

Modellierung von Erosion und Transport von Bodenpartikeln im Korngefüge

Motivation und Konzept

M.Sc. S. Buscher, Universität Duisburg Essen, Essen
Prof. Dr.-Ing. E. Perau, Universität Duisburg Essen, Essen

Erosive Prozesse in Böden, wie beispielsweise Suffosion und Kolmation, nehmen bei durchströmten geotechnischen Konstruktionen eine besondere Rolle ein. Sie stellen beispielsweise für Erdbauwerke, an denen Wasser längerfristig ansteht, wie Flussdeiche und Staudämme eine Gefahr dar. Infolge hydrodynamischer Kornumlagerungen verändern sich die Eigenschaften des durchströmten Bodens, was langfristig zu Standsicherheitsproblemen führen kann.

Die Auswirkungen von bodenmechanischen Erosionsprozessen werden derzeit über ihr finales Stadium als Versagenszustand beschrieben. Die Erosionsprozesse selber und ihr Verlauf bis hin zum Versagen werden dabei nicht untersucht. Den Prozess selber zu simulieren, würde es ermöglichen, Probleme besser zu erkennen und im Vorfeld wirtschaftliche Maßnahmen zu treffen. Die Beschreibung derartiger Prozesse auf mechanischer Grundlage ist Gegenstand dieses Beitrags. Es wird ein Drei-Phasen-Modell vorgestellt, in dem sowohl Ansätze aus der Kontinuumsmechanik als auch Erfahrungen aus der geotechnischen Praxis Anwendung finden. Das Modell beschreibt die Beziehungen, in denen die drei Phasen des Bodens (Korngefüge, Porenfluid und herausgelöste Partikel) während hydrodynamischer Kornumlagerungen stehen. Bestimmte Grenzfälle werden für das Modell identifiziert und näher erläutert. Die Implementierung dieser Grenzfälle über die Interaktionskräfte ist der nächste Schritt bei der Entwicklung des Modells.

1 Einleitung und Problemstellung

Unter dem Begriff „Erosion“ wird der Austrag von Bodenkörnern infolge äußerer Einflüsse wie Wind oder Wasserströmung verstanden. Bei geotechnischen Anwendungen bezieht sich der Begriff Erosion lediglich auf die Bewegung einzelner Bodenkörner infolge von Grundwasserströmung. Obwohl derartige Kornbewegungen möglich sind, wird in der klassischen Bodenmechanik stets angesetzt, dass das Korngerüst erhalten bleibt und sich als solches durch hydraulische Einflüsse nicht verändert.

Nach Ziems (Busch et al., 1993) werden erosive Prozesse abhängig von der in Bewegung geratenen Kornfraktion und ihrer Bewegungsrichtung in Bezug zum Schichtaufbau kategorisiert. So wird die Auflösung der gesamten Kornmatrix unter hydraulischen Bedingungen als Erosion bezeichnet. Dabei unterscheidet Ziems noch, ob dieser Auflösungsprozess nur innerhalb des Erdreiches („*innere Erosion*“), an der Geländeoberfläche („*äußere Erosion*“), zwischen zwei verschiedenen Bodenarten („*Kontakterosion*“) oder direkt entlang eines massiven Bauwerks („*Fugenerosion*“) abläuft.

Werden nur die feinsten Körner des Korngerüsts, hier Partikel genannt, aus dem Korngerüst gelöst und durch Wasserströmung bewegt, wird von Suffosion gesprochen. Auch hier kann der Prozess wie bei der

Erosion abhängig von seinem Ort differenziert benannt werden („*Äußere Suffosion*“, „*Innere Suffosion*“, „*Kontaktsuffosion*“). Im Zuge der Suffosion verändert sich der Porenraum und damit die bodenmechanischen Eigenschaften wie bspw. die Durchlässigkeit. Sie hat so einen indirekten Einfluss auf die Gebrauchstauglichkeit und Standsicherheit von geotechnischen Konstruktionen.

Als Gegenprozess zur Erosion und Suffosion ist die Kolmation zu nennen. Hier werden gelöste Partikel wieder im Korngerüst angelagert, wenn die Strömungskraft abnimmt und/oder die Partikel zu groß sind, um durch die Porenkanäle zu gelangen. Es entstehen im letzteren Fall sogenannte Filterkuchen (Schaufler et al., 2013).

Negativ wirkt sich Kolmation auf planmäßig durchströmte Bereiche wie beispielsweise dem engeren Umfeld von Brunnen aus, denen dann nur noch wenig Wasser entnommen werden kann und dabei auch die entspannende Wirkung auf das Grundwasser abnimmt.

Positiv ausnutzen lässt sich die Kolmation beispielsweise bei der Stützung des offenen Schlitzes bei Schlitzwänden. Durch die gewollte Entwicklung einer Filterkuchenschicht zum anstehenden Erdreich kann die Dränbedingung der Bentonitsuspension gesteuert und so das gewünschte Verhältnis zwischen Wasser und Feststoff erhalten werden. (vgl. Triantafyllidis, 2004)

Innere Suffosion findet häufig in grob gestuften Böden mit geringem Feinanteil statt (Chang et al., 2013). Da sie im Inneren des Bodens auftritt, wird sie anders als beispielsweise die äußere Erosion leicht übersehen. Zunächst werden bei der inneren Suffosion die feinsten Partikel des Bodens gelöst und bewegt, wodurch sich der Porenraum langsam vergrößert. Nach Kozeny und Carman (Carrier, 2003) wissen wir, dass der Porenraum einen direkten Einfluss auf die Durchlässigkeit hat. Mit einer größeren Durchlässigkeit steigen die Strömungsgeschwindigkeit und der hydraulische Druck auf das Korngerüst nimmt bereichsweise zu. Infolge dessen werden auch größere, aber immer noch feine, Körner des Bodens abtransportiert, was wiederum die Durchlässigkeit weiter vergrößert und nach schleichendem Beginn nach und nach eine Kettenreaktion auslösen kann.

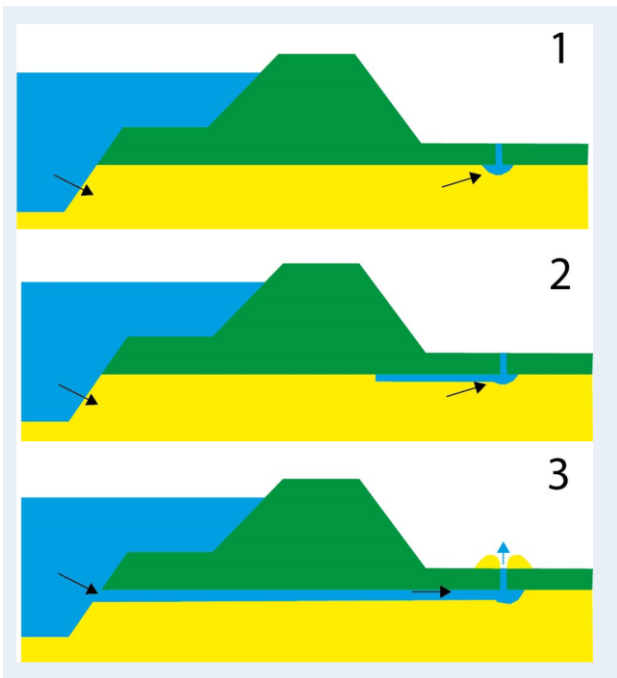


Abbildung 1-1: Schematische Darstellung des Ablaufs einer rückschreitenden Erosion an Erdbauwerken (nach Verhagen, 2020)

Innere Suffosion beeinflusst damit maßgeblich die Gebrauchstauglichkeit bzw. Funktionalität von wasserhaltenden Erdbauwerken wie Dämmen oder Deichen und letztendlich auch die Standsicherheit.

In Abbildung 1-1 ist der Prozess der *rückschreitenden Erosion* an einem Flussdeich dargestellt. Die untere Bodenschicht ist im Beispiel durchlässiger als der obere Deichkörper. Das angestaute Wasser durchströmt diese Schicht und tritt im ungünstigsten Fall unterhalb der luftseitigen Böschung aus. Ist die Strömungskraft groß genug, werden die Feinfraktionen aus der Deckschicht herausgelöst, der Porenraum vergrößert und es bildet sich eine Fehlstelle (1) aus. Das Korngerüst, bestehend aus den größeren

Bodenkörnern, mag erhalten bleiben. Zu diesem Zeitpunkt ist jedoch bereits der Widerstand auf der Sickerstrecke verringert und der hydraulische Gradient steigt bereichsweise. Weiteres Material aus tieferen bzw. näher zur wasserseitigen Böschung liegenden Bereichen wird nun ausgespült (2). Es beginnt ein rückschreitender Prozess. Dabei muss kein durchgängiger Kanal entstehen, wie es bei einem Austrag aller Kornfraktionen der Fall wäre, aber am Ende dieses Prozesses steht eine geschwächte Zone, durch die das Wasser aufgrund des größeren Porenraumes und der größeren Durchlässigkeit leicht strömt. Im Versagensfall wird das Land hinter dem Deich geflutet und möglicherweise der Deich bereichsweise ganz aufgelöst.

Im Fokus des vorliegenden Beitrags liegt die *innere Suffosion* sowie deren Modellierung. Es fällt zunächst auf, dass derzeit kein universelles Nachweisverfahren zum Ausschluss des Versagens durch rückschreitende Erosion zu existieren scheint. Mit Hilfe der Ereignisbäume nach Wan und Fell (2007) ist es zwar möglich, die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines rückschreitenden Erosionsprozesses zu ermitteln, allerdings ist das Verfahren sehr aufwändig und noch nicht vollumfänglich ausgearbeitet.

Für kohäsionslose Böden existieren sogenannte Filterkriterien. Diese sind Designregeln, bei deren Einhaltung Suffosionsprozesse vermieden werden. Es lassen sich damit also Aussagen treffen, ob die feinen Bestandteile eines Bodens überhaupt durch die Porenkanäle wandern können. Ist dies durch die Einhaltung der Designregeln ausgeschlossen, wird davon ausgegangen, dass ein suffosiver Prozess nicht eintreten wird. Bisher hat allein Ziems (Busch et al., 1993) ein hydraulisches Nachweiskriterium vorgeschlagen, das der geometrischen Untersuchung nachgeschaltet ist. Die Bundesanstalt für Wasserbau hat ein Nachweiskonzept entwickelt, mit dem es möglich ist, verschiedene Filterkriterien kombiniert zu verwenden, um eine Suffosionsgefährdung zu evaluieren. In der Praxis wird darauf geachtet, dass die Kornfraktionen grundsätzlich nicht durch die Porenkanäle des Korngerüsts gelangen können.

Aufschlussreich ist das Fazit der BAW zur Problematik: „Da die Vorgänge bei innerer Erosion rechnerisch nicht erfasst werden können, existieren hierfür keine Nachweisverfahren. Möglichen schädlichen Auswirkungen muss konstruktiv begegnet werden.“ (BAW, 2013 S.5)

Dieses Vorgehen ist insofern unbefriedigend, als dass es möglicherweise unwirtschaftlich ist und suffosive Prozesse nicht unbedingt zu einem Funktionsverlust oder gar Versagen einer Konstruktion führen müssen. Des Weiteren können die Nachweise nur für Ist-Zustände geführt werden – sie können keine Einschätzung über die Dauer eines Prozesses geben. Zudem besteht über die wissenschaftliche Neugierde

hinaus auch für forensische Fragen die Notwendigkeit, derartige Prozesse beschreiben zu können. Wir arbeiten hierzu an Modellen auf Basis der Kontinuumsmechanik.

2 Kontinuumsmechanisches Modell

2.1 Grundlagen und Visualisierung

Im Folgenden wird ein Basismodell zur Beschreibung von inneren Erosionsprozessen im Boden vorgestellt. Die Zielsetzung, zugrundeliegenden Annahmen, Vereinfachungen und Gleichungen sind Bestandteil dieses Unterkapitels. In den folgenden Unterkapiteln werden die Grenzfälle und Bilanzgleichungen, die den Rahmen der Modelle bilden, betrachtet. Die Modellierung greift auf Erkenntnisse der Kontinuumsmechanik zurück und besteht im Basismodell aus drei Phasen, Konstituierenden, die gemeinsam das Betrachtungsvolumen, das Kontinuum, bilden.

Die Kontinuumsmechanik wird vor allem bei der Beschreibung von Prozessen chemischer und physikalischer Natur eingesetzt. Mit ihr ist es möglich, phänomenologische Modelle zu bilden, um die makroskopischen Effekte eines Prozesses zu beschreiben. Mikroskopische Wechselwirkungen sind zwar die Ursache der makroskopischen Effekte, werden jedoch als solche in diesem Modell bzw. in der Theorie der porösen Medien nicht im Detail abgebildet.

Ziel unserer Forschungstätigkeit ist es, ein Modell zu entwickeln, das die Transportvorgänge von Partikeln im Boden beschreibt und die Effekte auf diesen wie die Veränderung der Bodeneigenschaften quantifiziert. Es soll nicht nur für kleinteilige Elementversuche, sondern auch Problemstellungen größeren Maßstabs geeignet sein. Abschließend müssen die bodenmechanischen Eingangsparameter aus Feld- und Laborversuchen bestimmt werden können.

Boden besteht im Wesentlichen aus Körnern, Wasser und Luft. Da Suffusionsprozesse vor allem in wassergesättigten Böden ablaufen, kann die Luft in den Poren des Bodens zumindest in einem Basismodell vernachlässigt werden – wobei sich abweichend von den Ansätzen der klassischen Bodenmechanik in den Poren auch feine Bestandteile des Bodens, sogenannte „Partikel“ frei bewegen können.

Das Basismodell setzt sich demnach aus drei Phasen zusammen. In Abbildung 2-1 ist auf mikroskopischer Ebene ein solches Modell – stark idealisiert – dargestellt. Die Farben geben den Zustand bzw. die Zuordnung zu der jeweiligen Konstituierenden wieder. Hellblau steht für das Porenwasser, Sandgelb sind die Körner des starren Korngerüstes und dunkelblau die gelösten, sich frei bewegenden Partikel. Zwei Idealisierungen geometrischer Art sind in Abbildung 2-1 augenfällig.

Die erste geometrische Vereinfachung in Abbildung 2-1 ist die Schnittführung durch den mittleren Querschnitt aller sphärischen Körner, um die Größenunterschiede zu verdeutlichen.

Die zweite geometrische Vereinfachung in Abbildung 2-1 bezieht sich auf die Kornform. Alle Körner und Partikel sind durch Kugeln idealisiert worden. Dies hat zwei Gründe: Zum einen gelten die zuvor erwähnten Nachweise gegen Suffosion für kohäsionslose Böden und zum anderen vereinfacht die Annahme von sphärischen Körpern die mechanische Beschreibung der Körner, da der Massen- und Schubmittelpunkt zusammenfallen und kein Strömungsabriss an der Kornkante auftritt, sodass die Körner keine zu berücksichtigende Eigendrehung verzeichnen.

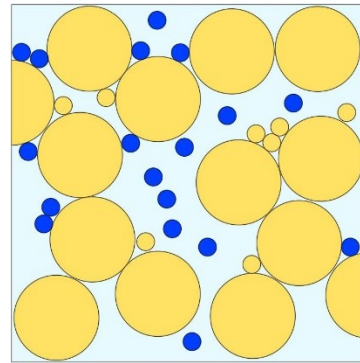


Abbildung 2-1: Idealisiertes Korngefüge mit Partikeln

Die Saturierungsbedingung (Gl. 1) ist eine von drei Gleichungen, die in diesem Beitrag vorgestellt werden, um die verschiedenen Phasen des Bodens zu verknüpfen und Aussagen über das Kontinuum und die Konstituierenden zu treffen. Sie besagt, dass das Betrachtungsvolumen jederzeit vollständig (zu 100%) gefüllt sein muss. Durch Superposition der einzelnen Volumenanteile der Phasen wird dies überprüft oder durch Rückrechnen der Volumenanteil der überzähligen Phase ermittelt. Ein Volumenanteil n_k ist definiert als das Volumen der einzelnen Phase k bezogen auf das gesamte Betrachtungsvolumen.

$$\sum n_k = n_S + n_F + n_P = 1 \quad (1)$$

In Gleichung 1 steht der Index S für das Korngefüge (solid), F für das Wasser (fluid), P für die frei beweglichen Körner (particles).

Eine Visualisierung der Saturierungsbedingung ist sowohl räumlich als auch in der Ebene möglich (Abbildung 2-2). Räumlich, mit je einer Achse, die den Volumenanteil einer der drei Phasen quantifiziert, dargestellt, ergibt sich für die Saturierungsbedingung eine dreieckförmige Ebene im Raum. Jeder Punkt

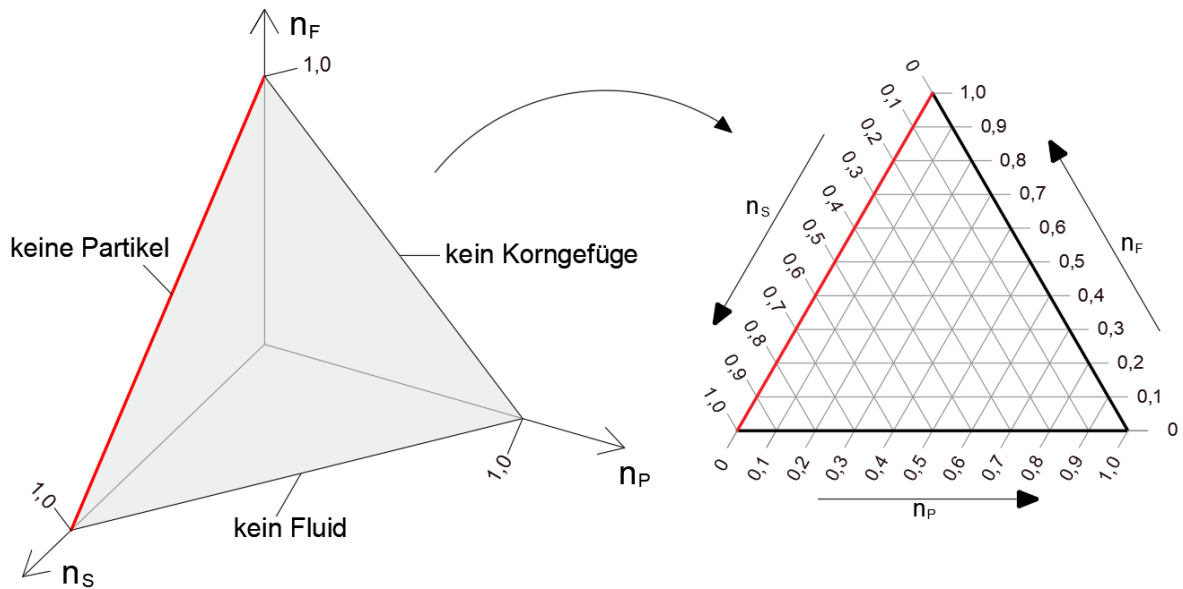


Abbildung 2-2 Visualisierung der Saturierungsbedingung in 3D (li.) und 2D (re.) als Dreiecksdiagramm

auf dieser Ebene steht für eine mögliche Konstellation, bei der sich das Kontinuum an einer Stelle aus unterschiedlichen Volumenanteilen der drei beteiligten Konstituierenden zusammensetzt. Die in Abb. 2-2 rot hervorgehobene Kante ($n_p=0$) repräsentiert Konstellationen, in dem keine Partikel und nur Korngefüge und Porenfluid vorhanden sind.

Als ebene Darstellung, rechts in Abbildung 2-2, wird aus der aufgespannten Fläche ein Dreiecksdiagramm, die ebenfalls diese rote Kante enthält.

Neben der Beschreibung der Saturierungsbedingung kann mit dem Dreiecksdiagramm auch der Verlauf eines Suffosionsprozesses gezeigt werden.

Abbildung 2-3 zeigt den vereinfachten Ablauf einer Suffosion. Am Anfang (I) befinden sich im Betrachtungsvolumen nur Korngefüge und Porenfluid. Damit fällt der Ausgangspunkt im Dreiecksdiagramm auf die rote Kante aus Abbildung 2-2. Infolge einer Grundwasserströmung lösen sich alle feinen Körner vom Korngerüst und werden in Bewegung gesetzt. Sie gehen in die Partikelphase über (II). Zuletzt werden alle Partikel vollständig aus dem Volumen durch die Wasserströmung gespült und es bleiben nur Korngerüst und Porenfluid zurück (III).

In der Realität würden das Ablösen und der Transport der Partikel nicht nacheinander (wie hier dargestellt) ablaufen, sondern kontinuierlich und zeitlich parallel. Damit gäbe es kein ausgeprägtes Dreieck, sondern eher eine Kurve, die die Punkte I und III verbindet, aber Punkt II nicht schneidet.

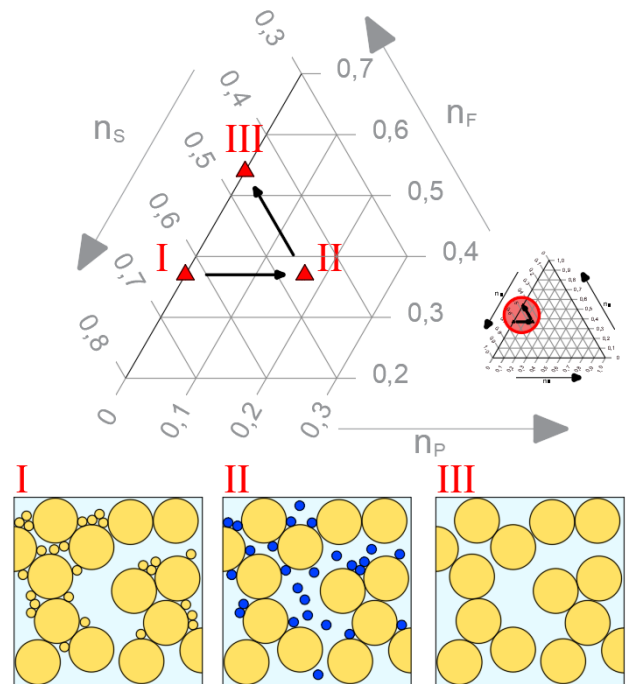


Abbildung 2-3: Suffosionsprozess im Dreiecksdiagramm

2.2 Grenzfälle

Im folgenden Abschnitt werden einige Grenzfälle für das Modell vorgestellt, die im geplanten Modell als Spezialfälle enthalten sein müssen.

Zunächst ist an dieser Stelle die partikelfreie, reine Grundwasserströmung zu nennen. Diese dient als eine wichtige Grundlage des Modells und muss bei jeder Erweiterung enthalten sein. Die rote Kante in Abbildung 2-2 stellt genau den Fall der Grundwasserströmung dar.

Die Veränderung der Bodeneigenschaften abhängig vom Porenraum wird im Prinzip durch die Kozeny-Carman-Gleichung beschrieben. Diese ist jedoch nicht nur auf die reine Grundwasserströmung beschränkt, sondern gilt weiter einschränkend nur in Bereichen eines mittleren Porenvolumenanteils, wie das in Abbildung 2-4 durch die grüne Linie dargestellt ist. Für das Modell muss diese Gleichung um Anteile erweitert werden, die zunächst überhaupt die Partikelphase beinhalten, um danach Suffosion und Kolmation im nächsten Schritt implementieren zu können.

Die Bewegung der Partikel durch die Porenkanäle wird leicht nachvollziehbar auch einen Einfluss auf den Gesamtprozess haben. Ein erster Ansatz, einen solchen Einfluss zu quantifizieren kann über die Gleichungen von Stokes erfolgen. Es lassen sich über dessen Kugelfallmethode Erkenntnisse über die Kräfte zwischen Partikel und Fluid mit Relativgeschwindigkeit ableiten. Im Dreiecksdiagramm (Abbildung 2-4) wird die einzelne Kugel ($n_p \ll n_f$) im Fluid ohne Korngefüge an der oberen Spitze verortet (blaues Dreieck). Alternativ kann eine feststehende Kugel mit umströmendem Fluid auch als ein, allerdings sehr reduziertes, Korngerüst betrachtet werden ($n_s \ll n_f$).

Suffosionsgefährdete Böden haben einen maximalen Feinanteil von 30% (Chang et al., 2013). Liegt der Feinanteil über dieser Grenze, tragen die feinsten Körner wesentlich zum Lastabtrag bei, wodurch der Prozess der Suffosion in einen inneren Erosionsprozess übergehen würde. Der Anwendungsbereich des Modells für geotechnische Fragestellungen muss daher ungefähr den grauen Bereich abdecken (Abbildung 2-4).

2.3 Bilanzgleichungen

Um die Kräfte, die im Kontinuum wirken, sowie die räumliche und zeitliche Entwicklung der einzelnen Massen zu berechnen, müssen die Massenbilanz und Impulsbilanz ausgewertet werden. Für jede Konstituierende wird eine eigene Bilanz aufgestellt. Dies bedeutet, dass zunächst für jede der Phasen ein eigener Bewegungszustand, eine eigene Dichte usw. definiert werden müssen.

Die Bilanz in Gl. 2 beschreibt die Massenerhaltung, wenn in der Gleichung die rechte Seite m_k zu null wird. Mit dieser Form können auch Prozesse beschrieben werden, die Kompressions- oder Streckvorgänge im Kontinuum beinhalten.

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \text{div}(\rho_k \mathbf{w}_k) = m_k \quad (2)$$

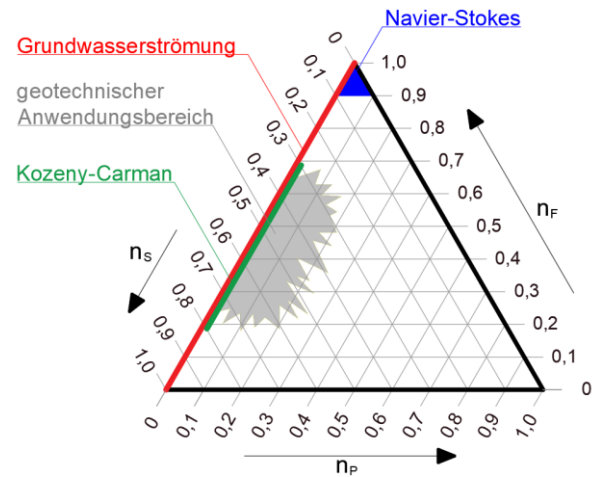


Abbildung 2-4: Grenzfälle in Dreiecksdiagramm dargestellt

Stehen erosive Prozesse im Fokus, werden Teile der Masse des Korngefüges zur Masse der Partikel umgewandelt. Dann müssen Massenaustauschterm m_k einbezogen werden. Ein Massenaustauschterm steht für die Rate, in der die Masse einer Phase in die einer anderen übergeht.

Für die fluide Phase ist hier der Massenaustauschterm null (Gl. 3a). Anders ist dies für die Massenaustauschterm (Gl. 3b,c) der festen Phasen. Während Suffosion und Kolmation gehen Teile des Korngerüsts in die Partikelphase über und umgekehrt. Sie ändern dabei ihren Bewegungszustand, aber nicht ihre Dichte. Damit sind die Terme im Betrag gleich und es muss nur der Massenaustauschterm einer Konstituierenden formuliert werden.

$$m_F = 0 \quad (3a)$$

$$m_s = -m_p \quad (3b)$$

$$m_p = f(n_s, n_p, \mathbf{w}_F, p_{SR}) \quad (3c)$$

Ansätze für den Massenaustauschterm der Partikelphase bzw. einer Suspension aus Fluid und Partikeln sind aus der Literatur (Steeb et al., 2005; Schaufler et al., 2013; Pfletschinger-Pfaff et al., 2014) bekannt. Zumeist beziehen sich diese Terme auf einen oder zwei Teilaspekte der Suffosion. Bei Askamp (voraussichtlich 2023) wird eine Möglichkeit vorgestellt, wie alle drei Teilaspekte (Ablösen, Transport, Anlage von Partikeln) mit einem Term gemäß Gl. 3c in Verbindung mit den Bilanzgleichungen wiedergegeben werden können.

$$\text{div} \mathbf{T}_k + \rho_k (\mathbf{b} - \mathbf{a}_k) + \mathbf{s}_k = m_k \mathbf{w}_k \quad (4)$$

Die Impulsbilanz (Gl. 4) enthält mehrere Anteile, die sich aus den Volumenkräften innerhalb und auf das Kontinuum wirkend zusammensetzen. Auch hier geht der Massenaustauschterm ein, spielt dort aber

keine maßgebliche Rolle. Interessanter sind hier die Divergenz des inneren Spannungstensors $div\mathbf{T}_k$ (Gl. 5a), da in diesem die Geschwindigkeit \mathbf{w}_k der betrachteten Phase eingeht, und der Interaktionsterm \mathbf{s}_k (Gl. 5b). Der Interaktionsterm ist abhängig von der Relativgeschwindigkeit $(\mathbf{w}_k - \mathbf{w}_j)$ und einer Resistivität R_{kj} zwischen jeweils zwei Phasen.

$$\mathbf{T}_k = f(\rho_k, \mathbf{w}_k, \dots) \quad (5a)$$

$$\mathbf{s}_k \sim \sum R_{kj} (\mathbf{w}_k - \mathbf{w}_j) \quad (5b)$$

Die Resistivität ist ein Proportionalitätsfaktor. Sie beinhaltet den Kehrwert der „Durchlässigkeit“ zwischen jeweils zwei Konstituierenden. Da die Durchdringungskraft zweier Phasen abhängig von der Bewegung zwischen den beiden Phasen ist, wird hier über die Relativbewegung die maßgebende Geschwindigkeitsdifferenz bestimmt. Für einen teilgesättigten Boden sind die Parameter für die Interaktion zwischen Luft, Wasser und Korngefüge bekannt (Perau, 2001) und numerisch evaluiert (Potthoff, 2003). Für das hier vorgestellte Modell müssen die Resistivitäten zwischen Fluid, Korngefüge und Partikelphase gefunden werden. Dabei können auf bisherige Erkenntnisse zurückgegriffen und neue Aspekte aus den vorgestellten Grenzfällen einbezogen werden.

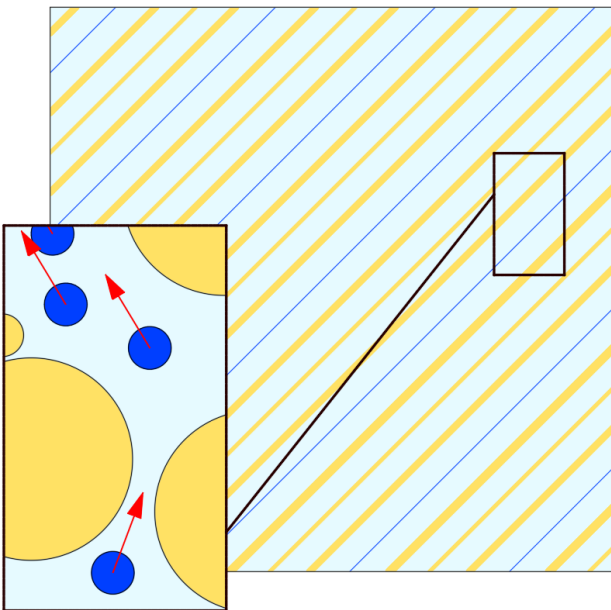


Abbildung 2-5: Partikelbewegung exemplarisch im Korngefüge in Mikro-Ebene

Aus Abbildung 2-5 ist erkennbar, dass die einzelnen Partikel sich nicht gleichgerichtet in einem Porenkanal bewegen und es liegt nahe, dass diese auch nicht die gleiche Geschwindigkeit (in Betrag und Richtung)

aufweisen. Die Ausbreitung der Partikel über das Betrachtungsvolumen zeigt Ähnlichkeiten zur Advektion und Dispersion von Schadstoffen.

Das untere Partikel in Abbildung 2-5 passt nicht durch die Öffnung der beiden größeren Körner im Korngefüge. Dieses Phänomen wurde beispielsweise von Yang et al. (2019) untersucht. Das Verstopfen von Porenkanälen und deren plötzliches Aufbrechen, ist ein Aspekt, der für die Resistivität zwischen Korngefüge und Partikelphase bei der Parameterdefinition berücksichtigt werden muss. An dieser Stelle könnte auch der geometrische Nachweis nach Ziems (Busch et al., 1993) eingearbeitet werden.

3 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde eingangs auf die Erosionsgefährdung durch anstehendes Wasser an Erdbauwerken wie Deichen und Dämmen eingegangen. Zurzeit bestehen Methoden, die das Eintreten von Suffosion durch geometrische Kriterien ausschließen und in der Praxis erfolgreich angewendet werden. Allerdings betrachten diese Kriterien nur einen Zustand und können den erosiven Prozess nicht abbilden. Ein weiterer Kritikpunkt ist, dass die alleinige Betrachtung geometrischer und hydraulischer Kriterien zwar auf der sicheren Seite liegen mögen, jedoch unwirtschaftlich sein können.

Das hier vorgestellte Basismodell ist ein erster Schritt, um auf Grundlage der Mechanik Aussagen über geotechnische Problemstellungen im Bereich der Suffosionsgefahr zu treffen. Hierfür wurden Grenzfälle identifiziert und deren Anwendung auf das Modell vorgestellt.

In Zukunft sollen die angesprochenen Aspekte und Ideen in das Modell implementiert werden, um abschließend eine numerische Umsetzung zu realisieren.

Literaturverzeichnis

Askamp, T. (voraussichtlich 2023). Modellierung innerer Erosion mit der Theorie Poröser Medien - Grundlagen eines Modells und Massenaustausch (Arbeitstitel)

BAW (Hg.) (2013). BAWMerkblatt. Merkblatt Materialtransport im Boden (MMB). Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Busch, K.-F., Luckner, L. & Tiemer, K. (1993). Lehrbuch der Hydrologie. Band 3. Geohydraulik, 3. Auflage, Stuttgart, Gebrüder Bornträger, Berlin

Carrier, W. D. (2003). Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE* 129 (11): 1054–1056

Chang, D. S. & Zhang, L. M. (2013). Extended internal stability criteria for soils under seepage. In: *Soils and Foundations* 53 (4), S. 569–583

DIN EN 1538+A1:2015-10. Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Schlitzwände

Machaček, J. (2020). Contributions to the numerical modelling of saturated and unsaturated soils. In: Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 187, Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), [Dissertation]

Perau, E. (2001). Die Phasen des Bodens und ihre mechanischen Wechselwirkungen – Ein Konzept zur Mechanik in teilgesättigten Böden. Verlag Glückauf GmbH, Essen
<https://doi.org/10.17185/duepublico/73533>

Perau, E. & Haubrichs, K. (2006). Numerische Berechnungen zum Nachweis der Standsicherheit tiefer Baugruben, in: Vorträge der Baugrundtagung 2006 in Bremen, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), S. 111-118

Perzmaier, S. & Haselsteiner, R. (2006a). Der Systemansatz zur Beurteilung der Gefahr der hydrodynamischen Bodendeformation. Tagungsband zur Fachtagung "Deichertüchtigung und Deichverteidigung in Bayern", Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München, Band Nr. 107, S. 57 - 74, 13./14. Juli, Wallgau.

Pfletschinger-Pfaff, H., Kayser, J. & Steeb, H. (2014). Mehrphasen-Modell zur Simulation von Sufusion. In: *Mitteilungen Heft 19 OHDE Kolloquium 2014 Aktuelle Themen der Geotechnik*. Technische Universität Dresden, Institut für Geotechnik, Dresden

Potthoff, S. (2003). Simulation von Zweiphasenströmungen im Boden. Ein Programmsystem auf Basis der Gemischten Finite-Elemente-Methode. Dissertation. Universität Duisburg-Essen, Essen

Schaufler, A., Becker, C. & Steeb, H. (2013). Infiltration processes in cohesionless soils. *ZAMM -J. Appl. Math. Mech.*, vol. 93, no. 2–3, pp. 1–9

Steeb, H., Diebels, S. & Vardoulakis, I. (2005). Modelling erosive processes in the framework of the Theory of Porous Media. Tagungsband des Symposiums 'Grenzschicht Wasser und Boden, Phänomene und Ansätze' 9. März 2005, TU Hamburg, Harburg, Germany.

Triantafyllidis, T. (2004). Planung und Bauausführung im Spezialtiefbau. Teil 1: Schlitzwand- und Dichtwandtechnik. Ernst & Sohn, Berlin

Verhagen, H.J. (2020). Schematische weergave van het pipingproces. URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PipingScheme.jpg>

Verruijt, A. (1995). *Computational Geomechanics. Theory and Applications of Transport in Porous Media*. Volume 7. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht

Yang, J.; Yin, Z.-Y.; Laouafa, F. & Hicher, P.-Y. (2019). Modeling coupled erosion and filtration of fine particles in granular media. In: *Acta Geotech.* 14 (6), S. 1615–1627