

Teilbericht zum Forschungsprojekt:
Kanalsanierung: Entwicklung innovativer Konzeptionen und
Verfahren zur Sanierung von öffentlichen und privaten
Kanälen mit dem Schwerpunkt Grundstücksentwässerung

Einzelauftrag 5

Entwicklungsunterstützende Untersuchung zur „Infiltrationsdichtheit“ bei Werkstoffwechsel bzw. Übergängen insbesondere im Zusammenhang mit der Fremdwassersanierung

- Arbeitspaket 4: Abnahmekriterien Infiltrationsdichtheit -

Neubiberg, September 2010

Auftraggeber: Institut für unterirdische Infrastruktur (IKT)

Projektleitung:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Disse
Universität der Bundeswehr München
Institut für Wasserwesen
Werner-Heisenberg-Weg 39
85579 Neubiberg

Projektbearbeitung:

Dipl.-Ing. (FH) Patrick Keilholz, M. Eng.
Universität der Bundeswehr München
Institut für Wasserwesen
Werner-Heisenberg-Weg 39
85579 Neubiberg

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Modellentwicklung.....	2
2.1	Die Software FEFLOW.....	2
2.2	Modellkonzeption und Abstrahierung des Infiltrationsmodells.....	3
3	Sensitivitätsanalysen.....	6
3.1	Parameterverhalten im 2D-Modell.....	6
3.2	Einfluss von Fremdkörpern im 2D-Modell.....	12
3.3	Parameterverhalten im 3D-Modell.....	15
4	Modelltechnische Kontrolle des Innendruckprüfverfahrens.....	19
4.1	Anpassung des Modells auf die maximale Exfiltrationsrate.....	20
4.2	Infiltration nach Innendruckprüfung.....	21
5	Aufbau von 3D-Modellen.....	23
5.1	Modellierung von Rohranschlüssen und unterschiedlichen Schadstellen.....	23
5.1.1	Rohranschluss.....	23
5.1.2	Muffenschaden.....	26
5.1.3	Riss im Rohrscheitel.....	27
5.2	Modellierung von Schächten.....	28
6	Ausblick.....	31
7	Zusammenfassung.....	32
8	Literatur.....	34

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Erweiterungsmöglichkeiten von 2D- zu 3D-Modellen (©DHI-WASY).....	2
Abb. 2: Modellaufbau: betrachtetes Bodenpaket mit mittig liegendem Versuchsstand	3
Abb. 3: Möglichkeiten der Modellabstraktion.....	4
Abb. 4: Aufbau des 2D-Vertikalmodells.....	6
Abb. 5: Infiltrationsraten und Grundwasserstände bei veränderlicher Rohrdurchlässigkeit.....	7
Abb. 6: Infiltrationsraten und Grundwasserstände bei veränderlichem Boden	9
Abb. 7: Veränderung der Infiltration bei unterschiedlichen Grundwasserständen.....	10
Abb. 8: Aufbau des 2D-Vertikalmodells mit Fremdkörper	13
Abb. 9: Fließgeschwindigkeiten im Vertikalmodell bei Umströmung des Fremdkörpers	13
Abb. 10: Veränderung der Infiltration bei unterschiedlichen Durchmessern eines Fremdkörpers.....	14
Abb. 11: Schnitt des FEFLOW 3D-Modells, Detailansicht der Störstelle im Rohr	15
Abb. 12: Vergleich der Absenkrichter bei unterschiedlichen Randbedingungen.....	16
Abb. 13: Natürliches Auftreten der unterschiedlichen Randbedingungen.....	17
Abb. 14: Infiltrationsraten und Grundwasserabsenkung bei unterschiedlichen Randbedingungen.....	17
Abb. 15: Anstieg der Fließgeschwindigkeiten im Bereich der Störstelle.....	18
Abb. 16: Druckpotential bei der Innendruckprüfung mit Grundwasser.....	19
Abb. 17: Änderung des Leakage-Faktors für die Innendruckprüfung bei.....	20
Abb. 18: Vergleich zwischen Infiltration und Exfiltration.....	21
Abb. 19: Vergleiche der Wasserdrücke und der Fließgeschwindigkeiten bei Exfiltration und Infiltration mit gleichem Druckpotential.....	22
Abb. 20: Zuweisung der Durchlässigkeiten im Anschlussbereich	24
Abb. 21: Wasserdruck im Anschlussrohr.....	25
Abb. 22: Wasserdruck im Bereich des Rohranschluss im abstrakten Modell	25
Abb. 23: Fließgeschwindigkeiten an einem Muffenschaden.....	26
Abb. 24: Infiltrationsraten an den Knotenpunkten im Bereich des Muffenschadens	27
Abb. 25: Fließgeschwindigkeiten im Bereich eines Scheitelrisses.....	27
Abb. 26: Infiltrationsraten an den Knotenpunkten im Bereich des Scheitelrisses	28
Abb. 27: Möglichkeiten der Modellabstraktion bei Schächten mit Rohranschluss	29
Abb. 28: Zuordnung der Durchlässigkeiten im Schachtmodell.....	29
Abb. 29: Infiltrationsraten im Schachtmodell.....	30

1 Einleitung

Die Infiltration von Fremdwasser in Kanalleitungssysteme verursacht jährlich hohe wirtschaftliche Schäden. Grundwasser kann besonders an Schadstellen, wie fehlerhaften Rohrmuffen, undichten Rohranschlüssen und Bruchstellen am Rohr, in das Kanalsystem eindringen. Hinsichtlich der Infiltrationsraten wurden bereits Untersuchungen durchgeführt, in denen das infiltrierte Volumen bzw. der Durchfluss von unterschiedlichen Schadstellen analysiert wurde.¹ Die Interaktion von infiltrierendem Wasser und der resultierenden Grundwasserabsenkung oberhalb der Schadstelle wurde allerdings bisher noch nicht hinreichend genau untersucht. Aus diesem Grund sollen im Rahmen dieser Studie Auswirkungen von Fremdwasserinfiltrationen auf den angrenzenden Bodenwasserhaushalt untersucht werden. Dabei werden neben den unterschiedlichen Schadstellen weitere Einflüsse wie die Bodenarten (Permeabilität), Grundwasserstände und die Leistungsfähigkeit des Grundwasserleiters auf die Infiltrationsraten untersucht.

Als Modellierungswerkzeug steht das Modell FEFLOW der Firma DHI-WASY zur Verfügung, mit dem das Verhalten des Aquifers bei unterschiedlichen Infiltrationsraten und Bodenarten bestimmt werden kann. Es werden neben einfachen 2-dimensionalen Modellen, mit denen die Sensitivität der Parameter untersucht, auch aufwendige 3-dimensionale Modelle aufgebaut, mit denen verschiedene Schadstellen räumlich simuliert werden. Auch die Interaktion der Schadstellen untereinander kann mit den 3D-Modellen problemlos abgebildet werden.

Im Vordergrund dieses Teilprojekts stehen die Wechselwirkungen zwischen Grundwasserständen und Infiltrationsraten bei unterschiedlichen Schadstellen. Hierbei werden die unbeeinflussten Infiltrationsraten als vorab definierte Werte im Modell verwendet.

¹ Vgl. Hennerkes, Jörg André : Reduzierung von Fremdwasser bei der Abwasserentsorgung, Dissertation an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen 2006.

2 Modellentwicklung

Damit der Einfluss der Infiltration auf den Grundwasserhaushalt analysiert werden kann, ist es notwendig, das Verhalten von Wasser im Boden bestmöglich im Modell abzubilden. Hierfür stehen verschiedene Berechnungsprogramme zur Verfügung, mit deren Hilfe die Wasserbewegungen im Boden simuliert werden können. Ein international anerkanntes Modell ist FEFLOW, das von DHI-WASY entwickelt wurde. Es eignet sich gut, um den Wasser-, Stoff- und Wärmtransport in mehrschichtigen Bodenkörpern zu simulieren.

2.1 Die Software FEFLOW

Der Name FEFLOW steht für “Finite Element Subsurface FLOW & Transport Simulation System“ und gibt damit schon darüber Auskunft, dass es sich bei der Berechnung der Grundwasserströmungen um ein auf finite Elemente basierendes System handelt. Entwickelt wurde die Software ursprünglich 1979 als reines 2D Berechnungsprogramm, das ab 1992 zu einem 3D-Modell erweitert wurde.² Inzwischen kann das Modell Wasserströmungen in ungesättigten Böden³ sowie Wärme- und Massentransport abbilden.

Die aktuelle Modellarchitektur sieht es vor, in einer 2-dimensionalen Ebene ein Modell zu erstellen, aus dem anschließend ein finites Elementegitter generiert wird. Das Gitter kann darauf hin in den 3D-Raum extrudiert werden (s. Abb. 1). Daraus ergeben sich finite Körper, die entweder die Form von Prismen (dreieckiges Netz) oder von Quadern (rechteckiges Netz) besitzen.

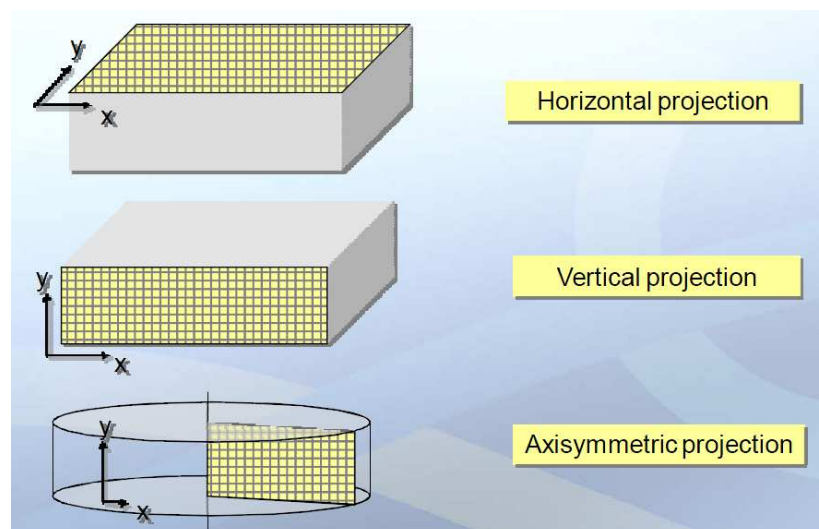


Abb. 1: Erweiterungsmöglichkeiten von 2D- zu 3D-Modellen (©DHI-WASY)

² Vgl. DHI-Wasy: FEFLOW 6.0 Trainingskript, 2010, S. 10.

³ Berechnungsgrundlage für ungesättigte Böden bildet die Richards- Gleichung.

Aus diesem Zusammenhang gibt es bei der Erstellung von 3D-Modellen immer eine Ebene, auf der Formen sehr frei generiert werden können (finites Elementegitter), die anschließend in die dritte Dimension erweitert wird. Durch das Verfahren der Extrusion hat die dritte Ebene nur eingeschränkte Möglichkeiten im Bezug auf die 3D-Gestaltungsfreiheit. Deshalb ist es nicht einfach möglich 3-dimensional verlaufende Rohrleitungssysteme (Rohre in x-, y- und z-Achse) zu generieren.

2.2 Modellkonzeption und Abstrahierung des Infiltrationsmodells

Die Fragestellung in dem Projekt macht es erforderlich ein Computermodell aufzubauen, welches dieselben geometrischen Maße des IKT-Versuchsstandes besitzt, da in diesem später die Infiltrationsraten und Grundwasserverhältnisse messtechnisch erfasst werden sollen. Daher hat das eigentliche Modell horizontale Kantenlängen von 15 x 6 m. Die vertikale Tiefe der Bodenschichten beträgt 6 m. Ein realistisches Grundwassermodell in einem Bodenkörper mit diesen Abmaßen abzubilden ist allerdings wenig effektiv, da Veränderungen im Grundwasserstand, wie beispielsweise Absenktrichter, über große Strecken erfolgen können. Aus diesem Grund wird das Modell mit den beschriebenen Maßen von einem homogenen Bodenkörper umgeben, da an dessen äußeren Ende eine unbeeinflusste Randbedingung (konstanter Grundwasserstand) definiert werden kann (s. Abb. 2).

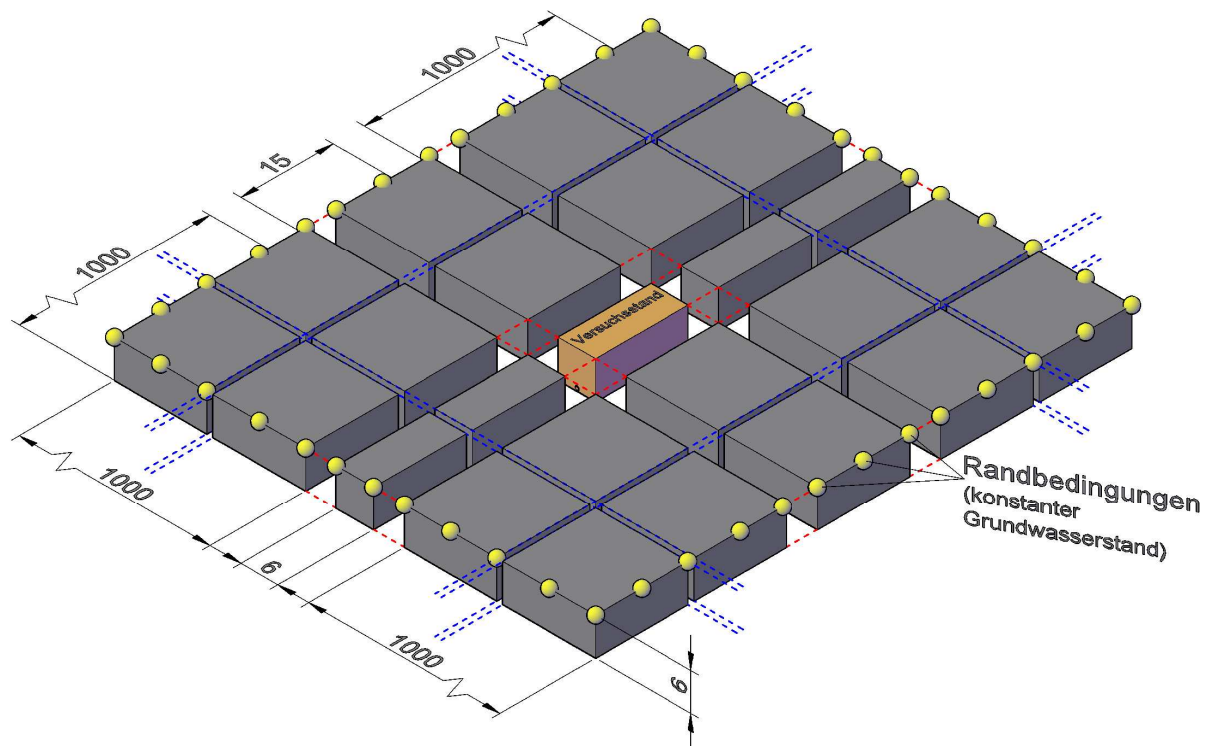


Abb. 2: Modellaufbau: betrachtetes Bodenpaket mit mittig liegendem Versuchsstand

Mit Hilfe dieser Modellerweiterung können natürliche homogene Bodenverhältnisse berechnet werden, bei denen allerdings der Grundwasserleiter nicht durch Störgrößen wie tiefgründige Bebauungen, Dichtwände etc. beeinflusst wird. Damit die Randbedingung im Versuchsstand abgebildet werden kann, muss der Wasserstand an den Rändern entsprechend der Simulationsergebnisse gesteuert werden. Hierfür wird eine Regelsteuerung notwendig, die entsprechend Wasser zugibt oder abpumpt, um den Grundwasserstand im Versuchsstand realistisch darzustellen.

Eine weitere Modellabstraktion ist im Bereich der Rohrleitungen notwendig. FEFLOW ist nur in der Lage Wasserstände und -strömungen in Böden zu simulieren. Konstruktionselemente wie Rohre müssen daher wie ein Boden behandelt werden. Das heißt, dass der Rohrmantel als undurchlässige Schicht abgebildet wird. An Schadstellen wird die Durchlässigkeit der finiten Elemente soweit erhöht, dass sich die gewünschte Infiltrationsrate einstellt. Die Durchlässigkeit an der Schadstelle kann dann über den Leaking-Faktor beschrieben werden.

In Folge der bereits beschriebenen Modellarchitektur kann die Geometrie von Rohrleitungen nur in einer Achse im Modell komfortabel abgebildet werden. Durch die Verwendung mehrerer Scheiben (Extrusionsebenen) können allerdings auch Rohre in mehreren Achsen modelliert werden. Dies ist jedoch vom Modellaufbau sehr aufwendig und die Modelle haben zudem sehr lange Rechenzeiten, so dass eine solche Architektur vermieden werden sollte. Eine einfache Alternative ist, die Rohrverläufe zu abstrahieren. Eine Abstraktion ist dann möglich, wenn der Einfluss auf die zu ermittelnden Größen vernachlässigbar klein ist. Bei den hier betrachteten Modellen soll grundsätzlich das Verhalten vom Wasser im Boden betrachtet werden. Die Rohre werden dabei nur als Fremdkörper bzw. Entnahmestellen im Bodenkörper betrachtet. Folglich können beispielsweise Anschlussrohre durch ein parallel zum Hauptrohr verlaufendes Entnahmerohr (fiktives Rohr) dargestellt werden, wenn angenommen wird, dass die Schadstellen der Anschlüsse immer an derselben Stelle liegen (s. Abb. 3).

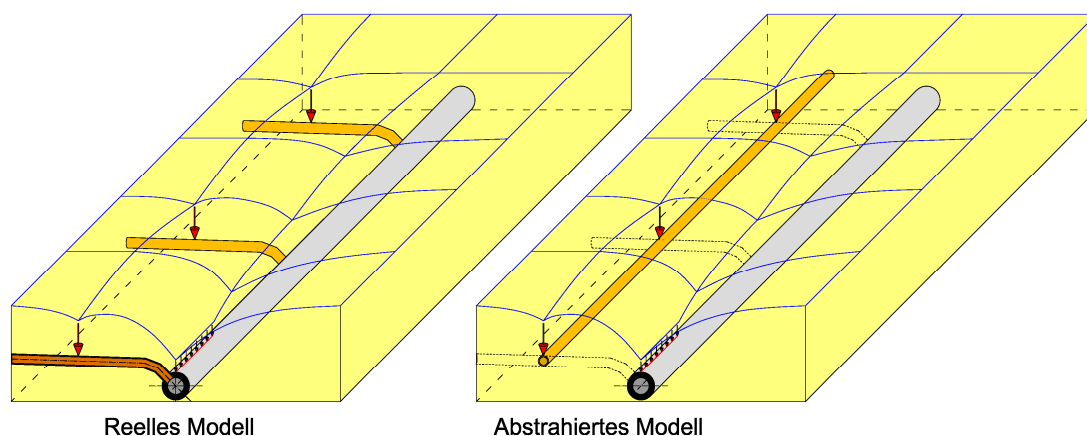


Abb. 3: Möglichkeiten der Modellabstraktion

Bei der Abstraktion des Modells muss allerdings gewährleistet sein, dass das fiktive Rohr keinen Einfluss auf die Grundwasserströmung hat. Wenn beispielsweise das Fließverhalten zu dem Abflussrohr so stark beeinträchtigt wird, dass sich andere Infiltrationen einstellen, sollte diese Art der Abstraktion nicht verwendet werden. Der Einfluss des fiktiven Rohrs wird daher in der folgenden Sensitivitätsanalyse näher untersucht.

3 Sensitivitätsanalysen

Das Verhalten von Grundwasser, welches über Schadstellen in Rohrleitungen infiltriert, kann besser analysiert werden, wenn zuvor eine (eindimensionale) Parameteranalyse des Modells durchgeführt wurde. Hierzu werden die Parameter, wie beispielsweise Grundwasserstand, Permeabilität des Bodens und Infiltrationsraten, separat variiert, während die anderen Parameter konstant bleiben. Parameterinteraktionen werden hier nicht untersucht, da diese einer Vielzahl von Modellierungsläufen bedürfen, was im Rahmen der kurzen Projektlaufzeit nicht umsetzbar ist.

Die Analysen werden an zwei unterschiedlichen Modelltypen durchgeführt. Zuerst erfolgt eine Parameteruntersuchung für das einfache 2D-Vertikalmodell. Folglich beziehen sich alle Ergebnisse des Modells auf den laufenden Meter. In einem weiteren Modell wird die Sensitivität von Schadstellengrößen in einem 3D-Modell getestet. Die Ergebnisse beziehen sich dadurch auf das gesamte Modell.

3.1 Parameterverhalten im 2D-Modell

Das vertikale 2D-Modell wird mit einer Breite von 6 m und einer Höhen von ebenfalls 6 m aufgebaut. Die Maße stützen sich auf den Querschnitt des Versuchstandes von IKT. Zusätzlich muss ein Bodenpaket links und rechts des Modells angefügt werden, um den Einfluss des Absenktrichters abbilden zu können (s. Abb. 4). Dadurch verfügt das Modell über eine unbeeinflusste Randbedingung, an der ein konstanter Grundwasserstand angenommen werden kann. Für die Breite der Bodenpakete werden jeweils 1000 m gewählt und an deren linken bzw. rechten Rand wird die Randbedingung „konstanter Wasserspiegel“ gesetzt. Der gesamte Boden wird als homogen mit einem gleichbleibenden k_f -Wert angenommen. Als Startbedingung ist das Modell bis zur Höhe der Randbedingung mit Wasser gefüllt.

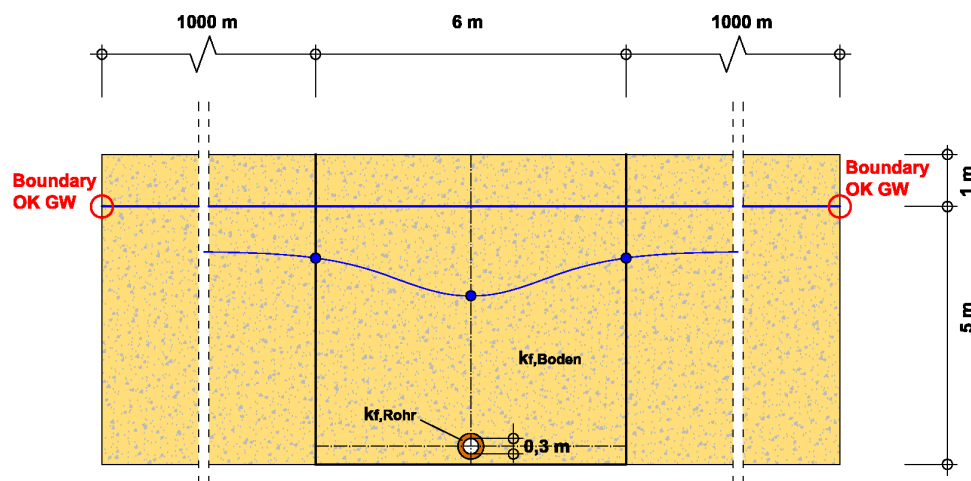


Abb. 4: Aufbau des 2D-Vertikalmodells

Unabhängig voneinander werden an diesem Modellaufbau die Parameter kf-Wert des Rohrs (Schadstelle), kf-Wert des Bodens und der Grundwasserstand variiert und als Funktion der Infiltration und der Grundwasserabsenkung über dem Rohr sowie am Rand des Versuchsstand dargestellt.

Variabler kf-Wert des Rohrs

Die Infiltrationsraten in das Rohr können über den kf-Wert des Rohrmantels verändert werden. Je größer die Durchlässigkeit des Mantels ist, desto mehr Wasser kann infiltrieren. In diesem Schritt soll der realistische Parameterbereich für die Permeabilität des Rohrs (Leakage- Faktor) untersucht werden. Zu diesem Zweck wird das Rohr als Drainage betrachtet. Es ist gleichmäßig durchlässig, so dass das Wasser über den gesamten Querschnitt infiltrieren kann. Die anderen Modellparameter bleiben konstant. Der kf-Wert des Bodens beträgt $20 \cdot 10^{-4}$ m/s und entspricht damit einem Mittelsand. Im Modell wird, gemessen von der Modellunterkante, ein Wasserstand von 5 m als Startbedingung und Randbedingung eingestellt. Die Durchlässigkeiten des Abfluss- bzw. Drainagerohres werden von stark undurchlässig (schluffiger Ton: $1 \cdot 10^{-8}$ m/s) bis sehr durchlässig (Sand: $1 \cdot 10^{-4}$ m/s) variiert.

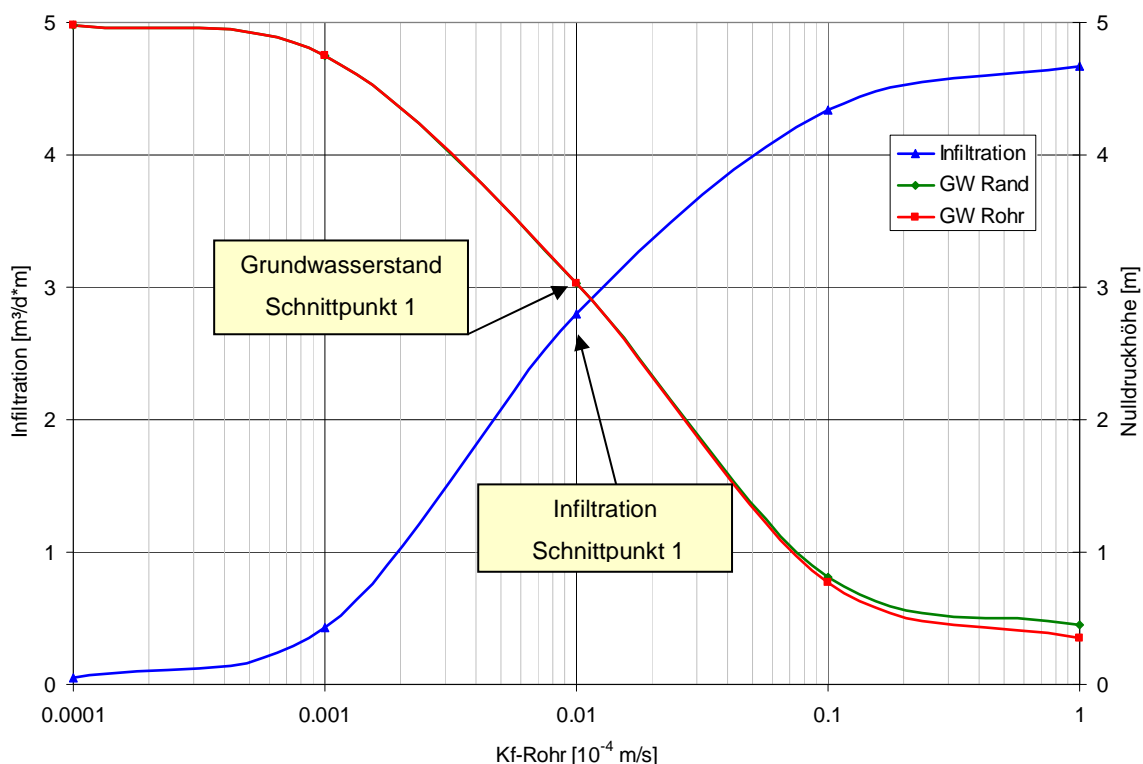


Abb. 5: Infiltrationsraten und Grundwasserstände bei veränderlicher Rohrdurchlässigkeit (kf-Wert Boden konstant: $20 \cdot 10^{-4}$ m/s)

Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Veränderung in der Infiltration und im Grundwasserstand (s. Abb. 5). Bei einem stark undurchlässigen Rohr ist die Infiltrationsrate wie erwartet gering und damit auch der Grundwasserstand nahezu unbeeinflusst.

Dagegen ist bei einem durchlässigen Rohr die Infiltration mit $4,7 \text{ m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$ sehr hoch. Das Rohr hat hier die Funktion einer Drainage, die den Grundwasserstand auf Höhe des Rohrs absenkt. Hier zeigt sich, dass ein natürlicher oberer Grenzwert der Infiltration erreicht ist, denn es kann nur langsam Wasser aus dem Boden nachströmen. Der obere Grenzwert stellt sich bei einem Leakage-Faktor von $1\cdot 10^{-4} \text{ 1/s}$ ein und der untere dagegen erst bei einem Leakage-Faktor von $1\cdot 10^{-6} \text{ 1/s}$. In dem dazwischen liegenden Bereich findet die Interaktion statt, so dass dieser Bereich für weitere Analysen weiter untersucht werden sollte.

Zur Berechnung der Infiltration gibt es bereits ähnliche Berechnungsansätze aus dem Bereich der Bodendrainierung. So kann beispielsweise nach Hooghoudt⁴ die Infiltration in offene Gräben oder Rohrdränagen berechnet werden. Da dieser jedoch mehrere Drainagen mit gleichen Abständen berechnet und annimmt, dass der Grundwasserspiegel bis zur Höhe des Drains absinkt, kann der Ansatz in diesem Fall nicht direkt verwendet werden. Zudem ist in der vorliegenden Studie die Durchlässigkeit des Rohrmantels parametrisiert, was bei Hooghoudt nicht der Fall ist. Damit die Infiltrationsraten durch ein Rohr ausreichend gut gesteuert werden können, ist der Wertebereich von $1\cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ bis $1\cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ zu empfehlen. Diese Werte entsprechen bei dem betrachteten 10 cm dicken Rohrmantel einem Leakage-Faktor von $1\cdot 10^{-6} \text{ 1/s}$ bis $1\cdot 10^{-4} \text{ 1/s}$, der sich nach folgender Formel ergibt von:

$$LF = \frac{k_f}{d} \left[\frac{1}{s} \right] \quad \text{Formel 1}$$

In dieser Formel bedeutet:

LF	=	Leakage-Faktor [1/s]
d	=	Dicke der Leakage Schicht [m]
k_f	=	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]

Variabler kf-Wert des Bodens

Nach der Untersuchung des Einflusses der unterschiedlichen Durchlässigkeit des Rohres soll nun die Bodenart variiert werden. Die Permeabilität des Rohrs wird auf Grundlage des vorherigen Versuchs mit einem kf-Wert von $1\cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ als konstant angenommen. Der Boden wird von einem sandigen Schluff (kf-Wert = $1\cdot 10^{-5} \text{ m/s}$) bis zu einem Kies (kf-Wert = $0,1 \text{ m/s}$) variiert. Wie bereits in dem vorangegangenen Versuchsaufbau wird als Randbedingung der Grundwas-

⁴ Vgl. Hooghoudt, General consideration of the problem of field drainage by parallel drains, ditches, watercourses, and channels. Publ. No.7 in the series Contribution to the knowledge of some physical parameters of the soil (titles translated from Dutch). Bodemkundig Instituut, Groningen, The Netherlands, 1940.

serstand mit 5 m über der Modellunterkante als konstant angenommen und als Anfangsgrundwasserstand verwendet.

Erwartungsgemäß zeigt sich bei diesem Versuch, dass mit höherer Durchlässigkeit des Bodens die Infiltration in das Rohr zunimmt (s. Abb. 6).

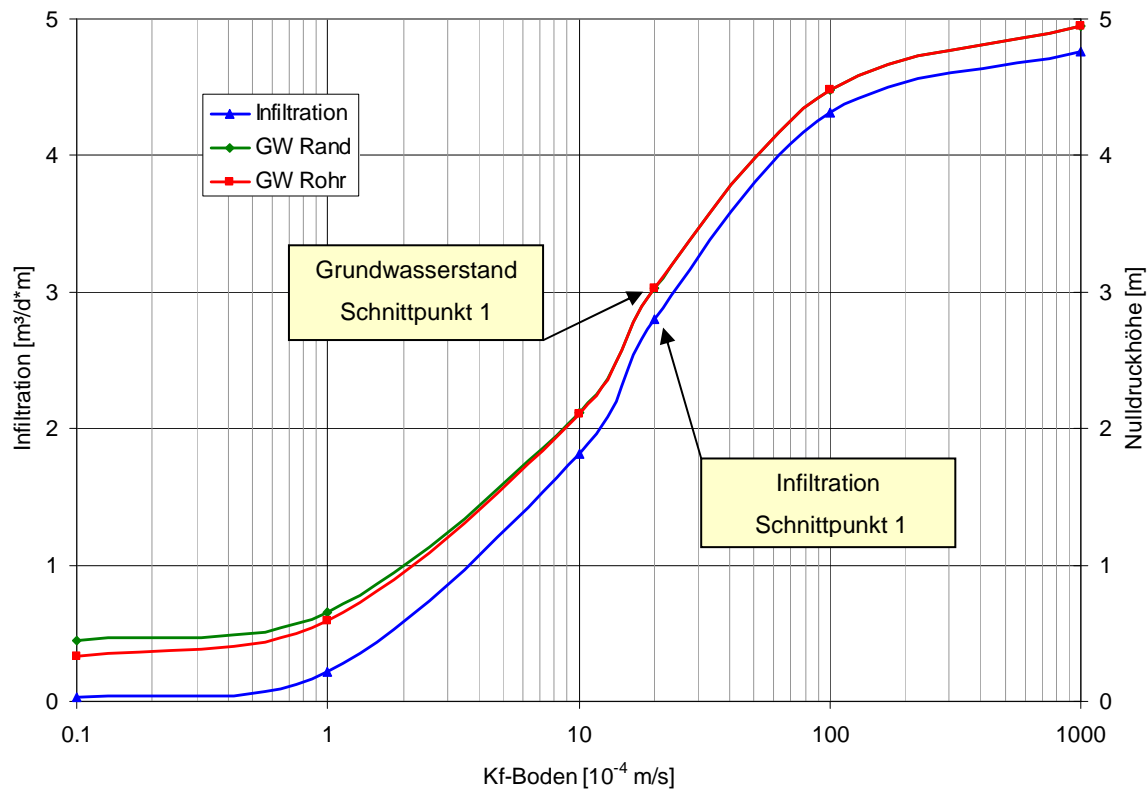


Abb. 6: Infiltrationsraten und Grundwasserstände bei veränderlichem Boden
(kf-Wert Rohr konstant : $1 \cdot 10^{-6}$ m/s)

Bemerkenswert ist, dass sich die Infiltrationsraten einem unteren und oberen Grenzwert annähern. Der untere Grenzwert ist über die Dichtungsfunktion des Bodens zu beschreiben. Der Effekt zeigt sich auch im starken Absinken des Grundwasserspiegels. Durch die geringe Undurchlässigkeit kann weniger Wasser zur Schadstelle fließen und der Absenktrichter wird sehr steil, da bereits geringe Infiltrationsraten das umliegende Bodenpaket stark drainieren können. Der obere Grenzwert ergibt sich bei gut durchlässigen Böden, in dem Wasser aus den Randbedingungen nachfließen kann. Für die gleichbleibende Maximalinfiltration ist die Leistungsfähigkeit der Drainage, also die Permeabilität des Rohrmantels verantwortlich. Durch den Rohrquerschnitt kann nur eine bestimmte Menge sickern, auch wenn im Bodenpaket genügend Wasser zur Verfügung steht. Der Effekt spiegelt sich auch im Grundwasser wider, in dem keine Absenkung zu erkennen ist.

Variabler Grundwasserstand

Mit dem dritten Modellaufbau soll der Einfluss des Grundwasserstandes genauer untersucht werden. Für den Fall, dass der Grundwasserstand höher als die Schadstelle im Rohr liegt, baut sich ein Wasserdruck auf, der die Infiltration erhöht. Im Folgenden wird bei einem gleichbleibenden Boden (k_f -Wert $20 \cdot 10^{-4}$ m/s) und einer konstanten Rohrdurchlässigkeit von $k_f = 1 \cdot 10^{-6}$ m/s der Grundwasserstand von 3 bis 5 m über Modellunterkante variiert. Dadurch kommt es zu unterschiedlichen Infiltrationsraten, die mit zunehmender Druckhöhe ansteigen (s. Abb. 7).

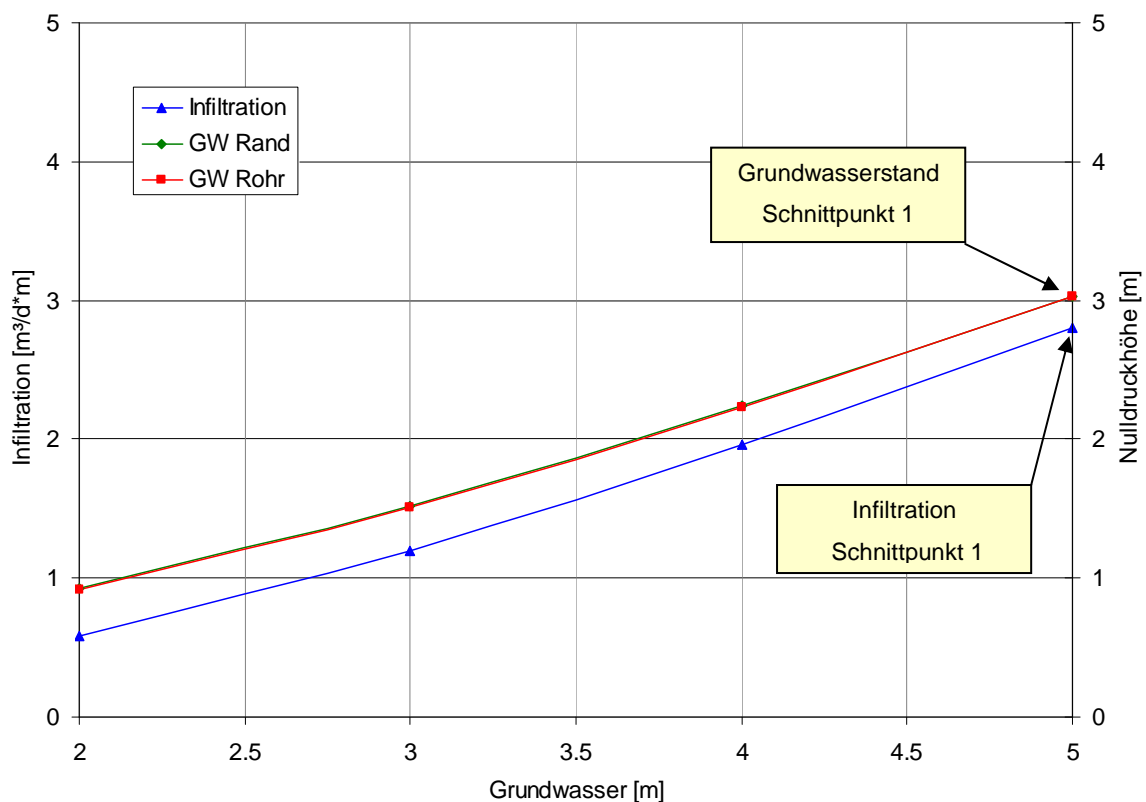


Abb. 7: Veränderung der Infiltration bei unterschiedlichen Grundwasserständen
(k_f -Wert Rohr konstant: $1 \cdot 10^{-6}$ m/s; k_f -Wert Boden konstant: $20 \cdot 10^{-4}$ m/s)

Die Infiltration steht in einem nahezu linearen Zusammenhang mit der Veränderung des Grundwasserstandes und damit mit dem Wasserdruck an der Schadstelle. Das Verhalten ist auf das Fließgesetz von Darcy zurückzuführen, das eine lineare Abhängigkeit zwischen dem k_f -Wert und dem hydraulischen Gefälle beschreibt (s. Formel 2).

$$Q = -k_f \cdot i \cdot A \quad \text{Formel 2}$$

In dieser Formel bedeutet:

Q	=	Durchfluss [m ³ /s]
k_f	=	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
i	=	Potenzialgefälle [-]
A	=	Durchflossene Fläche [m ²]

Allerdings berücksichtigt dieses Gesetz nicht die Absenkung des Grundwassers über der Schadstelle, so dass eine einfache Lösung der Formel nicht möglich ist. Jedoch kann das Fließgesetz von Darcy mit der Gleichung zur Bestimmung des Eintrittswiderstands nach Cavelaars- Vlotman- Spoor kombiniert werden (s. Formel 3).⁵

$$w_e = \frac{h_e}{q} = \frac{h_e}{Q} \cdot A \quad \text{Formel 3}$$

In dieser Formel bedeutet:

w_e	=	Eintrittswiderstand [m]
h_e	=	Grundwassersäule über Rohr [m]
q	=	Dränabflusspende [m/d]

Dadurch ergibt sich eine iterative Lösung, die in einem Beispiel für den Grundwasserstand von 5 m nachgerechnet wurde. Die Ergebnisse sind mit den Berechnungen von FEFLOW deckungsgleich, so dass die Aussage getroffen werden kann, dass das Modell in der Lage ist, komplexere Grundwasserfragestellungen problemlos zu lösen.

⁵ Vgl. Cavelaars, J. C.; Vlotman, W. F.; Spoor, G.: Subsurface Drainage Systems. In: Ritzema, H. P. (ed): Drainage Principles and Applications (ILRI Publication 16), International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen², 1994, S. 827 - 929.

Beispiel:

Infiltration nach Darcy:
$$Q_{Inf,Darcy} = k_f \cdot i \cdot A = k_f \cdot \frac{\Delta h}{d} \cdot A$$

$$Q_{Inf,Darcy} = k_f \cdot \frac{h_a - h_e}{d} \cdot \pi \cdot D$$

$$Q_{Inf,Darcy} = 0,0864 \frac{m}{d} \cdot \frac{4,65m - 0m}{0,1m} \cdot \pi \cdot 0,3m = 3,79 \frac{m^3}{d \cdot m}$$

Eintrittswiderstand:
$$w_e = \frac{h_e}{q} = \frac{h_e}{Q} \cdot A$$

$$w_e = \frac{h_e}{Q} \cdot \pi \cdot D$$

$$w_e = \frac{4,65}{3,79} \cdot \pi \cdot 0,3 = 1,16m$$

Infiltration mit Widerstand:
$$Q_{Inf,Darcy} = 0,0864 \frac{m}{d} \cdot \frac{4,65m - 1,16m}{0,1m} \cdot \pi \cdot 0,3m = 2,83 \frac{m^3}{d \cdot m}$$

Überprüfung Widerstand:
$$w_e = \frac{4,65 - 1,16}{2,83} \cdot \pi \cdot 0,3 = 1,16m$$

Vergleich:
$$Q_{Inf,Darcy} = 2,83 \frac{m^3}{d \cdot m} = Q_{Inf,FEFLOW} = 2,8 \frac{m^3}{d \cdot m}$$

3.2 Einfluss von Fremdkörpern im 2D-Modell

Die geplante Modellabstraktion macht es erforderlich, den Einfluss von Fremdkörpern im umgebenen Boden zu überprüfen. Hierzu wird parallel zu dem Abflussrohr ein undurchlässiges Rohr im Modell eingebaut, das umströmt werden muss (s. Abb. 8). Wenn sich das Rohr nicht oder nur gering auf die Potentiallinien des Grundwasserleiters auswirken, kann eine Modellabstraktion durchgeführt werden. Damit der Einfluss des Fremdkörpers besser untersucht werden kann, wird der Durchmesser des Fremdkörpers variiert.

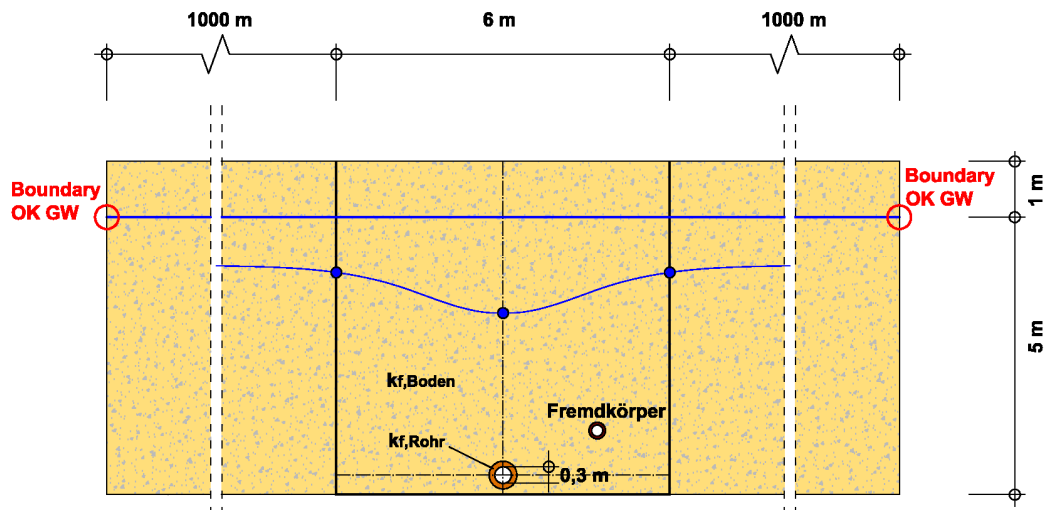


Abb. 8: Aufbau des 2D-Vertikalmodells mit Fremdkörper

Für den Rohrdurchmesser des Fremdkörpers werden Außendurchmesser von 20, 30 und 40 cm verwendet. Die Durchlässigkeit des umgebenen homogenen Bodens beträgt wie bereits in den vorherigen Versuchen $k_f = 20 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ und das Abflussrohr hat eine Drainagewirkung, die über den k_f -Wert des Rohrmantels von $1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ beschrieben wird. Die Umströmung des Fremdkörpers (fiktives Rohr) wird durch die Darcy- Fließgeschwindigkeiten dargestellt. Dabei zeigt sich, dass der Einfluss der Störung nur im unmittelbaren Bereich des Fremdkörpers statt findet (s. Abb. 9).

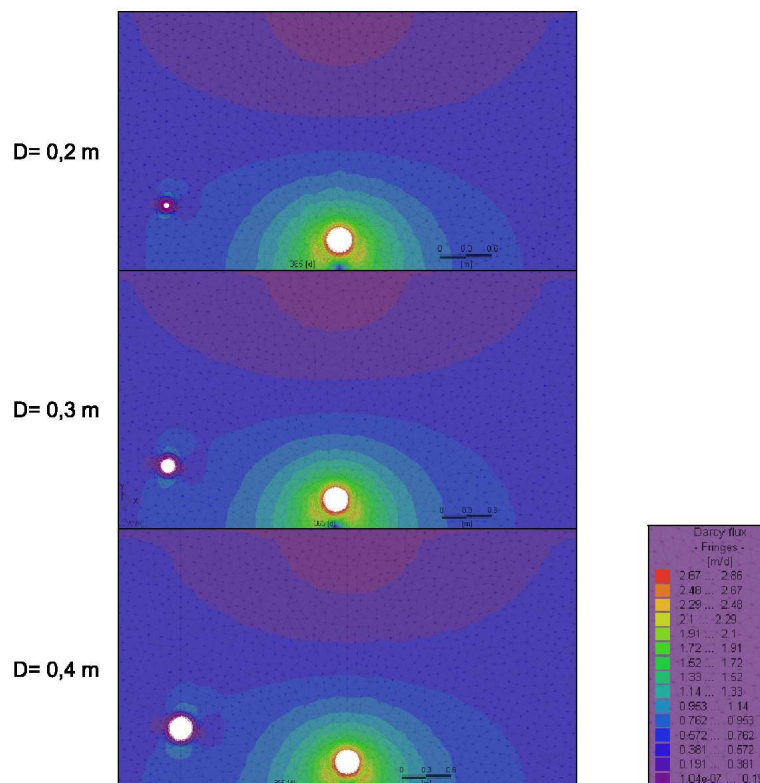


Abb. 9: Fließgeschwindigkeiten im Vertikalmodell bei Umströmung des Fremdkörpers

Der fast nicht vorhandene Einfluss des Fremdkörpers mit unterschiedlichen Durchmessern kann auch mittels der Infiltrationsrate in das Abflussrohr bewiesen werden. Alle Infiltrationsraten sind konstant, so dass der Rohrdurchmesser keinen erkennbaren Einfluss auf die Infiltration hat (s. Abb. 10).

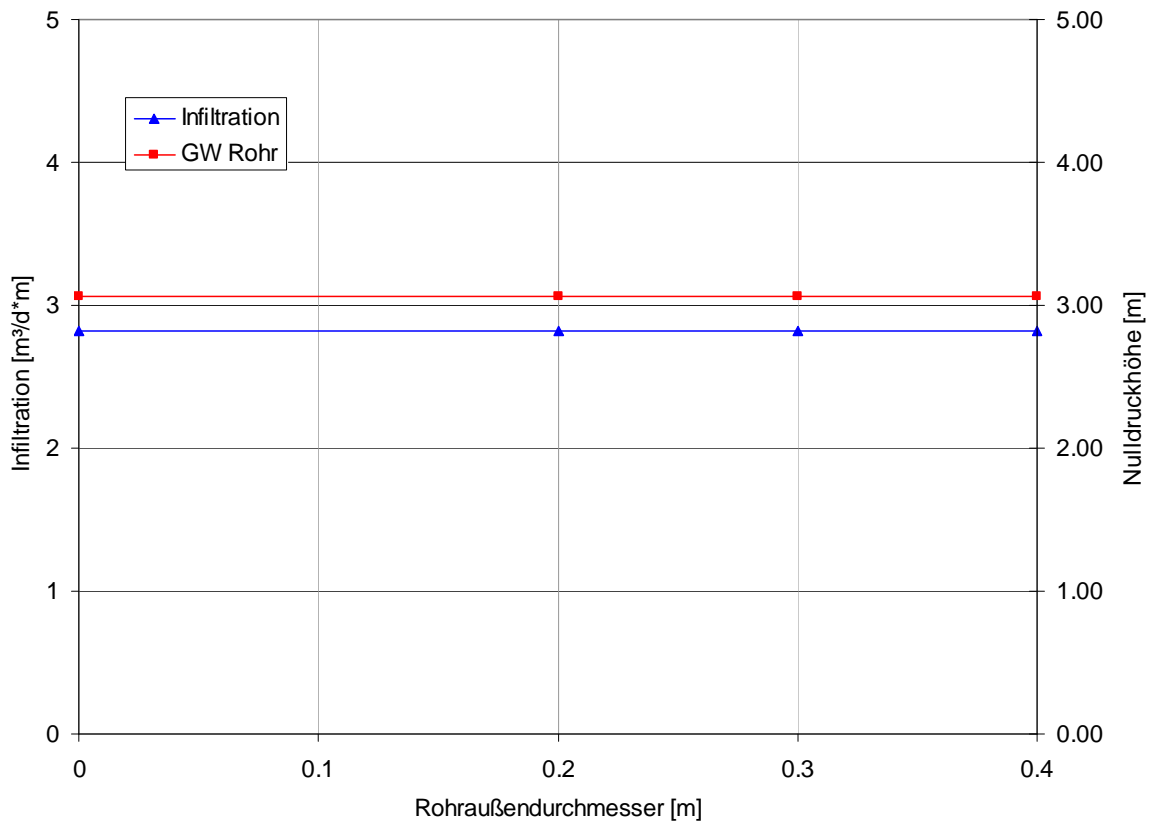


Abb. 10: Veränderung der Infiltration bei unterschiedlichen Durchmessern eines Fremdkörpers

Mit Hilfe dieses Versuchs konnte der Nachweis geführt werden, dass das abstrahierte Modell nahezu dieselben Grundwasserströmungen im Boden wie im reellen Modell abbildet. Folglich kann das abstrakte Modell für die weiteren Modellierungsszenarien verwendet werden.

3.3 Parameterverhalten im 3D-Modell

Während im vorherigen Abschnitt das Verhalten von Grundwasserströmungen im 2-dimensionalen Vertikalmodell untersucht wurde, soll nun eine Schadstelle 3-dimensional modelliert werden. Im 2D-Modell wurden Schäden stets als Linienschäden pro laufenden Meter berechnet. Dies ist in der Praxis jedoch seltener anzutreffen als punktuelle Schadstellen. Häufig kommt es zu einzelnen Schäden an Muffen, Rohranschlüssen oder, beispielsweise durch Wurzel einwuchs, zu einem punktuellen Bruch. Durch die lokal begrenzten Schäden fallen die Infiltrationsraten wesentlich geringer aus, da nicht mehr das gesamte Rohr als Drainage wirkt. Das grundsätzliche geohydraulische Verhalten (vgl. Kap. 3.1) ist direkt auf das 3D-Modell übertragbar, so dass dies keiner erneuten Untersuchung bedarf. Allerdings ändert sich im 3D-Modell der Einfluss der außen liegenden Randbedingung, da wesentlich geringere Infiltrationsraten auftreten, wodurch sich die Grundwasserabsenkung verringern wird. Darüber hinaus entsteht über der Schadstelle ein 3-dimensionaler Absenktrichter, der durch die Infiltrationsrate, die Bodenart und die Randbedingung beeinflusst wird.

Mit diesem Modell soll untersucht werden, wie sich der Abstand der Randbedingung auf einen punktuellen Schaden mit unterschiedlicher Größe auswirkt. Der Aufbau des Modells erfolgt nach den bereits festgelegten geometrischen Abmessungen des Versuchstandes, der von einem homogenen Bodenpaket umgeben ist (s. Abb. 2). Das umgebene Bodenpaket wird in verschiedenen Breiten (1000 m, 100 m, 0 m) ausgeführt, so dass die Randbedingung entsprechend näher oder weiter vom Versuchstand entfernt ist. Im Modellbereich des Versuchstandes wird ein Rohr eingesetzt, das ein rechteckiges Profil hat. Dadurch kann im Rohrscheitel die Schadstelle einfacher modelliert werden (s. Abb. 11).

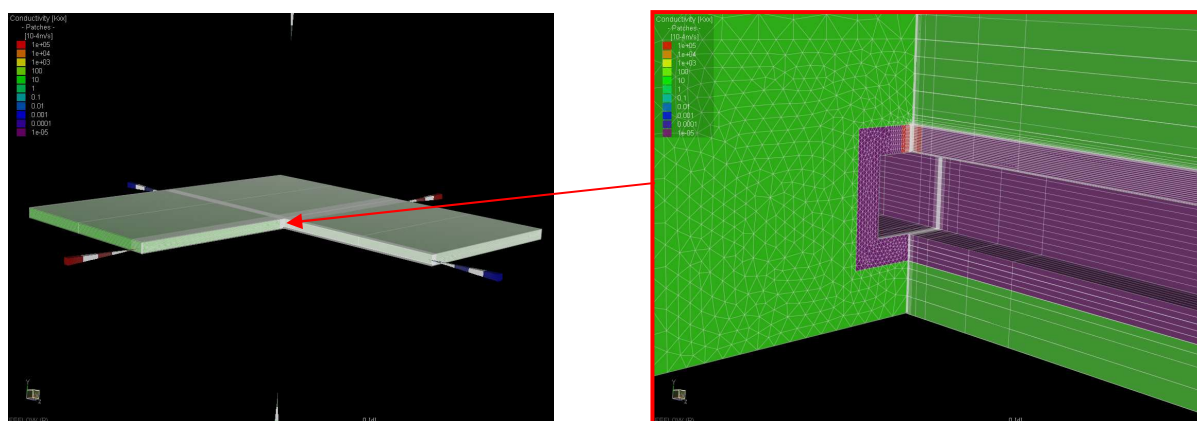


Abb. 11: Schnitt des FEFLOW 3D-Modells, Detailsicht der Störstelle im Rohr (rechts)

Die Schadstelle in der Rohrleitung wird in der Mitte des Versuchstandes als rechteckige Öffnung mit einer extrem hohen Durchlässigkeit von $k_f = 10 \text{ m/s}$ erstellt. Dies entspricht einem Leakage-Faktor von 1 1/s . Die Öffnung wird in dem Modell von 1 mm^2 ($1 \times 1 \text{ mm}$) bis zu 40000

mm² (100 x 400 mm) variiert. Der umgebende Boden wird als homogen, mit einem kf-Wert von $20 \cdot 10^{-4}$ m/s angenommen. Der undurchlässigen Schicht des Rohrmantels wird ein sehr geringer kf-Wert von $1 \cdot 10^{-9}$ m/s zugewiesen, so dass eine Infiltration nur über die Schadstelle möglich ist. Die folgenden Infiltrationsraten beziehen sich nur auf die eine Schadstelle und damit auf das gesamte Modell.

In dieser Versuchsreihe werden 3 Modelle mit unterschiedlich weit entfernten Randbedingungen aufgebaut, von denen jedes Modell mit 8 unterschiedlich großen Öffnungen versehen wird. Dadurch ergeben sich 24 unterschiedliche Modelle, an denen die Infiltrationsraten und die Wasserstände oberhalb der Schadstelle ermittelt werden können. Es zeigt sich, dass besonders bei Modellen mit großer Infiltration und weit entfernter Randbedingung sich der Absenktrichter gut einstellen kann. Dagegen ist bei dem Modell, in dem die Randbedingung direkt an den Versuchstand gesetzt wurde, nahezu kein Absenktrichter zu erkennen (s. Abb. 12).

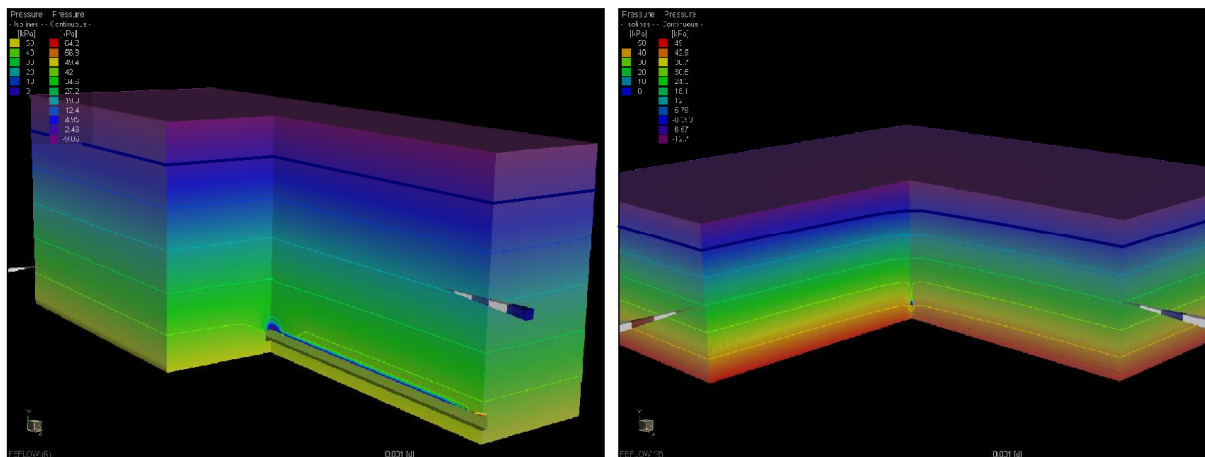


Abb. 12: Vergleich der Absenktrichter bei unterschiedlichen Randbedingungen (Bild links: 0 m; Bild rechts 100 m & 10-fach überhöht)

Der Einfluss des umgebenen Bodenpakets macht sich als regulierendes Medium bemerkbar, da es mitunter nur ein begrenztes Wasservolumen zur Infiltration zur Verfügung stellt. Ist der umgebene Boden zu dünn oder nicht vorhanden, wird das Wasser direkt aus der Randbedingung zur Infiltrationsstelle geleitet.

Beide Fälle können in der Praxis auftreten, so dass bei der Grundwassermodellierung stets die örtlichen Verhältnisse berücksichtigt werden müssen. Liegt die Schadstelle in einem Gebiet, in dem keine Grundwasserneubildung stattfinden kann (z. B. voll versiegelter Parkplatz), ist die Randbedingung „großes Bodenpaket“ anzunehmen (s. Abb. 13). Ist dagegen die Schadstelle des Rohrs beispielsweise direkt unterhalb oder neben einem Flussbett, kann folglich Wasser in unbegrenzter Menge zur Schadstelle strömen, so dass das Modell mit der Randbedingung ohne Bodenpaket die plausibleren Ergebnisse liefert. In der Regel wird man in der Praxis mit variablen Randbedingungen (bzw. Grundwasserneubildungsraten) rechnen müssen.

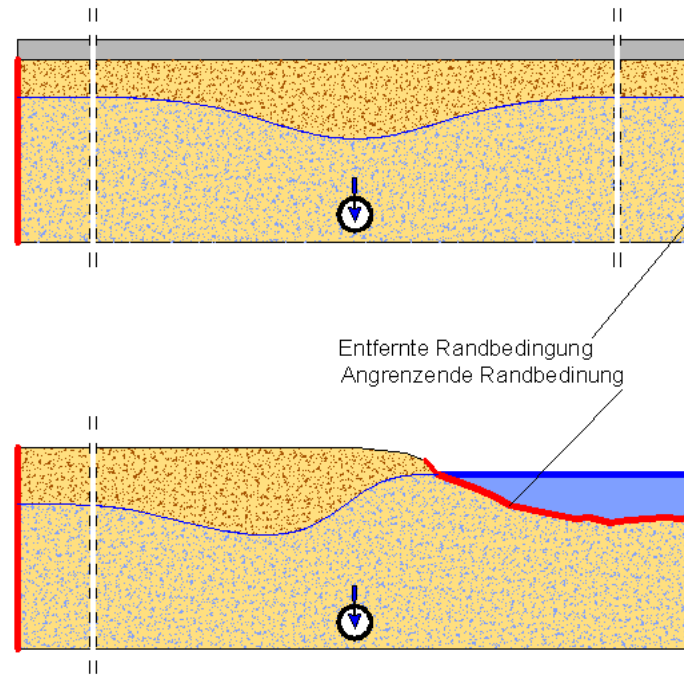


Abb. 13: Natürliches Auftreten der unterschiedlichen Randbedingungen

Der Einfluss des umgebenen Geländes darf für Fragestellungen der Infiltration nicht vernachlässigt werden. Besonders dann nicht, wenn Absenkungen im Grundwasserspiegel untersucht werden sollen. Auch wenn sich die Infiltrationsraten nicht deutlich voneinander unterscheiden, so gibt es eine deutliche Auswirkung in der Absenkung des Grundwassers (s. Abb. 14).

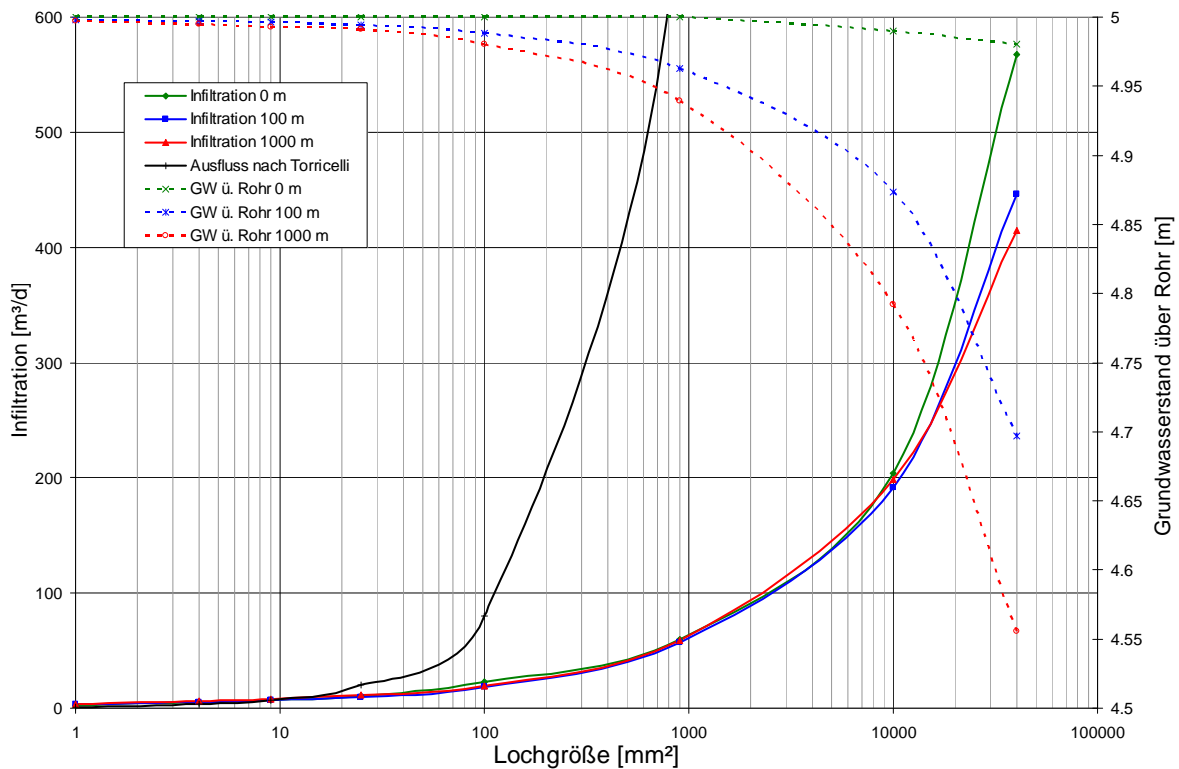


Abb. 14: Infiltrationsraten und Grundwasserabsenkung bei unterschiedlichen Randbedingungen

Werden die Ergebnisse mit dem Berechnungsansatz nach Torricelli verglichen, zeigt sich, dass dieser nicht für die Grundwassermodellierung angesetzt werden kann. Torricelli setzt ein mit Wasser gefülltes Becken voraus, aus dem dieses durch eine definierte Öffnung heraus läuft (s. Formel 4).⁶

$$Q = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2g \cdot h} \quad \text{Formel 4}$$

In dieser Formel bedeutet:

Q	=	Durchfluss [m ³ /s]
μ	=	Abflussbeiwert [-] hier 0,6
h	=	Wassertiefe [m]
A	=	Durchflossene Fläche [m ²]

Durch den Vergleich zeigt sich, dass der Einfluss des Bodens sehr groß ist, so dass die Grundwasserströmung (Darcy) im Vergleich zu einer reinen Wasserströmung (Torricelli) stark abgebremst wird. Dies spiegelt sich auch in den Fließgeschwindigkeiten im Boden wieder, die nur lokal um die Störstelle ansteigen (s. Abb. 15) und wesentlich langsamer sind als bei einem freien Ausfluss.

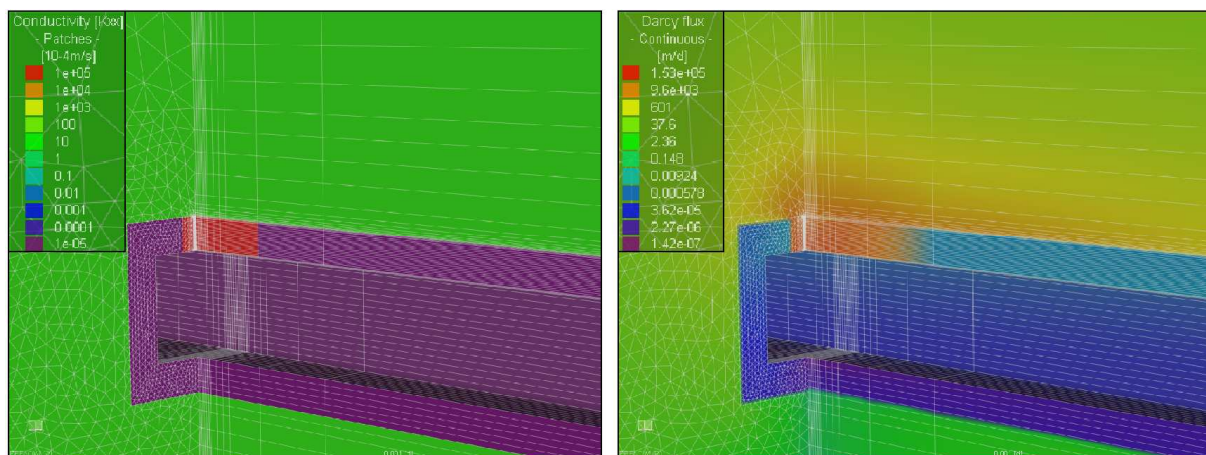


Abb. 15: Anstieg der Fließgeschwindigkeiten im Bereich der Störstelle

⁶ Vgl. Torricelli, Evangelista: 1608- 1647. In: Heinemann, Ekkehard; Feldhaus, Rainer: Hydraulik für Bauingenieure, Wiesbaden², 2003, S. 54.

4 Modellechnische Kontrolle des Innendruckprüfverfahrens

Die Dichtheitsabnahme von Abwasserrohrleitungen erfolgt nach dem Verfahren der Innendruckprüfung nach dem Arbeitsblatt ATV-DVWK A 139. Dabei wird mit Wasser in der Rohrleitung ein konstanter Überdruck von 50 kPa (4,9 m Wassersäule) aufgebaut. Das durch Exfiltration verlorengegangene Wasser darf in einem Zeitraum von 30 min nicht mehr als 0,15 l/ m² betragen.⁷ Bei einem Rohr mit einem Innendurchmesser von 30 cm würde sich dadurch ein kontinuierlicher Exfiltrationsausfluss von 6,78 l/d*m ergeben.

Bei dem Prüfverfahren wird oftmals die Wasserströmung aus dem Rohr in den Bodenkörper (Exfiltration) gleich einer Strömung aus dem Boden in das Rohr (Infiltration) gesetzt. Hier stellt sich die Frage, ob sich unter gleichen Bedingungen die Exfiltrationsraten ähnlich den Infiltrationsraten verhalten. Die Grundwasserstände werden in dem Prüfverfahren nicht mit berücksichtigt, obwohl diese den Wasserdruck beim Exfiltrieren und Infiltrieren erheblich beeinflussen (s. Abb. 16). Wird beispielsweise eine Innendruckprüfung an einem Rohr bei einem Grundwasserstand von 3 m über Rohrscheitel durchgeführt, steht dem exfiltrierenden Wasser nur noch ein Überdruck von 1,90 m zur Verfügung. Dagegen hätte das infiltrierende Wasser bei Atmosphärendruck im Rohr das Druckpotential des gesamten Grundwasserstandes (3 m) zur Verfügung. Dementsprechend wird bei diesen Rahmenbedingungen mehr Wasser infiltrieren als exfiltrieren.

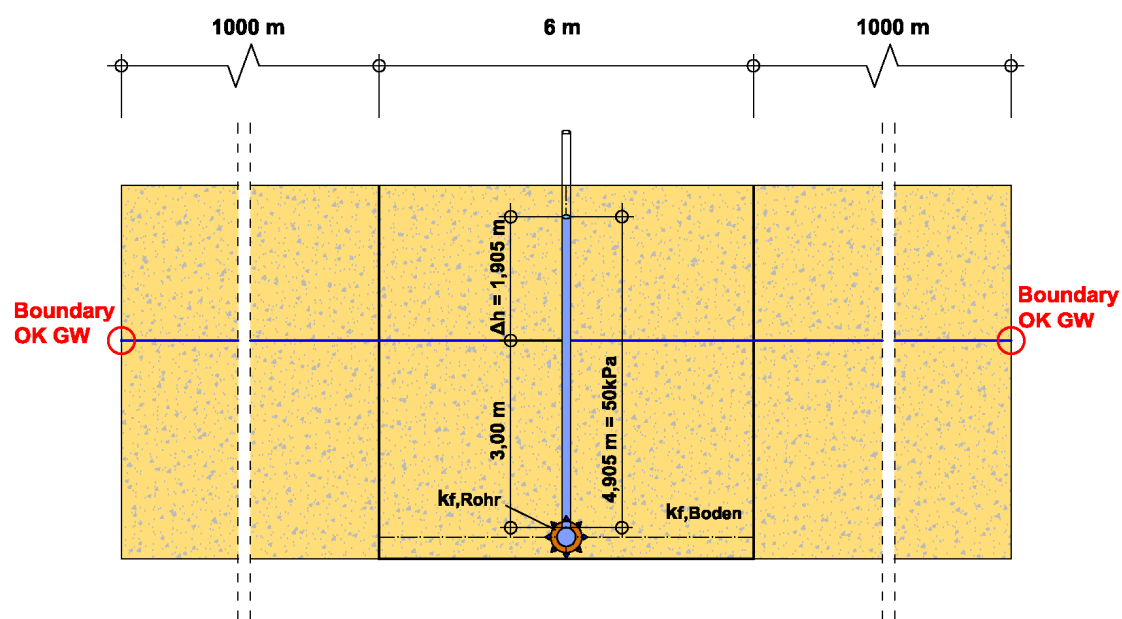


Abb. 16: Druckpotential bei der Innendruckprüfung mit Grundwasser

⁷ Vgl. ATV – DVWK – A139, Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen, 2001.

Auf Grund dieses Zusammenhangs soll das Innendruckprüfverfahren an einem 2D-Modell getestet werden. Unter Prüfbedingung wird im Modell die maximal zulässige Exfiltrationsrate bei unterschiedlichen Grundwasserständen eingestellt. Dies geschieht durch Anpassung des Leakage-Faktors des Rohrmantels. Anschließend wird überprüft, wieviel Wasser bei der definierten Undichtigkeit und bei wechselnden Grundwasserständen infiltrieren kann.

4.1 Anpassung des Modells auf die maximale Exfiltrationsrate

Die Überprüfung des Innendruckprüfverfahrens erfolgt an dem bereits verwendeten 2D-Vertikalmodell (vgl. Kap. 3.1 & 3.2), welches an die Prüfbedingungen angepasst wird. Im Rohr wird über die Randbedingung ein Wasserdruck von 50 kPa eingestellt. Dies entspricht einer Wassersäule von 4,90 m. Die Exfiltration aus dem Rohr wird mit Hilfe des k_f -Werts des Rohres auf die maximale zulässige Exfiltrationsmenge kalibriert. Damit bei einem Rohr mit 30 cm Innendurchmesser 6,78 l/d*m exfiltrieren, muss der 10 cm dicke Rohrmantel einen k_f -Wert von $1,5 \cdot 10^{-9}$ m/s aufweisen. Dies entspricht einem Leakage-Faktor von $1,5 \cdot 10^{-8}$ 1/s. Diese Bedingung ist allerdings nur gültig, wenn von außen kein Gegendruck vorhanden ist, also der Grundwasserstand unterhalb des Rohres liegt. Damit der Einfluss des Grundwasserstandes auf die Innendruckprüfung besser abgeschätzt werden kann, werden die Leakage-Faktoren bei unterschiedlichen Grundwasserständen ermittelt (s. Abb. 17).

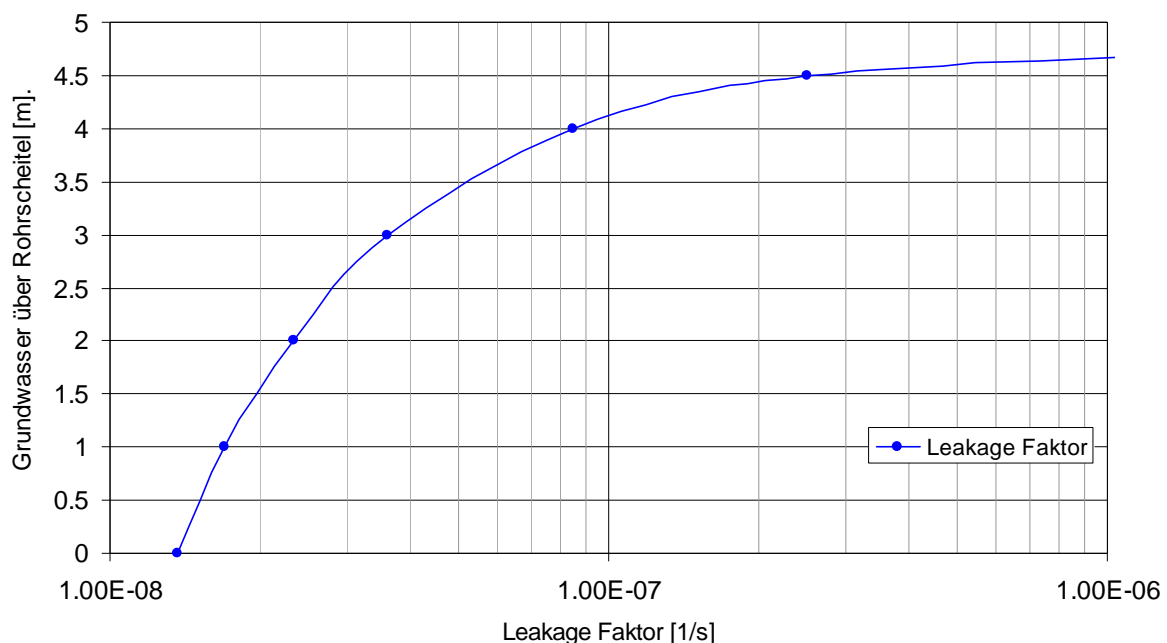


Abb. 17: Änderung des Leakage-Faktors für die Innendruckprüfung bei unterschiedlichen Grundwasserständen

Der Leakage-Faktor schwankt je nach Grundwasserstand für die maximal zulässige Exfiltrationsrate von $1,4 \cdot 10^{-8}$ 1/s (Grundwasser 0 m über Rohrscheitel) bis $8,5 \cdot 10^{-8}$ 1/s (Grundwasser 4 m über Rohrscheitel). Die Abhängigkeit zeigt, dass bei höheren Grundwasserständen ein größerer Leakage-Faktor (höhere Durchlässigkeit) möglich ist. Bei fallenden Grundwasserständen würde dann die zulässige Infiltration überschritten werden.

4.2 Infiltration nach Innendruckprüfung

Die im vorherigen Exfiltrationsmodell ermittelten Leakage-Faktoren werden jetzt für die Infiltrationsmodelle verwendet. Dabei wird für jedes Modell mit seinem individuellen Leakage-Faktor die Infiltrationsrate bei wechselnden Grundwasserständen ermittelt (s. Abb. 18). Dadurch ergeben sich fünf unterschiedliche Modelle mit jeweils konstantem Leakage-Faktor, an denen fünfmal der Grundwasserstand variiert wurde.

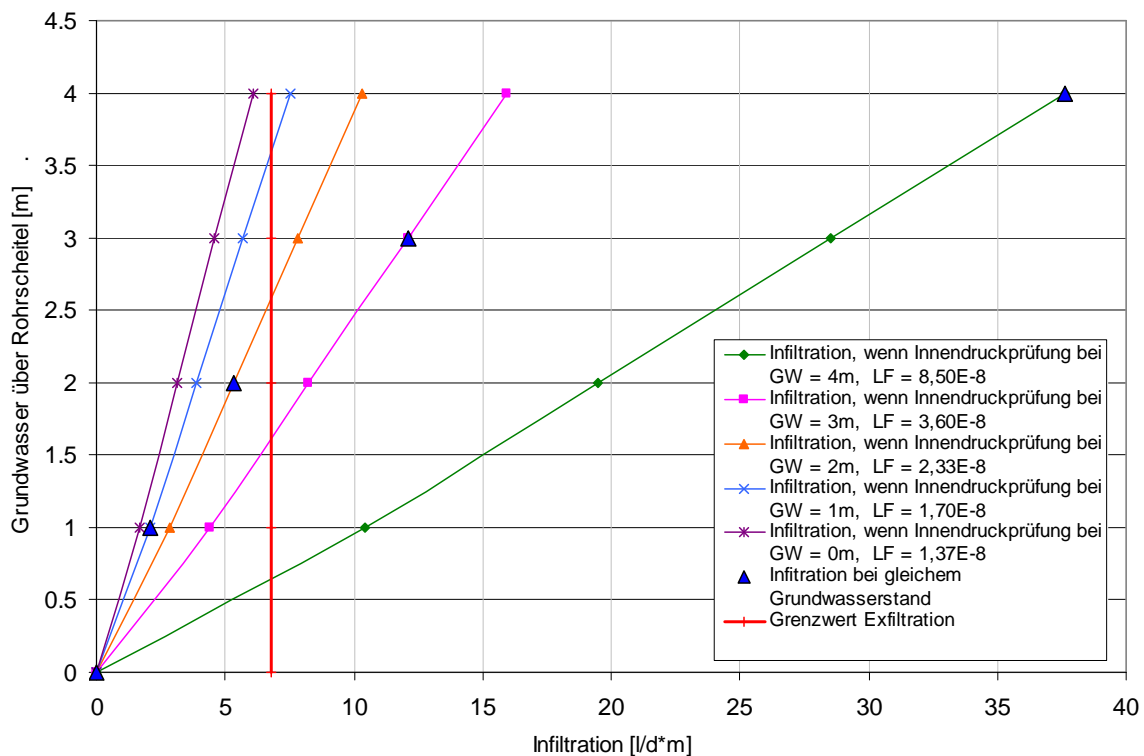


Abb. 18: Vergleich zwischen Infiltration und Exfiltration

Wenn der Grundwasserstand bei der Innendruckprüfung und dem Normalbetrieb (nach der Prüfung) konstant bleibt (blaue Dreiecke in Abb. 18), zeigt sich das die Infiltration deutlich größer als die Exfiltration sein kann. Dies ist besonders dann der Fall, wenn die Innendruckprüfung bei hohen Grundwasserständen durchgeführt wurde. Ist beispielsweise die Innendruckprüfung bei einem Grundwasserstand von 3 m durchgeführt (magenta) worden, so reicht bereits ein Grundwasserstand von ca. 1,6 m aus, um dieselben Infiltrationsraten wie die maximal zulässige

Exfiltrationsrate (rote senkrechte Linie) zu erzeugen. Die maximalen Exfiltrationsraten der Innendruckprüfung dürfen daher nicht mit den Infiltrationsraten gleich gesetzt werden, da sich zwischen Exfiltration und Infiltration unterschiedliche Druckpotentiale einstellen können. Bei der Innendruckprüfung sollte darauf geachtet werden, dass der Grundwasserstand nicht wesentlich über dem zu prüfenden Rohr steht.

Selbst wenn die Druckpotentiale bei Exfiltration und Infiltration gleichgesetzt werden, können aufgrund unterschiedlicher Strömungsvorgänge die Raten voneinander abweichen (s. Abb. 19).

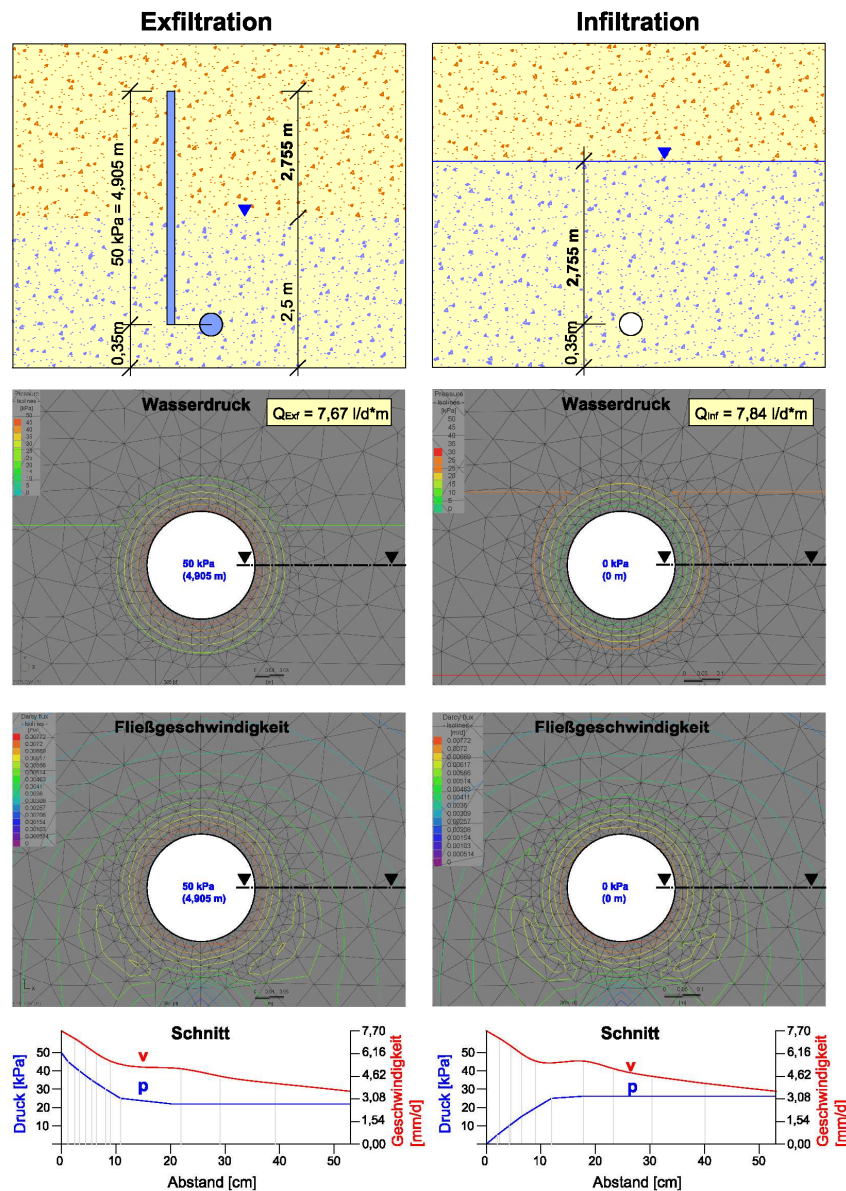


Abb. 19: Vergleich der Wasserdrücke (oben) und der Fließgeschwindigkeiten (unten) bei Exfiltration und Infiltration mit gleichem Druckpotential

Es sollte zusätzlich mit einem physikalischen Modellaufbau überprüft werden, ob der Boden bei Ex- bzw. Infiltration eine Anisotropie aufweist.

5 Aufbau von 3D-Modellen

In diesem Abschnitt sollen komplexere 3D-Modelle aufgebaut werden, die die späteren Einbauten im Versuchsstand von IKT möglichst gut abbilden. Hierfür wird zum einen ein Modell mit einem Abflussrohr, in das ein Anschlussrohr mündet, aufgesetzt. In den Rohren werden zudem unterschiedliche Schadstellen (Muffenschaden, Linienschaden im Rohrscheitel und punktueller Schaden) eingebaut. Zum anderen wird ein Modell erstellt, in dem Schächte mit unterschiedlichen Schadstellen und Rohranschlüssen simuliert werden.

5.1 Modellierung von Rohranschlüssen und unterschiedlichen Schadstellen

Mit diesem Modell wird die Berechnung von Rohranschlüssen und unterschiedlichen Schadstellen in einem Modell getestet. Es werden ein Rohranschluss mit einem punktuellen Schaden, ein Muffenschaden im Hauptrohr und ein Längsriss im Scheitel des Hauptrohrs erzeugt. Die Infiltrationen können anschließend über den Leakage-Faktor der Schadstellen eingestellt werden. Alle Schäden werden in einem Modellaufbau simuliert, um später mögliche Interaktionen zwischen den einzelnen Schäden erkennen zu können.

5.1.1 Rohranschluss

Rohranschlüsse, die sich in zwei Achsen treffen, sind äußerst schwierig im Modell abzubilden. Es werden daher zwei unterschiedliche Verfahren getestet. In einem ersten Modell soll das Anschlussrohr in seiner exakten Lage allein über die Permeabilität des Bodens modelliert werden. In einem zweiten Modell wird die bereits beschriebene Modellabstraktion (Abb. 3) verwendet. Beide Modellierungsverfahren werden anschließend verglichen und diskutiert.

Verfahren der kf-Wert Zuweisung

Bei diesem Modell müssen bereits in der Triangulationsebene (Finite Elementgitter) alle Einbauten eingebettet werden, wodurch die Anzahl der finiten Elemente insgesamt stark erhöht wird. Dies hat wiederum zu Folge, dass die Rechenzeit stark ansteigt. Das Modell wird anschließend mit Hilfe der Extrusionsschichten (Scheiben) in den 3-dimensionalen Raum erweitert. Die Schichten haben stets dieselbe Triangulation, so dass zwischen diesen finite Körper in Form von Prismen entstehen. Jedem einzelnen finiten Körper kann ein kf-Wert zugewiesen werden. Allerdings können keine einzelnen finiten Elemente gelöscht werden, um einen Hohlraum zu erzeugen. Der eigentliche Hohlraum wird deshalb durch eine extrem hohe Durchlässigkeit definiert (s. Abb. 20). Das infiltrierte Wasser muss allerdings aus dem Anschlussrohr (extrem durchlässiger Boden) abgeführt werden, so dass das Rohr an einer Modellgrenze enden muss. In diesem Fall

ist es das Abflussrohr. Die Scheiben des Modells werden in dem Bereich des Anschlusses stark verdichtet, um das Rohr möglichst präzise abbilden zu können.

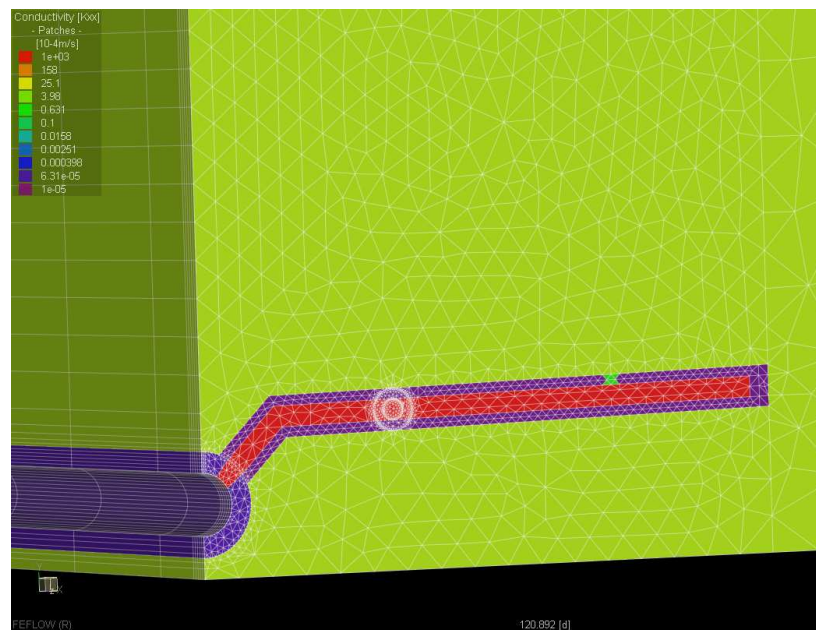


Abb. 20: Zuweisung der Durchlässigkeiten im Anschlussbereich

Problematisch ist jedoch, dass sich in dem Anschlussrohr nicht die gleichen Fließverhältnisse einstellen, wie in einem offenen Abflussrohr. Dadurch kann es bei einer hohen Infiltration zu einem Rückstau kommen, wodurch die Infiltration verringert wird. Dies lässt sich beispielsweise an dem Rohrbereich oberhalb des Schadens erkennen. Dadurch, dass das Rohr an diesem Ende geschlossen ist, staut sich Wasser auf, wodurch ein Druck entsteht, der sich bis auf die Schadstelle auswirkt (s. Abb. 21).

Bei dem Modellaufbau mit Durchlässigkeiten muss daher darauf geachtet werden, dass alle Rohrbereiche an einer Modellgrenze enden, damit sie ordnungsgemäß entwässern können. Dies ist im Modell jedoch nicht immer umzusetzen, so dass dieses Verfahren nur begrenzt eingesetzt werden sollte. Ein Vorteil ist, dass die Rohrverläufe jedoch grafisch richtig dargestellt und die Bilanz der Schadstelle auch am Hauptrohr durchgeführt werden kann.

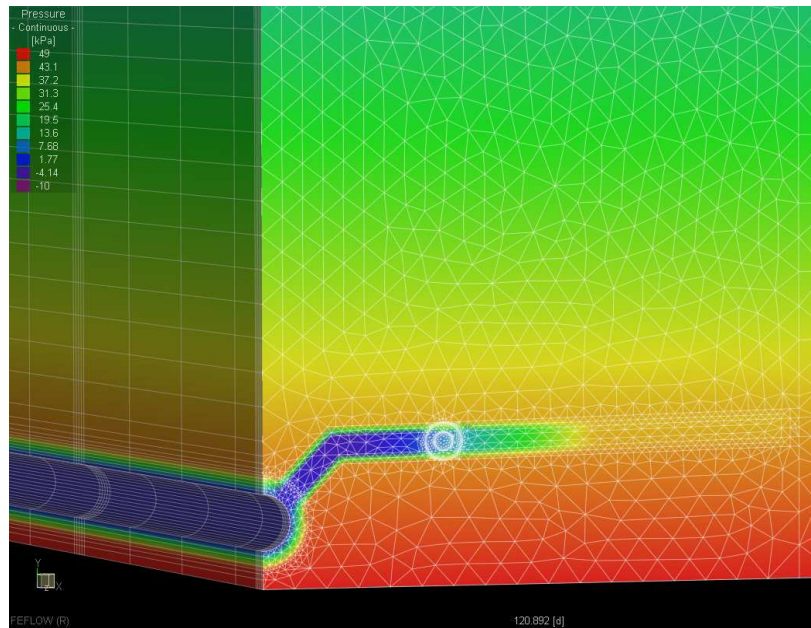


Abb. 21: Wasserdruck im Anschlussrohr

Abstrahierung

Die bereits untersuchte Möglichkeit der Abstrahierung sieht es vor, ein fiktives Rohr in derselben Richtung zum Hauptrohr zu legen und dadurch an der Schadstelle das Wasser direkt aus dem Modell zu nehmen. Der Vorteil bei diesem Verfahren liegt im einfachen und schnellen Modellaufbau. Jedoch ist der Nachteil dieses Verfahrens, dass das eigentliche Rohrsystem nicht mehr als solches zu erkennen ist. Mit Hilfe der Abstraktion kann allerdings das Wasser im Boden besser abgebildet werden, da das infiltrierte Wasser direkt an der Schadstelle aus dem System genommen wird (s. Abb. 22). Es wird daher nicht die Infiltration an der Schadstelle beeinflusst, wie es beim Verfahren der kf-Wert Zuweisung vorgekommen ist.

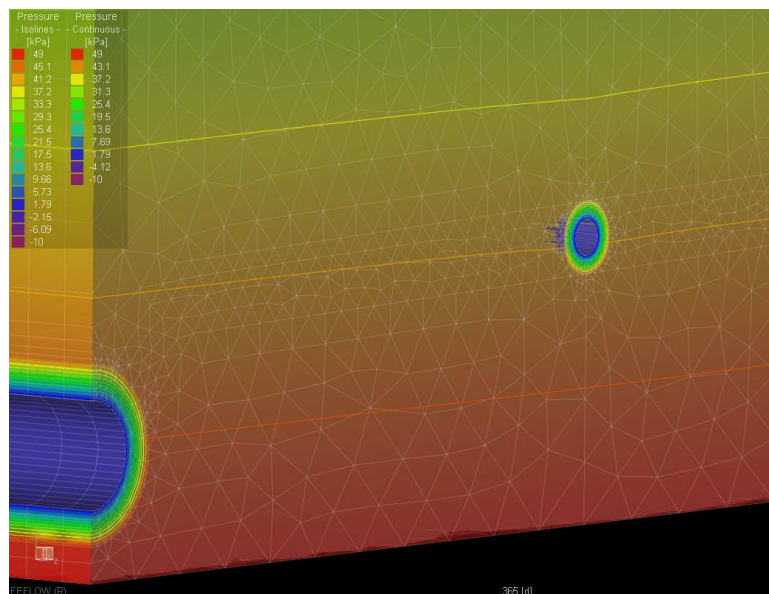


Abb. 22: Wasserdruck im Bereich des Rohanschluss im abstrakten Modell

Der Vergleich beider Modelle zeigt, dass mit dem abstrahierten Modell bessere und schnellere Ergebnisse simuliert werden können, so dass dieses für komplexere Fragestellungen vorzuziehen ist. Hingegen kann das Verfahren der kf-Wert Zuweisung verwendet werden, wenn eine Wechselwirkung zwischen Schadstelle und ableitendem Rohr ausgeschlossen werden kann.

5.1.2 Muffenschaden

Durch undichte Muffen können große Mengen Grundwasser in die Rohrleitungen infiltrieren. Dies gilt besonders dann, wenn beispielsweise vergessen wurde, Dichtungen einzubauen. Die Infiltration erfolgt hierbei über den gesamten Rohrquerschnitt im Bereich des Muffenübergangs. Im Modell wird diese Art der Infiltration über eine 10 cm dicke Scheibe abgebildet, in der der kf-Wert des Rohrs entsprechend herabgesetzt wird.

Die Darstellung der Fließgeschwindigkeiten im Boden verdeutlicht, dass das Wasser lokal durch die defekte Muffe fließt. Dadurch stellt sich eine leichte Strömung zum Rohr ein (s. Abb. 23).

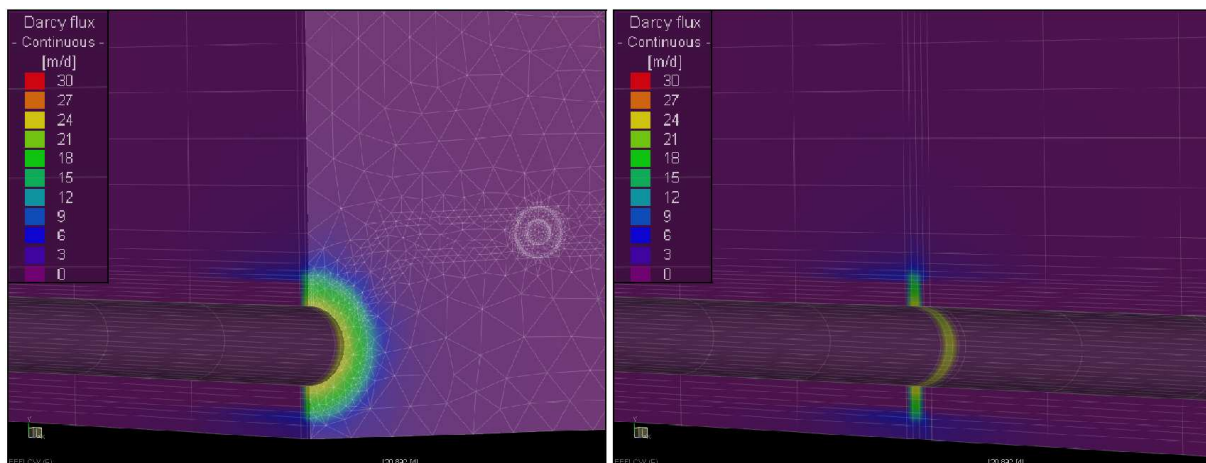


Abb. 23: Fließgeschwindigkeiten an einem Muffenschaden
(links: Schnitt durch die Muffe; rechts: Schnitt durch das Abflussrohr mit der Muffe)

Die Bilanzierung erfolgt direkt im Hauptrohr, in dem sich an jedem Knoten der finiten Elemente in der Schadstelle einzelne Infiltrationsraten einstellen (s. Abb. 24). Diese können summiert werden und ergeben folglich die Gesamtinfiltration an der Schadstelle. Durch die Veränderung des kf-Werts (Leakage-Faktors) an der durchlässigen Muffe kann das Modell an gemessene Zustände angepasst werden. Allerdings sind hierfür ausreichende Versuche notwendig, in denen bei unterschiedlichen Böden und Grundwasserständen sowie verschiedenen Schadensbildern an der Muffe die Infiltration ermittelt werden muss. Außerdem sind Informationen zur Absenkung des Grundwassers und der damit verbundenen Randbedingungen notwendig.

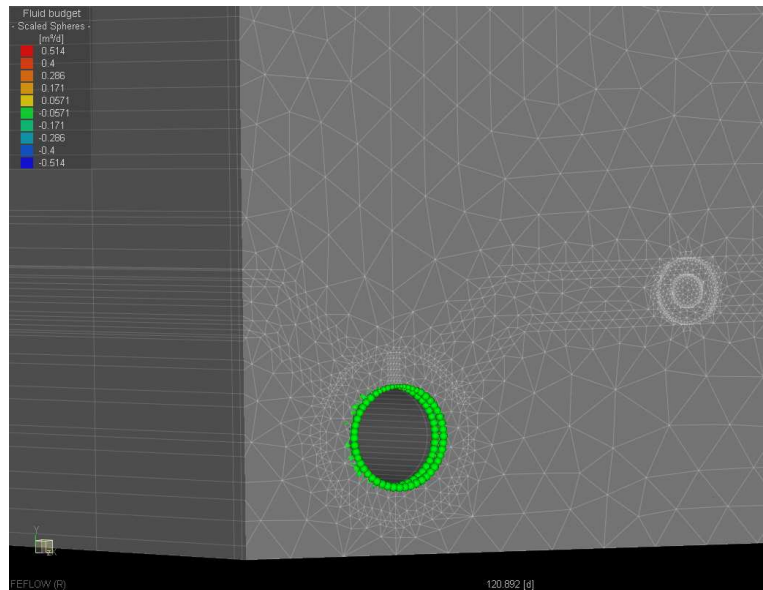


Abb. 24: Infiltrationsraten an den Knotenpunkten im Bereich des Muffenschadens

5.1.3 Riss im Rohrscheitel

Durch den Erddruck und besonders durch dynamische Lasten wie sie beispielsweise durch Verkehrswege entstehen, kann es zu einer Druckbelastung des Abflussrohres kommen, welches in der Folge reißt. Typisch sind Längsrisse im Rohrscheitel, über die das Grundwasser einsickern kann. Dieses Schadensbild wird ebenfalls im Modell abgebildet, in dem ein 20 mm breiter Bereich des Rohrmantels mit einer hohen Durchlässigkeit versehen wird. Die Länge des Risses kann beliebig über die Anordnung der Scheiben variiert werden. Im Modell wurde hier exemplarisch eine Risslänge von 60 cm erzeugt (s. Abb. 25).

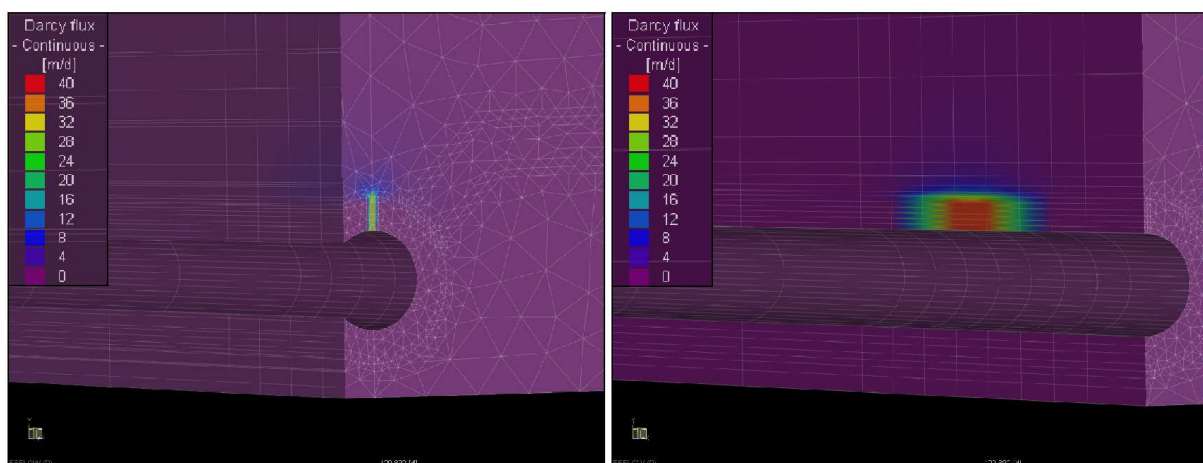


Abb. 25: Fließgeschwindigkeiten im Bereich eines Scheitelrisses

(links: Querschnitt durch das Abflussrohr; rechts: Längsschnitt durch das Abflussrohr mit Schaden)

Wie bereits beim Muffenschaden, stellt sich an jedem Punkt der finiten Elemente eine Infiltrationsrate ein, dessen Summe die Gesamtinfiltration beschreibt (s. Abb. 26). Auch hier kann durch die Variierung des Leakage- Faktors der Schadstelle die Gesamtinfiltration auf im Versuch bestimmte Infiltrationsraten eingestellt werden. Allerdings sind auch hier Versuchsreihen erforderlich.

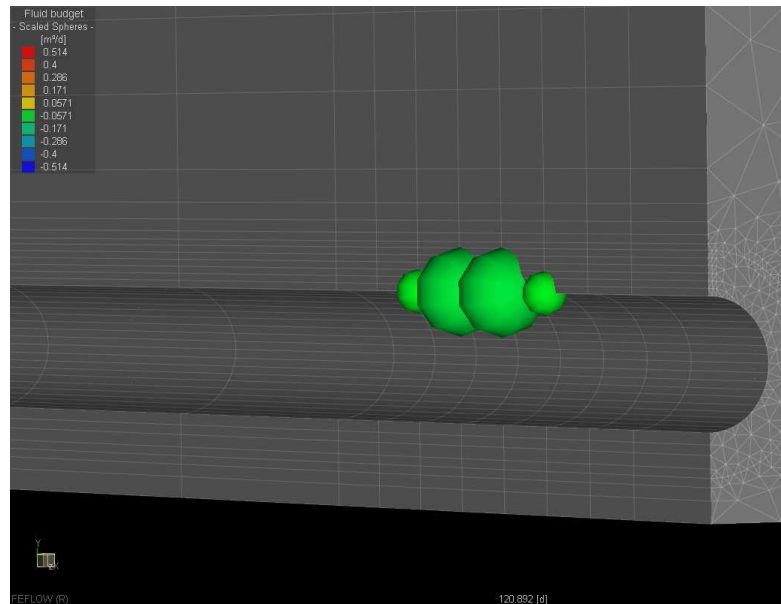


Abb. 26: Infiltrationsraten an den Knotenpunkten im Bereich des Scheitlisses

5.2 Modellierung von Schächten

In den vorherigen Kapiteln wurden horizontal verlaufende Rohrleitungen mit dem Modell abgebildet. Die Infiltration in vertikale Schächte kann ebenfalls mit FEFLOW modelliert werden. Als geometrische Randbedingung wird wieder der Versuchsstand von IKT mit einer Grundfläche von 15 x 6 m verwendet. In dem Modell werden zwei Schächte eingesetzt, die einen Abstand von 10 m haben. Die Schächte sind im unteren Bereich durch ein horizontal verlaufendes Rohr verbunden, so dass auch in diesem Modell Einbauten in zwei Richtungen bestehen. Ähnlich wie im vorherigen Versuchsaufbau kann dieses Modell einfach abstrahiert werden, um den Aufwand des Modellaufbaus und die Rechenzeiten gering zu halten. Die Modellierungsebene mit den hohen Freiheitsgraden ist diesmal jedoch nicht vertikal, sondern horizontal (s. Abb. 26).

Im Folgenden wird exemplarisch ein abstrahiertes Modell aufgebaut, das eine punktuelle Störung im Abflussrohr und einen durchlässigen Schachtring besitzt. Der Grundwasserstand wird als konstante Startbedingung mit 5 m von der Modellunterkante angenommen. An dem Modell wird eine Randbedingung (konstanter Grundwasserstand = 5 m) angenommen, die einen Abstand von 1000 m zum Versuchsstand hat. Wie bereits in den vorherigen Modellen wird der umgebene Boden mit einem k_f -Wert von $20 \cdot 10^{-4}$ m/s als homogen betrachtet.

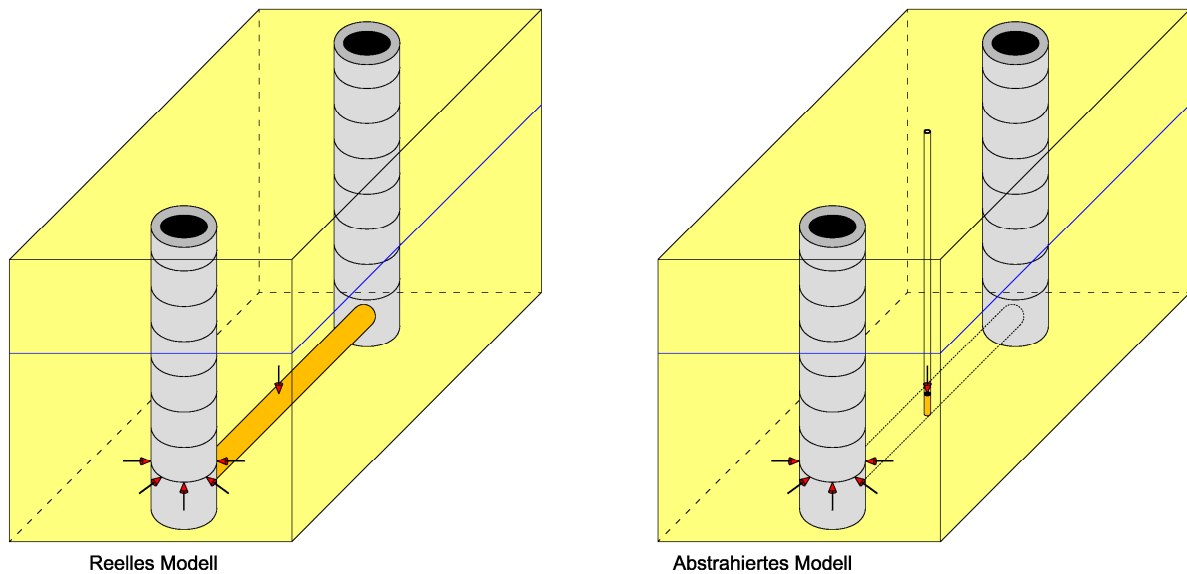


Abb. 27: Möglichkeiten der Modellabstraktion bei Schächten mit Rohranschluss

Die undurchlässigen Einbauten werden über einen sehr geringen k_f -Wert von $1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ beschrieben. An den Schadstellen, an denen Wasser infiltrieren kann, werden höhere Durchlässigkeiten angesetzt. So wird der 2 cm breiten durchlässigen Schicht im Schacht ein k_f -Wert von $1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ zugeordnet. Da der Schachtring eine Stärke von 20 cm hat, ergibt sich ein Leakage-Faktor von $5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/s}$. An der punktuellen Störstelle im Abflussrohr wird ebenfalls ein k_f -Wert von $1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ angenommen. Da allerdings die Materialstärke nur 5 cm beträgt, hat der Schaden einen Leakage-Faktor von $2 \cdot 10^{-3} \text{ 1/s}$. Beide Schäden werden in einem Modell abgebildet, um gegebenenfalls später Interaktionen zwischen den beiden Schäden erkennen zu können (s. Abb. 28).

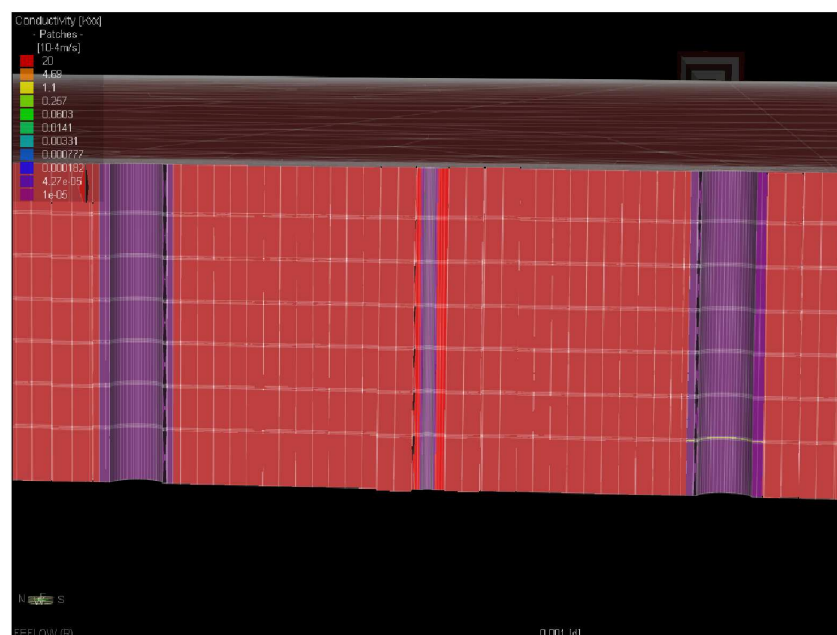


Abb. 28: Zuordnung der Durchlässigkeiten im Schachtmodell

Für beide Störstellen stellt sich bei der beschriebenen Modellparametrisierung eine Gesamtinfiltration ein. An der punktuellen Störstelle im Rohr infiltriert deutlich weniger als an der Schachtmuffe, da die Schadstelle eine deutlich größere Gesamtfläche hat (s. Abb. 29). Diese Infiltrationsraten haben eine große Auswirkung auf den Anfall von Wasser in der Abwasserwirtschaft. Der Grundwasserspiegel wird dadurch jedoch nicht wesentlich beeinflusst, obwohl eine weit außen liegende Randbedingung angesetzt wurde, entsteht kein Absenktrichter.

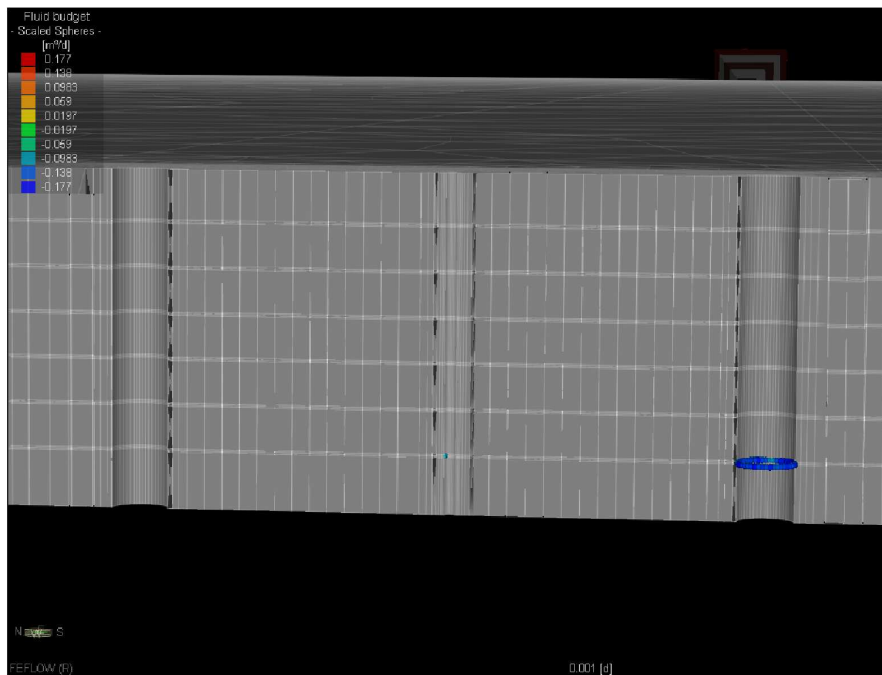


Abb. 29: Infiltrationsraten im Schachtmodell

Die modelltechnische Abbildung von Schächten mit Abwasserrohren und unterschiedlichen Schadstellen ist mit dem Modell problemlos möglich. Die verwendeten Leakage-Faktoren wurden für die Modellprüfung frei angenommen. Damit präzise Aussagen zur Infiltration gemacht werden können sind Leakage-Faktoren für die einzelnen Schadstellen notwendig. Wenn zudem der Grundwasserspiegel richtig abgebildet werden soll, sind genaue Informationen zu den Randbedingungen unverzichtbar.

6 Ausblick

Die Untersuchungen an den unterschiedlichen Modellen haben gezeigt, dass es in einigen Bereichen Forschungsbedarf gibt. Dies gilt besonders für die folgenden drei Schwerpunkte, die durch weitere Untersuchungen tiefer gehend analysiert werden sollten.

- a) In dem Forschungsprojekt wurde eine einfache Sensitivitätsstudie durchgeführt, bei der die Parameter Grundwasserstand, Durchlässigkeit des Bodens und Leakage- Faktor der Schadstelle einzeln, also eindimensional, variiert wurden. Es sollte angestrebt werden, eine dreidimensionale Parameteranalyse dieser Variablen durchzuführen. Dabei werden alle Parameter simultan variiert, so dass sich kumulative Effekte und Abhängigkeiten der Parameter untereinander zeigen können. Hierfür sind zahlreiche Modellläufe notwendig, die beispielsweise mit dem Verfahren der Monte-Carlo-Simulation durchgeführt und ausgewertet werden können.
- b) Die Modelle mit dem Programm FEFLOW haben bewiesen, dass die großräumigen Grundwasserströmungen gut abgebildet werden. Strukturelle Einbauten sind mit dem Modell allerdings schwieriger abzubilden, was jedoch im physikalischen Modell problemlos möglich ist. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit einer Modellkopplung zwischen dem physikalischen Modell (Versuchsstand IKT) und dem computergestützten Modell (FEFLOW). Die Schnittstelle ist der Rand des physikalischen Modells, welches über eine zeitabhängige Wasserstandsänderung gesteuert werden muss. Mit der Kombination der beiden Modelle können auch größerskalige Problemstellungen erfasst werden. Mit Hilfe dieser Modellkopplung können die Folgen durch Rohrsanierungen oder die Zunahme von Schadstellen untersucht werden. Die Abbildung der Randbedingung im physikalischen Modell muss allerdings in der Praxis noch untersucht werden. Es sollte am Rand des Versuchsstands eine Schotterrigole angelegt werden, über die mit Hilfe von Injektions- bzw. Drainagesonden der Wasserstand reguliert werden kann. Die Grundwasserstände können über Messbrunnen im Versuchsstand dokumentiert werden.
- c) Die Überprüfung des Innendruckprüfverfahrens hat gezeigt, dass es zu deutlichen Abweichungen zwischen Exfiltration und Infiltration kommen kann. Faktoren dafür sind die Grundwasserstände während der Innendruckprüfung und die anstehende Bodenart. Die Modellergebnisse sollten in einem physikalischen Versuch bestätigt werden. Ferner sollten durch die Modell- und Versuchsergebnisse Korrekturfaktoren gebildet werden, die die Einflüsse der Bodenart und des Grundwasserstandes während der Prüfung mit berücksichtigen.

7 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojekts sollten unter Verwendung des Modells FEFLOW unterschiedliche Modelle aufgebaut werden, mit deren Hilfe das Strömungsverhalten im Boden bei undichten Rohren untersucht werden kann. Hierfür wurde zuerst eine Sensitivitätsanalyse an einem einfachen 2D-Modell durchgeführt. In diesem Modell wird das Abflussrohr als Drainage angenommen, das durch Veränderung des Leakage- Faktors mehr oder weniger durchlässig ist. Außerdem wurden in diesem Modell die Einflüsse unterschiedlicher Böden, Grundwasserstände und Fremdkörper im Boden untersucht. Mit Hilfe dieser Erkenntnisse konnten sinnvolle Wertebereiche für die unterschiedlichen Parameter definiert werden.

In der Praxis wird zur Dichtheitsprüfung von Abwasserleitungen eine so genannte Innendruckprüfung durchgeführt. Bei dieser Prüfung wird ein Druck im Rohr aufgebaut, so dass Wasser an undichten Stellen aus dem Rohr exfiltrieren kann. Allerdings wird bei dieser Prüfung der vorhandene Grundwasserspiegel nicht mit berücksichtigt und auch keine Aussage getätigt, ob die Exfiltration gleich der Infiltration ist. Mit einem einfachen 2D- Modell wurde das Innendruckprüfverfahren bei unterschiedlichen Grundwasserspiegeln nachsimuliert. Die Durchlässigkeit des Rohrs wurde auf den Grenzwert der maximal zulässigen Exfiltration eingestellt. Anschließend wurden die Modelle mit den angepassten Leakage- Faktoren als Infiltrationsmodell verwendet, bei denen ebenfalls die Grundwasserstände variiert wurden. Es zeigte sich, dass sich besonders bei höheren Grundwasserständen deutlich größere Infiltrationen als Exfiltrationen einstellen.

Eine der Kernfragen war, wie und ob man den Versuchsstand von IKT mit dem Modell 3-dimensional abbilden kann. Hierfür wurden zwei unterschiedliche Modelltypen (Rohrmodell und Schachtmodell) aufgebaut, die z.T. als reales oder abstrahiertes Modell definiert wurden. Es zeigte sich, dass das abstrakte Modell bessere Ergebnisse liefert, da das infiltrierte Wasser besser aus dem System entnommen werden kann. An einem Abflussrohr wurden verschiedene Schadstellen wie Muffenschäden, Linienschäden und punktuelle Schäden simuliert. Es wurde auch ein Rohranschluss erfolgreich nachmodelliert. In einem weiteren Modell konnte ein Schacht mit undichtem Ring und einem punktuellen Schaden im Abflussrohr realistisch abgebildet werden.

Bei allen Modellen hat sich herausgestellt, dass Leakage- Faktoren für Schadstellen unbedingt erforderlich sind, um die Modelle zu kalibrieren bzw. anzupassen. Damit allerdings auch das Verhalten des Grundwassers richtig simuliert werden kann, ist es unbedingt erforderlich, die zu den Leakage- Faktoren gehörenden Randbedingungen zu dokumentieren. Die Randbedingungen besitzen einen sehr großen Einfluss auf die Ausdehnung von Absenktrichtern, die über den Schadstellen entstehen. Dadurch haben diese wiederum einen großen Einfluss auf den Grund-

wasserstand und die Infiltrationsrate an der Schadstelle. Die genaue Ermittlung der Leakage-Faktoren in Abhängigkeit zur Randbedingung sollte durch weitere Forschungsprojekte untersucht werden.

8 Literatur

ATV – DVWK – A139: Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen, 2001.

CAVELAARS, J. C.; VLOTMAN, W. F.; SPOOR, G.: Subsurface Drainage Systems. In: Ritzema, H. P. (ed): Drainage Principles and Applications (ILRI Publication 16), International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen², 1994, S. 827 - 929.

DHI-WASY: FEFLOW 6.0 Trainingskript, 2010, S. 10.

HOOGHOUDT: General consideration of the problem of field drainage by parallel drains, ditches, watercourses, and channels. Publ. No.7 in the series Contribution to the knowledge of some physical parameters of the soil (titles translated from Dutch). Bodemkundig Instituut, Groningen, The Netherlands, 1940.

HENNERKES, JÖRG ANDRÉ : Reduzierung von Fremdwasser bei der Abwasserentsorgung, Dissertation an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen 2006.

TORRICELLI, EVANGELISTA: 1608- 1647, In: Heinemann, Ekkehard; Feldhaus, Rainer: Hydraulik für Bauingenieure, Wiesbaden², 2003, S. 54.