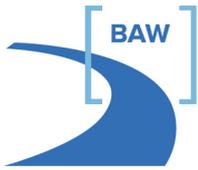


Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

BAWMerkblatt

Merkblatt Materialtransport im Boden (MMB)

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	Geltungsbereich und Zweck	1
2	Begriffe und Formelzeichen	1
2.1	Begriffe	1
2.2	Formelzeichen	2
3	Grundlagen	2
3.1	Allgemeines	2
3.2	Arten des Materialtransports	3
3.2.1	Suffosion	3
3.2.2	Erosion	4
3.2.3	Begriffsabgrenzung und englische Bezeichnungen	5
3.3	Nachweise	5
4	Nachweisverfahren für nicht kohäsive Böden	6
4.1	Allgemeines	6
4.2	Suffosion	6
4.2.1	Allgemeines zu Suffosionsnachweisen	6
4.2.2	Vereinfachtes Verfahren	6
4.2.3	Verfahren nach Ziem's	7
4.2.4	Verfahren nach Kenney und Lau	7
4.2.5	Verfahren nach Burenkova	10
4.2.6	Nachweis der Suffosionssicherheit nach MMB	11
4.3	Kontakterosion	12
4.3.1	Allgemeines	12
4.3.2	Verfahren nach Terzaghi und U.S. Waterways Experiment Station	13
4.3.3	Verfahren nach Cistin und Ziem's	14
4.3.4	Verfahren in Anlehnung an Lafleur	15
4.3.5	Verfahren nach Myogahara	19
4.4	Fugenerosion	20
4.4.1	Allgemeines	20
4.4.2	Fugenerosion an Massivbauwerken	20
4.4.3	Fugenerosion an Schichtgrenzen	20
5	Nachweisverfahren für kohäsive Böden	24
5.1	Allgemeines	24
5.2	Suffosion	25
5.3	Kontakterosion	25
5.3.1	Allgemeines	25
5.3.2	Nachweis für Deckwerke	25
5.3.3	Nachweisverfahren nach Sherard	25
6	Literatur	27
7	Bezugsregelwerke	28

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anwendungsgrenzen Nachweisverfahren	13
Tabelle 2:	Parameter für den Nachweis nach TAW (1999)	24
Tabelle 3:	Nachweis Kontakterosion für kohäsive Böden in und unter Deckwerken	25
Tabelle 4:	Bodentypen und Nachweiskriterien nach Sherard	26

Bildverzeichnis

Bild 1:	Materialtransport im Boden durch innere Suffosion	4
Bild 2:	Materialtransport im Boden durch Kontakterosion (links) und Fugenerosion (rechts)	5
Bild 3:	Konstruktion der Formkurve nach Kenney und Lau (1985)	8
Bild 4:	Nachweisverfahren nach Kenney und Lau (H-F-Diagramm) (Linien nicht im Ursprung)	9
Bild 5:	Darstellung der Versuchsergebnisse und Grenzkurven von Burenkova im $h''-h'$ -Diagramm	10
Bild 6:	Empfohlener Ablauf für den Nachweis der Suffosionssicherheit	12
Bild 7:	Zulässiges Abstandsverhältnis $A_{50,zul.}$ nach Cistin und Ziems	15
Bild 8:	Nachweisverfahren in Anlehnung an Lafleur	18
Bild 9:	Typkurven für suffosionssichere Böden	19
Bild 10:	Typkurven für suffosive Böden	19
Bild 11:	Grundmodell des Berechnungsansatzes nach Sellmeijer (TAW, 1999)	21
Bild 12:	Grundmodell für den Nachweis nach TAW	23

Anlagenverzeichnis

Anlage 1:	Beispiele zum Nachweis der Suffosionssicherheit nach MMB (Kap. 4.2)
Anlage 2:	Beispiele zum Nachweis der Kontakterosion nach MMB (Kap. 4.3)
Anlage 3:	Beispiel zum Nachweis gegen Fugenerosion nach MMB (Kap. 4.4)

1 Geltungsbereich und Zweck

Eine Voraussetzung für die Standsicherheit von durch- und unterströmten Bauwerken an Wasserstraßen ist eine ausreichende Sicherheit gegen Materialtransport im Boden (Bodenverlagerungen infolge hydrodynamischer Beanspruchung). Wesentliche Arten des durch Strömungskräfte des Wassers im Boden ausgelösten Transports von Bodenpartikeln sind Kontakt- und Fugenerosion sowie Suffosion.

In dem vorliegenden Merkblatt Materialtransport im Boden (MMB) werden auf geometrischen Kriterien der Bodenstruktur basierende Nachweisverfahren beschrieben, die zur Anwendung bei verkehrswasserbau-spezifischen Fragestellungen empfohlen werden (z. B. Bemessung von Kornfiltern nach MAK (2013), Nachweis der inneren Standsicherheit nach MSD (2011)).

2 Begriffe und Formelzeichen

2.1 Begriffe

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.

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 recycelt 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 Einstufenfilter oder mehrlagig als Stufenfilter ausgeführt werden. Sie müssen mechanisch und hydraulisch filterwirksam sein.

2.2 Formelzeichen

Formelzeichen	Benennung	Einheit
A_{50}	Abstandsverhältnis	-
C_C	Krümmungszahl	-
C_U	Ungleichförmigkeitszahl	-
c_u	undränierete Kohäsion	kN/m ²
c'	effektive Kohäsion	kN/m ²
d_x	Korndurchmesser bei x Masse-% Siebdurchgang	mm
d_D	untere Grenze der Ausfallkörnung	mm
d_{max}	maximaler Korndurchmesser (Größtkorn)	mm
d_{min}	minimaler Korndurchmesser	mm
d_k	maßgebender Porenkanaldurchmesser (Ziems)	mm
d_l	repräsentativer Korndurchmesser nach Lafleur	mm
e	Porenzahl	-
f	Verhältnissfaktor nach Terzaghi	-
F	Masseanteil der Körner < d (Kenney und Lau)	%
F_s	Schlupfmaß	-
h', h''	Faktoren nach Burenkova	-
H	Massenanteil zwischen Korndurchmesser d und 4·d	%
i	hydraulisches Gefälle / hydraulischer Gradient	-
I_p	Plastizitätszahl	-
Index B	Index für „Boden“ (bzw. an Kontaktfläche für feine Seite)	
Index F	Index für „Filter“ (bzw. an Kontaktfläche für grobe Seite)	

3 Grundlagen

3.1 Allgemeines

Im Boden strömendes Wasser kann in Abhängigkeit von lokal wirkenden hydraulischen Gradienten zu Umlagerungen und zum Transport von Bodenteilchen führen. Diese Vorgänge können die Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Erd- oder Massivbauwerken gefährden. In den folgenden Kapiteln werden die

nach Busch et al. (1993) unterschiedenen Arten des hydraulisch verursachten Bodenmaterialtransports beschrieben und hinsichtlich ihrer Auswirkungen bewertet.

Grundvoraussetzung für das Auftreten von Materialtransport sind bestimmte geometrische Bedingungen innerhalb der Bodenstruktur. Entsprechende geometrische Kriterien definieren Grenzwerte für den Korn Durchmesser bzw. den Durchmesser der Porenräume, bis zu denen ein Transport von Partikeln durch die Poren geometrisch möglich ist.

Ist eine Kornbewegung geometrisch möglich, so ist für Materialtransport im Boden zusätzlich eine Grund- oder Sickerwasserströmung erforderlich, durch deren Geschwindigkeit eine für eine Kornbewegung ausreichend große Kraft auf das Einzelkorn ausgeübt wird. Entsprechende hydraulische Kriterien werden i. d. R. über den Grenzwert des kritischen hydraulischen Gefälles definiert, ab dem ein Materialtransport beginnt.

Bei nicht kohäsiven Böden ist die Gefahr von Materialtransport besonders gegeben, da hier die einzelnen Bodenpartikel keine oder nur vernachlässigbare Bindungskräfte untereinander besitzen. Die Bodenpartikel sind frei beweglich, wenn es die Struktur des Porenraums zulässt.

In kohäsiven Böden hingegen sind die einzelnen Bodenpartikel durch chemische und / oder physikalische Bindungskräfte derart aneinander gebunden, dass einzelne Partikel nicht frei beweglich sind. Allerdings können sich entlang von Schwächezonen im kohäsiven Boden bewegliche Bodenaggregate bilden. Die Gefährdung eines kohäsiven Bodens hinsichtlich Materialtransport ist aufgrund der üblicherweise vorhandenen Aggregatgröße wesentlich geringer als bei nicht kohäsiven Böden. Da die Nachweise gegen Materialtransport im Boden sich für kohäsive und nicht kohäsive Böden grundlegend unterscheiden, werden sie in Kapitel 4 und Kapitel 5 getrennt behandelt.

3.2 Arten des Materialtransports

3.2.1 Suffosion

Die Umlagerung und der Transport der feinen Fraktionen eines Bodens im Porenraum des Korngerüsts der groben Fraktionen werden als Suffosion bezeichnet. Hierbei bleibt das tragende Korngerüst unverändert, eine Zerstörung der Bodenstruktur findet nicht statt. Als Folge der Suffosion erhöhen sich Porenvolumen und Durchlässigkeit des Bodens, während die Dichte abnimmt. Aufgrund der erhöhten Durchlässigkeit des Bodens vergrößert sich bei gleichbleibendem hydraulischem Gefälle der Grundwasserdurchfluss. Fortschreitende Suffosion kann Erosionsvorgänge begünstigen, wenn die Stabilität des tragenden Korngerüsts durch den Austrag des Feinmaterials vermindert wird. Der Übergang von Suffosion zur Erosion kann dann fließend sein. Suffosion tritt i. d. R. nur in nicht kohäsiven Böden auf.

Je nachdem, wo die suffosiven Materialtransportvorgänge stattfinden, wird nach Busch et al. (1993) zwischen innerer Suffosion (suffosiver Materialtransport innerhalb einer Bodenschicht), äußerer Suffosion (suffosiver Materialtransport zu einer freien Oberfläche hin) und Kontaktsuffosion (suffosiver Materialtransport in einen angrenzenden gröberen Boden) unterschieden. Voraussetzung für alle Arten der Suffosion ist die innere Suffosion. Auf eine Unterscheidung der Suffosionsarten wird daher verzichtet und nachfolgend unter Suffosion die innere Suffosion, wie sie in Bild 1 dargestellt ist, verstanden.

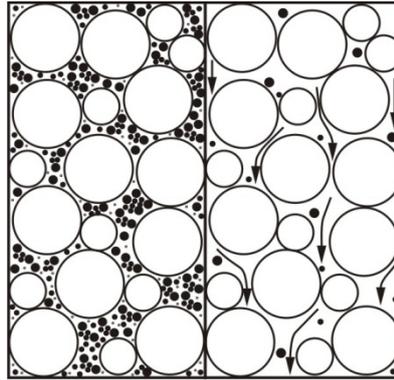


Bild 1: Materialtransport im Boden durch innere Suffosion

Der zur Suffosion umgekehrte Vorgang wird als Kolmation bezeichnet. Bei der inneren Kolmation lagern sich von der Grund- oder Sickerwasserströmung transportierte Teilchen im vorhandenen Porenraum des Korngerüsts eines nicht kohäsiven Bodens ab. Hierdurch vermindern sich das Porenvolumen sowie die Durchlässigkeit des Bodens und die Dichte nimmt zu. Die Ablagerung transportierter Teilchen an der Oberfläche einer Bodenschicht wird als äußere Kolmation bezeichnet.

3.2.2 Erosion

Als Erosion werden die durch Wasserströmung verursachte Umlagerung und der Transport nahezu aller Kornfraktionen eines Bodens bezeichnet. Dabei kommt es zu einer Veränderung der tragenden Bodenstruktur. Erosionsvorgänge können eine akute Gefährdung der Standsicherheit eines Erd- bzw. Massivbauwerkes zur Folge haben.

Je nachdem, wo Erosion stattfindet, wird nach Busch et al. (1993) zwischen äußerer und innerer Erosion sowie Kontakt- und Fugenerosion an Schicht- bzw. Bauwerksgrenzen unterschieden.

- Äußere Erosion erfolgt an der freien Oberfläche eines Bodenkörpers und wird i. A. durch eine äußere Strömungsbeanspruchung verursacht.
- Innere Erosion findet in größeren, meist röhrenförmigen Hohlräumen im Inneren des Bodenkörpers statt. Das Entstehen der inneren Erosion wird u. a. durch bereits vorhandene Hohlräume (z. B. abgestorbene Wurzeln, Tiergänge), unterschiedliche Lagerungsdichten, Anisotropie des Bodens und auch durch vorhergehende Suffosion gefördert. Rückschreitend von einer freien Oberfläche des Erdkörpers kann die innere Erosion zu einer Erweiterung und Verlängerung der konzentriert durchströmten Hohlräume führen (rückschreitende Erosion), so dass die Gefahr eines Erosionsbruchs (Erosionsgrundbruchs) besteht. Eine rückschreitende Erosion kann vermieden bzw. begrenzt werden, wenn der Austrag von Boden durch die Anordnung von Filterschichten verhindert wird.
- Kontakterosion beginnt an der Kontaktfläche zweier unterschiedlich zusammengesetzter Böden (grobkörniger und feinkörniger Boden) (Bild 2, links). Dabei erfolgt ein Transport von Bodenteilchen aus dem feinkörnigen Boden in den Porenraum des grobkörnigen Bodens, wo der Prozess als innere Suffosion oder Kolmation seine Fortsetzung finden kann.
- Fugenerosion ist eine rückschreitende Erosion an den Grenzflächen zwischen Massivbauwerken und Boden oder zwischen einer kohäsiven und einer unterlagernden nicht kohäsiven Bodenschicht (Bild 2, rechts). Sie führt zu einer progressiven Hohlraumbildung und kann zum Erosionsbruch (Erosionsgrundbruch) führen.

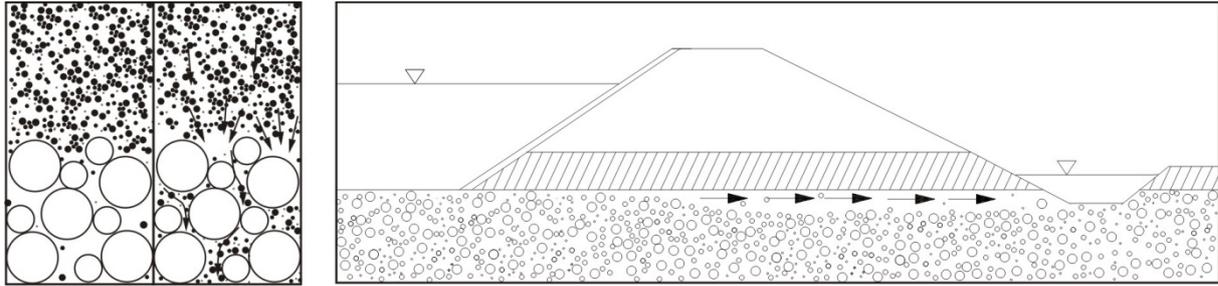


Bild 2: Materialtransport im Boden durch Kontakterosion (links) und Fugenerosion (rechts)

3.2.3 Begriffsabgrenzung und englische Bezeichnungen

Die Begriffe in diesem Merkblatt entsprechen der Definition von Busch et al. (1993). Sie werden in der internationalen Literatur jedoch nicht einheitlich verwendet.

"Erosion" wird im Deutschen häufig als Oberbegriff für alle Transportvorgänge von Bodenpartikeln durch Wind und Wasser benutzt. Bei Wasser als Transportmedium kann es sich dabei um Vorgänge auf der Bodenoberfläche oder im Korngerüst handeln. Im Englischen beschränkt sich "erosion" meist auf Oberflächenerosion. Erosion im Gewässerbett wird als "scouring" (deutsch auch "Kolkbildung") bezeichnet.

"Innere Erosion" wird bei Busch et al. (1993) relativ eng gefasst, in anderen deutschen Literaturstellen aber auch als Überbegriff aller Transportvorgänge im Innern eines Bodenbereichs verwendet (Suffosion, Kontakterosion). Der englische Begriff "internal erosion" bezeichnet teilweise diesen Überbegriff, teilweise nur die Suffosion (der englische Begriff "suffusion" wird nur von wenigen Autoren benutzt). "Internal stability" bezieht sich stets auf suffosive Vorgänge.

Der englische Begriff "piping" wird umfassender verstanden als im Deutschen und beschreibt alle Prozesse, bei denen Bodenpartikel ausgetragen werden. Darunter fallen "Innere Erosion" im Sinne dieses Merkblattes, "Fugenerosion" und "Kontakterosion". Materialaustrag infolge der Kontakterosion von Boden- oder Filterschichten unter Deckschichten wird als "winnowing" bezeichnet.

"Kolmation" wird im Englischen in "clogging" und "blinding" unterschieden. "Clogging" bezeichnet eine Einlagerung von Partikeln im Korngerüst, während "blinding" eine Anlagerung von Partikeln auf der Oberfläche der filternden Schicht beschreibt.

3.3 Nachweise

In diesem Merkblatt werden ausschließlich Verfahren zum Nachweis der Sicherheit gegen Suffosion und Kontakterosion sowie gegen Fugenerosion unter kohäsiven Bodenschichten behandelt (Bild 1 und Bild 2). Der Nachweis gegen äußere Erosion an der Oberfläche eines Bodenkörpers durch eine äußere Strömungsbeanspruchung erfolgt auf Grundlage von hydraulischen Berechnungen und wird hier nicht betrachtet. Da die Vorgänge bei innerer Erosion rechnerisch nicht erfasst werden können, existieren hierfür keine Nachweisverfahren. Möglichen schädlichen Auswirkungen muss konstruktiv begegnet werden.

Für den Nachweis gegen Fugenerosion bei Bauwerken in Dämmen wird im Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD 2011) ein Nachweisverfahren auf Grundlage numerischer Berechnungen der Dammdurchströmung im Bauwerksbereich zur Anwendung empfohlen.

Der Nachweis gegen Materialtransport im Boden erfolgt im vorliegenden Merkblatt ausschließlich auf Grundlage geometrischer Kriterien. Dieser Ansatz liegt auf der sicheren Seite, da in diesem Fall unab-

hängig von der hydraulischen Beanspruchung kein Materialtransport stattfindet. Allgemein gültige und in der Praxis erprobte Nachweisverfahren für hydraulische Kriterien gibt es derzeit nicht.

4 Nachweisverfahren für nicht kohäsive Böden

4.1 Allgemeines

Die Nachweise zur Sicherheit gegen Materialtransport im Boden sind an repräsentativen Körnungslinien der relevanten Bodenschichten durchzuführen.

Für die nachfolgend beschriebenen Verfahren finden sich Anwendungsbeispiele in den Anlagen.

4.2 Suffosion

4.2.1 Allgemeines zu Suffosionsnachweisen

Für den Nachweis der Suffosionssicherheit gibt es eine Vielzahl verschiedener Verfahren, die unter jeweils unterschiedlichen Gesichtspunkten und Systematiken (theoretische Betrachtungen und/oder Laborversuche) entwickelt wurden und sich daher hinsichtlich ihrer Anwendungsgrenzen unterscheiden. Die zur Anwendung empfohlenen Verfahren wurden aufgrund folgender Kriterien ausgewählt:

- möglichst weit gefasster Anwendungsbereich,
- einfache Handhabung und
- Zuverlässigkeit.

Die in den folgenden Kapiteln vorgestellten Verfahren nach

- Ziems,
- Kenney und Lau und
- Burenkova

sind Grundlage der in Kapitel 4.2.6 zur Anwendung empfohlenen Vorgehensweise für den Nachweis der Suffosionssicherheit.

4.2.2 Vereinfachtes Verfahren

Die nachfolgend aufgeführten Kriterien für den Nachweis gegen Suffosion ermöglichen eine einfache und leicht handhabbare Beurteilung der Suffosionsgefährdung anhand der Körnungslinie des Bodens. Diese Kriterien wurden von Ziems (WAPRO, 1970) abgeleitet und basieren auf Versuchen an Sanden und Kiesen mit stetiger Körnungslinie.

Böden, die die beiden folgenden Kriterien erfüllen, gelten demnach ohne besonderen Nachweis als suffosionssicher:

- Ungleichförmigkeitszahl $C_u < 8$ und
- stetige Körnungslinie.

Unter stetiger Körnungslinie wird eine Körnungslinie ohne Ausfallkörnung und markante Krümmungsänderungen verstanden.

4.2.3 Verfahren nach Ziems

4.2.3.1 Grundlagen

Das Verfahren zum Suffosionsnachweis nach Ziems beruht auf theoretischen Betrachtungen zur Porenstruktur bzw. zur Porenengstellenverteilung eines Bodens. Diese Betrachtungen sind auch Grundlage für Filterkriterien an der Grenzfläche zweier Böden (Ziems, 1967).

Ziems setzt in seinen Betrachtungen den für Suffosion maßgebenden Porenkanaldurchmesser d_k dem mittleren Porendurchmesser nach Pavcic gleich:

$$d_k = 0,455 \cdot \sqrt[6]{C_U} \cdot e \cdot d_{17} \quad (1)$$

Die Untersuchungen von Ziems zur Kontakterosion zeigen, dass von einem Filter mit einem maßgebenden Porenkanaldurchmesser d_k auch Partikel zurückgehalten werden, die kleiner als d_k sind. Um diese Erkenntnisse zu berücksichtigen, führt er das Schlupfmaß F_s als Abminderungsfaktor ein. Dieser Faktor berücksichtigt Effekte wie u.a. die Kornrauigkeit und die von der Kugel abweichende Form natürlicher Körner. Das Schlupfmaß F_s nimmt Werte bis zu 0,4 an (unter dynamischer Belastung wie Erschütterung oder pulsierender Strömung bis 0,6). Ziems überträgt diesen Ansatz auf den Nachweis der Suffosion. Da eine Kornbewegung bei Suffosion stärker behindert wird als bei Kontakterosion liegt der Ansatz auf der sicheren Seite.

4.2.3.2 Anwendungsgrenzen

Die Ermittlung des mittleren Porendurchmessers nach Pavcic hat nur für stetige Körnungslinien Gültigkeit. Demzufolge kann das darauf aufbauende Verfahren nach Ziems zum Nachweis der Suffosionssicherheit nicht bei unstetigen Körnungslinien (markante Krümmungsänderungen oder Knicke, d. h. plötzliche Anstiegsänderungen) angewendet werden.

4.2.3.3 Nachweisverfahren

Nach Ziems ist ein Boden sicher gegen Suffosion, wenn gilt:

$$\frac{d_{\min}}{F_s \cdot d_k} \geq 1,5 \quad (2)$$

mit

d_{\min} minimaler Korndurchmesser

F_s Schlupfmaß (Kapitel 4.2.3.1)

d_k maßgebender Porenkanaldurchmesser (Kapitel 4.2.3.1)

Die Größe d_{\min} definiert den größten Korndurchmesser, der bei Suffosion ausgetragen wird. Entspricht d_{\min} dem Korndurchmesser bei 0% Siebdurchgang (d_0) ($d_{\min} = d_0$), wird kein Partikel ausgetragen. Nach Busch et al. (1993) kann d_{\min} bis zu d_3 angesetzt werden, wenn ein entsprechender Materialaustrag toleriert werden kann. Den Faktor von 1,5 begründet Ziems mit der Inhomogenität der Böden hinsichtlich ihrer Korngrößenverteilung und Lagerungsdichte.

4.2.4 Verfahren nach Kenney und Lau

4.2.4.1 Grundlagen

Die Betrachtungen von Kenney und Lau (1985 und 1986) basieren auf Überlegungen zur Porenraumgeometrie eines Kugelhauferkes. Sie gehen 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 und Lau wird nicht die gesamte Körnungslinie betrachtet, sondern nur der Bereich der feinen Fraktionen, d. h. der maximale Anteil des Bodens, der beweglich im Porenraum des Korngerüstes vorhanden sein kann. Je nach Ungleichförmigkeit des groben Anteils des Bodens $C_{U,grob}$ sind das entweder die feinsten 30 % bei $C_{U,grob} \leq 3$ oder die feinsten 20 % bei $C_{U,grob} > 3$ des Bodens.

Kenney und Lau beschreiben die Form der Körnungslinie über das Verhältnis von H und F, wobei H dem Massenanteil zwischen den Korndurchmessern d und $4 \cdot d$ entspricht und F dem Massenanteil der Körner kleiner d .

Zur Konstruktion der Formkurve wird für mehrere Durchmesser d der Körnungslinie der zugehörige Siebdurchgang F ermittelt. Ebenfalls ermittelt wird der zum 4-fachen Durchmesser $4 \cdot d$ zugehörige Siebdurchgang $F + H$. Die Formkurve ergibt sich aus der Darstellung der Wertepaare H/F in einem Diagramm. Die Formkurve ist durch die Gerade $F + H = 1$ begrenzt.

In Bild 3 sind die Definitionen von H und F sowie die Konstruktion der Formkurve grafisch dargestellt.

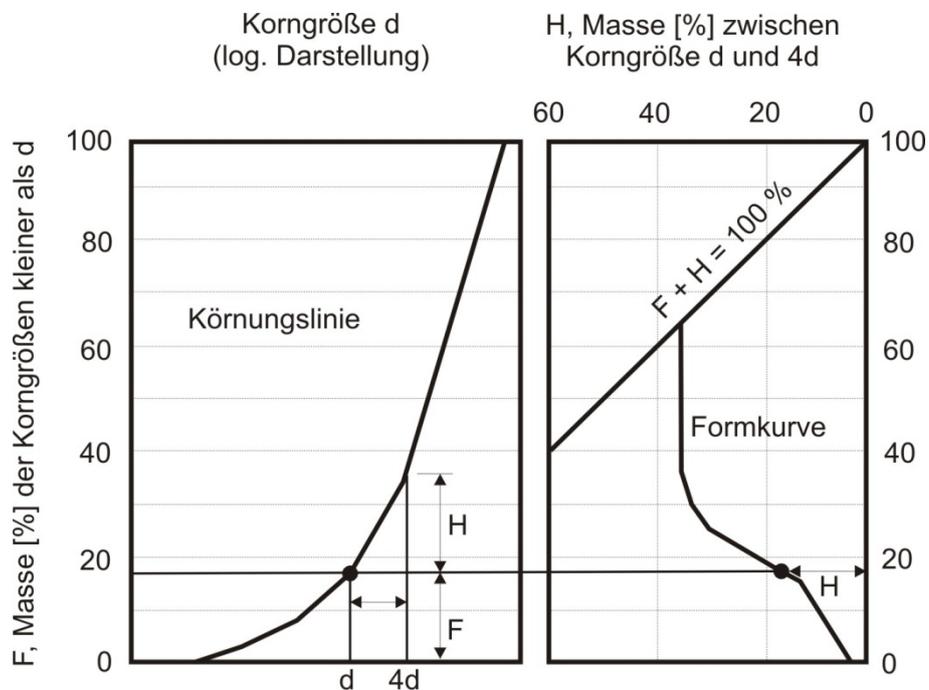


Bild 3: Konstruktion der Formkurve nach Kenney und Lau (1985)

Kenney und Lau haben das Verfahren in einer Vielzahl an Versuchen verifiziert. Die Versuche wurden unter ungünstigen Randbedingungen (Durchströmung von oben nach unten bei gleichzeitiger Vibration der Probe) durchgeführt. Die Ergebnisse liegen daher in Bezug auf praxisrelevante Fragestellungen auf der sicheren Seite.

4.2.4.2 Anwendungsgrenzen

Die Versuche führten Kenney und Lau an Sanden und Kiesen ohne Feinkornanteil ($d < 0,06$ mm) durch. Da das Verfahren auf geometrischen Modellvorstellungen hinsichtlich der Porenraumgeometrie basiert, kann es auch auf feinere, nicht kohäsive Böden angewendet werden. Das Verfahren ist auch auf Böden mit Ausfallkörnungen anwendbar.

4.2.4.3 Nachweisverfahren

Zum Nachweis der Suffosionssicherheit darf das Verhältnis H/F ein bestimmtes Maß nicht unterschreiten, d. h. die Körnungslinie darf eine bestimmte Steigung nicht unterschreiten.

Es wird unterschieden zwischen einem harten Kriterium mit $H = 1,3 F$ und einem weichen Kriterium mit $H = 1,0 F$. Die Kurve $H = 1,0 F$ entspricht der Fullerkurve, d. h. der Zusammensetzung eines abgestuften Mineralkorngemischs mit minimalem Porenanteil. Beide Kriterien sind als Bereiche in Bild 4 dargestellt. Laborversuche von Kenney und Lau haben gezeigt, dass das weiche Kriterium nicht immer ausreichend ist.

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 berücksichtigt (s. Bild 4).

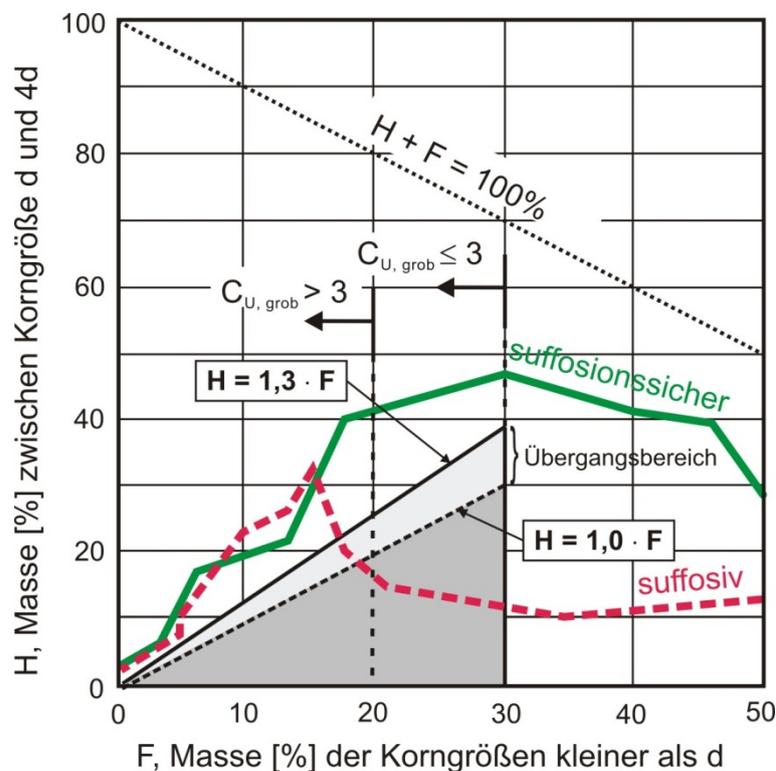


Bild 4: Nachweisverfahren nach Kenney und Lau (H-F-Diagramm) (Linien nicht im Ursprung)

Für die Prüfung eines Bodens auf Suffosivität wird zunächst auf Grundlage der Körnungslinie die $H(F)$ -Kurve des zu untersuchenden Bodenmaterials erstellt, die der um 90° rechts gedrehten Formkurve entspricht. Schneidet die $H(F)$ -Kurve die dunkelgrau angelegte Fläche ($H < F$, weiches Kriterium), so ist der Boden suffosiv. Wird nur die hellgraue Fläche ($H < 1,3 F$, hartes Kriterium) geschnitten, so ist der Boden im Übergangsbereich (s. Kapitel 4.2.6). Wird keine der Flächen geschnitten, ist der Boden als suffosionssicher zu bewerten. Die in Bild 4 dargestellte gestrichelte, rote Kurve zeigt die Formkurve eines suffosiven Bodens, die durchgezogene, grüne Kurve die eines suffosionssicheren Bodens.

4.2.5 Verfahren nach Burenkova

4.2.5.1 Grundlagen

Grundlage der Versuche von Burenkova (1993) sind Überlegungen zur Struktur eines Bodens hinsichtlich des Korngerüsts und der Füllung der Poren mit frei beweglichen Körnern. Burenkova führte an einer Vielzahl von Böden Versuche zur Ermittlung der Korngröße am Übergang zwischen Korngerüst und im Porenraum frei beweglichen Körnern durch.

Zur Beschreibung der Heterogenität eines Bodens verwendet Burenkova die repräsentativen Korndurchmesser d_{15} , d_{60} und d_{90} und führt die Faktoren $h' = d_{90} / d_{60}$ und $h'' = d_{90} / d_{15}$ ein.

Die Auswertung der Versuche mit Hilfe der beschreibenden Größen h' und h'' ergibt zwei Grenzkurven, innerhalb derer die Böden angeordnet sind, die nach den Versuchen als suffosionsicher bewertet wurden. Bild 5 zeigt die Versuchsergebnisse von Burenkova, die daraus abgeleiteten Grenzkurven und grau hinterlegt der Bereich für nicht suffusive Böden nach Burenkova (1993).

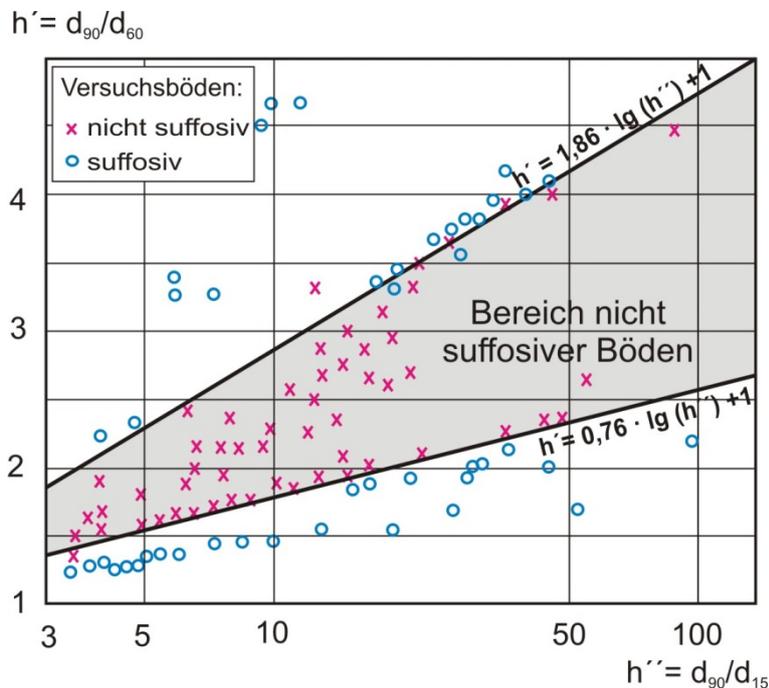


Bild 5: Darstellung der Versuchsergebnisse und Grenzkurven von Burenkova im h'' - h' -Diagramm

4.2.5.2 Anwendungsgrenzen

Die Versuche, auf denen das Nachweisverfahren aufbaut, wurden an Böden mit einer maximalen Ungleichförmigkeit $C_U = 200$ und einem maximalen Korndurchmesser von 60 bis 100 mm durchgeführt. Die Körnungslinien der untersuchten Böden waren konkav, konvex und linear.

Das Nachweisverfahren gilt auf Grundlage der von Burenkova durchgeführten Versuche für Böden (Bild 5) mit:

- $1 \leq h' \leq 5$ und
- $3 \leq h'' \leq 130$

4.2.5.3 Nachweisverfahren

Ein Boden gilt nach dem Verfahren von Burenkova als suffosionssicher, wenn gilt:

$$0,76 \cdot \lg(h'') + 1 < h' < 1,86 \cdot \lg(h'') + 1 \quad (3)$$

mit $h' = d_{90} / d_{60}$, $h'' = d_{90} / d_{15}$

4.2.6 Nachweis der Suffosionssicherheit nach MMB

Die vorgestellten und zur Anwendung empfohlenen Verfahren unterscheiden sich in ihrem Anwendungsbereich und ihrer Komplexität. Ein Boden wird als suffosionssicher angesehen, wenn dies entweder mit den vereinfachten Kriterien, dem Verfahren nach Ziems oder dem Verfahren nach Kenney und Lau (letzteres ggf. in Kombination mit Burenkova) nachgewiesen werden kann. Um den Nachweis der Suffosionssicherheit möglichst einfach aber gleichzeitig für eine große Bandbreite verschiedener Böden durchführen zu können, wird ein Ablauf gemäß Bild 6 vorgeschlagen.

In einem ersten Schritt werden die vereinfachten Kriterien (Kap. 4.2.2) überprüft. Falls diese nicht erfüllt sind, wird in einem zweiten Schritt das Verfahren nach Ziems (Kap. 4.2.3) angewandt. Sind die Anwendungsgrenzen des Nachweises nach Ziems nicht erfüllt oder ergibt der Nachweis nach Ziems eine Suffosionsgefährdung, erfolgt der Nachweis mit dem Verfahren nach Kenney und Lau (Kap. 4.2.4). Hierbei wird aus Gründen der Sicherheit zunächst der Ansatz des harten Kriteriums (Stabilitätskriterium $H > 1,3 F$) empfohlen. Ist dieses nicht eingehalten, ist zu prüfen, ob der Boden im Übergangsbereich zwischen dem harten und dem weichen Kriterium ($1,0 F < H \leq 1,3 F$) liegt. In diesem Fall wird die zusätzliche Absicherung mit dem Verfahren von Burenkova (Kap. 4.2.5) empfohlen. Liegt die Formkurve des Bodens im Bereich $H \leq 1,0 F$, so ist der Boden suffosiv.

Es ist aber auch möglich auf den vereinfachten Nachweis zu verzichten und direkt mit dem Nachweis nach Ziems oder nach Kenney und Lau zu beginnen.

In Bild 6 ist die empfohlene Vorgehensweise in Form eines Flussdiagramms veranschaulicht. Gestrichelt ist die Variante der Nachweisführung mit dem direkten Einstieg in das Verfahren nach Ziems bzw. Kenney und Lau dargestellt.

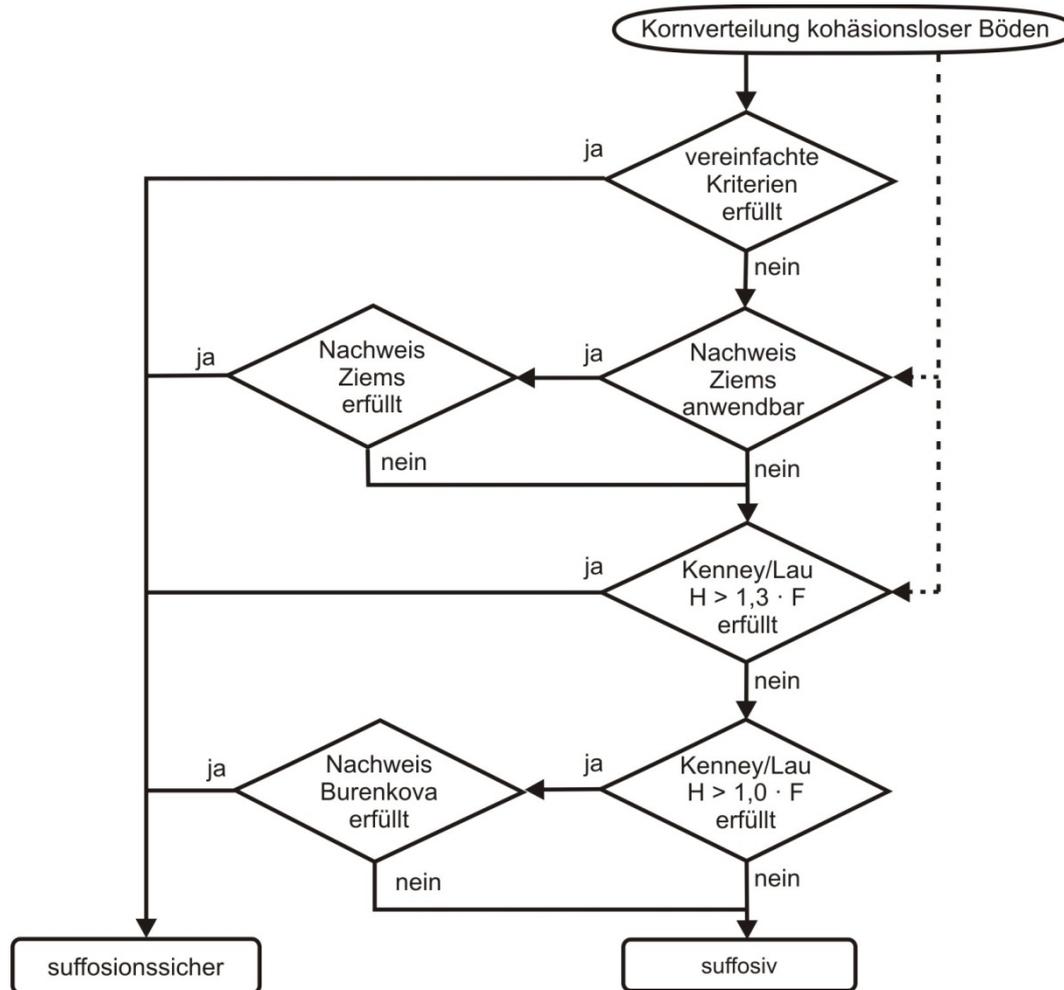


Bild 6: Empfohlener Ablauf für den Nachweis der Suffosionssicherheit

4.3 Kontakterosion

4.3.1 Allgemeines

Der Nachweis gegen Kontakterosion ist immer an Schichtgrenzen zwischen fein- und grobkörnigen Böden zu führen, an denen eine Sickerwasserströmung vom feineren zum gröbereren Boden oder parallel zur Kontaktfläche stattfindet.

Nachfolgend wird der feinere Boden als Boden (Index „B“) und der gröbere Boden als Filter (Index „F“) bezeichnet, da sich der Nachweis gegen Kontakterosion größtenteils auf Filterbemessungen bezieht und die entsprechenden Nachweise i. d. R. dafür entwickelt wurden.

Für den Nachweis gegen Kontakterosion existiert eine Vielzahl empirisch gewonnener Kriterien (DWA-M 507-1, 2011).

Zum Nachweis der geometrischen Sicherheit gegen Kontakterosion werden die Verfahren von

- Terzaghi,
- Cistin und Ziems,
- Lafleur und
- Myogahara

empfohlen. Die Grundlagen, die Anwendungsgrenzen und die Nachweisführungen werden nachfolgend beschrieben.

In Tabelle 1 sind die Anwendungsgrenzen dieser Verfahren zusammengestellt.

Tabelle 1: Anwendungsgrenzen Nachweisverfahren

Verfahren	$C_{U,F}$	$C_{U,B}$	Filter	Boden	hydraulischer Gradient i
Terzaghi	< 2	< 2	enggestufte Sande	enggestufte Sande	< 8
Cistin und Ziems	≤ 18	≤ 20	$d \leq 100$ mm	-	≤ 9
Lafleur	< 27	-	sandiger Kies $0,06 < d < 50$ mm $d_{15} > 0,2$ mm	kohäsionslose Böden $d < 50$ mm	≤ 8
Myogahara	-	-	GW, GE oder gröber		

Aufgrund der stark eingeschränkten Anwendungsgrenzen gilt das Verfahren nach Terzaghi nur für enggestufte Böden und enggestufte Filter. Das Verfahren nach Cistin und Ziems ist auf Böden mit einer Ungleichförmigkeit C_U bis 20 anwendbar, wenn diese keine Ausfallkörnung aufweisen. Für sehr weit gestufte Böden und Böden mit Ausfallkörnung wird der Nachweis in Anlehnung an Lafleur empfohlen. Das Verfahren nach Myogahara ist nur für grobe Gesteinskörnungen (z. B. Wasserbausteine) als Filterkörnung anwendbar.

Allen Verfahren zum Nachweis gegen Kontakterosion liegt der Gedanke zugrunde, dass ein Filter dann eine ausreichende mechanische Filterwirksamkeit besitzt, wenn er in der Lage ist, einen bestimmten repräsentativen Korndurchmesser des zu schützenden Bodens bei Durchströmung zurückzuhalten.

4.3.2 Verfahren nach Terzaghi und U.S. Waterways Experiment Station

4.3.2.1 Grundlagen

Terzaghi (1922) führte Untersuchungen und Versuche zum Untergrundversagen bei Dämmen infolge „piping“ durch. Aus diesen Untersuchungen wurde abgeleitet, dass eine ausreichend durchlässige Bodenaufkast ein „unfehlbares Mittel zur Verhütung der Erosionsgrundbrüche darstellt. Die Auflage muss so beschaffen sein, dass sie den freien Austritt des Sickerwassers gewährleistet, ohne den Durchtritt von Bodenpartikeln zu gestatten, d. h., sie muss gewissermaßen als Filter wirken“. Die erforderliche Korngröße des Filtermaterials wurde in dieser Arbeit für verschiedene Bodenarten auf empirischem Weg bestimmt. Eine Bemessungsregel wurde hierfür erstmals in Terzaghi und Peck (1948) angegeben. Grundlage waren Laboruntersuchungen von Bertram (1940) und erste Angaben zu Filterkriterien aus früheren, unveröffentlichten Berichten von Terzaghi.

Nach Terzaghi ist ein Filtermaterial geeignet, wenn der Quotient f aus dem Korndurchmesser des Filters beim Siebdurchgang von 15 % ($d_{15,F}$) und dem Korndurchmesser des zu schützenden Bodens beim Siebdurchgang von 85 % ($d_{85,B}$) maximal vier beträgt.

Das zulässige Verhältnis $f \leq 4$ ist konservativ, d. h. sicher, und wird in der Praxis am meisten verwendet. In weiteren Untersuchungen wurde ein Verhältnis von $f \leq 5$ (U.S. Waterways Experiment Station, 1941) als ausreichend nachgewiesen.

4.3.2.2 Anwendungsgrenzen

Das Kriterium von Terzaghi gilt aufgrund der experimentellen Randbedingungen, unter denen es entwickelt wurde, nur für eng gestufte Sande (sowohl für Boden als auch für Filter) mit $C_U < 2$ bei einem hydraulischen Gefälle bis $i = 8$.

4.3.2.3 Nachweisverfahren

Die Sicherheit gegen Kontakterosion ist gegeben, wenn gilt

$$f = \frac{d_{15,F}}{d_{85,B}} \leq 5 \quad (4)$$

4.3.3 Verfahren nach Cistin und Ziems

4.3.3.1 Grundlagen

In der Arbeit von Cistin (1967) werden die Suffosion eines nicht kohäsiven Bodens und die Kontaktsuffosion bzw. -erosion an der Berührungsstelle zweier nicht kohäsiver Böden beschrieben.

Bei den Versuchen von Cistin wurden verschiedene Böden in durchsichtige Plexiglasröhren eingebaut und senkrecht zur Kontaktfläche von oben nach unten, d. h. in Richtung der Schwerkraft durchströmt. Das hydraulische Gefälle wurde bis $i = 9$ gesteigert. Die Ungleichförmigkeitszahlen $C_{U,B}$ und $C_{U,F}$, sowie die Korndurchmesser $d_{50,B}$ und $d_{50,F}$ der Versuchsböden waren dabei die wichtigsten veränderlichen Bodenparameter.

Aus den Untersuchungsergebnissen leitete Cistin einen Zusammenhang zwischen dem Abstandsverhältnis $A_{50} = d_{50,F}/d_{50,B}$ und der Sicherheit gegen Kontakterosion ab. Ziems berücksichtigte in seinen Untersuchungen u. a. den Einfluss der Kornform und der Strömungsrichtung in Bezug auf die Kontaktfläche. Das von Cistin erstellte und von Ziems für den Bereich von $1 < C_{U,B} < 4$ überarbeitete Diagramm ist in Bild 7 dargestellt (WAPRO, 1970).

4.3.3.2 Anwendungsgrenzen

Für die Anwendung des Verfahrens von Cistin und Ziems gelten folgende Randbedingungen:

1. Ungleichförmigkeit des Bodens $C_{U,B} \leq 20$,
2. mindestens mitteldichte Lagerung
3. Ungleichförmigkeit des Filters $C_{U,F} \leq 18$,
4. Korngrößenbereich des Filters $d_i \leq 100$ mm,
5. hydraulisches Gefälle $i \leq 9$,
6. der Bemessungsansatz gilt für alle Strömungsrichtungen und
7. die Böden müssen suffosionssicher sein.

4.3.3.3 Nachweisverfahren

Zum Nachweis der Sicherheit gegen Kontakterosion wird das vorhandene Abstandsverhältnis $A_{50,vorh.}$ aus den d_{50} -Werten der zu untersuchenden Materialien (Boden $d_{50,B}$, Filter $d_{50,F}$) bestimmt und mit dem zulässigen Abstandsverhältnis $A_{50,zul}$ in Abhängigkeit von den vorhandenen Ungleichförmigkeiten $C_{U,F}$ des Filters und $C_{U,B}$ des Bodens gemäß Bild 7 verglichen.

$$A_{50,vorh} = \frac{d_{50,F}}{d_{50,B}} \quad (5)$$

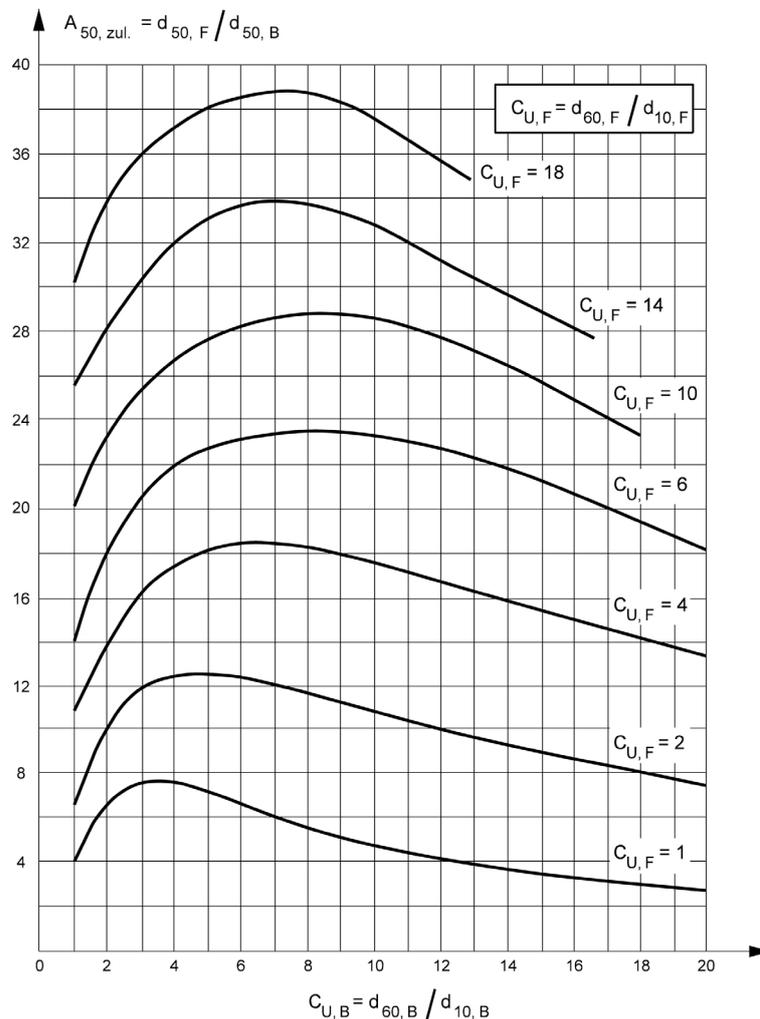


Bild 7: Zulässiges Abstandsverhältnis $A_{50,zul.}$ nach Cistin und Ziems

Filter und Boden bzw. die untersuchten Bodenschichten sind gegeneinander erosionsstabil, wenn das vorhandene Abstandsverhältnis $A_{50,vorh}$ kleiner oder gleich dem zulässigen Abstandsverhältnis $A_{50,zul}$ ist.

$$A_{50,vorh} \leq A_{50,zul} \quad (6)$$

Das Diagramm gilt für abgerundete Kornformen des gröbereren Bodens (Filter). Bei scharfkantiger Kornform ist das Abstandsverhältnis $A_{50,zul}$ mit dem Faktor 0,75 zu multiplizieren (Lattermann, 1997).

4.3.4 Verfahren in Anlehnung an Lafleur

4.3.4.1 Grundlagen

Mit dem Verfahren von Lafleur ist es möglich, Filter auch für ungleichförmige, d. h. weit gestufte und intermittierend gestufte, nicht kohäsive Böden zu dimensionieren. Es ist auch für suffosive Böden anwendbar (Lafleur et al., 1993).

Er führte Versuche mit Durchströmung von oben nach unten mit einem Gradienten $i = 8$ und maximaler Versuchsdauer von 71 Stunden durch. Ergänzend zu seinen Versuchen berücksichtigt Lafleur die Verfahren und Untersuchungen von anderen Autoren (Kenney und Lau, 1984; Sherard, 1984; Bertram, 1940; Terzaghi, 1948).

Er geht bei seinen Überlegungen davon aus, dass an der Kontaktfläche Boden/Filter immer ein gewisser Anteil des Bodens ausgespült und in den Filter eingetragen wird. Dabei kommt es zu einem komplexen Brückenbildungs-Prozess, der räumlich auf den Bereich der Kontaktfläche begrenzt bleibt, sofern das System Boden/Filter sicher gegen Kontakterosion ist.

Der ausgespülte Anteil ist bei gleichförmigen Böden minimal. Bei ungleichförmigen Böden ist eine Bemessung auf d_{85} (Terzaghi-Kriterium) i. d. R. nicht ausreichend, um eine stabile Basis/Filter-Kombination zu erhalten.

Für die Filterbemessung nach Lafleur wird ein repräsentativer Korndurchmesser d_l des Bodens definiert, auf den dann die repräsentative Öffnungsweite des Filters abzustimmen ist. Die repräsentative Öffnungsweite des Filters wird von Lafleur nach eigenen Untersuchungen und Untersuchungen anderer Autoren (Kenney, Sherard, Bertram) mit $d_{15,F}/5$ festgelegt. Filterstabilität ist vorhanden, wenn der repräsentative Durchmesser d_l des Bodens größer als die repräsentative Öffnungsweite des Filters ist. Der Anteil des ausgespülten Bodens wird somit begrenzt und ein Zusetzen des Filters durch Kolmation kann ausgeschlossen werden.

Der repräsentative Durchmesser des Bodens d_l (d_{85} , d_{50} , d_D oder d_{30}) hängt von der Suffosionssicherheit des Bodens und von der Form seiner Körnungslinie in der halblogarithmischen Darstellung ab. Als Formen der Körnungslinie werden die grundlegenden Kategorien

- lineare Verteilung,
- intermittierende Verteilung und
- linksgekrümmte Verteilung

verwendet. Je nach Erfordernis werden diese Kategorien noch weiter differenziert (s. Kap. 4.3.4.2).

4.3.4.2 Anwendungsgrenzen

Das Verfahren von Lafleur basiert auf Versuchen mit kohäsionslosen Sanden und Kiesen mit einem Feinkornanteil $d_{0,063}$ von maximal 40 % und einem hydraulischen Gradienten bis $i = 8$. Als Filter wurden sandiger Kies ($0,06 < d < 50$ mm, $d_{15} > 0,2$ mm) und als Boden Böden mit $d < 50$ mm verwendet. Es wird empfohlen, das Verfahren nur bei entsprechenden Böden und hydraulischen Gradienten bis $i = 8$ einzusetzen.

4.3.4.3 Nachweisverfahren

Die Betrachtungen von Lafleur umfassen eine Vielfalt verschiedener Typen an Körnungslinien, gehen im Detail jedoch nicht auf alle Typen ein. Um eine möglichst weite Anwendung der Ergebnisse von Lafleur zu ermöglichen lehnt sich das nachfolgend dargestellte Nachweisverfahren eng an das Verfahren von Lafleur an, erweitert dieses jedoch hinsichtlich der Betrachtung von Böden mit Ausfallkörnung.

Das empfohlene Nachweisverfahren ist als Flussdiagramm in Bild 8 dargestellt. Ausgangspunkt ist die Korngrößenverteilung des Bodens.

Am Beginn des Nachweises auf Kontakterosion nach Lafleur muss die Suffosionssicherheit des Bodens entsprechend Kapitel 4.2 untersucht werden.

In Abhängigkeit von der Form der Körnungslinie wird der repräsentative Korndurchmesser des Bodens d_i bestimmt. Die Sicherheit gegen Kontakterosion nach Lafleur ist gegeben, wenn gilt:

$$d_{F,15}/5 < d_i \quad (7)$$

Bei suffosionssicheren, gleichförmigen Böden unterscheidet sich der Nachweis nicht vom Nachweis nach Terzaghi ($d_i = d_{85}$). Als gleichförmig sind Böden mit $C_u \leq 6$ und ungefähr linearem Verlauf der Körnungslinie unterhalb von d_{90} anzusehen.

Bei Böden mit weit gestufter Korngrößenverteilung ($C_u > 6$) muss die Form der Körnungslinie und die innere Stabilität (Gefährdung gegen Suffosion) des Bodens berücksichtigt werden. Für suffosionssichere Böden mit linearer, weit gestufter Körnungslinie entspricht d_i der mittleren Korngröße d_{50} . Für suffosionssichere Böden mit Ausfallkörnung ist d_i gleich der unteren Grenze der Ausfallkörnung (d_D), jedoch maximal d_{50} .

Bei suffosiven Böden besteht die Gefahr des Zusetzens der Oberfläche des Filters oder des Filters selbst und damit ggf. der Entstehung einer gering durchlässigen Schicht, wenn der Filter zu fein bemessen ist. Hierdurch kann es ggf. zu erhöhten Porenwasserdrücken kommen. Bei zu grober Bemessung des Filters besteht die Gefahr übermäßiger Ausspülungen der feinen Bodenfraktionen. Die Bemessung suffosiver Böden auf d_{30} ist ein Kompromiss hinsichtlich beider Gefährdungen (Optimierung des Filtersystems). In besonderen Fällen ist zu prüfen, ob eher vermehrte Bodenausspülungen oder erhöhte Porenwasserdrücke in Kauf genommen werden können. Dementsprechend wäre dann der repräsentative Korndurchmesser d_i größer als d_{30} (ggf. mehr Bodenausspülung) oder kleiner als d_{30} (ggf. höhere Porenwasserdrücke) zu wählen. Suffosiv können Böden mit Ausfallkörnung oder deutlich links gekrümmter Körnungslinie sein. Ein Hinweis, ob ein Boden mit Ausfallkörnung vorliegt, ist das Kriterium für intermittierend gestufte Böden in DIN 18196 ($C_u \geq 6$, $C_c = d_{30}^2/(d_{60} \times d_{10}) < 1$ oder $C_c > 3$).



* d_D = untere Grenze der Ausfallkörnung
 ** Gefahr der Ausspülung der feineren Partikel

Bild 8: Nachweisverfahren in Anlehnung an Lafleur

Als Orientierungshilfe für die Einschätzung von Körnungslinien zum Nachweis der Kontakterosion sind in den Bildern 9 und 10 verschiedene Typkurven schematisch dargestellt und im Ablaufdiagramm in Bild 8 referenziert. Das Bild 9 zeigt Typkurven suffosionssicherer Böden und das Bild 10 Typkurven suffosiver Böden. Eine Aussage zur Suffosionsicherheit eines Bodens anhand der Typkurven ist nicht zulässig.

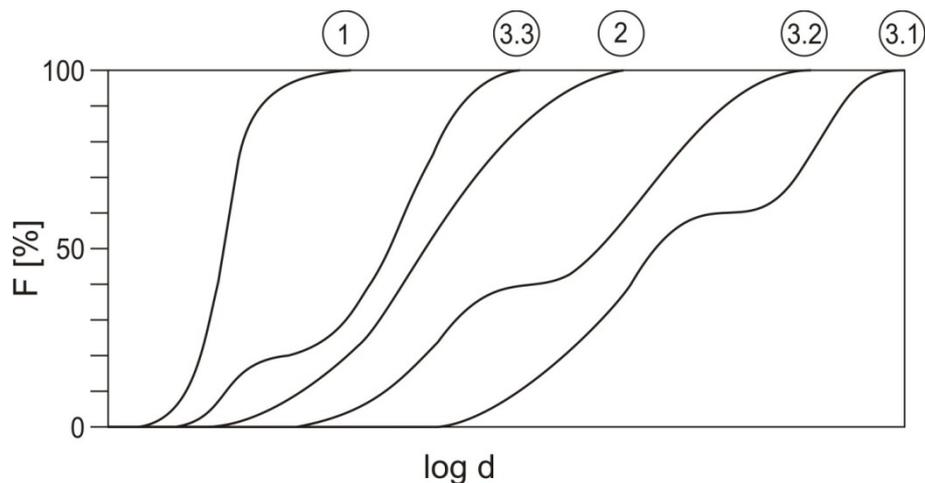


Bild 9: Typkurven für suffosionssichere Böden

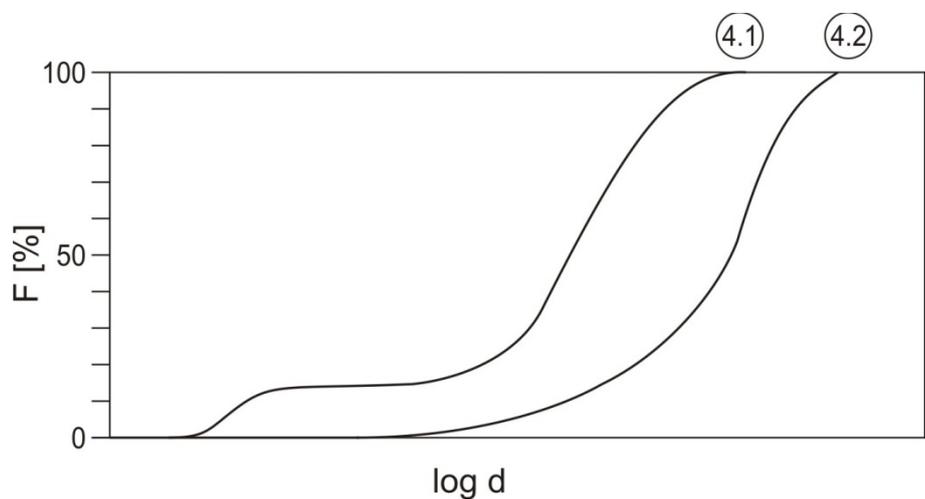


Bild 10: Typkurven für suffosive Böden

4.3.5 Verfahren nach Myogahara

4.3.5.1 Grundlagen

Mit dem Verfahren von Myogahara (1993) kann der Nachweis auf Kontakterosion zwischen groben Fraktionen, wie z. B. zwischen Kornfilter und Wasserbausteinen bei Deckwerken, geführt werden. Das Verfahren berücksichtigt, dass im Porenraum der groben Fraktionen bereits bei relativ kleinen hydraulischen Gradienten (ab ca. $i = 1$) turbulente Strömungen auftreten können.

Grundlage des Verfahrens sind Versuche mit vertikaler Durchströmung von oben nach unten. Als Basisböden wurden 10 verschiedene Sande und Sand-Kies-Gemische gegen ein einkörniges Grobmaterial mit einem Korndurchmesser von 53 mm auf Filterstabilität untersucht.

4.3.5.2 Anwendungsgrenzen

Die Anwendung des Verfahrens ist auf den Nachweis der Kontakterosion zwischen Böden bzw. Mineralstoffgemischen entsprechend der Bodengruppen GW oder GE nach DIN 18196 oder größer beschränkt.

4.3.5.3 Nachweisverfahren

Die Sicherheit gegen Kontakterosion nach Myogahara ist gegeben, wenn gilt:

$$\frac{d_{15,F}}{d_{30,B}} \leq 40 \quad (8)$$

4.4 Fugenerosion

4.4.1 Allgemeines

An der Grenzfläche von einem durchströmten Bodenkörper zu einem Bauwerk oder einer unterlagernden, nicht kohäsiven Bodenschicht können Bereiche in Form von Hohlräumen (Fugen) oder Auflockerungszonen entstehen, in denen kein oder nur ein geringer hydraulischer Widerstand besteht. Die daraus resultierende konzentrierte Strömung in diesen Bereichen kann den Transport von Bodenpartikeln auslösen und zur sogenannten Fugenerosion führen, die sich rückschreitend gegen die Strömungsrichtung entwickelt. Dies gilt auch für bestehende Erosionskanäle infolge abgestorbener Wurzeln oder Wühltiergänge. Die rückschreitende Fugenerosion setzt einen Abtransport der bewegten Bodenpartikel zu einer freien Oberfläche voraus.

4.4.2 Fugenerosion an Massivbauwerken

Im „Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen“, Ausgabe 2011 (MSD 2011), wird ein Verfahren für den Nachweis der Sicherheit gegen Fugenerosion an Massivbauwerken vorgegeben, das die geometrischen und geohydraulischen Bedingungen des Übergangsbereichs zwischen Baugrund und Bauwerk infolge der Bauwerksherstellung berücksichtigt. Grundlage dieses Nachweisverfahrens ist die Forderung ausreichender Sicherheiten für die geotechnischen und geohydraulischen Nachweise (ausreichende Sicherheiten gegen hydraulischen Grundbruch und Aufschwimmen sowie gegen Böschungsbruch) unter ungünstigsten hydraulischen Randbedingungen. Dazu werden in der Strömungsbeurteilung entlang aller Grenzflächen zwischen den Bauwerksteilen und dem Baugrund hydraulisch wirksame Hohlräume (Fugen) und damit kein Potenzialabbau angesetzt, sofern eine Hohlraumbildung wegen der Besonderheiten des Baugrunds, der Bauwerksgeometrie oder des Bauverfahrens nicht ausgeschlossen werden kann. Die so ermittelte Potenzialverteilung ist Grundlage der geotechnischen und geohydraulischen Standsicherheitsnachweise. Werden die Sicherheiten erfüllt, besteht unter den o. g. ungünstigen Annahmen keine Gefahr eines Bodenaustrags. Umlagerungen im Baugrund können damit zwar nicht vollständig verhindert werden, da aber kein Material das System verlässt, besteht auch keine Gefahr der schrittweisen Zerstörung des Damms durch rückschreitende Erosion (Piping).

4.4.3 Fugenerosion an Schichtgrenzen

4.4.3.1 Grundlagen

Grundlage des Nachweises gegen Fugenerosion an Schichtgrenzen ist ein von Sellmeijer entwickeltes Nachweisverfahren gegen rückschreitende Erosion unter einer aus kohäsivem Boden bestehenden Deckschicht (in TAW, 1999). Das Nachweisverfahren nach TAW gilt für Sand als unterlagernden Untergrund mit einer konstanten Schichtdicke. In Bild 11 ist das Grundmodell für das Berechnungsverfahren nach Sellmeijer dargestellt. Das Modell besteht aus einem undurchlässigen Bauteil der Länge L, das auf

einem Untergrund aus Sand aufsteht. Das Bauteil ist beidseitig eingestaut, wobei zwischen Ober- und Unterwasserseite eine Wasserstandsdifferenz ΔH vorhanden ist. Im unterwasserseitigen Bereich der Aufstandsfläche befindet sich ein Erosionskanal der Länge l . Das mathematische Nachweisverfahren basiert auf folgenden Gleichungen:

- Potenzialgleichung zur Beschreibung des Grundwasserstroms in der Sandschicht,
- Strömungsgleichung für die laminare Strömung im Erosionskanal und
- Kräftegleichgewicht für die Schleppkraft des strömenden Wassers und den Rollwiderstand der Sandkörner.

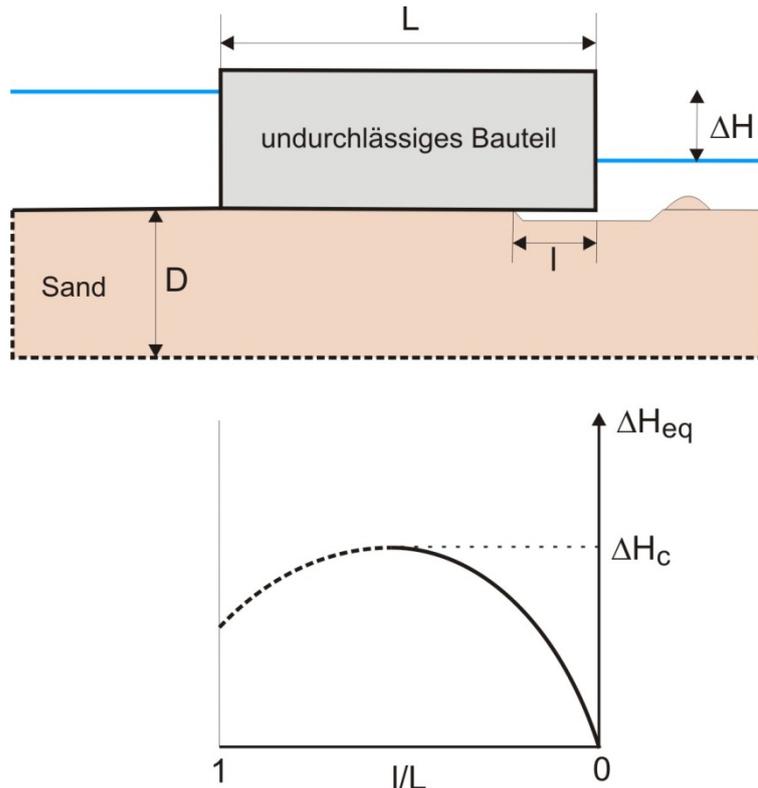


Bild 11: Grundmodell des Berechnungsansatzes nach Sellmeijer (TAW, 1999)

Mit Hilfe dieser Gleichungen kann die maximale Wasserstandsdifferenz ΔH_{eq} am Staubauwerk ermittelt werden, bei dem die Sandkörner gerade noch im Gleichgewicht stehen. Dieser Wert ist abhängig von dem Verhältnis l/L , d. h. der Länge des Erosionskanals l und der Länge des Staubauwerks L , dem Schleppkraftkoeffizienten η , der Durchlässigkeit des unterlagernden Bodens k sowie der Korngröße d_{70} und dem Rollwiderstandswinkel θ der Sandkörner. Für das in Bild 11 dargestellte Modell ergibt sich nach den Untersuchungen von Sellmeijer die maximale Wasserstandsdifferenz, die sogenannte kritische Wasserstandsdifferenz ΔH_c , bei der sich gerade noch ein Gleichgewichtszustand einstellt, bei einem Verhältnis $l/L = 0,5$. Bei kleineren Wasserstandsdifferenzen ΔH_{eq} entsteht ein Gleichgewichtszustand mit einem begrenzten Erosionskanal, dessen Länge von der Größe der Potenzialdifferenz abhängt. Mit steigender Differenz nimmt die Länge des Erosionskanals zu bis ein neuer Gleichgewichtszustand erreicht ist. Der Erosionsprozess kommt immer wieder zum Stillstand solange die beim Gleichgewichtszustand vorhandene Wasserstandsdifferenz ΔH_{eq} die kritische Differenz ΔH_c nicht überschreitet. Nach Erreichen der kritischen Wasserstandsdifferenz ΔH_c beschleunigt sich der Erosionsprozess und die Länge l des Erosi-

onskanals nimmt weiter zu, bis ein Durchbruch zur Oberwasserseite entsteht. Sellmeijer hat auf Basis dieser Modellvorstellungen eine Vielzahl von Berechnungen durchgeführt, bei denen die maßgeblichen Parameter variiert wurden. Die analytische Gleichung (9) für den Nachweis wurde durch Kurvenanpassung an diese Berechnungsergebnisse abgeleitet und in großmaßstäblichen Versuchen validiert.

Sellmeijer hat seinen grundlegenden Ansatz auf die Strömungssituation in Bild 12 übertragen, in der ein Erdbauwerk aus kohäsivem Boden auf einem nicht kohäsiven Bodenmaterial gegründet ist. Dafür wurde von ihm die folgende Gleichung für die Ermittlung der kritischen Wasserstandsdifferenz ΔH_c abgeleitet.

$$\Delta H_c = \alpha \cdot c \cdot \frac{\gamma_p}{\gamma_w} \cdot \tan \theta \cdot (0,68 - 0,10 \cdot \ln c) \cdot L \quad (9)$$

$$\alpha = \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{0,28}{(D/L)^{2,8} - 1}} \quad (10)$$

$$c = \eta \cdot d_{70} \cdot \left(\frac{1}{\kappa \cdot L} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

$$\kappa = \frac{\nu}{g} \cdot k = 1,35 \cdot 10^{-7} \cdot k \quad (12)$$

ΔH_c	Kritische Wasserstandsdifferenz [m]
γ_p	Wichte des Bodens [kN/m ³]
γ_w	Wichte des Wassers [kN/m ³]
θ	Rollwiderstandswinkel des Bodens [°]
L	Länge des Sickerwegs [m]
D	Dicke der durchströmten Schicht [m]
η	Schleppkraftkoeffizient [-]
d_{70}	Korndurchmesser bei 70% Siebdurchgang [m]
κ	Permeabilität [m ²]
ν	kinematische Viskosität [m ² /s]
k	Durchlässigkeit der durchströmten Schicht [m/s]
g	Gravitationskonstante [m/s ²]

4.4.3.2 Nachweisverfahren nach TAW

In TAW (1999) wurde aus dem Ansatz von Sellmeijer eine praktikable Formel für den Nachweis gegen Fugenerosion an Schichtgrenzen abgeleitet. Die Sicherheit gegen Fugenerosion ist demnach gegeben, wenn folgende Bedingung eingehalten wird:

$$(\Delta H - 0,3 \cdot d) \leq \frac{1}{\gamma} \Delta H_c \quad (13)$$

mit dem Sicherheitsfaktor $\gamma = 1,20$ und der vertikalen Länge d des Aufbruchkanals in [m].

Die in Gleichung (13) verwendete kritische Wasserstandsdifferenz ΔH_c errechnet sich nach Gleichung (9), wobei Tabelle 2 Empfehlungen für die Wahl der Parameter beinhaltet. Mit ΔH ist die vorhandene Wasserstandsdifferenz und mit d die vertikale Länge des Aufbruchkanals entsprechend Bild 12 bezeichnet.

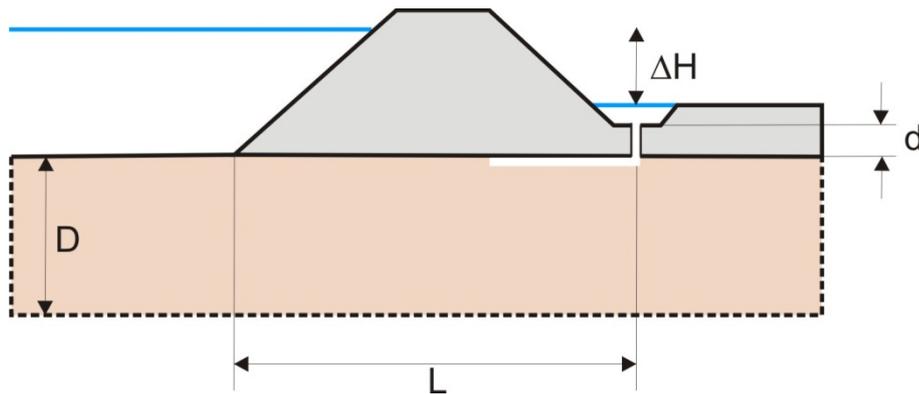


Bild 12: Grundmodell für den Nachweis nach TAW

Für den Nachweis bei Dämmen ist zu unterscheiden, ob am luftseitigen Dammfuß eine durchgehende Deckschicht vorhanden ist ($d > 0$), oder ob die Deckschicht vollständig fehlt oder lokal durchbrochen ist ($d = 0$). Bei einer durchgehenden Deckschicht setzt der Nachweis nach TAW (1999) voraus, dass bereits ein Aufbruchkanal entstanden ist. Es wird also angenommen, dass dort bereits ein Versagen in Form eines hydraulischen Grundbruchs bzw. eines Aufbruchs der Deckschicht stattgefunden hat. Nach MSD (2011) ist bei Dämmen an Bundeswasserstraßen jedoch grundsätzlich eine ausreichende Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch und Aufschwimmen nachzuweisen. Dies gilt insbesondere auch für eine Deckschicht am luftseitigen Dammfuß bei Dammunterströmung, z. B. infolge eines hydraulischen Versagens von Dichtungen. Unter der Voraussetzung einer ausreichenden Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch und Aufschwimmen ist ein Versagen in Form einer Fugenerosion unter der Deckschicht nicht möglich und muss deshalb nicht untersucht werden.

Für den Fall, dass bei einem Damm aus einem kohäsiven Bodenmaterial mit einer unterlagernden nicht kohäsiven Bodenschicht an der Luftseite eine Deckschicht vollständig oder lokal nicht vorhanden ist, ist jedoch der Nachweis gegen Fugenerosion nach TAW (1999) mit $d = 0$ zu führen. Damit ergibt sich aus (13):

$$\Delta H \leq \frac{1}{\gamma} \Delta H_c \quad (14)$$

mit dem Sicherheitsfaktor $\gamma = 1,20$ und den Parametern entsprechend Tabelle 2.

Tabelle 2: Parameter für den Nachweis nach TAW (1999)

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Art des repräsentativen Werts	Anmerkung/ Standardabweichung V_c
ΔH	Wasserstands Differenz	[m]	MHW - Grabensohle MHW – GOK	
L	Länge des Sickerwegs	[m]	unterer charakteristischer Wert	wenn keine Versuchswerte vorhanden: $V_c = 0,10$
D	Mächtigkeit der durchströmten Schicht	[m]	oberer charakteristischer Wert	wenn keine Versuchswerte vorhanden: $V_c = 0,10$
d	vertikale Länge des Aufbruchkanals	[m]	unterer charakteristischer Wert	
θ	Rollwiderstandswinkel des Bodens	[°]	41	
η	Schleppkraftkoeffizient	[-]	0,25	
γ_p	Wichte des Bodens	[kN/m ³]	17	
γ_w	Wichte des Wassers	[kN/m ³]	10	
κ	Permeabilität	[m ²]	oberer charakteristischer Wert	
d_{70}	Korndurchmesser bei 70 % Siebdurchgang	[m]	unterer charakteristischer Wert	0,25

Die charakteristischen Werte werden wie folgt ermittelt:

- oberer charakteristischer Wert $\approx \mu (1 + t_{N-1}^{0,95} V_c)$
- unterer charakteristischer Wert $\approx \mu (1 - t_{N-1}^{0,95} V_c)$

mit μ = Mittelwert oder Schätzwert
 V_c = Standardabweichung
 $t_{N-1}^{0,95}$ = Student-t-Faktor (falls keine Versuchsergebnisse vorliegen: $t_{N-1}^{0,95} = 1,65$)

5 Nachweisverfahren für kohäsive Böden

5.1 Allgemeines

Kohäsive Böden entsprechend der Definition nach Abschnitt 2.1 sind gegen jede Form von Materialtransport weniger empfindlich als nicht kohäsive Böden. Wegen ihrer inneren Bindungskräfte bestehen kohäsive Böden aus untereinander fixierten und damit weniger mobilen Bodenpartikeln als nicht kohäsive Böden. Bei entsprechender Strömungsbelastung können größere Bodenteile, sogenannte Aggregate, aus dem Verbund herausgelöst werden.

Die Gefahr eines Materialtransports sinkt mit zunehmender Kohäsion. Kohäsive Böden können an spannungsfreien Grenzflächen (z. B. an Rissflächen und Hohlräumen infolge von Herstellungsfehlern oder natürlichen Einflüssen) so viel Wasser aufnehmen, dass sie ihre inneren Bindungskräfte und damit ihre

Festigkeit nahezu vollständig verlieren. In Verbindung mit strömendem Wasser erhöht sich die Gefahr des Materialtransports. Sie steigt mit der Größe des hydraulischen Gradienten.

5.2 Suffosion

Bei kohäsiven Böden kann aufgrund der Fixierung der Bodenpartikel durch die Kohäsionskräfte ohne weiteren Nachweis von Suffosionssicherheit ausgegangen werden.

5.3 Kontakterosion

5.3.1 Allgemeines

Bei Schichtgrenzen zwischen kohäsivem und nicht kohäsivem Boden im gewachsenen Untergrund ist kein Nachweis gegen Kontakterosion erforderlich, da das Auftreten spannungsfreier Grenzflächen (Risse) im kohäsiven Boden i. d. R. ausgeschlossen werden kann.

Ist eine Rissbildung in einer kohäsiven Bodenschicht nicht auszuschließen, sollte die Gefahr der Kontakterosion nach dem Verfahren von Sherard (1989) überprüft werden. Die Möglichkeit einer Rissbildung ist in kohäsiven Schichten und Zonen von Erdbauwerken i. d. R. gegeben.

5.3.2 Nachweis für Deckwerke

Für Deckwerke nach MAR (2008) kann davon ausgegangen werden, dass zwischen kohäsivem Boden und nicht kohäsivem Boden eine ausreichende Sicherheit gegen Kontakterosion gegeben ist, wenn die Bedingungen der Tabelle 3 eingehalten sind. Das gilt sowohl für die Kontaktfläche kohäsiver Boden / Kornfilter als auch für die Kontaktfläche Tondichtung / nicht kohäsiver Untergrund.

Tabelle 3: Nachweis Kontakterosion für kohäsive Böden in und unter Deckwerken

kohäsiver Boden oder Tondichtung	Kornfilter oder nicht kohäsiver Boden
$I_p < 0,15$ und $c_U \geq 10 \text{ kN/m}^2$	$d_{10} \leq 0,2 \text{ mm}$ und $d_{60} \leq 0,7 \text{ mm}$
$I_p \geq 0,15$ und $c_U \geq 10 \text{ kN/m}^2$	$d_{10} \leq 0,6 \text{ mm}$ und $d_{60} \leq 2,0 \text{ mm}$

5.3.3 Nachweisverfahren nach Sherard

5.3.3.1 Grundlagen

Die Veranlassung zur Untersuchung des Filtrationsverhaltens von gering durchlässigen Böden durch Sherard waren Schäden an Staudämmen mit mineralischer Kerndichtung. Die Schäden entstanden durch Kontakterosion zwischen der Kerndichtung und dem (grobkörnigen) Stützkörper an konzentrierten Leckstellen, die wiederum durch Spannungsumlagerungen zwischen Kerndichtung und Stützkörper entstanden sind.

In den Laborversuchen von Sherard wurden Strömungskanäle mit einem Durchmesser von 1 bis 10 mm in 25 bis 100 mm dicken Dichtungsschichten (Boden) mit einem Wasserdruck von ca. 4 bar von oben nach unten durchströmt. Für die Dichtungsschicht wurden unterschiedliche Mischungen von Sand, Ton und Schluff verwendet, wobei keine Unterscheidung in kohäsive oder nicht kohäsive Böden erfolgte. Der unter der Dichtungsschicht liegende Filter bestand aus unterschiedlichen Sanden. Sofern der Boden sowohl einen Feinkornanteil von über 15 % als auch einen Kiesanteil mit einem Korndurchmesser über 4,75 mm enthielt, wurde in der Auswertung der Versuche nur der Anteil der Kornfraktionen mit

$d_B \leq 4,75$ mm berücksichtigt. Die Grenze Sand - Feinkorn liegt bei den Untersuchungen von Sherard bei einem Korndurchmesser $d_B \leq 0,074$ mm.

In den Versuchen stellte Sherard fest, dass sich bei der Durchströmung Partikel der Dichtungsschicht aus der Wandung des Strömungskanals herauslösen, suspendieren und in den Filter (Sand) eindringen.

Ist der Filter ausreichend feinkörnig, lagern sich die suspendierten Bodenteilchen in dessen Korngerüst ein und bilden einen stabilen, gering durchlässigen Filterkuchen. Der Materialaustrag kommt zum Erliegen.

Ist der Filter zu gröbkörnig bildet sich kein stabiler Filterkuchen aus. Der Materialtransport von der Suspension in den Sand kommt nicht zum Erliegen, der Strömungskanal vergrößert sich und die Dichtung versagt.

Aus seinen Versuchsergebnissen leitet Sherard verschiedene Kriterien zur Beurteilung der Kontakterosion zwischen Boden und Filter ab. Er unterscheidet hierfür abhängig von dem Anteil der Kornfraktion $d_B < 0,074$ mm vier Bodentypen, von denen ein Bodentyp kohäsiv ist (Bodentyp 1 in Tabelle 4), zwei Bodentypen sowohl kohäsiv als auch nicht kohäsiv (Bodentypen 2 und 3 in Tabelle 4) sein können und ein Bodentyp nicht kohäsiv ist. Der nicht kohäsive Boden wird nachfolgend nicht weiter betrachtet.

Die maßgebliche Bemessungsgröße für den Filter ist der Durchmesser $d_{15,F}$.

5.3.3.2 Anwendungsgrenzen

Obwohl Sherard auch nicht kohäsive Böden untersucht hat, wird die Anwendung des Verfahrens nach Sherard hier auf kohäsive Böden beschränkt. Das Verfahren sollte nur angewendet werden, wenn die Gefahr von Rissen in der kohäsiven Schicht gegeben ist.

5.3.3.3 Nachweisverfahren

Zunächst ist zu prüfen, ob es sich um einen kohäsiven Boden entsprechend Kap. 2.1 handelt. Sind Kornfraktionen $d_B > 4,75$ mm vorhanden sind diese rechnerisch abzutrennen. Für die nachfolgend erläuterte Nachweisführung ist nur der feinere Anteil zu betrachten ($d_{100,B} = 4,75$ mm). Der Boden ist auf der Grundlage des Kornanteils für $d_B \leq 0,074$ mm in eine der drei in Tabelle 4 aufgeführten Bodentypen einzuordnen und nach dem ebenfalls in Tabelle 4 aufgeführten Kriterium die Bemessungsgröße des Filter $d_{15,F}$ zu ermitteln bzw. die Gefährdung auf Kontakterosion zu beurteilen.

Tabelle 4: Bodentypen und Nachweiskriterien nach Sherard

Bodentyp	Bodenbeschreibung	Kriterium
Bodentyp 1	$d_{85,B} < 0,074$ mm	$d_{15,F} \leq 9 \cdot d_{85,B}$ und $d_{15,F} > 0,2$ mm
Bodentyp 2	$d_{40,B} < 0,074$ mm $d_{85,B} \geq 0,074$ mm	$d_{15,F} = 0,7$ mm
Bodentyp 3	$d_{15,B} < 0,074$ mm $d_{40,B} \geq 0,074$ mm	$d_{15,F} \leq \frac{40 - F_{0,074}}{40 - 15} \cdot (4 \cdot d_{85} - 0,7) + 0,7$ [mm] $F_{0,074}$ ist der Anteil des Bodens mit $d_B < 0,074$ mm ohne Kornanteil $d > 4,75$ mm

6 Literatur

- Burenkova, V. V. (1993): Assessment of the suffosion in non-cohesive and graded soils, in: Proceedings "Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering", Brauns, Heibaum & Schuler (eds) Balkema, Rotterdam
- Busch, K.-F., Luckner, L. und Thiemer, K. (1993): Geohydraulik, Gebrüder Bornträger, Berlin und Stuttgart
- Bertram, G.E. (1940): An Experimental Investigation of Protective Filters," Harvard University, Soil Mechanics Series No.7, Publication Number 267,1940, Graduate School of Engineering
- Cistin, J. (1967): Zum Problem mechanischer Deformationen nichtbindiger Lockergesteine durch die Sickerwasserströmung in Erddämmen, Wasserwirtschaft, Heft 2
- Kenney, T., Lau, D. (1985): Internal stability of granular filters, Canadian Geotechnical Journal, J 22, p. 215 – 225
- Kenney, T., Lau, D. (1986): Internal stability of granular filters - Reply, Canadian Geotechnical Journal, J. 23, p. 141 – 418
- Lafleur, J., Mlynarek, J., Rollin A.L. (1993): Filter criteria for well graded cohesionless soils, in: Proceedings "Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering", Brauns, Heibaum & Schuler (eds) Balkema, Rotterdam. p. 97 - 106
- Lattermann, E. (1997): Wasserbau in Beispielen, Werner Verlag, Düsseldorf
- Myogahara, Y., Morita, S., Kuroki, H., Sueoka, T.(1993): Piping stability in the filter of rock-fill dams, in: Proceedings Filters in Geotechnical Engineering, Hrsg: Brauns, Heibaum, Schuler, Balkema, Rotterdam p. 107 – 111
- Sherard, J.L. (1989): Critical Filters for Impervious Soils, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE 115 (7), p. 727 - 947
- Sherard, J. L., Dunnigan, L. P., Talbot, J. R. (1984): "Basic properties of sand and gravel filters." Geotech. Engrg., ASCE, 110(6), 684-700.
- Terzaghi (1922): "Failure of dam foundations by piping and means for preventing it.", Die Wasserkraft, Zeitschrift für die gesamte Wasserwirtschaft, 17(24), p. 445-449.
- Terzaghi, Peck (1948): Soil mechanics in engineering practice, Wiley, New York,
- U.S. Waterways Experiment Station (1941): Investigation of filter requirements for underdrains, Technical Memorandum No. 183-1
- Ziems (1967): Neue Erkenntnisse hinsichtlich der Verformungsbeständigkeit der Lockergesteine gegenüber Wirkungen des Sickerwassers, Wasserwirtschaft-Wassertechnik, 17. Jahrgang, Heft 2, S. 50-55

7 Bezugsregelwerke

- DIN 18196 (2011): Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke
- DIN 4095 (1990): Baugrund; Dränung zum Schutz von baulichen Anlagen - Planung und Ausführung, Beuth Verlag, Berlin
- DWA-M 507-1 (2011): Deiche an Fließgewässern - Teil 1: Planung, Bau und Betrieb, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef
- MSD (2011): Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe
- MAK (2012): Merkblatt für die Anwendung von Kornfiltern (MAK), Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Karlsruhe
- MAR (2008): Merkblatt Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Wasserstraßen (MAR), Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Karlsruhe, 2008
- TAW (1999): Technical Report on Sand Boils (Piping), Technical Advisory Committee on Flood Defences (TAW), The Netherlands
- WAPRO (1970): Werkstandard Nachweis der Beständigkeit von Erdstoffen gegenüber der Einwirkung der Sickerwasserströmung, Suffosion nichtbindiger Erdstoffe, WAPRO 4.04 Blatt 2; VEB Projektierung Wasserwirtschaft, Halle

Anlage 1: Beispiele zum Nachweis der Suffosionssicherheit nach MMB (Kap. 4.2)

Beim Nachweis der Sicherheit gegen Suffosion sind die innerhalb eines Körnungsbandes liegenden einzelnen Körnungslinien zu überprüfen.

Für die in Bild A1.1 dargestellte Körnungslinie eines Bodens (SU* nach DIN 18196) wird der Nachweis der Suffosionssicherheit nach Kapitel 4.2.6 geführt.

Die Porenzahl e wurde zu 0,5 ermittelt.

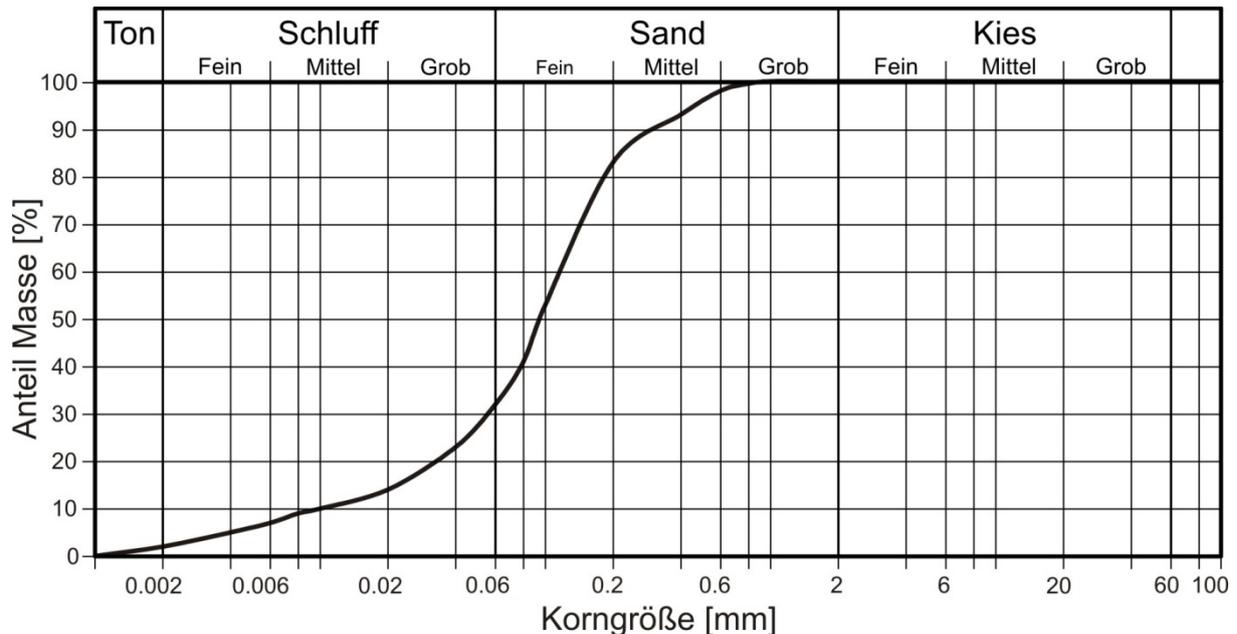


Bild A1.1: Körnungslinie

Schritt 1: Prüfung auf kohäsiven bzw. nicht kohäsiven Boden (Kap. 2.1)

Da sich die Nachweise gegen Materialtransport für kohäsive und nicht kohäsive Böden grundlegend unterscheiden, muss zuerst überprüft werden, ob es sich um einen kohäsiven oder nicht kohäsiven Boden handelt.

Sofern keine genaueren Laboruntersuchungen vorliegen, erfolgt diese Unterscheidung anhand der Definition in Kapitel 2.1 in Anlehnung an die Klassifizierung nach DIN 18196. Demnach gelten Böden der Bodengruppe UL, TL und grobkörniger als nicht kohäsiv.

Bei dem in Bild A1.1 dargestellten Boden handelt es sich um einen SU* nach DIN 18196, d. h. der Boden ist als nicht kohäsiv einzustufen.

Schritt 2: Nachweis nach dem vereinfachten Verfahren (Kap. 4.2.2)

Ungleichförmigkeit des Bodens: $C_U = d_{60} / d_{10} = 0,12 \text{ mm} / 0,01 \text{ mm} = 12$

$C_U > 8$

→ Das vereinfachte Verfahren ist nicht anwendbar.

Schritt 3: Nachweis nach dem Verfahren von Ziems (Kap. 4.2.3)

keine Ausfallkörnung, keine starke Krümmungsänderung, kein Knick vorhanden

→ Das Verfahren von Ziems kann angewendet werden.

Nach Ziems ist ein Erdstoff sicher gegen Suffosion wenn gilt:

$$\frac{d_{\min}}{F_S \cdot d_k} \geq 1,5$$

$d_{\min} = d_3 = 0,003 \text{ mm}$ (gewählt: es wird ein Materialaustrag von 3 % zugelassen)

$F_S = 0,4$ (max F_S unter Annahme einer stationären Strömung)

$$d_k = 0,455 \cdot \sqrt[6]{C_U} \cdot e \cdot d_{17} = 0,455 \cdot \sqrt[6]{12} \cdot 0,5 \cdot 0,023 \text{ mm} = 0,0079 \text{ mm}$$

$$\frac{0,003 \text{ mm}}{0,4 \cdot 0,0079 \text{ mm}} = 0,95 < 1,5$$

Der Boden ist nach dem Verfahren von Ziems suffosiv. Nach dem Ablaufdiagramm in Bild 6 (Abschnitt 4.2.6) ist der Nachweis gegen Suffosionssicherheit nach Kenney und Lau weiter zu führen.

Schritt 4: Nachweis nach dem Verfahren von Kenney und Lau (Kap. 4.2.4)

a) Bestimmung des zu betrachtenden feinkörnigen Bereichs

Bei dem Verfahren nach Kenney und Lau wird nicht die gesamte Körnungslinie sondern nur die feinsten 20 oder 30 Masse-% betrachtet. Um dies zu entscheiden wird die Körnungslinie bei 30 Masse-% aufgetrennt (siehe Bild A1.2). Ergibt sich für den groben Anteil der Körnungslinie eine Ungleichförmigkeit $C_{U,grob} \leq 3$, so sind für den Nachweis die feinsten 30 % zu betrachten. Ist $C_{U,grob} > 3$ sind die feinsten 20 % maßgebend. (siehe Bild A1.4).

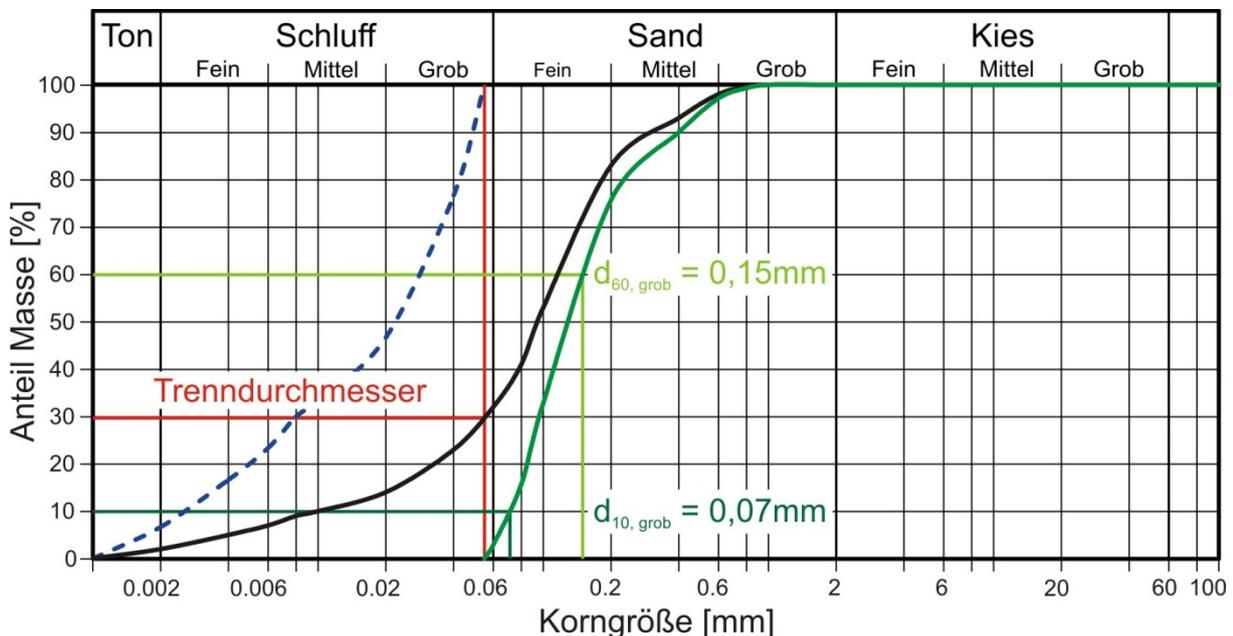


Bild A1.2: Ermittlung von $C_{U,grob}$; Auftrennen bei 30 %

Abtrennen der feinsten 30 % (siehe Bild A1.2).

$$C_{U,grob} = d_{60,grob} / d_{10,grob} = 0,15 \text{ mm} / 0,07 \text{ mm} = 2,1 < 3$$

Es müssen die feinsten 30 % betrachtet werden, da $C_{U,grob} \leq 3$ ist (siehe Bild A1.4).

b) Ermittlung der H(F)-Kurve auf Grundlage der Körnungslinie

Für den Nachweis wird die Körnungslinie in eine H(F)-Kurve umgewandelt.

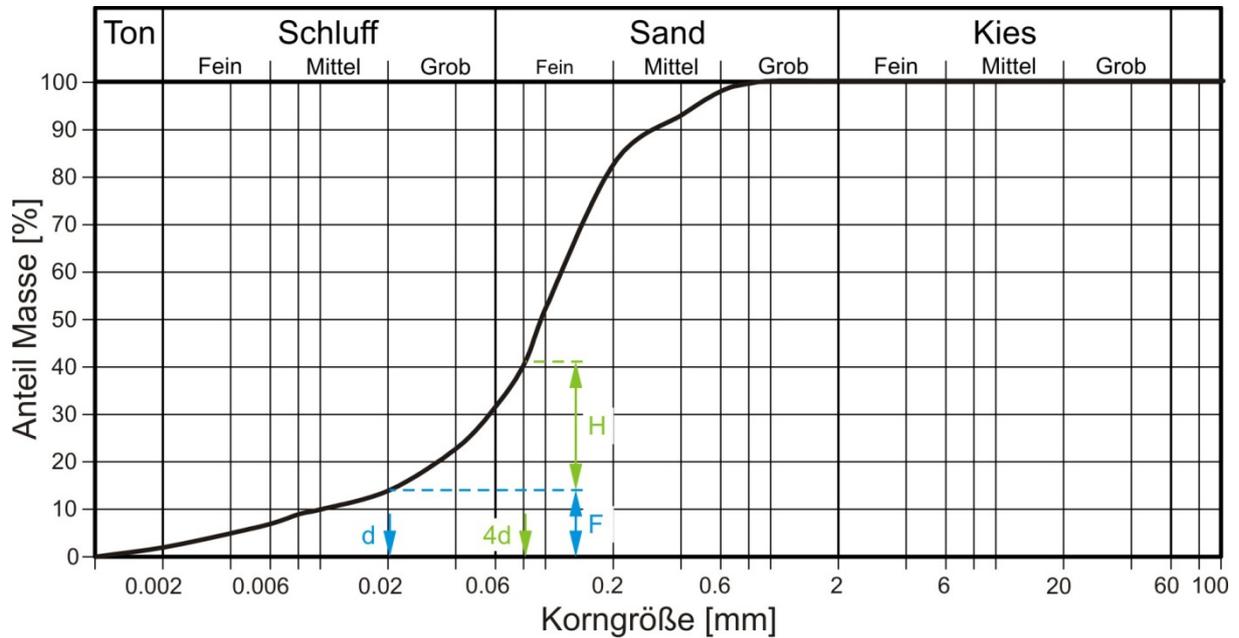


Bild A1.3: Parameter für die Ermittlung der H(F)-Kurve

Das prinzipielle Vorgehen wird beispielhaft für den Durchmesser $d = 0,02$ mm gezeigt.

$$4 \cdot d = 4 \cdot 0,02 \text{ mm} = 0,08 \text{ mm}$$

$$F = 14 \% \quad (\text{Masseanteil bei } d, \text{ siehe auch Bild 2})$$

$$H = 41 \% - 14 \% = 27 \% \quad (\text{Masseanteil bei } 4d \text{ abzüglich } F, \text{ siehe auch Bild 2})$$

Wird dies für mehrere Durchmesser zwischen d_0 und d_{30} bzw. d_{20} durchgeführt, erhält man die in Bild A1.4 dargestellte H(F)-Kurve. (Anm.: Für den Suffosionsnachweis im Beispiel ist die Ermittlung der H(F)-Kurve bis $F = 30 \%$ ($d = d_{30}$) ausreichend)

Liegt die ermittelte H(F)-Kurve oberhalb der Geraden $H = 1,3 \cdot F$ (für $F \leq 30 \%$), so ist der Boden als suffosionssicher zu bewerten.

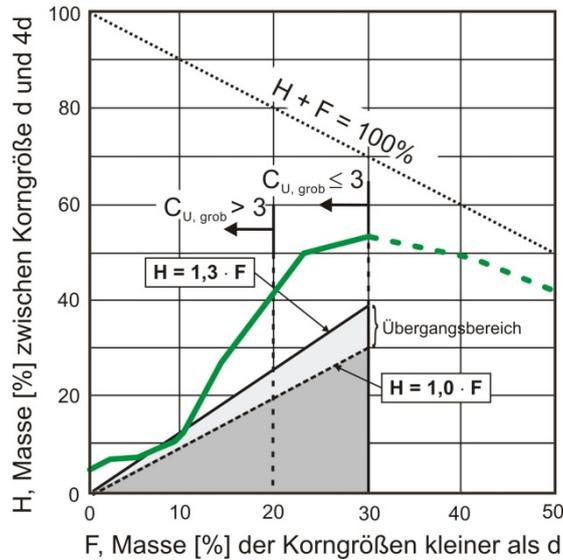


Bild A1.4: *H(F)*-Diagramm nach Kenney und Lau

Der Boden liegt nach dem Verfahren von Kenney und Lau im Übergangsbereich zwischen hartem ($H = 1,3 \cdot F$) und weichem Kriterium ($H = 1,0 \cdot F$). Daher wird zusätzlich der Nachweis nach Burenkova durchgeführt (s. Bild 6, Abschnitt 4.2.6).

Schritt 5: Nachweis nach dem Verfahren von Burenkova (Kap. 4.2.5)

Ein Boden gilt nach dem Verfahren von Burenkova als suffosionssicher, wenn gilt:

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

Mit

$$h' = d_{90} / d_{60} = 0,30 \text{ mm} / 0,12 \text{ mm} = 2,5 \quad \text{und}$$

$$h'' = d_{90} / d_{15} = 0,30 \text{ mm} / 0,021 \text{ mm} = 14,3$$

ergibt sich

$$0,76 \cdot \lg(14,3) + 1 = 1,88$$

$$1,86 \cdot \lg(14,3) + 1 = 3,15$$

$$1,88 < 2,50 < 3,15$$

Der Boden ist nach dem Verfahren von Burenkova suffosionssicher.

Schritt 6: Bewertung der Ergebnisse

Da der Boden nach Kenney und Lau im Übergangsbereich liegt und nach Burenkova suffosionssicher ist, wird der Boden abschließend als suffosionssicher bewertet.

Anlage 2: Beispiele zum Nachweis der Kontakterosion nach MMB (Kap. 4.3)

Nachfolgend wird der feinere Boden 1 als Boden (Index „B“) und der gröbere Boden 2 als Filter (Index „F“) bezeichnet.

Beispiel 1: Nachweis nach Terzaghi (Kap. 4.3.2)

In Bild A2.1 sind die Körnungslinien der für die nachfolgenden Beispielrechnungen verwendeten Böden dargestellt.

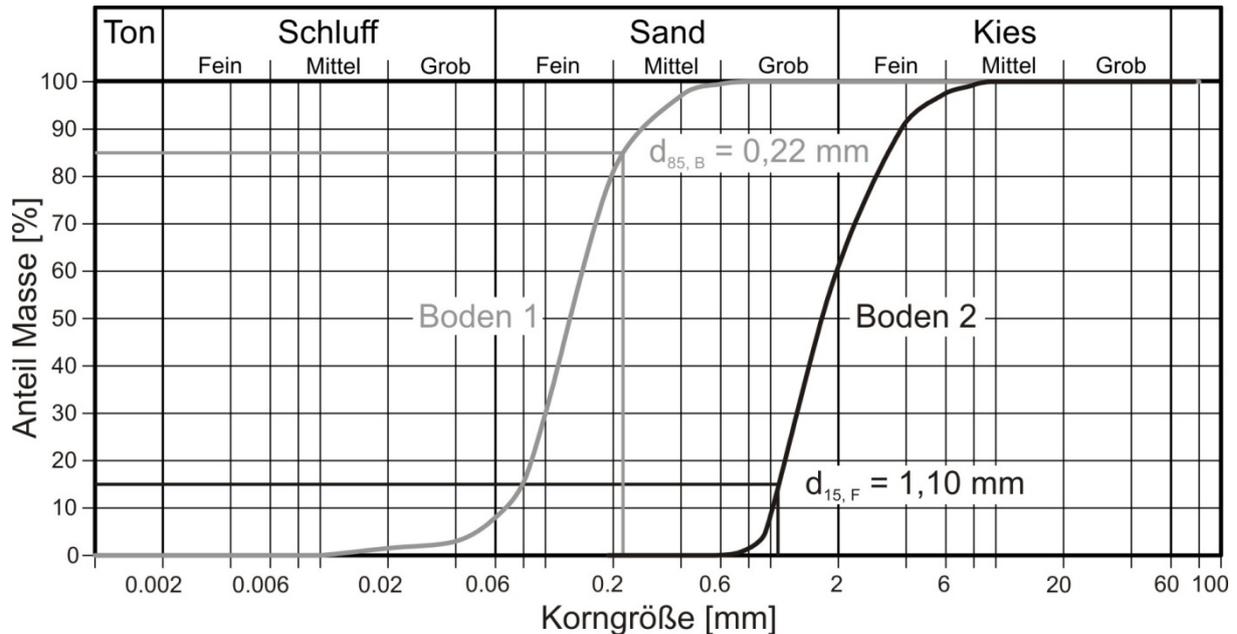


Bild A2.1: Körnungslinien

Schritt 1: Überprüfen der Anwendungsgrenzen

Das Verfahren nach Terzaghi darf nur für Sande mit einer Ungleichförmigkeit $C_U < 2$ angewendet werden.

$$C_{U,B} = d_{60,B} / d_{10,B} = 0,13 \text{ mm} / 0,066 \text{ mm} = 1,97$$

$$C_{U,F} = d_{60,F} / d_{10,F} = 2,0 \text{ mm} / 1,05 \text{ mm} = 1,90$$

Für die Böden in Bild A2.1 ist das Verfahren nach Terzaghi anwendbar.

Schritt 2: Nachweisführung

Nach Terzaghi sind zwei Böden sicher gegen Kontakterosion wenn gilt:

$$f = \frac{d_{15,F}}{d_{85,B}} \leq 5$$

$$d_{15,F} = 1,10 \text{ mm}, d_{85,B} = 0,22 \text{ mm} \quad (\text{s. Bild A2.1})$$

$$f = \frac{1,1 \text{ mm}}{0,22 \text{ mm}} = 5 \leq 5$$

Die Böden sind nach Terzaghi sicher gegen Kontakterosion.

Beispiel 2: Nachweis nach Cistin und Ziems (Kap. 4.3.3)

In Bild A2.2 sind die Körnungslinien der Böden für die nachfolgenden Beispielrechnungen dargestellt.

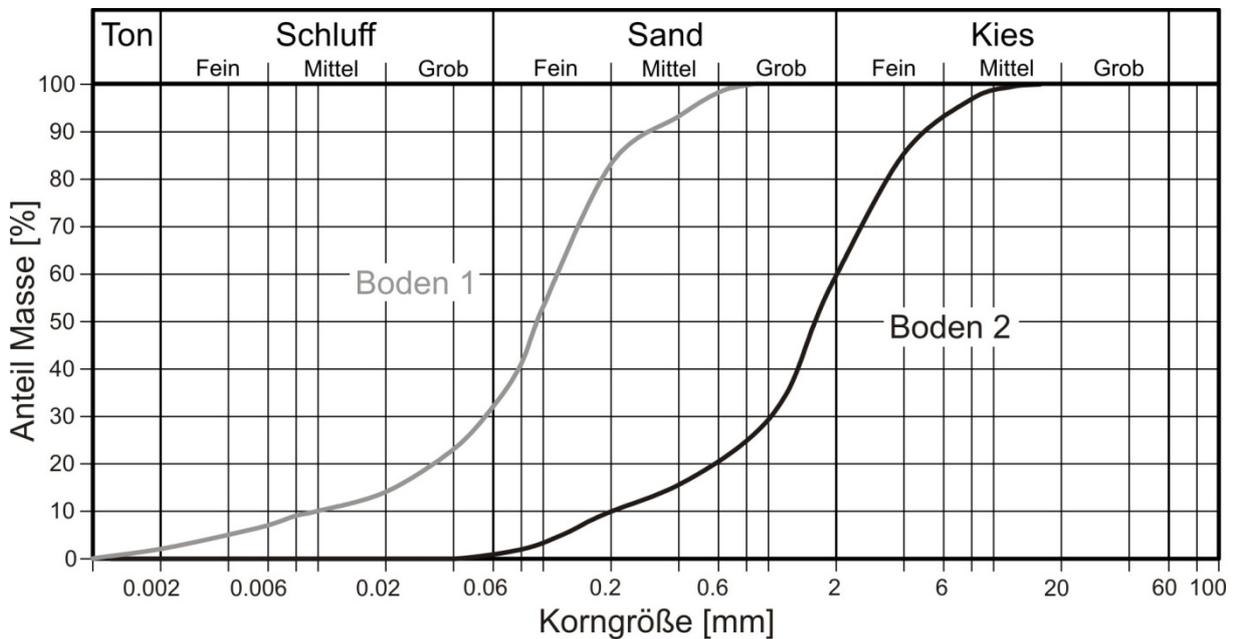


Bild A2.2: Körnungslinien

Schritt 1: Überprüfen der Anwendungsgrenzen (Kap. 4.3.3.2)

$$d_{10,B} = 0,01 \text{ mm}$$

$$d_{60,B} = 0,12 \text{ mm}$$

$$C_{U,B} = d_{60,B} / d_{10,B} = 0,12 \text{ mm} / 0,01 \text{ mm} = 12$$

1. $C_{U,B} = 12 \leq 20$ erfüllt

$$d_{10,F} = 0,2 \text{ mm}$$

$$d_{60,F} = 20 \text{ mm}$$

$$C_{U,F} = d_{60,F} / d_{10,F} = 20 \text{ mm} / 0,2 \text{ mm} = 10$$

2. $C_{U,F} = 10 \leq 18$ erfüllt

3. $d_{\max,F} = 20 \text{ mm} \leq 100 \text{ mm}$ erfüllt

4. Annahme $i \leq 9$ erfüllt

5. nicht relevant

6. Für die Anwendung des Nachweises nach Cistin und Ziems müssen die Böden suffosionssicher sein.

Die Überprüfung erfolgt mit den in Kapitel 4.2 genannten Nachweisverfahren.

Boden 1 („B“):

Die Suffosionssicherheit von Boden 1 wurde bereits in Anlage 1 nachgewiesen. Der Boden ist suffosionssicher.

Boden 2 („F“)

a) vereinfachtes Verfahren

$C_{U,F} > 8$: das vereinfachte Verfahren kann nicht angewendet werden

b) Nachweis nach Ziems

keine Ausfallkörnung, keine starke Krümmung, kein Knick vorhanden

→ das Verfahren von Ziems kann für Boden 2 angewendet werden.

$$d_{\min,F} = d_3 = 0,08 \text{ mm} \quad (\text{es wird ein Materialaustrag von 3 \% zugelassen})$$

$$F_S = 0,4 \quad (\text{stationäre Strömung})$$

$$e = 0,5 \quad (\text{Ergebnis aus Versuchen})$$

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

$$d_k = 0,455 \cdot \sqrt[6]{10} \cdot 0,5 \cdot 0,4 \text{ mm} = 0,13 \text{ mm}$$

$$\frac{d_{\min}}{F_S \cdot d_k} \geq 1,5$$

$$\frac{0,08 \text{ mm}}{0,4 \cdot 0,13 \text{ mm}} = 1,54 \geq 1,5$$

→ Boden 2 ist suffosionssicher.

Schritt 2: Nachweisführung

Zum Nachweis der Sicherheit gegen Kontakterosion nach Cistin und Ziems wird das vorhandene Abstandsverhältnis $A_{50,\text{vorh}}$ mit dem zulässigen Abstandsverhältnis $A_{50,\text{zul}}$ verglichen. Die untersuchten Bodenschichten sind gegeneinander erosionsstabil, wenn das vorhandene Abstandsverhältnis $A_{50,\text{vorh}}$ kleiner bzw. gleich dem zulässigen Abstandsverhältnis $A_{50,\text{zul}}$ ist.

erforderliche Parameter für den feineren Boden 1:

$$d_{10,B} = 0,01 \text{ mm}$$

$$d_{60,B} = 0,12 \text{ mm}$$

$$C_{U,B} = d_{60,B} / d_{10,B} = 0,12 \text{ mm} / 0,01 \text{ mm} = 12$$

$$d_{50,B} = 0,09 \text{ mm}$$

erforderliche Parameter für den gröberen Boden 2:

$$d_{10,F} = 0,2 \text{ mm}$$

$$d_{60,F} = 20 \text{ mm}$$

$$C_{U,F} = d_{60,F} / d_{10,F} = 20 \text{ mm} / 0,2 \text{ mm} = 10$$

$$d_{50,F} = 1,6 \text{ mm}$$

Annahme: abgerundete Kornform des gröberen Bodens

$$A_{50,\text{zul}} = 27,6 \quad (\text{Wert aus Bild 7, Abschnitt 4.3.3.3 abzulesen})$$

$$A_{50,\text{vorh}} = d_{50,F} / d_{50,B} = 1,6 \text{ mm} / 0,09 \text{ mm} = 17,8 < A_{50,\text{zul}}$$

Die Bodenschichten sind gegeneinander **erosionssicher!**

Beispiel 3: Nachweis in Anlehnung an Lafleur (Kap. 4.3.4)

In Bild A2.3 sind die Körnungslinien der für die nachfolgenden Beispielrechnungen verwendeten Böden dargestellt. Die dargestellten Körnungslinien erfüllen nicht die Anwendungsgrenzen der vorgenannten Verfahren nach Terzaghi und Ziems, so dass das Nachweisverfahren in Anlehnung an Lafleur anzuwenden ist.

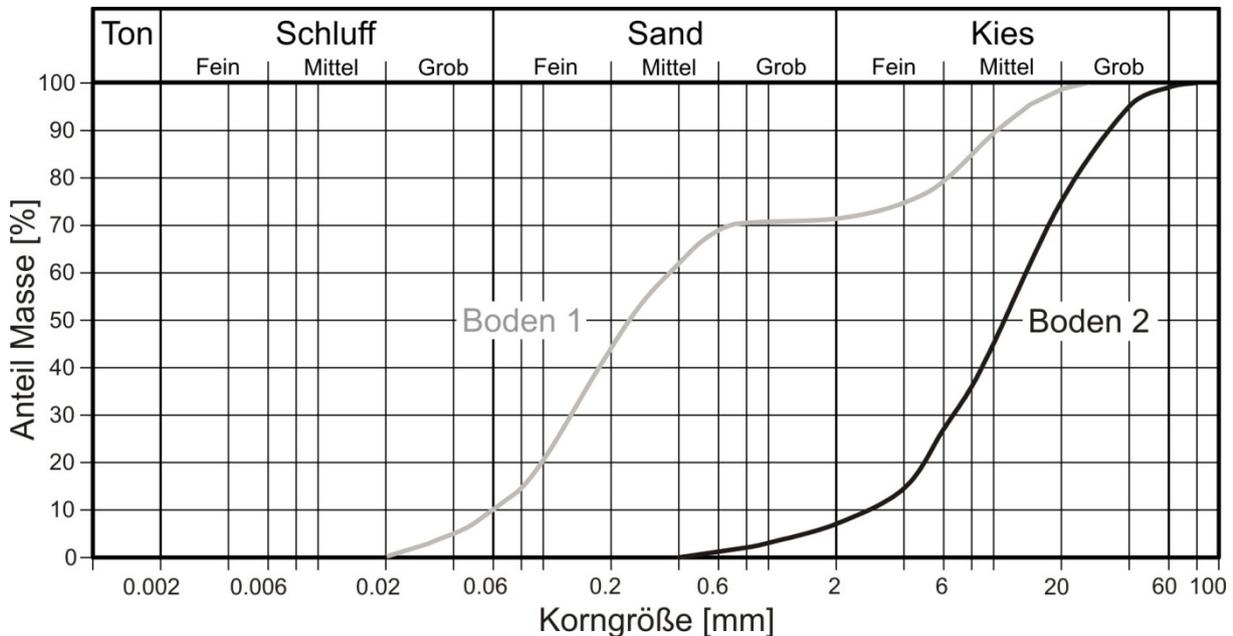


Bild A2.3: Körnungslinien

Der Nachweis erfolgt gemäß dem Ablaufdiagramm nach Bild 6 in Kapitel 4.3.4.3.

Schritt 1: Prüfung, ob Boden 1 suffosionssicher ist

Die Überprüfung erfolgt mit den in Kapitel 4.2 genannten Nachweisverfahren.

Die Körnungslinie von Boden 1 hat keinen stetigen Verlauf, daher kann zur Überprüfung der Suffosionssicherheit des Bodens weder das vereinfachte Verfahren noch das Verfahren von Ziems angewendet werden.

Nachweis nach Kenney und Lau:

$$C_{U, \text{grob}} = d_{60} / d_{10} = 2,4 \text{ mm} / 0,16 \text{ mm} = 15 > 3$$

(Anm.: Aufspaltung der Körnungslinie bei 30 % ist hier nicht dargestellt)

Es müssen nur die feinsten 20 % betrachtet werden, da $C_{U, \text{grob}} > 3$ ist.

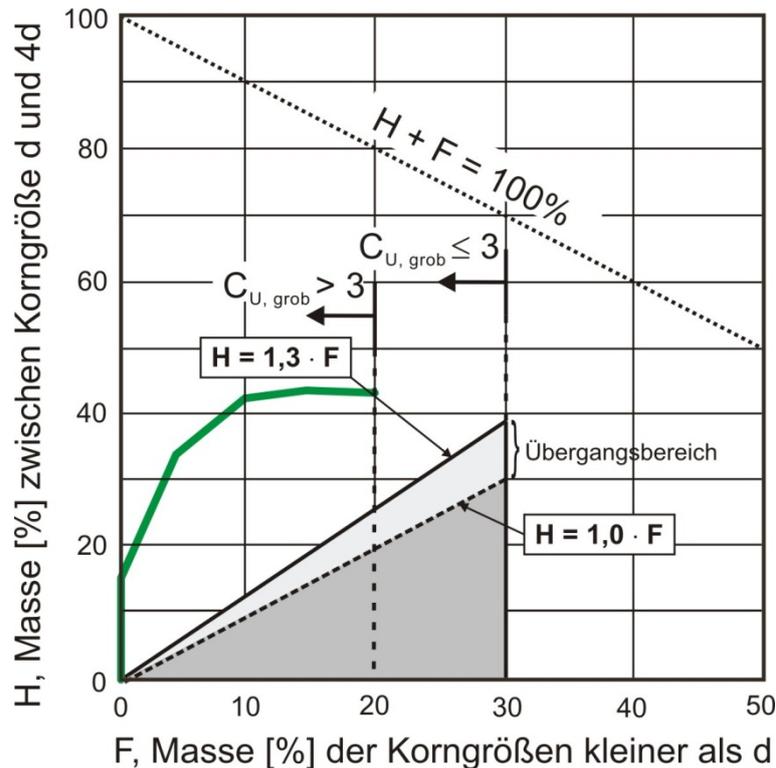


Bild A2.4: H(F)-Diagramm nach Kenney und Lau

Der Boden ist nach dem Verfahren von Kenney und Lau suffosionssicher, da die H(F)-Kurve durchgehend oberhalb der Grenzlinie $H = 1,3 \cdot F$ des harten Kriteriums liegt.

Schritt 2: Prüfung, ob der Boden gleichförmig ist

Die Ungleichförmigkeit von Boden 1 ist

$$C_{U,B} = d_{60,B} / d_{10,B} = 0,37 \text{ mm} / 0,06 \text{ mm} = 6,2 > 6. \text{ Der Boden ist nicht gleichförmig}$$

Schritt 3: Prüfung, ob der Boden eine Ausfallkörnung hat

Der Boden hat eine Ausfallkörnung im Grobsandbereich, die oberhalb von $d_{50,B}$ liegt.

Schritt 4: Nachweisführung

Die Böden sind nach dem Verfahren von Lafleur sicher gegen Kontakterosion, wenn gilt:

$$d_{15,F} / 5 < d_l$$

Nach den unter Schritt 1 bis 3 durchgeführten Überprüfungen ist der Boden 1 dem Typ 3.1 nach Kapitel 4.3.4.3 zuzuordnen.

Für Typ 3.1 ist $d_l = d_{50,B}$ (Bild 7, Kapitel 4.3.4.3)

$$d_{50,B} = 0,23 \text{ mm}$$

$$d_{15,F} / 5 = 4,1 \text{ mm} / 5 = 0,82 \text{ mm} > 0,23 \text{ mm}$$

Die Bodenschichten sind gegeneinander geometrisch **nicht erosionsicher**.

Anlage 3: Beispiel zum Nachweis gegen Fugenerosion nach MMB (Kap. 4.4)

Bei dem gewählten Beispiel (Bild A3.1) handelt es sich um einen geringdurchlässigen Damm auf einer 8 m mächtigen Sandschicht (SW).

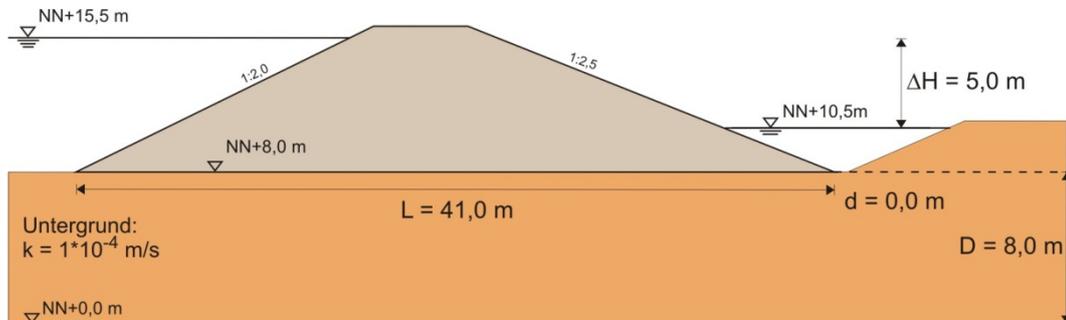


Bild A3.1: Dammquerschnitt für den Nachweis gegen Fugenerosion

Die Sicherheit gegen Fugenerosion ist nach Kap. 4.4.3 gegeben, wenn folgende Bedingung eingehalten wird:

$$\Delta H \leq \frac{1}{\gamma} \Delta H_c$$

In Tabelle A3.1 sind die für die Ermittlung von ΔH_c benötigten Parameter zusammengestellt, die sich nach Tabelle 2 und Formeln (9) bis (12) in Abschnitt 4.4.3.2 ergeben.

Tabelle A3.1: Eingangsparameter für den Nachweis gegen Fugenerosion

Formelzeichen	Wert	Einheit	Bezeichnung
d_{70}	0,001	[m]	Korndurchmesser bei 70% Siebdurchgang
θ	41	[°]	Rollwiderstandswinkel des Bodens
γ_p	17	[kN/m ³]	Wichte des Bodens
γ_w	10	[kN/m ³]	Wichte Wasser
L	15	[m]	Länge Sickerweg
D	8	[m]	Mächtigkeit der durchströmten Schicht
d	0	[m]	Dicke der kohäsiven Schicht unterhalb des Seitengrabens
η	0,25	[-]	Schleppkraftkoeffizient
ν	$1,3 \cdot 10^{-6}$	[m ² /s]	kinematische Viskosität
g	9,81	[m/s ²]	Gravitationskonstante
γ	1,2	[-]	Sicherheitsfaktor

Mit den in Tabelle A3.1 angegebenen Werten und den in Kapitel 4.4 genannten Formeln kann die kritische Wasserstandsdifferenz ΔH_c wie folgt ermittelt werden.

$$\alpha = \left(\frac{D}{L} \right)^{\left(\frac{0,28}{(D/L)^{2,8} - 1} \right)} = \left(\frac{8 \text{ m}}{41 \text{ m}} \right)^{\left(\frac{0,28}{(8 \text{ m} / 41 \text{ m})^{2,8} - 1} \right)} = 1,59$$

$$\kappa = \frac{v}{g} \cdot k = \frac{1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}{9,81 \text{ m/s}^2} \cdot 1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} = 1,36 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$$

$$c = \eta \cdot d_{70} \cdot \left(\frac{1}{\kappa \cdot L} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,25 \cdot 0,001 \text{ m} \cdot \left(\frac{1}{1,36 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot 41 \text{ m}} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,30$$

$$\Delta H_c = \alpha \cdot c \cdot \frac{\gamma_p}{\gamma_w} \cdot \tan \theta \cdot (0,68 - 0,10 \cdot \ln c) \cdot L$$

$$\Delta H_c = 1,59 \cdot 0,30 \cdot \frac{17 \text{ kN/m}^3}{10 \text{ kN/m}^3} \cdot \tan 41^\circ \cdot (0,68 - 0,1 \cdot \ln 0,30) \cdot 41 \text{ m} = 23,35 \text{ m}$$

$$\Delta H = (15,5 \text{ m} - 5,5 \text{ m}) = 5,0 \text{ m}$$

$$\frac{1}{\gamma} \cdot \Delta H_c = \frac{1}{1,2} \cdot 23,35 \text{ m} = 19,46 \text{ m}$$

$$(\Delta H - 0,3 \cdot d) = 5,0 \text{ m} \leq 19,46 \text{ m} = \frac{1}{\gamma} \Delta H_c$$

→ Es entsteht kein durchgehender Erosionskanal von der Luft- zur Wasserseite. Somit besteht keine Gefahr eines Erosionsgrundbruchs infolge Fugenerosion.

Anm.: Neben dem Nachweis gegen Materialtransport (hier Fugenerosion) ist nach MSD zusätzlich noch der Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch am Dammfuß zu führen.