

---

# **Anwendung der Perkolations- theorie zur Analyse des suffosiven Partikeltransportes**

Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur

an der Fakultät Bauingenieurwesen  
der  
Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von:  
Olivier Semar  
Bad Bergzabern/Rheinland Pfalz

Gutachter:  
1. Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt  
2. Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Aufleger  
3. Senior Lecturer Dr.-Ing. Alexander Scheuermann

Tag der Disputation:

29. Oktober 2010



---

## Vorwort des Herausgebers

Die Zuverlässigkeit von durchströmten Erdbauwerken wie Dämme und Deiche, aber auch die Stabilität des durchströmten natürlichen Baugrundes, hängen von der Widerstandsfähigkeit der Böden gegen eine hydrodynamische Beanspruchung ab. Äußere und innere Erosionsphänomene haben ein großes Gefährdungspotenzial. Die schädigenden Folgen einer Oberflächenerosion reichen bis zum Verlust des Bauwerks. Die innere Erosion von Böden hat in Baugruben, Dämmen und Bauwerken des technischen Wasserschutzes immer wieder zu katastrophalen Schadensfällen geführt. Dieser Prozess setzt unabhängig von der hydrodynamischen Einwirkung die Mobilität von Partikeln voraus. Diese Dissertation befasst sich mit den kinematischen Bedingungen des Transportes von Feinteilen aus dem Kornskelett weitgestufter Böden, der sogenannten inneren Suffosion.

Die Beurteilung der Suffosionsgefahr weitgestufter Böden ist keine neue Fragestellung. Es existieren empirische Nachweismethoden, eine physikalische Beschreibung des Grenzzustandes liegt bisher aber noch nicht vor. Mit zunehmender Ungleichförmigkeit eines Bodens wird die Suffosionsgefahr evidenter. Die Anwendungsgrenzen der verfügbaren Kriterien werden aber gerade für derartige Böden überschritten.

In dieser Arbeit wird die Mobilität von Partikeln im Porenraum eines Bodens mit einem neuen Ansatz analysiert. Abgeleitet aus Beobachtungen an suffosiven Böden wird eine grobe Fraktion des Kornhaufwerks als mechanisch stabiles, tragendes Skelett betrachtet, welches als räumlicher Filter wirkt. Im Porenraum dieser Grobstruktur sind mobile Feinteile eingebettet. Transport und Rückhaltung werden geometrisch durch Filtration an den Engstellen von Porenpfaden im dreidimensionalen Porennetzwerk der Grobstruktur kontrolliert.

Der Autor modelliert das Porensystem als ein kubisches Gitter mit zufällig verteilten Öffnungsweiten der Engstellen und untersucht mithilfe der Perkolations-theorie die Wahrscheinlichkeit sowie den Grad einer potenziellen Mobilität freier Partikel. Ist das Grobskelett mit seinem Porennetzwerk in der Lage, die mobilen Partikel zurückzuhalten, liegt ein nicht suffosiver Boden vor. Sind dagegen die Feinteile infinit mobil, gilt der Boden als potentiell suffosiv. Als wesentliches Ergebnis konnte mit dieser Modellierung gezeigt werden, dass der räumliche Filter unabhängig von der statistischen Verteilung der Engstellen eine klare Trennschärfe besitzt. Erstmals gelingt eine quantitative Abschätzung der im Korngerüst mobilen Masse. Die experimentelle Überprüfung steht in erstaunlich guter Übereinstimmung mit der Prognose.

Diese Arbeit ist Teil eines Forschungsprojektes der Deutschen Forschungsgemeinschaft, das sich mit der Beschreibung, Modellierung und Visualisierung des Porenraums weitgestufter Erdstoffe und mit den daraus ableitbaren Erosionsphänomenen beschäftigt. Für die finanzielle Unterstützung dieser interessanten Forschung möchte ich mich ganz herzlich bedanken. Danken möchte ich auch den Partnern dieses interdisziplinären Forschungsprojektes für die hilfreichen Beiträge und hervorragende Teamarbeit. Mein Dank gilt ebenso der Bundesanstalt für Wasserbau, Abteilung Geotechnik, Karlsruhe, und dem Wasser- und Schifffahrtsamt Freiburg. In fruchtbaren Diskussionen konnten wir gemeinsam mit den assoziierten französischen Kollegen Erfahrungen mit Phänomenen der inneren Erosion anhand konkreter Projekte austauschen und an Originalböden die Erosionsprozesse experimentell untersuchen.

*Weimar, November 2010*

*Karl Josef Witt*

---

## Vorwort des Verfassers

Die Erosionsstabilität von weitgestuften Böden ist eine der Kernfragen bei der Beurteilung von Versagensszenarien im Damm-, Deich- und Wasserbau. Jegliche Veränderung der Fließbedingungen im Untergrund, sei es durch einen Wandel der klimatischen oder durch anthropogene Eingriffe, hat auch einen potenziellen Einfluss auf die Aktivierung interner Erosionsprozesse. Eine spezielle Erosionsart in weitgestuften Böden, deren Grenzbedingung bisher nur ansatzweise phänomenologisch beschreibbar ist, ist die innere Suffosion. Die Effekte treten in ähnlicher Form auch im Verkehrswegebau wie auch allgemein im Erdbau auf, wo anstelle der Grundwasserströmung Erschütterungen eine allmähliche und sukzessive Partikelbewegung auslösen.

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des DFG Forschungsprojektes „Bedingungen suffosiver Erosionsphänomene in Böden“ (SUFFOS). Ziel ist, die Strukturstabilität weitgestufter Erdstoffe mit Schwerpunkt innerer Suffosion beschreiben zu können. Innere Erosionsphänomene werden mit dem wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansatz der Perkolationstheorie untersucht, in die Strukturkenngößen aus experimentellen und numerischen Analysen berücksichtigt und implementiert werden. Die geometrischen Bedingungen eines Partikeltransportes bzw. der Rückhalt innerhalb des Bodengefüges werden als stochastischer Prozess simuliert mit dem Ziel, Grenzzustandsbedingungen als obere und untere Schranke statistisch zu formulieren.

Für die Möglichkeit zur Bearbeitung dieser Thematik möchte mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt bedanken, der mich nicht nur mit zahlreichen Ratschlägen unterstützte, sondern auch in jeder Hinsicht für mich da war. Ich konnte mit unterschiedlichsten Fragestellungen an Herrn Prof. Witt herantreten mit der Gewissheit, einen kritischen und stets lösungsorientierten Diskussionspartner anzutreffen. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Aufleger und Herrn senior lecturer Dr.-Ing. Alexander Scheuermann danke ich vielmals für die bereitwillige Übernahme des Korreferats.

Bei den Mitarbeitern der Materialforschungs- und -Prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar, Fachgebiet Geotechnik, die mir bei der Durchführung und der Auswertung der Experimente sowie der Versuchsentwicklung behilflich waren, bedanke ich mich für die produktive Zusammenarbeit. Ganz besonders möchte ich Dr. rer. nat. Steffen Prohaska, Prof. Dr.-Ing. Volker Slowik, Dipl.-Ing. Ulrike Homberg, Dipl.-Ing. Tobias Mehlhorn, Dipl.-Ing. Kerstin Ratz, Dipl.-Ing. Helge Vosberg und Dipl.-Ing. Anne Bull danken für die konstruktive Zusammenarbeit und die stets vorhandene Gesprächs- und Diskussionsbereitschaft im Rahmen der durchgeführten Forschungsprojekte. Ebenso danke ich den Mitarbeitern der Professur Grundbau für die kollegiale Zusammenarbeit und meinen Hilfwissenschaftlern Nicole Magiera und Deborah Gronau für die tatkräftige Unterstützung. Für die Durchsicht des Manuskripts danke ich Frau

Dipl.-Ing. Ulrike Homberg, Herrn Dipl.-Ing. Thomas Wolff, Herrn Dipl.-Ing. Robert-Balthasar Wudtke, Frau Bettina Prehl und Frau Sarah Vogel.

Für die finanzielle Förderung bedanke ich mich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und dem Wasser- und Schifffahrtsamt Freiburg, ohne die diese Arbeit in dieser Form nicht realisierbar gewesen wäre.

*Frankfurt am Main, November 2010*

*Olivier Semar*

BAUHAUS  
UNIVERSITÄTSVERLAG

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>2D-Porenstrukturanalyse von Boden</b>	<b>5</b>
2.1	Begriffsdefinitionen zur Beschreibung der Porenstruktur . . . . .	5
2.2	Der äquivalente Porenkanaldurchmesser . . . . .	6
2.3	Die Porenöffnungsweitenverteilung . . . . .	9
2.4	Schlussfolgerungen 2D-Porenstrukturanalyse . . . . .	16
<b>3</b>	<b>3D-Poren- und Gefügestrukturanalyse</b>	<b>17</b>
3.1	Übersicht über Methoden . . . . .	17
3.2	3D-Strukturanalyse an CT-Aufnahmen . . . . .	19
3.3	3D-Strukturanalyse an zufallsbedingten Kugelpackungen . . . . .	22
3.4	Schlussfolgerungen 3D-Poren- und Gefügestrukturanalyse . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Innere Suffosion</b>	<b>27</b>
4.1	Begriffsdefinitionen . . . . .	27
4.2	Beständigkeit von Böden gegen innere Suffosion . . . . .	28
4.3	Gegenüberstellung bestehender geometrischer Suffosionskriterien . . . . .	30
4.4	Schlussfolgerungen zur Bemessungspraxis . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Perkolationstheorie</b>	<b>47</b>
5.1	Grundlagen . . . . .	47
5.2	Perkulationsmodell . . . . .	48
5.3	Cluster . . . . .	50
5.3.1	Charakteristische Parameter . . . . .	52
5.3.2	Skalierungsgesetze . . . . .	55
5.4	Zufallsgeneratoren . . . . .	57
5.4.1	Lineare Kongruenzmethode . . . . .	58
5.4.2	Zuweisung der Porenstruktur . . . . .	61

<b>6</b>	<b>Untersuchung der Suffosion mit Perkolationsmodellen</b>	<b>65</b>
6.1	Kinematik des Materialtransportes . . . . .	65
6.2	Wahl des Perkolationsmodells und Annahmen . . . . .	66
6.3	Globale Strukturveränderung . . . . .	69
6.3.1	Sensitivitätsanalyse . . . . .	71
6.3.2	Globale Mobilitätswahrscheinlichkeit . . . . .	75
6.3.3	Perkolationswahrscheinlichkeit . . . . .	76
6.3.4	Validierung mit kernspintomographischen Aufnahmen . . . . .	78
6.4	Lokale Strukturveränderungen . . . . .	78
6.5	Strukturveränderungen in Kontaktzonen . . . . .	86
6.6	Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Perkolationsstheorie . . . . .	88
<b>7</b>	<b>Einflussgrößen und Parameterstreuung</b>	<b>91</b>
7.1	Einflussgrößen . . . . .	91
7.2	Variation von Bodenparametern . . . . .	92
7.2.1	Lagerungsdichte . . . . .	92
7.2.2	Korngrößenverteilung . . . . .	94
7.2.3	Untersuchungen zur Variation der Korngrößenverteilung . . . . .	96
7.3	Schlussfolgerung zur Variation der Bodenparameter . . . . .	104
7.4	Validierung der 3D-Porenstrukturanalyse mit zufallsbedingten Kugelpackungen . . . . .	106
<b>8</b>	<b>Fallbeispiel und experimentelle Validierung</b>	<b>111</b>
8.1	Anwendung der Perkolationsstheorie auf ein Fallbeispiel . . . . .	111
8.2	Experimentelle Überprüfung . . . . .	118
8.2.1	Prüfeinrichtung . . . . .	118
8.2.2	Versuchsvorbereitung . . . . .	120
8.2.3	Versuchsdurchführung . . . . .	121
8.2.4	Versuchsergebnisse . . . . .	123
8.3	Vergleich der Laborergebnisse mit Ergebnissen aus dem simulierten Modell . . . . .	124
8.4	Schlussfolgerungen zur experimentellen Untersuchung . . . . .	127
<b>9</b>	<b>Grenzzustandsbedingungen zur Suffosionsbeständigkeit</b>	<b>129</b>
9.1	Vorgehen zur Beurteilung der Suffosionsbeständigkeit . . . . .	129
9.2	Eingangsgrößen und Porenengstellenverteilung . . . . .	130
9.3	Suffosive Materialtransportbedingungen . . . . .	132
9.3.1	Kritischer Korndurchmesser und maximale Massenverluste . . . . .	132
9.3.2	Lokale Strukturveränderungen . . . . .	134
9.4	Anwendungsbeispiel . . . . .	137
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>145</b>



---

<b>11 Summary</b>	<b>149</b>
<b>A Programmierung</b>	<b>164</b>
A.1 C++ Code Zufallsgenerator . . . . .	165
A.2 Test des Zufallsgenerators . . . . .	165
A.3 Hoshen-Kopelman Algorithmus . . . . .	166
<b>B Anlagen zur experimentellen Validierung</b>	<b>168</b>
B.1 Versuchsaufbau . . . . .	169
B.2 Ergebnisse zu den Suffosionsversuchen . . . . .	171