



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

BAWMerkblatt

Merkblatt Anwendung von Kornfiltern an Bundeswasserstraßen (MAK)

Ausgabe 2013



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

BAW-Merkblätter und -Richtlinien Herausgeber

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

Postfach 21 02 53
76152 Karlsruhe

Tel.: 0721 9726-0
Fax: 0721 9726-4540

info@baw.de
www.baw.de

Übersetzung, Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit Genehmigung des Herausgebers: © BAW 2013

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Vorbemerkung	1
2	Begriffe, Formelzeichen und Abkürzungen	1
2.1	Begriffe	1
2.2	Formelzeichen	3
2.3	Abkürzungen	3
3	Grundsätze für die Anwendung von Kornfiltern	4
3.1	Allgemeines	4
3.2	Kornfilter in einem Deckwerk	4
3.3	Kornfilter als Auflastdrän am luftseitigen Fuß eines Kanaldamms	5
4	Planungsunterlagen	7
5	Kornfilterbauweisen	8
5.1	Allgemeines	8
5.2	Filterdicken	8
5.3	Standard-Zweistufenfilter für Deckwerke an Binnenwasserstraßen	9
5.4	Filter bei inhomogenen Untergrundverhältnissen	10
5.5	Anschlüsse von Deckwerken an Bauwerke	11
6	Materialanforderungen	11
6.1	Physikalische Materialanforderungen	11
6.2	Umwelttechnische Materialanforderungen	12
7	Filtertechnische Nachweise	12
7.1	Allgemeines	12
7.2	Mechanische Filterwirksamkeit	12
7.2.1	Grundsätze	12
7.2.2	Nicht kohäsive Böden	13
7.2.3	Kohäsive Böden	13
7.2.4	Suffosive Böden	13
7.3	Hydraulische Filterwirksamkeit	13
7.4	Stufenfilter	14
7.5	Suffosionssicherheit	14
7.6	Filtertechnische Anforderungen bei Deckwerken	14
7.7	Bemessung nach zusätzlichen Untersuchungen	15
7.8	Ermittlung des Körnungsbandes eines Filters	15
8	Hinweise zur Ausschreibung und Bauausführung	16
8.1	Verdingungsunterlagen	16
8.2	Bauausführung	17
8.2.1	Einbau im Trockenen	17
8.2.2	Einbau unter Wasser	17
8.3	Bestandsunterlagen	18

Literatur	18
Bezugsregelwerke	18

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mindestdicken von Kornfiltern	8
Tabelle 2: Anforderungen an Gesteinskörnungen für Kornfilter nach TL Gestein (2007)	11
Tabelle 3: Verfahren zur Abschätzung der Durchlässigkeit von Sanden	14

Bildverzeichnis

Bild 1: Kornfilter in einer Böschungssicherung mit einem Deckwerk	5
Bild 2: Durchströmungsverhältnisse bei Anströmung eines Auflastdräns am Dammfuß	6
Bild 3: Auflastdrän mit Einstau durch ein Gewässer	6
Bild 4: Kornfilter als Zweistufenfilter in einem Deckwerk	9
Bild 5: Zulässige Bereiche für Körnungslinien im Standard-Zweistufenfilter	10
Bild 6: Anschluss eines Deckwerks mit Kornfilter an eine vertikale Bauwerkskante	11
Bild 7: Körnungsbänder von Wasserbausteinen der Klassen CP _{90/250} , LMB _{5/40} und LMB _{10/60}	15

Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes k aus der Korngrößenverteilung
Anlage 2: Beispiele zur Ermittlung der Kornverteilung eines Filters

1 Vorbemerkung

Dieses Merkblatt gilt für Kornfilter, die in Böschungs- und Sohlensicherungen, an Dämmen und anderen baulichen Anlagen an Wasserstraßen eingesetzt werden.

Technische und normative Änderungen erforderten die vollständige Überarbeitung des 1989 erstmalig herausgegebenen Merkblatts MAK. Die Nachweisverfahren für den Materialtransport im Boden in Form von Kontakterosion und Suffosion sind im überarbeiteten MAK nicht mehr enthalten. Sie werden in dem neu verfassten Merkblatt Materialtransport im Boden (MMB) (MMB, 2013) behandelt. Das MAK bezieht sich in weiten Bereichen auf das MMB, so dass die beiden Merkblätter als eine Einheit zu sehen sind.

Während der Schwerpunkt der Vorgängerversion des MAK, Ausgabe 1989, auf der Anwendung des Kornfilters in Deckwerken für den Uferschutz lag, sind in der überarbeiteten Fassung insbesondere auch Anwendungen als Dränelemente an Dämmen erfasst. Daher ist das vorliegende MAK auch im Zusammenhang mit dem Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD) (MSD, 2011) zu sehen.

2 Begriffe, Formelzeichen und Abkürzungen

2.1 Begriffe

Auflastdrän

Ein Auflastdrän ist ein außenliegender Drän, der durch seine Auflast den Bodenkörper stabilisiert und durch seine Filterwirkung die Erosion des Bodenkörpers verhindert.

Deckwerk

Als Deckwerk wird der gesamte Aufbau einer Böschungs- und/oder Sohlensicherung bezeichnet. Hierzu gehören Deckschicht und Filter oder Deckschicht und Dichtung mit Trennlage.

Anm: Kornfilter werden i. A. nur bei durchlässigen Deckwerken verwendet (MAR 2008).

Drän

Ein Drän dient zur Fassung und Ableitung von Grund- und Sickerwasser. Nach DIN 4095 (1990) ist Drän der Sammelbegriff für Dränleitung und Dränschicht. Bei Dräns für Dämme an Wasserstraßen ist eine Dränleitung nicht zwingend erforderlich.

Einstufenfilter

Einstufenfilter sind einlagige Kornfilter aus Gesteinskörnungen mit einer Ungleichförmigkeitszahl $C_u \leq 5$.

Erosion

Erosion ist die Umlagerung und der Transport aller Fraktionen eines Bodens durch die Strömung des Wassers.

Filterwirksamkeit, hydraulische

Unter hydraulischer Filterwirksamkeit wird die Fähigkeit eines Kornfilters verstanden, das ihm zuströmende Wasser in ausreichendem Maß abzuleiten.

Filterwirksamkeit, mechanische

Unter mechanischer Filterwirksamkeit wird die Fähigkeit eines Filters verstanden, den zu schützenden Boden in ausreichendem Umfang zurückzuhalten (Bodenrückhaltevermögen).

Gesteinskörnung

Als Gesteinskörnung wird ein körniges Material für die Verwendung im Bauwesen bezeichnet, das natürlich, industriell hergestellt oder rezykliert ist. Im Wasserbau werden i. A. natürliche Gesteinskörnungen aus mineralischen Vorkommen verwendet, die ausschließlich mechanisch aufbereitet wurden (z. B. Kies, Sand, gebrochenes Festgestein).

Kohäsive Böden/nicht kohäsive Böden

Für Nachweise gegen Materialtransport erfolgt eine Unterscheidung in kohäsive und nicht kohäsive Böden auf der Grundlage der Klassifikation nach DIN 18196:2011-05. Als kohäsive Böden werden im Sinne dieses Merkblattes mindestens mittelplastische fein- und gemischtkörnige Böden bezeichnet, die eine effektive Kohäsion c' besitzen. Als nicht kohäsive Böden gelten hier grobkörnige und leichtplastische gemischt- und feinkörnige Böden.

Kornfilter

Kornfilter sind natürlich vorkommende oder hergestellte Gemische aus Gesteinskörnungen. Sie können einlagig als Einstufen- oder Mischkornfilter oder mehrlagig als Stufenfilter ausgeführt werden. Sie müssen mechanisch und hydraulisch filterwirksam sein.

Mischkornfilter

Mischkornfilter sind einlagige Kornfilter aus Gesteinskörnungen mit einer Ungleichförmigkeitszahl $C_U > 5$.

Stufenfilter

Stufenfilter sind mehrlagige Kornfilter aus unterschiedlichen Gesteinskörnungen. Die einzelnen Filterstufen müssen gegeneinander filterstabil sein.

Suffosion

Suffosion ist die Umlagerung und der Transport der feinen Fraktionen eines nicht kohäsiven Bodens im Porenraum des Korngerüstes der groben Fraktionen durch die Strömung des Wassers.

2.2 Formelzeichen

Formelzeichen	Benennung	Einheit
C_U	Ungleichförmigkeitszahl	-
d_{10}	Korndurchmesser bei 10 % Siebdurchgang	mm
d_{15}	Korndurchmesser bei 15 % Siebdurchgang	mm
d_{50}	Korndurchmesser bei 50 % Siebdurchgang	mm
D_{\min}	Mindestdicke Kornfilter	m
D_{Pr}	Verdichtungsgrad	%
k	Durchlässigkeitsbeiwert	m/s
k_F	Durchlässigkeitsbeiwert Filter	m/s
k_B	Durchlässigkeitsbeiwert Boden	m/s
I_P	Plastizitätszahl	-
w_L	Wassergehalt an der Fließgrenze	-
Index F	Index für „Filter“	
Index B	Index für „Boden“	
ρ_{rd}	Rohdichte auf ofentrockener Basis nach DIN EN 1097-6	Mg/m ³

2.3 Abkürzungen

Abkürzungen	Benennungen
$CP_{90/250}$	Größenklasse Wasserbausteine nach DIN EN13383
$LMB_{5/40}$	Gewichtsklasse Wasserbausteine nach DIN EN13383
$LMB_{10/60}$	Gewichtsklasse Wasserbausteine nach DIN EN13383
LA	Los-Angeles-Koeffizient
W_{cm}	Wasseraufnahme
F_i	Frostwiderstandsklasse
C_i	Kategorie für Anteil gebrochener Flächen
m_{LPC}	Gehalt organischer Verunreinigungen

3 Grundsätze für die Anwendung von Kornfiltern

3.1 Allgemeines

Ein Kornfilter hat die Aufgabe, den Boden vor Ausspülungen und Umlagerungen infolge von Grund-/ Sickerwasserströmungen oder äußerer hydraulischer Beanspruchung durch Oberflächenwasser (Strömung, Wellen) zu schützen. Bei hydraulischer Beanspruchung sind sowohl Lockergesteine als auch veränderlich feste Gesteine, die unter dem Einfluss von Wasser, Luft und Temperaturschwankungen verwittern und nicht erosionsfest sind, zu sichern.

Der Kornfilter muss auf den Anwendungsfall bezogene technische Anforderungen hinsichtlich der mechanischen und hydraulischen Filterwirksamkeit erfüllen, d. h., er ist auf den zu schützenden Boden abzustimmen.

Kornfilter unterliegen hydraulischen Beanspruchungen durch innere und ggf. äußere Strömungskräfte. Eine innere hydraulische Beanspruchung wird durch Strömungskräfte im Korngerüst des Kornfilters verursacht; eine äußere hydraulische Beanspruchung durch Strömungskräfte an der Oberfläche des Kornfilters. Hinsichtlich der hydraulischen Beanspruchung ist dabei zu unterscheiden, ob sich der Kornfilter in einem Gewässer (z. B. Filter innerhalb eines Deckwerks, Kapitel 3.2) oder an der Luftseite (z. B. Auflastdrän am luftseitigen Fuß eines Kanaldamms, Kapitel 3.3) befindet.

Kornfilter unterliegen mechanischen Beanspruchungen, z. B. durch Befahren mit Baugeräten (Spurrillen, Rissbildung), Aufbringen einer Deckschicht aus Schüttsteinen (Durchschlag) und Überbauten oder Verkehrslasten. Sie sind durch eine ausreichende Dicke auf diese Beanspruchungen auszulegen, oder es sind geeignete Schutzmaßnahmen (z. B. das Aufbringen einer Deckschicht) zu treffen.

3.2 Kornfilter in einem Deckwerk

Ein Kornfilter in einem Deckwerk hat die Aufgabe einen Bodenaustrag in die Deckschicht hinein bzw. durch die Deckschicht hindurch zu verhindern. Er muss gegen den anstehenden Boden und gegen die Deckschicht filterstabil sein.

Schnelle Wasserspiegeländerungen im Gewässer (z. B. infolge Schiffsvorbeifahrt) können große innere hydraulische Beanspruchungen in Form hoher hydraulischer Gradienten erzeugen und dadurch hydrodynamische Bodenverlagerungen bewirken. Dies gilt sowohl für den Boden unterhalb des Filters als auch für den Filter. Eine Beschädigung des Filters infolge hydrodynamischer Bodenverlagerung wird durch eine ausreichende Auflast der Deckschicht verhindert.

Die Deckschicht schützt den Filter auch gegen Erosion infolge äußerer hydraulischer Beanspruchungen wie z. B. Wellenschlag oder Hochwasserabfluss.

Bild 1 zeigt den Aufbau eines Deckwerks mit einem Kornfilter auf einer Uferböschung. In diesem Beispiel bindet das Deckwerk zur Sicherung des Böschungsfußes in die Sohle ein. Der für die Herstellung erforderliche Fußgraben ist bis auf die Höhe der Gewässersohle wieder verfüllt.

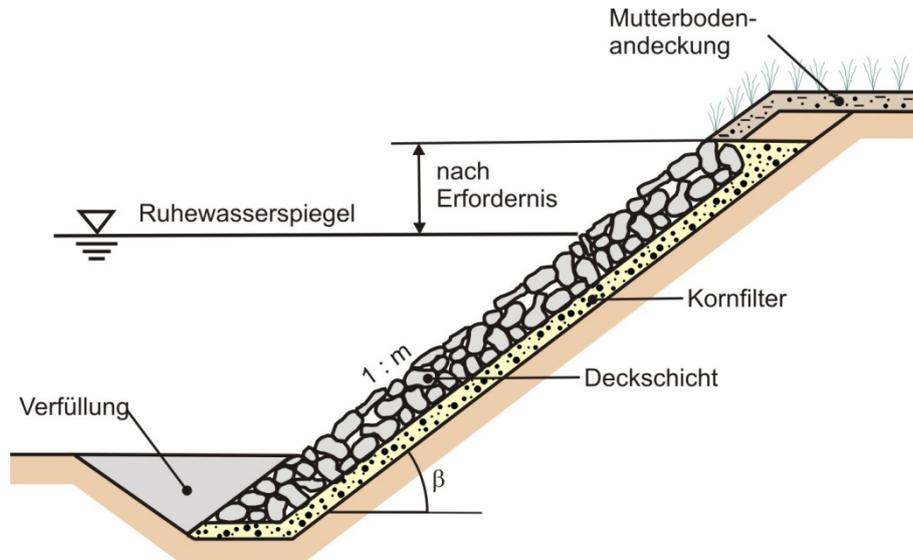


Bild 1: Kornfilter in einer Böschungssicherung mit einem Deckwerk

Die Bemessung eines Deckwerkes (Kornfilter mit Deckschicht) erfolgt nach den Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB) (GBB, 2010). Standardbauweisen für Deckwerke sind im MAR (2008) enthalten.

3.3 Kornfilter als Auflastdrän am luftseitigen Fuß eines Kanaldamms

Ein Auflastdrän am luftseitigen Dammfuß stabilisiert durch sein Eigengewicht die Dammböschung und leitet das ihm zuströmende Sickerwasser ab. Er muss gegenüber dem Dammmaterial und dem Untergrund filterstabil sein.

Hinsichtlich der hydraulischen Beanspruchungen wird unterschieden, ob der Auflastdrän durch einen am Dammfuß verlaufenden Seitengraben bzw. ein anderes Gewässer eingestaut wird oder nicht.

Bei einem nicht eingestauten Auflastdrän erfolgt eine innere hydraulische Beanspruchung nur durch die Zuströmung aus dem Damm. Da die hydraulische Durchlässigkeit des Auflastdräns wesentlich größer ist als die des Dammkörpers, beschränkt sich die Durchströmung zumeist auf einen teilgesättigten Übergangsbereich zwischen Dammkörper und Auflastdrän sowie einen gesättigten Bereich geringer Dicke an der Sohle des Auflastdräns (Odenwald, 2011). Bild 2 zeigt die Durchströmungsverhältnisse bei Anströmung eines Auflastdräns am luftseitigen Dammfuß. Der hydraulische Gradient der wassergesättigten Strömung und damit die Strömungskräfte an der Sohle des Auflastdräns sowie im luftseitigen Wasseraustrittsbereich sind gering und daher i. d. R. nicht standsicherheitsrelevant. Äußere hydraulische Beanspruchungen ergeben sich z. B. durch Starkniederschlag. Die Oberfläche eines Auflastdräns ist deshalb i. d. R. gegen äußere Erosion zu schützen, z. B. durch Grasbewuchs, s. MSD (2011).

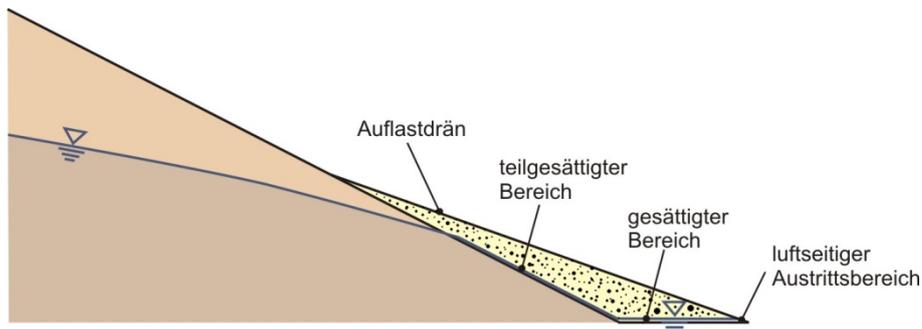


Bild 2: Durchströmungsverhältnisse bei Anströmung eines Auflastdräns am Dammfuß

Wird ein Auflastdrän auf der Luftseite eingestaut, treten weitere innere hydraulische Beanspruchungen auf. Die unter Wasser befindlichen Partikel des Kornfilters stehen bei luftseitigem Einstau unter Auftrieb, wodurch die Standsicherheit des Dräns verringert werden kann. Bei einem schnellen Wasserspiegelabfall im einstauenden Gewässer (z. B. in einem an den Damm angrenzenden Hochwasserrückhalteraum) können außerdem in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des Bodens und des Auflastdräns sowie der Absenkgeschwindigkeit Porenwasserüberdrücke entstehen, die die Standsicherheit der Dammböschung reduzieren. Eine äußere hydraulische Beanspruchung auf einen eingestauten Auflastdrän ist die Strömung im angrenzenden Gewässer (z. B. Seitengraben). In Abhängigkeit von der maßgebenden Strömungsgeschwindigkeit sind ggf. Maßnahmen zum Schutz des Auflastdräns gegen äußere Erosion erforderlich. Zumeist erfolgt dies durch Aufbringen einer Deckschicht (z. B. aus Wasserbausteinen), die filterstabil gegenüber dem Auflastdrän sein muss.

Bild 3 zeigt einen Auflastdrän an einer luftseitigen Dammböschung, der am Dammfuß durch einen wasserführenden Seitengraben eingestaut wird. Der Auflastdrän ist im Bereich des Seitengrabens mit Wasserbausteinen gegen äußere Erosion geschützt.

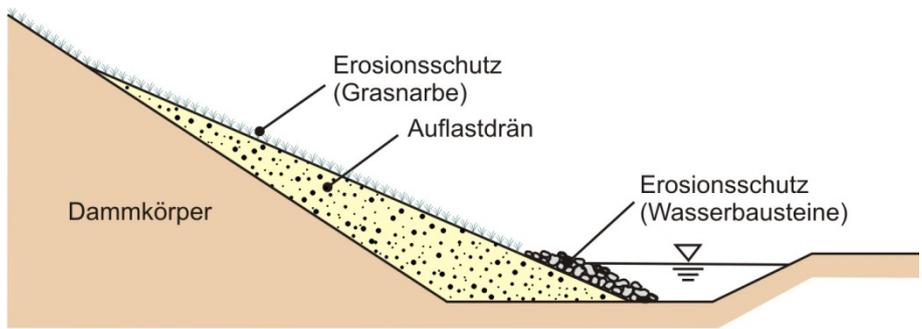


Bild 3: Auflastdrän mit Einstau durch ein Gewässer

Die Standsicherheitserhöhung des Dammes durch den Auflastdrän ist im Rahmen der Standsicherheitsuntersuchung nach dem Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD 2011) nachzuweisen.

4 Planungsunterlagen

Für die Planung eines Kornfilters müssen Angaben zum Baugrund, zu hydraulischen und mechanischen Beanspruchungen und ggf. zum Aufbau der Deckschicht vorliegen.

Baugrund

Die Baugrundbeschreibung muss den Schichtenaufbau und -verlauf mit folgenden Angaben enthalten:

a) *Korngrößenverteilung mit Körnungsband*

Die Korngrößenverteilungen der relevanten Bodenschichten sind Grundlage für die Untersuchungen nach dem Merkblatt Materialtransport im Boden (MMB, 2013). Sie sind u. a. erforderlich zur Beurteilung des Bodens hinsichtlich der Unterscheidung in kohäsive und nicht kohäsive Böden und werden zur Prüfung der Notwendigkeit eines Filters und ggf. zur Filterbemessung benötigt.

b) *Wasserdurchlässigkeit (k-Wert)*

Der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k ist Grundlage für den Nachweis der hydraulischen Filterwirksamkeit eines Kornfilters. Bei nicht kohäsiven Böden kann der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert auf Grundlage der Korngrößenverteilung abgeschätzt werden (Kap. 7.3).

c) *Klassifikation nach DIN 18196*

Die Klassifikation des Bodens nach DIN 18196 (2011) ist Grundlage der Unterscheidung in kohäsive und nicht kohäsive Böden. Hierzu ist die Kenntnis der Fließgrenze, der Korngrößenverteilung und der Plastizitätszahl erforderlich.

Hydraulische Beanspruchungen des Filters bei Einbau und Betrieb

Die maßgeblichen natürlichen und schiffsinduzierten Strömungsgeschwindigkeiten, Wellenhöhen und Wasserspiegeländerungen müssen für die Bemessung einer ggf. erforderlichen Deckschicht und zur Festlegung des Einbauverfahrens bekannt sein.

Mechanische Beanspruchungen des Filters bei Einbau und Betrieb

Die mechanische Beanspruchung des Filters beim Einbau hängt wesentlich von der Einbausituation ab (unter Wasser, Abwerfen der Steine, Befahrung mit Baufahrzeugen,...) und ist ggf. bei der Dimensionierung des Filters zu berücksichtigen.

Aufbau der Deckschicht

Es müssen die Bauart (Steinschüttung, Belag, ...) und die Dicke der Deckschicht sowie ggf. die Klasse der Wasserbausteine bekannt sein.

5 Kornfilterbauweisen

5.1 Allgemeines

Es wird zwischen folgenden Kornfilterbauweisen unterschieden:

- Einstufenfilter,
- Mischkornfilter und
- Stufenfilter.

5.2 Filterdicken

In Tabelle 1 sind Richtwerte für Mindestdicken von Kornfiltern angegeben. Sie berücksichtigen die für die Funktion eines Kornfilters erforderliche Filtrationslänge und beinhalten Sicherheitszuschläge für übliche Einbaubeanspruchungen sowie Bauleranzen. Die angegebenen Werte dürfen ohne besondere Untersuchungen nicht unterschritten werden. Abhängig von der Einbausituation können auch größere Dicken erforderlich werden.

Tabelle 1: Mindestdicken von Kornfiltern

Filterart	Mindestdicke D_{\min} bei Einbau	
	im Trockenen	unter Wasser
Einstufen- und Stufenfilter		
$d_{50,F} \leq 30$ mm	15 cm je Stufe	20 cm je Stufe
$d_{50,F} > 30$ mm	30 cm je Stufe	30 cm je Stufe
Mischkornfilter	30 cm	30 cm

5.3 Standard-Zweistufenfilter für Deckwerke an Binnenwasserstraßen

Bei Deckwerken für Ufersicherungen kann die erforderliche Filterstabilität in der Abfolge Boden – Kornfilter – Deckschicht häufig nicht mit einer Filterstufe realisiert werden. In diesem Fall ist der Einbau eines Zweistufenfilters zwischen Deckschicht und Boden sinnvoll. Bild 4 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Deckwerks mit einem Zweistufenfilter.

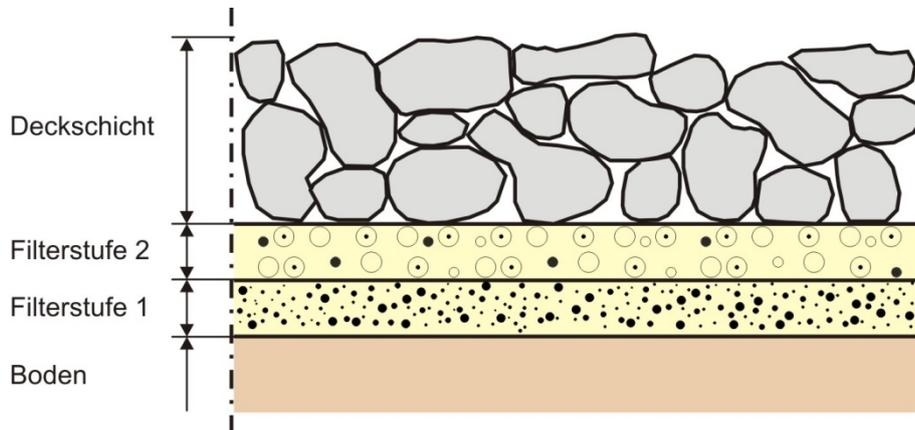


Bild 4: Kornfilter als Zweistufenfilter in einem Deckwerk

Die Regelbauweise für Kornfilter in Deckwerken an Binnenwasserstraßen unter einer Deckschicht aus Schüttsteinen der Klassen CP_{90/250}, LMB_{5/40} oder LMB_{10/60} nach DIN EN 13383 (2002) wird der in Bild 5 dargestellte Standard-Zweistufenfilter verwendet.

Wenn der Boden homogen und sein Kornanteil $d_{15} \leq 0,06$ mm ist, sind keine expliziten Filternachweise erforderlich. Die gesamte Dicke des Standard-Zweistufenfilters ist für die Deckwerksbemessung nach GBB (2010) statisch anrechenbar.

Bei einem Kornanteil des Bodens $d_{15} > 0,06$ mm ist der Standard-Zweistufenfilter dann anwendbar, wenn die Durchlässigkeit der ersten Filterstufe größer als die Durchlässigkeit des Bodens ist. Die erste Filterstufe ist jedoch für die Deckwerksbemessung nach GBB statisch nicht anrechenbar, wenn ihre Durchlässigkeit $k_F \leq 25 k_B$ ist.

Die Körnungslinien der Filterstufen müssen innerhalb der in Bild 5 festgelegten Grenzen verlaufen. Informativ ist zusätzlich der typische Bereich für Wasserbausteine der Klasse LMB_{5/40} dargestellt. Der Standard-Zweistufenfilter hat sich im langjährigen Einsatz bei Böschungs- und Sohlensicherungen bewährt.

Erfüllt der anstehende Boden die oben genannte Forderung nicht bzw. sind andere Steinklassen als CP_{90/250}, LMB_{5/40} oder LMB_{10/60} für die Deckschicht vorgesehen, muss eine Filterbemessung nach Kapitel 7 in Verbindung mit dem MMB (2013) vorgenommen werden.

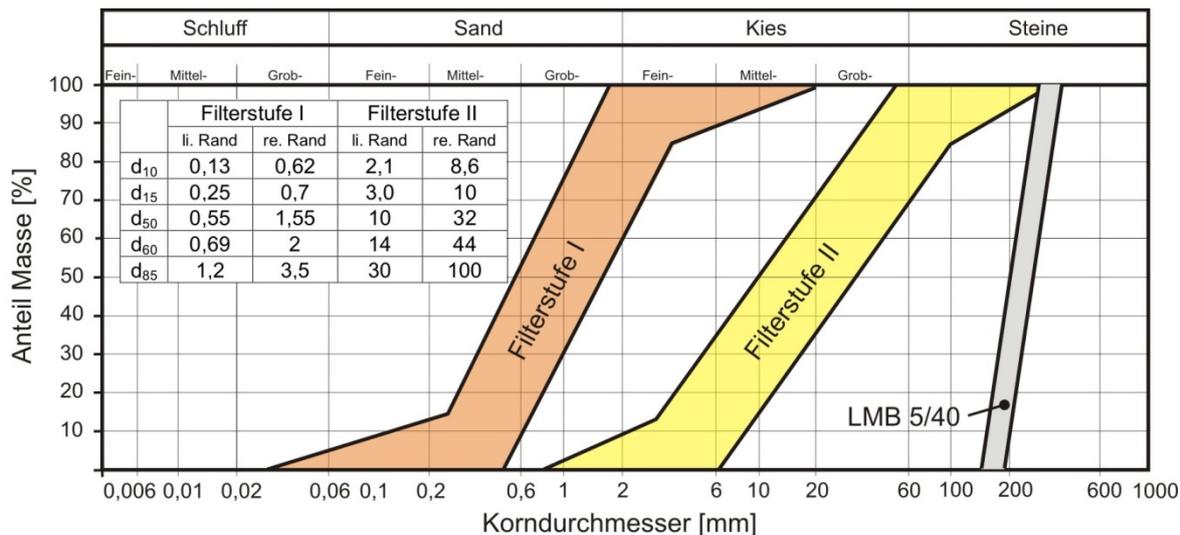


Bild 5: Zulässige Bereiche für Körnungslinien im Standard-Zweistufenfilter

5.4 Filter bei inhomogenen Untergrundverhältnissen

Inhomogene Untergrundverhältnisse liegen bei Wechsellagerung von Böden mit deutlich unterschiedlicher Korngrößenverteilung bzw. Durchlässigkeit vor.

Bei inhomogenen Untergrundverhältnissen in der Kontaktfläche zwischen Untergrund und Filter ist es oft nicht möglich, mit einem Filter sowohl die hydraulische als auch die mechanische Filterwirksamkeit für alle Bodenschichten zu erfüllen. In diesem Fall ist hinsichtlich der Anforderungen an einen Kornfilter folgendes zu beachten:

- Wird eine höher durchlässige Bodenschicht mit einer geringer durchlässigen Filterlage überdeckt, führt dies zu einem Ansteigen des Wasserdrucks im Boden unterhalb des Filters und damit zu einer Verschlechterung der Standsicherheit z. B. einer Böschung.
- Wird eine geringer durchlässige Bodenschicht mit einer zu grobkörnigen Filterlage überdeckt, so kann aufgrund fehlender Filterstabilität eine unerwünschte Erosion des feinkörnigen Bodens eintreten.

Es ist im Einzelfall zu entscheiden, ob entweder ein Anstieg der Sickerlinie oder eine Erosion toleriert werden kann. Falls beides nicht zugelassen werden kann, ist die Filterkörnung lokal an die inhomogenen Untergrundverhältnisse anzupassen.

5.5 Anschlüsse von Deckwerken an Bauwerke

Der Anschluss eines Kornfilters an ein Bauwerk ist so auszubilden, dass der zu schützende Untergrund an keiner Stelle, auch unter Berücksichtigung von Verformungen des Anschlusses (Fugenbildung), freiliegt. Der Filter ist bis in Bauwerksnischen und Spundwandtäler zu führen. Wegen möglicher höherer Strömungsgradienten unmittelbar an Bauwerken und eventuell vorhandener Einbauschwierigkeiten am Bauwerk sollte der Filter in diesen Bereichen entsprechend Bild 6 ausgeführt werden.

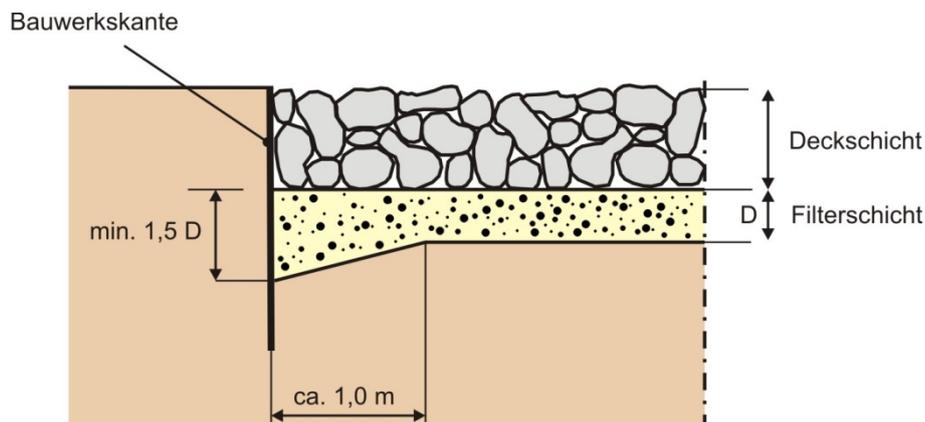


Bild 6: Anschluss eines Deckwerks mit Kornfilter an eine vertikale Bauwerkskante

6 Materialanforderungen

6.1 Physikalische Materialanforderungen

Die physikalischen Materialanforderungen an die Gesteinskörnungen, aus denen der Kornfilter hergestellt wird, sind in den TL Gestein (2007) enthalten. Für die Anwendung von Gesteinskörnungen im Wasserbau werden die Kategorien nach TL Gestein (2007) entsprechend Tabelle 2 empfohlen.

Tabelle 2: Anforderungen an Gesteinskörnungen für Kornfilter nach TL Gestein (2007)

Anforderung	Kategorie
Widerstand gegen Zertrümmerung	LA ₂₅ oder LA ₃₀ gesteinsabhängig nach Anhang A der TL Gestein
Wasseraufnahme	W _{cm} 0,5 Anm.: bei dauerhaft unter Wasser liegendem Kornfilter keine Anforderung
Widerstand gegen Frostbeanspruchung falls W _{cm} 0,5 nicht eingehalten	F2 Anm.: bei dauerhaft unter Wasser liegendem Kornfilter keine Anforderung
Anteil gebrochener Flächen für gebrochene Gesteine	C _{90/3}
Gehalt an groben organischen Verunreinigungen	m _{LPC} 0,1

Das erforderliche Körnungsband ergibt sich aus der Filterbemessung und ist ohne Toleranzen einzuhalten. Es sind auch die Materialanforderungen der ZTV-W LB 210 (2006) zu beachten. Demnach soll das Material eine Rohdichte auf ofentrockener Basis nach DIN EN 1097-6 (2013) $\rho_{rd} \geq 2,3 \text{ t/m}^3$ besitzen, gleichmäßig abgestuft sein und es muss den Anforderungen der DIN EN 13242 genügen. Auf Böschungen mit Neigungen von 1:2,5 oder steiler ist gebrochenes Material zu verwenden.

Die genannten Materialkennwerte müssen in der Leistungserklärung des Herstellers zusammen mit der CE-Kennzeichnung aufgeführt sein (Warenbegleitpapiere mit CE-Kennzeichnung, siehe Kapitel 8.3).

6.2 Umwelttechnische Materialanforderungen

Die verwendeten Materialien müssen umweltverträglich sein. Aufgrund fehlender gesetzlicher Grundlagen sind jedoch derzeit keine allgemein gültigen Regelungen zur Umweltverträglichkeit von mineralischen Stoffen als Filtermaterial festlegbar.

Die Verwendung von Eisenhütten- und Metallhüttenschlacken für Kornfilter in Deckwerken ist im Bereich der Bundeswasserstraßen gegenwärtig ausgeschlossen (BMVBS, 2010).

Ist an Wasserstraßen die Verwendung anderer, industriell hergestellter Gesteinskörnungen oder rezyklierter Gesteinskörnungen für den Kornfilter geplant, so wird die Bewertung des Umweltrisikos durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde empfohlen.

7 Filtertechnische Nachweise

7.1 Allgemeines

Folgende Anforderungen sind für die gewählte Filterkörnung nachzuweisen:

- mechanische Filterwirksamkeit,
- hydraulische Filterwirksamkeit und
- Suffosionssicherheit.

Filtertechnische Nachweise sind an repräsentativen Körnungslinien der Bodenschichten durchzuführen. Gleichartige Körnungslinien können vereinfachend zu Körnungsbändern zusammengefasst werden, deren Ränder die Grundlage der Filterbemessung sind.

7.2 Mechanische Filterwirksamkeit

7.2.1 Grundsätze

Unter mechanischer Filterwirksamkeit wird die Fähigkeit eines Kornfilters verstanden, den zu schützenden Boden in ausreichendem Umfang zurückzuhalten (Bodenrückhaltevermögen).

Die mechanische Filterwirksamkeit ist auf der sicheren Seite liegend für die feinkörnige (linke) Grenze des Körnungsbandes des zu schützenden Bodens nachzuweisen. Für detaillierte Betrachtungen können den Nachweisen einzelne Körnungslinien zugrunde gelegt werden. Sind im Körnungsband sowohl kohäsive als auch nicht kohäsive Böden enthalten, so erfolgt die Bemessung auf die feinkörnigste der nicht

kohäsiven Körnungslinien. Die Körnungslinien der kohäsiven Böden bleiben bei der Bemessung unberücksichtigt.

7.2.2 Nicht kohäsive Böden

Die Filterbemessung kann bei nicht kohäsiven Böden nach dem Kriterium von Cistin und Ziems oder nach Terzaghi unter Berücksichtigung der jeweiligen Anwendungsgrenzen erfolgen. Ein Beispiel hierzu ist in Anlage 2 enthalten. Werden die Anwendungsgrenzen nicht eingehalten, ist das Verfahren nach Lafleur zu verwenden.

Der Nachweis der Filterstabilität des Kornfilters gegen grobe Körnungen (z. B. Wasserbausteine) kann mit dem Verfahren von Myogahara erfolgen.

Die Nachweisverfahren sind im MMB (2013), Kap. 4 beschrieben.

7.2.3 Kohäsive Böden

Homogene, kohäsive Böden sind in den meisten Fällen aufgrund der Fixierung der Bodenpartikel durch die Kohäsionskräfte nicht empfindlich gegen Kontakterosion.

Hinweise zur Notwendigkeit des Nachweises gegen Kontakterosion und ggf. die Nachweisführung sind im MMB (2013), Kap. 5 enthalten.

7.2.4 Suffosive Böden

Wird ein suffosiver Boden durch einen Filter geschützt, der auf den Rückhalt des gesamten Kornspektrums ausgelegt ist, können sich bei Durchströmung ausgetragene Feinanteile dieses Bodens vor dem Kornfilter anlagern (Kolmation). Durch die Kolmation wird die Durchlässigkeit des Kornfilters reduziert und es kann zu einem Ansteigen des Wasserdrucks vor dem Filter kommen. Ein Kornfilter sollte daher nicht auf den Rückhalt der gesamten infolge Suffosion umlagerbaren Feinanteile bemessen werden.

Die Bemessung eines Kornfilters auf einen suffosiven Boden ist nach MMB (2013), Kap. 4.3.4 in Anlehnung an das Verfahren nach Lafleur durchzuführen.

7.3 Hydraulische Filterwirksamkeit

Unter hydraulischer Filterwirksamkeit wird die Fähigkeit eines Kornfilters verstanden, das ihm zuströmende Wasser in ausreichendem Maß abzuführen. Dafür muss die Wasserdurchlässigkeit des Filters so groß sein, dass innerhalb des Filters kein wesentlicher Potenzialabbau stattfindet.

Die hydraulische Filterwirksamkeit ist für die grobkörnige (rechte) Grenze des Körnungsbandes des Bodens nachzuweisen. Für genauere Betrachtungen können einzelne Körnungslinien zugrunde gelegt werden.

Die hydraulische Filterwirksamkeit eines Filters gegenüber dem abzufilternden Boden ist gewährleistet bei

- $k_F > 25 k_B$ für nicht kohäsive Böden und
- $k_F \geq 10^{-5}$ m/s für kohäsive Böden.

Die Wasserdurchlässigkeit nicht kohäsiver Böden kann anhand ihrer Korngrößenverteilung nach den in Tabelle 3 genannten Verfahren abgeschätzt werden. Weitere Verfahren zur Ermittlung der Durchlässigkeit anhand von Korngrößenverteilungen sind in Anlage 1 aufgeführt.

Tabelle 3: Verfahren zur Abschätzung der Durchlässigkeit von Sanden

Autor	Formel	Anwendungsbereiche
Hazen (1893)	$k = 0,0116 \cdot d_{10}^2$ d_{10} in mm, k in m/s	$C_U < 5$ $0,1 \text{ mm} < d_{10} < 3 \text{ mm}$
Beyer (1964)	$k = c(C_U) \cdot d_{10}^2$ $c(C_U)$ s. Anlage 1 d_{10} in mm, k in m/s	$2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s} < k < 4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ $0,06 \text{ mm} < d_{10} < 0,6 \text{ mm}$

7.4 Stufenfilter

Ein Stufenfilter ist erforderlich, wenn die mechanische Filterwirksamkeit zwischen dem Boden und einer Deckschicht nicht mit einer Filterstufe erreichbar ist.

Ist das Körnungsband des zu schützenden Bodens so breit, dass die mechanische und die hydraulische Filterwirksamkeit nicht durch einen einlagigen Filteraufbau eingehalten werden können, ist ebenfalls ein mehrlagiger Filteraufbau sinnvoll. Hierbei wird die mechanische Filterwirksamkeit durch die 1. Filterstufe und die hydraulische Filterwirksamkeit durch die 2. Filterstufe erzielt (s. Anlage 2).

Die Wasserdurchlässigkeit eines mehrstufigen Filtersystems muss vom Baugrund ausgehend mit jeder Stufe zunehmen.

7.5 Suffosionssicherheit

Damit ein Kornfilter dauerhaft seine Funktion erfüllt, darf seine Korngrößenverteilung auch bei Durchströmung keiner Veränderung unterliegen, d. h., es darf kein Austrag feiner Kornfraktionen aus einem Kornfilter stattfinden. Um dies sicherzustellen, muss der Kornfilter suffosionssicher sein. Die Suffosionssicherheit ist nach MMB (2013), Kap. 4.2 nachzuweisen.

7.6 Filtertechnische Anforderungen bei Deckwerken

Zur Überprüfung der mechanischen Filterstabilität zwischen einer Deckschicht aus Wasserbausteinen und der darunter vorgesehenen Kornfilterlage kann das Verfahren nach Myogahara (MMB 2013) Kap. 4.3, verwendet werden. Dabei können die in Bild 7 dargestellten Körnungsbänder der Wasserbaustein-Klassen CP_{90/250}, LMB_{5/40} und LMB_{10/60} herangezogen werden, die auf der Grundlage der „Technischen Lieferbedingungen für Wasserbausteine“ (TLW, 2003) bzw. DIN EN 13383 (2002) ermittelt wurden. Für den Nachweis ist dabei auf der sicheren Seite liegend der rechte Rand des Körnungsbandes der Wasserbausteine maßgebend.

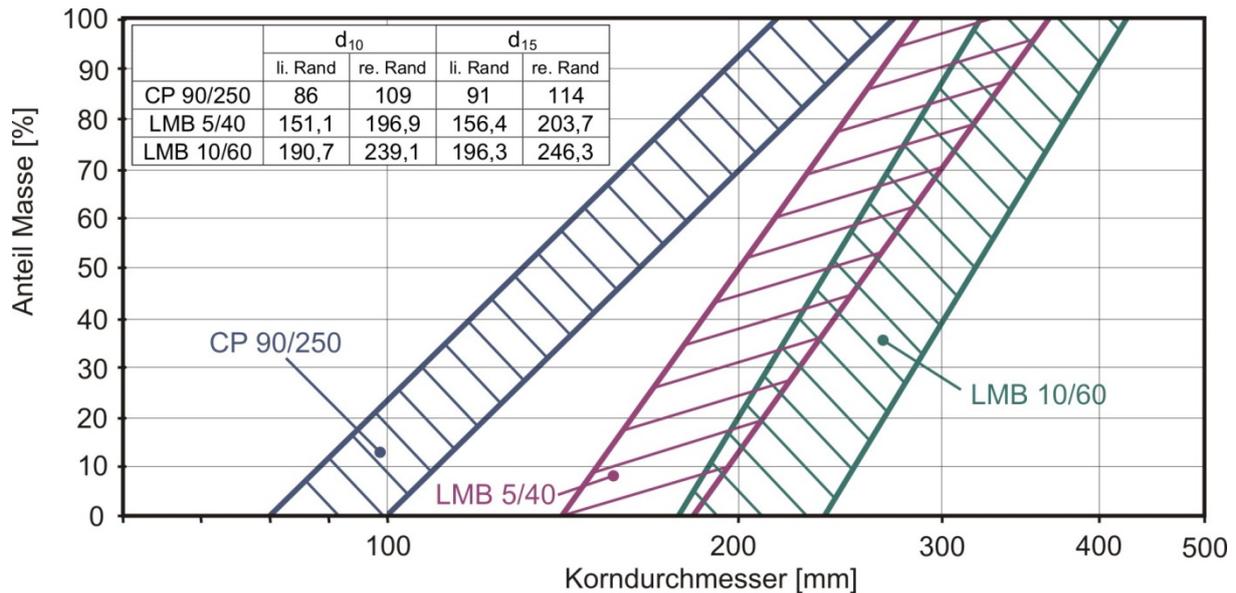


Bild 7: Körnungsbänder von Wasserbausteinen der Klassen CP_{90/250}, LMB_{5/40} und LMB_{10/60}

7.7 Bemessung nach zusätzlichen Untersuchungen

Im Einzelfall können Filterkörnungen, die von einer Filterbemessung nach Ziffer 7.2 und 7.3 abweichen, durch spezielle Untersuchungen, wie z. B. Modellversuche, ermittelt werden. Modellversuche zur Ermittlung von Filterkörnungen sind unter Berücksichtigung der in situ auftretenden maximalen hydraulischen Beanspruchungen durchzuführen. Die so ermittelten Filterkörnungen gelten nur für Anwendungen, die den Randbedingungen der Versuche entsprechen.

7.8 Ermittlung des Körnungsbandes eines Filters

Das Körnungsband eines Filters, d. h. die Bandbreite möglicher Körnungslinien, ergibt sich aus der filtertechnischen Bemessung auf das Körnungsband des zu schützenden Bodens. Dieses wird im Allgemeinen aus der Umhüllenden aller repräsentativen Körnungslinien des abzufilternden Bodens konstruiert.

Der *linke* Rand des Körnungsbandes des zu schützenden Bodens ist für den Nachweis der mechanischen Filterstabilität maßgebend. Entsprechende Nachweisverfahren sind in Kapitel 7.2 aufgeführt. Die hiermit ermittelte Körnungslinie ist gleichzeitig der *rechte* Rand des Körnungsbandes der möglichen Filterkörnungslinien. Alle Filterkörnungslinien müssen feinkörniger als diese Grenze sein.

Der *rechte* Rand des Körnungsbandes des zu schützenden Bodens ist für den Nachweis der hydraulischen Filterstabilität maßgebend. Die entsprechenden Bedingungen sind in Kapitel 7.3 aufgeführt. Die ermittelte Körnungslinie ist gleichzeitig der *linke* Rand des Körnungsbandes der möglichen Filterkörnungslinien. Die Filterkörnungslinien müssen grobkörniger als diese Grenze sein.

Körnungslinien, die innerhalb dieser Grenzen liegen, sind als Filterkörnung entsprechend der genannten Kriterien geeignet.

Nicht immer kann eine Filterstufe allein sowohl die mechanische als auch die hydraulische Filterwirksamkeit erfüllen. Dies kann z. B. der Fall sein, wenn eine Bodenschicht ein breites Körnungsband aufweist. Dabei ist es möglich, dass ein auf die mechanische Filterwirksamkeit gegen den linken Rand des Körnungsbandes bemessener Filter nicht den Anforderungen an die hydraulische Filterwirksamkeit gegen den rechten Rand des Körnungsbandes genügt. Welcher Filterwirksamkeit (Funktion) hierbei der Vorrang zu geben ist, ist im Einzelfall unter Berücksichtigung folgender Kriterien zu beurteilen:

- Größe und Schädlichkeit möglicher Porenwasserüberdrücke bei fehlender hydraulischer Filterwirksamkeit (Erdstatik),
- Menge und Schädlichkeit eines möglichen Bodenaustrags bei fehlender mechanischer Filterwirksamkeit und
- Anteile der groben und feinen Körnungslinien im Körnungsband des Bodens.

Kann im Anwendungsfall keine Einschränkung der hydraulischen oder der mechanischen Filterwirksamkeit hingenommen werden, sind ggf. kleinere Abschnitte mit engeren Körnungsbändern zu definieren, für die eine jeweils separate Filterbemessung durchzuführen ist. Alternativ ist ein mehrstufiger Filteraufbau zu prüfen, bei dem die hydraulische Filterwirksamkeit (Verhinderung von Porenwasserüberdrücken) durch eine gröbere Filterstufe erreicht wird.

Anlage 2 enthält ein Beispiel zur Ermittlung des Körnungsbandes eines Kornfilters.

8 Hinweise zur Ausschreibung und Bauausführung

8.1 Verdingungsunterlagen

Die Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen - Wasserbau (ZTV-W) für Böschungs- und Sohlensicherungen (Leistungsbereich 210) (ZTV-W LB 210, 2006) und für Erdarbeiten (Leistungsbereich 205) (ZTV-W LB 205, 1992) beinhalten Regeln für den Einbau von Kornfiltern und sollten daher Vertragsbestandteil werden.

Für das Körnungsband des Kornfilters sind folgende Parameter vorzugeben, die ohne Toleranzen einzuhalten sind:

- für die linke Grenze die Körnungsanteile d_{10} und d_{100} , dazwischen linearer Verlauf in halblogarithmischer Darstellung und $d_5 > 0,06$ mm und
- für die rechte Grenze die Körnungsanteile d_0 und d_{85} , dazwischen linearer Verlauf in halblogarithmischer Darstellung, zur Begrenzung des Überkorns $d_{100} \leq 5 \cdot d_{85}$.

Für den Standard-Zweistufenfilter gelten die Grenzen der Korngrößenverteilung aus Bild 5.

Sind Bauwerksanschlüsse auszuführen, so sind sie in der Verdingungsunterlage detailliert zu erläutern und ggf. zusätzlich zeichnerisch darzustellen.

In der Verdingungsunterlage ist zu fordern, dass der Bieter bei Unterwassereinbau des Kornfilters das vorgesehene Einbauverfahren hinsichtlich

- Planungsvorbereitung,
- Beschreibung der Einbaugeräte und des Einbauverfahrens und

- vorgesehene Kontrollmethoden angibt.

Die Qualitätssicherung für Kornfilter erfolgt nach ZTV-W LB 210 (2006). Mit dem Angebot ist die Leistungserklärung des Herstellers abzugeben.

8.2 Bauausführung

8.2.1 Einbau im Trockenen

Bei Mischkornfiltern darf durch den Einbauvorgang keine Entmischung eintreten.

Die Filter sind lagenweise mit Lagenstärken von max. 30 cm einzubauen und ggf. zu verdichten.

Besondere Sorgfalt beim Filtereinbau ist im Anschlussbereich von Bauwerken erforderlich, in denen der Filter nur schlecht verdichtet werden kann (z. B. unter überstehenden Bauteilen). Hier können sich infolge von Sackungen Fugen ausbilden, die eine konzentrierte Durchströmung begünstigen.

Filter bei innen liegenden Dräns sind wie das Dammmaterial in Anlehnung an die ZTV W LB 205 (1992) mit einem Verdichtungsgrad $D_{Pr} = 100\%$ zu verdichten. Über die Verdichtung eines außen liegenden Dräns ist anhand der Anforderungen an den Filter (statische Wirksamkeit, Begehbarkeit) zu entscheiden.

8.2.2 Einbau unter Wasser

Ungleichförmiges Filtermaterial ($C_U > 5$) neigt beim Fall durch das Wasser zur Entmischung. Es entsteht dann ein sogenannter "umgekehrter Filter", der in der Regel an den Übergängen zu den benachbarten Schichten nicht die geforderten Korngrößen aufweist. In der Praxis ist daher für den Einbau von Kornfiltern unter Wasser durch Verklappen nur die Anwendung von gleichförmigen Korngemischen ($C_U \leq 5$) zulässig.

Ungleichförmiges Filtermaterial darf unter Wasser nur dann eingebaut werden, wenn durch Versuche nachgewiesen wird, dass eine Kornentmischung durch ein geeignetes Einbauverfahren vermieden wird.

Das Einbauverfahren muss einen vollflächigen Filtereinbau unter Einhaltung der geforderten Mindestdicken gewährleisten.

Rückströmungen und Wellen des laufenden Schiffsverkehrs dürfen den freiliegenden Kornfilter nicht beschädigen. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit ist daher im Baustellenbereich auf $v_s = 6$ km/h zu beschränken.

Für das Einbringen eines Kornfilters mittels Verklappen sind anwendungsbezogene Eignungsprüfungen erforderlich (ZTV-W LB 210, 2006).

Beim Verklappen eines Kornfilters in strömendem Wasser ist mit erheblicher horizontaler Verdriftung des Materials bereits bei geringen Fließgeschwindigkeiten zu rechnen. Daher sollte ein Kornfilter in Fließgewässern im Regelfall durch Ablegen mit der Baggerschaufel eingebaut werden. Zudem ist sicherzustellen, dass das Filtermaterial gegenüber der Strömung bis zur Abdeckung mit einer Deckschicht ausreichend lagestabil ist.

8.3 Bestandsunterlagen

Im Hinblick auf spätere Unterhaltungsarbeiten oder Instandsetzungen sind von der tatsächlichen Ausführung Bestandsunterlagen zu fertigen, aus denen alle wesentlichen Einzelheiten hervorgehen. Dazu gehören:

1. Beschaffenheit des Untergrundes nach DIN 4020 (2010) und DIN 18196 (2011),
2. Filter- und ggf. Deckwerks- oder Dränaufbau,
3. Filterbemessung,
4. Art des Filtermaterials und Korngrößenverteilung der Filterstufe(n),
5. Warenbegleitpapiere mit CE-Kennzeichnung,
6. Bauwerksanschlüsse,
7. Stationierung des Einbaubereiches und
8. Besonderheiten beim Einbau (z. B. evtl. Mängel bei den Kontrollprüfungen oder Vorbehalte bei der Abnahme, Taucherberichte).

Literatur

Beyer, W. (1964): Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve. - WWT 14: S. 165-168, Berlin

Hazen, A. (1892): Some physical properties of sands and gravels with special reference to their use in filtration. 24th Annual Report Massachusetts State Board of Health: Pub.Doc. No.34, S. 539-556

BMVBS (2010): Erlass „Einsatz von industriell hergestellten Wasserbausteinen an Bundeswasserstraßen“, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung vom 14.09.2010, Bonn

Odenwald, B. (2011): Numerische Berechnung der Dammdurchströmung; BAWMitteilungen Nr. 94, S. 59-76, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Bezugsregelwerke

DIN EN 1097-6 (2013): Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme, Beuth Verlag, Berlin

DIN EN 1997-2 (2010): Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds
zusammen mit:

DIN 4020, Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-2 und

DIN EN 1997-2/NA Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds

in: Handbuch Eurocode 7, Geotechnische Bemessung, Band 2, Erkundung und Untersuchung, Beuth Verlag, Berlin

DIN 4095 (1990): Baugrund, Dränung zum Schutz von baulichen Anlagen – Planung und Ausführung, Beuth Verlag, Berlin

DIN 18196 (2011): Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke, Beuth Verlag, Berlin

DIN EN 13242 (2008): Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Straßenbau, Beuth Verlag, Berlin

DIN EN 13383 (2002): Wasserbausteine, Teil 1: Anforderungen, Beuth Verlag, Berlin

GBB (2010): Grundlagen der Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Bundeswasserstraßen (GBB), Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

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

MMB (2013): Merkblatt Materialtransport im Boden, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

MSD (2011): Merkblatt Strandsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

TLW (2003): Technische Lieferbedingungen für Wasserbausteine (TLW), Drucksachenstelle bei der WSD Mitte, Am Waterlooplatz 9, 30169 Hannover

TL Gestein (2007): Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau, TL Gestein-StB 04, Fassung 2007, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln

ZTV-W LB 205 (1992): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen Wasserbau (ZTV-W), Erdbau, Leistungsbereich 205; Drucksachenstelle bei der WSD Mitte, Am Waterlooplatz 9, 30169 Hannover

ZTV-W LB 210 (2006): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen Wasserbau (ZTV-W), für Böschungs- und Sohlensicherungen, Leistungsbereich 210; Drucksachenstelle bei der WSD Mitte, Am Waterlooplatz 9, 30169 Hannover

Anlage 1: Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes k aus der Korngrößenverteilung

Tabelle A1.1: Verfahren zur Ermittlung der Durchlässigkeit k in m/s aus der Korngrößenverteilung (d in mm)

Verfahren	Formel	geeignete Bodenart	Parameter und Grenzen
Beyer (1964)	$k = c(C_U) \cdot (d_{10})^2$	Sande und Kiese	$C_U < 20$; $0,06 \text{ mm} < d_{10} < 0,6 \text{ mm}$ $2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s} < k < 4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$
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)	$k = \frac{\chi_{10}(C_U)}{1000} \cdot d_{10}^2$		$5 < C_U \leq 17$
	$k = \frac{\chi_{25}(C_U)}{1000} \cdot d_{25}^2$	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 A1.2: Beiwert c nach Beyer

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 A1.3: Abhängigkeit des empirischen Beiwertes c_1 nach Zieschang von der Lockergesteinsart

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 $d_{0,01} < 2 \%$	≥ 5	$d_{10} = 0,1 - 0,6 \text{ mm}$	0,0093
schwach tonig schluffiger Sand mit $d_{0,01} < 3 \%$	≥ 5	$d_{10} = 0,08 - 0,6 \text{ mm}$	0,0070
tonig schluffiger Sand mit $d_{0,01} < 4 \%$	≥ 5	$d_{10} = 0,06 - 0,6 \text{ mm}$	0,0046

Tabelle A1 4: Abhängigkeit des empirischen Beiwerts c_2 nach Zieschang vom Glimmergehalt

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

Tabelle A1.5: Korrekturfaktoren $\chi_{10}(c_u)$ bzw. $\chi_{25}(c_u)$ nach Seiler für $5 \leq C_U \leq 100$

	C_U	[Einer]									
	[Zehner]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\chi_{10}(C_U)$	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		
$\chi_{25}(C_U)$									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									

Literaturverzeichnis Anlage 1

BEYER, W. (1964): Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve. - WWT 14: S. 165-168, Berlin

HAZEN, A. (1893): Some physical properties of sands and gravels with special reference to their use in filtration. – 24th Annual Report Massachusetts State Board of Health: Pub.Doc. No.34, S. 539-556

KAUBISCH, M. (1986): Zur indirekten Ermittlung hydrogeologischer Kennwerte von Kippenkomplexen, dargestellt am Beispiel des Braunkohlenbergbaus, Dissertation Bergakademie Freiberg

ODONG, J. (2008): Evaluation of Empirical Formulae for Determination of Hydraulic Conductivity based on Grain-Size Analysis, The Journal of American Science, 4(1), 2008, ISSN 1545-1003

SEILER, K.-P. (1973): Durchlässigkeit, Porosität und Kornverteilung quartärer Kies-Sand-Ablagerungen des bayrischen Alpenvorlandes, Gas- und Wasserfach - Wasser, Abwasser – 114. Jahrgang, Heft 8, S. 353-358

ZIESCHANG, J. (1964): Die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Lockergesteinsgrundwasserleitern. – Zeitschrift für angewandte Geologie, Nr. 10, S. 364-370

Anlage 2: Beispiele zur Ermittlung der Kornverteilung eines Filters

1 Vorbemerkung

In den nachfolgenden Beispielen soll der Berechnungsgang zur Bemessung eines Kornfilters aufgezeigt werden.

Die in den Bildern A2.1 und A2.3 dargestellten Körnungsbänder der Böden 1 und 2 repräsentieren dabei an ihren Rändern die jeweils fein- und grobkörnigsten Körnungslinien einer Bodenschicht. Die Ränder stehen demnach **nicht** für eine graphisch konstruierte Umhüllende aller innerhalb der Bodenschicht ermittelten Körnungslinien.

In der Regel ist es ausreichend, die nachfolgenden Bemessungsschritte für den linken und rechten Rand eines Körnungsbandes zu führen. Es wird jedoch empfohlen, auch einzelne, innerhalb des Körnungsbandes liegende Körnungslinien zu überprüfen und nachzuweisen, falls sie in ihrer Form deutlich von den übrigen Körnungslinien der Bodenschicht abweichen.

2 Bemessungsbeispiel für Boden 1

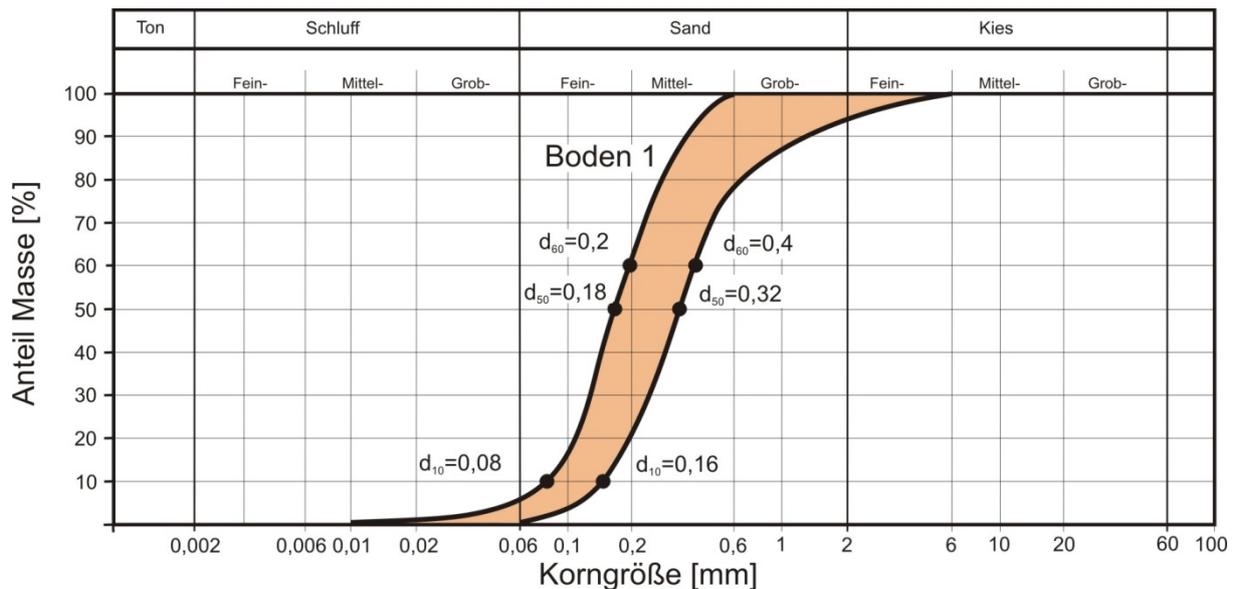


Bild A2.1: Körnungsbänder mit charakteristischen Körnungslinien für Boden 1

Bei dem dargestellten Körnungsbänder für Boden 1 handelt es sich am linken Rand um einen schwach schluffigen Fein- bis Mittelsand (Bodengruppe SU nach DIN 18196).

Die Körnungslinie am rechten Rand steht für einen enggestuften grobsandigen Mittelsand, der nach DIN 18196 der Bodengruppe SE zuzuordnen ist.

Schritt 1: Prüfung auf kohäsiven bzw. nicht kohäsiven Boden gemäß MMB, Abschnitt 2.1

Sofern keine genaueren Laboruntersuchungen vorliegen, erfolgt diese Unterscheidung anhand der Definition im MMB, Abschnitt 2.1 in Anlehnung an die Klassifizierung nach DIN 18196. Boden der Boden- gruppe SU ist i. A. nicht bis gering plastisch (leicht plastisch) und daher nicht kohäsiv. Reine Sande (Bodengruppe SE) sind grundsätzlich nicht kohäsiv.

Für das Beispiel folgt daraus:

linker Rand des Körnungsbandes: Bodengruppe SU nach DIN 18196 → **nicht kohäsiv**
rechter Rand des Körnungsbandes: Bodengruppe SE nach DIN 18196 → **nicht kohäsiv**

Schritt 2: Prüfung auf Suffosionssicherheit des anstehenden Bodens gemäß MMB, Abschnitt 4.2.6

Ermittlung der Ungleichförmigkeit C_U :

linker Rand: $C_U = d_{60,B} / d_{10,B}$
 $= 0,2 / 0,08 = 2,5$ $C_U < 8$ und stetiger Verlauf der Körnungslinie

rechter Rand: $C_U = d_{60,B} / d_{10,B}$
 $= 0,4 / 0,16 = 2,5$ $C_U < 8$ und stetiger Verlauf der Körnungslinie

Bewertung:

Beide Körnungslinien erfüllen das Kriterium für den vereinfachten Nachweis nach Ziem. Demnach sind beide Böden ohne weiteren Nachweis suffosionssicher.

Anm.: Für nicht suffosionssichere Böden erfolgt die Bemessung der mechanischen Filterstabilität eines Kornfilters in Anlehnung an das Verfahren nach Lafleur (MMB, Kap. 4.3.4).

Schritt 3: Bemessung des Filters auf mechanische Filterwirksamkeit (entspricht dem Nachweis gegen Kontakterosion entsprechend MMB, Abschnitt 4.3)

Die Bemessung der mechanischen Filterwirksamkeit erfolgt auf die feinkörnigste Körnungslinie der betrachteten Bodenschicht. Dies ist i. A. der linke Rand des zu bemessenden Körnungsbandes.

Verfahrensauswahl:

Für die maßgebende Körnungslinie am linken Rand ist die Anwendungsgrenze des Verfahrens nach Terzaghi mit max. $C_U < 2$ überschritten, da $C_U = 2,5$. Es kommt daher das Verfahren nach Cistin/Ziems zur Anwendung. In Abhängigkeit von den jeweiligen Anwendungsgrenzen sind auch andere Verfahren zulässig (siehe MMB).

Bemessung:

Erforderliche Eingangsparameter für das Verfahren nach Cistin/Ziems:

- zu bemessender Boden:

aus Bild A2.1: $d_{10,B} = 0,08 \text{ mm}$
 $d_{60,B} = 0,2 \text{ mm}$
 $C_{U,B} = d_{60,B} / d_{10,B} = 0,2 \text{ mm} / 0,08 \text{ mm} = 2,5$
 $d_{50,B} = 0,18 \text{ mm}$

- zu ermittelnder Filter:

gewählt: $C_{U,F} \approx 2,5$
Der Filter soll eine ähnliche Ungleichförmigkeit wie die des Bodens aufweisen.

Berechnungsgang:

- Aus Bild 7 in MMB Abschnitt 4.3.3.3 kann mit den Werten für $C_{U,B} = 2,5$ und $C_{U,F} = 2,5$ der Wert von $A_{50,zul} = 12$ für das zulässige Abstandsverhältnis zwischen Boden und Filter abgelesen werden (Zwischenwerte dürfen interpoliert werden).
- Mit $A_{50,zul}$ und dem bekannten Wert für $d_{50,B}$ lässt sich anschließend $d_{50,F}$ durch Umformen der Gleichung $A_{50,zul} = d_{50,F} / d_{50,B}$ zu $d_{50,F} = A_{50,zul} \cdot d_{50,B} = 12 \cdot 0,18 = 2,2 \text{ mm}$ ermitteln.
- $d_{60,F}$ ist so zu wählen, dass die Bedingung $C_{U,F} \approx 2,5$ erfüllt wird (s.o.), für das Beispiel wird $d_{60,F} = 2,7 \text{ mm}$ gewählt,
- durch Umformung der Gleichung für $C_{U,F} = d_{60,F} / d_{10,F}$ ergibt sich somit für $d_{10,F} = d_{60,F} / C_{U,F} = 2,7 / 2,5 = 1,08 \text{ mm}$ (gewählt $d_{10,F} = 1,1 \text{ mm}$),
- mit $d_{10,F} = d_{10,R} = 1,1 \text{ mm}$,
 $d_{60,F} = d_{60,R} = 2,7 \text{ mm}$ und
 $d_{50,F} = d_{50,R} = 2,2 \text{ mm}$

kann der **rechte** Rand des Körnungsbandes aller möglichen Filterkörnungslinien gezeichnet werden (s. Bild A2 2).

Schritt 4: Bemessung des Filters auf hydraulische Filterwirksamkeit (MAK, Abschnitt 7.3)

Die Bemessung der hydraulischen Filterwirksamkeit erfolgt auf die grobkörnigste Körnungslinie des betrachteten Homogenbereichs. Dies ist i. A. der **rechte** Rand des zu bemessenden Körnungsbandes.

Bemessung:

Erforderliche Eingangsparameter: Durchlässigkeit (k-Wert) des anstehenden Bodens (k_B)

Der k-Wert des Bodens kann entweder direkt über Laborversuche oder analytisch über empirische Berechnungsformeln unter Wahrung spezifischer Geltungsbereiche (meist abhängig von C_U und der Körnungslinie) anhand seiner Körnungslinie abgeschätzt werden (MAK, Anlage 1). Im Beispiel werden analytische Verfahren verwendet.

Ermittlung von C_U zur Verfahrensauswahl:

$$d_{10,B} = 0,16 \text{ mm}$$

$$d_{60,B} = 0,4 \text{ mm}$$

$$C_{U,B} = d_{60,B} / d_{10,B} = 0,4 \text{ mm} / 0,16 \text{ mm} = 2,5$$

Beide Bedingungen zur Anwendung des Verfahren nach Hazen ($C_U < 5$ und $0,1 < d_{10} < 3 \text{ mm}$) werden eingehalten. Damit errechnet sich der k-Wert zu:

Berechnungsgang:

- Aus der Formel nach Hazen für k mit
 $k = 0,0116 \cdot d_{10}^2$ mit
 $d_{10} = d_{10,B} = 0,16 \text{ mm}$
errechnet sich die Durchlässigkeit des anstehenden Bodens k_B zu
 $k_B = 0,0116 \cdot 0,16^2 [\text{mm}] = 3,0 \cdot 10^{-4} \text{ m/sec.}$
(Anm.: Formel ist nicht dimensionsecht!)
- Die erforderliche Durchlässigkeit des Filters ergibt sich aus der Forderung
 $k_F \geq 25 \cdot k_B$ zu
 $\geq 25 \cdot 3,0 \cdot 10^{-4} \text{ m/sec.}$
 $\geq 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/sec.}$

Durch Umformung der Gleichung $k = 0,0116 \cdot d_{10}^2$ errechnet sich
 $d_{10,F} = (k_F / 0,0116)^{0,5} = (7,5 \cdot 10^{-3} / 0,0116)^{0,5} = 0,8 \text{ mm,}$

- mit dem gewählten $C_{U,F} = 2,5$ folgt für $d_{60,F}$
 $d_{60,F} = C_{U,F} \cdot d_{10,F} = 2,5 \cdot 0,8 \text{ mm} = 2,0 \text{ mm,}$
- mit $d_{10,F} = d_{10,L} = 0,8 \text{ mm}$ und
 $d_{60,F} = d_{60,L} = 2,0 \text{ mm}$

kann der **linke** Rand des Körnungsbandes aller möglichen Filterkörnungslinien gezeichnet werden (siehe Bild A2 2)

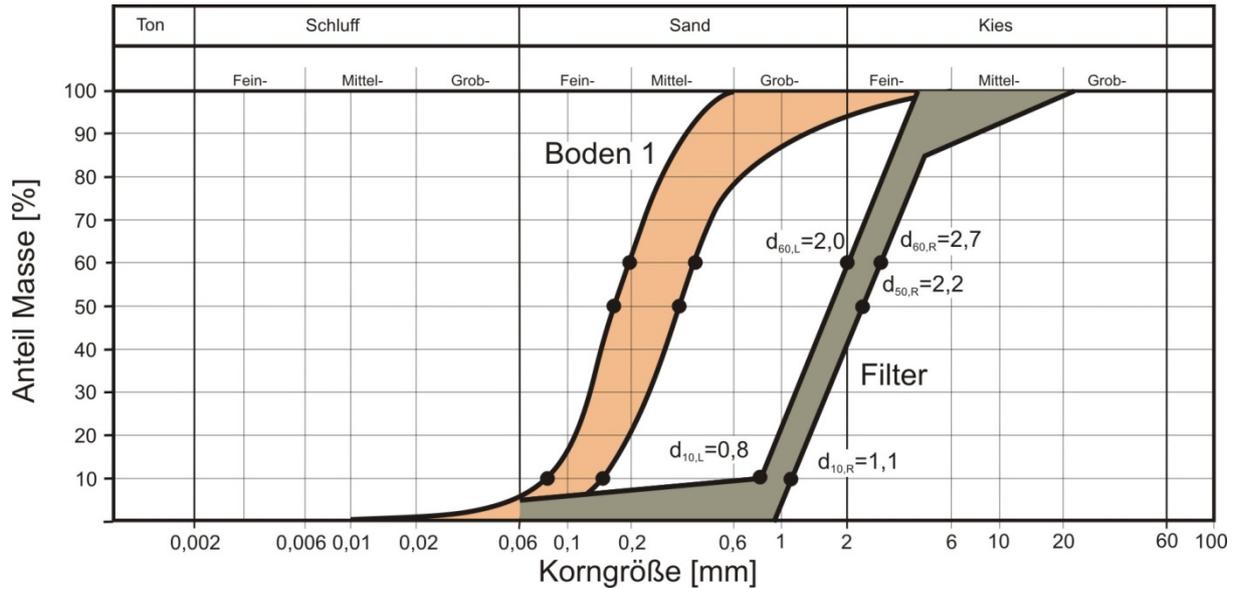


Bild A2.2: Ergebnis der Kornfilterbemessung

Schritt 5: Festlegung der Ausschreibungsparameter

Zur Beschreibung des zulässigen Körnungsbandes für den Kornfilter sind in der Ausschreibung die kennzeichnenden Durchmesser mit ihren jeweiligen prozentualen Massenanteilen anzugeben.

Linke Grenze des Körnungsbandes: $d_5 = 0,06 \text{ mm}$
 $d_{10} = 0,8 \text{ mm}$
 $d_{100} = 4,0 \text{ mm}$

Rechte Grenze des Körnungsbandes: $d_0 = 0,9 \text{ mm}$
 $d_{85} = 4,5 \text{ mm}$
 $d_{100} = 22,5 \text{ mm}$

3 Bemessungsbeispiel für Boden 2

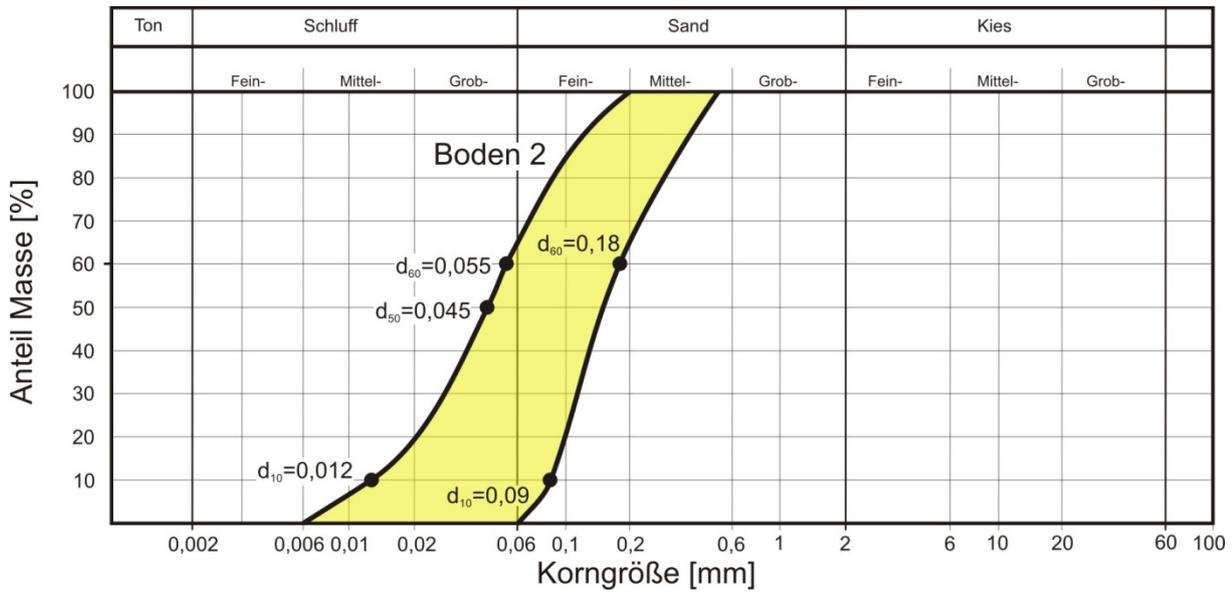


Bild A2.3: Körnungsbandsdiagramm mit charakteristischen Körnungslinien für Boden 2

Bei dem Körnungsbandsdiagramm für Boden 2 handelt es sich am linken Rand um einen sandigen Grobschluff. Laboruntersuchungen zur Plastizität und die geotechnische Bodenansprache ergaben nur geringe plastische Eigenschaften. Nach DIN 18196 handelt es sich um einen leichtplastischen, sandigen Schluff der Bodengruppe UL.

Die Körnungslinie am rechten Rand beschreibt einen enggestuften Fein- bis Mittelsand, der nach DIN 18196 der Bodengruppe SE zuzuordnen ist.

Schritt 1: Prüfung auf kohäsiven bzw. nicht kohäsiven Boden gemäß MMB, Abschnitt 2.1

Sofern keine genaueren Laboruntersuchungen vorliegen, erfolgt diese Unterscheidung anhand der Definition im MMB, Abschnitt 2.1 in Anlehnung an die Klassifizierung nach DIN 18196. Demnach gelten leichtplastische Böden der Bodengruppe UL, TL als nicht kohäsiv. Reine Sande (Bodengruppe SE) sind grundsätzlich nicht kohäsiv.

Für das Beispiel folgt daraus:

- linker Rand des Körnungsbandes: Bodengruppe UL nach DIN 18196 → nicht kohäsiv
- rechter Rand des Körnungsbandes: Bodengruppe SE nach DIN 18196 → nicht kohäsiv

Schritt 2: Prüfung auf Suffosionssicherheit des anstehenden Bodens gemäß MMB, Abschnitt 4.2.6

Ermittlung der Ungleichförmigkeit C_U :

linker Rand: $C_U = d_{60,B} / d_{10,B}$
 $= 0,055 / 0,012 = 4,6 < 8$ und stetiger Verlauf der Körnungslinie

rechter Rand: $C_U = d_{60,B} / d_{10,B}$
 $= 0,18 / 0,09 = 2 < 8$ und stetiger Verlauf der Körnungslinie

Bewertung:

Bei beiden Körnungslinien wird das Kriterium für die Zulässigkeit des vereinfachten Nachweises nach Ziems eingehalten. Beide Böden sind demnach suffosionssicher.

Anm.: Für nicht suffosionssichere Böden erfolgt die Bemessung der mechanischen Filterstabilität eines Kornfilters in Anlehnung an das Verfahren nach Lafleur (MMB, Kap. 4.3.4).

Schritt 3: Bemessung des Filters auf mechanische Filterwirksamkeit (entspricht dem Nachweis gegen Kontakterosion entsprechend MMB, Abschnitt 4.3)

Die Bemessung der mechanischen Filterwirksamkeit erfolgt auf die feinkörnigste Körnungslinie des betrachteten Homogenbereichs. Dies ist i. A. der **linke** Rand des zu bemessenden Körnungsbandes.

Verfahrensauswahl:

Für die Körnungslinie am linken Rand ist die Anwendungsgrenze des Verfahrens nach Terzaghi mit max. $C_U < 2$ überschritten, da $C_U = 4,6$. Es kommt daher das Verfahren nach Cistin/Ziems zur Anwendung. In Abhängigkeit von den jeweiligen Anwendungsgrenzen sind auch andere Verfahren zulässig (siehe MMB).

Bemessung:

Erforderliche Eingangsparameter für das Verfahren nach Cistin/Ziems:

- zu bemessender Boden:

aus Bild A2.3: $d_{10,B} = 0,012$ mm
 $d_{60,B} = 0,055$ mm
 $C_{U,B} = d_{60,B} / d_{10,B} = 0,055 \text{ mm} / 0,012 \text{ mm} = 4,6$
 $d_{50,B} = 0,045$ mm

- zu ermittelnder Filter:

gewählt: $C_{U,F} \approx 4$
Der Filter soll eine ähnliche Ungleichförmigkeit wie die des Bodens aufweisen.

Berechnungsgang:

- Aus Bild 5 in MMB Abschnitt 4.3.3.3 kann mit den Werten für $C_{U,B} = 4,6$ und $C_{U,F} = 4$ der Wert von $A_{50,zul} = 18$ für das zulässige Abstandsverhältnis zwischen Boden und Filter abgelesen werden.
- Mit $A_{50,zul}$ und dem bekannten Wert für $d_{50,B}$ lässt sich anschließend $d_{50,F}$ durch Umformen der Gleichung $A_{50,zul} = d_{50,F} / d_{50,B}$ zu $d_{50,F} = A_{50,zul} \cdot d_{50,B} = 18 \cdot 0,045 = 0,81$ mm ermitteln.
- $d_{60,F}$ ist so zu wählen, dass die Bedingung $C_{U,F} \approx 4$ erfüllt wird (s.o.), für das Beispiel wird $d_{60,F} = 1,1$ mm gewählt,
- durch Umformung der Gleichung für $C_{U,F} = d_{60,F} / d_{10,F}$ ergibt sich somit für $d_{10,F} = d_{60,F} / C_{U,F} = 1,1 / 4 = 0,28$ mm,
- mit $d_{10,F} = d_{10,R} = 0,28$ mm,
 $d_{60,F} = d_{60,R} = 1,1$ mm und
 $d_{50,F} = d_{50,R} = 0,81$ mm

kann der **rechte** Rand des Körnungsbandes aller möglichen Filterkörnungslinien gezeichnet werden (s. Bild A2.4)

Schritt 4: Bemessung des Filters auf hydraulische Filterwirksamkeit (MAK, Abschnitt 7.3)

Die Bemessung der hydraulischen Filterwirksamkeit erfolgt auf die grobkörnigste Körnungslinie des betrachteten Homogenbereichs. Dies ist i. A. der **rechte** Rand des zu bemessenden Körnungsbandes.

Bemessung:

Erforderliche Eingangsparameter: Durchlässigkeit (k-Wert) des anstehenden Bodens (k_B)

Der k-Wert des Bodens kann entweder direkt über Laborversuche oder analytisch über empirische Berechnungsformeln unter Wahrung spezifischer Geltungsbereiche (meist abhängig von C_U und der Körnungslinie) anhand seiner Körnungslinie abgeschätzt werden (MAK, Anlage 1). Im Beispiel werden analytische Verfahren verwendet.

Ermittlung von C_U zur Verfahrensauswahl:

$$d_{10,B} = 0,09 \text{ mm}$$

$$d_{60,B} = 0,18 \text{ mm}$$

$$C_{U,B} = d_{60,B} / d_{10,B} = 0,18 \text{ mm} / 0,09 \text{ mm} = 2$$

Die erste Bedingung zur Anwendung des Verfahren nach Hazen ist eingehalten ($1 < C_U < 5$), jedoch wird die zweite Bedingung ($0,1 < d_{10} < 0,5$ mm) nicht erfüllt. Es wird daher das Verfahren nach Beyer gewählt (gilt für $C_U < 20$ und $0,06 < d_{10} < 0,6$ mm).

Berechnungsgang:

- Aus der Formel nach Beyer für k mit
 $k = c(C_U) \cdot d_{10}^2$ und
 $c(C_U) = 0,010$ (Wert aus, Anlage 1) und
 $d_{10} = d_{10,B} = 0,09$ mm
 errechnet sich die Durchlässigkeit des anstehenden Bodens k_B zu
 $k_B = 0,010 \cdot 0,09^2$ [mm] = $8,1 \cdot 10^{-5}$ m/sec.
- Die erforderliche Durchlässigkeit des Filters ergibt sich aus der Forderung
 $k_F \geq 25 \cdot k_B$ zu
 $\geq 25 \cdot 8,1 \cdot 10^{-5}$ m/sec
 $\geq 2,0 \cdot 10^{-3}$ m/sec.
- Durch Umformung der Gleichung $k = c(C_U) \cdot d_{10}^2$ und mit $c(C_U) = 0,009$ (Wert aus Tabelle 1, Anlage 1 für $C_{U,F} = 4$, siehe Schritt 3) errechnet sich $d_{10,F}$ zu
 $d_{10,F} = (k_F / 0,009)^{0,5} = (2,0 \cdot 10^{-3} / 0,009)^{0,5} = 0,47$ mm,
- mit dem gewählten $C_{U,F} = 4$ folgt für $d_{60,F}$
 $d_{60,F} = C_{U,F} \cdot d_{10,F} = 4 \cdot 0,47$ mm = 1,9 mm,
- mit $d_{10,F} = d_{10,L} = 0,47$ mm und
 $d_{60,F} = d_{60,L} = 1,9$ mm

kann der **linke** Rand des Körnungsbandes aller möglichen Filterkörnungslinien gezeichnet werden (siehe Bild A2.4)

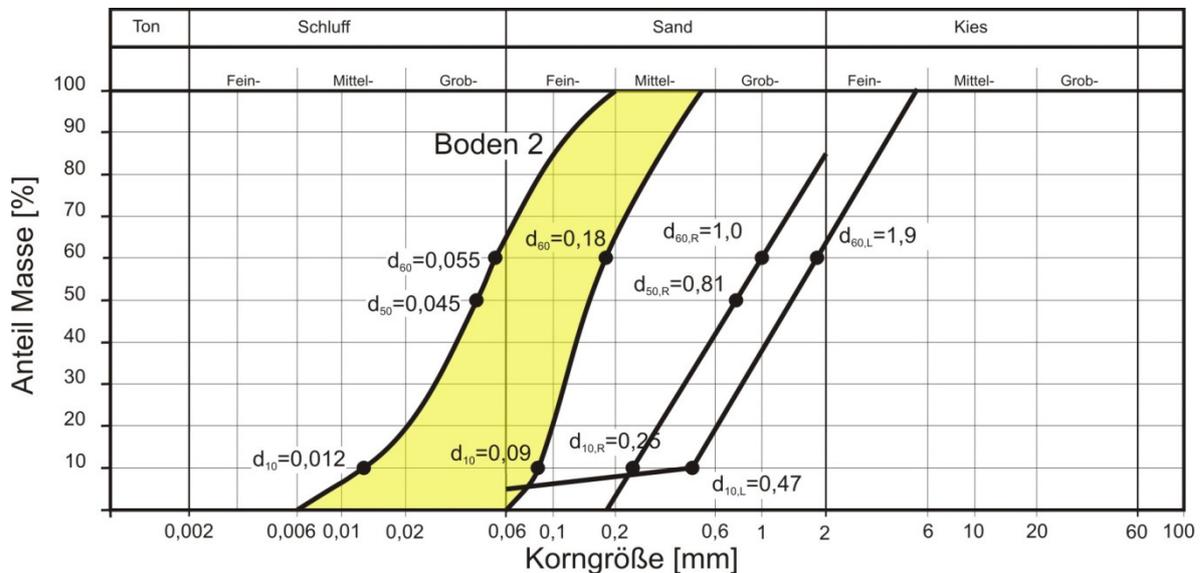


Bild A2.4: Filterkörnungslinien aus erstem Bemessungsversuch (kein sinnvolles Ergebnis, da der rechte Rand feinkörniger ist als der linke Rand)

Ergebnis: Es gibt keine Filterkörnung, die beide Bedingungen erfüllt!

Die maßgebende Filterkörnung zur Wahrung der mechanischen Filterwirksamkeit (Index R) ist feinkörniger als die maßgebende Filterkurve zur Einhaltung der hydraulischen Filterwirksamkeit (Index L). Dies bedeutet, dass ein mechanisch bzw. geometrisch stabiler Filter das hydraulische Kriterium nicht erfüllt. Der Filter wäre nicht durchlässig genug, um das ausfließende Wasser ohne schädliche Strömungskräfte abzuleiten.

Lösungswege:

Durch Vorgabe einer steileren Körnungslinie des Filters (geringere Ungleichförmigkeit $C_{U,F}$) kann in einem zweiten Berechnungsgang versucht werden, eine Filterkörnung zu ermitteln, die beide Bedingungen erfüllt. Sollte auch dies nicht zum Erfolg führen, besteht die Möglichkeit einen Filter aus mehreren Filterlagen zu dimensionieren (Stufenfilter Schritt 5).

Schritt 5: Dimensionierung eines Stufenfilters (hier Zweistufenfilter)

Bei dem geplanten Zwei-Stufen-Filter soll die erste Filterstufe die mechanische Filterstabilität gegenüber dem anstehenden Untergrund gewährleisten. Die hydraulische Filterstabilität der ersten Stufe darf dabei eingeschränkt sein. Schädliche Porenwasserüberdrücke in der ersten Filterstufe sind bei erdstatischen Nachweisen zu berücksichtigen. So darf z. B. das Gewicht dieser Filterlage nicht vollständig als Auflast auf den anstehenden Boden angerechnet werden (z. B. bei der Deckwerksbemessung).

In einem zweiten Berechnungsgang wird dann die zweite Filterlage dimensioniert, die gegenüber der ersten Filterlage sowohl geometrisch als auch hydraulisch filterstabil ist und so die hydraulische Leistungsfähigkeit des Stufenfilters gewährleistet. Das Gewicht dieser Filterstufe darf bei erdstatischen Nachweisen vollständig als Auflast angerechnet werden. Diese Filterlage gewährleistet zudem den Erosionsschutz für den durchströmten Bereich der ersten Filterlage.

Dimensionierung der Filterstufe 1:

Die Dimensionierung erfolgt auf die feinkörnigste Körnungslinie im Körnungsband des anstehenden Bodens. Der Berechnungsgang ist analog der Vorgehensweise in Schritt 3. Da sich an den Eingangsgrößen keine Änderungen ergeben, sind auch die Ergebnisse identisch. Der **rechte** Rand des Körnungsbandes der Filterstufe 1 kann demnach durch folgende Kenngrößen beschrieben werden:

Kenngrößen am **rechten** Rand der Filterstufe 1:

$$d_{10,F1,R} = 0,28 \text{ mm}$$

$$d_{60,F1,R} = 1,1 \text{ mm und } d_{50,F1,R} = 0,81 \text{ mm}$$

$$C_{U,F1,R} = 4$$

Der **linke** Rand der Filterstufe 1 kann theoretisch bis zur grobkörnigsten Körnungslinie im Körnungsband des anstehenden Bodens reichen. Er sollte ungefähr die gleiche Ungleichförmigkeit wie der rechte Rand aufweisen.

Gewählte Kenngrößen am **linken** Rand der Filterstufe 1:

$$\begin{aligned}d_{10,F1,L} &= 0,125 \text{ mm} \\d_{60,F1,L} &= 0,50 \text{ mm und } d_{50,F1,L} = 0,39 \text{ mm} \\C_{U,F1,L} &\approx 4\end{aligned}$$

Dimensionierung der Filterstufe 2:

Die Dimensionierung erfolgt hinsichtlich der **mechanischen Filterwirksamkeit** auf den linken Rand der Filterstufe 1.

Gewählt: $C_{U,F2,R} \approx 4$

- Aus Bild 5 in MMB Abschnitt 4.3.3.3 ergibt sich mit $C_{U,F1,L} \approx 4$ und $C_{U,F2,R} \approx 4$ für das zulässige Abstandsverhältnis zwischen Filterstufe 1 und 2 ein Wert von $A_{50,zul} = 17,5$.
- Mit diesem $A_{50,zul}$ und dem bekannten Wert für $d_{50,F1,L}$ lässt sich anschließend $d_{50,F2,R}$ durch Umformen der Gleichung $A_{50,zul} = d_{50,F2,R} / d_{50,F1,L}$ zu $d_{50,F2,R} = A_{50,zul} \cdot d_{50,F1,L} = 17,5 \cdot 0,39 = 6,8 \text{ mm}$ ermitteln.
- $d_{60,F2,R}$ ist so zu wählen, dass die Bedingung $C_{U,F2,R} \approx 4$ erfüllt wird, für das Beispiel gilt $d_{60,F2,R} \approx 9 \text{ mm}$,
- durch Umformung der Gleichung für $C_{U,F} = d_{60,F2,R} / d_{10,F2,R}$ ergibt sich somit für $d_{10,F2,R} = d_{60,F2,R} / C_{U,F2,R} = 9 / 4 = 2,3 \text{ mm}$,
- mit $d_{10,F2,R} = 2,3 \text{ mm}$,
 $d_{60,F2,R} = 9 \text{ mm}$ und
 $d_{50,F2,R} = 6,8 \text{ mm}$

kann der **rechte** Rand des Körnungsbandes aller möglichen Filterkörnungslinien gezeichnet werden (Bild A2.5).

Die **hydraulische Filterwirksamkeit** ist auf den rechten Rand der Filterstufe 1 ausgerichtet.

k-Wert für den rechten Rand der Filterstufe 1:

$$\begin{aligned}d_{10,F1,R} &= 0,25 \text{ mm} && \rightarrow 0,1 < d_{10} < 0,5 \text{ mm}, \\C_{U,F1,R} &= 4 && \rightarrow C_U < 5,\end{aligned}$$

Die Anwendungsgrenzen für das Verfahren nach Hazen (siehe Anlage 1) sind eingehalten.

- Mit $d_{10} = d_{10,F1,R} = 0,25 \text{ mm}$ ergibt sich nach Hazen:
 $k_{F1,R} = 0,0116 \cdot 0,25^2 [\text{mm}] = 7,3 \cdot 10^{-4} \text{ m/sec}$.
- Die erforderliche Durchlässigkeit der Filterstufe 2 errechnet sich aus der Bedingung $k_{F2} \geq 25 \cdot k_{F1}$ zu
 $k_{F2} \geq 25 \cdot 7,3 \cdot 10^{-4} \text{ m/sec} \geq 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ m/sec}$.

Berechnungsgang:

- Durch Umformung der Gleichung $k = 0,0116 \cdot d_{10}^2$ errechnet sich der entsprechende Durchmesser $d_{10,F2}$ zu
- $d_{10,F2} = (k_{F2} / 0,0116)^{0,5} = (1,8 \cdot 10^{-2} / 0,0116)^{0,5} = 1,24 \text{ mm}$,
mit dem gewählten C_U von $C_{U,F2} = 4$ ergibt sich dann $d_{60,F2}$ zu
 $d_{60,F} = C_{U,F2} \cdot d_{10,F2} = 4 \cdot 1,24 \text{ mm} = 5,0 \text{ mm}$,
- mit $d_{10,F2,L} = 1,24 \text{ mm}$ und
 $d_{60,F2,L} = 5,0 \text{ mm}$

kann der **linke** Rand des Körnungsbandes aller möglichen Filterkörnungslinien gezeichnet werden (Bild A2.5).

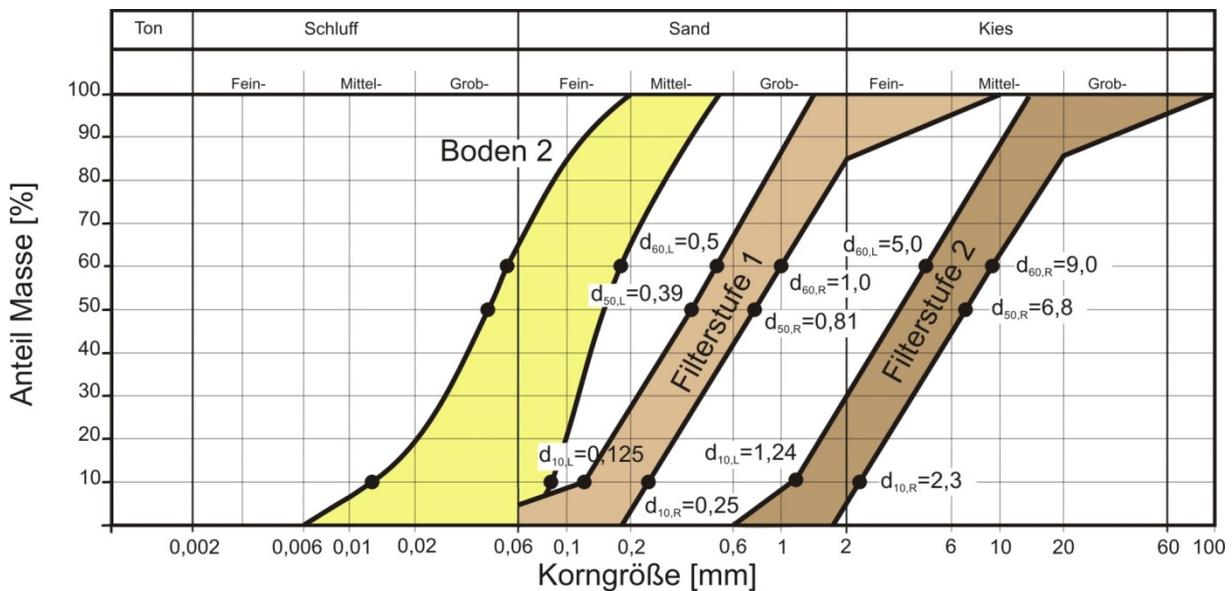


Bild A2.5: Stufenfilter

Schritt 6: Ausschreibungsparameter

Zur Beschreibung des zulässigen Körnungsbandes sind in der Ausschreibung für jede Filterstufe die kennzeichnenden Durchmesser mit ihren jeweiligen prozentualen Massenanteilen anzugeben.

Filterstufe 1: Linke Grenze des Körnungsbandes: $d_5 \geq 0,06 \text{ mm}$
 $d_{10} = 0,12 \text{ mm}$
 $d_{100} = 1,5 \text{ mm}$

Rechte Grenze des Körnungsbandes: $d_0 = 0,19 \text{ mm}$
 $d_{85} = 2 \text{ mm}$
 $d_{100} = 10 \text{ mm}$

Filterstufe 2: Linke Grenze des Körnungsbandes: $d_0 = 0,6 \text{ mm}$ (gewählt)
 $d_{10} = 1,25 \text{ mm}$
 $d_{100} = 14 \text{ mm}$

Rechte Grenze des Körnungsbandes: $d_0 = 1,8 \text{ mm}$
 $d_{85} = 20 \text{ mm}$
 $d_{100} = 100 \text{ mm}$