

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Laursen, Charlotte; Kayser, Jan**

## **Suffosiver Materialtransport in durchströmten Böden**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/100825>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Laursen, Charlotte; Kayser, Jan (2012): Suffosiver Materialtransport in durchströmten Böden. In: 8. Kolloquium 'Bauen in Boden und Fels', 17. und 18. Januar 2012 in Ostfildern/Stuttgart. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen. S. 197-203.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# Suffosiver Materialtransport in durchströmten Böden

Dipl.-Ing. Charlotte Laursen  
Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Deutschland

Dr.-Ing. Jan Kayser  
Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Deutschland

## Zusammenfassung

Beim Nachweis der Standsicherheit von Dämmen und Deichen spielt neben der äußeren Standsicherheit die Sicherheit gegen hydrodynamische Bodenbewegungen eine wichtige Rolle. Die Suffosion ist eine der wesentlichen Arten dieser hydraulisch bedingten Bodenumlagerungen. Für den Nachweis der Suffosionssicherheit gibt es verschiedene Verfahren mit jeweiligen, z. T. sehr engen Anwendungsgrenzen. In dem Beitrag werden die wesentlichen Verfahren und die Ergebnisse umfangreicher Vergleichsberechnungen vorgestellt. Basierend auf den Vergleichsberechnungen wurde eine Vorgehensweise für die Nachweisführung erarbeitet, wie sie zukünftig für Dämme an Bundeswasserstraßen empfohlen und in einem neuen BAW-Merkblatt Materialtransport im Boden (MMB) verankert wird.

## 1. Einleitung

Voraussetzung für die Standsicherheit von Dämmen und Deichen ist neben einer ausreichenden äußeren Standsicherheit, d.h. der Sicherheit gegen Böschungsbruch und Aufschwimmen bzw. hydraulischen Grundbruch auch eine ausreichende Sicherheit gegen hydrodynamische Bodenbewegungen in den Erdbauwerken und im Untergrund bei Durchströmung. Die wesentlichen Arten dieses durch die Strömungskräfte des Wassers ausgelösten Transportes von Kornfraktionen sind die Suffosion und die Kontakterosion.

Suffosion ist die Umlagerung und der Transport der feinen Fraktionen eines ungleichförmigen nicht-bindigen Bodens im Porenraum des Korngerüsts der groben Fraktionen durch die Strömung des Wassers. Voraussetzung für ihr Auftreten ist eine Bodenstruktur, die neben einem tragenden groben Korngerüst (Skelett), das die Spannungen im Boden aufnimmt, einen annähernd spannungsfreien feinen Bodenanteil enthält (s. Bild 1, oben). Füllt der Feinkornanteil die Poren des tragenden Korngerüsts aus und nimmt damit ebenfalls Spannungen auf, ist ein suffosiver Materialtransport nicht möglich. Böden mit un stetigen Körnungslinien (Ausfallkörnungen, Knicke) oder mit stark links gekrümmter Körnungslinie in halblogarithmische Darstellung sind hinsichtlich Suffosion besonders gefährdet.

Das tragende Korngerüst des Bodens wird durch Suffosion nicht verändert, d.h. es findet keine Zerstörung der Bodenstruktur statt. Jedoch erhöhen sich als Folge der Suffosion das Porenvolumen und damit die Durchlässigkeit des Bodens, während die Dichte abnimmt. Auf-

grund der zunehmenden Durchlässigkeit des Bodens vergrößert sich bei gleichbleibendem hydraulischem Gefälle der Grundwasserdurchfluss. Fortschreitende Suffosion führt durch den Austrag von Feinmaterial zu einer Verminderung der Stabilität des Korngerüsts. So kann es z.B. zum Austrag einzelner skelettbildender Teilchen kommen, wodurch Erosionsvorgänge ausgelöst werden können, d.h. der Übergang von Suffosion zur Erosion kann fließend sein.

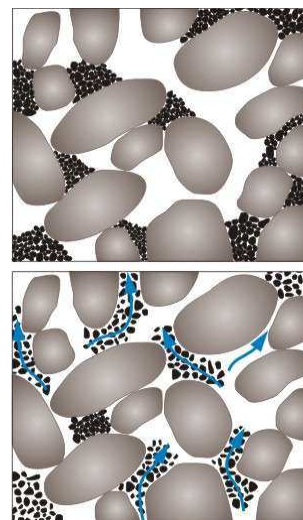


Bild 1: Suffosionsgefährdete Bodenstruktur nicht durchströmt (oben) bzw. durchströmt mit Suffosion (unten)

Je nachdem, wo die Suffosion stattfindet, wird häufig 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 wird daher verzichtet und nachfolgend unter Suffosion die innere Suffosion, wie sie in Bild 1, unten dargestellt ist, verstanden.

Für den Nachweis der Suffosionsstabilität gibt es eine Vielzahl verschiedener Verfahren, die i. d. R. unter jeweils unterschiedlichen Gesichtspunkten und Systematiken (theoretische Betrachtungen und/oder Laborversuche) entwickelt wurden. Aufgrund dessen unterscheiden sich die einzelnen Verfahren deutlich hinsichtlich ihrer Anwendungsgrenzen. Ziel der Untersuchungen der BAW war es, auf der Basis der bekannten Verfahren Empfehlungen für die Durchführung von Suffosionsnachweisen zu entwickeln. Die Kriterien sind hierbei

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

Nachfolgend werden die wesentlichen Verfahren und die Ergebnisse umfangreicher Vergleichsberechnungen sowie die daraus abgeleiteten Empfehlungen zur Durchführung des Suffosionsnachweises vorgestellt. Diese Empfehlungen werden für Erdbauten im Verkehrswasserbau empfohlen und in einem neuen „Merkmale Materialtransport im Boden (MMB)“ verankert. Das MMB fügt sich in die Reihe der BAW-Merkblätter insbesondere als Bezugsregelwerk für das MAK [5] ein.

## 2. Nachweisverfahren

Es werden ausschließlich Nachweisverfahren zur Anwendung empfohlen, die auf geometrischen Kriterien beruhen. Bei diesen Nachweisen wird untersucht, ob ein Transport von Feinbestandteilen des Bodens bei der vorhandenen Poren- und Korngeometrie überhaupt möglich ist. Hydraulische Kriterien, die auf die Ermittlung eines für einen suffosiven Materialtransport erforderlichen hydraulischen Gradienten basieren, werden aufgrund ihrer beschränkten Anwendbarkeit und Zuverlässigkeit nicht betrachtet. Des Weiteren werden nur Verfahren betrachtet, deren Zuverlässigkeit von den jeweiligen Autoren auch in Laborversuchen nachgewiesen wurde.

### 2.1 Vereinfachte Kriterien

In der Literatur finden sich verschiedene vereinfachte Kriterien für den Nachweis gegen Suffosion, die eine einfache und leicht handhabbare Beurteilung der Suffosionsgefahr anhand der Körnungslinie und z. T. der Lagerungsdichte des Bodens ermöglichen.

Diese Kriterien wurden von Ziems [7] abgeleitet und ergeben sich aus seinem Nachweisverfahren (Kap. 2.2). Böden, die eines der folgenden Kriterien erfüllen, gelten ohne besonderen Nachweis als suffosionssicher (Sicherheit von  $\eta = 1,5$ ):

- Ungleichförmigkeitszahl  $C_U \approx 1$ ,
- $C_U < 10$  und eine Körnungslinie, die in halblogarithmischer Darstellung einer Geraden entspricht,
- $I_D > 0,6$  bei  $C_U > 10$  und eine Körnungslinie, die in halblogarithmischer Darstellung einer Geraden entspricht ( $I_D =$  bezogene Lagerungsdichte)

Ein weiterer vereinfachter Nachweis wurde von Ziems auf Basis von Versuchen mit Sanden und Kiesen mit stetiger Körnungslinie entwickelt [7]:

- $C_U < 8$  und stetige Körnungslinie

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

### 2.2 Verfahren nach Ziems

Das Verfahren nach Ziems beruht auf theoretischen Betrachtungen zur Porenstruktur bzw. zur Porenengstellenverteilung eines Erdstoffes, die auch Grundlage für Filterkriterien an der Grenzfläche zweier Erdstoffe sind.

Ziems setzt in seinen Betrachtungen den für Suffosion maßgebenden Porenkanaldurchmesser  $d_k$  dem mittleren Porendurchmesser  $\bar{d}_{p,h}$  nach Pavcic gleich:

$$d_k = \bar{d}_{p,h} = 0,455 \cdot \sqrt[6]{C_U} \cdot e \cdot D_{17}$$

Dieser Zusammenhang hat jedoch nur für stetige Körnungslinien Gültigkeit. Demzufolge kann das darauf aufbauende Verfahren nach Ziems zum Nachweis der Suffosionssicherheit nicht bei un stetigen Körnungslinien, d.h. bei Ausfallkörnungen oder Körnungslinien mit starken Krümmen oder Knicken verwendet werden. Versuche, die Ziems zur Untersuchung der Kontaktersion durchgeführt hat, zeigen, dass von einem Filter mit einem maßgebenden Porenkanaldurchmesser  $d_k$  Partikel zurückgehalten werden, die deutlich kleiner als  $d_k$  sind. Um diese Erkenntnisse zu berücksichtigen führt er das Schlupfmaß  $F_s$  als Abminderungsfaktor ein. Dieser Faktor berücksichtigt summarisch Effekte wie u. a. 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 Kontaktersion, womit der Ansatz auf der sicheren Seite liegt.

Nach Ziems ist ein Erdstoff sicher gegen Suffosion wenn gilt:

$$\eta_{S,G} = \frac{d_{\min}}{F_s \cdot d_k} \geq 1,5$$

mit

$d_{\min}$  minimaler Korndurchmesser

$F_s$  Schlupfmaß

$d_k$  maßgebender Porenkanaldurchmesser

Über die Größe  $d_{\min}$  wird somit der Korndurchmesser definiert, der bei Suffosion ausgetragen werden darf. Wird  $d_{\min}$  dem Korndurchmesser bei 0% Siebdurchgang ( $d_0$ ) gleichgesetzt ( $d_{\min} = d_0$ ), so wird gefordert, dass kein Partikel ausgetragen werden kann. Nach [2] kann für weniger bedeutende Nachweise  $d_{\min}$  bis zu  $d_{3\%}$  angesetzt werden. Die geforderte Sicherheit von 1,5 begründet Ziems mit der Inhomogenität der Erdstoffe hinsichtlich Ihrer Kornverteilung und Lagerungsdichte.

### 2.3 Verfahren nach Burenkova

Burenkova [1] entwickelte ein empirisches Kriterium auf Basis von Versuchen an weitgestuften Böden. Untersucht wurden Böden mit einer maximalen Ungleichförmigkeit von  $C_U = 200$  und einem maximalen Korndurchmesser von 60 bis 100 mm. Die Körnungslinien der untersuchten Böden waren konkav, konvex und linear.

Grundlage der Versuche von Burenkova sind Überlegungen zur Struktur eines Erdstoffes hinsichtlich des Korngerüsts und der Füllung der Poren des Korngerüsts mit losen Partikeln. Bei diesen Versuchen wird die zu untersuchende Bodenprobe in bis zu 20 einzelne Kornfraktionen aufgetrennt. Zu Beginn des Versuches wird das Volumen der größten Fraktion bestimmt. Nach Zugabe der nächstfeineren Fraktion wird wiederum das Volumen bestimmt. Dies wird wiederholt bis alle Kornfraktionen zumischt sind. Nimmt das Volumen der Probe bei Zugabe einer Fraktion zu, so gehört diese Fraktion zur den skelettbildenden Körnern, d.h. zum Korngerüst. Nimmt das Volumen nicht zu, so gehören diese Fraktionen zur Füllung der Poren und können durch Suffosion transportiert werden. Die Fraktion mit dem größten Durchmesser der losen Füllung ( $d_{dv}$ ) stellt den Übergang zwischen Skelett und losen Körnern dar.

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

$$h' = d_{90} / d_{60}$$

$$h'' = d_{90} / d_{15}$$

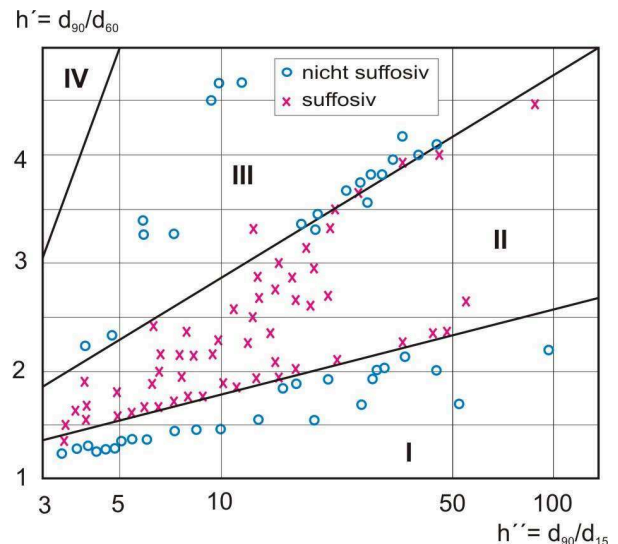


Bild 2: Darstellung der Versuchsergebnisse von Burenkova im  $h''$ - $h'$ -Diagramm (aus [1])

Die Auswertung der Versuche erfolgte durch Auftragung der  $h'$  und  $h''$ -Werte der Versuchsböden in einem halblogarithmischen Diagramm (Bild 2). Burenkova definiert zwei Grenzkurven, innerhalb derer die Böden angeordnet sind, die nach den Versuchen als nicht suffosiv bewertet werden (Bereich II). Außerhalb dieser Grenzkurven schließen die Zonen I und III an. Bodenproben, die innerhalb dieser Zonen liegen, sind aufgrund der Versuchsergebnisse als suffosiv zu bewerten. Bereich IV stellt einen Bereich künstlicher Korngemische dar, die nicht weiter betrachtet werden.

Der Bereich II für nicht suffosive Böden ergibt sich durch die festgelegten Grenzkurven zu

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

Aufgrund des in den Versuchen ermittelten Korndurchmessers  $d_{dv}$ , der den Übergang von den skelettbildenden Fraktionen zu den Fraktionen der Porenfüllung kennzeichnet, wird mit dem Größtkorn des Bodens  $d_{\max}$  folgende Beziehung abgeleitet:

$$0,55 \cdot (h'')^{1,5} < \frac{d_{dv}}{d_{\max}} < 1,87 \cdot (h'')^{1,5}$$

### 2.4 Verfahren nach Lubočekov

Lubočekov [7] leitete aus Überlegungen hinsichtlich der Geometrie eines verschiedenenkörnigen Kugelhauferkes und durch ergänzende Versuche idealisierte suffosions-sichere Körnungslinien, sog. Grenzkornverteilungskurven ab (Bild 3). Deren Struktur ist dergestalt, dass die Poren einer Kornfraktion jeweils von der nächstfeineren Fraktion vollständig gefüllt sind und somit die einzelnen Körner unbeweglich sind.

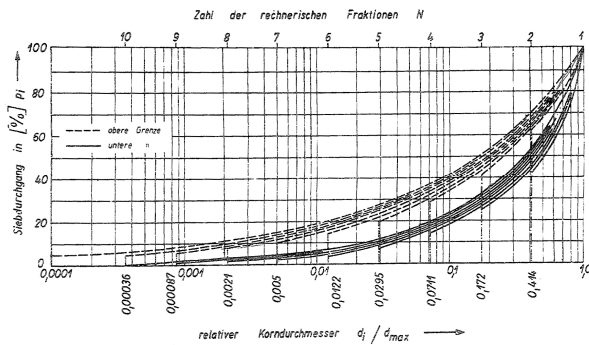


Bild 3: Grenzkornverteilungskurven für suffosionssichere nichtbindige Böden nach Luboček (aus [7])

Das Verfahren von Luboček ist ein grafisches Verfahren, mit dem aus der Abweichung der realen Kornverteilung von diesen Grenzkornverteilungen die Suffosionssicherheit und die Größe der ausspülbaren Teilchen ermittelt werden kann.

Nach den Untersuchungen von Luboček kann bis zu 40%, bei besonders ungünstiger Form der Körnungslinie bis zu 60% des groben Teils des Erdstoffes unberücksichtigt bleiben, ohne dass sich die Suffosionseigenschaften entscheidend verändern. Der Nachweis erfolgt in diesem Fall nur am feinen Teil des Erdstoffes.

## 2.5 Verfahren nach Kenney und Lau

Die Betrachtungen von Kenney/Lau basieren auf Überlegungen zur Porenraumgeometrie eines Kugelhauwerkkes. Sie gehen davon aus, dass sich ein Korn mit dem Durchmesser  $D$  durch eine Pore, die aus mehreren Körnern mit dem Durchmesser  $4D$  gebildet wird, bewegen kann. Bei dem Nachweis Kenney/Lau wird nicht die gesamte Körnungslinie betrachtet, sondern nur der Bereich der feinen Fraktionen, d.h. der Anteil des Bodens, der maximal beweglich im Porenraum des Korngerüsts vorhanden sein kann. Je nach Ungleichförmigkeit  $C_U$  des groben Anteils des Bodens sind das die feinsten 30% ( $C_{U,grob} \leq 3$ ) oder 20% ( $C_{U,grob} > 3$ ) des Bodens. Hierbei ist  $C_{U,grob}$  die Ungleichförmigkeitszahl des groben Bodenanteils, d. h. nach Abtrennen von 30% bzw. 20% der feineren Körnung.

Kenney/Lau definieren einen Massenanteil  $H$ , der der Masse zwischen dem Korndurchmesser  $D$  und  $4D$  entspricht und einen Masseanteil  $F$ , der die Masse der Körner kleiner  $D$  beinhaltet. Das Verhältnis  $H/F$  ist ein Maß für die Steigung der Körnungslinie. In Bild 4 ist die Konstruktion der  $H/F$ -Kurve (Formkurve) grafisch dargestellt. Das Verhältnis  $H/T$  darf zum Nachweis der Suffosionssicherheit ein bestimmtes Maß nicht unterschreiten d. h. die Körnungslinie darf eine bestimmte Steigung nicht unterschreiten.

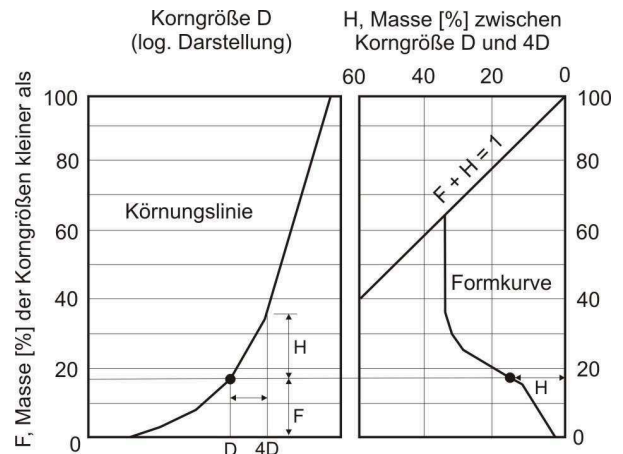


Bild 4: Methode nach Kenney/Lau zur Beschreibung der Form (Steigung) einer Körnungslinie

In einem ersten Ansatz wird von Kenney/Lau als Bedingung das Verhältnis  $H/F > 1,3$  genannt (hartes Kriterium). Infolge der Diskussion des Kriteriums in der Fachöffentlichkeit wurde das Kriterium auf  $H/F > 1,0$  (weiches Kriterium) abgeschwächt. Das weiche Kriterium entspricht der Fullerkurve, d. h. einer Zusammensetzung eines abgestuften Mineralgemischs mit minimalem Porenanteil. Beide Kriterien sind als Bereiche in Bild 5 dargestellt.

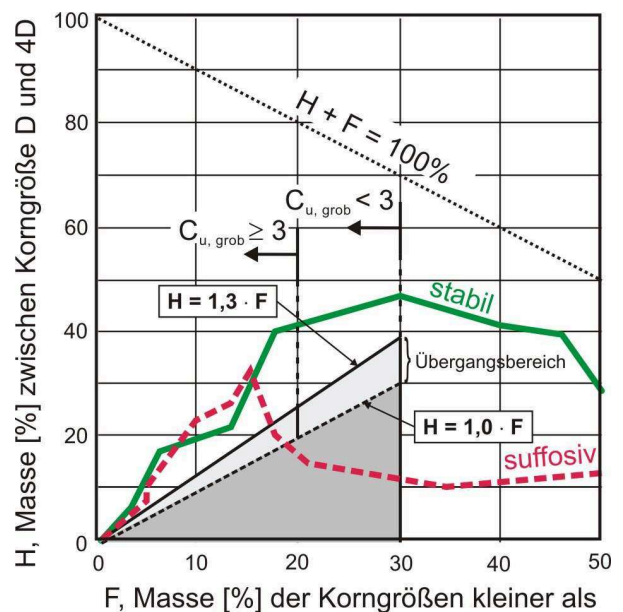


Bild 5: Nachweisverfahren nach Kenney und Lau

Laborversuche von Kenney/Lau haben gezeigt, dass das weiche Kriterium jedoch nicht mit absoluter Sicherheit als ausreichend anzusehen ist.

Für die Prüfung eines Bodens auf Suffosivität wird zunächst auf Grundlage der Körnungslinie die  $H/F$ -Kurve des zu untersuchenden Bodenmaterials erstellt. Schneidet die  $H/F$ -Kurve die dunkelgrau angelegte Fläche ( $H/F > 1$ , weiches Kriterium), so ist der Boden

suffosiv. Wird die hellgraue Fläche ( $H/F > 1,3$ , hartes Kriterium) geschnitten, so ist der Boden im Übergangsbereich. Wird keine der Flächen geschnitten ist der Boden hinsichtlich Suffosion als stabil zu bewerten. Die in Bild 5 dargestellte strichlierte Kurve zeigt einen suffosiven Boden, die durchgezogene Kurve zeigt einen stabilen Boden.

Kenney und Lau haben das Verfahren in einer Vielzahl an Versuchen verifiziert. Die Versuche wurden unter sehr harten Randbedingungen mit Durchströmung von oben nach unten bei gleichzeitiger Vibration der Probe durchgeführt, so dass die Ergebnisse in Bezug auf praxisrelevante Fragestellungen auf der sicheren Seite liegen.

### 3 Vergleichsberechnungen

Die Vergleichsberechnungen wurden in zwei Schritten durchgeführt. Im ersten Schritt wurden ausgewählte Böden mit Hilfe der in Kap. 2 aufgeführten Verfahren hinsichtlich Ihrer Suffosionsgefährdung untersucht. Bei diesem Schritt lag das Hauptaugenmerk auf der Handhabbarkeit der Nachweisverfahren und dem Vergleich der anhand der unterschiedlichen Verfahren ermittelten Ergebnisse.

Es wurden sehr weit gestufte Böden mit konkaver (links gekrümmter) Körnungslinie und Böden mit Ausfallkörnungen untersucht.

Das Verfahren nach Luboćkov zeigte sich in seiner Handhabbarkeit sehr umständlich und nicht eindeutig und wurde deshalb bei den weiteren Betrachtungen nicht berücksichtigt

In einem 2. Schritt wurden die Vergleichsberechnungen für Kornverteilungen durchgeführt, die in der Literatur zusammen mit Versuchsergebnissen dokumentiert sind. Diese wurden den Veröffentlichungen von Wan/Fell [5] und Kenney/Lau [3] entnommen. Es handelt sich hierbei um überwiegend sehr weit gestufte, z. T. auch konvexe Kornverteilungen. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass die Versuchsrandbedingungen in beiden Veröffentlichungen sehr unterschiedlich und daher nur begrenzt vergleichbar sind, wobei die Versuchsbedingungen bei Kenney/Lau aufgrund der angelegten Vibrationen als hart zu bewerten sind.

Über die oben genannten Nachweisverfahren hinaus, wurden diese Kornverteilungen auch nach dem im Merkblatt Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen (MAK), Ausgabe 1989 [5] empfohlenen Verfahren auf ihre Suffosionssicherheit überprüft. Der Grundgedanke dieses Verfahrens ist die Rückführung der Transportvorgänge bei Suffosion auf die Vorgänge bei Kontakterosion. D. h. es wird angenommen, dass der Austrag der feinen Kornfraktionen nur dann möglich ist, wenn diese im Korngerüst des groben Anteils beweglich sind. Dies setzt voraus, dass die feinen Kornfraktionen gegenüber den groben Fraktionen nicht filterstabil sind. Bei diesem Verfahren wird der Erdstoff rechnerisch in zwei Komponenten, d.h. einen Basis- und einen Filteranteil aufgetrennt und es wird

überprüft, ob diese beiden Teile gegeneinander filterstabil sind. Der Erdstoff gilt als selbstfiltrierend, d.h. als suffosionsstabil, wenn jede Basis-Filter Kombination, in die sich der Erdstoff aufteilen lässt, die Filterregeln erfüllt. Im MAK wird die Anwendung der Filterregel nach Cistin/Ziems empfohlen. Dieser Nachweis liegt auf der sicheren Seite, da nicht klar ist, ob die Körner überhaupt die für einen suffosiven Materialtransport erforderliche Bewegungsfreiheit haben.

Die Ergebnisse der Berechnungen mit insgesamt 17 Vergleichsböden sind in der Tabelle 1 hinsichtlich der Übereinstimmung der Nachweisverfahren mit den Ergebnissen der Laborversuche dargestellt. Ergänzend ist noch aufgeführt, inwieweit die Ergebnisse der rechnerischen Nachweise gegenüber den Versuchsergebnissen auf der sicheren Seite liegen (d. h. Versuch und Nachweis liefern das gleiche Ergebnis oder der Nachweis ergibt eine Suffosionsgefährdung, der Versuch aber nicht).

	Übereinstimmung mit Laborversuchen	Nachweise auf der sicheren Seite
Ziems	53%	100%
Kenney/Lau	65%	100%
Burenkova	59%	88%
Cistin/Ziems	53%	100%

Tabelle 1: Ergebnisse der Vergleichsberechnungen

Die Verfahren von Ziems, Kenney/Lau und Cistin-Ziems liegen für alle betrachteten Böden auf der sicheren Seite, wobei das Verfahren von Kenney/Lau die beste Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen zeigt. Die Übereinstimmung mit den Versuchen zwischen 53 % und 65 % erscheint zunächst relativ gering, allerdings ist zu berücksichtigen, dass die untersuchten Böden von vornherein so ausgewählt wurden, dass sie ein Potential auf Suffosivität haben. Bei einer zufälligen Auswahl von Probedöden wäre eine wesentlich größere Übereinstimmung zwischen Versuchen und Nachweisverfahren zu erwarten. Zum anderen sind die Nachweisverfahren per se auf der sicheren Seite liegend formuliert, was eine pessimistischere Bewertung impliziert.

Ergänzend zu ihren Laboruntersuchungen führten Wan/Fell auch Vergleichsberechnungen durch [6], in denen neben den bereits genannten Verfahren von Kenney/Lau und Burenkova auch Verfahren nach U.S Corps of Engineers, Istomina, Sherard und Sun verwendet wurden. Die Berechnungen bestätigen die oben bereits genannten Aussagen zu den Verfahren von Kenney/Lau und Burenkova.

Eine gesonderte Auswertung führte Wan [6] auf der Grundlage der Nachweisverfahren von Kenney/Lau und Burenkova durch. Hierbei wird das Verfahren von Kenney/Lau mit den zwei o. g. unterschiedlichen Bewertungskriterien (weich und hart) betrachtet.

Wan wertete seine Versuche in einer Kombination von Kenney/Lau und Burenkova aus. Das Ergebnis der Auswertung ist in Tabelle 2 als Matrix dargestellt. Wan stellt die Ergebnisse der Nachweisverfahren von Kenney/Lau und Burenkova gegenüber, wobei er für Burenkova die zwei Ergebnisse „stabil“ oder „unstabil“ und für Kenney/Lau die drei Ergebnisse „unstabil“ (Stabilitätsgrenze  $H/F < 1,0$ ), „Übergangsbereich“ ( $1,0 \leq H/F < 1,3$ , weiches Kriterium) und „stabil“ ( $H/F > 1,3$ , hartes Kriterium) verwendet. Anschließend vergleicht Wan die sich in der  $2 \times 3$ -Matrix ergebenden 6 Kombinationsmöglichkeiten der verschiedenen Nachweisergebnisse mit Versuchsergebnissen und gibt für jedes Matrixfeld die Wahrscheinlichkeit der Suffosionsstabilität in 5 Abstufungen von - - bis ++ an.

Suffosionsstabilität unwahrscheinlich - wahrscheinlich +		Kenney/Lau		
		$H/F < 1$ unstabil	$1,0 < H/F < 1,3$ Übergangsber.	$H/F > 1,3$ stabil
Burenkova	Unstabil	- bis --	0 bis -	++
	Stabil	+	+ bis ++	++

Tabelle 2: Vergleich Ergebnisse Kenney/Lau und Burenkova nach WAN [6]

Die Darstellung von Wan zeigt, dass Böden nach dem Kriterium  $H/F > 1,3$  genügend sicher sind. Für Böden im Übergangsbereich von Kenney/Lau sind nur die Böden mit ausreichender Sicherheit stabil, die auch dem Kriterium von Burenkova genügen. Alle anderen Ergebniskombinationen liefern keine ausreichende Sicherheit.

#### 4 Empfehlungen

Im Ergebnis der Untersuchungen wird folgendes Vorgehen für den Nachweis der Suffosionsstabilität von Böden vorgeschlagen, wie er in Bild 6 als Flussdiagramm dargestellt ist.

Die Eingangsprüfung bezieht sich auf die bewährten vereinfachten Kriterien (vgl. Kap. 2.1). Falls diese nicht erfüllt sind, sind eingehende Untersuchungen erforderlich. Vorgeschlagen wird zum einen das Verfahren nach Ziems, da es im Verkehrswasserbau bewährt ist und dessen Ergebnisse auf der sicheren Seite liegen. Allerdings ist die Anwendung auf stetige Kornverteilungskurven begrenzt. Die Beurteilung ob eine Körnungslinie mit Ausfallkörnung vorliegt, kann z. B. anhand der DIN 18196 (über  $C_U$  und  $C_C$ ) erfolgen.

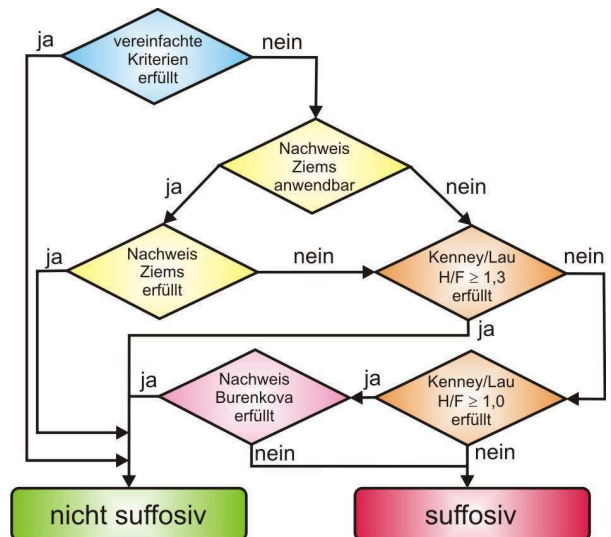


Bild 6: Empfohlener Ablauf für den Nachweis der Suffosion

Alternativ zu dem Verfahren nach Ziems ist das Verfahren nach Kenney/Lau anwendbar. Dies gilt, wenn die Anwendungsgrenzen des Nachweises nach Ziems nicht erfüllt sind oder wenn der Nachweis nach Ziems eine Suffosionsgefährdung ergibt. Es wird aus Gründen der Sicherheit zunächst der Ansatz des strengen Kriteriums (Stabilitätskriterium  $H/F > 1,3$ ) empfohlen. Dieses Verfahren ist für eine große Bandbreite verschiedener Böden einsetzbar und kann auch als in der Praxis bewährt angesehen werden. Da das strenge Kriterium Böden entsprechend der Fullerkurve als suffosiv einstuft, was jedoch der Erfahrung widerspricht, wird für Böden, die im Übergangsbereich zwischen dem harten und dem weichen Kriterium liegen, die zusätzliche Absicherung mit dem Verfahren von Burenkova empfohlen, nach dem z. B. Fullerkurven nicht suffosiv sind.

Der vorgeschlagene Ablauf des Suffosionsnachweises wurde an 29 Böden, bei denen die vereinfachten Kriterien größtenteils nicht anwendbar waren und die aufgrund ihrer Kornverteilung als potentiell suffosionsgefährdet zu bewerten waren, einem Praxistest unterzogen. Vergleichend wurde auch noch das oben beschriebene Verfahren nach MAK [5] untersucht.

Die Ergebnisse des Praxistests können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die vorgeschlagene Vorgehensweise ist praxisgerecht und liefert plausible Ergebnisse.
- Der Nachweis nach Ziems ist aufgrund der eingeschränkten Anwendungsgrenzen häufig nicht anwendbar.
- Der Nachweis nach Ziems ist härter als nach Kenney/Lau-Burenkova.
- Auch das Filterkriterium nach Cistin-Ziems, das in der Vergangenheit für die Bewertung der Suffosionsstabilität im Bereich der Dämme an Wasserstra-

ßen häufig angewendet wurde [5], ist härter als Kenney/Lau(-Burenkova)

## 5 Literatur

- [1] Burenkova, V.V. (1993): Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Balkema, S. 357 - 360, Rotterdam
- [2] Busch, K.-F., Luckner, L., Thiemer, K. (1993): Geohydraulik, 3. Auflage, Gebrüder Bornträger, Berlin Stuttgart
- [3] Kenney, T., Lau, D. (1985): Internal stability of granular filters, Canadian Geotechnical Journal, J 22, p. 215 – 225
- [4] Kenney, T., Lau, D. (1986): Internal stability of granular filters - Reply, Canadian Geotechnical Journal, J. 23, p. 141 – 418
- [5] Merkblatt Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen (MAK), Ausgabe 1989; Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe
- [6] Wan, Ch., Fell, R. (2004): Experimental investigation of internal instability of soils in embankment dams and their foundations, INICIV Report No. R-429, University of New South Wales, Sydney
- [7] WAPRO 4.04, Blatt 2 incl. Erläuterungen, Oktober 1970, VEB Projektierung Wasserwirtschaft