

## Abschlussbericht TransMiT

# Teil B 4.1

Strategiekomponente B.I Qualitätsbasierte Trennentwässerung

## **Validierung des Berechnungsmodells zur Überflutungssimulation anhand einer Benchmark-Bibliothek und realen Überflutungsversuchen**

Autoren:

Dr.-Ing. Alexander Verworn, Dr.-Ing. Aaron Peche, Simon Spletzer  
BPI Hannover \* Verworn, Beratende Ingenieure

## Kurzbeschreibung des Einzelkapitels

Zur Validierung der Ergebnisse von numerischen Oberflächenabflussmodellen ist die Entwicklung von theoretischen und physikalischen Referenzmodellen verschiedenster Art (hinsichtlich Größe, Komplexität, Randbedingungen, Anzahl Raumdimensionen, Zeitabhängigkeit) zielführend (Kolditz et al., 2015). Während in der Literatur nur wenige Überflutungsversuche zu finden sind und diese überwiegend auf großen und komplexen Eingabe-daten basieren, wurde in der aktuellen Untersuchung ein neuartiges Referenzmodell mit auf einer möglichst kleinen Eingangsdatenmenge entwickelt. Dabei beschreibt der Überflutungsversuch die instationäre räumlich gerichtete Überflutung einer geneigten und heterogenen Fläche. Ziel der Bearbeitung war der Entwurf und die Durchführung des physikalischen Überflutungsversuches, der im weiteren Verlauf zur Entwicklung eines neuen numerischen Referenzmodells mit einem Oberflächenabflusssimulator genutzt wurde.

Im Rahmen dieser Untersuchung konnte gezeigt werden, dass die numerische Berechnung des Oberflächenabflusses mit dem Oberflächenabflusssimulator OpenGeoSys (Kolditz et al., 2012a) eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Wasserständen und dem Wellenfortschritt des physikalischen Versuches aufweist. Tendenziell werden die lokalen Wasserstände an allen Messstellen vom numerischen Modell unterschätzt. Als mögliche Ursachen sind Messungenauigkeiten wie z. B. eine Unterschätzung des Zuflusses durch die Durchflussmessung oder fehlerhafte Werte im Höhenmodell zu nennen.

In der Realität bildet sich zudem eine Wasserfront aus, die zu einem sprunghaften Anstieg des Wasserstands von Null auf einige Millimeter führt. Im numerischen Modell wird dieser Sprung nicht abgebildet. Letzteres liegt möglicherweise an numerischer Diffusion (Hinkelmann, 2005), welche die Abbildung scharfer Kanten im numerischen Modell erschwert. Vor diesem Hintergrund ist eine Untersuchung der o. g. Parameter des physikalischen Versuches und des Oberflächenabflusssimulators OpenGeoSys zu empfehlen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>iii</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>iv</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>5</b>
<b>2 Physikalisches Experiment.....</b>	<b>6</b>
2.1    Versuchsaufbau .....	6
2.2    Messgrößenermittlung.....	6
<b>3 Der Oberflächenabflusssimulator OpenGeoSys .....</b>	<b>8</b>
3.1    Oberflächenabfluss mit OpenGeoSys.....	8
3.2    Verifizierung des Oberflächenabflusses in OGS .....	8
3.2.1 Benchmark 1: Regenquell-getriebener, stationärer Abfluss auf einer eindimensionalen, geneigten Fläche .....	8
3.2.2 Benchmark 2: Regenquellterm-getriebene, instationäre Füllung einer umgedrehten Pyramide .....	9
3.2.3 Benchmark 3: Berechnung des Normalabflusses auf einer geneigten Fläche .	10
<b>4 Konzeptionelles Modell.....</b>	<b>11</b>
4.1    Aufbau.....	11
4.2    Gitterkonvergenz .....	11
4.3    Parameteruntersuchung .....	12
<b>5 Ergebnisse .....</b>	<b>13</b>
5.1    Durchbruchskurven der Messstellen.....	13
5.2    Fortschreiten der Wasserfront .....	13
<b>6 Fazit .....</b>	<b>14</b>
<b>7 Literaturverzeichnis.....</b>	<b>15</b>

## Abbildungsverzeichnis

Bild 2-1:	Versuchsaufbau. Oben: Draufsicht mit Zufluss (Q) und Messstellen (A-F). Unten: Zugehöriges Höhenprofil aus Laserscandaten .....	6
Bild 2-2:	Beispiel Videoaufnahme .....	7
Bild 3-1:	Konzeptionelles Modell zu Benchmark 1 .....	8
Bild 3-2:	Vergleich numerischer und analytischer Lösung zu Benchmark 1 .....	8
Bild 3-3:	Ergebnis einer numerischen Berechnung mit unstrukturiertem Diskretisierungsnetz .....	9
Bild 3-4:	Vergleich numerischer und analytischer Lösung zu Benchmark 1 .....	9
Bild 3-5:	Konzeptionelles Modell zu Benchmark 3 .....	10
Bild 4-1:	Numerisches Modell: Oben Gesamtgebiet, unten im Detail .....	11
Bild 4-2:	Gitterkonvergenz .....	12
Bild 4-3:	Variation des Rauigkeitsparameters an einem Messpunkt.....	12
Bild 5-1:	Durchbruchskurven an zwei Messstellen.....	13
Bild 5-2:	Fortschreiten der Wasserfront .....	13
Bild 6-1:	Foto der Wasserfront.....	14

## 1 Einleitung

Überflutungssereignisse infolge (lokaler) Starkregen haben im urbanen Raum ein hohes Schadenspotential an privaten und öffentlichen Gebäuden sowie Infrastruktureinrichtungen. Den aktuellen Projektionen des Klimawandels folgend sind erhöhte Vorkommen extremer Starkregenereignisse zu erwarten (IPCC, 2012). Für die Anpassung und Gestaltung zukunftsfähiger urbaner Gebiete wird eine Quantifizierung der Überflutungsgefährdung mit Hilfe von physikalisch-basierten numerischen Oberflächenabflussmodellen empfohlen (Schmitt, 2011).

Zur Validierung der Ergebnisse von numerischen Oberflächenabflussmodellen ist die Entwicklung von theoretischen und physikalischen Referenzmodellen verschiedenster Art (hinsichtlich Größe, Komplexität, Randbedingungen, Anzahl Raumdimensionen, Zeitabhängigkeit) zielführend (Kolditz et al., 2015). Während in der Literatur nur wenige Überflutungsversuche zu finden sind und diese überwiegend auf großen und komplexen Eingabedaten basieren, wurde in der aktuellen Untersuchung ein neuartiges Referenzmodell mit auf einer möglichst kleinen Eingangsdatenmenge entwickelt. Dabei beschreibt der Überflutungsversuch die instationäre räumlich gerichtete Überflutung einer geneigten und heterogenen Fläche. Ziel der Bearbeitung war der Entwurf und die Durchführung des physikalischen Überflutungsversuches, der im weiteren Verlauf zur Entwicklung eines neuen numerischen Referenzmodells mit einem Oberflächenabflusssimulator genutzt wurde.

## 2 Physikalisches Experiment

### 2.1 Versuchsaufbau

Das Gebiet für das physikalische Experiment liegt in einem Bereich auf dem Gelände der Stadtentwässerung Hildesheim (SEHi) zwischen zwei Klärstufen. Der Versuchsbereich erstreckt sich über eine Breite von 1,6 m und eine Länge von 12,0 m. Bild 2-1 zeigt eine Zeichnung des Versuchsgebietes mit zugehörigem Höhenprofil aus Laserscandaten sowie die Lage der Wasserstandsmessstellen als auch die Lage der Bodenmarkierungen. Die geflutete Oberfläche besteht aus herkömmlichen 0,3 m x 0,3 m großen Gehwegplatten aus Beton. Die Fugen zwischen den Gehwegplatten sind, besonders im Randbereich, mit einer ausgeprägten Grasnarbe bewachsen.

Das Untersuchungsgebiet wurde über ein kleines Reservoir mit einem konstanten Zufluss von  $Q = 1,6 * 10^{-3} \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  geflutet. Der Zufluss wurde mittels einer Durchflussmessung auf Schwankungen überwacht. Zur Aufzeichnung der Wasserfront wurden insgesamt vier Versuchsabläufe an zwei Versuchstagen durchgeführt. Dabei wurde unterschieden in trockene und benetzte Oberflächenzustände.

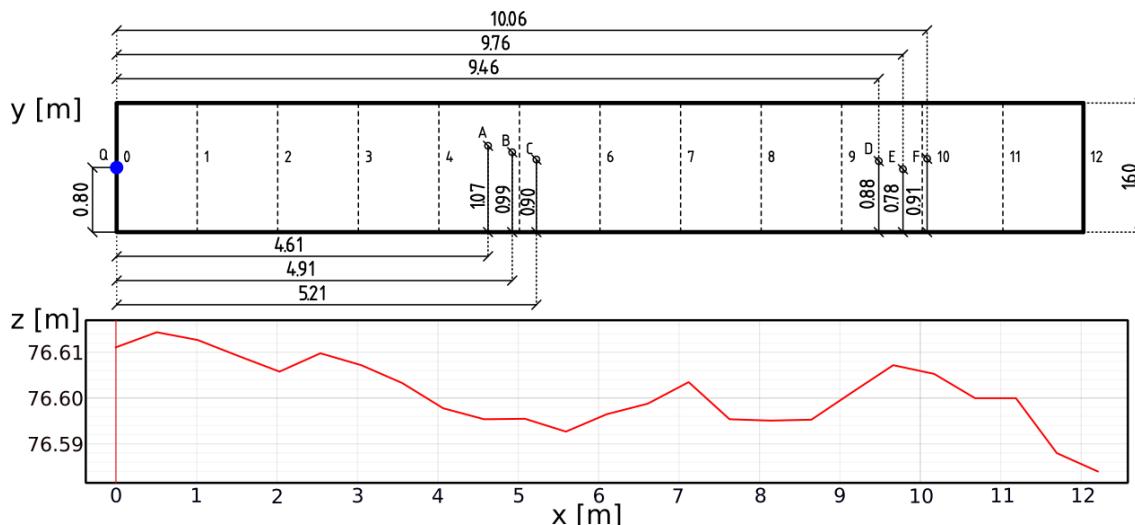


Bild 2-1: Versuchsaufbau. Oben: Draufsicht mit Zufluss ( $Q$ ) und Messstellen (A-F). Unten: Zugehöriges Höhenprofil aus Laserscandaten

### 2.2 Messgrößenermittlung

Bei dem beschriebenen physikalischen Überflutungsversuch wurden die folgenden Messgrößen über die Zeit gemessen: Lokale Wasserstände sowie das Fortschreiten der Wasserfront. Die lokalen Wasserstände über die Zeit wurden optisch über Messeinrichtungen erfasst. Das Fortschreiten der Wasserfront wurde auf der Grundlage von Markierungen auf dem Boden ebenfalls optisch gemessen. Die optische Erfassung der Messdaten erfolgte über entsprechende Videoaufnahmen (s. Bild 2-2).



Bild 2-2: Beispiel Videoaufnahme

### 3 Der Oberflächenabflusssimulator OpenGeoSys

#### 3.1 Oberflächenabfluss mit OpenGeoSys

OpenGeoSys (OGS) ist eine Open-Source Multiphysik-Plattform zur numerischen Simulation von gekoppelten thermo-hydro-mechanischen-chemischen Prozessen in geklüfteten und porösen Medien (Kolditz et al., 2012a). In OpenGeoSys wird für die Berechnung des Oberflächenabflusses der Ansatz der Diffusionswelle verwendet (Delfs et al., 2013). Diese wird mit einer upstream weighting Finite-Elemente-Methode diskretisiert (Maxwell et al., 2014).

#### 3.2 Verifizierung des Oberflächenabflusses in OGS

##### 3.2.1 Benchmark 1: Regenquell-getriebener, stationärer Abfluss auf einer eindimensionalen, geneigten Fläche

Im ersten Benchmark wird eine geneigte Fläche mit der konstanten Regenspende berechnet. Beim im Bild 3-1 gezeigten konzeptionellen Modellaufbau wurde eine bestimmte Rauigkeit und eine definierte Länge zugrunde gelegt. Während am rechten Rand eine Neumann No-Flow Randbedingung angeordnet wurde, herrscht am linken Rand freier Ausfluss. Das analytische Modell basiert auf der 2D-Diffusionswellen-Gleichung.

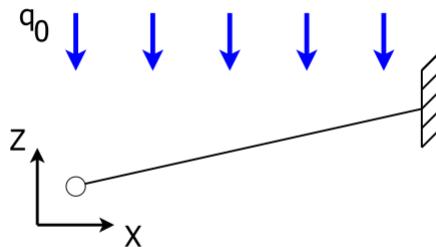


Bild 3-1: Konzeptionelles Modell zu Benchmark 1

Im folgenden Bild 3-2 sind drei Vergleiche von numerischen und analytischen Lösungen mit unterschiedlicher Berechnung dargestellt. Der an den linken Rand angrenzende Bereich wurde für den Vergleich vom numerischen und analytischen Modell genutzt.

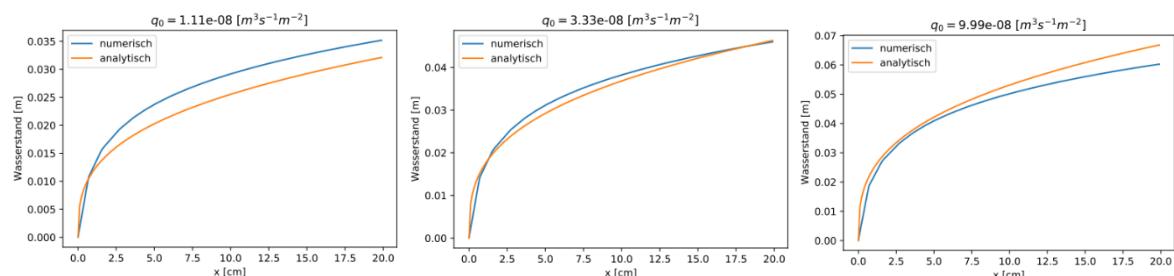


Bild 3-2: Vergleich numerischer und analytischer Lösung zu Benchmark 1

### 3.2.2 Benchmark 2: Regenquellterm-getriebene, instationäre Füllung einer umgedrehten Pyramide

Im zweiten Benchmark wurde das Füllen einer Grube in Form einer umgedrehten Pyramide untersucht. Durch den Ansatz einer No-Flow Randbedingung an den Rändern wurde die Grube befüllt. Durch den Ansatz einer Volumenbilanz beim analytischen Modell muss das Volumen des gefallenen Regens dem Wasservolumen der Pyramide entsprechen. Im Bild 3-3 ist beispielhaft das Ergebnis einer numerischen Berechnung für eine Seite der Pyramide dargestellt, die aufgrund der Symmetrie anschließend vervierfacht wurde.

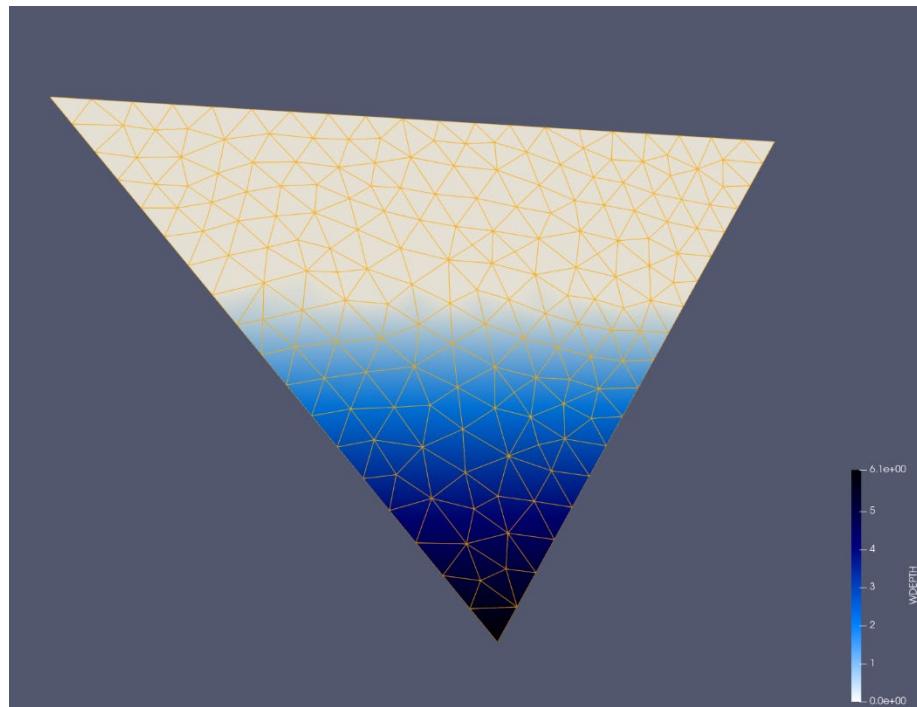


Bild 3-3: Ergebnis einer numerischen Berechnung mit unstrukturiertem Diskretisierungsnetz

Im Bild 3-4 erfolgt ein Vergleich des Wasserstandes in der Pyramide aus der numerischen und analytischen Lösung. Der zunehmend geringere Wasserstand bei der numerischen Lösung kann durch Benetzungseffekte und den Fließprozess resultieren, da sich der Wasserstand bei der analytischen Lösung unverzüglich einstellt.

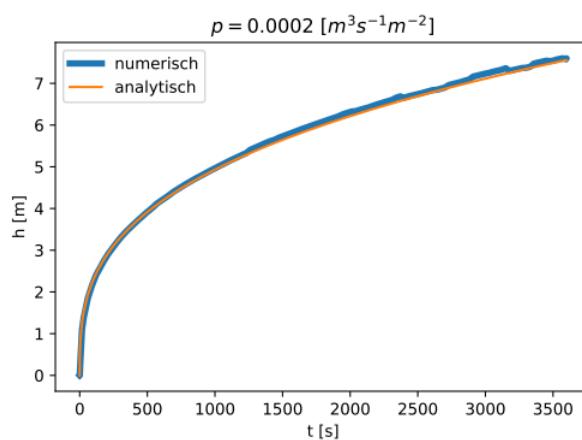


Bild 3-4: Vergleich numerischer und analytischer Lösung zu Benchmark 1

### 3.2.3 Benchmark 3: Berechnung des Normalabflusses auf einer geneigten Fläche

Im dritten Benchmark wurde die Berechnung der Fließgeschwindigkeit untersucht. Die Berechnung des Normalabflusses erfolgte auf einer geneigten Fläche mit definierten Maßen. Das konzeptionelle Modell ist im Bild 3-5 dargestellt.

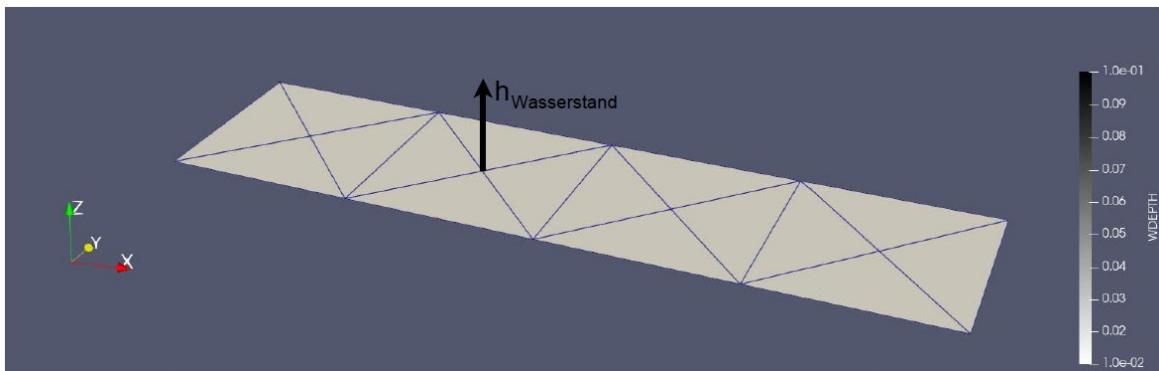


Bild 3-5: Konzeptionelles Modell zu Benchmark 3

Die Untersuchung erfolgte auf der Grundlage unterschiedlicher Neigungen und Wasserstände. Die Wasserstände wurden im numerischen Modell am hohen und tiefen Rand mittels Dirichleträndern fixiert, die geneigten Seiten des Modells wurden als No-Flow Ränder berücksichtigt. Dem analytischen Modell lag die Fließformel nach Gauckler-Manning-Strickler zugrunde. Bei sämtlichen Berechnungsvarianten haben sich keine Abweichungen zwischen numerischer und analytischer Lösung ergeben.

## 4 Konzeptionelles Modell

### 4.1 Aufbau

Das konzeptionelle Modell wurde analog zu den Ausmaßen des physikalischen Versuchs dimensioniert und mit einem strukturierten Dreiecksgitter diskretisiert. Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Oberflächenstruktur wurde das numerische Gitter des Modells in drei Abschnitte untergliedert und mit unterschiedlichen Rauigkeitsbeiwerten belegt. Die Ränder wurden modelltechnisch als No-Flow Ränder berücksichtigt. Die Höhenpunkte wurden einem digitalen Oberflächenmodell (DOM) entnommen und über die y-Ausdehnung gemittelt als konstant angesetzt. Das numerische Modell ist im Bild 4-1 dargestellt.

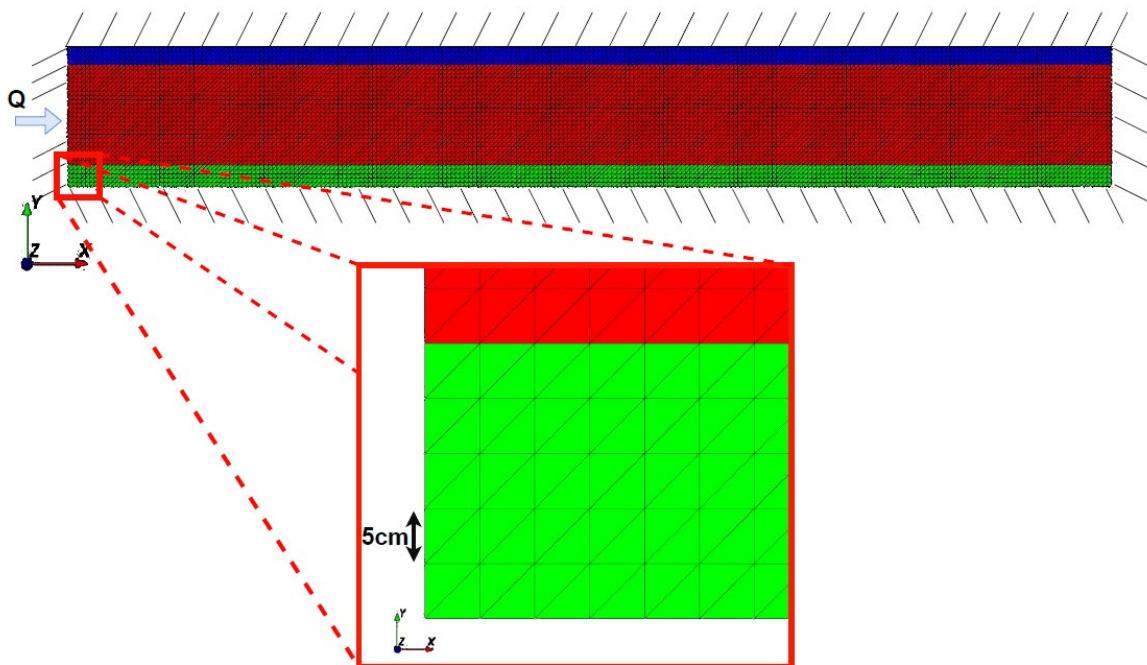


Bild 4-1: Numerisches Modell: Oben Gesamtgebiet, unten im Detail

### 4.2 Gitterkonvergenz

Zur Verwendung eines ausreichend feinen numerischen Berechnungsnetzes wurde eine schrittweise Verfeinerung des Gitters vorgenommen. Dabei wurden die errechneten Wasserstände mit verschiedenen Gittern an definierten Messstellen jeweils bei einem mittleren Zeitschritt verglichen. Als Kriterium für die Gitterkonvergenz wurde gemäß Graf & Degener (2011) eine 1 %-ige Abweichung zum einer Ebene größeren Gitter verwendet. Im Bild 4-2 kann eine ausreichend feine Gitterauflösung abgelesen werden.

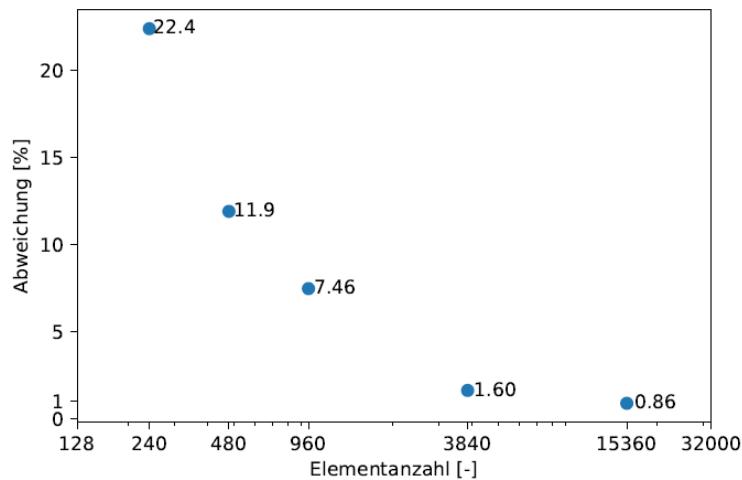


Bild 4-2: Gitterkonvergenz

### 4.3 Parameteruntersuchung

Zur Evaluierung des Einflusses des Rauigkeitsbeiwertes wurden bei Verdopplung und Halbierung des Wertes die resultierenden Wasserstände an bestimmten Stellen im Modell verglichen. Gemäß der Fließformel nach Gauckler-Manning-Strickler erreicht die Wellenfront einen definierten Ortspunkt im Modell bei großen Rauigkeitsbeiwerten schneller als bei kleinen. Die Untersuchung zeigte außerdem den Einfluss durch das Aufteilen in drei Rauigkeitszonen. Neben der zeitlichen Verzögerung ist im Bild 4-3 auch eine Veränderung der Steigung der Kurven zu erkennen: Je größer der Rauigkeitsbeiwert angesetzt wird, desto flacher ist die Kurve.

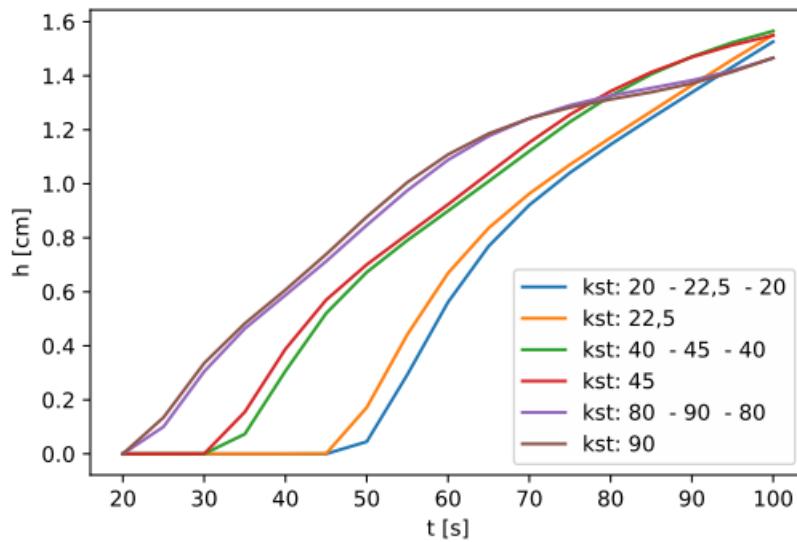


Bild 4-3: Variation des Rauigkeitsparameters an einem Messpunkt

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Durchbruchskurven der Messstellen

Abschließend wurden die Ergebnisse der physikalischen Versuche mit den Ergebnissen der numerischen Nachrechnungen verglichen. Im nachfolgenden Bild 5-1 sind die gemessenen Durchbruchskurven an verschiedenen Messpunkten den numerisch berechneten Verläufen gegenübergestellt. Der zeitliche Verlauf weist eine hohe Übereinstimmung auf, während die absoluten Wasserstände vom numerischen Modell tendenziell hauptsächlich bei trockenen Oberflächenverhältnissen leicht unterschätzt werden.

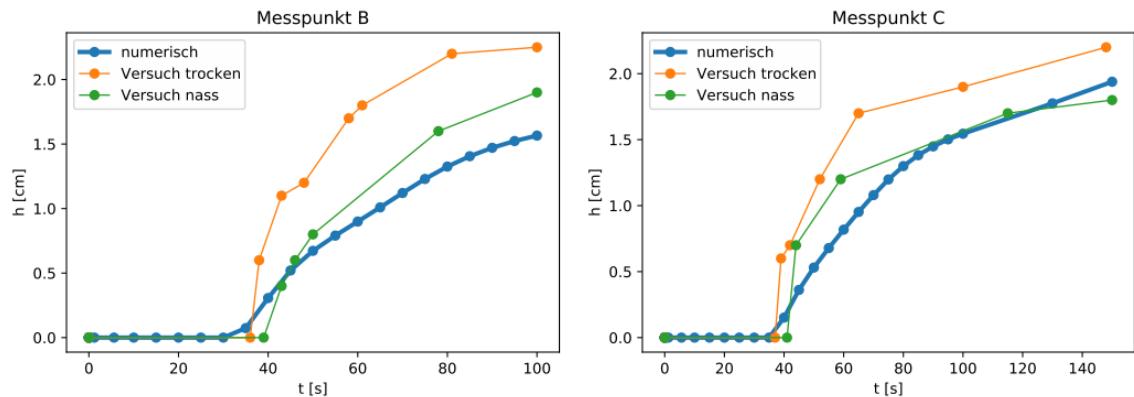


Bild 5-1: Durchbruchskurven an zwei Messstellen

### 5.2 Fortschreiten der Wasserfront

Die Ergebnisse der Auswertung zum Fortschreiten der Wasserfront sind im Bild 5-2 dargestellt. Dabei wurden bei der numerischen Berechnung zwei verschiedene Kriterien angesetzt. Bei der ersten Variante wurde als Kriterium zur Detektion der fortschreitenden Wasserfront ein Wasserstand  $> 0$  mm angesetzt, während bei der zweiten Variante als Kriterium ein Wert von  $> 3$ mm als immobile Wassertiefe gemäß Liang et al. (2017) angenommen wurde. Beim Verlauf mit einem Kriterium von  $> 3$  mm sind zwei Knicke zu erkennen, die auf das Höhenprofil zurückzuführen sind. Da diese Messpunkte jeweils höher liegen als die nachfolgenden Bereiche, resultiert im numerischen Modell ein entsprechender Abfluss, so dass das Kriterium von 3 mm nicht erreicht wird. Insgesamt zeigte sich trotz der Unterschiede zwischen trockenen und nassen Oberflächenverhältnissen bei den physikalischen Versuchen eine sehr gute Übereinstimmung mit dem numerischen Modell.

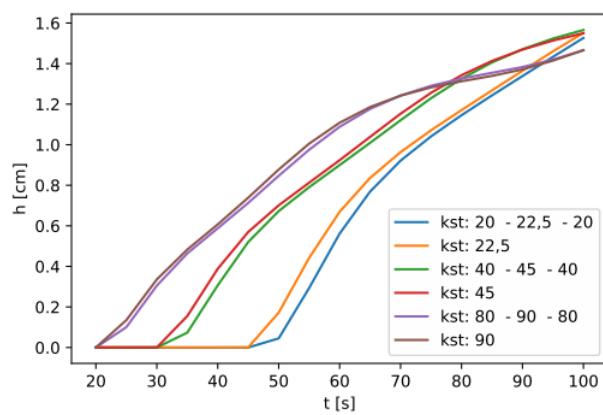


Bild 5-2: Fortschreiten der Wasserfront

## 6 Fazit

Im Rahmen dieser Untersuchung konnte gezeigt werden, dass die numerische Berechnung des Oberflächenabflusses mit dem Oberflächenabflusssimulator OpenGeoSys (Kolditz et al., 2012a) eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Wasserständen und dem Wellenfortschritt des physikalischen Versuches aufweist. Tendenziell werden die lokalen Wasserstände an allen Messstellen vom numerischen Modell unterschätzt. Als mögliche Ursachen sind Messungenauigkeiten wie z. B. eine Unterschätzung des Zuflusses durch die Durchflussmessung oder fehlerhafte Werte im Höhenmodell zu nennen.

In der Realität bildet sich zudem eine Wasserfront aus, die zu einem sprunghaften Anstieg des Wasserstands von Null auf einige Millimeter führt, wie im Bild 6-1 zu erkennen ist. Im numerischen Modell wird dieser Sprung nicht abgebildet. Letzteres liegt möglicherweise an numerischer Diffusion (Hinkelmann, 2005), welche die Abbildung scharfer Kanten im numerischen Modell erschwert. Vor diesem Hintergrund ist eine Untersuchung der o. g. Parameter des physikalischen Versuches und des Oberflächenabflusssimulators OpenGeoSys zu empfehlen.



Bild 6-1: Foto der Wasserfront

## 7 Literaturverzeichnis

- Delfs, J.-O., Wang, W., Kalbacher, T., Singh, A. K. & Kolditz, O. (2013). A coupled surface/subsurface flow model accounting for air entrapment and air pressure counterflow. *Environmental Earth Sciences*, 69 (2), 395414. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2420-1>
- Graf, T. & Degener, L. (2011). Grid convergence of variable-density flow simulations in discrete-fractured porous media. *Advances in Water Resources*, 34 (6), 760-769. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.04.002>
- Hinkelmann, R. (2005). Efficient Numerical Methods and Information-Processing Techniques for Modeling Hydro- and Environmental Systems. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/3-540-32379-1>
- IPCC. (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. CAMBRIDGE ISBN 978-1-107-02506-6. [https://www.ebook.de/de/product/19222721/managing\\_the\\_risks\\_of\\_extreme\\_events\\_and\\_disasters\\_to\\_advance\\_climate\\_change\\_adaptation\\_special\\_report\\_of\\_the\\_intergovernmental\\_panel\\_on\\_climate\\_chan.html](https://www.ebook.de/de/product/19222721/managing_the_risks_of_extreme_events_and_disasters_to_advance_climate_change_adaptation_special_report_of_the_intergovernmental_panel_on_climate_chan.html)
- Kolditz, O., Bauer, S., Bilke, L., Böttcher, N., Delfs, J. O., Fischer, T., Görke, U. J., Kalbacher, T., Kosakowski, G., McDermott, C. I., Park, C. H., Radu, F., Rink, K., Shao, H., Shao, H. B., Sun, F., Sun, Y. Y., Singh, A. K., Taron, J., . . . Zehner, B. (2012a). OpenGeoSys: an open-source initiative for numerical simulation of thermo-hydro-mechanical/chemical (THM/C) processes in porous media. *Environmental Earth Sciences*, 67 (2), 589-599. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1546-x>
- Kolditz, O., Shao, H., Wang, W. & Bauer, S. (Hrsg.). (2015). Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical Processes in Fractured Porous Media: Modelling and Benchmarking. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11894-9>
- Liang, J., Bradford, S. A., Čimínek, J. & Hartmann, A. (2017). Adapting HYDRUS-1D to Simulate Overland Flow and Reactive Transport during Sheet Flow Deviations. *Vadose Zone Journal*, 16 (6), vzej2016.11.0113. <https://doi.org/10.2136/vzej2016.11.0113>
- Maxwell, R. M., Putti, M., Meyerhofer, S., Delfs, J.-O., Ferguson, I. M., Ivanov, V., Kim, J., Kolditz, O., Kollet, S. J., Kumar, M., Lopez, S., Niu, J., Paniconi, C., Park, Y.-J., Phanikumar, M. S., Shen, C., Sudicky, E. A. & Sulis, M. (2014). Surface-subsurface model intercomparison: A first set of benchmark results to diagnose integrated hydrology and feedbacks. *Water Resources Research*, 50 (2), 15311549. <https://doi.org/10.1002/2013wr013725>
- Schmitt, T. G. (2011). Risikomanagement statt Sicherheitsversprechen – Paradigmenwechsel auch im kommunalen Überflutungsschutz. *KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall*, Heft 58 (1), S. 40-49.