

ENDBERICHT

FFG Projektnummer	840536	eCall Antragsnummer	2666035
Kurztitel	Unterströmung	Förderungsnehmerl n	ÖBV-GmbH
Bericht Nr.		Berichtszeitraum	01.04.2013- 31.08.2014
Bericht erstellt von	DI Marek Szabo, DI Michael Pauser		

Richtwert für den Umfang: 10-20 Seiten

1. Ziele und Ergebnisse

- Wurden die dem Förderungsvertrag zugrunde liegenden Ziele erreicht?
Sind diese Ziele noch aktuell bzw. realistisch?
Achtung: Änderungen von Zielen erfordern eine Genehmigung durch die FFG.

Die Projektziele umfassen die Untersuchung des zeitlichen und räumlichen Strömungsverhaltens unterhalb von Dämmen anhand von naturmaßstäblichen Dammmodellen zur Beurteilung des Versagensrisikos und der Sicherungsmaßnahmen sowie zur Bewertung des Vernässungspotentials. Daraus sollten Bemessungsgrundlagen für Sicherungsmaßnahmen gegenüber hydraulischem Grundbruch bzw. unkontrolliertem Aufbrechen allfälliger bindiger Deckschichten zufolge Unterströmung abgeleitet werden. Die Projektziele zum Forschungsvorhaben wurden erreicht.

- Vergleichen Sie die Ziele mit den erreichten Ergebnissen.

Die Darstellung der erreichten Ergebnisse wird in Anlehnung an die Methodik, welche in den Arbeitspaketen beschrieben wurde, vorgenommen. Für die Erfüllung der festgelegten Projektziele war dieser schrittweise Untersuchungsprozess von großer Wichtigkeit.

Dammmodelle:

Das kleinmaßstäbliche Modell stellt innerhalb einer Plexiglasrinne einen Vertikalschnitt durch einen Dammkörper einschließlich dessen Untergrundes im Maßstab 1:10 dar. Die Versuchsrinne für das Schnittmodell besitzt eine Breite von 50 cm und wurde durch eine Querwand in ein Becken mit einer Länge von 235 cm umgebaut. Das geometrisch verkleinerte Dammmodell wird auf einem zweischichtigen Untergrund gegründet. Unmittelbar am landseitigen Dammfuß erfolgt die Druckentlastung der gering durchlässigen Schicht mit Hilfe einer bzw. zwei Säulen oder eines Grabens. Zur Messung der Druckpotentiale in der gut durchlässigen Schicht wurden entlang der Modellachse bis zu 11 Beobachtungspiegel aus Plexiglas angeordnet. Ergänzend zur Druckpotentialmessung fand eine Durchflussmessung des aus dem Entlastungselement austretenden Sickerwassers mit einem Messglas statt.



Abbildung 1: Das kleinmaßstäbliche Dammodell (M 1:10).

Das naturmaßstäbliche Modell stellt in Anlehnung an die Hochwasserschutzdämme an der March ein 4 m breites Schnittmodell des sanierten Dammes samt dem zweischichtigen Untergrund dar und dient der experimentellen Untersuchung der Wirkungsweise von Entlastungsdrainagen zufolge Dammunterströmung. Das speziell zu diesem Zweck errichtete Versuchsbecken, in dem das Modell mit einer Höhe von 4,5 m und einer Gesamtlänge von 25 m aufgebaut ist, ermöglicht unter Labor ähnlichen Bedingungen die Durchführung derartiger Modellversuche im Maßstab 1:1. Zur Entlastung des hydrostatischen Druckes auf die gering durchlässige Deckschicht bei simuliertem Hochwasser diente eine unmittelbar am landseitigen Dammfuß in der Symmetrieachse angeordnete Entlastungssäule, deren Durchmesser, Durchlässigkeit (mit/ohne Kiesfüllung) und zum Teil auch die Einbindung in den gut durchlässigen Untergrund variiert wurden.

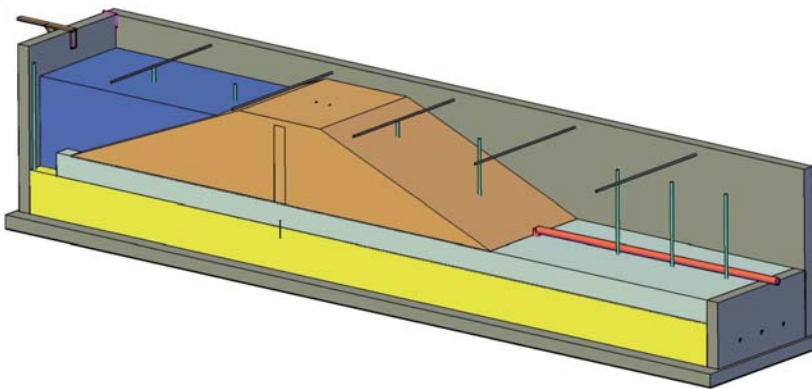


Abbildung 2: Schematische Darstellung des naturmaßstäblichen Dammodells (links). Einstau während der Modellversuche (rechts).

Diese Kombination aus klein- und großmaßstäblichen Modellversuchen war das Ergebnis eines Optimierungsprozesses, um eine möglichst genaue Beschreibung der Wirkungsweise von Druckentlastungssystemen zu erzielen. Mit Hilfe der „quasi“ Modellfamilie konnten die im Naturmaßstab beobachteten physikalischen Phänomene im Strömungsverhalten durch die ergänzenden Sandmodellversuche verifiziert und eine Grundlage für die numerische Kalibrierung geschaffen werden.

Untersuchung der Systemdurchlässigkeit:

Neben den geometrischen Randbedingungen weist die Durchlässigkeit der grundwasserleitenden Bodenschicht den größten Einfluss auf die Wahl des richtigen Druckentlastungselementes und die Prognostizierung der austretenden Sickerwassermengen auf.

Zur Beurteilung der Gesamtdurchlässigkeit der gut durchlässigen Bodenschicht im Sandmodell wurde ein „Feldversuch“ durchgeführt. Abbildung 3 zeigt anhand eines schematischen Längenschnittes den Versuchsaufbau. Aus der gemessenen Wassermenge, dem Höhenunterschied zwischen dem Ober- und Unterwasserspiegel und den geometrischen Abmessungen der gut durchlässigen Untergrundsicht konnte unter Berücksichtigung des Gesetzes nach Darcy die Systemdurchlässigkeit in horizontaler Richtung bestimmt werden. Der ermittelte mittlere horizontale Durchlässigkeitsbeiwert betrug $k_H = 1,18 \times 10^{-3}$ m/s bei einem Porenanteil von $n = 0,35$.

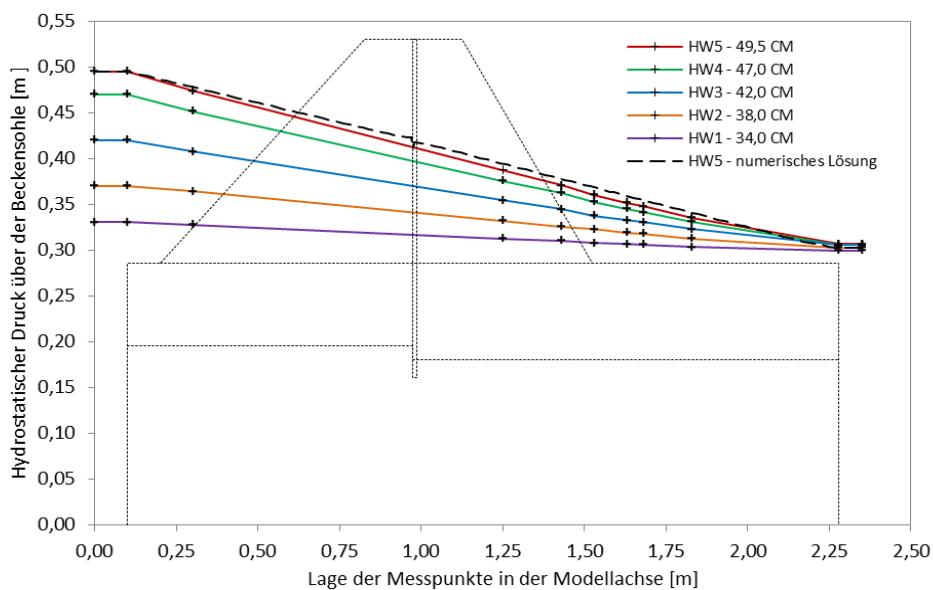


Abbildung 3: Drucklinien unterhalb der gering durchlässigen Deckschicht für unterschiedliche Wasserstände – „Feldversuch“ zur Bestimmung der Gesamtdurchlässigkeit des Grundwasserleiters.

Im großmaßstäblichen Modell wurden neben der Bestimmung der Systemdurchlässigkeit zahlreiche Bodenproben aus der durchlässigen Bodenschicht (Grundwasserleiter) entnommen und umfangreichen Untersuchungen im Labor hinsichtlich der Auswirkung der Einbaudichte auf den k-Wert unterzogen. Abbildung 4 veranschaulicht die Versuchsergebnisse in halblogarithmischer Darstellung. Diese zeigen einen linearen Zusammenhang zwischen den ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerten in vertikaler Richtung (Streuung: von $k = 9,0 \times 10^{-4}$ bis $3,6 \times 10^{-5}$ m/s) und dem zugehörigen Porenanteil (zwischen $n = 0,16$ und $0,27$). Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass die Ausgleichsgeraden größtenteils eine einheitliche Neigung aufweisen. Demnach erfährt das sandig-kiesige Schüttmaterial zufolge Verdichtung eine gleichmäßige Reduktion des k-Wertes. Unter der Voraussetzung eines quasi-homogenen Verdichtungszustandes mit lokalen Schwankungen der Einbaudichte durch Entmischungsvorgänge beim Einbau ergibt sich eine relativ enge Bandbreite des Durchlässigkeitsbeiwertes, der die später beschriebene numerische Kalibrierung in bedeutendem Maße beeinflusst.

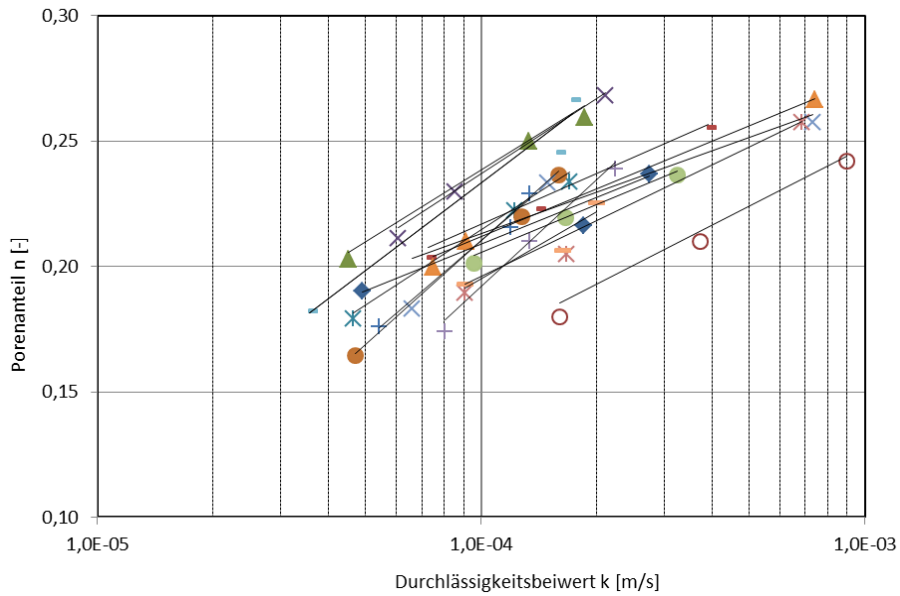


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen dem Durchlässigkeitsbeiwert k und dem Porenanteil n für das verwendete Grundwasserleiter-Schüttmaterial.

Versuchsergebnisse:

In Abbildung 5 sind für unterschiedliche Wasserstände die Drucklinien entlang der Achse des Sandmodells infolge der Entlastungswirkung einer Einzelsäule dargestellt. Für die höchste Staustufe ist außerdem auch die Druckverteilung ohne eine Entspannungsmaßnahme ersichtlich. Der Überdruck unterhalb der Dammaufstandsfläche wird gleichmäßig bis zur Entlastungsstelle abgebaut. Erst im Nahbereich der Kiessäule fällt dieser rasch auf das Niveau der Entlastungsebene ab. Hinter der Säule steigt er wieder steil an und begrenzt damit die Ausdehnung des Druckentlastungstrichters. Im Hinterland erreicht der Überdruck aufgrund der einseitigen Zuströmung zur Kiessäule einen konstanten Wert, welcher maßgebend für die Beurteilung der Sicherheit gegen Aufschwimmen ist.

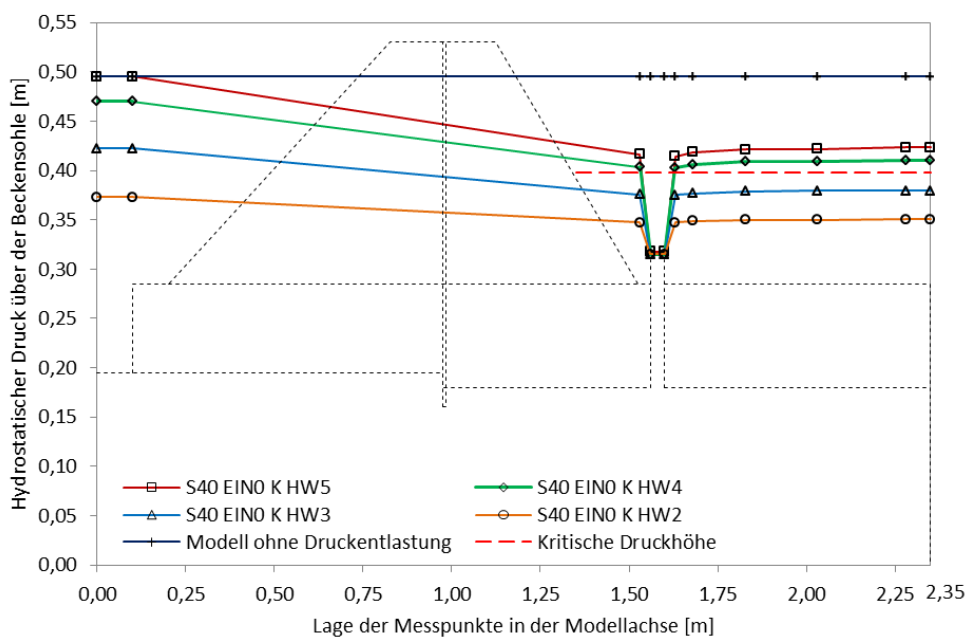


Abbildung 5: Drucklinien für unterschiedliche Wasserstände für das Sandmodell mit Einzelsäule.

Bei den großmaßstäblichen Modellversuchen gemessene Druckverläufe (Abbildung 6) veranschaulichen exemplarisch den Entspannungseffekt infolge einer Kiessäule, die in dieser Form häufig auch in der Praxis zur Druckentlastung eingesetzt wird. Auf Grundlage weiterer Messungen kann zusammenfassend bestätigt werden, dass der Wirkungsgrad von Kiessäulen durch die Verlängerung der Eintauchtiefe deutlich erhöht werden kann. Darüber hinaus hat auch die Durchlässigkeit des Entspannungselementes einen starken Einfluss auf die Wirkungsweise. Vom Druckabbau hängt auch die Menge der austretenden Sickerwässer direkt ab. Mit der Messung des Durchflusses wurde daher neben der Druckregistrierung eine zweite Zielgröße für die numerische Kalibrierung gewonnen. Abbildung 7 zeigt die Durchflusskurve für die Ø 600 mm Kiessäule ohne Einbindung.

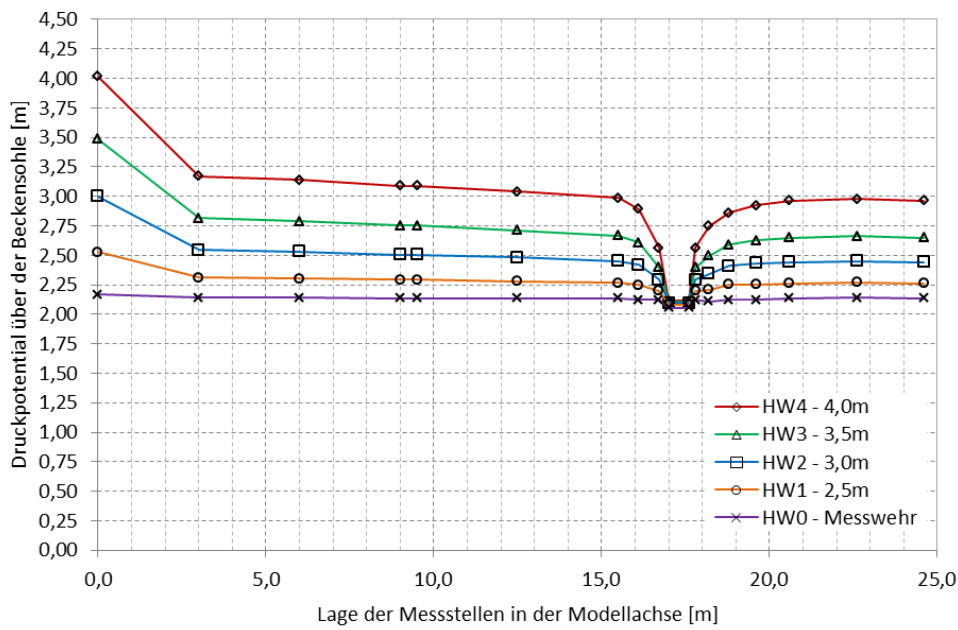


Abbildung 6: Drucklinien infolge der Ø600 mm Kiessäule ohne Einbindung

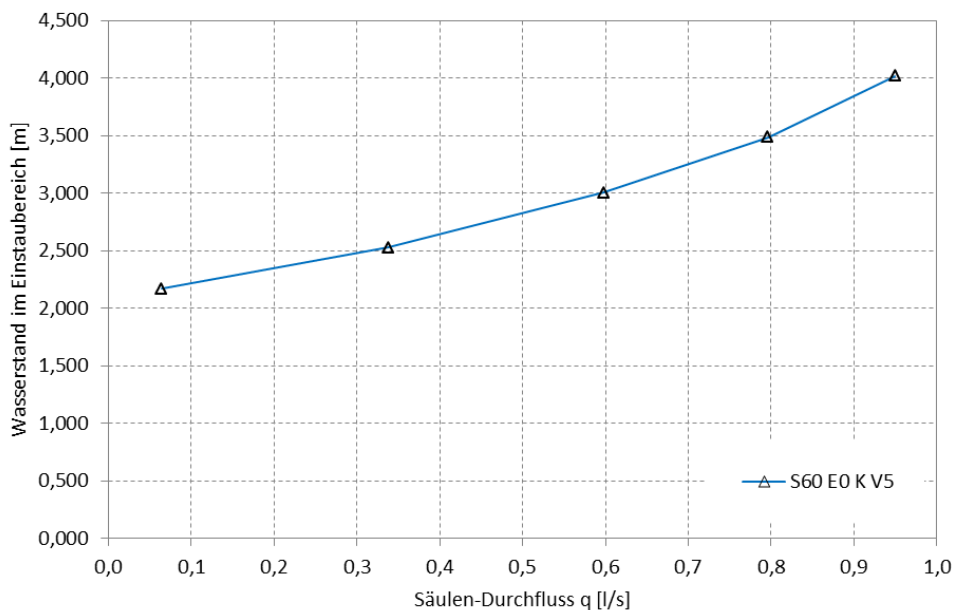


Abbildung 7: Ermittelte Durchflussmenge während der Versuchsdurchführung am Modell mit Ø 600 Kiessäule ohne Einbindung.

Modellkalibrierung und Numerische Vergleichsrechnungen:

Die numerische Modellierung der Unterströmung von Dämmen stellte einen wichtigen Beitrag zur Beschreibung der Wirkungsweise von Druckentlastungssystemen dar. Hierfür bot sich die gekoppelte hybride Modellierung in idealer Weise an, weil durch eine Kalibrierung des numerischen Modells an die experimentell ermittelten Daten (Groß- und Modellversuche) eine optimale Übertragung der Simulationsergebnisse in die Natur möglich war. Demnach haben die Ergebnisse der numerischen Vergleichsrechnungen einen großen Wert für den praktischen Einsatz hinsichtlich der Dimensionierung von Druckentlastungssystemen oder Gegengewichtsschüttungen.

Abbildung 8 zeigt am Beispiel eines Entlastungsgrabens die Näherungskurven der gemessenen und der berechneten (2D- und 3D-Strömungssimulationen) Durchflüsse. Mit den durchgeführten Vergleichsrechnungen konnte eine sehr gute Übertragbarkeit des kalibrierten zweidimensionalen Modells in das dreidimensionale System bestätigt werden. Damit wurde ein Nachweis erbracht, dass die Modellkalibrierung auch für die Untersuchung von räumlichen Unterströmungsproblemen gültig ist.

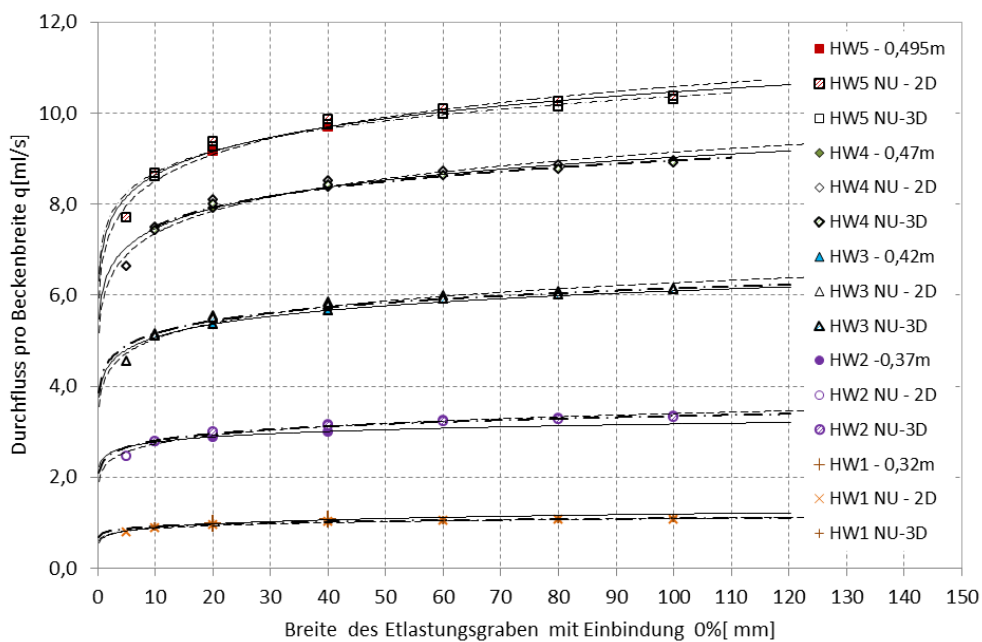


Abbildung 8: Vergleich der Annäherungsfunktionen für die gemessenen und die mit einem 2D bzw. 3D numerischen Vergleichsmodell berechneten Durchflüsse eines Drainagegrabens ohne Einbindung in Abhängigkeit von der Breite.

Aufbauend auf den numerischen Strömungssimulationen für das Sandmodell wurde entsprechend den geometrischen und bodenphysikalischen Randbedingungen des naturmaßstäblichen Dammmodells eine Kalibrierung durchgeführt. Die Ergebnisse bestätigten die Richtigkeit der gewählten Methodik bei der Beurteilung des zeitlichen und räumlichen Strömungsverhaltens bei Unterströmung von Dämmen und bilden eine gute Grundlage für die praktische Anwendung. In Abbildung 9 ist die Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Druckverteilung im Grundwasserleiter infolge der Entlastungswirkung einer Kiessäule Ø 600 mm ohne Einbindung dargestellt. Mit Ausnahme geringer Abweichungen der Drücke im Einflussbereich der Sickerstrecke stimmen die Ergebnisse beider Ermittlungsmethoden gut

überein.

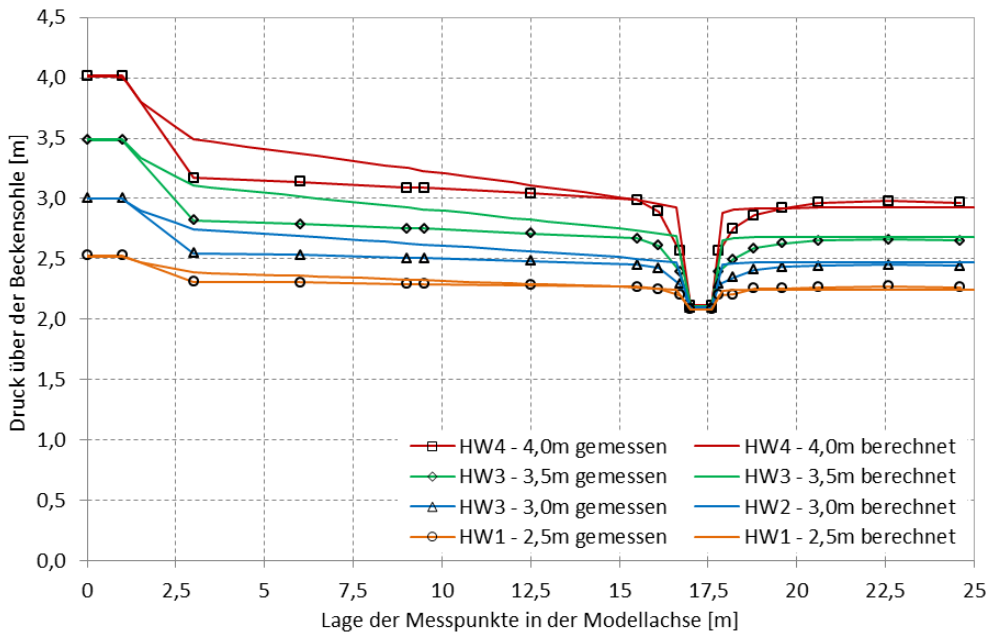


Abbildung 9: Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Drucklinienverläufe für das naturmaßstäbliche Modell mit einer Kiessäule Ø 600 ohne Einbindung.

Bei der Dimensionierung von Druckentlastungen ist zusammenfassend festzustellen, dass linienförmige Druckentlastungen (Drainagegräben) auch ohne Einbindung bei homogenen Untergrundverhältnissen einen hohen Wirkungsgrad besitzen. Der gegenüber punktförmigen Entspannungselementen stärkere Druckabbau ist aber mit einer erhöhten Sickerwassermenge verbunden. Vor allem aufgrund der größeren entlastungswirksamen Fläche ergibt sich ein gradliniger Zulauf des Wassers zu dem nicht eingebundenen Graben. In der Natur weist der gewachsene Untergrund häufig Schichten mit variierender Durchlässigkeit auf. Insbesondere an der Schichtgrenze zu den grundwasserführenden Sedimenten erfolgt der Übergang meist fließend, was bei fehlender Einbindung zur Beeinträchtigung dessen Funktion führen kann. Eine Verbesserung der Entlastungswirkung lässt sich zwar durch die Vergrößerung der Querschnittsfläche (Breite, Durchmesser) erzielen, hierfür ist ebenfalls ein unmittelbarer Anschluss an den gut durchlässigen Untergrund von großer Bedeutung. Bei punktförmigen Entlastungselementen kann die Größe des Druckabbaus sehr wirksam durch eine Verlängerung der Eintauchtiefe erreicht werden. Damit wird eine horizontale Zuströmung begünstigt und eine bessere Verbindung mit den stärker wasserführenden Schichten sichergestellt. In beiden Fällen (Geometrie und Einbindetiefe) weist der Anstieg der Druckentlastung einen degressiven Verlauf auf, der sich auch im Durchfluss widerspiegelt. Darüber hinaus zeigte die Systemdurchlässigkeit der Entspannungselemente einen großen Einfluss auf deren Wirkungsweise. Demnach bewirken die durchlässigeren Brunnen im Vergleich zu Kiessäulen einen stärkeren Druckabbau.

Für die Prognostizierung der Sickerwasseraustritte bei Hochwasser bieten numerische Berechnungen eine gute Methode. Die Aussagekraft kann dabei durch eine Anpassung des Modells an die hydraulischen, geotechnischen und örtlichen Randbedingungen des konkreten Projektes deutlich erhöht werden. Außerdem stellt die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführte Modellkalibrierung

eine wichtige Basis für die projektspezifische Bewertung der Hinterlandvernässung dar.

- Beschreiben Sie „Highlights“ und aufgetretene Probleme bei der Zielerreichung.

Dieses wissenschaftlich-experimentelle Projekt stellte vor allem aufgrund der geometrischen Dimension der Modellversuche in vielen Hinsichten ein Neuland auf dem Gebiet der physikalischen Modellierung dar. Zudem wurde der Schwerpunkt auf die Beurteilung der Unterströmung von Dämmen gelegt, die nicht visuell, sondern nur mit Hilfe von gemessenen Daten untersucht werden konnte. Damit war eine direkte Überprüfung der Strömungsprozesse im Untergrund kaum möglich. Die größte Herausforderung lag aber in einer möglichst homogenen Ausführung des Modells, insbesondere der gut durchlässigen Bodenschicht (Grundwasserleiter). Eine wichtige Grundlage hierfür wurde bereits bei der Wahl der geeigneten Böden gelegt. Die Entscheidungen zu Projektbeginn hatten daher einen sehr starken Einfluss auf die zu einem deutlich späteren Zeitpunkt gewonnenen Messergebnisse. Die gute Übereinstimmung experimenteller und numerischer Methoden bestätigte jedoch die Richtigkeit der getroffenen Ansätze bei der Entwicklung dieser Großversuchsanlage.

Während der Versuchsdurchführung mussten wiederholt Probleme mit unkontrollierten Aufbrüchen der Modell-Deckschicht zufolge Erosion und/oder Aufschwimmen gelöst werden. Derartige lokale Sanierungsarbeiten waren mit einem hohen Zeitaufwand verbunden und konnten nur in einem stark begrenzten Rahmen durchgeführt werden. Die bereits bei geringer hydrostatischer Druckhöhe beobachteten Versagen unterstreichen zu einem das hohe Risiko eines unkontrollierten Aufbrechens der Deckschicht, zum anderen zeigen sie die Notwendigkeit technischer Sicherungsmaßnahmen, um Dammversagen bei zukünftigen Hochwasserereignissen zu minimieren.

2. Arbeitspakete und Meilensteine

2.1 Übersichtstabellen

Erläuterung:

Die Tabellen sind analog zum Förderungsansuchen aufgebaut.

Basistermin: Termin laut Förderungsansuchen bzw. laut Vertrag gültigem Projektplan

Aktuelle Planung: Termin laut zum Zeitpunkt der Berichtslegung gültiger Planung

Tabelle 1: Arbeitspakete

AP Nr.	Arbeitspaket Bezeichnung	Fertigstellungsgrad	Basistermin		Aktuell		Erreichte Ergebnisse / Abweichungen
			Anfang	Ende	Anfang	Ende	
1	Versuchsdurchführung	100%	04/13	09/13	04/13	10/14	Mit den durchgeführten Modellversuchen konnten wichtige Daten zur Beurteilung von unterschiedlichen Druckentlastungssystemen gewonnen und deren Wirkungsweise verifiziert werden.
2	Numerische Vergleichsrechnungen & Modellkalibrierung	100%	06/13	12/13	06/13	11/14	Anhand der Vergleichsrechnungen konnte der Nachweis über die Richtigkeit der

							numerischen Näherungslösung erbracht werden. Dies wurde durch die gute Übereinstimmung der numerischen Berechnungsergebnisse mit den gemessenen Daten aus den klein- und großmaßstäblichen Modellversuchen bestätigt.
3	Numerische Parameterstudie & Versuchsauswertung	100%	10/13	03/14	10/13	12/14	Die durchgeführten Parameterstudien am kalibrierten Modell bilden eine wichtige Grundlage zur Bemessung von Druckentlastungssystemen sowie zur Quantifizierung der austretenden Sickerwässer. Diese Untersuchungen stellen somit grundlegende Bemessungsansätze für den praktischen Einsatz dar.

2.2 Beschreibung der im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten

- Beschreiben Sie die im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten, strukturiert nach den Arbeitspaketen.

AP 1 – Versuchsdurchführung:

Das 1. Arbeitspaket umfasste in erster Linie die Durchführung von naturmaßstäblichen Modellversuchen, welche durch eine Reihe von im Labor durchgeführten, kleinmaßstäblichen Versuchen ergänzt wurden.

Vor dem Beginn der **Großversuche** war es jedoch notwendig, die bodenphysikalischen Parameter der verwendeten Böden zu untersuchen. Dabei wurde primär die Auswirkung der Einbaudichte auf die Größe des k-Wertes des sandig-kiesigen Schüttmaterials (Grundwasserleiter) im Laboratorium mittels 45 Durchlässigkeitsversuche mit konstanter Druckhöhe beurteilt. Da der Durchlässigkeitsbeiwert der grundwasserleitenden Modellschicht einen hinsichtlich der Interpretation der Messergebnisse maßgebenden Bodenkennwert darstellt, wurde die Gesamtdurchlässigkeit zusätzlich mithilfe von Pumpversuchen bestimmt.

Neben den Labor- und Feldversuchen zur Bestimmung der Durchlässigkeit waren ursprünglich Versuche zur Beurteilung des Erosionsverhaltens der feinkörnigen Deckschicht vorgesehen. Obwohl es im Zuge der naturmaßstäblichen Modellversuche bereits bei geringer Druckbelastung wiederholt zu Erosionsbrüchen der bindigen Deckschicht kam, wurde auf die Durchführung von Erosionsuntersuchungen verzichtet, weil sie keine vorbeugende Maßnahme darstellen. Aus diesem Grund wurde auf der Modell-Landseite ein Dichtungsteppich aus erosionsstabilem Dichtwandmaterial in die Deckschicht eingebaut und diese dann an der Oberfläche zusätzlich durch eine Auflastschüttung gegen Aufschwimmen stabilisiert.

Die erwähnte bauliche Adaptierung des großmaßstäblichen Damm-Modells war notwendig, um eine ungehinderte Versuchsdurchführung zu gewährleisten. Vor allem zu Beginn der Versuchsreihen mit der „kleinen“ Drainagesäule (Ø 200 mm) musste nahezu jeder Versuch zusätzlich wiederholt werden, weil lokale Versagen der landseitigen Deckschicht infolge von Erosionsbrüchen bzw. durch Aufschwimmen

aufgetreten sind. Um größere Beschädigungen am Modell zu vermeiden, wurden solche Versuche abgebrochen und nach aufwendigen Sanierungsarbeiten der Bruchstellen erneut gestartet.

Aufgrund dieser unvorhersehbaren Ereignisse kam es zu zeitlichen Verzögerungen bei der Versuchsdurchführung. Aus diesem Grund wurde der Schwerpunkt der Untersuchungen in erster Linie auf die Beurteilung der Wirkungsweise von punktförmigen Druckentlastungen gelegt, und zwar von der Einzelsäule. Dabei wurden der Durchmesser (klein, mittel, groß), die Durchlässigkeit der Säule (mit und ohne Kiesfüllung) und teilweise auch die Einbindung (unvollkommene Filterstrecke: mit 0% bzw. 15%) variiert. Es wurden insgesamt 42 großmaßstäbliche Versuche durchgeführt; die Dauer der einzelnen Versuche betrug von einigen Tagen bis zu maximal zwei Wochen. Zur Überprüfung der aufgezeichneten Messdaten erfolgten diese Tests größtenteils in Form von Doppelversuchen (Erst- und Zweitversuch). Diesen Modellversuchen wurde eine stufenförmige Ganglinie mit ausgeprägten stationären Staustufen zugrunde gelegt. Damit konnten der Entlastungseffekt sowie die Sickerwassermenge unter zeitlich nicht veränderlichen Strömungsbedingungen untersucht werden. Die daraus gewonnenen Messdaten dienen der Kalibrierung des numerischen Vergleichsmodells.

Aufgrund von festgestellten Anomalien in der Druckentlastung im Zuge der Großversuche wurden zur qualitativen Beurteilung der Messergebnisse zusätzliche **Sandmodellversuche** durchgeführt. Gegenüber dem physikalischen System (Prototyp) weisen sie einen höheren Grad der experimentellen Kontrolle auf und ermöglichen eine variationsreiche Überprüfung maßgebender Modellparameter unter extremen Randbedingungen. Die Wahl der geeigneten Böden für die kleinmaßstäblichen Modellversuche erfolgte auf Grundlage der bodenphysikalischen Eigenschaften der verwendeten Schüttmaterialien beim Bau des naturmaßstäblichen Dammodells. Dabei war vor allem das hydraulische Verhalten des Grundwasserleiters von großer Bedeutung. Die im Labor durchgeführten Durchlässigkeitsversuche mit konstanter Druckhöhe dienten in erster Linie zur Abschätzung des Einflusses der Lagerungsdichte auf die absolute Größe des k -Wertes. Zur Beurteilung der Gesamtdurchlässigkeit der vorwiegend horizontal durchströmten gut durchlässigen Bodenschicht wurde ergänzend ein „Feldversuch“ direkt am kleinmaßstäblichen Modell durchgeführt.

Die Untersuchungen am maßstäblichen Modell dienen in erster Linie zur Beurteilung der Wirkungsweise von verschiedenen Entspannungssystemen: Einzelsäule, Doppelsäule und Entlastungsgraben. Hierzu wurden die Druckpotentialverläufe unterhalb der feinkörnigen Bodenschicht entlang der Symmetrieachse des Modells sowie der Querachse durch das Entlastungselement am landseitigen Damfuß im Zuge von insgesamt 116 Versuchen gemessen. Der Durchführung dieser Modellversuche wurde eine instationäre Hochwasserganglinie mit stufenförmigem Charakter zugrunde gelegt.

AP 2 – Numerische Vergleichsrechnungen & Modellkalibrierung:

Das Arbeitspaket Nr. 2 beinhaltet den Prozess der Kalibrierung des numerischen Modells an die Messdaten der klein- und großmaßstäblichen Modellversuche. Zum Zweck einer optimalen Interpretation der Messergebnisse der physikalischen Großversuche, die einer deutlich stärkeren Streuung der Modellparameter unterliegen, wurde in der ersten Stufe der numerischen Strömungsmodellierung das kleinmaßstäbliche Modell kalibriert. Die Grundlage hierfür bildeten die Modellversuche mit einem vollkommenen Entlastungsgraben. Dies ermöglichte, dass das räumliche

Modell zunächst durch ein äquivalentes vertikal ebenes System ersetzt werden konnte. An diesem erfolgte dann die numerische Kalibrierung, der die gemessene Sickerwassermenge während der stationären Ganglinienstufen zugrunde gelegt wurde. Hierzu wurde durch eine Vielzahl von Voruntersuchungen die Modellgeometrie optimiert und der Einfluss zeitlich veränderlicher Randbedingungen auf die Ergebnisse untersucht.

Um die Anwendbarkeit der durchgeführten 2D-Kalibrierung in einem räumlichen System zu verifizieren, wurde ein naturgetreues Abbild des physikalischen Dammmodells erstellt. Insbesondere für die Beurteilung der Wirkungsweise von punktuellen Druckentlastungen ist die dreidimensionale Modellierung von großer Bedeutung. Zur Überprüfung der Sensibilität des kalibrierten Modells wurden die 3D-Strömungssimulationen für unterschiedliche Geometrieparameter des Drainagegrabens durchgeführt. Mit den durchgeführten Vergleichsrechnungen konnte eine sehr gute Übertragbarkeit des kalibrierten zweidimensionalen Modells in das dreidimensionale System bestätigt werden.

Aufbauend auf den numerischen Vergleichsrechnungen auf Basis der homogenen Sandmodelle wurde bei der Kalibrierung des großmaßstäblichen Modells neben den bodenphysikalischen Kennwerten und den aufgezeichneten Meßgrößen auch die örtliche Heterogenität berücksichtigt. Hierzu waren anhand der Messungen bestimmte Anomalien im Strömungsverhalten festzustellen, welche auf die herstellungsbedingte Verdichtung der Schichtgrenze zum grobkörnigen Boden zurückzuführen waren. Dieser Umstand erforderte daher eine gesonderte Herangehensweise bei der Modellkalibrierung anhand ausgewählter Großversuche. Das primäre Ziel lag dabei in der iterativen Anpassung der k -Werte des Grundwasserleiters, sodass die Druckverhältnisse auf der Landseite (Hinterland) sowie die berechneten Sickerwasseraustritte mit den Messergebnissen möglichst gut übereinstimmen. Im ersten Schritt wurde für alle untersuchten Kiessäulendurchmesser durch eine Variation des Durchlässigkeitsbeiwertes vom Grundwasserleiter eine Annäherung an den gemessenen Potentialverlauf und die dazugehörige Durchflussmenge gesucht. Für dieses Grundmodell erfolgte dann eine gezielte Anpassung an die Auswertungen einzelner Säulen, die zum Teil qualitativ unterschiedliche Wirkungsweise aufwiesen. Die Richtigkeit der gewählten Methodik bei der Kalibrierung des naturmaßstäblichen Modells konnte durch Vergleichsrechnungen bestätigt werden.

Aufgrund der guten Übereinstimmung der numerischen Strömungssimulationen mit den gemessenen Daten war ein Einsatz von einer anderen Berechnungssoftware nicht erforderlich.

AP 3 – Numerische Parameterstudie & Versuchsauswertung:

Das 3. Arbeitspaket beinhaltet Parameterstudien am kalibrierten numerischen Modell zur Veranschaulichung des Einflusses von maßgebenden Modellparametern auf die Wirkungsweise von Druckentlastungssystemen. Hierzu wurden unterschiedliche Arten von Druckentlastungen (Einzel-Kiessäule, Entlastungsbrunne, Mehrsäulensystem und Graben) und deren Geometrie untersucht. Da die geometrischen Abmessungen des physikalischen Modells eine fixe Randbedingung darstellen, wurde ebenfalls die Auswirkung der Breite, Länge und Tiefe (Mächtigkeit des Grundwasserleiters) des Modells durch ergänzende Vergleichsrechnungen beurteilt. Mit Hilfe der großen Anzahl von numerischen Strömungssimulationen war es möglich, die wichtigen Einflussfaktoren im Detail zu überprüfen und somit die grundlegenden Ansätze für die praktische Anwendung zu beschreiben.

- Konnten die Arbeitsschritte und -pakete gemäß Plan erarbeitet werden?
Gab es wesentliche Abweichungen?

Die Arbeitspakete konnten gemäß Plan ohne wesentliche Abweichungen bearbeitet werden.

- Die Beschreibung beinhaltet ebenso eine allfällige Änderung der angewandten Methodik.
Achtung: Änderungen an der Methodik und wesentliche Änderungen im Arbeitsplan erfordern eine Genehmigung durch die FFG.

Während der Ausarbeitung dieses Forschungsprojektes kam es zu keinen Änderungen hinsichtlich der zu Beginn gewählten Methodik, welche aus einer Koppelung der experimentellen Untersuchungen mit numerischen Vergleichsrechnungen bestand.

3. Projektteam und Kooperationen

- Gibt es wesentliche Veränderungen im Projektteam (interne SchlüsselmitarbeiterInnen und externe Partner/Dritteleister)?
- Gehen Sie auf Änderungen in der Arbeitsaufteilung ein.
Gibt es Auswirkungen auf die Kosten- / Finanzierungsstruktur und die Zielsetzung?

Im Projektteam des externen Forschungspartners – Technische Universität Wien (TU Wien) – kam es zu einer personellen Änderung. Frau Dipl.-Ing. Viktoria Ostermann hat in der ersten Jahreshälfte 2013 die Karenz angetreten. Dies hatte jedoch keinen Einfluss auf die Einhaltung des Projektzeitplans und die Erlangung der festgelegten Ziele des gegenständlichen Forschungsvorhabens. Die Kenntnisse von Frau Ostermann bei der numerischen Modellierung von Grundwasserströmungen wurden daher in der Anfangsphase des Projektes genutzt. Sie war bei der Vorbereitung der Grundmodelle für die numerischen Vergleichsrechnungen beratend tätig.

In den weiteren Projektphasen wurden ihre Aufgaben hinsichtlich der Modellkalibrierung an die groß- und kleinmaßstäblichen Modellversuche vom Projektleiter, Herrn Dipl.-Ing. Marek Szabo, übernommen. Aufgrund einer Fristerstreckung des Projektes waren keine zusätzlichen personellen Änderungen im Projektteam notwendig. Damit ergaben sich auch keine Auswirkungen auf die Finanzierungsstruktur dieses Vorhabens.

4. Wirtschaftliche und wissenschaftliche Verwertung

- Beschreiben Sie die bisherigen Verwertungs- und / bzw. Weiterverbreitungsaktivitäten.
Ist eine Verwertung möglich?

Die für die kommenden Jahre geplanten Sanierungen von Hochwasserschutzdämmen an der Donau, im Rheintal sowie andere Dammbauprojekte bilden eine sehr gute Voraussetzung für die praktische Umsetzung der Forschungsergebnisse und der darauf aufbauenden weiterführenden Arbeiten. Nach dem heutigen Stand der Technik stellen neben Auflastschüttungen vor allem Druckentlastungen eine technische Sicherungsmaßnahme zur Reduktion eines unkontrollierten Aufbrechens des oberflächennahen, feinkörnigen Untergrundes am landseitigen Dammfuß dar. Optimierte

Bemessungsgrundlagen für derartige Dammfußdrainagen sind daher von großem Vorteil für Kosten- und Ausführungssicherheit der anstehenden Dammertüchtigungen. Darüber hinaus können sie zur Verbesserung der bestehenden Prognosemodelle zur Quantifizierung von Sickerwasseraustritten auch bei bereits sanierten Dämmen mit integrierten Druckentlastungssystemen angewandt werden. Hierzu kommt auch die Dimensionierung von Pumpstationen und Poldern, die bislang aufgrund fehlender Bemessungsansätze mit starken Unsicherheiten behaftet war. Dies betrifft ein aktuelles Großprojekt an der March und Thaya, bei dem zurzeit umfangreiche Maßnahmen zur Minimierung der Hinterlandvernässung in Planung sind. Das Forschungsvorhaben kommt insbesondere den Planern und Projektanten zugute, um eine genauere Abgrenzung der Ursachen für die Vernässungen zu erzielen.

Durch die gute Übereinstimmung der numerischen Näherungslösung mit den Messdaten aus den Modellversuchen wurde nachgewiesen, dass diese kombinierte Modellierung eine verlässliche Methode zur Beurteilung des Wirkungsgrades von Druckentlastungen darstellt. Dies setzt jedoch voraus, dass neben den geometrischen Randbedingungen vor allem die Kennwerte hinsichtlich der Durchlässigkeit wasserführender Schichten möglichst genau bekannt sind. Das verwendete Simulationsprogramm wurde auch aus dem Grund gewählt, weil es in der Geotechnik häufig eingesetzt wird. Damit bietet es eine gute Plattform für die Umsetzung der Forschungsergebnisse in die Praxis.

Neben der Verbreitung der erforschten Erkenntnisse bei anstehenden Sanierungsprojekten steht der Wissenschaft eine Basis für die darauf aufbauenden experimentell-theoretischen Tätigkeiten zur Verfügung. Insbesondere durch Publikationen und Präsentationen des Forschungsvorhabens sollen der Öffentlichkeit bzw. dem Fachpublikum die Ergebnisse näher gebracht werden.

- Listen Sie Publikationen, Dissertationen, Diplomarbeiten sowie etwaige Patentmeldungen, die aus dem Projekt entstanden sind, auf.

Im Rahmen der Ausarbeitung des Forschungsprojektes sind folgende Publikationen entstanden:

Publikationen und Präsentationen:

BRANDL H., SZABO M. (2013): *Hydraulic failure of flood protection dykes*. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris.

SZABO M. (2013): *Experimental and numerical modelling analysis of the effectiveness of relief drainages by underseepage of dykes*. Proceedings of EWGIE Annual Meeting. Wien.

BRANDL H., SZABO M. (2015): *Unterströmung und hydraulischer Grundbruch von Hochwasserschutzdämmen*. Tagungsband zu 5. Symposium: Sicherung von Dämmen, Deichen und Stauananlagen. Siegen.

Exkursionen:

SZABO M., ADAM D. (2013): Experimental modelling of the effectiveness of relief drainages by underseepage of dykes. Im Rahmen des Meetings „European Working Group on Internal Erosion in Embankment Dams and Their Foundations“. Wien / Markgrafneusiedl.

Studentische Arbeiten:

BETHGE R. (2014): *Technische Maßnahmen gegen hydrodynamische Erosionsprozesse von unterströmten Dämmen*. Bachelorarbeit. FH Campus Wien. Bauingenieurwesen-Baumanagement.

KÖCK G. (2014): *Untersuchung der Wirkungsweise von Entlastungsdrainagen an kleinmaßstäblichen Dammodellen*. Bachelorarbeit. FH Campus Wien. Bauingenieurwesen-Baumanagement.

SMAZINKA L. (2013): *Experimentelle großmaßstäbliche Untersuchungen sowie analytische und numerische Berechnungen zur Quantifizierung von Sickerwässern aus Entlastungsdrainagen*. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen.

- Welche weiterführenden F&E-Aktivitäten sind geplant?

Mit diesem Projekt konnten ein Meilenstein bei der Erforschung der Wirkungsweise von verschiedenen Druckentlastungssystemen gelegt und eine wertvolle Grundlage für weiterführende Forschungsarbeiten geschaffen werden. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus den bereits durchgeführten Modellversuchen sind bei der Fortsetzung dieser Forschungsarbeiten zusätzliche Untersuchungen mit ausgewählten Spannungselementen vorgesehen. Die zum Teil qualitativen Unterschiede zwischen den Labortests im kleinen Maßstab und den naturmaßstäblichen Versuchen unter quasi Laborbedingungen verdeutlichen den Maßstabseffekt hinsichtlich der Übertragung empirisch gewonnener Ergebnisse in die Natur. Mithilfe einer Koppelung experimenteller und numerischer Daten sollen daher im Rahmen einer Dimensionsanalyse Maßstabsfaktoren gefunden werden, um eine verbesserte Anwendung der Forschungserkenntnisse für die praktische Nutzung zu erzielen. Ergänzend dazu sind die beobachteten physikalischen Phänomene des Druckabbaus im Einflussbereich von wasserseitigen Sickerflächen (Fehlstellen in der feinkörnigen Deckschicht) im Detail zu analysieren. Hierzu lieferten auch die numerischen Vergleichsrechnungen teilweise abweichende Ergebnisse.

Im Hinblick auf die Druckentlastung im Hinterland sowie die Quantifizierung der austretenden Sickerwässer konnte mit dem gegenständlichen Projekt der Nachweis über die Richtigkeit der numerischen Vergleichsrechnung erbracht werden. Die gute Übereinstimmung mit den Messungen gilt jedoch primär für homogene Untergrundverhältnisse. In der Natur weist der Grundwasserleiter häufig eine Schichtung auf und wird durch wechselnde Durchlässigkeit geprägt. Die Auswirkung der Heterogenität auf die Dimensionierung von den Entlastungselementen soll daher aufbauend auf dieser Studie untersucht werden. Damit lässt sich eine wesentliche Optimierung des kalibrierten numerischen Modells erreichen. Dies ist insbesondere für den praktischen Einsatz bei der Festlegung der richtigen Druckentlastungsart von großer Bedeutung.

Ein wesentliches Ziel der weiterführenden Forschungsarbeiten ist die analytische Lösung des Druckentlastungsverhaltens von unterschiedlichen Spannungselementen. Als Basis sollen dazu die Ergebnisse der bislang durchgeführten experimentellen und numerischen Untersuchungen dienen. Wird auf diesem Wege eine Übereinstimmung zwischen diese drei genannten Lösungsansätzen gefunden, lassen sich die beim Hochwasser aufgezeichneten Messdaten sehr genau analysieren.

- Wie werden die im Projekt geschaffenen Prototypen weiter verwendet?

Die geschaffenen Prototypen sollen nicht nur für die Weiterführung dieser Grundlagenforschung genutzt, sondern auch für andere Projekte mit dem Schwerpunkt Wasserbau und Geotechnik eingesetzt werden. Neben der Unterströmung stellt beispielsweise die Überströmung ein häufiges

Versagenszenario eines Hochwasserschutzdammes dar. Unter Laborbedingungen durchgeführte naturmaßstäbliche Modellversuche ermöglichen hierzu eine realitätsnahe Nachbildung eines solchen Dammversagens und erlauben eine genaue Untersuchung dieser Prozesse.

In der rechtzeitigen Erkennung des Initialzustandes vor dem Dammversagen liegt ebenfalls ein großes Forschungspotential. Insbesondere in der Entwicklung und Anwendung von messtechnischen Ausrüstungen zur Beobachtung der Versagensmechanismen sowie zur Warnung vor diesen.

5. Erläuterungen zu Kosten & Finanzierung

- Die Abrechnung ist als eigene Datei im Excel-Format hochzuladen. Die Verwendung der im eCall zur Verfügung gestellten Vorlage ist verpflichtend. Beachten Sie den FFG Kostenleitfaden (www.ffg.at/kostenleitfaden) bzw. Ausschreibungsdokumente.
- Abweichungen vom Kostenplan sind an dieser Stelle zu beschreiben und zu begründen.

Die unter Punkt Nr. 3 und Punkt Nr. 6 beschriebene personelle Änderung im Projektteam sowie die Fristerstreckung des Projektes hatten keine Auswirkung auf die Änderungen der genehmigten Gesamtkosten des gegenständlichen Forschungsvorhabens. Die Abrechnung ist der beigelegten Excel-Tabelle zu entnehmen.

	Genehmigt lt. Vertrag	IST-Kosten	IST / genehmigt
Personalkosten	4.500	4.500	100%
F&E-Infrastrukturnutzung	0	0	
Sach- und Materialkosten	0	0	
Drittkosten	139.900	139.900	100%
Reisekosten	0	0	
GESAMT	144.400	144.400	100%

6. Projektspezifische Sonderbedingungen und Auflagen

- Gehen Sie auf projektspezifische Sonderbedingungen und Auflagen (laut §6 des Förderungsvertrags) ein, sofern diese im Förderungs- bzw. Werkvertrag vereinbart wurden.

Im Förderungsvertrag zum gegenständlichen Forschungsprojekt wurden keine spezifischen Sonderbedingungen und Auflagen vereinbart.

7. Meldungspflichtige Ereignisse

Gibt es besondere Ereignisse rund um das geförderte Projekt, die der FFG mitzuteilen sind (siehe auch Richtlinien – Anhang zu 5.3., 5.3.5), z.B.

- Änderungen der rechtlichen und wirtschaftlichen Einflussmöglichkeiten bei dem/der Förderungsnehmer/in
- Insolvenzverfahren
- Ereignissen, die die Durchführung der geförderten Leistung verzögern oder unmöglich machen

- Weitere Förderungen für dieses Projekt

Bei den Förderungsunternehmen kam es während des Forschungszeitraumes zu keinen Änderungen der rechtlichen und wirtschaftlichen Einflussmöglichkeiten sowie zu keinem Insolvenzverfahren.

Am Projektbeginn führten witterungsbedingte Erschwernisse bei der Versuchsdurchführung sowie erforderliche Adaptierungen bzw. Sanierungen nach lokalen Versagen am großmaßstäblichen Damm-Modell zu einer Verzögerung der geförderten Leistung innerhalb des ursprünglich genehmigten Zeitraumes (von 01.04.2013 bis 31.03.2014). Aus diesem Grund wurde am 17.02.2014 eine Firsterstreckung der Forschungsarbeiten beantragt und bis 31.12.2014 genehmigt. Damit konnten die naturmaßstäblichen Messungen sowie ergänzende Modellversuche im kleinen Maßstab durchgeführt werden. Letztere stellen einen wichtigen Beitrag für die numerische Modellkalibrierung dar. Darüber hinaus wurden wertvolle Erkenntnisse über die Wirkungsweise von verschiedenen Druckentlastungselementen gewonnen, die vor allem für die Zielerfüllung von großer Bedeutung waren. Bei der Durchführung dieses Projektes gab es keine weiteren Förderungen.