

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Witt, Karl Josef

Suffosion nichtbindiger Böden – Phänomen und Nachweismethode

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101940>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Witt, Karl Josef (2014): Suffosion nichtbindiger Böden – Phänomen und Nachweismethode. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Filter und hydraulische Transportvorgänge im Boden. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 23-35.

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.



Suffosion nichtbindiger Böden – Phänomen und Nachweismethode

Karl Josef Witt, Bauhaus-Universität Weimar

Einleitung

Innere Erosion kommt in natürlichen Böden und in Erdbauwerken in unterschiedlichen Erscheinungsformen und Stufen der Gefährdung vor. Die Phänomene sind Filtration an Grenzschichten, Suffosion, Verflüssigung mit rückschreitender Erosion wie auch physikalische und chemische Lösungsvorgänge. Die grundlegenden Gemeinsamkeiten sind die Mobilisierung und der Transport von Bodenpartikeln durch eine hydraulische oder dynamische Einwirkung. Bei der Filtration finden Rückhalt oder Transport an einer konkreten Grenze zweier Böden statt. Bei der Suffosion werden Bodenpartikel oder –aggregate aus einem weitgestuften Boden gelöst und transportiert. Die rückschreitende Erosion wird durch eine Verflüssigung des Bodens an der Austrittsstelle einer Porenströmung initiiert und setzt sich progressiv in Röhren mit bevorzugter Wasserwegsamkeit in den Baugrund oder in das Erdbauwerk fort. Bei physikalischen oder chemischen Lösungsvorgängen werden Teile der Struktur des Bodens mit der Porenströmung entfernt. Übergeordnet ist den Phänomenen der inneren Erosion eine Mobilisierung von Boden im Sinne einer Emission und ein von der Kinematik im Porensystem kontrollierter Transport im Sinne einer Transmission. Einflussparameter sind die hydraulischen Bedingungen, i. e. Porenwasserströmung und Porenwasserdruck, die Geometrie und die mechanische Tragstruktur des Bodens sowie eventuelle Bindekräfte wie Kohäsion, Kapillarspannung oder Zementierung der Partikel.

Der Beitrag behandelt die Suffosion nichtbindiger Böden, ein für weitgestufte und inhomogen entmischte Böden charakteristisches Phänomen der inneren Erosion. Zur Beurteilung des Suffosionspotentials gibt es in der Ingenieurpraxis eine Reihe von Nachweismethoden, deren Anwendungsgrenzen aber teils unklar sind [1], [2], [3], [4], [5], [6]. Nach einer Darstellung der dem Phänomen zugrunde liegenden physikalischen Bedingungen wird eine kürzlich publizierte Anpassung einer auf Kézdy [7] zurückgehenden Nachweismethode vorgestellt, die eine sehr einfache und schnelle Beurteilung des Suffosionspotentials anhand der Steigung der Korngrößenverteilung des Bodens erlaubt [8].

Das Phänomen der Suffosion weitgestufter nichtbindiger Böden

Im Erdbau werden mit Blick auf Setzungen, Standsicherheit und hydraulische Eigenschaften die Verdichtung, die Verformbarkeit und die Wasserdurchlässigkeit einer Schüttung als Kriterien der Qualität betrachtet. Verdichtbarkeit, Steifigkeit und Wasserdurchlässigkeit hängen aber wesentlich von der Korngrößenverteilung, den granularen Gegebenheiten und der damit

erreichten Struktur ab. Als optimale Korngrößenverteilung, die eine möglichst hohe Dichte, möglichst geringe Porosität, in ihrer Geometrie wenig streuende Poren und damit mechanisch wie hydraulisch stabile Bedingungen erwarten lässt, wird in Annäherung an die Fuller-Kurve eine Potenzfunktion der Korngrößenverteilung betrachtet,

$$D = 100 \cdot \left(\frac{d_{\min}}{d_{\max}} \right)^n \quad (1)$$

wobei D den Siebdurchgang darstellt, d_{\min} und d_{\max} eine Unter- und Obergrenze der Körnungslinie. Der Exponent n liegt je nach Kornform im Bereich 0,45 bis 0,5. Ein Boden mit einer derartigen Körnungslinie neigt tatsächlich wenig zu Entmischung und bildet bei hoher Verdichtung eine sehr gleichmäßige Porenstruktur mit geringstmöglicher Porosität. Nahezu alle Körner sind in die mechanisch tragende Struktur eingebunden und daher in ihrer Lage stabil. Sie sind allenfalls durch starke dynamische oder hydraulische Einwirkungen oder durch eine Scherbeanspruchung aus ihrer Lage zu lösen.

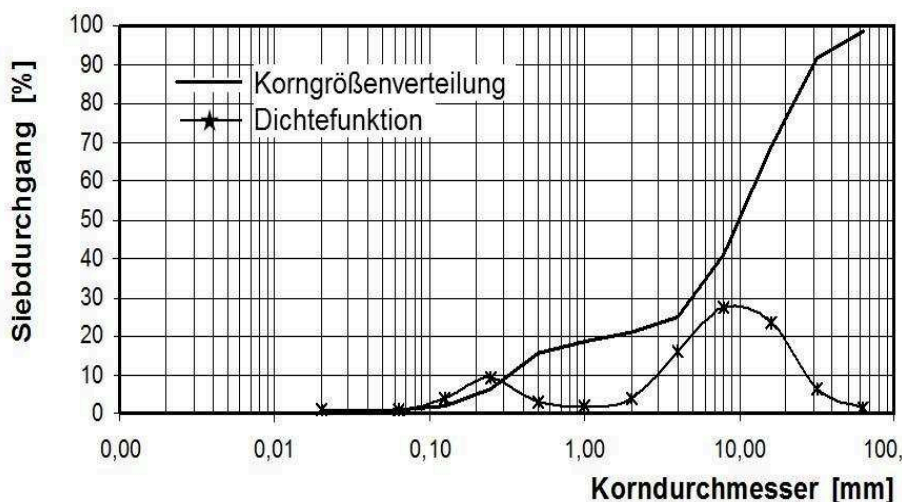


Bild 1: Korngrößenverteilung (Massen-Summenlinie) und Fraktionsanteile (Massen-Dichtefunktion) eines Sedimentbodens

Diese idealen Bedingungen sind bei einem natürlichen Boden nicht erfüllt. Weitgestufte natürliche Böden folgen aufgrund ihrer Genese nicht a priori diesem Potenzgesetz, allenfalls für begrenzte Abschnitte der Körnungslinie. Residuale Verwitterungsböden zerfallen in Abhängigkeit des genetisch, tektonisch und mineralogisch bedingten Trennflächengefüges in Grob- und Feinaggregate. Dies gilt näherungsweise auch für gebrochene Mineralstoffe. Die Korngrößenverteilung von Sedimentböden wird durch die wechselnden Strömungsbedingungen der Genese bestimmt und ist die Folge der Mikro- oder Makrostratigraphie. Die Körnungslinie weist oft im Bereich des Fein- und Mittelkorns eine unstetige Steigung auf, die Massenanteile der einzelnen Fraktionen nehmen nicht stetig zu. Ursache ist eine bimodale Kornzusammensetzung mit einem feinen und einem groben Anteil. Dabei kann es zu einem

gänzlichen Fehlkorn über mehrere Fraktionen hinweg kommen oder auch zu einem überlappenden Bereich der Grob- und Feinanteile, in dem die Körnungslinie nur flach ansteigt. Bild 1 zeigt eine derartige Körnungslinie, typisch für einen Sedimentboden im Mittellauf eines Flusses. Es handelt sich um ein Gemisch aus einem Mittelkies und Fein- bis Mittelsand. In das Kornverteilungsdiagramm sind die Massen der einzelnen Fraktionen als Verteilungsdichte dargestellt, welche die bimodale Kornzusammensetzung mit zwei signifikant unterschiedlichen Verteilungen veranschaulicht.

Böden mit bimodaler Kornzusammensetzung bilden je nach Proportion der Teilmengen unterschiedliche Packungsstrukturen. Stellt der feinere Anteil mehr als ca. 30 % der Gesamtmasse, ist dieser strukturbildend. Die gröberen Fraktionen sind dann nur in die Feinteilmatrix ohne Kornkontakt verteilt eingelagert. Trotz bimodaler Kornzusammensetzung bildet sich so bei homogener Mischung eine unimodale Porenstruktur. Die mechanisch effektive Kornstruktur wie auch die hydraulisch maßgebende Porenstruktur werden durch den feinen Anteil bestimmt. Liegt dagegen die Masse des feinen Anteils deutlich unterhalb von 30 %, bildet sich eine Grobstruktur. Die Körner der groben Fraktionen stehen untereinander in Kontakt. Die feinen Anteile sind in die Poren dieser Tragstruktur lose eingelagert. Sowohl Korn- als auch Porenstruktur sind bimodal. Das Porensystem des tragenden Skeletts bestimmt dann die Wasserdurchlässigkeit und bildet die möglichen Porenpfade einer inneren Erosion.

Solche Böden sind potentiell suffosionsgefährdet. Bild 2 zeigt einen Verguß des in Bild 1 beschriebenen Flusssedimentes. In die Poren des Skeletts aus Kies sind lose und nicht porenfüllend Sandkörner eingelagert. Das Suffosionspotential hängt von der Durchgängigkeit der Porenpfade der Grobstruktur für die eingelagerten feinen Anteile ab. Bei bindigem Feinanteil ist die Mobilität eine Frage der Aggregatsgröße eines Zerfalls. Ein Transport von Partikeln oder Aggregaten wird dann stark durch die Fließgeschwindigkeit der Porenströmung und durch die Mineralogie des bindigen Anteils beeinflusst.

Das Charakteristikum des suffosiven Erdstoffes ist somit die bimodale Struktur des Kornaufbaus. Einflussfaktor ist neben der Korngrößenverteilung der Füllgrad der groben Poren, der vom Verhältnis Grob- zu Feinanteil und von der Lagerungsdichte abhängt. Bei einer Teilfüllung der Poren kommt es schon bei einer geringen Durchströmung zu einer Defraktionierung der eingebetteten Feinanteile. Ist das Skelett nicht in der Lage, die mobilen Körner durch Filtration an den Porenengstellen zurückzuhalten, werden diese entlang bevorzugter Pfade transportiert, wenn die hydraulische Einwirkung, i. e. die durch die Strömung auf die Körner applizierte Schubspannung in Verbindung mit der Gewichtskraft der Partikel groß genug ist. Sind Partikel mobil, die in der Lage sind, die Engstellen der Porenpfade zu blockieren, bilden sich temporär stabile Verhältnisse. Der Transport wird unterbrochen, kann aber bei geänderten Strömungsverhältnissen reaktiviert werden.



*Bild 2: Links: Verguß eines weitgestuften Sedimentbodens. Skelett aus Kies, eingelagerter Sand.
 Rechts: Prinzipskizze zur Migration des feinen Anteils durch Porenpfade des Skeletts*

Nach unseren Erfahrungen mit experimentellen Untersuchungen und theoretischen Analysen zu suffosiven Böden können drei Stadien der Suffosion unterschieden werden.

Quasi stabil: Bei geometrisch quasistabilen Verhältnissen ist das Porensystem des Skeletts in der Lage, die mobil eingelagerten Partikel auf kurzen Wegen zu blockieren. Bei einer Durchströmung kommt es zu Verlagerungen der mobilen Feinanteile in der Größenordnung von Zenti- oder allenfalls Dezimetern, jedoch nicht zu einem unbegrenzten Austrag.

Instabil: Bei geometrisch instabilen Verhältnissen existieren bevorzugte Porenpfade, entlang derer ein Partikeltransport über große Strecken ermöglicht wird. Bei einer Durchströmung kommt es zu einem signifikanten Austrag der mobilen Feinteilfraktionen, soweit hierfür eine Vorflut besteht und die hydraulischen Einwirkungen groß genug sind.

Struktur-Kollaps: Infolge konzentrierter Durchströmung und Porenwasserüberdruck wird die Struktur des Skeletts zerstört. Einzelne Partikel werden sukzessive aus der Struktur gelöst, es kommt lokal zum Strukturkollaps der auch progressiv verlaufen und in rückschreitende Erosion entlang bevorzugter Pfade übergehen kann.

Filteranalogie und Einflussparameter

Mit der Modellierung des suffosionsempfindlichen Bodens als ein mechanisch tragendes Skelett und eingebetteter mobiler Feinanteile kann das Phänomen der Suffosion auf das der Filtration zurückgeführt werden. Anstelle der Grenzsicht Basis/Filter tritt ein räumliches Gebilde, bestehend aus dem mechanisch tragenden Skelett, das die Funktion des Filters übernimmt und dem eingebetteten Basiserdstoff. Der Filter, als ebene Grenzsicht oder als räumliche Struktur, muss in der Lage sein, die mobilen Partikel in seinem Porensystem geometrisch zurückzuhalten. Diese Filtration findet an den Engstellen des Porenraumes statt, den Verbindungen der einzelnen Poren, deren Öffnungsweite durch die Krümmungsradien der sich berührenden Körner der Tragstruktur bestimmt wird. Mit der Filtration an den Engstellen werden diese blockiert. Das strömende Wasser und mit ihm die mobilen Partikel suchen sich dann andere Pfade. Sind die möglichen Pfade im tragenden Skelett aufgrund zu kleiner Engstellen oder aufgrund bereits zurückgehaltener Partikel für potentiell mobile Partikel einer betrachteten Größe geometrisch blockiert, liegen quasi-stabile Verhältnisse vor. Ist diese Bedingungen dagegen nicht erfüllt, d. h. existieren Porenpfade, entlang derer ein Transport von Partikeln einer bestimmten Größe unbegrenzt möglich ist, liegen instabile Verhältnisse vor. Im Falle einer hydraulischen Einwirkung kommt es zu einem Transport entlang bevorzugter Porenpfade. Dies gilt für Filtration an einer Grenzsicht und für die innere Filtration, die Suffosion, gleichermaßen. Physikalisch handelt es sich bei beiden Phänomenen um ein Porensystem, dessen Öffnungsweite im quasi-stabilen Fall in der Lage sein muss, mit dem Wasser transportierte Partikel auf kurzen Strecken zurückzuhalten. Ein Filter wie auch das Skelett eines suffosiven Erdstoffes können als ein räumliches Sieb betrachtet werden, das im Gegensatz zu einem herkömmlichen Sieb nicht eine bestimmte Öffnungsweite hat, sondern eine variable, statistisch verteilte. Alle experimentellen Erfahrungen, theoretischen Analysen und numerischen Simulationen zeigen, dass bei einer Basis-Filter-Kombination wie auch bei weitgestuften Böden eine scharfe Grenze zwischen quasi-stabilen und instabilen Verhältnissen besteht, was in der Terminologie der Filtertechnik einer hohen Trennschärfe entspricht. Die effektive Öffnungsweite des Porensystems eines zumindest mitteldicht gelagerten Bodens entspricht etwa dem 75 % Quantil der Poren-Engstellen-Verteilung der tragenden Struktur [9].

Der Selbstfiltrationsindex I_{SF}

In den letzten Jahrzehnten haben sich sowohl für den Nachweis der Filterstabilität zweier benachbarter Erdstoffe als auch für den Nachweis der Suffosion eines Bodens sog. Kornverteilungskriterien etabliert. Die geläufigen Filterkriterien basieren auf dem Vergleich des Korndurchmessers $d_{15,F}$ oder $d_{50,F}$ des Filtererdstoffes mit dem Korndurchmesser $d_{85,B}$ oder $d_{50,B}$ des Basiserdstoffes. Das bekannteste hiervon ist das auf *Bertram* [10] zurückgehende Terzaghi-Kriterium (Gl.2), das für enggestufte, nichtbindige Böden empfohlen wird.

$$\frac{d_{15,F}}{d_{85,B}} \leq 4 \quad (2)$$

Dieses empirisch abgesicherte Kriterium enthält ein bisher nicht quantifiziertes Sicherheitsniveau. Eigene Untersuchungen und Auswertungen zahlreicher Berichte von experimentellen Forschungen bestätigen als Grenzzustand ein Verhältniswert dieser Durchmesser von 9, Gl. 3.

$$\frac{d_{15,F}}{d_{85,B}} \cong 9 \quad (3)$$

Die oben beschriebene Analogie der Phänomene Filtration und Suffosion erlaubt die von Kézdy [7] und von Sherard [11] vorgeschlagene und in dem BAW-Merkblatt MAK [6] aufgegriffene Nachweismethode der Trennung einer potentiell suffosiven Korngrößenverteilung in eine grobe, strukturbildende Fraktion, die als Filter wirkt und in eine Feinfraktion, die als Basis betrachtet wird. Auf die bei einem Durchmesser d_T aufgetrennte Körnungslinie werden die bewährten Kornverteilungs-Filterkriterien angewendet. Da es sich nach der Auftrennung einer weitgestuften Korngrößenverteilung i. A. eher um eine enggestufte handelt, ist nach Ansicht des Verfassers auch das Terzaghi-Kriterium nach Gl. (2) mit dem Grenzwert nach Gl. (3) anwendbar. Dieses Kornverteilungskriterium ist auch deshalb angemessen, weil es mit $d_{15,F}$ und $d_{85,B}$ die relevanten Kenngrößen berücksichtigt. Die Poren des Filters werden durch die zahlenmäßig dominanten kleineren Fraktionen, bis $d_{20,F}$ gebildet, während die groben mobilen Fraktionen $\geq d_{70,B}$ die Blockierung der Porenpfade initiieren. Bild 3 zeigt exemplarisch die Auftrennung der Korngrößenverteilung des in Bild 1 dargestellten Flusssedimentes bei einem Korndurchmesser von $d_T = 2 \text{ mm}$.

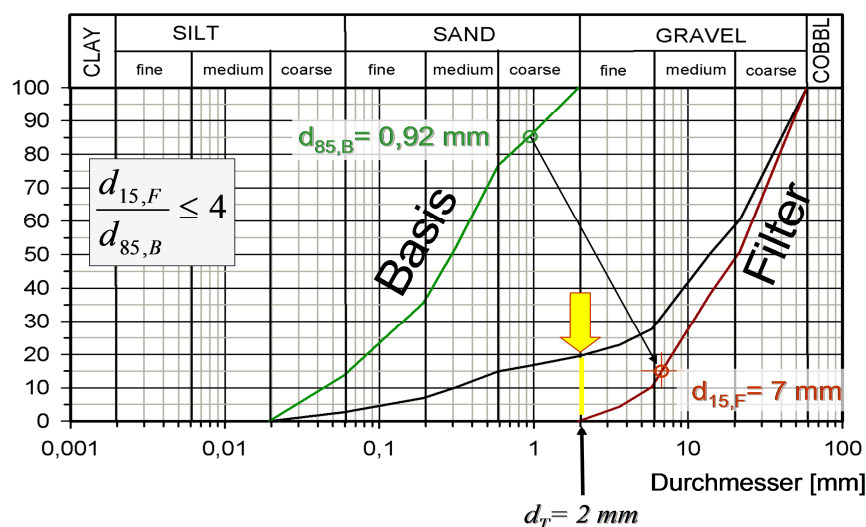


Bild 3: Trennung der Korngrößenverteilung eines potentiell suffosiven Bodens in Struktur und mobile Feinanteile. Anwendung des Terzaghi-Kriteriums

Bei der Prüfung des Suffosionspotentials einer Korngrößenverteilung nach dieser Methode erheben sich zwei grundsätzliche Fragen, die sich mit dem Auffinden der Trennkorngröße beantworten lassen:

- (i) liegt ein tragendes Skelett mit eingelagerten Feinteilen vor und falls dies zutrifft
- (ii) wo ist der relevante Trennpunkt zwischen Skelett und eingelagerten Feinteilen?

Die Filtereigenschaften der bei dem Korndurchmesser d_T aufgetrennten Korngrößenverteilungen lassen sich mit dem Abstandsverhältnis $d_{15,F}/d_{85,B}$, dem Selbstfiltrationsindex $I_{SF}(d_T)$ bewerten. Bei der Anwendung des Terzaghi-Kriteriums liegen geometrisch stabile Verhältnisse mit der für Filtration empirisch nachgewiesenen Sicherheit vor, wenn für beliebige Korngrößen d_T ein Selbstfiltrationsindex $I_{SF} \leq 4$ eingehalten ist. Nach vielen Vergleichsrechnungen und eigenen Untersuchungen treten auch bei Korngrößenverteilungen mit $I_{SF} \leq 6$ noch keine Ausspülungen auf. Der Boden ist bei einer homogenen Durchmischung hinsichtlich des Suffosionspotentials bis zu diesem Verhältnis quasi stabil.

In vielen experimentellen und theoretischen Untersuchungen hat sich dagegen der Grenzwert $I_{SF} \cong 9$ als relativ scharf erwiesen [4]. Ab diesem Abstandsverhältnis findet in Abhängigkeit der hydraulischen Einwirkung entlang bevorzugter Porenpfade ein Transport von mobilen Feinanteilen statt. Der Boden ist dann hinsichtlich des Suffosionspotentials instabil. Im Zwischenintervall ist zumindest mit lokal begrenzter Verlagerung von Feinanteilen bei hydraulischer Einwirkung zu rechnen.

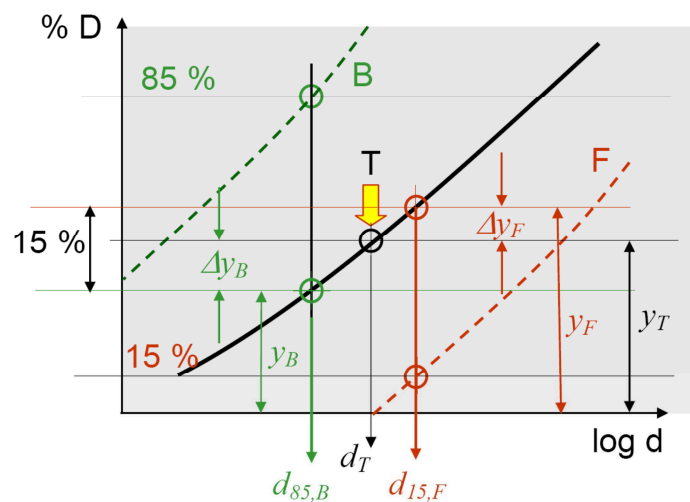


Bild 4: Definition der Durchmesser und Massenanteile zur Projektion der Fraktildurchmesser $d_{85,B}$ und $d_{15,F}$ auf die Ausgangskorngrößenverteilung

Zur Ermittlung des Selbstfiltrationsindex $I_{SF}(d_T)$ ist es nicht erforderlich, die Korngrößenverteilung tatsächlich an verschiedenen Durchmessern wie in Bild 3 dargestellt

graphisch aufzutrennen. Die Durchmesser der aufgetrennten Korngrößenverteilungen lassen sich direkt auf die Ausgangskorngrößenverteilung projizieren, $I_{SF}(d_T)$ kann direkt nach Gl. 4 berechnet werden. Die Kenngrößen und die verwendeten Symbole sind in Bild 4 und in den Gleichungen (5) bis (9) erläutert

$$I_{SF}(d_T) = \frac{d_{15,F}}{d_{85,B}} = \frac{d_{y_T + \Delta y_F}}{d_{y_T - \Delta y_B}} = \frac{d_{y_F}}{d_{y_B}} \quad (4)$$

$$\Delta y_F = 0,15 (100\% - y_T) \quad (5)$$

$$y_F = y_T + \Delta y_F = 0,85 \cdot y_T + 15\% \quad (6)$$

$$\Delta y_B = 0,15 \cdot y_T \quad (7)$$

$$y_B = y_T - \Delta y_B = 0,85 \cdot y_T \quad (8)$$

$$\Delta y_F + \Delta y_B = 15\% \quad (9)$$

Ausgehend vom Massendurchgang y_T der betrachteten Trennkorngröße d_T der Ausgangskorngrößenverteilung bilden sich die Durchmesser $d_{85,B}$ und $d_{15,F}$ bei einer virtuellen Trennung bei $y_T - \Delta y_B$ bzw. $y_T + \Delta y_F$ ab. Die Neigung der Sekante im betrachteten Intervall, näherungsweise die Steigung in d_T , berechnet sich nach Gl. (10).

$$m(d_T) = \frac{0,15}{\log I_{SF}} \quad (10)$$

Die Ermittlung von I_{SF} nach Gl. (4) vereinfacht sich, wenn der Quotient $d_{15,F}/d_{85,B}$ anstatt für einen konkreten Punkt d_T für das Intervall $d(y)$ bis $d(y+15\%)$, also jeweils für eine Massendifferenz von $\Delta D = 15\%$ ermittelt wird (z. B. d_{20}/d_5 , d_{25}/d_{10} , d_{30}/d_{15} usw.):

$$I_{SF} = \frac{d_{y+15\%}}{d_y} \quad (11)$$

Der Index lässt sich erforderlichenfalls mit Gl. (6) oder (8) der Trennkorngröße d_T über deren Massendurchgang y_T zuordnen.

$$y_T = \frac{y_B}{0,85} = \frac{y_F - 15\%}{0,85} \quad (12)$$

Mit den empirisch bestätigten Grenzen der Stabilität und Instabilität eines weitgestuften nichtbindigen Bodens lässt sich mit Gl. (10) dieses Suffosionskriterium als Steigung der Ausgangskorngrößenverteilung formulieren:

$$\text{innere Stabilität} \quad I_{SF} \leq 6 \rightarrow m \geq 0,193 \quad (13)$$

$$\text{innere Instabilität} \quad I_{SF} \geq 9 \rightarrow m \leq 0,157 \quad (14)$$

Für den Fall, dass in Bereichen der Korngrößenverteilung der mit den Gl. (4) oder Gl. (11) ermittelte Selbstfiltrationsindex bzw. die nach Gl. (10) ermittelte Steigung der Körnungslinie instabile Bedingungen nach Gl. (14) erwarten lässt, muss geprüft werden, ob strukturbedingt

Suffosion überhaupt möglich ist, d. h. ob aufgrund der Massenverhältnisse der virtuell aufgetrennten Korngrößenverteilung ein tragendes Skelett vorliegt oder ob ggf. eine Feinteilmatrix mechanisch und hydraulisch dominiert, in der sich a priori strukturbedingt keine Suffosion entwickeln kann. Theoretisch und empirisch abgesichert liegt ab einem Massenanteil der Feinanteile von $y_T \geq 30\%$ kein tragendes Grobskelett, sondern solch eine Feinteilmatrix vor. Das genaue bodenspezifische Verhältnis kann durch Mischungsversuche im Labor ermittelt werden [12], [13]. Für die in Bild 1 und 3 dargestellte Korngrößenverteilung wurde z. B. nachgewiesen, dass bezogen auf die ebenfalls experimentell ermittelte Trennkorngröße d_T im Intervall von 1 bis 2 mm bei mitteldichter Lagerung ab einem Massenanteil der Feinfraktion von 28 % alle Poren des Skeletts gefüllt sind und ab $d_{30} < 1$ mm eine Feinteilmatrix vorliegt.

Aufgrund dieser Strukturbetrachtung kann abgeleitet werden, dass es hinreichend ist, den Nachweis der inneren Stabilität auf die unteren 30 % des Massendurchgangs der Ausgangskorngrößenverteilung zu begrenzen. Suffosion kann strukturbedingt nur dann auftreten, wenn zusätzlich zur notwendigen Bedingung $I_{FS} \geq 9$ bzw. $m \leq 0,157$ gilt

$$\max d_T \leq d_{30} \text{ bzw. } y_T \leq 30\% \quad (15)$$

Umgekehrt impliziert dies, dass $d_T > d_{30}$ bzw. $y_T > 30\%$ eine hinreichende Bedingung für den Ausschluss von Suffosion ist. Bei einer Prüfung des Selbstfiltrationsindex einer Korngrößenverteilung vom Kleinstkorn steigend, liegt die größte ungünstige Trennkorngröße $\max d_T$ zwischen den skelettbildenden Körnern und den eingelagerten Feinteilen etwa am Übergang zwischen instabilen zu stabilen Verhältnissen. Bei Böden mit Ausfallkörnung ist dieser Punkt meist am rechten Rand des Sattels.

Das vorgestellte Kriterium betrachtet die Kinematik eines potentiellen Austrags von Feinanteilen. Soweit es sich bei den mobilen Fraktionen um kohäsionsloses Material handelt, muss davon ausgegangen werden, dass Suffosion schon bei einer geringen hydraulischen Einwirkung stattfindet, so dass eine zusätzliche Prüfung der hydraulischen Bedingungen nicht angemessen ist. Die Gefahr eines Austrags ist umso größer, je geringer der Füllgrad der Grobporen ist. Besteht der potentiell suffosive Anteil dagegen aus bindigem Boden, sind diese geometrischen Bedingungen nur als notwendiges kinematisches Kriterium zu betrachten. Das Lösen der Partikel und Aggregate ist mit zunehmender Kohäsion ein hydraulisch und mineralogisch dominiertes Phänomen [14].

Beispiel

Bild 5 zeigt die Anwendung des Kriteriums nach Gl. (11) und (14) auf die Korngrößenverteilung des oben beschriebenen Flusssedimentes. Eine visuelle Beurteilung erlaubt die Darstellung des Grenzwertes der Steigung pro Dekade. Der flacher als diese Grenzneigung verlaufende Teil der Körnungslinie, hier $d \leq 0,2 \text{ mm}$ und $0,6 \text{ mm} \leq d \leq 2 \text{ mm}$, erfüllt in diesen Intervallen nicht die Grenzbedingung $d_{15,F}/d_{85,B} \leq 9$. Der Boden ist instabil. Die fraktionsweise Berechnung des Verhältniswertes I_{FS} nach Gl. (11) und dessen Zuordnung zu der korrespondierenden Trennkorngröße bestätigen die Suffosionsanfälligkeit dieses Bodens. Das für die Strukturbildung maßgebende größte Korn liegt im Bereich $d_T \approx 2 \text{ mm}$, am Übergang zur quasistabilen Bedingung.

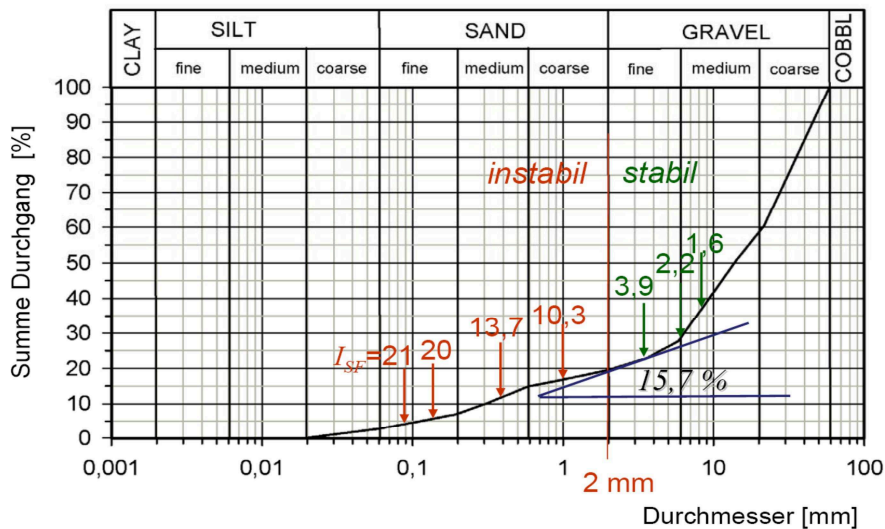


Bild 5: Beispiel zur Anwendung des I_{SF} -Suffosionskriteriums

Die experimentelle Ermittlung der Trennkorngröße zwischen Struktur und Porenfüllung durch sequentielle Mischversuche [13], CT-Visualisierung und numerische Analysen der Struktur dieses typischen Flusssedimentes haben bestätigt, dass bei einer homogenen Mischung das tragende Skelett aus den Körnern $d \geq 1,4 \text{ mm}$ gebildet wird und dass die Poren dieses Skeletts nur unvollständig mit Feinteilen gefüllt sind (vgl. auch Bild 2). In aufwändigen Säulenversuchen wurde bei einer zyklischen Durchströmung in Richtung der Schwerkraft bis zu 6 % der Masse ausgespült. Darüber hinaus wurden durch die Potentialverteilung signifikante Umlagerungen der Feianteile über Distanzen bis zu 10 cm nachgewiesen. Das Größtkorn des ausgespülten Bodens betrug 1 mm.

Diskussion

In dem Regelwerk MSD, 2011 [6] wird eine gestufte Methode des Suffosionsnachweises empfohlen, in dessen Kern der Nachweis nach *Kenney & Lau* steht [3]. Dieser Nachweis baut auf der Referenzmethode nach *Lubočkov* [1] auf. Im Gegensatz zur hier vorgeschlagenen Bewertung der Steigung der Korngrößenverteilung betrachtet der Nachweis nach *Kenney & Lau* den Massenzuwachs H bei einem festen Verhältnis der Korndurchmesser d_x bis $4 \cdot d_x$. Auch dieser Nachweis lässt sich als Steigung der Korngrößenverteilung darstellen, der Grenzwert ist jedoch nicht konstant, sondern hängt vom Massendurchgang F der betrachteten Korngröße ab [8], [12]. Das Kriterium ist daher geometrisch nicht invariant, berücksichtigt also auch andere Effekte, als nur die Kinematik von Transport und Rückhalt. Nach Ansicht des Autors kann dieses Kriterium nur die Aussage treffen, ob ein Boden stabil oder instabil ist. Weitergehende Aussagen können daraus nicht abgeleitet werden. Es ist jedoch experimentell abgesichert und steht nicht im Widerspruch zu der hier vorgeschlagenen Methode.

Die Bewertung des Suffosionspotentials durch den Selbstfiltrationsindex I_{SF} erlaubt dagegen gleichzeitig eine quantitative Bewertung des Abstandes zum Grenzzustand, liefert die maximale Trennkorngröße und die sich daraus ergebende potentiell mobile Masse der Feinanteile. Das Ergebnis ist dahingehend zu interpretieren, dass in einer homogenen Schüttung bei Unterschreitung der Grenzneigung der Korngrößenverteilung über ein Massenintervall von mindestens 15 % hinweg eine Grobstruktur mit eingelagerten Feinteilen geometrisch möglich, wobei die Grobstruktur nicht in der Lage ist die mobilen Feinanteile bei einem hydraulisch oder dynamisch verursachten Transport zurückzuhalten. Das Kriterium prüft jedoch nicht die Problematik einer lokal begrenzten inneren Instabilität, die bei einer entmischt eingebauten Schüttung eines insgesamt stabil abgestuften Bodens lokal auftritt, wenn sehr grobkörnige und sehr feinkörnige Zonen aneinandergrenzen.

Zusammenfassung

Suffosionsempfindliche Böden sind durch eine bimodale Korn- und Porenstruktur gekennzeichnet. Im Porenraum einer mechanisch dominanten Grobstruktur sind Feinanteile eingelagert, die bei einer Porenströmung defraktioniert werden. Sind die Engstellen des Porenraums nicht in der Lage, die mobilen Partikel durch Filtration zurückzuhalten, kommt es zu einer lokal begrenzten Verlagerung oder auch zu einer Ausspülung von Feinanteilen des Bodens. Folge ist eine Schwächung der Struktur, die bei progressivem Verlauf zu deren Kollaps, zu Setzungen, Sackungen oder auch zu rückschreitender Erosion führen kann.

Zur Beurteilung des Suffosionspotentials eines Bodens wird eine Analogie zwischen der geometrischen Filtration an einer Grenzschicht benachbarter Böden und der Suffosion vorgestellt. Die Korn- und Porenstruktur wird als räumlich wirkendes Sieb mit einer variablen Öffnungsweite betrachtet, wobei sich entlang der Porenpfade eine hohe Trennschärfe im Sinne

einer effektiven Öffnung der Struktur ergibt, die den Transport oder Rückhalt von mobilen Feinanteilen kontrolliert.

Der Selbstfiltrationsindex I_{FS} wird als Verhältnis Korngrößen $d_{15,F}$ und $d_{85,B}$ der virtuell aufgetrennten Korngrößenverteilungen definiert. Der Wert kann direkt aus der zu bewertenden Korngrößenverteilung als Verhältnis zweier Korndurchmesser ermittelt werden, die eine Differenz des Massendurchgangs von 15 % aufweisen. Wird im Bereich von d_0 bis d_{30} ein Verhältnisswert $I_{SF} \leq 4$ nachgewiesen, ist aufgrund geometrischer Betrachtungen kein Transport von Feinteilen aus der Kornstruktur zu erwarten. Für $I_{SF} \geq 9$ handelt es sich um einen suffosiven Boden. Das tragende Skelett der Bodenstruktur ist dann nicht in der Lage, hydraulisch mobilisierte Körner geometrisch zurückzuhalten. Eine Filterwirkung und somit geometrische Stabilität kann erst durch Blockade der Porenpfade nach einem gewissen Partikeltransport stattfinden. Die Grenze zwischen skelettbildenden Körnern und eingelagerten Feinanteilen liegt auf der Körnungslinie etwa am Übergang zwischen instabilen zu stabilen Verhältnisswerten.

Als erster Schritt der Analyse wird die Steigung der Korngrößenverteilung im Intervall $d < d_{30}$ betrachtet. Instabile Bedingungen liegen bei einem nichtbindigen Boden vor, wenn dessen Korngrößenverteilung über einen signifikanten Korngrößenbereich flacher als die Grenzneigung verläuft, die näherungsweise einem Massezuwachs von 16 % je Dekade entspricht. Verläuft die Steigung der Korngrößenverteilung steiler als 19 %, besteht bei einer homogenen Schüttung keine Suffosionsgefahr. Im Zwischenbereich ist mit lokaler Mobilität zu rechnen. Der Boden ist dann quasi stabil. Ein zu flacher Verlauf der Körnungslinie oberhalb eines Massendurchgangs von 30 %, gleichbedeutend mit $d_T > d_{30}$, ist in Hinblick auf innere Erosion unproblematisch. Die Bodenstruktur wird dann durch die feineren Fraktionen gebildet, die mechanisch wie hydraulisch dominant sind. Es liegt kein Grobskelett und somit kein Suffosionspotential vor.

Für Böden mit kohäsiven Feinanteilen gelten die geometrischen Bedingungen gleichermaßen. Hier sind aber zusätzlich die Aggregatsgrößen der Fragmentierung und die hydraulische Beanspruchung für das Lösen und den Transport ausschlaggebend.

Eigene ingenieurpraktische Erfahrungen haben gezeigt, dass die Ursache von Suffosion nicht immer die in der Spezifik der übergeordneten Kornzusammensetzung eines Bodens liegt, sondern das Phänomen häufig als Folge einer Entmischung beim Einbau weitgestufter Böden auftritt. Insofern erheben sich bei der Bewertung der Suffosionsgefährdung eines Erdbauwerks immer auch die Fragen der Repräsentativität der Korngrößenverteilungen und die der Schädlichkeit eines lokal begrenzten Partikeltransportes.

Dank

Der Autor bedankt sich bei dem Wasser- und Schifffahrtsamt Freiburg und der Bundesanstalt für Wasserbau für die Beauftragung zahlreicher Untersuchungen, Beratungen und fruchtbaren Diskussionen zu Fragen der inneren Erosion von Dämmen. Besonderer Dank gilt meinen

wissenschaftlichen Mitarbeitern M.Sc. M. Salehi Sadaghiani und H. Jentsch für die Durchführung von Experimenten und Vergleichsrechnungen.

Literatur

- [1] *Lubočkov, E.A.*: The calculation of suffosion properties of non-cohesive soils when using the Non-suffosion analogue (russisch). In: International Conference on Hydraulic Research. Brno, Czechoslovakia, 1969, S. 135–148
- [2] *WAPRO4.04, Blatt 2* Ausgabe Oktober 1970. Nachweis der Beständigkeit von Erdstoffen gegenüber der Einwirkung der Sickerwasserströmung – Suffosion nichtbindiger Erdstoffe
- [3] *Kenney, T.C. Lau, D.*: Internal stability of granular filters - Reply, Canadian geotechnical Journal 23 (1986), pp. 255-258
- [4] *Semar, O., Witt, K.J., Fannin, J.*: Suffosion evaluation – comparison of current approaches. Proceeding of the Fifth International Conference on Scour and Erosion, ASCE Geotechnical Special Publication No.210, 2010, pp. 251-261
- [5] *Laursen, Ch., Kayser, J.*: Suffosiver Materialtransport in durchströmten Böden. 8. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Technische Akademie Esslingen, 2012
- [6] Bundesanstalt für Wasserbau (Hrsg.): *BAW Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen* (MSD). Ausgabe 2011
- [7] *Kézdy, Á.*: Verstärkung der Hochwasserschutzdeiche (Ungarisch) Institut für Geotechnik, Technische Universität Budapest, Bericht Nr. 1, 1969
- [8] *Witt, K. J.*: Der Selbstfiltrationsindex als Suffosionskriterium für nichtbindige Erdstoffe. geotechnik 36 (2013), Heft 3, S. 160-168
- [9] *Semar, O.*: Anwendung der Perkolationstheorie zur Analyse des suffosiven Partikeltransportes. Schriftenreihe Geotechnik, Bauhaus-Universität Weimar, Heft xx 2010
- [10] *Bertram, G.E.*: An experimental investigation of protective filters. Publ. Graduate School of Engineers, Harvard University, No. 267, 1940, pp. 1-21
- [11] *Sherard, J.L.*: Sinkholes in dams of coarse, broadly graded soils. Transactions, 13th Int. Congress on Large Dams, New Dehli, India, 1979, vol.2 pp 25-35
- [12] *Chapuis, R.P.*: Similarity of internal stability criteria for granular soils. Canadian geotechnical Journal 29 (1992), pp. 711-713
- [12] *Larrard, F. de*: Concrete Mixture-Proportioning - A Scientific Approach. Modern Concrete Technology Series No. 9, ed: Mindess, S. Bentur, A., E & FN SPON, London, p. 421, 1999
- [13] *Salehi Sadaghiani, M.R., Witt, K.J., Jentsch, H.*: Proc. 6th Int. Conf. Scour & Erosion ISCE-6, Paris, 2012, pp. 132-138
- [14] *Rehfeld, E.*: Die Erosionsbeständigkeit bindiger Lockergesteine – die wichtigsten Grundlagen zur Dimensionierung von Dichtungsschichten aus natürlichem Erdstoff. Wiss. Zeitschr. d. TU Dresden 16, 1967, H.5