2	Filterregeln nach AK 14	41
4.5.2	Materialeigenschaften	41
5	Filterbemessung nach M Geok E.....	45
5.1	Mechanische Filterwirksamkeit.....	45
5.1.1	Hydraulischer Sicherheitsfall I	45
5.1.2	Hydraulischer Sicherheitsfall II	45
5.1.3	Hydraulischer Sicherheitsfall III.....	45
5.2	Hydraulische Filterwirksamkeit.....	46
5.3	Geotextilrobustheitsklassen	47
6	Literatur	49
7	Anlagen.....	50

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1	Zulässiges Abstandsverhältnis $A_{50,zul}$ nach Cistin/Ziems	9
Abbildung 2	Zulässiges Abstandsverhältnis O_{90}/d_{50} in Abhängigkeit der Ungleichförmigkeit C_u	12
Abbildung 3	Flussdiagramm zur Beurteilung der Suffosionssicherheit von nicht kohäsiven Böden.....	14
Abbildung 4	Konstruktion der Formkurve (H-F-Diagramm) nach Kenney/Lau	18
Abbildung 5	Versuchsergebnisse und Grenzkurven von Burenkova im $h' - h'' -$ Diagramm	21
Abbildung 6	Filterbauweisen.....	32
Abbildung 7	Schematische Darstellung von durchlässigen Deckschichten.....	32
Abbildung 8	Körnungsbänder von Wasserbausteinen.....	33
Abbildung 9	Regelanforderungen an die Filterwirksamkeit eines Geotextils aus TLG 2008.....	38
Abbildung 10	Regelanforderungen an die Filterwirksamkeit eines Geotextils aus TLG 2018.....	39
Abbildung 11	Materialanforderungen an ein Geotextil aus TLG 2008.....	42
Abbildung 12	Materialanforderungen an ein Geotextil aus TLG 2018.....	43
Abbildung 13	Empfehlungen für die Ausbildung von Zusatzschichten aus MAG 1993	44

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1	Verfahren zur Ermittlung der Durchlässigkeit k in [m/s] aus der Korngrößenverteilung.....	7
Tabelle 2	Beiwert c nach Beyer	7
Tabelle 3	Abhängigkeit des empirischen Beiwerts c_1 nach Zieschang von der Lockergesteinsart	7
Tabelle 4	Abhängigkeit des empirischen Beiwerts c_2 nach Zieschang von der Lockergesteinsart	7
Tabelle 5	Korrekturfaktoren nach Seiler für $5 \leq C_u \leq 100$	8
Tabelle 6	Kriterien für mechanische Filterwirksamkeit, kohäsive Böden	24
Tabelle 7	Notwendiges Flächengewicht in Abhängigkeit der Überschüttung	25
Tabelle 8	Ermittlung der erforderlichen Geotextilrobustheitsklasse nach [12].....	47
Tabelle 9	Geotextilrobustheitsklasse nach [12].....	48

Verzeichnis der Anlagen

Anlage 1	Bemessung eines geotextilen Filters gem. DWA-M 511	50
Anlage 2	Bemessung eines geotextilen Filters gem. MAG 1993	51

IMPRESSUM

Prof. Dr.-Ing. Uwe Glabisch
c/o Hochschule Wismar / Fakultät für Ingenieurwissenschaften
Bereich Bauingenieurwesen / Lehrgebiet Grundbau und Bodenmechanik

Hochschule Wismar Zimmer 2.09 / Haus 22
Postfach 1210 Philipp-Müller-Straße 14
23952 Wismar 23966 Wismar

Telefon: +49 3841 753-7308
Mobil: +49 176 57757962
E-Mail: uwe.glabisch@hs-wismar.de

1 Einleitung

Geotextilien als Filter müssen so bemessen werden, dass der zu filternde Boden vor Erosion geschützt wird, das tragende Korngerüst somit stabil gehalten wird, das Passieren von Feinkorn nur in nicht kritischem Ausmaß so gestattet wird, dass eine Kolmation – der Aufstau von feinem Material am Filter - vermieden wird oder im unschädlichen Rahmen bleibt und das Grundwasser durch den Filter strömen kann.

Zu diesem Zweck müssen die mechanische Filterwirksamkeit (Bodenrückhalt), die hydraulische Filterwirksamkeit (Verhinderung eines Anstiegs der Sickerlinie) und die Robustheit nachgewiesen werden.

Für den Bereich des Straßenbaus werden gemäß „Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau“, ZTV E-StB, Hinweise zur Bemessung von geotextilen Filtern mit Bezug auf das „Merkblatt über die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Straßenbaus“, M Geok E, gegeben.

Im August 2017 erschien die überarbeitete Fassung des Merkblatts DWA-M 511 „Filtern mit Geokunststoffen“, die das Merkblatt „Anwendung von Geotextilien im Wasserbau“, DVWK 221/1992, ersetzt. Hierin wird aus dem Vergleich von nationalen und international gängigen Empfehlungen ein neues Bemessungsverfahren für die mechanische Filterstabilität entwickelt, ebenso werden Anforderungen an die hydraulische Filterwirksamkeit, die Filterdicken und die Robustheit formuliert.

Im Bereich Wasserstraßen – Böschungs- und Sohlsicherungen - wird die Bemessung von geotextilen Filtern im „Merkblatt Anwendung von geotextilen Filtern an Wasserstraßen“ (MAG) behandelt.

Die MAG stammt aus dem Jahr 1993. Nach Auskunft der BAW Karlsruhe wird im Zuge von Überarbeitungen empfohlen, einen Teilnachweis der Filterwirksamkeit durch den entsprechenden Nachweis gemäß DWA-M 511 zu ersetzen. Hierauf wird im vorliegenden Beitrag an gegebener Stelle eingegangen.

Die technischen Lieferbedingungen für Geotextilien und geotextilverwandte Produkte an Wasserstraßen (TLG) des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, Abteilung Wasserstraßen, Schifffahrt sind im Jahre 2018 neu erschienen und haben die TLG aus dem Jahr 2008 somit abgelöst. In der Anlage 2 der neuen TLG wird die Bodenart des Baugrundes in die drei Klassen A, B und C eingeteilt, in der TLG aus 2008 waren es die Klassen 1 bis 4. Das zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Handbuchs gültige Merkblatt MAG (1993) und die Richtlinie Prüfung von Geotextilien im Verkehrswasserbau (RPG, 1994) beinhaltet analog zur TLG 2008 die Bodentypen 1 bis 4. Der Bodentyp A in der TLG 2018 ist praktisch eine Zusammenführung der Bodentypen 1 und 2, der Bodentyp B entspricht dem Bodentyp 3 und der Bodentyp C dem Bodentyp 4. Da das Merkblatt MAG und die Richtlinie RPG nach wie vor Gültigkeit besitzen, wird in diesem Handbuch weiterhin mit den Bodentypen 1 bis 4 gearbeitet.

Der vorliegende Beitrag stellt die Nachweisverfahren dieser Merkblätter und Empfehlungen dar und versucht, in kurzen Beispielen (grau hinterlegte Textteile) die Anwendung zu verdeutlichen. Zu diesem Zweck wurden Flussdiagramme zur Nachweisführung geotextiler Filter gemäß DWA-M 511 und MAG 1993 in den Anlagen 1 und 2 erarbeitet. Die Programmausdrucke zu den Nachweisen wurden mit den Programmen GGU Sieve und GGU Filter Stabiltý erstellt.

2 Planungsgrundlagen für geotextile Filter

Folgende Planungsgrundlagen müssen bekannt sein, um die geotechnischen Filter auf ihre jeweilige Einsatzsituation hinsichtlich ihrer Filtereigenschaften und weiterer Festigkeitseigenschaften bemessen zu können.

2.1 Baugrund

- Schichtenaufbau
- Wasserstände
- Korngrößenverteilungslinien von an den Filter anliegenden Böden
- plastische Eigenschaften von an den Filter anliegenden Böden, undrainierte Scherfestigkeit c_u , Plastizitätszahl I_p
- evtl. innerer Reibungswinkel (Standicherheit von Böschungen, Reibungsbeiwert des Geotextils)
- Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte
- Filterbauweise (MAG)
- Deckschichtwahl (MAG)

2.2 Einwirkungen

- hydraulische Beanspruchungen
- mechanische Beanspruchungen aus Bauausführung – Durchschlagbeanspruchungen etc.
- mechanische Beanspruchung aus Überdeckung
- chemische Einwirkungen, Versinterung / Verockerung

2.3 Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwerts k_f aus der Kornverteilungslinie

Die Wasserdurchlässigkeit als Grundlage zur Untersuchung der hydraulischen Filterstabilität kann anhand der Korngrößenverteilungslinien nach in der Literatur genannten Verfahren abgeschätzt werden. Das Merkblatt „Anwendung von Kornfiltern an Bundeswasserstraßen" (MAK) [4],[5], stellt die im Folgenden aufgeführten Verfahren und deren Anwendungsbereiche für unterschiedliche Böden zusammen. Eingangsgrößen sind die undrainierte Scherfestigkeit c_u und die wirksamen Korndurchmesser bei 10, 20 bzw. 25 Massen-%, d_{10} , d_{20} bzw. d_{25} .

Für nicht kohäsive Böden kommen die Verfahren nach Hazen bzw. nach Beyer häufig zum Einsatz.

Verfahren	Formel	geeignete Bodenart	Parameter und Grenzen
Beyer (1964)	$k = c(C_u) \cdot (d_{10})^2$	Sande und Kiese	$C_u < 20$; $0,06 < d_{10} < 0,6 \text{ mm}$ $2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s} < k < 4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$
Hazen (1893)	$k = 0,0116 \cdot (d_{10})^2$	Sande	$C_u < 5$; $0,1 \text{ mm} < d_{10} < 3 \text{ mm}$
Kaubisch (1986)	$k = 10^{0,0005 \cdot P^2 - 0,12 \cdot P - 3,59}$ P in Gew %	tonhaltige Böden P = Pelitgehalt = $\Sigma(U+T)$ ($d < 0,02 \text{ mm}$)	$5 < C_u < 400$ $k < 10^{-6} \text{ m/s}$ P > 10 %
USBR (in Odong, 2008)	$k = 0,0036 \cdot (d_{20})^{2,3}$	gemischtkörnige Böden	$d_{10} < 0,02 \text{ mm}$ $d_{20} > 0,002 \text{ mm}$ $10^{-8} \text{ m/s} < k < 10^{-6} \text{ m/s}$
Seiler (1973)	$k = \frac{x_{10}(C_u)}{1000} \cdot d_{10}^2$		$5 < C_u \leq 17$
	$k = \frac{x_{25}(C_u)}{1000} \cdot d_{25}^2$	Kiese - Sande	$17 \leq C_u \leq 100$
Zieschang (1964)	$k = c_1 \cdot c_2 \cdot (d_{10})^2$	toniger, schluffiger bis kiesiger Sand	$C_u \leq 52$; $0,06 \text{ mm} < d_{10} < 0,6 \text{ mm}$ $1,6 \cdot 10^{-5} \text{ m/s} < k < 5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$

Tabelle 1: Verfahren zur Ermittlung der Durchlässigkeit k in $[m/s]$ aus der Korngrößenverteilung, nach [4] und [5]

C_u	1,0 - 1,9	2,0 - 2,9	3,0 - 4,9	5,0 - 9,9	10,0 - 19,9	> 20
$c(C_u)$	0,011	0,010	0,009	0,008	0,007	(0,006)

Tabelle 2: Beiwert c nach Beyer, nach [4] und [5]

Lockergesteinsart	C_u	Gültigkeitsbereich	c_1
reiner Sand, kiesiger Sand	1 - 3	$d_{10} = 0,1 - 0,6 \text{ mm}$	0,0139
reiner Sand, kiesiger Sand	3 - 5	$d_{10} = 0,1 - 0,6 \text{ mm}$	0,0116
schwach schluffiger Sand für $d_{0,01} < 2 \text{ %}$	≥ 5	$d_{10} = 0,1 - 0,6 \text{ mm}$	0,0093
schwach tonig schluffiger Sand mit $d_{0,01} < 3 \text{ %}$	≥ 5	$d_{10} = 0,08 - 0,6 \text{ mm}$	0,0070
tonig schluffiger Sand mit $d_{0,01} < 4 \text{ %}$	≥ 5	$d_{10} = 0,06 - 0,6 \text{ mm}$	0,0046

Tabelle 3: Abhängigkeit des empirischen Beiwerts c_1 nach Zieschang von der Lockergesteinsart, nach [4] und [5]

Glimmergehalt	c_2
kein Glimmergehalt bis Spuren	1,0
schwach glimmerig	0,8
stark glimmerig	0,5

Tabelle 4: Abhängigkeit des empirischen Beiwerts c_2 nach Zieschang von der Lockergesteinsart, nach [4] und [5]

	C _U	[Einer]									
	[Zehner]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
X ₁₀ (C _U)	0						21,5	19,0	17,0	15,0	13,5
	1	12,0	10,5	9,4	8,4	7,5	6,7	6,1	5,7		
X ₂₅ (C _U)									0,88	0,88	0,89
	2	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	1,0	1,02	1,04	1,06	1,08
	3	1,10	1,13	1,16	1,19	1,22	1,25	1,25	1,31	1,34	1,37
	4	1,40	1,44	1,48	1,52	1,56	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
	5	1,85	1,90	1,95	2,00	2,05	2,10	2,18	2,26	2,34	2,42
	6	2,50	2,58	2,66	2,74	2,82	2,90	2,98	3,06	3,14	3,22
	7	3,30	3,40	3,50	3,60	3,70	3,80	3,92	4,04	4,16	4,28
	8	4,40	4,54	4,68	4,82	4,96	5,10	5,26	5,42	5,58	5,74
	9	5,90	6,08	6,26	6,44	6,62	6,80	7,02	7,24	7,46	7,68
	10	7,90									

Tabelle 5: Korrekturfaktoren nach Seiler für 5 ≤ C_U ≤ 100, nach [4] und [5]

3 Filterbemessung gemäß Merkblatt „Filtern mit Geokunststoffen“, DWA-M 511

3.1 Flussdiagramm

Die Vorgehensweise einer Filterbemessung nach dem Merkblatt „Filtern mit Geokunststoffen“, DWA-M 511 [7] wird im Flussdiagramm der Anlage 1 gezeigt. Für die zu führenden Nachweise werden im Diagramm sowohl die jeweils zu beachtenden Kapitel des vorliegenden Handbuchs, als auch die Kapitel der DWA-M 511 zur einfachen Handhabung genannt.

3.2 Unterscheidung in kohäsive und nicht kohäsive Böden

Im Vorfeld zu weiteren Untersuchungen wird in Anlehnung an DIN 18196 in zu filternde kohäsive und nicht kohäsive Böden unterschieden:
Als kohäsive Böden werden mindestens mittelplastische fein- und gemischtkörnige Böden bezeichnet, die eine effektive Kohäsion besitzen, TM, TA, etc.
Nicht kohäsive Böden sind grobkörnige und leichtplastische gemischt- und feinkörnige Böden, SE, SU, TL, etc.

3.3 Notwendigkeit eines (geotextilen) Filters

3.3.1 Kriterium für nicht kohäsive Böden nach Cistin/Ziems

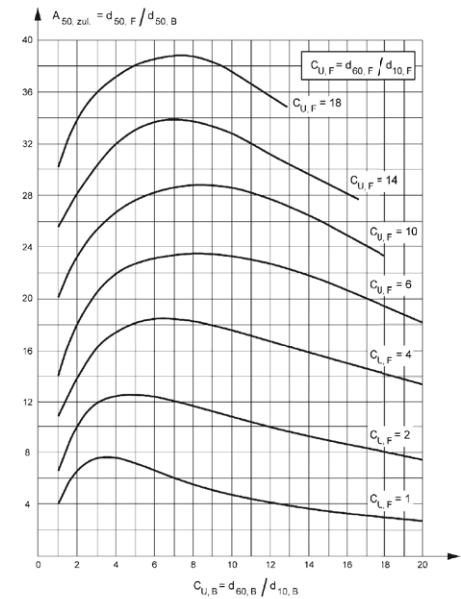
Anwendungsgrenzen:
Das im folgenden vorgestellte Kriterium stellt einen sicheren Ansatz lt. DWA-M 511 7.2 für Erdstoffe mit 0,1 mm < d < 30 mm und Filterstoffe mit 4 mm < d < 100 mm dar. Nach bisherigen Erfahrungen ist es jedoch auch für feinere und gröbere Kornbereiche verwendbar.

Aus den Korngrößenverteilungen des zu filternden Bodens (B) und des Filters (F) werden die folgenden Werte ermittelt:

$C_{U,F} = \frac{d_{60,F}}{d_{10,F}} \qquad C_{U,B} = \frac{d_{60,B}}{d_{10,B}} \qquad A_{50,vorh} = \frac{d_{50,F}}{d_{50,B}}$

Es wird anschließend eine Kontrolle mit dem Grenzwert des zulässigen Abstandsverhältnisses aus der folgenden Graphik durchgeführt $A_{50,vorh} \leq A_{50,zul}$

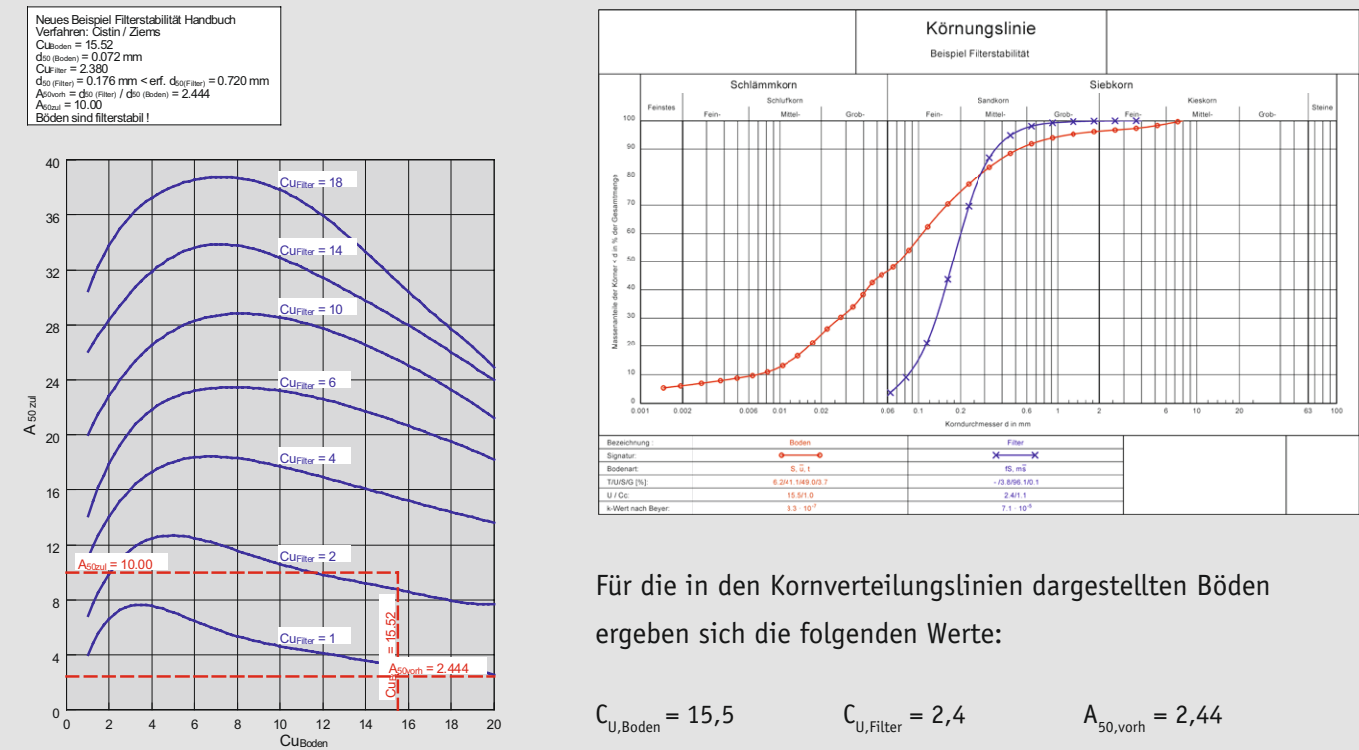
Nachweis:



$A_{50,vorh} \leq A_{50,zul}$

Abbildung 1: Zulässiges Abstandsverhältnis A_{50,zul} nach Cistin/Ziems, aus MMB 2013

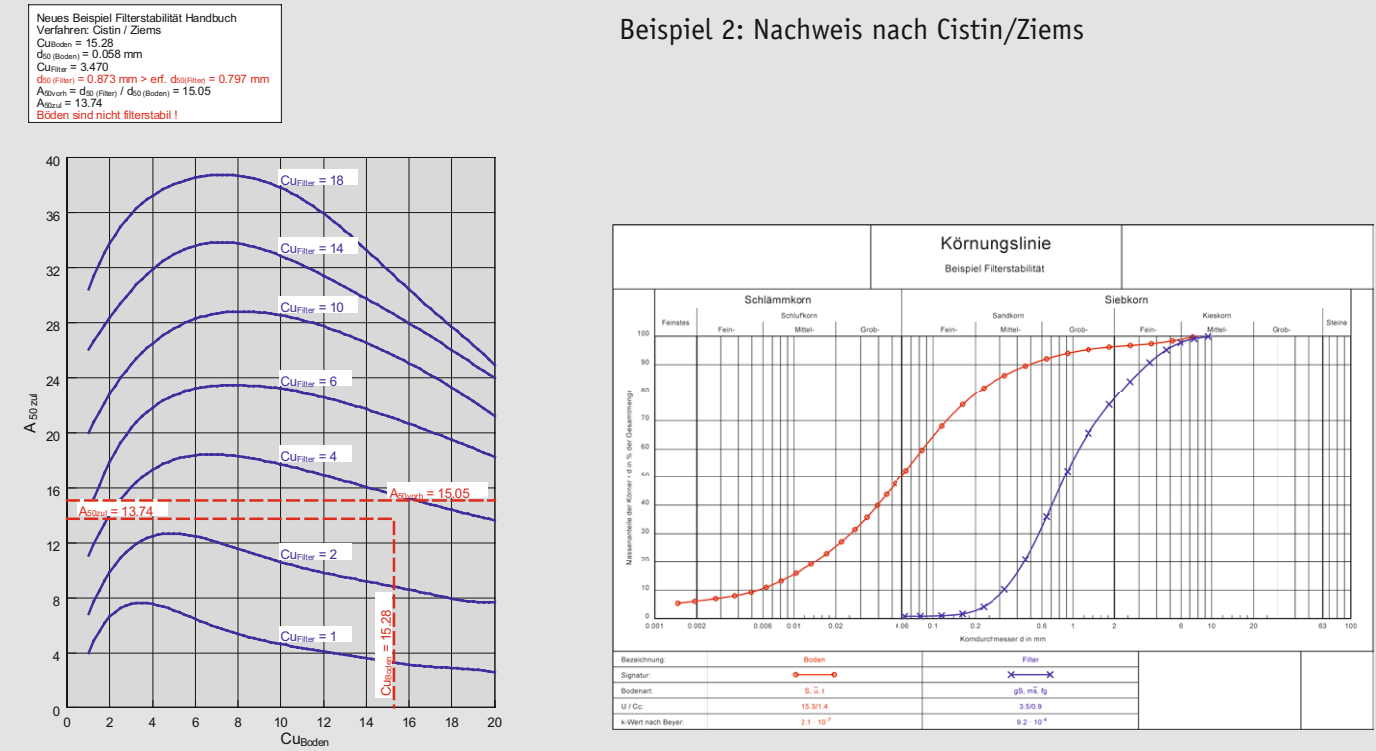
Beispiel 1: Nachweis nach Cistin/Ziems



Aus der Graphik (Cistin/Ziems) kann das zulässige Abstandsverhältnis abgelesen werden zu $A_{50,zul} = 10,0$

Somit ist die Bedingung $A_{50,vorh} \leq A_{50,zul}$ erfüllt, der Nachweis ist erbracht, **ein Filter ist nicht notwendig**.

Beispiel 2: Nachweis nach Cistin/Ziems



3.3.2 Kohäsive Böden nach Ansatz MMB 2013

Zwischen kohäsiven und nicht kohäsiven Böden ist kein (geotextiler) Filter notwendig, wenn gem. MMB 2013 5.3.2 für die Plastizitätszahl I_p , die undrainierte Scherfestigkeit c_u und die wirksamen Korndurchmesser d_{10} und d_{20} gilt:

- $I_p < 0,15$ und $c_u \geq 10 \text{ kN/m}^2$ (kohäsiv) und $d_{10} \leq 0,2 \text{ mm}$ und $d_{60} \leq 0,7 \text{ mm}$ (nicht kohäsiv) bzw.
- $I_p \geq 0,15$ und $c_u \geq 10 \text{ kN/m}^2$ (kohäsiv) und $d_{10} \leq 0,6 \text{ mm}$ und $d_{60} \leq 2,0 \text{ mm}$ (nicht kohäsiv)

3.4 Mechanische Filterwirksamkeit

Die Nachweise zur Mechanischen Filterwirksamkeit dienen der Bestimmung der maximal möglichen Öffnungsweite des Geotextils, um das Bodenmaterial des zu filternden Boden zurück zu halten.

3.4.1 Mechanische Filterwirksamkeit für nicht kohäsive Böden

Hinweis in DWA-M 511 7.4.1:
Werden Werte für die mögliche Öffnungsweite O_{90} berechnet, die kleiner sind als die auf dem Markt verfügbaren Werte, werden Laborversuche an für das Baufeld repräsentativen Bodenproben empfohlen.

Werden Werte für die mögliche Öffnungsweite O_{90} berechnet, die größer sind als die auf dem Markt verfügbaren Werte, können Filter mit kleineren Öffnungsweiten verwendet werden, wenn gleichzeitig die hydraulische Filterwirksamkeit (vgl. folgendes Kapitel) nachgewiesen werden kann.

3.4.1.1 Statische hydraulische Belastungen

Für statische hydraulische Belastungen wie z.B. langsame Wasserstandsänderungen bzw. geringe Fließgeschwindigkeiten kann der Nachweis gemäß DWA-M 511 wie folgt geführt werden.

Aus dem in DWA-M 511 neu entwickelten Bemessungsdiagramm kann mit Hilfe der Ungleichförmigkeitszahl C_u und dem wirksamen Korndurchmesser d_{50} des zu filternden Bodens die erforderliche Öffnungsweite des geotextilen Filters O_{90} bestimmt werden. Die Gleichung der Lognormalverteilung lautet:

$$\frac{O_{90}}{d_{50}} = 1 + \frac{24 \cdot e^{\left[\frac{-(\ln(C_u)-1,65)^2}{2 \cdot 0,55^2} \right]}}{0,55 \cdot C_u \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}}$$

In Abhängigkeit der Lagerungsdichte des zu filternden Bodens dürfen gem. DWA-M 511 7.4.1 die Werte für O_{90} / d_{50} um 10 % vergrößert (dicht gelagert) bzw. um 10 % abgemindert (locker gelagert) werden.

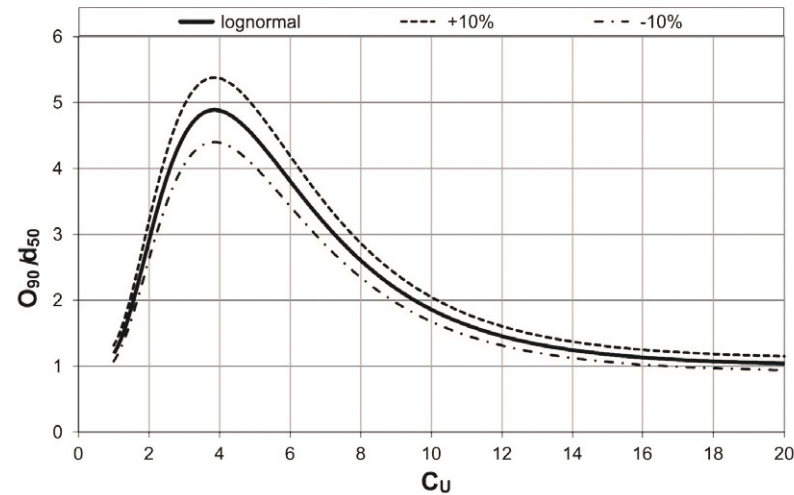
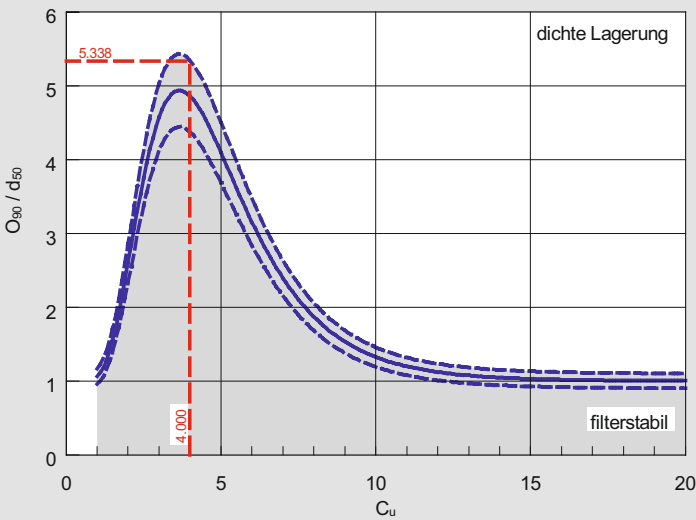


Abbildung 2: Zulässiges Abstandsverhältnis O_{90} / d_{50} in Abhängigkeit der Ungleichförmigkeit C_u , aus DWA-M 511



Beispiel 3: Nachweis mechanische Filterwirksamkeit, nicht kohäsiver Boden

Es wird ein zu filternder Boden mit einer Ungleichförmigkeit von $C_u = 4,0$ und einem wirksamen Durchmesser von $d_{50} = 0,08$ untersucht:

Ergebnis:

Bei einem wirksamen Durchmesser $d_{50} = 0,08$ mm des zu filternden Bodens für $C_u = 4$ folgt $O_{90} / d_{50} \leq 5,338$. Bei einem wirksamen Durchmesser $d_{50} = 0,08$ mm des zu filternden Bodens wird somit $O_{90} \leq 0,08 \cdot 5,338 = 0,427$ mm.

Geotextilien mit einer Öffnungsweite von $O_{90} \leq 0,427$ mm erfüllen die mechanische Filterstabilität.

3.4.1.2 Dynamische hydraulische Belastungen

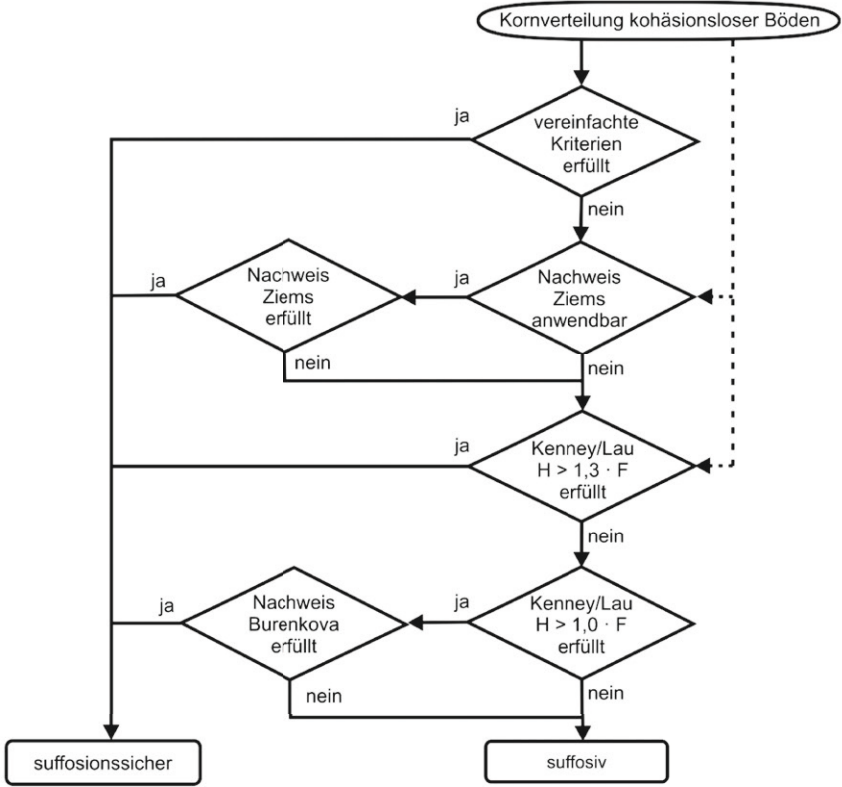
Für dynamische hydraulische Belastungen wie z.B. turbulente Strömungen, Wellenschlag kann gemäß DWA-M 511 7.4.1 der Nachweis in Anlehnung an EAK 1993 für Fein- und Mittelsande mit $0,1 \text{ mm} < d_{50} < 0,3 \text{ mm}$ wie folgt geführt werden:

$$O_{90} \approx d_{50}$$

3.4.2 Mechanische Filterwirksamkeit für suffosionsgefährdete Böden

Vor der Untersuchung der mechanischen Filterwirksamkeit muss untersucht werden, ob der zu filternde Boden suffosionsgefährdet ist.

Die Abschätzung der Suffosionssicherheit - Umlagerung und Transport der feinen Fraktionen des Bodens bei unverändert tragendem Korngerüst – wird im MMB 2013 vorgestellt. Wie dem folgenden Diagramm entnommen werden kann, werden hierfür zur Beurteilung die Verfahren von Ziems, Kenney/Lau und Burenkova bemüht.



In aufeinander folgenden Schritten wird ein Boden bezüglich seiner Suffosionssicherheit beginnend mit vereinfachten Kriterien und evtl. anschließend mit dem Verfahren nach Ziems oder dem Verfahren nach Kenney/Lau (evtl. in Kombination mit Burenkova) untersucht.

Das MMB 2013 lässt auch eine mögliche Variante der Nachweisführung zu, unter Verzicht auf einen vereinfachten Nachweis direkt mit dem Nachweis nach Ziems oder nach Kenney/Lau, vgl. die gestrichelte Linie im Flussdiagramm.

Abbildung 3: Flussdiagramm zur Beurteilung der Suffosionssicherheit von nicht kohäsiven Böden, aus MMB 2013

3.4.2.1 Vereinfachter Nachweis

Bei Erfüllung der nachfolgenden Kriterien gelten Böden nach Ziems als suffosionssicher:

- Ungleichförmigkeit des Bodens $C_{U,Boden} < 8$
- stetige Körnungslinie ohne Ausfallkörnung und markante Krümmungsänderungen

3.4.2.2 Nachweis der Suffosionssicherheit nach Ziems

Falls der vereinfachte Nachweis nicht erbracht werden kann, wird in einem folgenden Schritt das Verfahren nach Ziems angewandt.

Ein Boden gilt als suffosionssicher, wenn $\frac{d_{min}}{F_s \cdot d_k} \geq 1,5$ erfüllt ist.

Dabei sind:

d_{min} = minimaler Korndurchmesser für Austrag durch Suffosion

F_s = Schlupfmaß,
0,4 für stationäre Strömung
0,6 für dynamische Belastung

d_k = maßgebender Porenkanaldurchmesser nach Pavcic, durch den Partikel bewegt werden,

$$d_k = 0,455 \cdot \sqrt[6]{C_U} \cdot e \cdot d_{17}$$

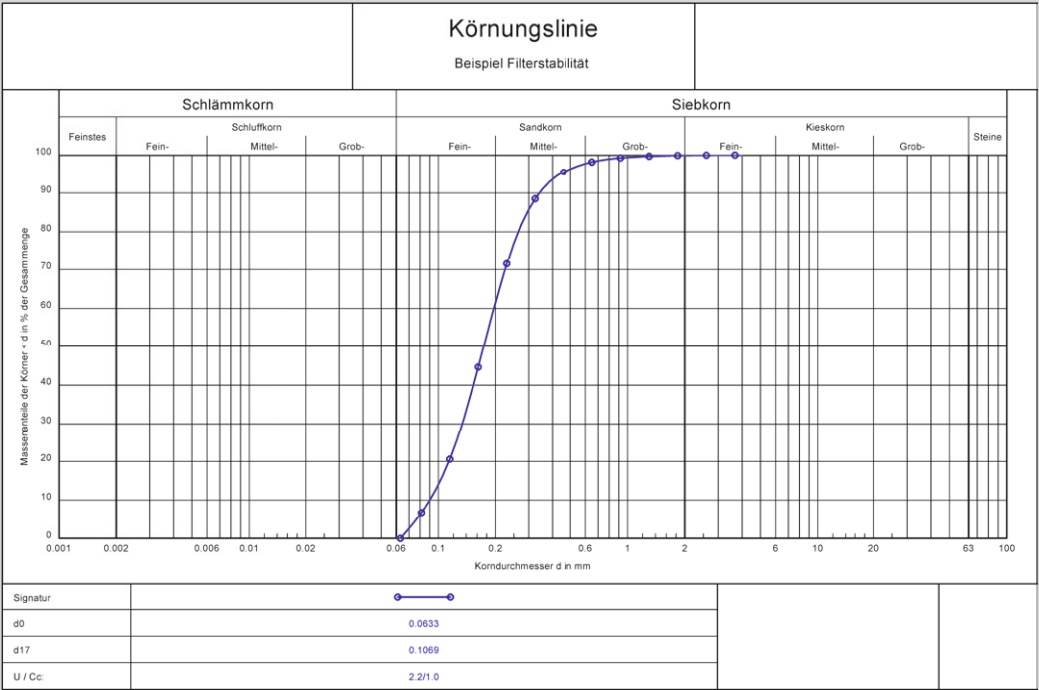
e = Porenzahl des zu filternden Bodens

d_{17} = wirksamer Korndurchmesser bei 17 Massen-%

Mit d_{min} wird der größte Korndurchmesser definiert, der bei der Suffosion ausgetragen wird und ist im Einzelfall festzulegen.

Zur Erläuterung: Wird d_{min} dem Korndurchmesser bei 0% Siebdurchgang d_0 gleichgesetzt, wird kein Material ausgetragen.

Beispiel 4: Nachweis nach Ziems



$d_0 = 0,063 \text{ mm} = d_{min}$
(kein Materialaustrag zugelassen)
 $d_{17} = 0,1069 \text{ mm}$
 $C_U = 2,2$
 $e = 0,45$
(Annahme, entspricht einem Porenanteil von $n = 0,31$)

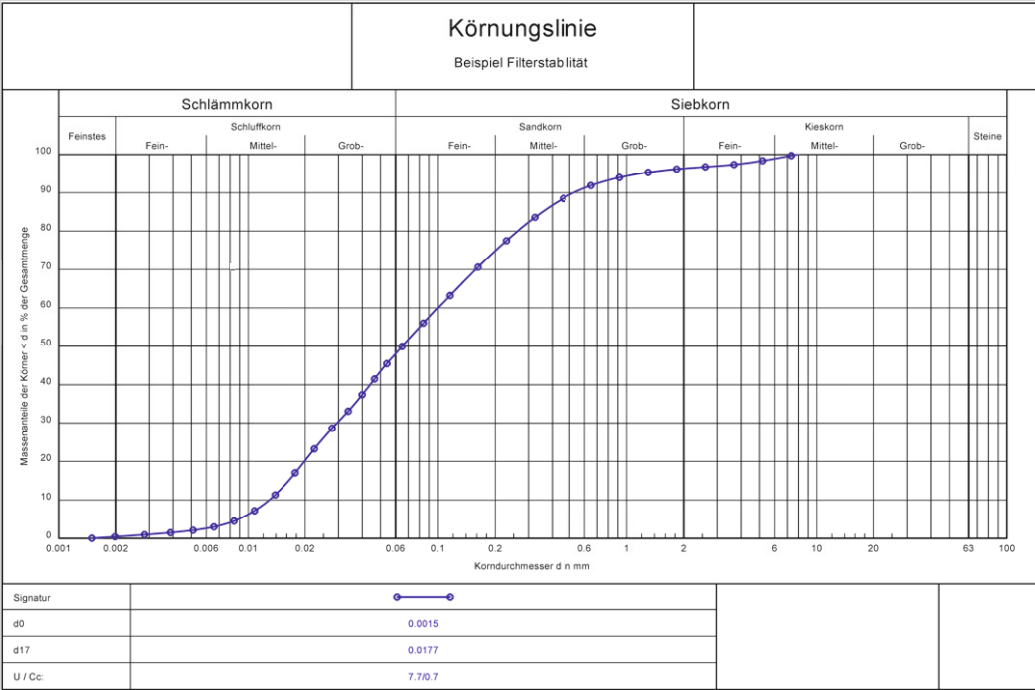
Mit $F_s = 0,4$ (stationärer Fall) wird

$$d_k = 0,455 \cdot \sqrt[6]{C_U} \cdot e \cdot d_{17} = 0,455 \cdot \sqrt[6]{2,2} \cdot 0,45 \cdot 0,1069 = 0,025$$

$$\frac{d_{min}}{F_s \cdot d_k} = \frac{0,063}{0,4 \cdot 0,025} = 6,3 > 1,5$$

Der Boden ist somit **suffosionssicher**.

Beispiel 5: Nachweis der Suffosionssicherheit nach Ziems



Aus der Kornverteilungslinie ergibt sich:

$d_0 = 0,0015 \text{ mm} = d_{\min}$
(kein Materialaustrag zugelassen)

$d_{17} = 0,00177 \text{ mm}$

$C_u = 7,7$

$e = 0,35$
(Annahme, entspricht einem Porenanteil von $n = 0,26$)

Mit $F_s = 0,4$ (stationärer Fall) wird

$$d_k = 0,455 \cdot \sqrt[6]{C_u} \cdot e \cdot d_{17} = 0,455 \cdot \sqrt[6]{7,7} \cdot 0,35 \cdot 0,00177 = 0,004$$

Daraus folgt:

$$\frac{d_{\min}}{F_s \cdot d_k} = \frac{0,0015}{0,4 \cdot 0,004} = 0,938 < 1,5$$

Der Boden ist somit **nicht suffosionssicher**.

Anwendungsgrenzen des Verfahrens:
Das Verfahren kann nur für stetige Kornverteilungslinien angewandt werden.

3.4.2.3 Nachweis der Suffosionssicherheit nach Kenney/Lau

Sind die Anwendungsgrenzen des Nachweises nach Ziems nicht erfüllt oder ergibt der Nachweis nach Ziems eine Suffosionsgefährdung, erfolgt der Nachweis nach dem Verfahren nach Kenney/Lau.

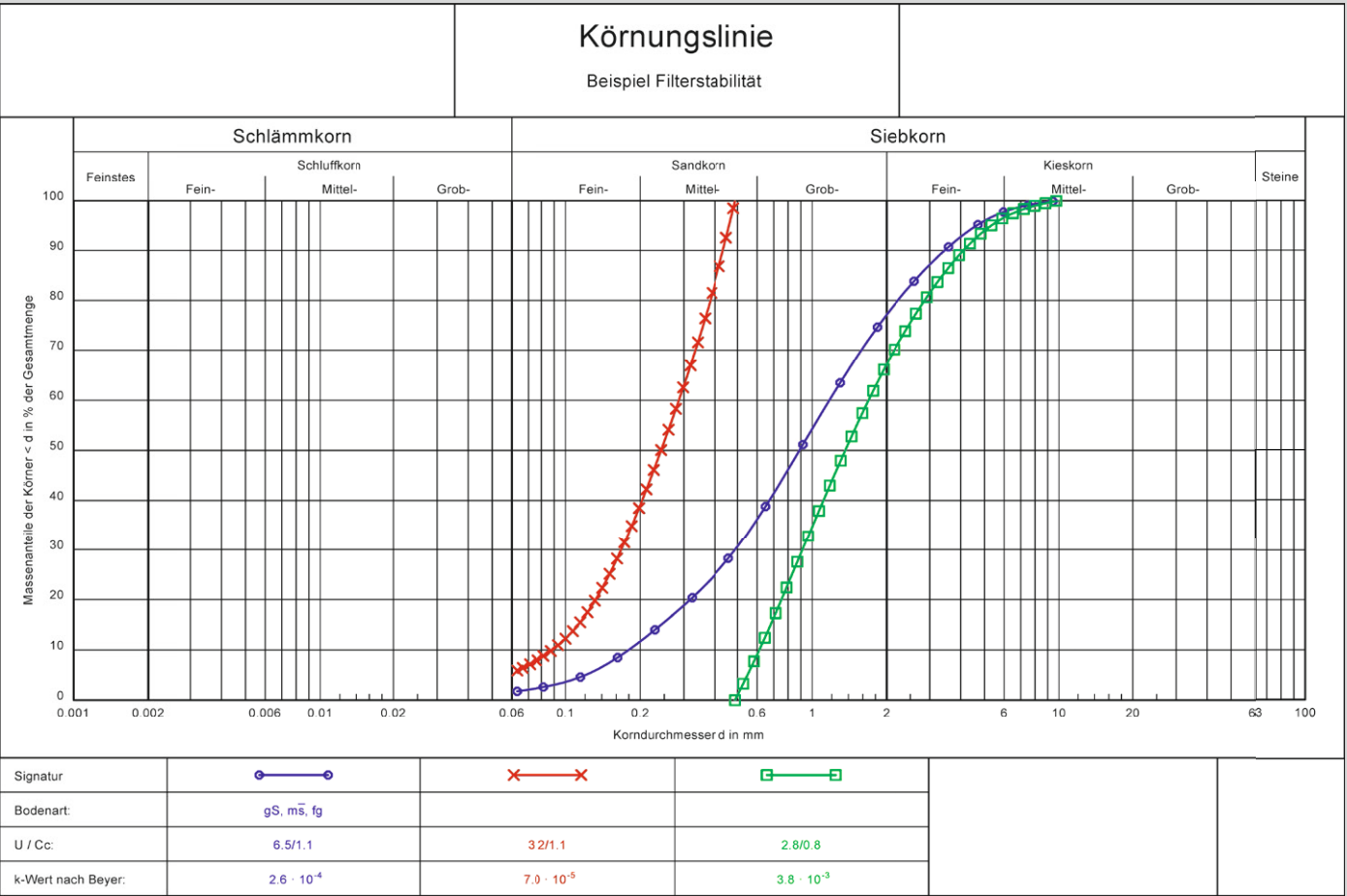
Gemäß MMB 2013 4.2.4 gehen Kenney/Lau davon aus, dass sich ein Korn mit dem Durchmesser d durch eine Pore, die aus mehreren Körnern mit dem Durchmesser $4 \cdot d$ gebildet wird, bewegen kann.

Bei dem Nachweis nach Kenney/Lau wird nicht die gesamte Körnungslinie untersucht, sondern nur der Bereich der feinen Fraktionen, der beweglich im Porenraum des Korngerüsts vorhanden sein kann.

Um zu entscheiden, welcher Kornanteil für den Nachweis maßgeblich ist, wird die Körnungslinie bei 30 % in einen feinen Anteil und einen groben Anteil aufgetrennt. Von dem groben Anteil (70 %) wird die Ungleichförmigkeit $C_{u,grob}$ bestimmt.

Bei $C_{u,grob} \leq 3$ werden die feinsten 30 % und bei $C_{u,grob} > 3$ die feinsten 20 % des Bodens für den Nachweis nach Kenney/Lau berücksichtigt.

Beispiel 6: Auftrennung der Kornverteilungslinie bei 30 Massen-% zur Bestimmung von $C_{u,grob}$



Nach Aufteilen der Kornverteilungslinie ergibt sich für das Beispiel eine Ungleichförmigkeit $C_{u,grob} = 2,8 \leq 3$. Daher werden die feinsten 30 % des Bodens für den folgenden Nachweis nach Kenney/Lau berücksichtigt.

Zum Nachweis der Suffosionssicherheit mit Hilfe des Verfahrens nach Kenney/Lau wird aus der Sieblinie des zu untersuchenden Bodens der Siebdurchgang „F“ für mehrere Durchmesser d ermittelt. Außerdem wird der Siebdurchgang ermittelt, der zu den Durchmessern $4 \cdot d$ gehört, „F+H“.

Die Wertepaare H und F werden in einem Diagramm dargestellt, im sogenannten „H-F-Diagramm“. Schneidet die H-F – Kurve den dunkelgrauen Bereich, so ist der Boden nicht suffosionssicher. Dort ist das Verhältnis von $H/F \leq 1$.

Liegt die H-F – Kurve im hellgrauen Zwischenbereich ($1,0 F < H \leq 1,3 F$), wird eine zusätzliche Absicherung zur Beurteilung der Suffosionssicherheit mit dem Verfahren von Burenkova empfohlen, vgl. folgendes Kapitel 3.4.2.4.

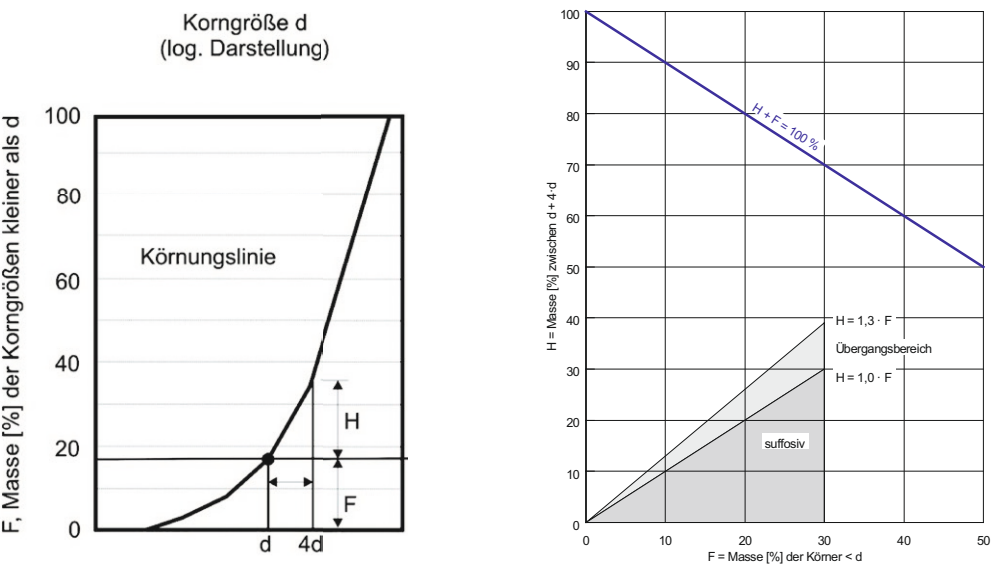
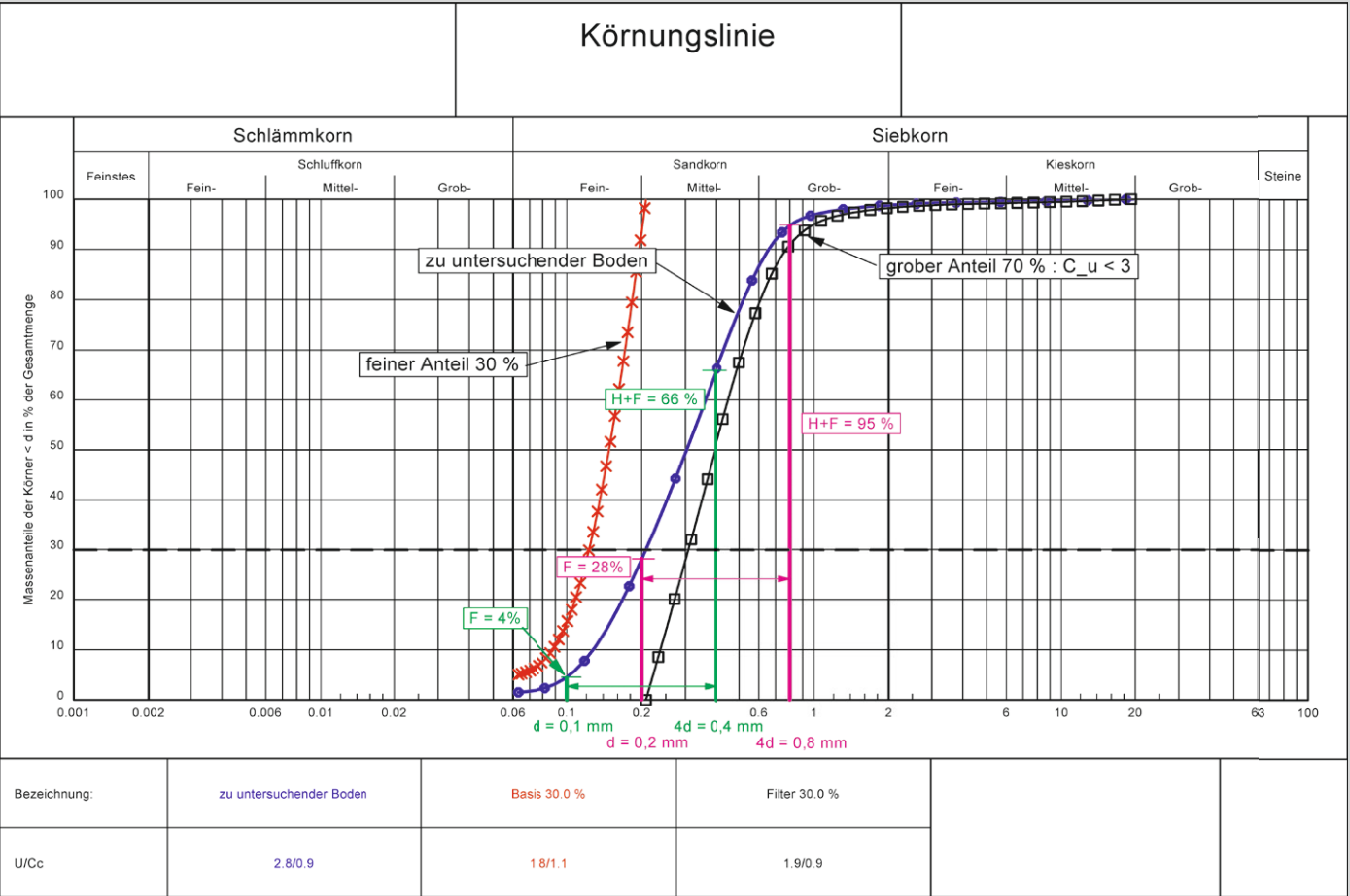


Abbildung 4: Konstruktion der Formkurve (H-F-Diagramm) nach Kenney/Lau, Bild links aus MMB 2013, rechts: Programmausdruck GGU Filter Stability

Beispiel 7: Nachweis der Suffosionssicherheit nach Kenney/Lau
Der (blau) dargestellte Boden soll hinsichtlich seiner Suffosionssicherheit nach Kenney/Lau untersucht werden.



Nach einer Auftrennung der Kornverteilungslinie bei 30 % wird für den groben Anteil (70 %) eine Ungleichförmigkeit von $C_{U, \text{grob}} = 1,9$ ermittelt. Es werden die feinsten 30 % des Bodens für den Nachweis nach Kenney/Lau berücksichtigt.

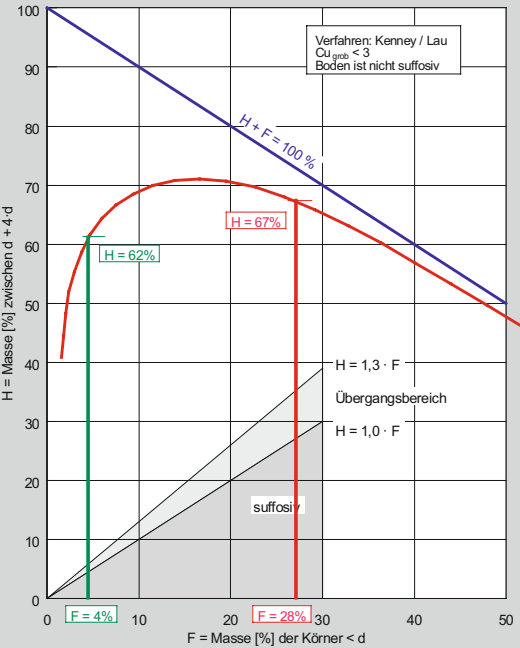
Exemplarisch für viele zu untersuchende Korndurchmesser der feinsten 30 % des Bodens werden hier Wertepaare des H-F-Diagramms für die Korndurchmesser $d = 0,1 \text{ mm}$ und $d = 0,2 \text{ mm}$ ermittelt. Diese Wertepaare für F und H

$d = 0,1 \text{ mm}: F = 4 \%$
 $4 \cdot d = 0,4 \text{ mm}: F + H = 66 \%$ } $H = 62 \%$

bzw.

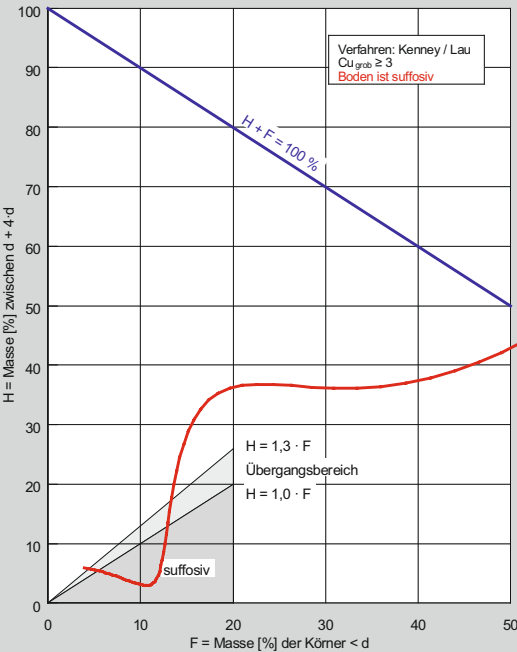
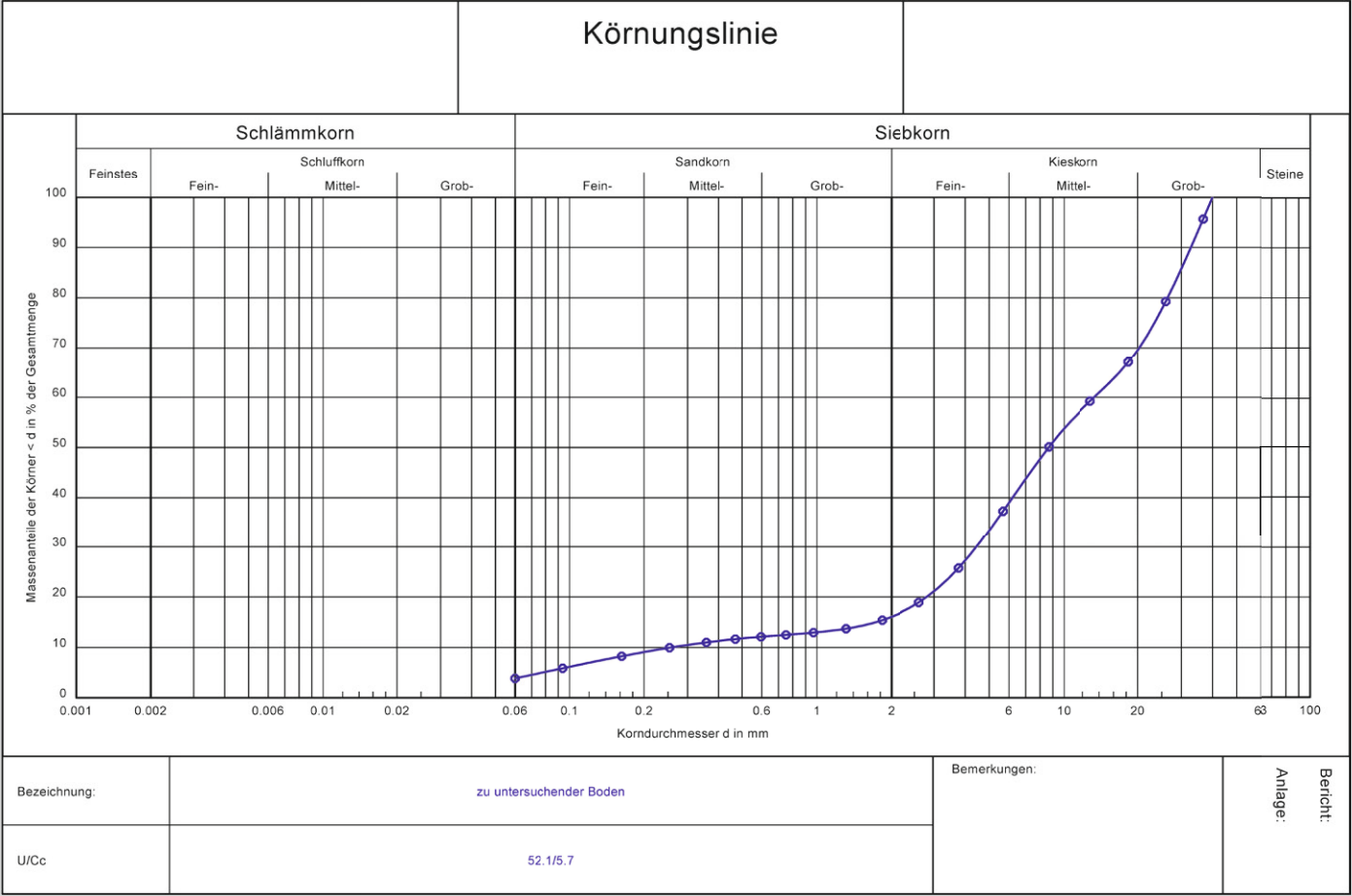
$d = 0,2 \text{ mm}: F = 28 \%$
 $4 \cdot d = 0,8 \text{ mm}: F + H = 95 \%$ } $H = 67 \%$

sind exemplarisch in der Formkurve dargestellt, vgl. Abbildung rechts.



Die H-F-Kurve schneidet den grau hinterlegten Bereich nicht, der Boden ist **nicht suffosionsgefährdet**.

Beispiel 8: Nachweis der Suffosionssicherheit nach Kenney/Lau (H-F-Diagramm), Programmausdruck GGU Sieve und Filter Stability



Dieses Beispiel zeigt einen Boden, dessen größerer Anteil eine Ungleichförmigkeit von $C_{U, \text{grob}} > 3,0$ besitzt. Somit werden nur die feinsten 20 % des Bodens untersucht:

Die H-F-Kurve schneidet den grau hinterlegten Bereich, der Boden ist **suffosionsgefährdet**.

Anwendungsgrenzen des Verfahrens:
Das Verfahren basiert auf geometrischen Modellvorstellungen hinsichtlich der Porenraumgeometrie und ist für grobkörnige, jedoch auch feinere nicht kohäsive Böden, und auch für Böden mit einer Ausfallkörnung anwendbar.

3.4.2.4 Nachweis der Suffosionssicherheit nach Burenkova

Liegt die H-F-Kurve im Zwischenbereich ($1,0 F < H \leq 1,3 F$, hellgrau im H-F-Diagramm markiert) wird im MMB 2013 4.2.6 ein zusätzlicher Nachweis nach Burenkova empfohlen.

Mit Hilfe der wirksamen Korndurchmesser d_{15} , d_{60} und d_{90} werden Faktoren

$$h' = \frac{d_{90}}{d_{60}} \quad ; \quad h'' = \frac{d_{90}}{d_{15}}$$

eingeführt.

Nach dem Verfahren nach Burenkova ist ein Boden suffosions-sicher, wenn gilt:

$$0,76 \cdot \lg(h'') + 1 < h' < 1,86 \cdot \lg(h'') + 1$$

Die Gleichungen beschreiben als Grenzkurven den suffosions-sicheren Bereich im $h' - h''$ - Diagramm.

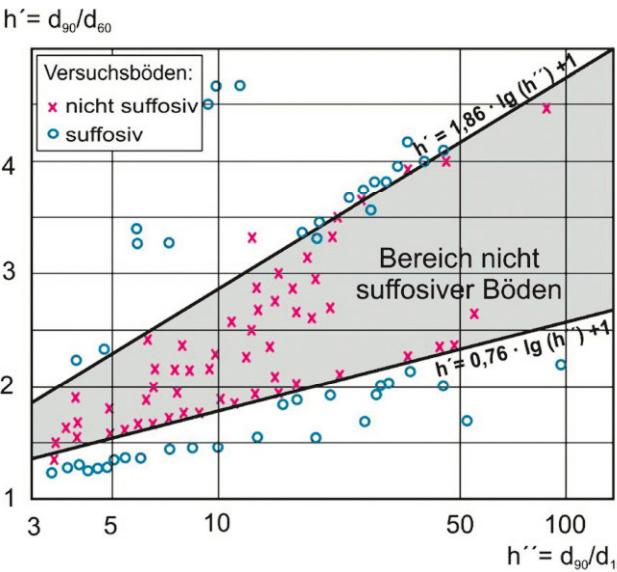


Abbildung 5: Versuchsergebnisse und Grenzkurven von Burenkova im $h' - h''$ - Diagramm, aus MBB 2013

Beispiel 9: Nachweis der Suffosionssicherheit nach Burenkova

Für einen Boden, dessen H-F-Kurve im Zwischenbereich des H-F-Diagramms nach Kenney/Lau liegt ($1,0 F < H \leq 1,3 F$) werden ermittelt:

$$d_{15} = 0,021 \text{ mm}, \quad d_{60} = 0,12 \text{ mm}, \quad d_{90} = 0,3 \text{ mm}$$

Somit ergeben sich die Faktoren:

$$h' = \frac{d_{90}}{d_{60}} = \frac{0,3}{0,12} = 2,5 \quad ; \quad h'' = \frac{d_{90}}{d_{15}} = \frac{0,3}{0,021} = 14,29$$

und damit

$$0,76 \cdot \lg(14,28) + 1 < 2,5 < 1,86 \cdot \lg(14,28) + 1 \quad \text{bzw.} \quad 1,878 < 2,5 < 3,148$$

Der Boden ist **suffosionssicher**.

Anwendungsgrenzen des Verfahrens:
Gemäß der von Burenkova durchgeführten Versuche gilt das Nachweisverfahren für Böden, die die folgende Bedingung erfüllen, vgl. Abbildung 5:

$$1 \leq \frac{d_{90}}{d_{60}} \leq 5 \quad \text{und} \quad 3 \leq \frac{d_{90}}{d_{15}} \leq 130$$

3.4.3 Bemessung Filter für suffosionsgefährdete Böden

Gemäß DWA-M 511 7.4.2 sollte ein Filter eines suffosionsgefährdeten Bodens nicht auf den Rückhalt der gesamten umlagerbaren Feinteile ausgelegt sein, um ein kolmationsbedingtes Ansteigen des Wasserdrucks zu verhindern. DWA-M 511 zitiert Lafleur, dessen Kriterium zur Bestimmung der Öffnungsweite herangezogen wird:

$$0_{90} < d_{30}$$

Der Feinanteil, der als erodierbar erachtet werden kann, ist im Einzelfall festzulegen. Zur Abschätzung des größten Korndurchmessers des suffosiven Anteils kann gem. DWA-M 511 der Ansatz nach Ziems verwendet werden, vgl. Kapitel 3.4.2.2:

Ein Boden gilt demnach als suffosionssicher, wenn

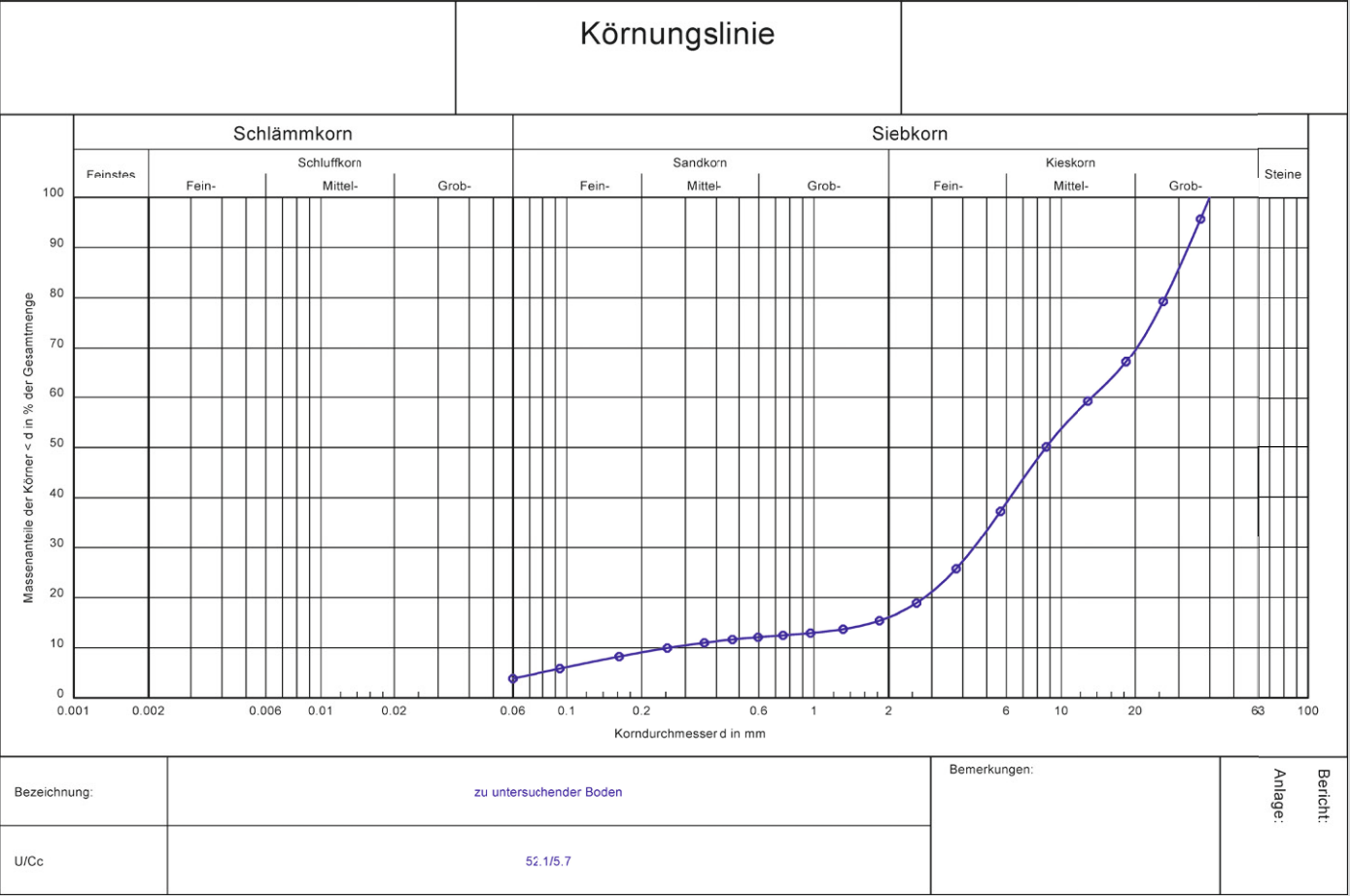
$$d_{\text{suff,max}} = \eta \cdot F_S \cdot d_k$$

- η = Sicherheitsfaktor, $\eta = 1$; nach Ziems für Ausschluss von Suffosion: $\eta = 1,5$
- F_S = Schlupfmaß: 0,4 für stationäre Strömung, 0,6 für dynamische Belastung
- d_k = maßgebender Porenkanaldurchmesser nach Pavcic, durch den Partikel bewegt werden,

$$d_k = 0,455 \cdot \sqrt[6]{C_U} \cdot e \cdot d_{17}$$

- e = Porenzahl des zu filternden Bodens
- d_{17} = wirksamer Korndurchmesser bei 17 Massen-%

Beispiel 10: Berechnung des größten Korndurchmessers des suffosiven Anteils



- $F_S = 0,4$ (stationärer Fall)
- $d_{17} = 2$ mm
- $C_U = 52,1$
- $e = 0,45$ (Annahme, entspricht einem Porenanteil von $n = 0,31$)
- $d_k = d_k = 0,455 \cdot \sqrt[6]{C_U} \cdot e \cdot d_{17} = 0,455 \cdot \sqrt[6]{52,1} \cdot 0,45 \cdot 2 = 0,79$
- $d_{\text{suff,max}} = \eta \cdot F_S \cdot d_k = 1 \cdot 0,4 \cdot 0,79 = 0,316$ mm

Danach ist nach der Kornverteilungslinie etwa ein Massenanteil von ca. 11 % als **suffosionsgefährdet** einzustufen.

3.4.4 Mechanische Filterwirksamkeit für kohäsive Böden

In Abhängigkeit von Plastizitätseigenschaften und der undrainierten Scherfestigkeit eines Bodens werden in DWA-M 511 7.4.3 die Anforderungen an die Öffnungsweiten der geotextilen Filter formuliert:

undrainierte Scherfestigkeit c _u in [kN/m²]	Platizitätszahl Ip [-]	Öffnungsweite O ₉₀ [mm]
≥ 10	≥ 0,15	< 0,125
≥ 10	< 0,15, Konsistenz: steif	< 0,125
< 10	< 0,15	gem. Regeln für nicht kohäsive Böden, alternativ: Turbulenztest nach DIN EN ISO 10772. *)
< 10	≥ 0,15	individuelle Lösung für den Boden (Schlick, Klei)

Tabelle 6: Kriterien für mechanische Filterwirksamkeit, kohäsive Böden

*) : Ein Turbulenztest ist ebenfalls erforderlich, wenn in der Bemessung Öffnungsweiten erhalten werden, die unter den verfügbaren Werten liegen.

3.5 Hydraulische Filterstabilität

Für die Durchlässigkeit des Geotextils muss nach DWA-M 511 7.5 die Forderung

$$k_{\text{Geotextil}} \geq 10 \cdot k_{\text{Boden}} \dots\dots 100 \cdot k_{\text{Boden}}$$

erfüllt sein. Liegen ein sehr durchlässiger Boden und nur geringe Gradienten vor, so kann die Durchlässigkeit des Geotextils bestimmt werden zu:

$$k_{\text{Geotextil}} \geq k_{\text{Boden}}$$

Der Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens kann gemäß den in Kapitel 2.3 genannten Beziehungen abgeschätzt werden. Der Durchlässigkeitsbeiwert des Geotextils ergibt sich dabei zu

$$k_{\text{Geotextil}} = V_{\text{H50}} \cdot d/h$$

mit
d = Dicke des Geotextils in mm
V_{H50} = Geschwindigkeitsindex bei einer Potenzialdifferenz von 50 mm
h = 50 mm (Potenzialdifferenz nach DIN EN ISO 11058)

Der Geschwindigkeitsindex wird nach DIN EN ISO 11058 aus der Durchflussgeschwindigkeit bei 20°C Wassertemperatur ermittelt. Umrechnungen auf andere Temperaturen: k_T = k₂₀ / R_T

$$R_T = \frac{1,762}{1 + 0,033 \cdot T + 0,00022 \cdot T^2}$$

mit
T = Temperatur in °C
k_T = Durchlässigkeit bei einer Wassertemperatur in T in °C
k₂₀ = Durchlässigkeit bei einer Wassertemperatur T von 20 °C

Es ist zu berücksichtigen, dass die Durchlässigkeit von Geotextilien bei suffosiven Böden unter Auflast um eine Zehnerpotenz abnimmt.

3.6 Filterdicken

Gemäß DWA-M 511 7.7 ist bei geotextilen Filtern eine ausreichende Filtrationslänge durch die Gewährleistung einer Mindestdicke von

$$d \geq 30 \cdot O_{90}$$

zu gewährleisten.

3.7 Robustheit

Für geotextile Filter gelten nach DWA-M 511 folgende Anforderungen an das minimale Flächengewicht in Abhängigkeit der Überschüttung:

Überschüttung mit	Größtkorn d in [mm]	min. Flächengewicht [g/m²]
Sand und Kies	8	300
Sand und Kies	32 (Rundkorn)	400
Kies	32 (Rundkorn)	500
Steine und Kies	Breckkorn	600
Steine bis 60 kg		750
Steine über 60 kg		1000

Tabelle 7: Notwendiges Flächengewicht in Abhängigkeit der Überschüttung

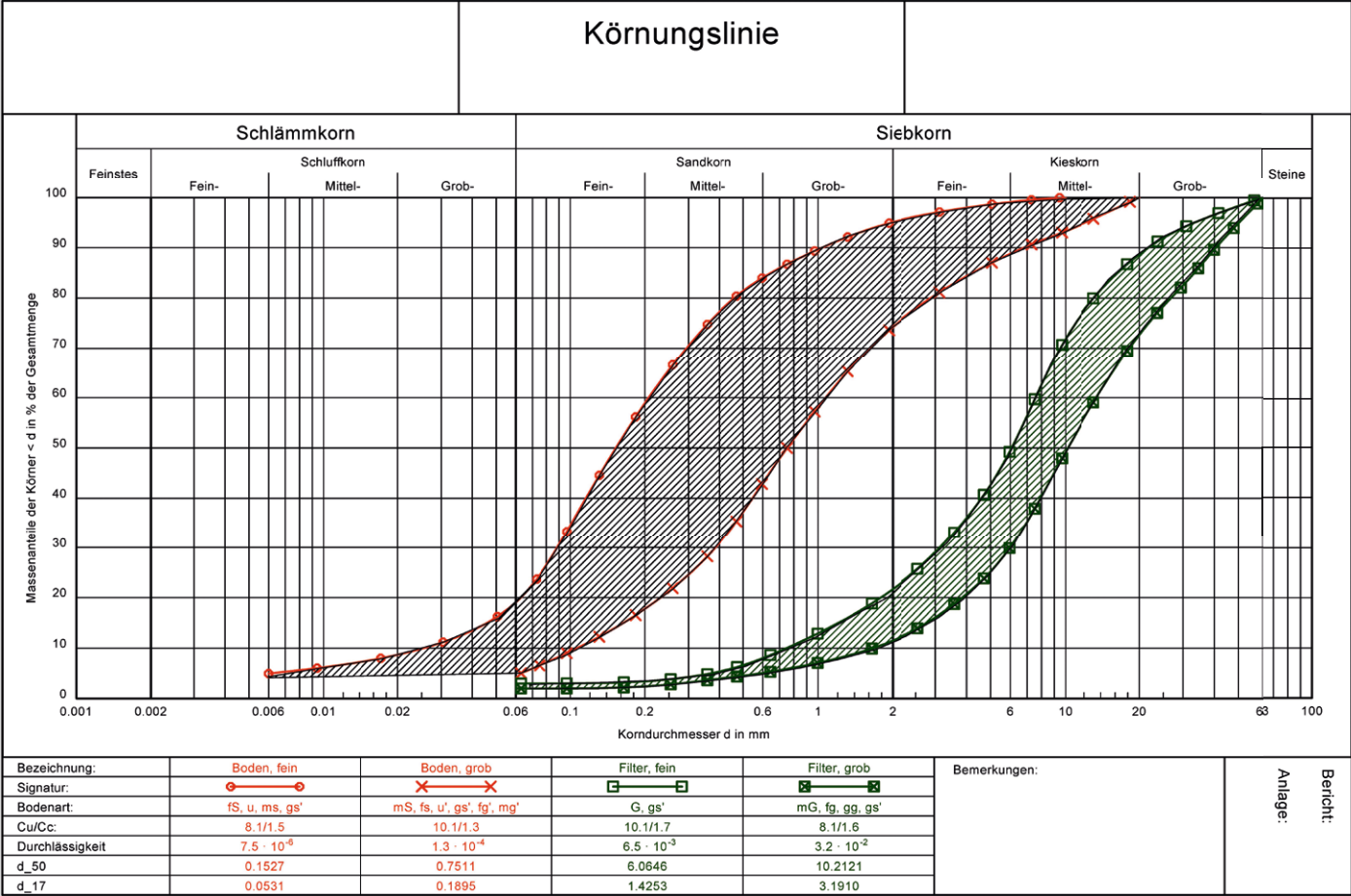
Überkornanteile bis 3 % sind zulässig. Für ein ausreichendes Verformungsvermögen wird eine Dehnung von ≥ 50% bei Höchstzugkraft empfohlen.

- Hinweis :
- In der BAM-Richtlinie (2012) wird für geotextile Filter im Deponiebau gefordert:
- d ≥ 3 mm : Flächengewicht ≥ 300 g/m²
 - eine Stempeldurchdrückkraft ≥ 2,5 kN
 - ein Durchdrückvorschub bei der Stempeldurchdrückkraft von mindestens 50 mm.

Für Küstenschutzbauwerke haben sich Flächengewichte von 500 g/m² bis über 1000 g/m² je nach Anwendungsfall bewährt. Beispiele werden in EAK (2007) [2] gegeben.

3.8 Abschließendes Beispiel 11 zur Filterbemessung gemäß DWA-M 511

In der folgenden Graphik sind exemplarisch die Körnungsbänder für einen nicht bindigen Boden und ein Filtermaterial zu dessen Entwässerung dargestellt. Für diese Materialien wird im Folgenden die Bemessung eines geotextilen Filters für die betrachteten Böden gemäß dem in Anlage 1 dargestellten Flussdiagramm vorgeführt. Es wird angenommen, dass das Grundwasser eine Temperatur von 10°C hat.



3.8.1 Kontrolle der Notwendigkeit eines Filters

Da es sich bei dem Boden um ein nicht kohäsives Material handelt, ist gemäß Kapitel 3.3.1 nach Cistin/Ziems zu überprüfen, ob ein Filter notwendig ist. Für die Körnungsbänder des Bodens und des Filters werden die folgenden Kombinationen untersucht:

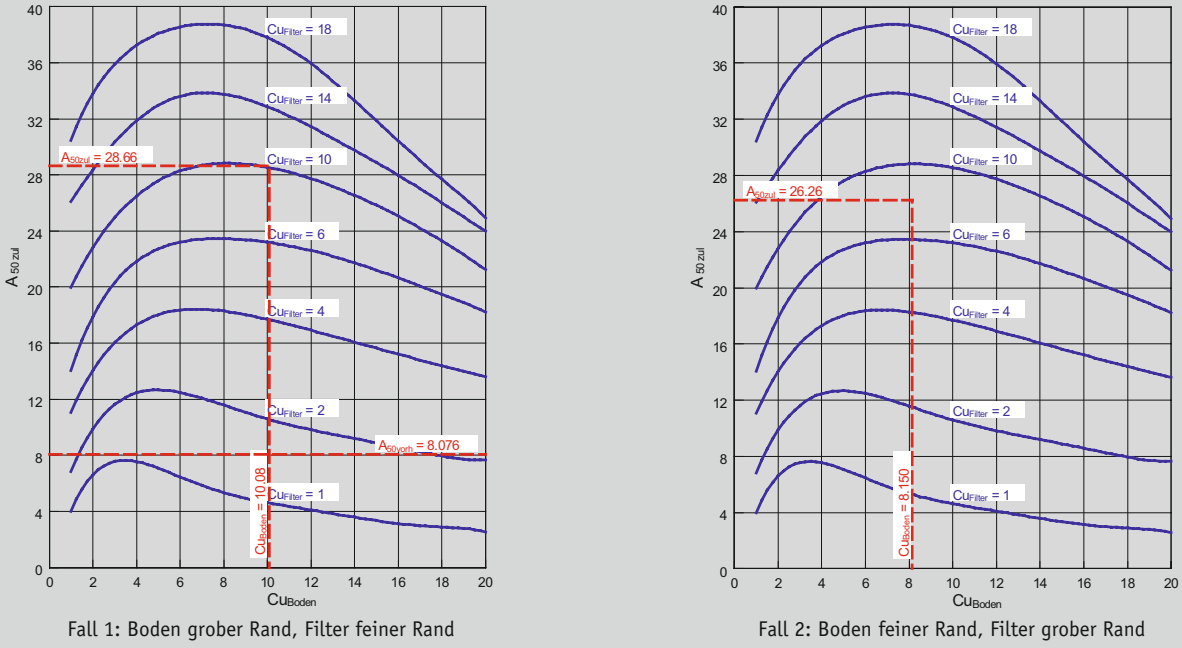
- grober Rand des Bodens mit feinem Rand des Filters. Dies stellt die „günstigste“ Situation bzgl. der Korngrößenunterschiede dar,
- feiner Rand des Bodens mit grobem Rand des Filters. Hierbei sind die Korngrößenunterschiede am größten.

Für den ersten Fall (grob/fein) ergibt sich: Nach Cistin/Ziems ergibt sich $A_{50,zul} = 28,66$. Ein Filter ist nicht erforderlich.

$A_{50,vorh} = 6,065 \text{ mm} / 0,751 \text{ mm} = 8,08$

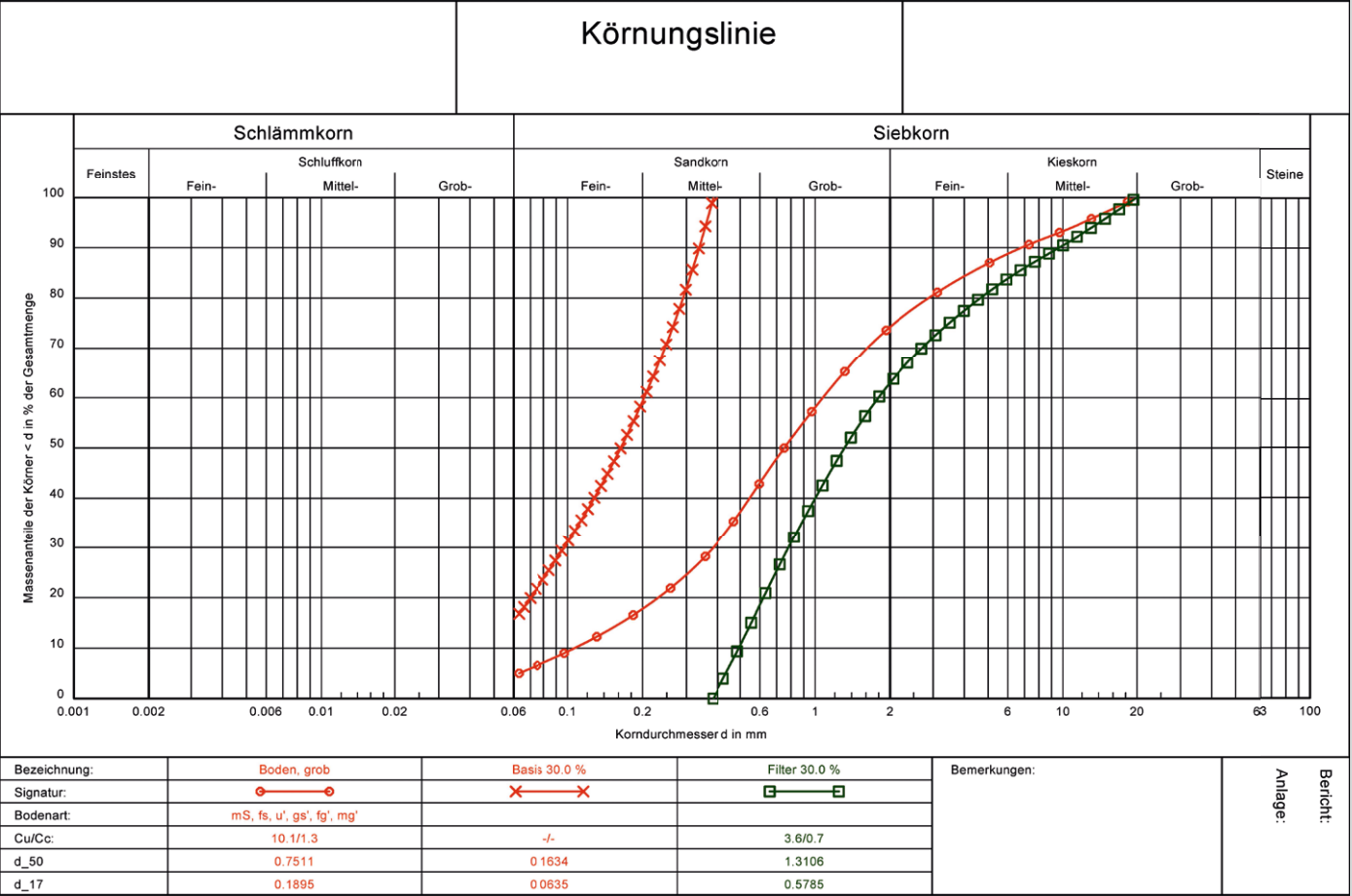
Für den zweiten Fall (fein/grob) ergibt sich: Nach Cistin/Ziems ergibt sich $A_{50,zul} = 26,26$. Ein Filter ist erforderlich.

$A_{50,vorh} = 10,21 \text{ mm} / 0,153 = 66,73$



3.8.2 Untersuchung der Suffosionssicherheit des Bodens nach Kenney/Lau

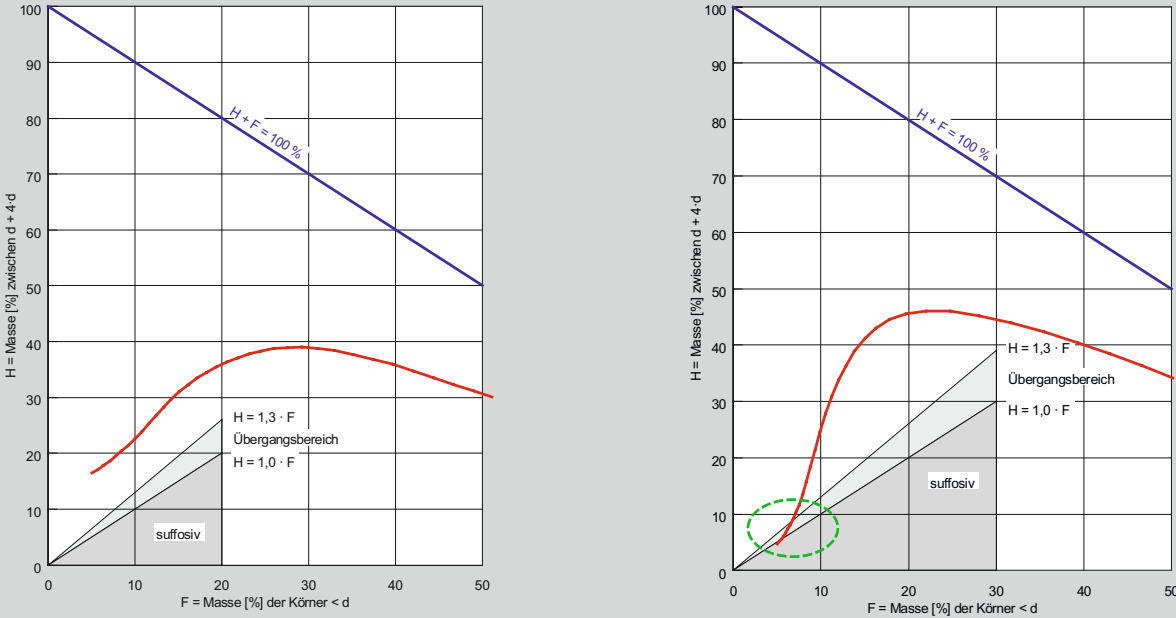
Für den groben und den feinen Rand des Körnungsbandes des Bodens werden die zugehörigen Körnungslinien bei 30 % in einen feinen und in einen groben Anteil aufgetrennt, vgl. Kapitel 3.4.2.3. Für den groben Anteil (70%) des groben Rands ergibt sich eine Ungleichförmigkeit von $C_u > 3,0$:



Somit werden beim Nachweis nach Cistin/Ziems die feinsten 20 % des Bodens berücksichtigt.

Für den groben Anteil (70 %) des feinen Rands ergibt sich eine Ungleichförmigkeit von $C_u \leq 3,0$, hier werden beim Nachweis nach Cistin/Ziems die feinsten 30 % des Bodens berücksichtigt.

Nach dem Verfahren von Kenney/Lau ergibt sich, dass der grobe Rand suffosionssicher ist (links), der feine Rand ist nicht suffosionssicher (rechts), die H(F)-Kurve schneidet den grau hinterlegten Bereich (grün eingekreist).



Für den feinen Rand kann das größte suffosionsgefährdete Korn nach Kapitel 3.4.3 für einen hier angenommenen Porenanteil des Materials von $n = 0,3$ und den dynamischen Fall für das Schlupfmaß abgeschätzt werden mit

$$d_{suff,max} = \eta \cdot F_s \cdot 0,455 \cdot \sqrt[6]{C_u} \cdot e \cdot D_{17} = 1,5 \cdot 0,6 \cdot 0,455 \cdot \sqrt[6]{8,1} \cdot 0,428 \cdot 0,0531 = 0,0132 \text{ mm}$$

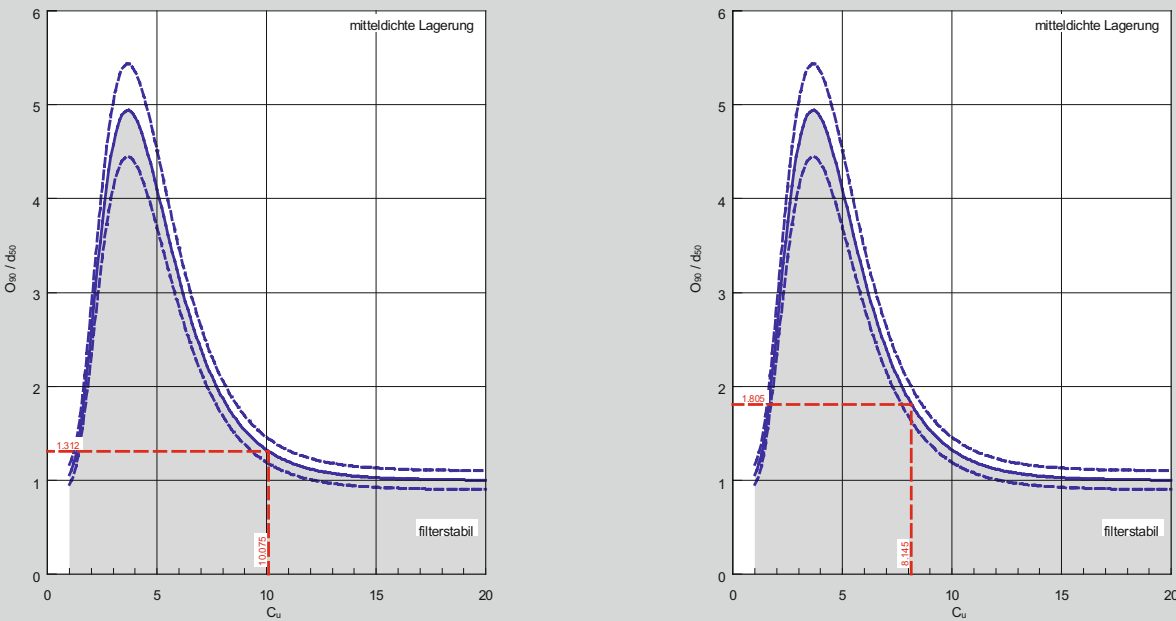
Dies entspricht gemäß der Körnungslinie einem Massenanteil von ca. 8 % des feinen Rands des Körnungsbands.

3.8.3 Filterbemessung – charakteristische Öffnungsweite

Gemäß Kapitel 3.4.1.1 ergibt sich für den groben Rand bei einem Ungleichförmigkeitsgrad von $C_u = 10,1$ ein Verhältnis von $O_{90} / d_{50} \leq 1,31$. Mit dem Wert von $d_{50} = 0,751 \text{ mm}$ ergibt sich eine charakteristische Öffnungsweite von $O_{90} \leq 0,986 \text{ mm}$. Für den feinen Rand ergibt sich bei einem Ungleichförmigkeitsgrad von $C_u = 8,15$ ein Verhältnis von $O_{90} / d_{50} \leq 1,81$.

Mit dem Wert von $d_{50} = 0,153 \text{ mm}$ ergibt sich eine charakteristische Öffnungsweite von $O_{90} \leq 0,277 \text{ mm}$.

Für die kleinere der berechneten Öffnungsweiten ist ein Vliesstoff zu wählen.



Verhältnis O_{90} / d_{50} , grober Rand
Exemplarisch wird ein Vliesstoff gewählt mit den folgenden Eigenschaften:

- Flächengewicht g : 500 g/m²
- Dicke d : 4,3 mm
- char. Öffnungsweite O_{90} : 0,08 mm
- Wasserdurchlässigkeit V_{H50} : $4,5 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$

3.8.4 Untersuchung der hydraulischen Filterwirksamkeit

Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f wird nach Hazen aus den Kornverteilungslinien mit

$$k_f = 7,5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s} \text{ für den feinen Rand und}$$
$$k_f = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ m/s für den groben Rand}$$

abgeschätzt.

Nach Kapitel 3.5 muss als Mindestwert für die Durchlässigkeit des Geotextils die Forderung erfüllt sein. Der Durchlässigkeitsbeiwert des Geotextils ergibt sich dabei zu
Somit kann der Nachweis nachfolgend erfüllt werden.

$$k_{\text{Geotextil}} \geq 10 \cdot k_{\text{Boden}}$$

$$k_{\text{Geotextil}} = V_{H50} \cdot d / (R_{T10} \cdot h)$$

$$\text{erf. } V_{H50} = 10 \cdot k_{\text{Boden}} \cdot \frac{R_{T10} \cdot h}{d}$$
$$\text{erf. } V_{H50} = 10 \cdot 1,3 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1,3 \cdot 50}{4,3} = 0,0197 \text{ m/s}$$
$$\text{erf. } V_{H50} = 0,0197 \text{ m/s} < \text{vorh. } V_{H50} = 0,045 \text{ m/s}$$

3.8.5 Filterdicke

Nach Kapitel 3.6 muss der Filter eine Minstdicke von $d > 30 \cdot O_{90} = 30 \cdot 0,08 \text{ mm} = 2,4 \text{ mm}$ besitzen. Mit dem gewählten Vliesstoff wird dieser Nachweis erbracht.

3.8.6 Robustheit

Die Robustheit wird gemäß Kapitel 3.7 in Abhängigkeit der Überschüttung gewählt. Für den angenommenen Fall einer Überschüttung mit Sand und Kies mit einem maximalen Durchmesser von $d = 32 \text{ mm}$ (Rundkorn) ist ein Flächengewicht von $g = 400 \text{ g/cm}^2$ erforderlich. Der oben gewählte Vliesstoff erfüllt diese Bedingung.

4 Filterbemessung nach Merkblatt „Anwendung von geotextilen Filtern an Wasserstraßen“, MAG

Das Merkblatt „Anwendung von geotextilen Filtern an Wasserstraßen“, MAG (1993) gilt für Geotextilien, die bei Böschungs- und Sohlsicherungen von Wasserstraßen und zugehörigen Bauwerken wie Dämmen und Gräben als Filter zum Einsatz kommen.

Die „Technischen Lieferbedingungen für Geotextilien und geotextilverwandte Produkte an Wasserstraßen“, TLG, benennen Anforderungen zu Eigenschaften und Prüfungen der verwendeten Materialien.

4.1 Flussdiagramm

Die Vorgehensweise einer Filterbemessung nach dem Merkblatt „Anwendung von geotextilen Filtern an Wasserstraßen“, MAG (1993), [8] zeigt das Flussdiagramm der Anlage 2. Für die zu führenden Nachweise werden im Diagramm sowohl die jeweils zu beachtenden Kapitel des vorliegenden Handbuchs, als auch die Kapitel der MAG zur einfachen Handhabung genannt.

4.2 Baugrund als Planungs- und Bemessungsgrundlage

Im Vorfeld zu weiteren Untersuchungen wird der zu filternde Boden gemäß MAG 1993 in nichtbindige und bindige Böden unterschieden.

4.2.1 Nichtbindige Böden

Nichtbindige Böden neigen unter Einfluss von Porenwasserströmungen oder Oberflächenwasser zu Erosionen und Rutschungen, wenn ein Böschungswinkel von $\beta \geq \varphi/2$ überschritten wird. Bei Wellenschlag oder Absunk kann die Böschung bereits eher instabil werden. Hierauf sind Filterbauweisen gem. MAG 1993 auszurichten.

Liegen keine Laborergebnisse zur undrainierten Scherfestigkeit und zur Plastizitätszahl vor, sind Böden mit einem Kornanteil von $d_{20} \geq 0,06 \text{ mm}$ nach MAG 1993 bei der Filterbemessung als nichtbindige Böden zu behandeln.

4.2.2 Bindige Böden

Bindige Böden besitzen eine sehr geringe Mobilität der Einzelkörner und eine sehr geringe Durchlässigkeit. Dies wird in der späteren Bemessung berücksichtigt, vgl. Kapitel 4.5.1.1.

4.2.3 Suffosionsgefährdete Böden

Für nichtbindige Böden mit einer Ausfallkörnung und für nichtbindige Böden mit einer Ungleichförmigkeitszahl von $C_u \geq 8$ ist nach MAG 1993 die Suffosionssicherheit nachzuweisen.

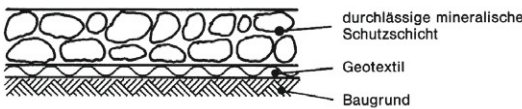
In der Anlage 2 der MAG 1993 wird das mehrmalige Auftrennen von Kornverteilungslinien mit anschließender Untersuchung der mechanischen Filterstabilität der aufgetrennten Kornfraktionen zur Untersuchung der Suffosionsgefährdung vorgestellt.

Laut Auskunft der BAW zum Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Handbuchs befindet sich das Merkblatt MAG 1993 in Überarbeitung, so dass die Beurteilung der Suffosionsgefahr bereits aktuell gemäß Flussdiagramm des MMB 2013 bewertet wird. Somit wird an dieser Stelle bzgl. der Beurteilung der Suffosionsgefahr auf MMB 2013 und das Kapitel 3.4.2 des vorliegenden Handbuchs hingewiesen.

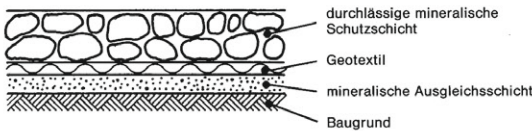
4.3 Filter- und Deckschichtbauweisen

In Abhängigkeit einer gewählten Filterbauweise beschreibt MAG 1993 Einbaubedingungen eines Geotextils für eine durchlässige Deckschicht als Filter in Abhängigkeit vom Baugrund, der Böschungsneigung, den hydraulischen Einwirkungen und den Einbaubedingungen:

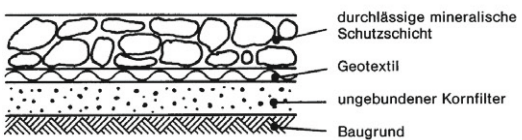
Geotextil unmittelbar auf dem Baugrundplan



Geotextil auf einer mineralischen Ausgleichsschicht



Kombination eines Geotextils mit einem ungebundenen Kornfilter



Mineralische Zwischenlage auf dem Geotextil

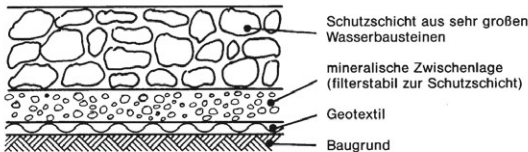


Abbildung 6: Filterbauweisen aus MAG 1993

Die Abbildung 6 macht deutlich, dass das Geotextil in Abhängigkeit der gewählten Bauweise für die angrenzenden Materialien – Baugrund, Deckschicht, Ausgleichsschicht, Kornfilter - hinsichtlich seiner Filtereigenschaften zu bemessen ist.

Durchlässige Deckschichten, bei denen ein Geotextil als Filter zwischen zwei Mineralkornlagen fungiert, werden in MAR 2008 mit den folgenden Regeldeckschichten gezeigt:

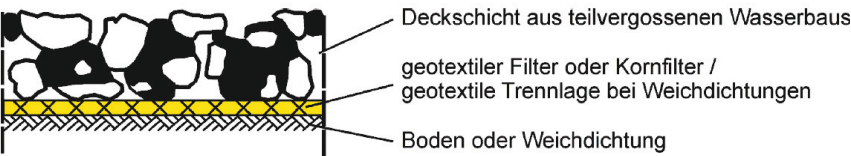
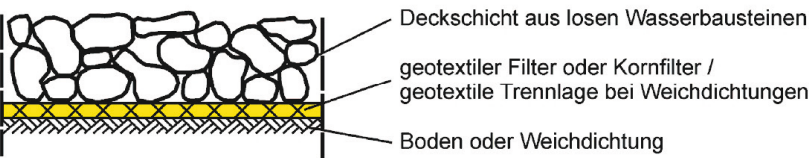


Abbildung 7: Schematische Darstellung von durchlässigen Deckschichten aus MAR 2008

Unter einer dichten Deckschicht übernimmt ein Geotextil nur eine Trennfunktion! Hierauf wird im vorliegenden Handbuch nicht eingegangen.

Die Abbildung 8 zeigt Kornverteilungsbänder von Wasserbausteinen aus MAK 2013, die hinsichtlich der Filterstabilität mit dem im Folgenden beschriebenen Verfahren untersucht und für die die vorgesehenen Geotextilien bemessen werden müssen.

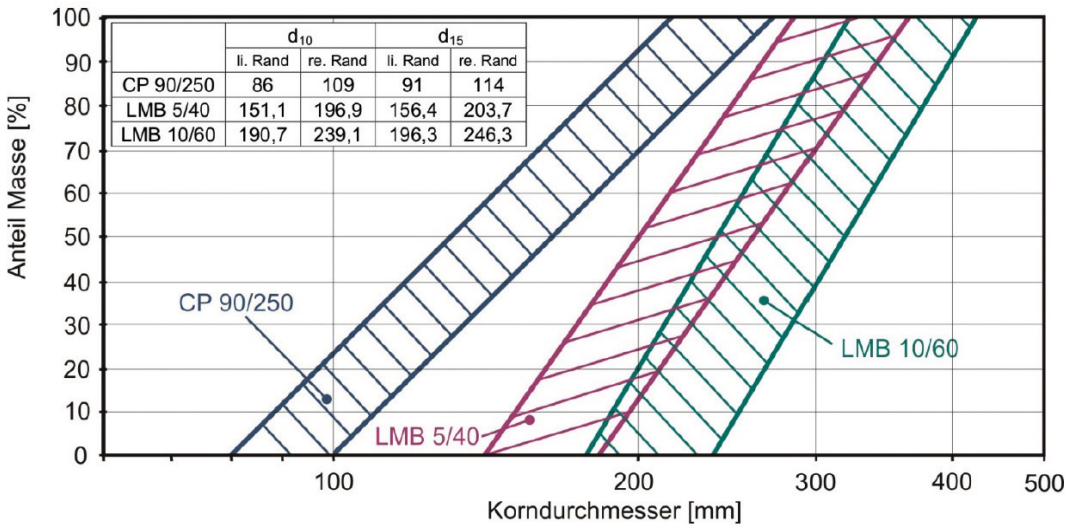


Abbildung 8: Körnungsbänder von Wasserbausteinen der Klassen CP 90/250 , LMB 5/40 und LMB 10/60, aus MAK 2013

4.4 Notwendigkeit eines geotextilen Filters nach Cistin/Ziems

Die Notwendigkeit eines geotextilen Filters zwischen den je nach Filterbauweise verwendeten Mineralkornlagen wird gemäß MAG 1993 mit dem Diagramm nach Cistin/Ziems in Analogie zum Kapitel 3.3 des vorliegenden Handbuchs durchgeführt.

Anwendungsgrenzen:

Gemäß MMB 2013 4.3.3 gelten für die Anwendung des Kriteriums nach Citin/Ziems bei Wasserstraßen folgende Randbedingungen:

- Ungleichförmigkeit des Bodens $C_{U,Boden} \leq 20$
- Boden in mindestens mitteldichter Lagerung
- Ungleichförmigkeit des Filters $C_{U,Filter} \leq 18$
- Korngrößenbereich des Filters $d_i \leq 100\text{ mm}$
- Hydraulisches Gefälle $i \leq 9$
- Suffosionssichere Böden (vgl. Kapitel 3.4.2)

4.5 Bemessung des Geotextils

Für die Bemessung des Geotextils müssen die in MAG 1993 genannten Anforderungen bzgl. der Filterwirksamkeit und der Materialeigenschaften gem. TLG 2018 erfüllt werden.

Für den Einsatz eines Geotextils als Böschungs- oder Sohlsicherung wird in MAG 1993 das Klassifizierungsverfahren der BAW empfohlen, in dem die Anforderungen für Filterwirksamkeit und Materialeigenschaften mit der Zuordnung des Baugrunds zu einem sogenannten Bodentyp – dem Bodentypverfahren – und mit der Wahl einer Filter- und Deckschichtbauweise festgelegt wird.

4.5.1 Filterwirksamkeit

Nach aktueller Auskunft der BAW Karlsruhe wird die Filterwirksamkeit eines Geotextil - anders als in MAG 1993 noch dargestellt - nachgewiesen. Die Filterregel nach AK 14 findet sowohl beim Nachweis für dynamische als auch statische hydraulische Belastungen keine Anwendung mehr.

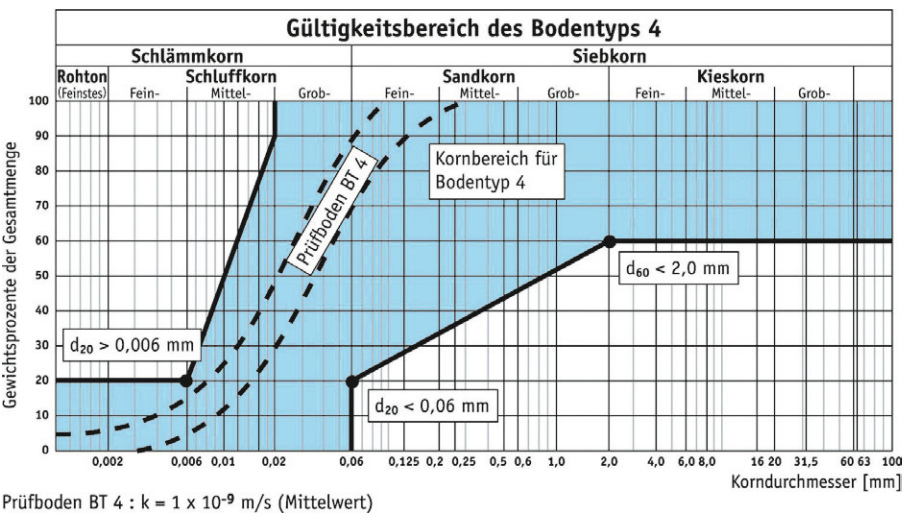
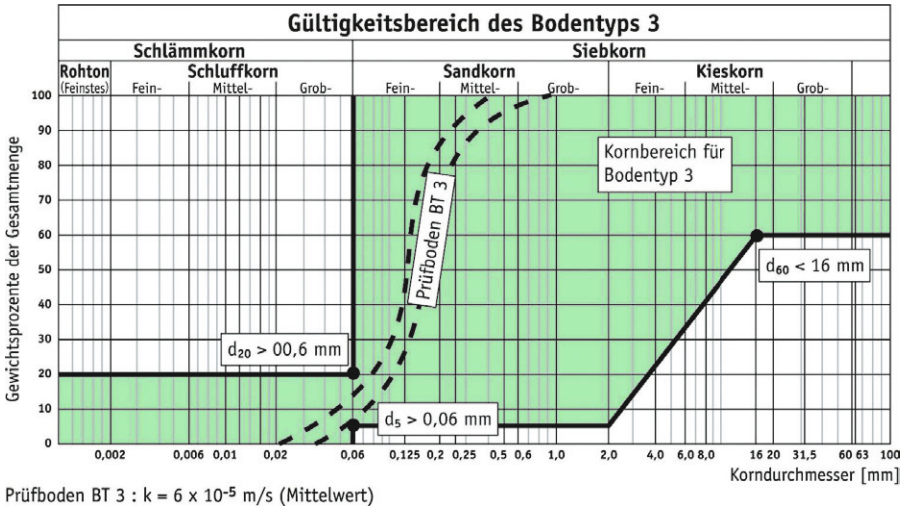
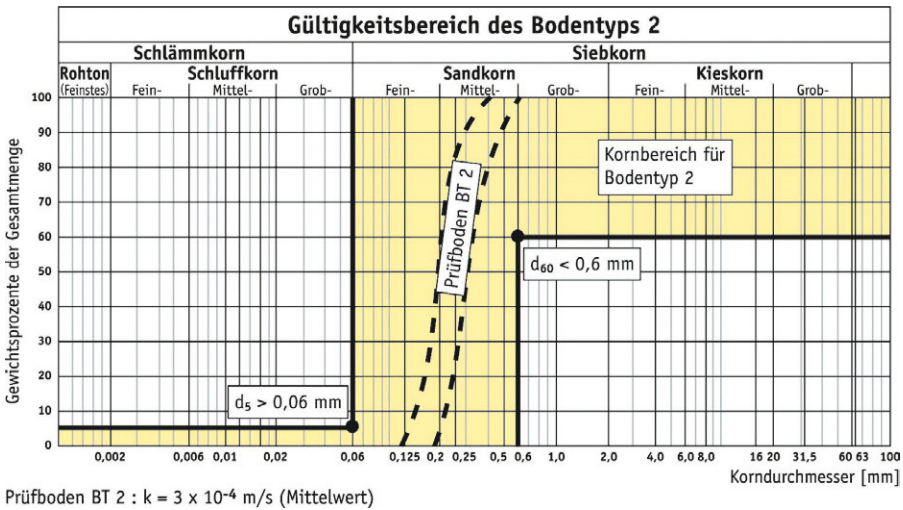
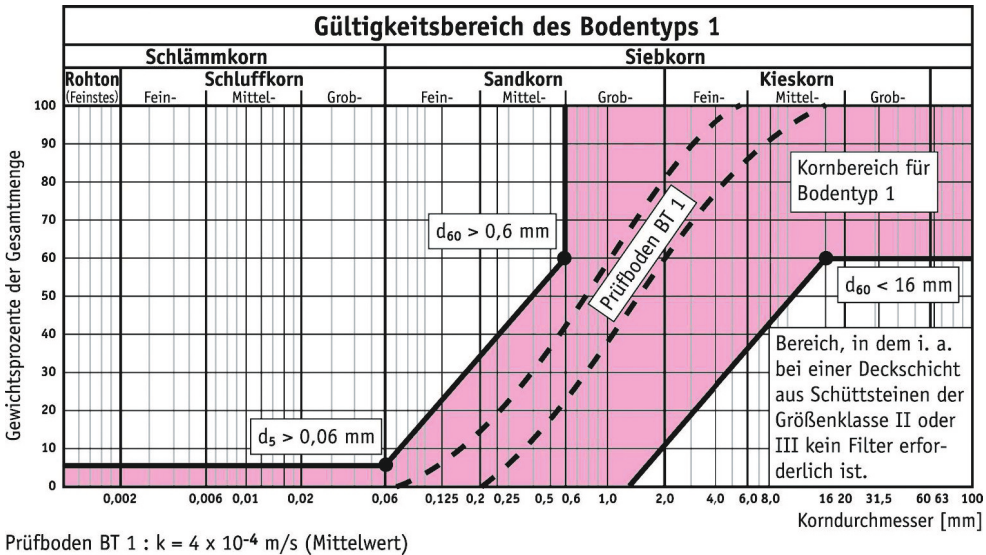
Stattdessen wird der Nachweis für dynamische hydraulische Belastungen ausschließlich nach dem Bodentyp-Verfahren durchgeführt, beim Nachweis für statische hydraulische Belastungen wird auf das aktuelle Merkblatt DWA-M 511 verwiesen, so dass notwendige Nachweise nun wie im Folgenden dargelegt durchgeführt werden:

- für dynamische hydraulische Belastungen: z.B. Schifffahrtseinflüsse, schneller Absunk, Wellen, turbulente Strömungen
 - Kriterien nach dem Bodentyp-Verfahren der BAW
- für statische hydraulische Belastungen: z.B. langsame Wasserstandsänderungen, geringe Wellenhöhen und Fließgeschwindigkeiten
 - Verweis auf den Nachweis der Filterwirksamkeit nach DWA-M 511

Liegt ein Körnungsband für einen zu filternden Boden vor, so ist die mechanische Filterwirksamkeit für die feinstkörnige nichtbindige Körnungslinie des Bandes, die hydraulische Filterwirksamkeit für die durchlässigste Körnungslinie des Bandes zu bemessen.

4.5.1.1 Bodentyp-Verfahren der BAW

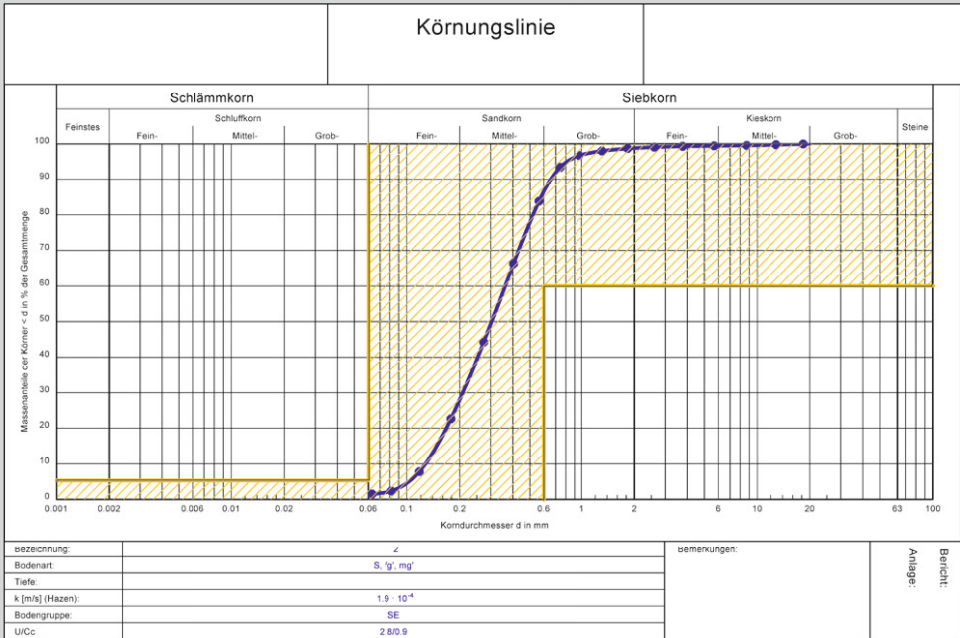
Nichtbindige bzw. schwach bindige Böden werden in MAG 1993 in vier Bodentypen eingeteilt:



Nichtbindige Böden, vgl. Kapitel 4.2.2, sind gemäß der feinstkörnigen Kornverteilungslinie des Bandes dem Gültigkeitsbereich eines der Bodentypen 1 – 4 zuzuordnen.

Es ist der Bodentyp maßgebend, in dessen Gültigkeitsbereich die Kornanteile d_5 bis d_{60} des zu filternden Bodens fallen.

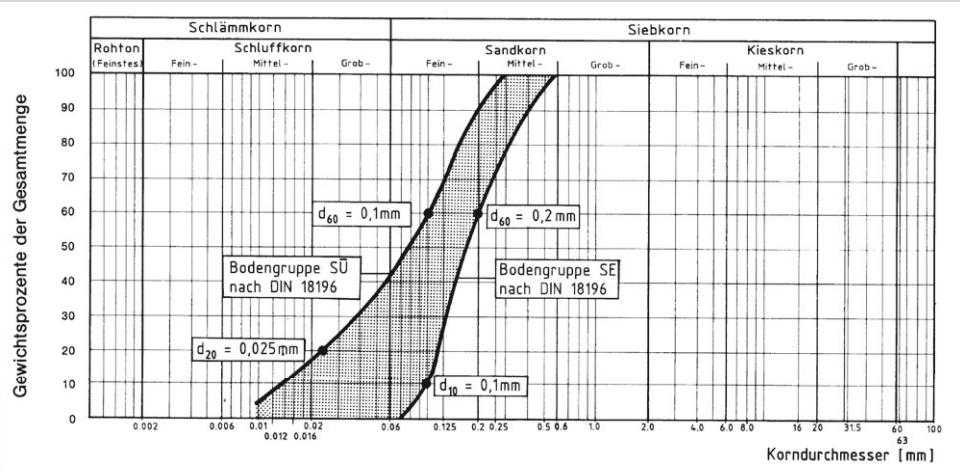
Beispiel 12: Zuordnung einer Kornverteilungslinie zum Bodentyp nach BAW (Boden aus Beispiel 4)



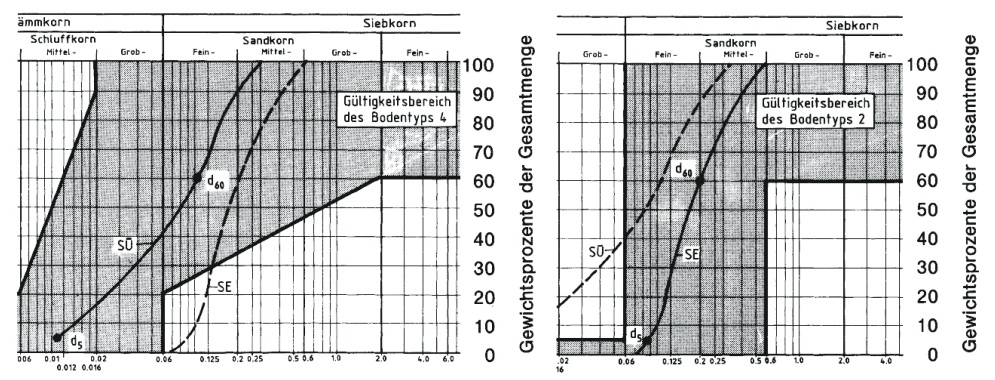
Zuordnung der Kornverteilungslinie aus Beispiel 4 zum Bodentyp 2 mit Kornanteilen d_5 bis d_{60} des zu filternden Bodens im Gültigkeitsbereich

Beispiel 13: Zuordnung eines Körnungsbandes zu Bodentypen

Für einen zu filternden Boden wurde das nachfolgende, in MAG 1993 gezeigte Körnungsband ermittelt, das sich vom stark schluffigen Sand SU* bis hin zum enggestuften Sand SE erstreckt.



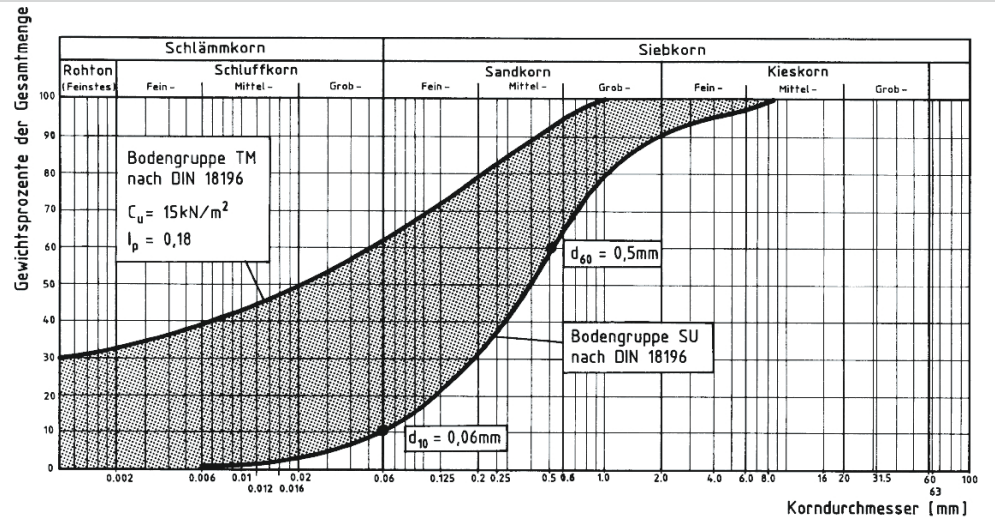
Der stark schluffige Sand SU* wird dem Bodentyp 4 zugeordnet, der enggestufte Sand SE dem Bodentyp 2:



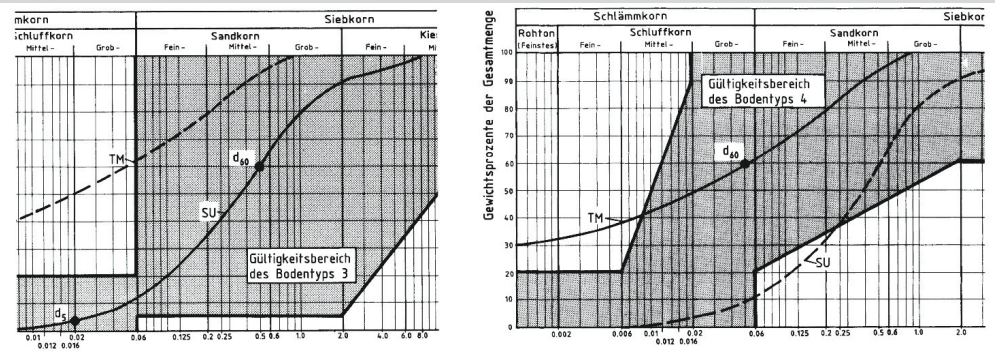
Beispiel 14: Zuordnung eines Körnungsbandes mit bindigen Anteilen zum Bodentyp

Für einen zu filternden Boden wurde das nachfolgende, in MAG 1993 gezeigte Körnungsband ermittelt, das sich vom mittelpastischen Ton TM Sand bis hin schluffigen Sand erstreckt.

Werden für den mittelpastischen Ton die undrainierte Scherfestigkeit und die Plastizitätszahl ermittelt, so wird dieser in der Nachweisführung als bindiger Boden behandelt. Dem Körnungsband zufolge sind jedoch weitere Körnungen zwischen dem Schluff und dem Ton vorhanden.



Die im Körnungsband zwischen Schluff und Ton liegenden Böden werden dem Bodentyp 4 zugeordnet, der für die mechanische Filterwirksamkeit maßgeblich ist.



Wenn der Bodentyp bzw. für Körnungsbänder die Bodentypen wie oben gezeigt ermittelt wurde, schließt die Bemessung nach dem Bodentyp-Verfahren an. Hierzu wird die nachfolgende Tabelle aus TLG 2008 verwendet.

1. Filterwirksamkeit nach RPG

unter einer durchlässigen Deckschicht						
1	2	3	4	5	6	7
Lfd. Nr.	Funk-tion ¹⁾	Bodenart des Baugrundes (Filterplanum)	Dicke der Filterschicht (D)	zulässiger Bodendurchgang (mechanische Filterwirksamkeit)		k ₁₀ -Wert des bodenbesetzten Geotextils ⁵⁾ (hydraulische Filterwirksamkeit)
				Gesamtmasse des Bodendurchganges (MG)	Bodendurchgang in der letzten Prüfphase (ML)	
			(mm)	(g/184 cm ²) ²⁾	(g/184 cm ²) ²⁾	(m/s)
1	F	Bodentyp 1	D ≥ 4,5	M _G ≤ 300 ³⁾	M _L ≤ 30	k ₁₀ > 8 · 10 ⁻⁴
2	F	Bodentyp 2	D ≥ 4,5			k ₁₀ > 6 · 10 ⁻⁴
3	F	Bodentyp 3	D ≥ 4,5			k ₁₀ > 1 · 10 ⁻⁴
4	F	Bodentyp 4	D ≥ 6,0			k ₁₀ > 1 · 10 ⁻⁷
5	T	Bindige Böden mit: c _u ≥ 10 kN/m ² und I _p ≥ 0,15 ⁴⁾ (z.B. Tondichtung)	keine Anforderung	es gelten die Anforderungen für Bodentyp 1, 2, 3 oder 4 (freie Wahl)		es gelten die Anforderungen für Bodentyp 4
6	T	Bindige Böden mit: c _u ≥ 10 kN/m ² und I _p ≥ 0,15 ⁴⁾	keine Anforderung	es gelten die Anforderungen für Bodentyp 4		
unter einer dichten Deckschicht (Dichtung)						
						V _{H50} -Wert des Geotextils ⁶⁾
			(mm)			(m/s)
7	T	unabhängig von der Bodenart des Baugrundes	D < 5,0	es gelten die Anforderungen für Bodentyp B		V _{H50} < 1,5 · 10 ⁻⁴
¹⁾ Einsatz als Filterlage (F) (Funktion Filtern und Trennen) oder als Trennlage (T) (Funktion Trennen) ²⁾ Gramm, bezogen auf die Größe der Prüffläche ³⁾ 300 g / 184 cm² = 16,3 kg/m² ⁴⁾ sind c_u und I_p nicht bekannt, gelten alle Anforderungen für Bodentyp 4 ⁵⁾ Durchlässigkeit bei 10°C bei h = 50 mm berechnet nach RPG aus der Wasserdurchlässigkeit normal zur Ebene V_{H50} [m/s] nach DIN 11058 und der Schichtdicke d [m] nach DIN EN ISO 9863-1 oder -2: $k_{10} = \frac{v_{H50} \cdot d}{R_{T10} \cdot h}$ mit dem Temperaturkorrekturfaktor R_{T10} = 1,30 [-] ⁶⁾ Wasserdurchlässigkeit normal zur Ebene V_{H50} [m/s] nach DIN 11058. Das Geotextil darf keine deutliche anisotrope Durchlässigkeit aufweisen.						

RPG: BAW - Richtlinie für die Prüfung von Geotextilien im Verkehrswasserbau

Abbildung 9: Regelanforderungen an die Filterwirksamkeit eines Geotextils aus TLG 2008

Zukünftig wird nach den Regelanforderungen aus der TLG 2018 zu verfahren sein. Abbildung 10 zeigt die neuen Anforderungen.

1. Filterwirksamkeit nach RPG

unter einer durchlässigen Deckschicht						
1	2	3	4	5	6	7
Lfd. Nr.	Funktion ¹⁾	Bodenart des Baugrundes (Filterplanum)	Dicke der Filterschicht (D)	zulässiger Bodendurchgang (mechanische Filterwirksamkeit)		k ₁₀ -Wert des bodenbesetzten Geotextils ⁵⁾ (hydraulische Filterwirksamkeit)
				Gesamtmasse des Bodendurchganges (M _G)	Bodendurchgang in der letzten Prüfphase (M _L)	
			(mm)	(g/184 cm ²) ²⁾	(g/184 cm ²) ²⁾	(m/s)
1	F	Bodentyp A	D ≥ 4,5	M _G ≤ 300 ³⁾	M _L ≤ 30	k ₁₀ > 1 · 10 ⁻³
3	F	Bodentyp B	D ≥ 4,5			k ₁₀ > 1 · 10 ⁻⁴
4	F	Bodentyp C	D ≥ 6,0			k ₁₀ > 1 · 10 ⁻⁷
5	T	Bindige Böden mit: c _u ≥ 10 kN/m ² und I _p ≥ 0,15 ⁴⁾ (z.B. Tondichtung)	keine Anforderung	es gelten die Anforderungen für Bodentyp A, B, oder C (freie Wahl)		es gelten die Anforderungen für Bodentyp C
6	T	Bindige Böden mit: c _u ≥ 10 kN/m ² und I _p ≥ 0,15 ⁴⁾	keine Anforderung	es gelten die Anforderungen für Bodentyp C		
unter einer dichten Deckschicht (Dichtung)						
			(mm)			
7	T	unabhängig von der Bodenart des Baugrundes	D < 6,0	es gelten die Anforderungen für Bodentyp B		

¹⁾ Einsatz als Filterlage (F) (Funktion Filtern und Trennen) oder als Trennlage (T) (Funktion Trennen)

²⁾ Gramm, bezogen auf die Größe der Prüffläche

³⁾ 300 g / 184 cm² = 16,3 kg/m²

⁴⁾ sind c_u und I_p nicht bekannt, gelten alle Anforderungen für Bodentyp C

⁵⁾ Durchlässigkeit bei 10°C bei h = 50 mm berechnet nach RPG aus der Wasserdurchlässigkeit normal zur Ebene V_{H50} [m/s] nach DIN 11058 und der Schichtdicke d [m] nach DIN EN ISO 9863-1 oder -2:

$$k_{10} = \frac{v_{H50} \cdot D}{R_{T10} \cdot h}$$

mit dem Temperaturkorrekturfaktor R_{T10} = 1,30 [-]

RPG: BAW - Richtlinie für die Prüfung von Geotextilien im Verkehrswasserbau

Abbildung 10: Regelanforderungen an die Filterwirksamkeit eines Geotextils aus TLG 2018

Ein Geotextil besitzt nach MAG 1993 gegenüber allen Böden eines Bodentyps eine ausreichende Filterwirksamkeit, wenn es in einer für jedes Fabrikat vorgeschriebenen Grundprüfung

- für die Bodentypen 1 – 3 mit dem Durchströmungsverfahren
- für den Bodentyp 4 mit dem Turbulenzverfahren

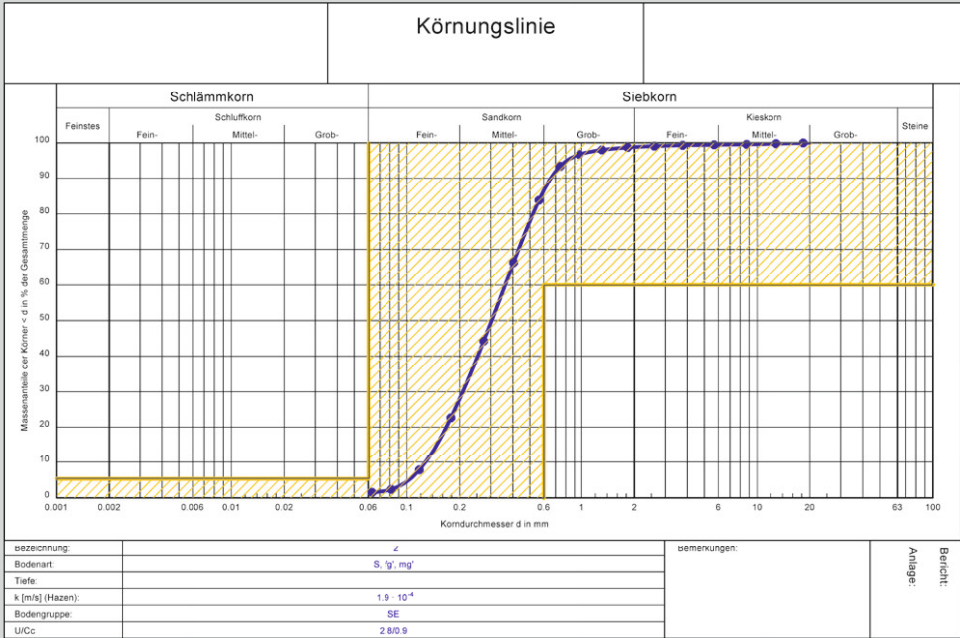
die in den Abbildungen 9 bzw. 10 genannten Werte für die Schichtdicke, den Bodendurchgang und Durchlässigkeit bei Bodenauflast von 25 cm einhält.

Für die Zuordnung eines bindigen Bodens sollten auch die undrainierte Scherfestigkeit c_u und die Plastizitätszahl I_p bekannt sein, vgl. Zeile 5 und 6 der Abbildung 9 bzw. Abbildung 10.

Sind diese Kennwerte nicht bekannt bzw. $c_u < 10 \text{ kN/m}^2$ und $I_p < 15$, so ist das Geotextil immer für den Bodentyp 4 zu bemessen. Dies stellt eine auf der sicheren Seite liegende Lösung dar.

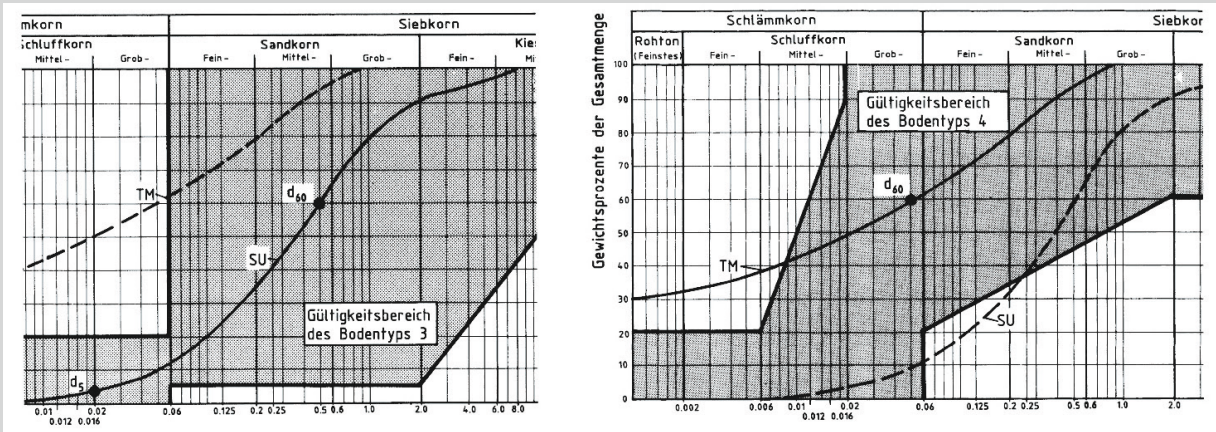
Für Böden, deren Körnungsband über die Grenzen von Gültigkeitsbereichen eines Bodentyps hinaus reicht, ist der geotextile Filter auf alle Bodentypen auszulegen, die von dem Körnungsband mit den Kornanteilen d_5 bis d_{60} erfasst werden.

Beispiel 15: Regelanforderungen der Kornverteilungslinie aus Beispiel 12 (Boden aus Beispiel 4)
(im Beispiel 12: Zuordnung zum Bodentyp 2)



- ➔ Dicke der Filterschicht: $D \geq 4,5 \text{ mm}$
- Zulässiger Bodendurchgang: $M_g \leq 300 \text{ g / 184 cm}^2, M_L \leq 30 \text{ g / 184 cm}^2$
- Durchlässigkeit des bodenbesetzten Geotextils: $k_v > 6 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$

Beispiel 16: Regelanforderungen des Kornverteilungsbands Beispiel 14
(im Beispiel 14: Zuordnung zum Bodentyp 4 und Bodentyp 2)



- ➔ Dicke der Filterschicht: $D \geq 6 \text{ mm}$ (Bodentyp 4 maßgebend)
- Zulässiger Bodendurchgang:
(für den feinstkörnigen nichtbindigen Bodentyp 4): $M_g \leq 300 \text{ g / 184 cm}^2, M_L \leq 30 \text{ g / 184 cm}^2$
- Durchlässigkeit des bodenbesetzten Geotextils: $k_v > 6 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$
(für den durchlässigsten Bodentyp 2)

4.5.1.2 Filterregeln nach AK 14

Gemäß Auskunft der BAW Karlsruhe finden die Filterregeln des AK 14 sowohl bei dynamischen, als auch bei statischen hydraulischen Belastungen keinen Einsatz mehr und werden daher nicht weiter erläutert.

4.5.2 Materialeigenschaften

Allgemeine Materialanforderungen wie die Zugfestigkeit und Abriebbeständigkeit werden in der TLG genannt. Der erforderliche Durchschlagwiderstand ist abhängig von den gewählten Filterbausteinen und wird in Zeile 3 genannt.

Die Dicke der Filterschicht wird grundsätzlich durch das Bodentyp-Verfahren vorgegeben.

2. Materialanforderungen

Lfd. Nr.	Materialeigenschaft			Deckschichtbauweise				
				lose Wasserbausteine	vergossene Wasserbausteine	durchlässige und dichte Beläge		
						G < 3 kN/m²	G < 3 kN/m²	
1	Höchstzugfestigkeit nach DIN EN ISO 10319 längs und quer		kN/m	≥ 12,0		≥ 12,0	≥ 9,0 ¹⁾	≥ 12,0
2	Abrieb- beständigkeit nach RPG	Restdicke D der Filterschicht nach Abriebtest	mm	Bodentyp 1-3: D ≥ 3,5 Bodentyp 4: D ≥ 4,5		--	-- ²⁾	
		Höchstzugfestigkeit nach Abriebtest (Restzugfestigkeit)	kN/m	≥ 9,0		--	-- ²⁾	
				lose oder teilvergossene Wasserbausteine der Klasse ³⁾			vollvergossene Wasserbausteine	
				CP _{90/250} 30 kg ⁴⁾	LMB _{5/40} 60 kg ⁴⁾	LMB _{10/60} 90 kg ⁴⁾	alle Steinklassen ⁵⁾	
3	Durchschlagwiderstand (Fallenergie) nach RPG		Nm	≥ 600	≥ 1200	≥ 1800	≥ 600	--

¹⁾ bei Unterwassereinbau ≥ 12,0 kN/m

²⁾ bei Betonverbundsteinen wie bei losen Wasserbausteinen

³⁾ Steinklassen nach DIN EN 13383-1, bei Größenklassen bis zu einer Rohdichte ρ_s = 3000 g/cm³.

⁴⁾ für den Durchschlagtest maßgebende Masse eines Steines der jeweiligen Steinklasse unter Berücksichtigung der zulässigen Überkornanteile (wird von 90 Masse-% der Steine mit großer Wahrscheinlichkeit nicht überschritten). Die Fallenergie entspricht dem Aufprall eines Steines dieser Masse aus 2 m Höhe.

⁵⁾ für vollvergossene Wasserbausteine entspricht die Fallenergie dem Aufprall eines Steines der Klasse LMB_{10/60} (90kg) beim Einbau unter Wasser.

RPG: BAW - Richtlinie für die Prüfung von Geotextilien im Verkehrswasserbau
DIN EN ISO 10319: Geotextilien; Zugversuch am breiten Streifen
DIN EN 13383-1: Wasserbausteine - Teil 1: Anforderungen

Abbildung 11: Materialanforderungen an ein Geotextil aus TLG 2008

2. Materialanforderungen

Lfd. Nr.	Materialeigenschaft			Deckschichtbauweise					
				lose Wasserbausteine	vergossene Wasserbausteine		durchlässige und dichte Beläge		
							G < 3 kN/m²	G < 3 kN/m²	
1	Zugfestigkeit nach DIN EN ISO 10319 längs und quer		kN/m	≥ 12,0		≥ 12,0		≥ 9,0 ¹⁾	≥ 12,0
2	Abrieb- beständigkeit nach RPG	Charakteristische Öffnungsweite (O ₉₀)	µm	≤ Mittelwert plus Standardabweichung der Leistungserklärung		--		-- ²⁾	
		Zugfestigkeit nach Abriebtest (Restzugfestigkeit)	kN/m	≥ 9,0		--		-- ²⁾	
				lose oder teilvergossene Wasserbausteine der Klasse ³⁾			vollvergossene Wasserbausteine		
				CP _{90/250} 30 kg ⁴⁾	LMB _{5/40} 60 kg ⁴⁾	LMB _{10/60} 90 kg ⁴⁾	alle Steinklassen ⁵⁾		
3	Durchschlagwiderstand (Fallenergie) nach RPG		Nm	≥ 600	≥ 1200	≥ 1800	≥ 600		--

¹⁾ bei Unterwassereinbau ≥ 12,0 kN/m

²⁾ bei Betonverbundsteinen wie bei losen Wasserbausteinen

³⁾ Steinklassen nach DIN EN 13383-1, bei Größenklassen bis zu einer Rohdichte ρ_s = 3000 g/cm³.

⁴⁾ für den Durchschlagtest maßgebende Masse eines Steines der jeweiligen Steinklasse unter Berücksichtigung der zulässigen Überkornanteile (wird von 90 Masse-% der Steine mit großer Wahrscheinlichkeit nicht überschritten). Die Fallenergie entspricht dem Aufprall eines Steines dieser Masse aus 2 m Höhe.

⁵⁾ für vollvergossene Wasserbausteine entspricht die Fallenergie dem Aufprall eines Steines der Klasse LMB_{10/60}(90kg) beim Einbau unter Wasser.

RPG: BAW - Richtlinie für die Prüfung von Geotextilien im Verkehrswasserbau
DIN EN ISO 10319: Geotextilien; Zugversuch am breiten Streifen
DIN EN 13383-1: Wasserbausteine - Teil 1: Anforderungen

Abbildung 12: Materialanforderungen an ein Geotextil aus TLG 2018

Die neuen Anforderungen gem. TLG 2018 sind in Abbildung 12 dargestellt. Gegenüber der TLG 2008 hat sich in Punkt 2 die erforderliche Restdicke nach Abriebtest geändert zu einer Anforderung mit dem Fokus auf die Wasserdurchlässigkeit. Die charakteristische Öffnungsweite O₉₀ nach Abriebtest wird nun maßgebend.

Für den Fall, dass ein Geotextil mit einer Zusatzschicht eingesetzt wird, ist diese mit den folgenden Kennwerten auszubilden:

Bodenart des Baugrundes (Planum)	Art der Zusatzschicht	Öffnungsweise $D_w (O_{90})$ (mm)	Schichtdicke D (mm)
Bodentyp 2-4	engporig	0,3 - 2,0	5 - 15
	offenporig	8,0 - 20	15 - 25

Abbildung 13: Empfehlungen für die Ausbildung von Zusatzschichten aus MAG 1993

Die Wasserdurchlässigkeit des zum Einsatz kommenden Geotextils ist gem. MAG 1993 zu wählen mit:

- schluffige Böden:

$k_v \geq 50 \cdot k_{\text{Boden}}$
- schwach schluffige Böden:

$k_v \geq 10 \cdot k_{\text{Boden}}$

Jedoch ist nach Auskunft der BAW der in Abbildung 9 gemäß dem Bodentyp-Verfahren genannte Wert für die Durchlässigkeit des bodenbesetzten Geotextils zur Verhinderung von Bodeneinlagerungen völlig ausreichend und braucht mit oben stehenden Bedingungen nicht weiter kontrolliert zu werden.

5 Filterbemessung nach M Geok E

Für Geokunststoffe, die im Erdbau und in Entwässerungsanlagen des Straßenbaus eingesetzt werden, gibt das Merkblatt M Geok E Angaben zu Anwendungsmöglichkeiten und notwendigen Nachweisführungen.

Die Bemessung von geotextilen Filtern umfasst wie in anderen Merkblättern den Nachweis des Bodenrückhaltevermögens – die mechanische Filterwirksamkeit – und den Nachweis der Wasserdurchlässigkeit – die hydraulische Filterwirksamkeit.

5.1 Mechanische Filterwirksamkeit

M Geok E unterscheidet bzgl. hydraulischer Einwirkungen nach sogenannten hydraulischen Sicherheitsfällen. Für drei Sicherheitsfälle werden Hinweise zur Nachweisführung der mechanischen Filterwirkung gegeben.

5.1.1 Hydraulischer Sicherheitsfall I

Lt. M Geok E sorgen geringe Wassermengen, einseitige Anströmungen und geringe hydraulische Gefälle im Straßenbau im Regel-fall filtertechnisch für einfache Bedingungen.

Für die Öffnungsweite gilt für Vliesstoffe:

$$0,06 \text{ mm} \leq \text{gew. } O_{90} \leq 0,2 \text{ mm}$$

5.1.2 Hydraulischer Sicherheitsfall II

Für den hydraulischen Sicherheitsfall II mit geringen wechselseitigen bzw. mittleren einseitigen Anströmungen werden die fol-genden Anhaltswerte für die Öffnungsweiten gegeben. Die zu filternden Böden sind auf Suffosions- und Erosionssicherheit hin zu untersuchen.

- Kohäsiver Boden:

$0,06 \text{ mm} \leq \text{gew. } O_{90} \leq 0,20 \text{ mm}$
- Grobschluff bis Feinsand:

$0,06 \text{ mm} \leq \text{gew. } O_{90} \leq 0,11 \text{ mm}$
- Feinsand:

$0,06 \text{ mm} \leq \text{gew. } O_{90} \leq 0,13 \text{ mm}$
- Mittelsand:

$0,08 \text{ mm} \leq \text{gew. } O_{90} \leq 0,30 \text{ mm}$
- Grobsand:

$0,12 \text{ mm} \leq \text{gew. } O_{90} \leq 0,60 \text{ mm}$

Ist der Boden nicht erosions- bzw. suffosionssicher, ist der Nachweis nach dem hydraulischen Sicherheitsfall III durchzuführen.

5.1.3 Hydraulischer Sicherheitsfall III

Einseitige konzentrierte Anströmungen und großflächige wechselseitige Anströmungen mit hohem Wasseranfall sind dem hydrau-lischen Sicherheitsfall III zuzuordnen.

Hat das Versagen des geotextilen Filters negative Auswirkungen auf ein Bauwerk, wird der hydraulische Sicherheitsfall III maßgebend.

Eine Analyse der hydraulischen Bedingungen und die daraus resultierende Filterdimensionierung ist durch einen geotechnischen Sachverständigen durchzuführen.

5.2 Hydraulische Filterwirksamkeit

Nach M Geok E wird der Nachweis der hydraulischen Filterwirksamkeit erbracht, wenn die folgende Bedingung erfüllt ist:

$$k_{v, 5\%, \text{ Geotextil}} = k_{\text{Boden}}$$

bzw.

$$k_{v, 5\%, \text{ Geotextil}} \geq 1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

Der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert $k_{v, 5\%, \text{ Geotextil}}$ wird für ein Gefälle von $i = 1$ und einer Auflast von 2 kN/m^2 gemäß DIN 60500-4 ermittelt.

Eine ausreichende Wasserdurchlässigkeit wird auf Dauer mit dem Ausschluss einer Kolmation gesichert. Dazu sind die folgenden Bedingungen einzuhalten:

Um den Boden gegen Erosion zu schützen und um somit das tragende Korngerüst stabil zu halten, wird eine Öffnungsweite gewählt mit

$$\text{gew. } O_{90} \leq 1,0 \cdot \text{zul } O_{90}$$

Um eine Kolmation im unschädlichen Rahmen zu gewährleisten ist eine Öffnungsweite zu wählen:

$$\text{gew. } O_{90} \leq 0,2 \cdot \text{zul } O_{90}$$

5.3 Geotextilrobustheitsklassen

Die Ermittlung der notwendigen Geotextilrobustheitsklasse wird in [12] mit der folgenden Tabelle bestimmt:

Ermittlung der für eine Baustelle erforderlichen Geotextilrobustheitsklasse für Trenn-, Filter- und Schutzlagen.

5 Beanspruchungsfälle für Korngröße und -form des Schüttmaterials werden kombiniert mit 5 Beanspruchungsfällen durch Einbau und Baubetrieb. Daraus ergeben sich die Geotextilrobustheitsklassen GRK 3 bis GRK 5.

Einfluss des Schüttmaterials		
	Schüttmaterial	
	rundkörnig	scharfkantig
AS 1	mechanische Beanspruchung ohne Bedeutung	
AS 2	grob- und gemischtkörnige Böden	
AS 3	wie AS 2 mit ≤ 40 % Steinen und Blöcken	Korngröße wie AS 2
AS 4	wie AS 2 mit > 40 % Steinen und Blöcken	Korngröße wie AS 3
AS 5		Korngröße wie AS 4

Die Beanspruchung durch Schüttmaterial sowie Einbau- und Baubetrieb ergibt GRK					
AS 1 - AS 5 Beanspruchung durch Schüttmaterial	AS 1	AS 2	AS 3	AS 4	AS 5
AB 1 Einbau von Hand	GRK 3				
AB 2 Einbau maschinell, Spurrinnen < 5cm	GRK 3	GRK 3	GRK 3	GRK 4	GRK 5
AB 3 Spurrinnentiefe 5 < 15 cm	GRK 3	GRK 3	GRK 4	GRK 5	(h)
AB 4 Spurrinnentiefe 15 < 30 cm	GRK 3	GRK 4	GRK 5	(h)	(h)
AB 5 Spurrinnentiefe > 30 cm	GRK 4	GRK 5	(h)	(h)	(h)

(h) in diesen Fällen sollte die Spurrinnentiefe durch die Erhöhung der Schüttlagendicke reduziert werden; bis zu einem gewissen Grade ist dies auch durch eine Bewehrung zu erreichen.

Bei zu erwartenden tiefen Spurrinnen werden hoch dehnfähige Produkte empfohlen (Höchstzugkraftdehnung > 50 %).

Tabelle 8: Ermittlung der erforderlichen Geotextilrobustheitsklasse nach [12]

Die mechanischen Eigenschaften für die Geotextilrobustheitsklassen sind entsprechend der folgenden Tabelle definiert, wobei für geotextile Filter die Geotextilrobustheitsklassen GRK 3 bis GRK 5 gefordert werden.

Geotextilrobustheitsklasse GRK	Vliesstoffe		Gewebe aus Folienbändchen oder Spleißgarnen	
	Stempeldurch- druckkraft erf $F_{p,5\%}$	Masse pro Flächeneinheit erf $m_{A,5\%}$	Höchstzugkraft ¹⁾ erf $F_{5\%}$	Masse pro Flächeneinheit erf $F_{A,5\%}$
1	≥ 0,5 kN	≥ 80 g/m ²	≥ 20 kN/m	≥ 100 g/m ²
2	≥ 1,0 kN	≥ 100 g/m ²	≥ 30 kN/m	≥ 160 g/m ²
3	≥ 1,5 kN	≥ 150 g/m ²	≥ 35 kN/m	≥ 180 g/m ²
4	≥ 2,5 kN	≥ 250 g/m ²	≥ 45 kN/m	≥ 220 g/m ²
5	≥ 3,5 kN	≥ 350 g/m ²	≥ 50 kN/m	≥ 250 g/m ²

Erläuterung:

Tabelle 9: Geotextilrobustheitsklasse nach [12]

6 Literatur

[1] *Anwendung von Geotextilien im Wasserbau, Merkblätter 221 / 1992*, Herausgeber Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK), Bonn, 1992

[2] *Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken, EAK 2002, korrigierte Ausgabe 2007*, Herausgeber: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen

[3] *Grundbautaschenbuch, 7. Auflage, Teil 2*, Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt

[4] *BAW Merkblatt Anwendung von Kornfiltern an Bundeswasserstraßen (MAK)*, Herausgeber: Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 2013

[5] *Änderung zu A1:2015 zu BAW Merkblatt Anwendung von Kornfiltern an Bundeswasserstraßen (MAK)*, Herausgeber: Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 2013

[6] *Merkblatt Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (MAR)*, Herausgeber: Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 2008

[7] *Merkblatt DWA-M 511, Filtern mit Geokunststoffen*, Herausgeber: DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 2017

[8] *Merkblatt Anwendung von geotextilen Filtern an Wasserstraßen (MAG)*, Herausgeber: BAW Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 1993

[9] *Merkblatt Materialtransport im Boden (MMB)*, Herausgeber: Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 2013

[10] *Merkblatt über die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Straßenbaus (M Geok E)*, Herausgeber: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2016

[11] *Richtlinie für die Zulassung von Geotextilien zum Filtern und Trennen für Deponieabdichtungen*, Herausgeber: Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, 2016

[12] *Technische Lieferbedingungen für Geokunststoffe im Erdbau des Straßenbaus, (TL Goek E-StB 05)*, Herausgeber: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau, 2005

[13] *Technische Lieferbedingungen für Geotextilien und geotextilverwandte Produkte an Wasserstraßen (TLG)*, Herausgeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung Abteilung Wasserstraßen, Schifffahrt, 2008

[14] *Technische Lieferbedingungen für Geotextilien und geotextilverwandte Produkte an Wasserstraßen (TLG)*, Herausgeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung Abteilung Wasserstraßen, Schifffahrt, 2018

[15] *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, ZTV E-StB*, 2009

7 Anlagen

