

PHREASIM – Ein Expertensystem zur Simulation von Fließverhältnissen in Grundwassermessstellen und deren unmittelbarem Nahfeld

**Joachim Drießen, Marc Schöttler,
Frieder Enzmann, Zahra Lakdawala,
Konrad Steiner, Peter Popov, Oleg Iliev,
Michael Drews, et al.**

Grundwasser

Zeitschrift der Fachsektion
Hydrogeologie in der Deutschen
Gesellschaft für Geowissenschaften (FH-
DGG)

ISSN 1430-483X

Grundwasser
DOI 10.1007/s00767-015-0291-y



Your article is protected by copyright and all rights are held exclusively by Springer-Verlag Berlin Heidelberg. This e-offprint is for personal use only and shall not be self-archived in electronic repositories. If you wish to self-archive your article, please use the accepted manuscript version for posting on your own website. You may further deposit the accepted manuscript version in any repository, provided it is only made publicly available 12 months after official publication or later and provided acknowledgement is given to the original source of publication and a link is inserted to the published article on Springer's website. The link must be accompanied by the following text: "The final publication is available at link.springer.com".



PHREASIM – Ein Expertensystem zur Simulation von Fließverhältnissen in Grundwassermessstellen und deren unmittelbarem Nahfeld

Joachim Drießen · Marc Schöttler · Frieder Enzmann ·
 Zahra Lakdawala · Konrad Steiner · Peter Popov ·
 Oleg Iliev · Michael Drews · Georg Wieber · Michael Kersten

Eingang des Beitrages: 23.1.2015 / Eingang des überarbeiteten Beitrages: 19.4.2015
 © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

Zusammenfassung Die vorliegende Arbeit stellt eine Studie zur rechnergestützten Modellierung stationärer Fließverhältnisse an und in horizontal durchströmten Bohrburungen vor. Basierend auf einem neuartigen 3D-Navier-Stokes-Brinkman-Gleichungslöser wird ein Lösungsansatz für das interaktive System Porengrundwasserleiter/Filterkies/Filterrohr/Brunnenraum vorgestellt. Er ermöglicht es, stationäre Strömungsszenarien gekoppelt aus freiem und

porösem Fließen am Computer zu simulieren. Für die Anwendung des Gleichungslösers wurde das Expertensystem PHREASIM entwickelt, mit dem Modellgeometrien erstellt und im Anschluss an die Simulation stationäre Fließszenarien visualisiert werden können. Zur Validierung wurden in Laborexperimenten beispielhaft verschiedene Brunnenmodellkonstruktionen untersucht und anschließend mit PHREASIM simuliert. Der Abgleich zwischen Ergebnissen aus Laborexperimenten und Simulationen zeigt, dass mit PHREASIM quasistationäre Fließszenarien bei identischen Randbedingungen und gleichen Geometrien realitätsnah abgebildet werden können. Bei genauer Kenntnis der Brunnengeometrien und der strömungsmechanischen Randbedingungen kann mit PHREASIM die Fließsituation an beliebigen Stellen innerhalb sowie außerhalb eines horizontal durchströmten Brunnenabschnitts am Computer simuliert werden. Ein Einsatzbereich von PHREASIM ist die Unterstützung der Interpretation von Fließmessdaten, die beispielsweise mit dem PHREALOG-Fließmesssystem gewonnen werden.

Dr. F. Enzmann (✉) · J. Drießen · Prof. Dr. G. Wieber ·
 Prof. Dr. M. Kersten
 Institut für Geowissenschaften, Johannes Gutenberg-Universität,
 Becherweg 21, 55099 Mainz, Deutschland
 E-Mail: enzmann@uni-mainz.de

Dr. M. Schöttler
 PHREALOG,
 Rheinallee 88, 55120 Mainz, Deutschland

Dr. Z. Lakdawala
 DHI-WASY GmbH,
 Volmerstraße 8, 12489 Berlin, Deutschland

Dr. K. Steiner · Dr. P. Popov · Prof. Dr. O. Iliev
 Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik
 ITWM,
 Fraunhofer-Platz 1, 67663 Kaiserslautern, Deutschland

Dr. P. Popov
 ppResearch Ltd,
 33 Lyuben Karavelov Str.,
 1142 Sofia, Bulgaria

Dr. M. Drews
 ConocoPhillips,
 600 North Dairy Ashford,
 Houston, TX 77079, USA

Prof. Dr. G. Wieber
 Landesamt für Geologie und Bergbau, Rheinland-Pfalz,
 Emy-Roeder-Straße 5, 55129 Mainz, Deutschland

PHREASIM: a computer-aided expert system to characterize horizontal fluid flow in and around wells

Abstract In this study, a new numerical solver based on a coupling of the Navier-Stokes and Brinkman equations is presented. The solver can model 3D horizontal steady-state flow conditions with interactions between the aquifer, gravel-pack, well screen, and open borehole at the interface between the borehole and the surrounding porous filter and aquifer, thus solving the critical transition from porous to free flow. The solver is embedded in the workflow of the PHREASIM expert system. It allows for designing a broad variety of well designs and flow sce-

narios while considering the permeabilities and geometries of the involved microstructures. Stationary flow scenarios can be visualized in any cross-section and at any discrete point within the model. In order to verify the validity of the numerical approach, a variety of flow scenarios were investigated in sand tank model experiments and simulated with PHREASIM. By comparing the results of both simulations and experimental measurements performed using identical boundary conditions, PHREASIM proved to be viable for accurately replicating virtually steady-state flow conditions. PHREASIM aims to support the interpretation and significance of flow data gained by borehole flow measuring systems like PHREALOG.

Keywords Groundwater flow · In-hole flow · Well flow simulation · Navier-Stokes-Brinkman · PHREASIM

Einleitung

Belastbare Daten zur Grundwasserströmung sind bei allen Grundwassererkundungen von grundlegender Bedeutung. Gegenüber konventionellen, auf Grundwasserstände basierenden Grundwasserströmungsmodellen stellen Durchflussmessungen in Grundwassermessstellen bzw. ausgebauten Bohrbrunnen eine ergänzende Datenbasis dar, beispielsweise zur Plausibilitätsprüfung oder zur Beweissicherung im Rahmen von Sanierungsfällen und Tiefbaumaßnahmen. Die Passage des Grundwassers durch einen Bohrbrunnen korrespondiert über das Brunnenbauwerk mehr oder weniger direkt mit der Grundwasserströmung im angrenzenden Aquifer. Informationen zur lokalen Grundwasserströmung insbesondere in Porengrundwasserleitern lassen sich daher aus der stationären, horizontalen Grundwasserpassage indirekt ableiten. Bei tiefen und schwer erschließbaren Aquiferen können jedoch Informationen zur Grundwasserströmung meist nur noch mithilfe von Messungen in Bohrbrunnen gewonnen werden. Die Möglichkeit, Informationen zur örtlichen Grundwasserströmung aus dem stationären Durchfluss im Brunnenraum ableiten zu können ist daher von großem Interesse und Gegenstand zahlreicher Publikationen der letzten Jahrzehnte, in denen unterschiedliche Ansätze zur Lösung des Problems behandelt werden (z. B.: Bergmann 1970, 1971, Klotz 1971, Wheatcraft & Winterberg 1985, Barrash et al. 2006, Chong-Xi et al. 2006, Wu et al. 2008, Bayless et al. 2011). Ebenso intensiv sind Entwicklungen geeigneter Messmethoden zur Erfassung der GW-Fließbewegung in Bohrbrunnen vorangetrieben worden (z. B.: Drost et al. 1968, Young & Waldrop 1989, Barczewski & Marschall 1990, Momii et al. 1993, Schöttler 1997, Kearn 1997, Graw et al. 2000, Kessels & Zoth 2000, Jepsen & Pedler 2003, Englert 2003, James et al. 2006, Morgenstern & Börner 2008). Trotz jahrzehntelan-

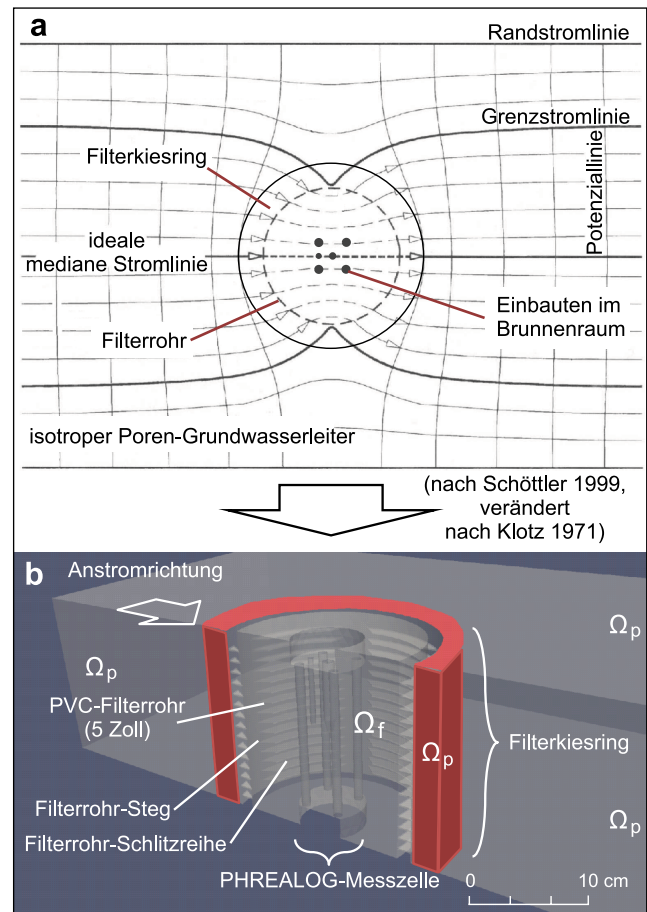


Abb. 1 **a** Geometrie des horizontalen Strömungsfeldes an einem Bohrbrunnen im Porengrundwasserleiter. Ausbildung und Einbiegung von Grenzstromlinien im Realfall. Darstellung mit Ringkiesschüttung und zentrisch eingebauter PHREALOG Messzelle; **b** Digitalisierung des Realfalls aus Abbildung 1a in eine originalgetreue, diskretisierte Modellgeometrie aus Aquifer, 5-Zoll-PVC-Schlitzfilterrohr und PHREALOG-Messzelle.

ger Anstrengungen hat sich jedoch eine Validierung dieser Messmethoden aus unterschiedlichen Gründen als äußerst schwierig erwiesen.

Für hinreichend genaue Auswertung und Interpretation der Daten zur GW-Fließgeschwindigkeit aus Durchflussmessungen ist die Kenntnis der Einflussnahme des Brunnenbaus auf die Fließbewegungen entscheidend. Bohrbrunnen stellen grundsätzlich eine hydraulische Anomalie im Gefüge des Aquifers dar. Daher entspricht der horizontale Durchfluss nicht an allen Stellen im Brunnen der GW-Fließbewegung im angrenzenden Aquifer. Die Grundwasserpassage an Brunnen wird durch Druckänderungen an den Grenzflächen zwischen Sediment, Filter und freiem Durchfluss beeinflusst und führt zu einer Auslenkung der Druckpotenziallinien (Abb. 1a). Zur Interpretation der Daten aus Durchflussmessungen muss daher die durch das Brunnenbauwerk verursachte Strömungsbeeinflussung quantifiziert werden. Hierzu müssen die Ausbaudaten des

Bohrbrunnens sowie die Durchlässigkeit des angrenzenden Sedimentkörpers bekannt sein.

Aufgrund der hydraulischen Komplexität an Brunnenbauwerken werden zur Beschreibung der horizontalen Durchflussbewegungen üblicherweise vereinheitlichende Ansätze verwendet. In klassischen Formelwerken wird ein Korrelationsfaktor (sog. „ α -Faktor“) berechnet, mit dem ein Verhältnis zwischen Durchflussgeschwindigkeit im Brunnen und der Filtergeschwindigkeit im Aquifer beschrieben wird (Drost et al. 1968, Bergmann 1970, 1971, Klotz 1971). Bei Kenntnis der (freien) Durchflussgeschwindigkeit im Brunnen glaubte man, mit diesem Ansatz die Filtergeschwindigkeit im umgebenden Aquifer realitätsnah abbilden zu können (Kerfoot & Massard 1985, Wheatcraft & Winterberg 1985, Bidaux & Tsang 1991). Diese Formelwerke tragen jedoch nicht allen einflussnehmenden Faktoren hinreichend Rechnung, um aus gemessenen Durchflussgeschwindigkeiten die Filtergeschwindigkeiten im Aquifer mit belastbarer Genauigkeit für alle Fließszenarien ableiten zu können. Beispielsweise wird der variable hydraulische Einfluss durch geometrische Formfaktoren der Brunnenfilterrohre (Filterrohröffnungsgeometrien wie Schlitz-/Steganordnung) in Bezug zur Anstromrichtung nicht berücksichtigt (Abb. 1b). Dass berechenbare Korrelationsfaktoren wie der α -Faktor das Geschwindigkeitsverhältnis Aquifer zu Bohrbrunnen nur unzureichend beschreibt, ist bereits häufig diskutiert worden und führte zur Erweiterung der klassischen Formelwerke (z. B. Kerfoot & Massard 1985, Kearn 1997, Wu et al. 2008). Eine weitere Komplikation ergibt sich aus der Tatsache, dass Filterstrecken von Grundwassermessstellen und Bohrbrunnen korrespondierend zur GW-Fließbewegung im umgebenden Porenaquifer nicht nur horizontal sondern auch vertikal durchströmt werden. Vertikale GW-Fließbewegungen können jedoch mit geeigneten technischen Maßnahmen wie Packern zur Isolierung kurzer Brunnenabschnitte weitgehend unterbunden werden. Diese Brunnenabschnitte werden dann idealerweise nur noch horizontal durchströmt.

Die korrekte Parametrisierung der Einflussgrößen ist komplex und erfordert die genaue Kenntnis der an Bohrbrunnen auftretenden hydrodynamischen Verhältnisse. Aufgrund der Komplexität bieten sich zum besseren Verständnis der Fließbewegungen an Bohrbrunnen rechnergestützte Fließmodelle an. Erste Ansätze dazu kamen aber nicht über den Einsatz klassischer Darcy-Ansätze hinaus (z. B. Drost et al. 1968, Jepsen & Pedler 2003, James et al. 2006). Diese Ansätze können jedoch den diskontinuierlichen Übergang vom Porengrundwasserleiter in den offenen Brunnenbauwerksraum (Navier-Stokes-Regime) nur unzureichend parametrisieren. Angeregt durch die teilweise begrenzte Stichhaltigkeit von Ergebnissen aus diesen klassischen Ansätzen ergab sich die Idee, einen rechnergestützten Modellansatz zu schaffen, der unter anderem den

hydraulischen Einfluss nicht nur von realen Brunnengeometrien sondern auch den von Brunneneinbauten wie Messsonden und deren geometrischen Stellungen zum Anstrom berücksichtigt. Derartig komplexe hydraulische Vorgänge können bisher nur in aufwändigen analogen Labormodellexperimenten jeweils für eine individuelle geometrische Anordnung und Fließsituation nachgestellt werden (Rech 2000, Jepsen & Pedler 2003, James et al. 2006). Um für die praktische Anwendung individuelle Fließszenarien aus den Brunnenausbaue- und Fließmessdaten zeit- und realitätsnah modellhaft nachzubilden, sind computergestützte Simulationsmodelle unerlässlich. Ziel unseres Projektes war es, mit dem dafür neu erstellten Expertensystem „PHREASIM“ Brunnengeometrien und GW-Fließszenarien realitätsnah und nachvollziehbar nachzubilden, sodass mit Messtechniken wie beispielsweise mit dem PHREALOG-Messsystem (PHREALOG 2014) gemessene Durchflussbewegungen plausibel interpretiert werden können.

Expertensystem PHREASIM

Die Entwicklung des Expertensystems PHREASIM erfolgte im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten BMBF-Projekts „FLIMSYS“ als Kooperationsvorhaben zwischen dem Unternehmen PHREALOG, dem Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM) in Kaiserslautern und dem Institut für Geowissenschaften der Universität Mainz. Der zur Simulation von gekoppelter Strömung insbesondere am kritischen Übergang von porösem Raum (Aquifer/Filterkies) zum freien Raum (Filterrohr/Brunnenraum) erforderliche Strömungssimulator wurde vom ITWM entwickelt. Er gliedert sich in einen Präprozessor, in dem die geometrischen Randbedingungen parametrisiert und das Berechnungsgitter erzeugt werden, und einen Postprozessor zur eigentlichen Strömungsberechnung und -auswertung. Aufbauend auf diesem Strömungssimulator wurde das Expertensystem PHREASIM als strukturiertes Arbeitsablaufschema zur Simulation unterschiedlicher Fließszenarien am Institut für Geowissenschaften der Universität Mainz erarbeitet. PHREASIM umfasst somit bibliotheksgestützte Eingabemodule zur Erstellung von Modellgeometrien und Randbedingungen, den Prä- und Postprozessor sowie Ausgabemodule zur Datenbereitstellung und Visualisierung. PHREASIM simuliert die Fließverhältnisse sowohl direkt in der Messstelle als auch im unmittelbaren Umfeld im Aquifer unter Berücksichtigung aller geometrischen Einflussgrößen und horizontalen Anstromrandbedingungen für Porengrundwasserleiter (Abb. 1). Der generelle Ablauf der Arbeitsschritte für eine PHREASIM-Simulation lässt sich zu folgenden Teilschritten zusammenfassen:

1. Erstellung der Modellgeometrie
2. Netzgenerierung mit dem Präprozessor
3. Festlegung der Modellparameter (Fluidichte, Viskosität, Permeabilitäten des Aquifer- und Filtermaterials) und hydraulischer Randbedingungen (Anstromgeschwindigkeit)
4. Strömungssimulation mit dem Postprozessor
5. Bereitstellung und Visualisierung der Daten

Der Simulationsraum ist üblicherweise als quaderförmiger Volumenkörper definiert, der von der Dimension und Position der darin enthaltenen Einbauten (Grundwasserleiter, Filterkies, Filterrohr, etc.) einem praxisüblichen Brunnenausbau entspricht. PHREASIM simuliert die Strömungsverhältnisse auf Basis numerischer Lösungen der hydromechanischen Grundlagengleichungen. Die Navier-Stokes-Gleichung beschreibt die Beschleunigung eines inkompressiblen Fluids aufgrund von Druckunterschieden, der inneren und äußeren viskosen Reibung sowie äußeren Kräfteinflüssen im freien Raum. Brinkman (1949) beobachtete die Entstehung von unzulässigen Diskontinuitäten der Geschwindigkeitsvektoren am Rand von porösen Körpern. Die Lösung des Problems war die Erweiterung des Darcy-Gesetzes um den Viskositätsterm aus der Stokes-Gleichung. Die Verknüpfung beider Gleichungen führt zur Navier-Stokes-Brinkman (NSB)-Gleichung (Ciegis et al. 2007). Gleichung 1 stellt die laminare, inkompressible und isothermale NSB-Gleichung dar, mit der freien Strömung in Modellvolumen Ω_f und poröser Strömung im Darcy-Regime Ω_p (Abb. 1b):

$$[1] \quad \begin{cases} \frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} - \nabla \cdot (\tilde{\mu} \nabla \vec{u}) + (\rho \vec{u}, \nabla) \vec{u} + \overbrace{\tilde{\mu} \tilde{K}^{-1} \vec{u} + \nabla p}^{\text{Darcy law}} = \vec{f}, \\ \nabla \cdot \vec{u} = 0 \end{cases} \quad \text{Navier-Stokes}$$

wobei,

$$[2] \quad \begin{aligned} \tilde{\mu} &= \begin{cases} \mu & \text{in } \Omega_f, \\ \mu_{\text{eff}} & \text{in } \Omega_p, \end{cases} \quad \vec{f} = \begin{cases} \vec{f}_{\text{NS}} & \text{in } \Omega_f, \\ \vec{f}_B & \text{in } \Omega_p, \end{cases} \\ \tilde{K}^{-1} &= \begin{cases} 0 & \text{in } \Omega_f, \\ K^{-1} & \text{in } \Omega_p, \end{cases} \end{aligned}$$

Wobei $\vec{u}$ den Fluidgeschwindigkeitsvektor, p den Druck, ρ und μ , die Dichte bzw. Viskosität des strömenden Fluids, und $\tilde{K}$ den Permeabilitätstensor der porösen Medien beschreibt.

Diese NSB-Gleichung ist eine nichtlineare partielle Differentialgleichung, die nur unter ganz bestimmten Randbedingungen analytische Lösungen aufweist. Bei gegebener Geometrie der Festkörpermatrix (z. B. Porenraum in einem

Sandstein) kann bei Definition geeigneter Randbedingungen ein entsprechendes Druck- und Geschwindigkeitsfeld simuliert und die Permeabilität aus dem mittleren Volumenfluss und dem Druckgefälle als makroskopisch tensorieller Materialparameter aus der porenskaligen Simulation abgeleitet werden (Rage 1996, Enzmann 2000, Saenger et al. 2011, Sell et al. 2013, Blunt et al. 2013). Zu Projektbeginn wurde dieser strömungsmechanische Simulationsansatz zunächst im zweidimensionalen Fall prinzipiell auf Gültigkeit getestet (Mezhyrov 2012), um dann in der Hauptprojektphase den 3D-Ansatz PHREASIM zu entwickeln. PHREASIM löst die NSB-Gleichung auf einem Finiten-Elemente (FE)-Netz, mit dem alle erforderlichen Geometrien generiert und erfasst werden können (Abb. 1b). Bei den im Grundwasserbereich üblichen Anstromgeschwindigkeiten (siehe Tab. 1) werden damit die Druck- und Strömungsverhältnisse numerisch simuliert, visuell dargestellt, charakterisiert und letztendlich quantifiziert.

Aufbau des Laborexperiments zur Validierung von PHREASIM

Zur Validierung der mit PHREASIM berechneten GW-Fließverhältnisse wurde der simulierte Modellraum als Laborexperiment nachgebildet. Die physikalische Größe des Labormodells wurde so dimensioniert, dass die Gültigkeit des Darcy-Gesetzes bei mittleren GW-Fließgeschwindigkeiten als definierte Versuchsrandbedingungen nicht verletzt wird und keine turbulenten Strömungsregime auftreten können. Das Rechenmodell und das Labormodell ermöglichten somit die Untersuchung der Strömungsverhältnisse von sehr langsamem, d. h. laminarem Fließen bis an die Grenze zum turbulenten Regime. Beliebige Kombinationen aus Aquifersedimenten, Filterkiesen, Filterrohre und Formkörper-Einbauten in den Brunnenraum konnten zusammengestellt und experimentell untersucht werden. Der generelle Aufbau des Experiments erfolgte analog zu den in der Praxis üblichen Vorgaben zum Brunnenausbau (DIN 4925 1999, DIN 4935 2006, DIN 4924 2014). So waren die eingesetzten Filterrohrdurchmesser auf genormte Bohrlochdurchmesser abgestimmt und die Durchlässigkeiten von Aquifer, Filterkies und Schlitzweiten der eingesetzten Filterrohre an die vorgegebenen Korngrößenabstufungen gekoppelt. Insgesamt ließen sich somit weite Bereiche der GW-Fließbewegungen im direkten Umfeld einer GW-Messstelle experimentell nachbilden. Der hydraulische Durchfluss wurde über ein System aus Vor- und Nachlaufbehälter, Wasserpumpe und Druckanzeige-Standrohren zur exakten Festlegung und Kontrolle als Randbedingung bewerkstelligt. Mittig im Modellboden befanden sich rotierbare Fassungen zur Aufnahme von Filterrohren mit unterschiedlichem Durchmesser, Art, Mate-

Tab. 1 Modellierte und gemessene Systeme

Abbildung	Quelle	k_f „Aquifer“ [m/s]	k_f Filterkies [m/s]	Filtertyp (DIN)	Durchmes- ser [Zoll]	Schlitzweite [mm]	Bohrdurch- messer [mm]	Wasser [°C]
1a/1b	PHREASIM	2,40E-02	5,80E-02	Wickeldraht DIN 4935 (2006)	4	1	270	22,5
3a	Labormodell	2,40E-02	5,80E-02	Wickeldraht DIN 4935 (2006)	4	1	270	22,5
3b	PHREASIM	2,40E-02	5,80E-02	Wickeldraht DIN 4935 (2006)	4	1	270	22,5
3c	Labormodell	2,40E-02	5,80E-02	Schlitzrohr DIN 4925 (1999)	2	1	270	22,5
3d	PHREASIM	2,40E-02	5,80E-02	Schlitzrohr DIN 4925 (1999)	2	1	270	22,5
3e	Labormodell	2,00E-03	6,50E-02	Schlitzrohr DIN 4925 (1999)	5	1	270	25
3f	PHREASIM	2,00E-03	6,50E-02	Schlitzrohr DIN 4925 (1999)	5	1	270	25
4a	PHREASIM	2,00E-03	6,50E-02	Schlitzrohr DIN 4925 (1999)	2	1	270	25
4b	PHREASIM	2,00E-03	6,50E-02	Schlitzrohr DIN 4925 (1999)	2	1	270	25
4c	PHREASIM	2,00E-03	6,50E-02	Schlitzrohr DIN 4925 (1999)	2	1	270	25
–	Labormodell	2,00E-03	6,50E-02	Schlitzrohr DIN 4925 (1999)	5	1	270	25
5a	PHREASIM	2,00E-03	6,50E-02	Schlitzrohr DIN 4925 (1999)	5	1	270	25
–	Labormodell	2,00E-03	6,50E-02	Schlitzrohr DIN 4925 (1999)	5	1	270	25
5b	PHREASIM	2,00E-03	6,50E-02	Schlitzrohr DIN 4925 (1999)	5	1	270	25
–	Labormodell	2,00E-03	6,50E-02	Schlitzrohr DIN 4925 (1999)	5	1	270	25
5c	PHREASIM	2,00E-03	6,50E-02	Schlitzrohr DIN 4925 (1999)	5	1	270	25

rial und Formgebung. Dadurch ließen sich Variationen der Anstromrichtung experimentell nachbilden (Schreiber 2012).

Der Durchfluss im Brunnenraum selbst wurde mithilfe von fluoreszierenden Tracerfahnen visualisiert. Eine Dosiereinrichtung und variabel angebrachte Haarkanülen ermöglichten die definierte Zugabe einer hochverdünnten Uraninlösung an verschiedenen Positionen im Brunnenraum zur Abbildung von Tracerverlaufslinien. Diese Fluoreszenztracerzugabe erfolgte als Injektion und konnte dabei präzise an die angelegte Filtergeschwindigkeit als Randbedingung angepasst werden, sodass sich dünne Tracerfahnen real korrespondierend als Stromlinien zu den natürlichen Fließbewegungen des Wassers ausbildeten. Die Erfassung der Fließgeschwindigkeit v_{Br} im Brunnenraum erfolgte in der axialen Mitte des Filterrohres. Zur Nachverfolgung der Tracerlinienlaufzeit wurde die flexible Tracerzuflussleitung in zeitlich definierten Abständen kurz abgedrückt und damit Druckpulse erzeugt. Die Tracerlinien wurden so mit Markerpunkten versehen, deren Drift optisch vermessen werden konnte. Die Tracerfahnen wurden mithilfe eines Kamerasystems kontinuierlich aufgezeichnet und per Bildverarbeitung vermessen. Aus diesen Daten ließen sich Fließrichtung, Fließgeschwindigkeit und die Fließwege im Brunnenraum exakt ableiten und auswerten (Schreiber 2012, Reigber 2013, Smolka 2014).

Aufsetzen eines PHREASIM-Modells und Ablauf der Simulation

Als erster Schritt im Ablauf einer Simulation muss das Experiment detailgetreu geometrisch abgebildet werden. Vier Strömungszonen waren zu unterscheiden: das Aquifermaterial, der Filterkies, das Filterrohr und der durchströmte Brunnenraum. Dieser gesamte Bereich wird als

quaderförmiger Körper abgebildet ($50 \times 50 \times 50$ cm). Der Aquiferbereich wurde als Parameter mit einer homogenen Permeabilität als homogenes poröses Medium gesehen. Für den Bereich Filterrohr wurden die Geometrien von Brunnenfilterrohren nach DIN 4925 (1999) (geschlitzte Filterrohre) sowie DIN 4935 (2006) (Wickeldrahtfilter) eingesetzt. Zur Einbindung in das Simulationsmodell wurde die Geometrieform des Filterrohres als Negativ (d. h. nur der durchströmte Bereich, also die Schlitzte selber) diskretisiert und modelliert. Der Bereich des Brunnenraums war frei durchströmbar definiert (Navier-Stokes-Regime, Ω_f in Gl. 1). Im Brunnenraum enthaltene Formfaktoren (z. B. die der Messvorrichtung PHREALOG) wurden wie die Geometrieform des Filterrohres als räumliches Negativ modelliert und in das Modell eingebunden. Die Geometrien von Filterrohr und den im Brunnenraum enthaltenen Bauformen konnten im Modell beliebig zueinander und zur Anströmung ausgerichtet werden, sodass bei Kenntnis der realen Ausrichtung der Filterrohrgeometrie und der Brunneneinbauten zueinander und zur Brunnenanstromrichtung eine Modellanordnung korrespondierend zu den realen Gegebenheiten erfasst und simuliert werden konnte.

Im zweiten Schritt musste für das aufgestellte geometrische Modell ein FE-Netz erzeugt werden, welches der NSB-Löser als Input benötigt. Die Netzgenerierung erfolgte mit der Open-Source-Software NETGEN (NETGEN 2014). Der Modellraum wurde damit in tetraedrische Netze in 3D aufgelöst. Kleinräumige Heterogenitäten wie z. B. die Filterschlitzte wurden von NETGEN hierarchisch räumlich verfeinert und automatisch optimiert. Einstellmöglichkeiten bot der Eingriff in die Netzgenerierung zur Erstellung räumlich unterschiedlicher Netzauflösungen des Modells. Dabei war immer der Kompromiss zwischen numerischen Stabilitätskriterien und zeitlichem Rechenaufwand abzuschätzen,

der kleinere Serverarchitekturen (z. B. 64-core 512 GB RAM) trotz HPC-Parallelisierung mehrere Tage auslasten kann (Drießen 2013, Lüpnitz 2013).

Der dritte Schritt umfasste die Einstellung und Definition der Modellgeometrie und hydraulischen Randbedingungen, wobei dem Aquifermaterial und Filterkies eine spezifische Permeabilität zugewiesen wurde. An der Einstromfläche in den Modellraum (linker Rand des Modells/Aquifer, vgl. Abb. 1a) wurde eine Druck- oder Einstromrandbedingung vorgegeben. Der gegenüberliegende (rechte) Rand des Modells war als freier Abstromrand definiert. Die Lösung der NSB-Gleichung erforderte die Vorgabe von Dichte und Viskosität des strömenden Fluids. In der Regel wurde auch die Temperaturabhängigkeit dieser physikalischen Werte berücksichtigt (Schreiber 2012, Lüpnitz 2013). Alle weiteren Ränder des Quaders wurden numerisch als periodische Ränder behandelt.

Im vierten, wichtigsten Schritt erfolgte die numerische (stationäre) Lösung der NSB-Gleichung auf dem erstellten FE-Netz und den definierten Randbedingungen. Während der Simulation wurde das Konvergenzverhalten kontrolliert und protokolliert. Nach erfolgreicher Konvergenz des Gleichungssystems erzeugte ein Postprozessor ein lokal aufgelöstes Vektorfeld der kartesischen Fluidgeschwindigkeitskomponenten sowie ein skalares Druckfeld über das gesamte Modellgebiet.

Im fünften und letzten Schritt wurden die Druck- und Fluidvektorfelder als Ergebnisdateien eingelesen und mit ParaView (ParaView 2014) auf relativ einfache Art und Weise halbautomatisch visualisiert und quantitativ ausgewertet. Die Strömungsrichtung und der Druck ließen sich damit auf verschiedene Art und Weise, z. B. als Vektorfeld, Strömungsgeschwindigkeit, Stromlinien und Druckfarbskala an beliebigen Modell-Lokationen darstellen (Abb. 2 und 3). Es ließen sich so detaillierte Aussagen über den Einfluss verschiedener zu testender Parameter und Modellgeometrien auf den Durchfluss studieren (z. B. Einfluss der Durchlässigkeiten des Aquifers, des Filtermaterials, des Filterausbaus der Filterstrecke und Filtergeometrie, von Richtungsanordnungen und Einbauten im Brunnenraum wie z. B. einer Messeinrichtung).

Ergebnisse der Experimente

Abbildung 2 demonstriert eine PHREASIM-Simulation bei niedriger Anstromgeschwindigkeit (von links nach rechts) in einem Brunnenraum ausgestattet mit einem Wickeldrahtfilter (DN100 nach DIN 4935 2006), und zwar in Form von Profillinien der Druck- und Geschwindigkeitsverteilung im Modellgebiet (Abb. 2a), der horizontalen Strömungslinien (Abb. 2b), sowie horizontale und vertikale Detaildarstellungen (Abb. 2c und d). Diese Darstellungen erlauben unmit-

telbar die Beurteilung der hydromechanischen Verhältnisse an jeder Stelle im Modellgebiet.

Das Druckprofil (Abb. 2a, rote Profillinie) zeigt einen typischen, hydrodynamisch zu erwarteten Verlauf durch das Modellsystem. Nach Einstellung des hydraulischen Gleichgewichtes (Gültigkeit des Darcy-Regimes) muss sich zwangsweise ein solches Profil einstellen. Der Druck nimmt (von links nach rechts) in den porösen Bereichen (Aquifer und Filtermaterial) linear mit wechselnden Gradienten ab. Im (freien) Brunnenraum selbst hingegen zeichnet sich offensichtlich kein nennenswerter Druckgradient ab. Die minimalen lokalen Unterschiede bestimmen das dort herrschende Strömungsverhalten (Navier-Stokes-Regime). Das Geschwindigkeitsprofil (Abb. 2a, grüne Profillinie) zeigt dagegen die auftretende Dynamik der Fließverhältnisse. Das Fluid wird systematisch zum Filter hin zunehmend beschleunigt, um in den Filterengstellen (Rohrschlitz) das Maximum an Geschwindigkeit zu erreichen. Nach Passage durch den Brunnenraum verlangsamt sich das Fluid symmetrisch (bedingt durch den Aufbau des Modellgebietes) wieder zur Austrittsstelle hin. Der in Abbildung 2b dargestellte Verlauf der Stromlinien im Modellsystem korrespondiert mit den von Klotz (1971) vorgestellten Laborexperimenten, aus denen die Grundlagen zur Entwicklung des Korrelationsterms α abgeleitet wurden (Drost et al. 1968 und Abbildung 1a).

Abbildung 3 zeigt eine Simulation mit im Brunnenraum eingebauter PHREALOG-Messzelligeometrie (schematisch durch mehrere Streben mittig verteilt im Messfeld). Die hydrodynamischen Strömungsparameter Druck und Geschwindigkeitsvektoren in Betrag und Richtung lassen sich an jeder beliebigen Stelle im Modellgebiet auslesen und statistisch auswerten, so wie in der Lokation des Messfeldes des PHREALOG-Messsystems (Abb. 3c). Daraus kann direkt die Streuung, Varianz der Fließrichtung sowie Fließgeschwindigkeit an jeder Stelle im Messfeld abgeleitet werden. Insgesamt zeigt sich in jedem direkt verglichenen Einzelexperiment mit der entsprechenden Simulation eine visuell nahezu exakte Übereinstimmung (übereinstimmende Geometrie und Randbedingungen vorausgesetzt). Abbildung 4 zeigt drei repräsentative Beispiele getesteter Systeme jeweils im direkten Vergleich Experiment gegen Simulation mit den in Tabelle 1 gelisteten Randbedingungen, bzw. verschiedenen Geometrien und Anstromgeschwindigkeiten. Sowohl laminares Fließverhalten in Wickeldrahtfiltern (Abb. 4a, b) als auch horizontale (Abb. 4c, d) und vertikale Walzenausbildung (Abb. 4e, f) werden geometriegenau fluidmechanisch abgebildet.

Abbildung 5 zeigt Simulationsergebnisse dargestellt im Schnitt durch die horizontale und vertikale Mitte des Modellraums. In Abbildung 5a–c sind die Simulationsergebnisse von drei Fließszenarien mit identischen hydraulischen Randbedingungen aber mit unterschiedlicher

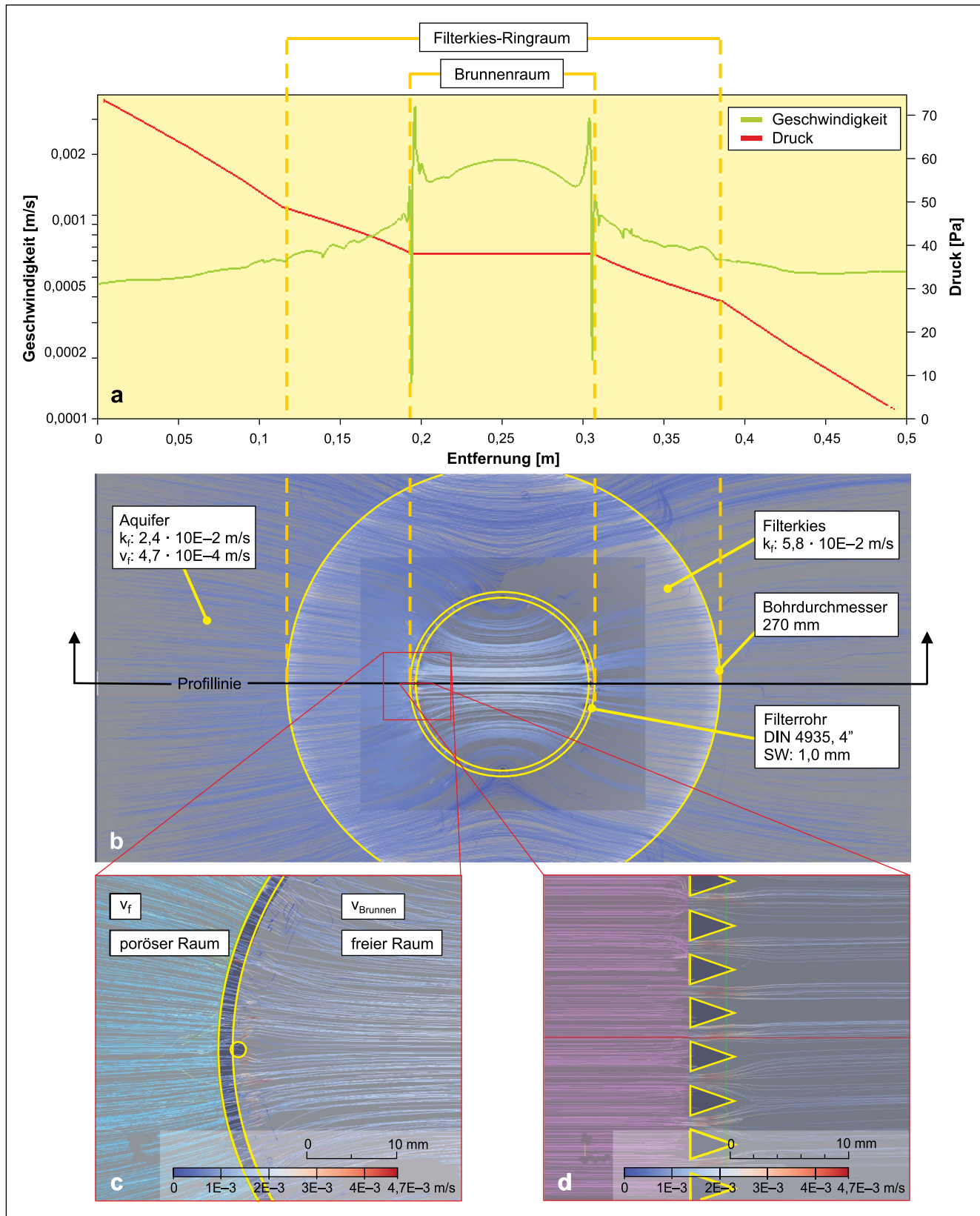
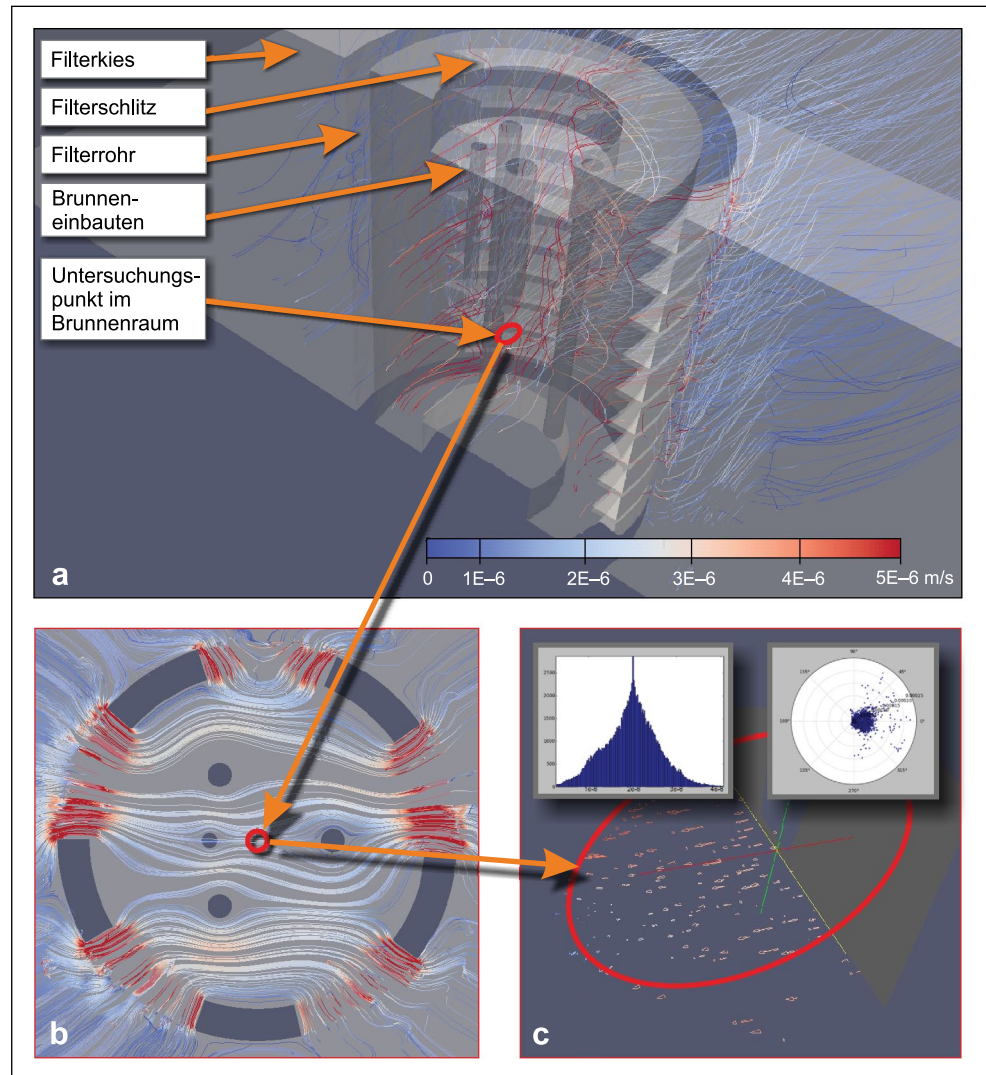


Abb. 2 Darstellungsformen einer Simulation zur Beurteilung der hydromechanischen Verhältnisse an jeder Stelle im Modellgebiet. **a** Druck- und Geschwindigkeitsprofil entlang der Anstromrichtung inkl. der Herausstellung wesentlicher baulicher Merkmale der Modellgeometrie; **b** Draufsicht der Modellgeometrie; Darstellung des

Strömungsverlaufs mittels Stromlinien und der hydraulischen Randbedingungen; **c** Aufsicht im Detail mit der Darstellung der Stromlinien und den Domänen Aquifer, Filterrohr und Brunnenraum; **d** Seitlicher Schnitt im Detail mit der Darstellung der Stromlinien und den Domänen Aquifer, Filterrohr und Brunnenraum.

Abb. 3 Simulation mit im Brunnenraum eingebauter Messzellegeometrie (a und b). Die hydrodynamischen Strömungsparameter Druck und Geschwindigkeitsvektoren in Betrag und Richtung lassen sich an jeder beliebigen Stelle im Modellgebiet auslesen und statistisch auswerten. Daraus können direkt die Streuung, die Varianz der Fließrichtung sowie die Fließgeschwindigkeit an jeder Stelle im Messfeld abgeleitet werden (c).

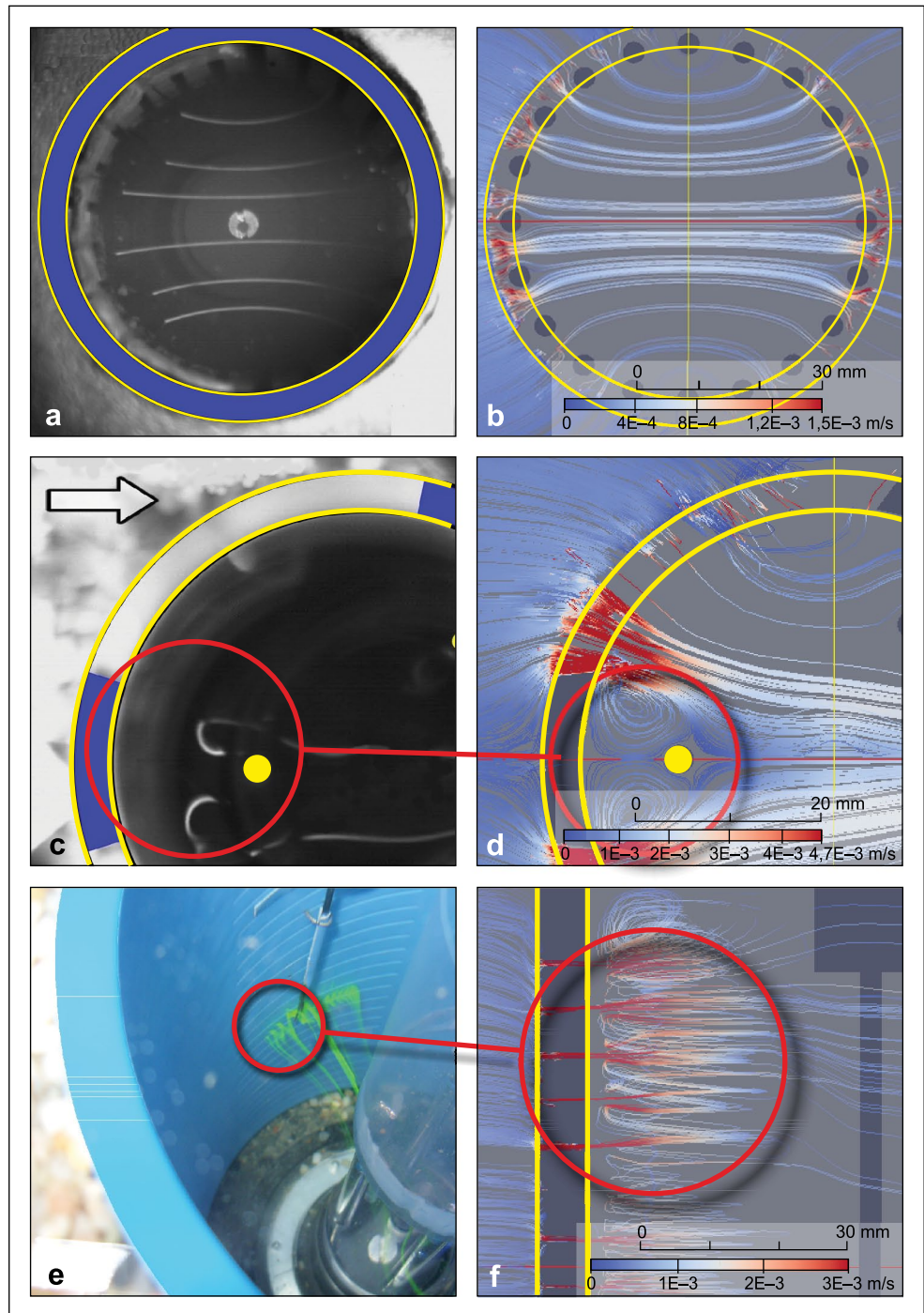


Anordnung der eingesetzten Bauformen zum Anstrom hin gegenübergestellt. Zu sehen sind jeweils das Filterrohr-element, in der Aufsicht mit drei Schlitten und drei Stegen (DN50 nach DIN 4925 1999) und in der Seitenansicht mit den Filterschlitten, des Weiteren vier zylinderförmige Elemente (Streben) im Brunnenraum, wovon drei rotations-symmetrisch um die axiale Mitte angeordnet sind, sowie die Durchflussbahnen am und im Brunnenraum. In der Seitenansicht sind die Formelemente transparent dargestellt. In Abbildung 5a–c wird die Anordnung der drei Streben jeweils 90° um die axiale Mitte gedreht und das Filterrohr-element einmal um 45°. Ziel war es, durch die Änderung der Anordnung die Auswirkung auf die Durchflusssituation in der axialen Mitte beispielhaft zu untersuchen. Hierzu wurde eine relativ hohe Filtergeschwindigkeit von $5 \cdot 10^{-4}$ m/s an das Modell angelegt, denn Änderungen im Durchflussverhalten treten bei hohen Fließgeschwindigkeiten deutlicher hervor als bei niedrigen. Es zeigt sich anhand der veränderten Fließbahnverläufe und der Ausbildung von Fließwalzen

im Druckschatten der Filterrohrstege deutlich, dass die geometrische Anordnung die stationäre Durchflussgeometrie und -geschwindigkeit im Brunnenraum verändert. Insbesondere auffällig ist die Ausbildung von Fließwalzen, das Auftreten von fast teilturbulenten Strömen an den Filterschlitten unmittelbar beim Austritt in den freien Brunnenraum sowie das Ausdämpfen der Fließgeschwindigkeit mit zunehmendem Abstand zur Innenwandung des Brunnenfilterrohrs (vgl. auch Abb. 4e).

Abbildung 6 zeigt Simulationsergebnisse ähnlich dargestellt wie in Abbildung 5. In Abbildung 6a–c zeigen sich die Simulationsergebnisse von drei Fließszenarien mit unterschiedlichen hydraulischen Randbedingungen aber mit gleichbleibender Anordnung der eingesetzten Bauformen zum Anstrom hin gegenübergestellt. Zu sehen sind jeweils das Filterrohr-element, in der Aufsicht mit fünf Schlitten und fünf Stegen (DN125 nach DIN 4925 1999) und in der Seitenansicht mit verdeckten Filterschlitten, des weiteren fünf zylinderförmige Elemente im Brunnenraum, die rota-

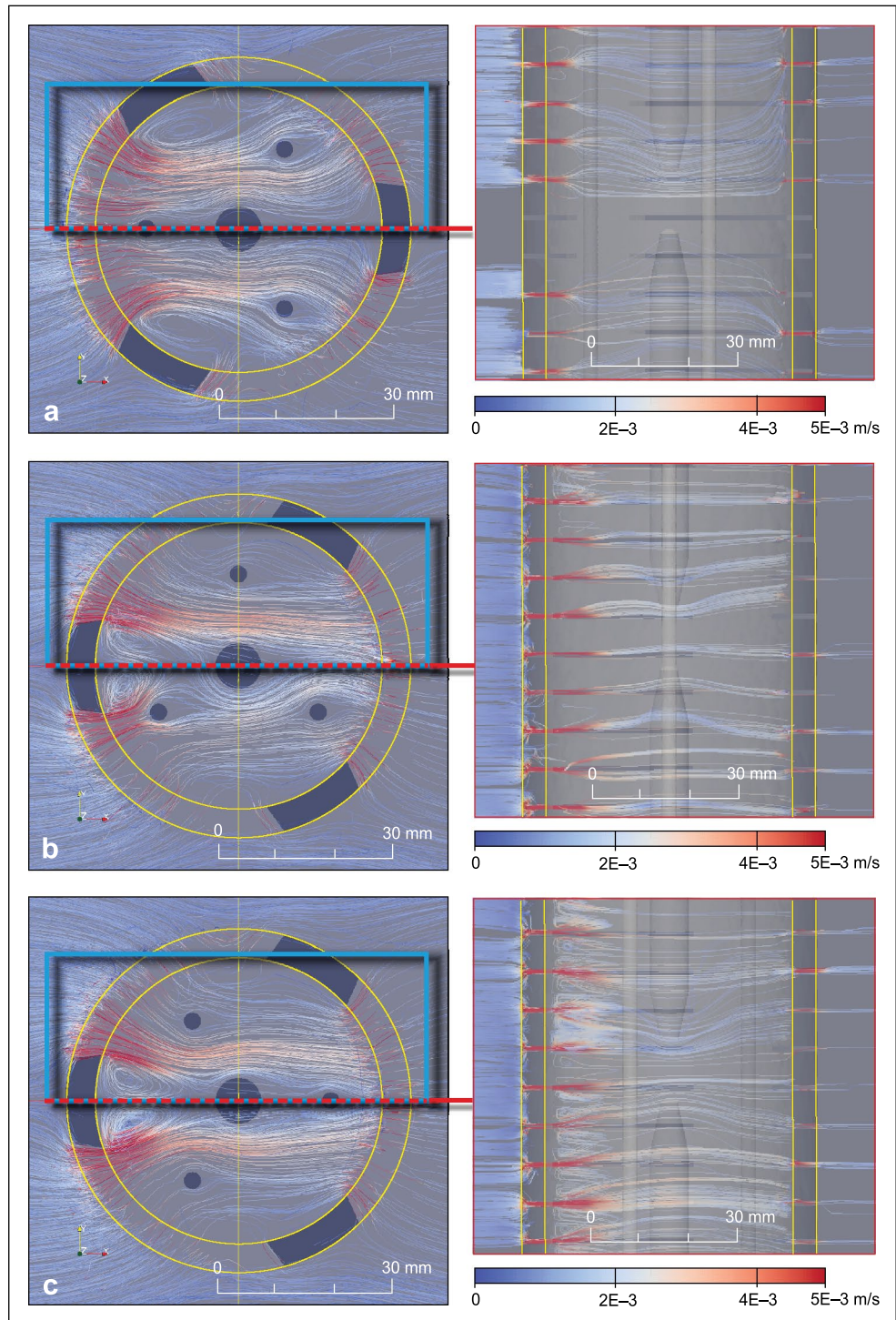
Abb. 4 Gegenüberstellung von Experiment und Simulation anhand repräsentativer Systeme; **a** und **b** laminares Fließen im 2-Zoll-Wickeldrahtfilter; **c** und **d** horizontale Walzenausbildung im 2-Zoll-Schlitzfilterrohr mit eingebauter Messzelle; **e** und **f** vertikale Walzenausbildung im 5-Zoll-Schlitzfilterrohr mit eingebauter Messzelle.



tionssymmetrisch um die axiale Mitte angeordnet sind. Diese Untersuchungsreihe diente dazu, Auswirkungen auf die Durchflusssituation durch eine Änderung der angelegten Filtergeschwindigkeit (vgl. Tab. 2) zu studieren. Bei der kleinsten angelegten Filtergeschwindigkeit herrscht im Brunnenraum eine annähernd symmetrische Durchflussgeometrie vor und ein gleichförmiges Ausströmen aus den Filterschlitzten (Abb. 6a). Bei einer Erhöhung der Filtergeschwindigkeit (Abb. 6b) treten erste horizontale Fließwalzen im Druckschatten der Filterrohrstege auf sowie lang

geformte, in den Brunnenraum hineinragende Fließwalzen an den Filterschlitzten. Bei einer weiteren Erhöhung der Filtergeschwindigkeit (Abb. 6c) verstärken und verflachen sich die horizontalen sowie vertikalen Fließwalzen und ragen zunehmend weiter in den Brunneninnenraum hinein. Dargestellt ist immer ein stationärer Zustand. Für die Betrachtung im zeitlichen Ablauf ist davon auszugehen, dass bereits bei diesen Durchflussverhältnissen die Dynamik der Ausbildung von Fließwalzen zunimmt und mit der Ausbildung anderer Fließwalzen zeitlich konkurrierend wechselwirkt,

Abb. 5 Schnitte durch die horizontale und vertikale Mitte des Modellraums. Simulationen von drei Fließszenarien im 2-Zoll-Schlitzfilterrohr bei identischen hydraulischen Randbedingungen, aber unterschiedlicher Anordnung der eingesetzten Bauformen zum Anstrom gegenübergestellt (**a** Ausgangsposition, **b** Streben rotiert um 90° und Filterrohrelement rotiert um 45° im Uhrzeigersinn, **c** weitere Rotation der Streben um 90° im Uhrzeigersinn). Deutliche Beeinflussung des Durchströmungsverhaltens durch Variationen in der Modellgeometrie.

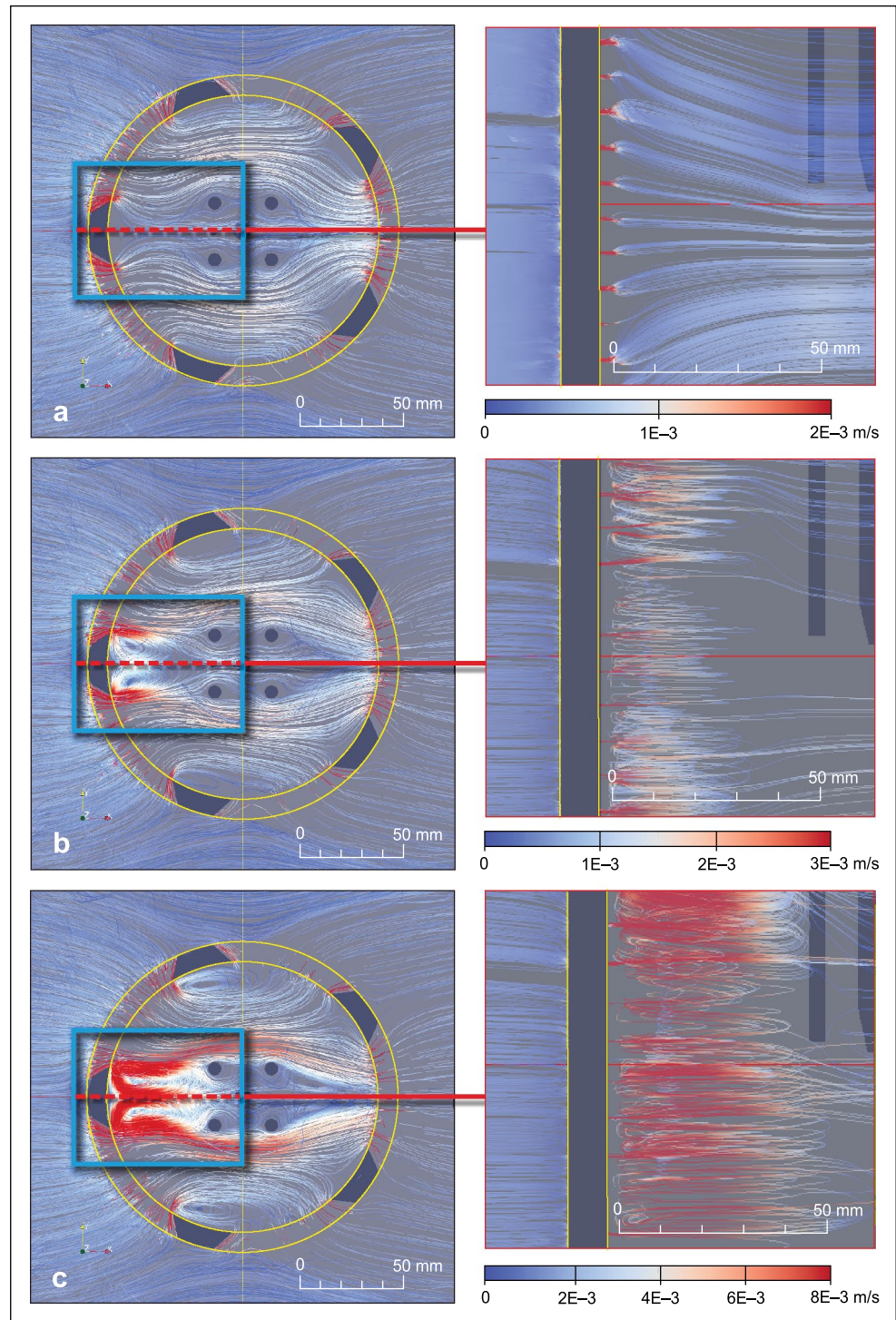


mit der Konsequenz, dass die Durchströmung im Brunnenraum ungleichmäßig erfolgt und somit keine stationäre Durchflussgeometrie mehr gegeben ist.

Die Dimensionen der eingesetzten Formgeometrien und der angelegten Filtergeschwindigkeiten v_f der dargestellten Simulations- und Labormodellexperimente sind in Tabelle 1 und 2 aufgeführt. Aus der Visualisierung der Stromlinien (Abb. 2b und 3) lassen sich die α -Faktoren als

Korrelation zu Formelberechnungen ableiten und systematisch vergleichen. In Tabelle 2 sind die per Simulation berechneten sowie die im Labor gemessenen Geschwindigkeiten im Brunnenraum gegenübergestellt und jeweils mit der angelegten Filtergeschwindigkeit unter Berücksichtigung der jeweiligen Standardabweichung ins Verhältnis gesetzt. Die Tabelle 2 beinhaltet für jede Simulation eine Gegenüberstellung zwischen α -Werten berechnet auf

Abb. 6 Aufsichten und Schnitte von Simulationen mit unterschiedlichen Fluidgeschwindigkeiten im 5-Zoll-Filterrohr und mit eingebauter Messzelle. Von oben nach unten: Ansteigende Anstromgeschwindigkeiten (**a** kleine angelegte Filtergeschwindigkeit, **b** mittlere und **c** hohe Filtergeschwindigkeit, Überleitung in den instationären Durchfluss) bewirken bei gleichbleibender Anordnung der eingesetzten Bauformen die Ausbildung und Verstärkung von horizontalen und vertikalen Fließwalzen.



Grundlage der Formel nach Drost et al. (1968) und einem dem α -Wert entsprechenden Verhältnis zwischen tatsächlich gemessener Strömungsgeschwindigkeit in der axialen Mitte des Brunnenraums und der angelegten Filtergeschwindigkeit v_f (vgl. Abb. 1a). Für das jeweilige Fallbeispiel zeigt sich, dass das aus Werten von Simulation und Laborexperiment resultierende Verhältnis nur in einigen Fällen mit den nach Drost et al. berechneten α -Werte übereinstimmt. In

Abbildung 7 sind die in Tabelle 2 gelisteten Geschwindigkeitsverhältnisse im Vergleich Labor/Simulation als Graph gegenübergestellt. Der bis über 50%-ige Unterschied zwischen beiden Werten führt zu dem Schluss, dass die allein auf Geometrieparametern der ausgebauten Grundwassermessstelle beruhenden α -Werte nach Drost et al. (1968) für eine belastbare Wiedergabe der realen Strömungsverhältnisse im umgebenden Aquifer in der Tat unzulänglich sind.

Tab. 2 Quantitativer Vergleich PHREASIM/Labor und α -Werte nach Drost et al. 1968

Abbildung	Quelle	Angelegte v_f [m/s]	Standardabweichung [m/s] ^a	Mittlere v_{Br} [m/s] ^b	Standardabweichung [m/s] ^c	v_{Br}/v_f	$(v_{Br} + \text{std})/v_f^d$	Alpha-Wert ^e
1a/1b	PHREASIM	4,70E-04		7,97E-04	6,21E-04	1,70	3,02	2,81
3a	Labormodell	2,90E-04	4,77E-07	5,19E-04	9,43E-05	1,79	2,11	2,81
3b	PHREASIM	2,90E-04	–	4,83E-04	3,79E-04	1,67	2,97	2,81
3c	Labormodell	4,47E-04	2,57E-06	6,97E-04	n. b.	1,56	n. b.	1,89
3d	PHREASIM	4,70E-04	–	9,85E-04	1,10E-04	2,10	2,33	1,89
3e	Labormodell	3,11E-04	6,87E-07	1,04E-03	1,80E-05	3,34	3,40	2,01
3f	PHREASIM	3,00E-04	–	6,82E-04	4,35E-04	2,27	3,72	2,01
4a	PHREASIM	5,00E-04	–	1,57E-03	1,47E-03	3,14	6,08	1,89
4b	PHREASIM	5,00E-04	–	1,51E-03	1,45E-03	3,02	5,92	1,89
4c	PHREASIM	5,00E-04	–	1,62E-03	1,48E-03	3,24	6,20	1,89
–	Labormodell	3,11E-04	6,87E-07	1,05E-03	1,98E-05	3,38	3,44	2,01
5a	PHREASIM	3,00E-04	–	4,84E-04	3,80E-04	1,61	2,88	2,01
–	Labormodell	4,24E-04	6,24E-06	2,30E-03	1,25E-05	5,42	5,45	2,01
5b	PHREASIM	4,00E-04	–	9,85E-04	1,06E-03	2,46	5,11	2,01
–	Labormodell	5,11E-04	1,67E-06	3,35E-03	8,16E-06	6,56	6,57	2,01
5c	PHREASIM	5,00E-04	–	1,12E-03	1,67E-03	2,24	5,58	2,01

n. b. nicht bestimmt

^aStandardabweichung Randbedingungen Labordaten (Thermische Effekte, Druckschwankungen, Inhomogenitäten Filterkies- und Aquifermaterial, Messfehler)

^bmittlere Durchflussgeschwindigkeit im freien Brunnenraum beim Experiment aus Tracerfahnen, bei Simulation aus Vektoren abgeleitet

^cStandardabweichung der Ergebnisse; a) aus Laborexperimenten und b) aus den Ergebnisvektoren der Simulationen

^dmittlere Durchflussgeschwindigkeit im freien Brunnenraum (basierend auf Anteil der simulierten Strömungsvektoren > 68,3 % Erwartungswert)

^egeometrischer Alpha-Wert berechnet nach Drost et al. 1968

Dagegen lässt sich an der Regressionsgeraden (Abb. 7) eine hohe Übereinstimmung zwischen Experiment und PHREASIM-Simulation postulieren. Wird nur derjenige Anteil der simulierten Strömungsvektoren im freien Fluidraum (also innerhalb des freien Brunnenraums), der alle Werte > Erwartungswert + 1σ -Standardabweichung entspricht (also nur 31,7 % des Anteils aller freien Geschwindigkeiten, orangene Datenpunkte in Abbildung 7) bei der Verhältnissberechnung berücksichtigt, korrespondieren die Laborergebnisse mit den Simulationsergebnissen ($R^2=0,91$). Ein direkter exakter Vergleich ist leider noch nicht möglich, da an den simulierten Geschwindigkeitsvektoren noch keine Tracertransportsimulation direkt korrespondierend zur experimentellen Tracerausbreitung durchgeführt werden kann. Dies ist numerisch nicht trivial umzusetzen und erfordert eine Weiterentwicklung des PHREASIM-Systems.

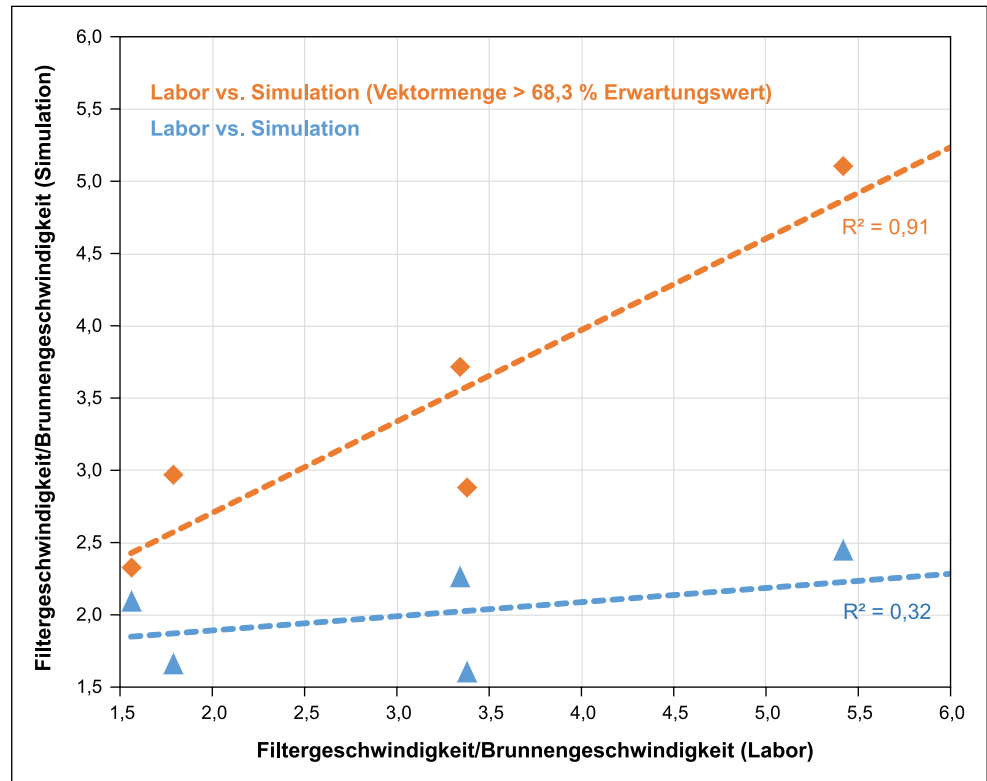
Diskussion

Im Experimentverlauf wurden unterschiedliche fluiddynamische Systeme mit vergleichsweise hohen Fließgeschwindigkeiten im laminaren Regime untersucht, simuliert und gegenübergestellt. Die Simulationen beschreiben einen rein stationären Fließzustand, der sich unter den gegebenen Randbedingungen einstellt, ohne Berücksichtigung der weiteren Entwicklung der Fließdynamik im Zeitverlauf. Diese

Randbedingungen wurden sowohl im Experiment als auch in den Simulationen erfolgreich untersucht. Die Vergleichbarkeit der Laborexperimente untereinander und Vergleiche mit den PHREASIM-Simulationen stellten allerdings einen hohen Anspruch an die Konstanz der Umgebungs-, System- und Fluidtemperatur. Daher wurden alle Laborexperimente und Simulationen mit gleichbleibenden Wassertemperaturen von 22,5 °C, bzw. 25 °C durchgeführt und simuliert. Zwar herrschen bei Untersuchungen im Grundwasser üblicherweise eher Temperaturen von 10–12 °C, jedoch hätte eine Anpassung an reale Temperaturbedingungen den experimentellen Aufwand unverhältnismäßig erhöht. Abweichungen zwischen Experiment und Simulation lassen sich daher eher auf Fehlerquellen in den Experimenten wie der eingeschränkten zeitlichen Konstanz der Randbedingungen (Temperatur und hydraulische Gradienten) bis zum Gleichgewicht und Konvergenzverhalten zurückführen, insbesondere bei niedrigen Anstromgeschwindigkeiten ($< 3,1 \cdot 10^{-4}$ m/s). Zum einen waren im Experimentaufbau flache hydraulische Gradienten ($< 0,004$) nur schwer über ein Überlaufsystem zu kontrollieren, und zum anderen traten dann Dichte- und Thermokonvektionseffekte bei der Tracerausbreitung auf (Schreiber 2012).

In der Simulation wurde das Aquifer- und Filtermaterial zudem als homogen angenommen. Beim Experimentaufbau gelingt es aber letztendlich nicht, vollständige Homogenität zu erreichen. Allerdings ist auch im Feld faktisch keine

Abb. 7 Graphische Gegenüberstellung der in Tabelle 2 gelisteten Geschwindigkeitsverhältnisse im Vergleich Labor/Simulation. Der bis über 50 %-ige Unterschied zwischen beiden Werten zeigt, dass die allein auf Geometrieparametern der ausgebauten Grundwassermessstelle beruhenden α -Werte nach Drost et al. (1968) die realen Strömungsverhältnisse im umgebenden Aquifer nicht hinreichend sind. Die orangenen Datenpunkte und die Regressionsgerade zeigen unter Berücksichtigung oberhalb des Erwartungswertes der simulierten Geschwindigkeitsvektoren im Brunnenraum eine hohe Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation.



Homogenität gegeben. Aus den genannten Gründen treten zwangsläufig Abweichungen zwischen den im Laborexperiment angelegten und gemessenen Geschwindigkeiten zu den simulierten Szenarien auf. Dies zeigt sich im Vergleich der in Tabelle 1 aufgeführten Geschwindigkeitsergebnisse für den Brunnenraum aus Simulationen und Laborexperimenten.

Fazit

Vorrangiges Ziel der Untersuchungen war es, die Gültigkeit der Simulationen mit inhärentem hydromechanisch-numerischem Ansatz zu belegen. Hierzu wurden unterschiedliche Fließszenarien bei variierenden Geometrien und Randbedingungen realisiert und mit analogen Laborexperimenten direkt qualitativ, visuell und quantitativ verglichen. Dadurch konnten die simulierten hydrodynamischen Zustände im Experiment validiert werden. Bei Nachweis der Gültigkeit wird die Kopplung hydraulischer und geometrischer Einflussfaktoren direkt durch die Simulation abgeleitet, wobei die Formfaktoren von Filterrohren und Brunneneinbauten im Zusammenhang mit ihrer geometrischen Orientierung berücksichtigt werden. Es ist jedoch auch zu berücksichtigen, dass mit PHREASIM nur stationäre Fließverhältnisse abgebildet werden. Der direkte praktische Nutzen ergibt sich aus der Möglichkeit, bei bekannten Geometrien und Randbedingungen die realen Fließverhältnisse vorwärts simulie-

ren zu können. Eine automatisierte Auswertung berechnet weitgehend alle hydromechanischen Einflussfaktoren und kann diese als Korrekturfaktoren für klassische Verfahren zur Verfügung stellen.

Ein direkter Nutzen ist die Möglichkeit, die im Feld mit dem weiterentwickelten PHREALOG-Messsystem (Schöttler 2004, 2010, PHREALOG 2014) gewonnenen Messdaten z. B. vorwärts zu simulieren und zu vergleichen. Des Weiteren kann das Bauform-Design von Strömungsmesszellen per hydromechanischer Simulationen zunächst virtuell erprobt und so strömungsmechanisch optimierte Bauformen konstruktiv umgesetzt werden.

Zusammenfassend ergibt sich, dass im gesamten Verlauf der Arbeiten eine hohe Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment erkennbar war wie in diesem Beitrag an einigen Beispielen demonstriert wurde. Die Simulationsergebnisse zeigten im Vergleich mit den Ergebnissen der Laborexperimente deutlich auf, welche Einflussfaktoren sich wie auf die hydromechanischen Verhältnisse auswirken. Ein praktisches Ziel ist daher, in Zukunft bei der Untersuchung von Fließvorgängen am Brunnenraum sowie für analoge Vergleiche zur Validierung von Feldmessdaten auf aufwändige Laborexperimente weitgehend verzichten zu können. Die Abweichungen zwischen den Simulationsergebnissen und den Laborwerten zeigen jedoch auch Grenzen des Ansatzes auf, nämlich dass aufgrund natürlicher Varianz der Randbedingungen Simulationen die realen Gegebenheiten lediglich nur mit guter Näherung abbilden

können. Zur weiteren Validierung des vorgestellten numerischen Modellansatzes werden derzeit Strömungsszenarien aus realen Brunnengeometrievorgaben modelliert, ausgewertet und mit den entsprechenden Felddaten verglichen.

Danksagungen Die vorliegende Arbeit wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des KMU-Innovativ Verbundprojekts „Entwicklung eines modularen Multi-Level-Messsystems zur Messung der Grundwasserfließbewegung in Grundwasseraufschlüssen – FLIMSYS“ (BMBF-FKZ 02WQ1193) gefördert. Dank gilt auch für die Unterstützung bei der Anfertigung und dem Aufbau der Labormodelle durch die Feinmechanische Werkstatt des Instituts für Physik der Atmosphäre der Universität Mainz.

Literatur

- Barczewski, B., Marschall, P.: Entwicklung und Einsatz eines Lichtleiterfluorometers zur kontinuierlichen in-situ Messung von Fluoreszenztracern. Sonderheft zum 9. Nationalen Felsmechanik Kolloquium (Aachen). *Geotechnik*. **13**, 148–153 (1990)
- Barrash, W., Clemo, T., Fox, J., Johnson, T.: Field, laboratory and modeling investigation of the skin effect at wells with slotted casing, Boise hydrogeophysical research site. *J. Hydrol.* **326**, 181–198 (2006)
- Bayless, E.R., Mandell, W., Ursic, R.: Accuracy of flowmeters measuring horizontal groundwater flow in an unconsolidated aquifer simulator. *Ground. Water. Monit. Remediat.* **31**(2), 48–62 (2011)
- Bergmann, H.: Über die Grundwasserbewegung am Filterrohr. GSF-Bericht R24, Gesellschaft für Strahlenforschung München-Neuherberg (1970)
- Bergmann, H.: Hydromechanische Fragen zur Interpretation von Tracermessungen. GSF-Bericht R36, Gesellschaft für Strahlenforschung München-Neuherberg (1971)
- Bidaux, P., Tsang, C.F.: Fluid flow patterns around a well bore or an underground drift with complex skin effects. *Water. Resour. Res.* **27**, 2993–3008 (1991)
- Blunt, M.J., Bijeljic, B., Dong, H., Gharbi O., Iglauer, S., Mostaghimi, P., Paluszny, A., Pentland, C.: Pore-scale imaging and modeling. *Adv. Water Resour.* **51**, 197–216 (2013)
- Brinkman, H.C.: A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles. *Appl. Sci. Res.* **1**, 27–34 (1949)
- Chong-Xi, C., Li-Tang, H. & Xu-Sheng, W.: Analysis of steady ground water flow toward wells in a confined-unconfined aquifer. *Ground. Water.* **44**, 609–612 (2006)
- Ciegis, R., Iliev, O., Lakdawaka, Z.: On parallel numerical algorithms for simulating industrial filtration problems. *Comput. Methods. Appl. Math.* **7**(2), 118–134 (2007)
- DIN 4925: Filter- und Vollwandrohre aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (PVC-U) für Brunnen, Teil 1, Teil 2. Beuth Verlag, Berlin (1999)
- DIN 4935: Wickeldrahtfilterrohre aus nicht rostendem Stahl für Brunnen – Teil 1: DN 40 bis DN 100 mit kontinuierlicher Spaltweite und Gewindeverbindung. Beuth Verlag, Berlin (2006)
- DIN 4924: Sande und Kiese für den Brunnenbau – Anforderungen und Prüfverfahren, Ausgabe 2014–07. Beuth Verlag, Berlin (2014)
- Drießen, J.: Simulation der Strömungsverhältnisse mit einem Navier-Stokes-Brinkmann Ansatz im Umfeld einer Grundwassermess-einrichtung. Diplomarbeit, unveröffentlicht, Universität Mainz (2013)
- Drost, W., Klotz, D., Koch, H., Moser, H., Neumaier, F., Rauert, W.: Point dilution method measuring ground water flow by means of radioisotopes. *Water. Resour. Res.* **4**, 125–147 (1968)
- Englert, A.: Measurement, Estimation and Modelling of Groundwater Flow Velocity at Krauthausen Test Site. Dissertation, RWTH Aachen (2003)
- Enzmann, F.H.: Modellierung von Porenraumgeometrien und Transport in korngestützten porösen Medien. Dissertation, Johannes Gutenberg-Universität Mainz (2000)
- Graw, K.-U., Jagsch, N., Lengricht, J., Schöne, J.: Enhancing groundwater flow information by understanding bore hole flow. *Int. Conf. New Trends in Water and Environmental Engineering for Safety and Life: Eco-Compatible Solutions for Aquatic Environments, Terr@A*, 3–7 July 2000, Naples (2000)
- James, S., Jepsen, R., Beauheim, R., Pedler, W., Mandell, W.: Simulations to verify horizontal flow measurements from a Borehole flowmeter. *Ground. Water.* **44**, 394–405 (2006)
- Jepsen, R., Pedler, W.H.: Laboratory and Numerical Evaluation of Borehole Methods for Subsurface Horizontal Flow Characterization. Sandia Report SAND 2003–2068. <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2003/032068.pdf> (2003). Zugriffen 12. Dez. 2014
- Kearl, P.M.: Observations of particle movement in a monitoring well using the colloidal borescope. *J. Hydrol.* **200**, 323–344 (1997)
- Kerfoot, W.B., Massard, V.A.: Monitoring well screen influences on direct flowmeter measurements. *Ground. Water. Monit. Rev.* **5**, 74–77 (1985)
- Kessels, W., Zoth, G.: Doppelmantel-Packer mit geoelektrischer Messtechnik zur Bestimmung der Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers. Patent P19855048, NLB/GGA Hannover (2000)
- Klotz, D.: Untersuchung von Grundwasserströmungen durch Modellversuche im Maßstab 1:1. *Geologia. Bavarica.* **64**, 75–119 (1971)
- Lüpnitz, N.: Simulation von Modellszenarien mit der Bohrlochsimulations-Software PHREASIM analog zu Laborexperimenten an einem korrespondierenden Strömungsmodell. Diplomarbeit, unveröffentlicht, Universität Mainz (2013)
- Mezhyrov, E.: Simulation der Strömungsverhältnisse an der PHREASIM-Messanordnung im Bohrloch – eine 2D Teststudie. Diplomarbeit, Institut für Geowissenschaften, Johannes Gutenberg-Universität Mainz (2012)
- Momii, K., Jinno, K., Hirano, F.: Laboratory studies on a new laser doppler velocimeter system for horizontal groundwater velocity measurements in a borehole. *Water. Resour. Res.* **29**, 283–291 (1993)
- Morgenstern, A., Börner, F.: Bohrlochgeophysikalische Messung der Grundwasserbewegung bei minimaler Störung des natürlichen Strömungsfeldes. *Grundwasser.* **13**(2), 101–113 (2008)
- NETGEN – Automatic Mesh Generator. www.hpfem.jku.at/netgen (2014). Zugriffen 12. Dez. 2014
- ParaView Version 4.2, Kitware. <http://www.paraview.org/> (2014). Zugriffen 12. Dez. 2014
- PHREASIM – Firmenbroschüre. <http://phrealog.bplaced.net/Joomla2/index.php/en/> (2014). Zugriffen 12. Dez. 2014
- Rage, T.: Studies of tracer dispersion and fluid flow in porous media. PhD Thesis, University of Oslo (1996)
- Rech, M.: Untersuchungen zur horizontalen Strömung in Brunnenfilterrohren nach DIN 4925. Diplomarbeit, unveröffentlicht, Institut für Geowissenschaften der Universität Köln (2000)
- Reigber, A.: Experimentelle Untersuchungen zum Durchflussverhalten an ausgewählten Schlitz- und Wickeldrahtfiltern. Diplomarbeit, unveröffentlicht, Universität Mainz (2013)
- Saenger, E.H., Enzmann, F., Keehm, Y., Steeb, H.: Digital rock physics: effect of fluid viscosity on effective elastic properties. *J. Appl. Geophysics.* **74**, 236–241 (2011)
- Schöttler, M.: Messbarkeit der Grundwasserbewegung durch Visualisierung der Strömung in Bohrbrunnen. Shaker Verlag, Aachen (1997)
- Schöttler, M.: Erfassung der Grundwasserströmung mittels des GFV-Messsystems. *Geotechnik.* **27**, 41–45 (2004)

- Schöttler, M.: In-Situ Grundwasser-Fließmessungen im Deckgebirge und an den Grubenbauwerken des Staßfurter Sattels. In: Gerardi, J. (Hrsg.): Abgesoffene Bergwerke II, Staßfurt 2010 – Erkennen, analysieren, bewerten und prognostizieren der zukünftigen Entwicklung der Bergbaufolgeschäden. EDGG 244, 173–178 (2010)
- Schreiber, W.: Analoges Modell zur Untersuchung horizontaler Strömungen in Brunnenfilterrohren nach DIN 4925 mit eingebauter GFV-Messzelle. Diplomarbeit, Institut für Geowissenschaften, Johannes Gutenberg-Universität Mainz (2012)
- Sell, K., Enzmann, F., Kersten, M., Spangenberg, E.: Microtomographic quantification of hydraulic clay mineral displacement effects during a CO₂ sequestration experiment with saline aquifer sandstone. *Environ. Sci. Tech.* **47**, 198–204 (2013)
- Smolka, M.: Laborexperimente zum Durchflussverhalten in Brunnenfilterrohren DN100 und DN125 nach DIN 4925 mit eingebautem Durchfluss-Messsondendummy. Diplomarbeit, unveröffentlicht, Universität Mainz (2014)
- Wheatcraft, S.W., Winterberg, F.: Steady state flow passing through a cylinder of permeability different from the surrounding medium. *Water. Resour. Res.* **21**, 1923–1929 (1985)
- Wu, Y.-S., Lee, C.-H., Yu, J.-L.: Effects of hydraulic variables and well construction on horizontal borehole flowmeter measurements. *Ground. Water. Monit. R.* **28**, 65–74 (2008)
- Young, S.C., Waldrop, W.R.: An electromagnetic borehole flowmeter for measuring hydraulic conductivity variability. In: Molz F.J., Melville J.C., Guven O. (Hrsg.) *Proceedings of the Conference on New Field Techniques for Quantifying the Physical and Chemical Properties of Heterogeneous Aquifers*, Auburn University, Alabama. National Water Well Association Dublin, Ohio (1989)