Zusammenfassung der Promotionsschrift

Analyse der Einflussfaktoren des hydraulischen Widerstands feinkörniger Böden

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)
an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von
Helen Machaček (geb. Günther)
(externe Doktorandin)
geboren am 25.11.1989 in Mainz

Betreuer:
Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt

12. Mai 2023

Problemstellung und Zielsetzung

1. Für Bauwerke im Grundwasser, die permanent oder temporär umströmt werden, ist nach DIN EN 1997-1 (2009) und DIN 1054 (2010) der Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch zu führen. Dieser wird anhand eines Kräftegleichgewichts aus der destabilisierenden vertikal nach oben gerichteten Strömungskraft und dem stabilisierenden Bodeneigengewicht unter Auftrieb für jedes in Frage kommende Bodenprisma geführt.
2. Dieses Nachweiskonzept beruht auf dem beobachteten Versagensmechanismus in nichtbindigen Böden. Kompensiert die Strömungsbelastung die vertikalen effektiven Spannungen, kann der Verlust der Korn-zu-Korn-Kontakte zu einer Bodenverflüssigung führen. In feinkörnigen, bindigen Böden hingegen ist aufgrund der Bindungskräfte zwischen den Bodenpartikeln eine Bodenverflüssigung unwahrscheinlich und stattdessen von anderen hydraulischen Versagensmechanismen auszugehen. Werden die zusätzlichen haltenden Kräfte bindiger Böden beim Nachweis gegen hydraulisches Versagen nicht berücksichtigt, führt dies i. d. R. zu einer sehr konservativen, unwirtschaftlichen Dimensionierung. Allerdings kann durch Missachten des tatsächlich eintretenden Versagensmechanismus die Sicherheit gegen hydraulisches Versagen auch überschätzt werden. Insbesondere für Baugruben- oder Kanalspundwände kann der Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch für die Dimensionierung der Einbindetiefe maßgebend sein.
3. Experimentelle Untersuchungen an der Bauhaus-Universität Weimar haben gezeigt, dass das Versagen an einer umströmten Wand im bindigen Baugrund durch eine Rissentstehung am Wandfuß ausgelöst wird. Um alternativ ein Nachweiskonzept für bindige Böden zu formulieren, bei dem hydraulisch induzierte Risse als maßgebendes Versagen betrachtet werden, besteht ein Wissensdefizit bezüglich der Prozesse bei Rissentstehung.
4. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein neuartiger Triaxialversuch entwickelt, um die Prozesse bei hydraulisch induzierter Rissentstehung und die maßgebenden Einflussfaktoren in einer umfassenden Laborstudie zu untersuchen.
5. Ziel der Arbeit ist es, durch ein differenziertes Verständnis für die Prozesse bei Rissentstehung im bindigen Boden die Grundlage für praxisnahe Bemessungsmodelle zu schaffen.

Stand der Wissenschaft

6. In anderen Bereichen der Geotechnik und Geomechanik ist die hydraulisch induzierte Rissentstehung in Boden und Fels seit Jahrzehnten Gegenstand der Forschung. Die Fragestellungen stammen dabei aus der Erdöl- und Erdgasförderung, dem Dammbau, der Injektionstechnik, in situ-Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit oder des vorliegenden Spannungszustands.
7. Das betrachtete Boden- oder Felsmaterial, die verwendeten Methoden und der Fokus der Untersuchung variieren je nach Themengebiet deutlich. Im Vordergrund der Analysen steht meist der für die Rissentstehung erforderliche Injektionsdruck, der sog. Aufreißdruck, als Maß für den Risswiderstand des Materials.

8. Laborversuche zum Aufreißdruck zeigen, dass dieser wesentlich von dem Bodenmaterial, dem Spannungszustand, dem Konsolidierungsgrad und der Belastungsgeschwindigkeit abhängt. Um ein allgemeingültiges Modell zur Bestimmung des Aufreißdrucks aus diesen Versuchen abzuleiten, unterscheiden sich die eingesetzten Methoden und die quantitativen Ergebnisse zu stark.
9. Keines der auf den experimentellen Untersuchungen basierenden empirischen und analytischen Modelle berücksichtigt alle als relevant identifizierte Einflussfaktoren gleichzeitig.

Eingesetzte Methoden

10. Um die Rissentstehung in feinkörnigen Böden zu untersuchen wurde ein neuartiger Triaxialversuch entwickelt, bei dem das Versagen eines zylindrischen Probekörpers durch einen lokal induzierten Porenwasserdruck herbeigeführt wird. Dazu wurde eine modifizierte Kopfplatte mit einer Kanüle angefertigt, an deren Spitze über einen Filter der Porenwasserdruck in Probenmitte aufgebracht wird. Durch die präzise Mess- und Regelungstechnik kann der Aufreißdruck bei Rissentstehung an der Kanülenspitze durch den kurzzeitigen Abfall des Porenwasserdrucks sowie einem schlagartigem Wasserzustrom in den Probekörper festgestellt werden.
11. Um die wesentlichen Einflussfaktoren auf den Aufreißdruck in feinkörnigen Böden zu untersuchen, wurde eine Laborstudie mit nahezu 100 Einzelversuchen bei Variation des Probenmaterials, der Methode der Probenherstellung, des Spannungszustands, des Konsolidierungsgrads, der Belastungsgeschwindigkeit, der Drainagebedingungen sowie des Sättigungsdrucks durchgeführt.
12. Die Reproduzierbarkeit der Versuche bezüglich des Aufreißdrucks wurde durch eine mehrfache Wiederholung der Einzelversuche unter gleichen Anfangs- und Randbedingungen überprüft.
13. Zur Herstellung von Probekörpern mit möglichst homogener Bodenstruktur wurde eine spezielle Methode zur Konsolidierung angewendet. Die resultierende Bodenstruktur wurde mittels Quecksilberporosimetrie und Aufnahmen im Nano-CT an konsolidierten Teilproben beurteilt.
14. Zur zerstörungsfreien Visualisierung der entstandenen Risse wurden CT-Aufnahmen einzelner Probekörper nach der hydraulischen Belastung durchgeführt.
15. Der effektive Spannungszustand, der bei Rissentstehung lokal im Bereich der Kanülenspitze vorliegt, wurde durch numerische, gekoppelte Strömungs-Verformungsberechnungen mit einem rotationssymmetrischen FE-Modell der Versuche mit Abaqus Standard analysiert.
16. Das Materialverhalten der feinkörnigen Proben wurde durch das Modified Cam-Clay-Modell wiedergegeben. Die Stoffmodellparameter wurden an zusätzlich durchgeführten Oedometer- und Triaxialversuchen kalibriert.
17. Mit dem numerischen Modell wurden die Versuchsvariationen an einem ausgewählten Probenmaterial nachgerechnet, wobei das Modell anhand der im Labor gemessenen Volumenströme bzw. Drücke validiert wurde. Zur Analyse des effektiven Spannungszustandes bei Rissentstehung wurde im Postprocessing der

Zeitpunkt in den Berechnungen ausgewertet, zu dem in der zugehörigen Versuchsvariante die Rissentstehung durch den Druckabfall festgestellt wurde.

18. Durch die experimentellen Untersuchungen und die numerische Analyse wurden mit Hilfe einer Analogiebetrachtung zur linear-elastischen Bruchmechanik die wesentlichen Einflussfaktoren auf die hydraulisch induzierte Rissentstehung herausgearbeitet.

Wesentliche Ergebnisse

19. Der entwickelte Triaxialversuch ist für die Untersuchung der hydraulisch induzierten Rissentstehung in feinkörnigen Böden geeignet. Die in den Versuchen gemessenen Aufreißdrücke sind reproduzierbar und die hydraulisch induzierten Risse können nach Probenausbau visuell belegt werden.
20. Aus der Versuchsvariation geht hervor, dass die wesentlichen Einflussfaktoren auf den Aufreißdruck das Probenmaterial, der Anfangsspannungszustand, der Konsolidierungsgrad sowie die Belastungsgeschwindigkeit sind. Dabei steigt der Aufreißdruck mit der Anfangsspannung, dem Konsolidierungsgrad und der Belastungsgeschwindigkeit. Diese Ergebnisse stimmen qualitativ mit den Aussagen aus der Literaturrecherche überein.
21. Im Postprocessing der FE-Berechnungen können zum Zeitpunkt der Rissentstehung Bereiche kritischer Zug- und/oder Scherspannungen identifiziert werden. Damit können die Risse sowohl durch eine Zug- als auch eine Scherbelastung entstehen. Die kritischen Spannungsbereiche der unterschiedlichen Berechnungsvarianten sind bei Rissentstehung nahezu gleich groß. Bei höheren Anfangsspannungen oder Konsolidierungsgraden treten höhere Spannungsbeanspruchungen in den kritischen Bereichen auf.
22. Der linear-elastischen Bruchmechanik zufolge entstehen Risse an Fehlstellen im Material, wenn die dort auftretenden Spannungsintensitäten die Materialfestigkeit überschreiten. Dies kann auf die durchgeführten Versuche übertragen werden: Fehlstellen, an denen im Bereich der kritischen Spannungen hohe Spannungsintensitäten auftreten, können in den Proben durch Makroporen oder Mikrorisse vorliegen. Damit steigt die Wahrscheinlichkeit einer Rissentstehung mit der Höhe der Spannungsbeanspruchung bzw. der Größe des Bereichs kritischer Spannungen sowie der Größe der vorliegenden Fehlstellen und sinkt mit der Materialfestigkeit.
23. Die wesentlichen Einflussfaktoren auf den Aufreißdruck bei hydraulisch induzierten Rissen sind die die Größe und Verteilung der Fehlstellen im Boden, der durch die hydraulische Einwirkung vorliegenden Spannungszustand und die Materialfestigkeit. Die Anfangsspannung, der Konsolidierungsgrad, die Materialfestigkeit und die Belastungsgeschwindigkeit bestimmt maßgeblich die Größe und die Bereiche mit kritischen Spannungen.
24. Die Ergebnisse der experimentellen und numerischen Analyse der relevanten Einflussgrößen stellt die theoretische Basis für die Entwicklung praxisnaher Modelle zur Bestimmung der Rissgefährdung feinkörniger Böden in situ dar.