

# UNIVERSITY OF BIRMINGHAM

## Research at Birmingham

### Hydraulische Modellierung und die Ermittlung des repräsentativen Elementarvolumens (REV) im Kluftgestein

Blum, P; Mackay, Rae; Riley, Michael; Knight, JL

#### *Document Version*

Publisher's PDF, also known as Version of record

#### *Citation for published version (Harvard):*

Blum, P, Mackay, R, Riley, M & Knight, JL 2006, 'Hydraulische Modellierung und die Ermittlung des repräsentativen Elementarvolumens (REV) im Kluftgestein', Grundwasser.

[Link to publication on Research at Birmingham portal](#)

#### **General rights**

Unless a licence is specified above, all rights (including copyright and moral rights) in this document are retained by the authors and/or the copyright holders. The express permission of the copyright holder must be obtained for any use of this material other than for purposes permitted by law.

- Users may freely distribute the URL that is used to identify this publication.
- Users may download and/or print one copy of the publication from the University of Birmingham research portal for the purpose of private study or non-commercial research.
- User may use extracts from the document in line with the concept of 'fair dealing' under the Copyright, Designs and Patents Act 1988 (?)
- Users may not further distribute the material nor use it for the purposes of commercial gain.

Where a licence is displayed above, please note the terms and conditions of the licence govern your use of this document.

When citing, please reference the published version.

#### **Take down policy**

While the University of Birmingham exercises care and attention in making items available there are rare occasions when an item has been uploaded in error or has been deemed to be commercially or otherwise sensitive.

If you believe that this is the case for this document, please contact [UBIRA@lists.bham.ac.uk](mailto:UBIRA@lists.bham.ac.uk) providing details and we will remove access to the work immediately and investigate.

# Hydraulische Modellierung und die Ermittlung des repräsentativen Elementarvolumens (REV) im Kluffgestein

Philipp Blum · Rae Mackay · Michael S. Riley · John L. Knight

Eingang des Beitrages 27. 7. 2005/Eingang des überarbeiteten Beitrages: 1. 8. 2006/Online veröffentlicht: 1. 3. 2007  
© Springer-Verlag 2007

**Kurzfassung** Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit und des repräsentativen Elementarvolumens (REV) in Kluffgrundwasserleitern, die zur hydraulischen Modellierung von großräumigen Kluffsystemen verwendet werden kann. Für die Ermittlung der Durchlässigkeit wurden zweidimensionale stochastische Kluffnetze simuliert. Aufgrund der Tatsache, dass die Kluffdichten im Untersuchungsgebiet stark variieren, wurde eine Sensitivitätsstudie durchgeführt, in der drei verschiedene Kluffdichten hinsichtlich ihrer hydraulischen Eigenschaften genauer untersucht wurden. Das Fließverhalten in den Kluffnetzen wurde durch das kubische Gesetz (cubic law) beschrieben. Die hydraulische Modellierung im Kluffgestein zeigte, dass nicht für alle Kluffnetze ein REV ermittelt werden konnte. Für Kluffnetze mit einer mittleren ( $P_{21} = 13,1 \text{ m}^{-1}$ ) und großen Kluffdichte ( $P_{21} = 16,9 \text{ m}^{-1}$ ) konnte bis auf eine einzige Ausnahme für alle drei untersuchten Gesteinsformationen

ein REV mit einer Größe von  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  ermittelt werden. Hingegen konnte für Kluffnetze mit einer geringen Kluffdichte ( $P_{21} = 5,1 \text{ m}^{-1}$ ) kein REV bestimmt werden.

## Hydraulic modelling and the evaluation of the representative elementary volume (REV) in fractured rock

**Abstract** The objective of the following study is the development of a method for the evaluation of the hydraulic conductivity and the representative elementary volume (REV) in fractured rock aquifers, which can be used for the hydraulic modelling of large-scale fractured systems. Two-dimensional stochastic discrete fracture networks were simulated for the evaluation of hydraulic conductivity. Due to the strongly variable fracture density in the considered area, a sensitivity study was performed which examined three various fracture densities according to their hydraulic properties. The flow behaviour in the discrete fracture networks is described with the cubic law. The hydraulic modelling in the fractured rock showed that an REV could not be determined for all discrete fracture networks. With one exception, an REV with a size of  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  could be determined for discrete fracture networks with a medium ( $P_{21} = 13.1 \text{ m}^{-1}$ ) and high fracture density ( $P_{21} = 16.9 \text{ m}^{-1}$ ). In contrast, no REV could be found for discrete fracture networks with a low fracture density ( $P_{21} = 5.1 \text{ m}^{-1}$ ).

**Keywords** hydraulic modelling · REV · fractured rock · stochastic fracture network · aquifer

---

Dr. P. Blum,  
Zentrum für Angewandte Geowissenschaften, Eberhard-Karls-Universität Tübingen,  
Sigwartstr. 10, 72076 Tübingen,  
Telefon: +49 7071 29-75496, Telefax: +49 7071 5059,  
E-Mail: philipp.blum@uni-tuebingen.de

Prof. Dr. R. Mackay, M.S. Riley,  
School of Geography, Earth and Environmental Sciences, University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham, B15 2TT, Großbritannien,  
Telefon: +44 121 414-6142/-6163, Telefax: +44 121 414-4942,  
E-Mail: r.mackay@bham.ac.uk, m.riley@bham.ac.uk

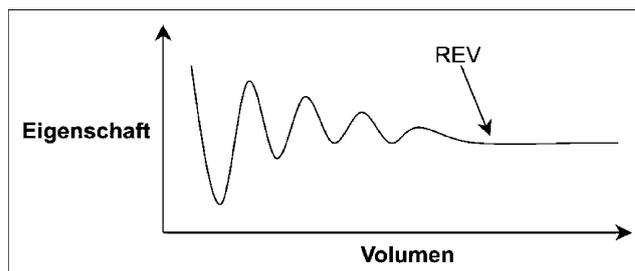
Dr. J.L. Knight,  
United Kingdom Nirex Limited, Curie Avenue, Harwell, Didcot,  
Oxfordshire, OX11 0RH, Großbritannien,  
Telefon: +44 1235 825447, Telefax: +44 1235 820560,  
E-Mail: les.knight@nirex.co.uk

## Einleitung

Mehrere Länder betrachten momentan Kluffgesteine als potenzielles Wirtsgestein (Witherspoon & Bodvardsson

2001) oder als konkretes Wirtsgestein für die Einlagerung nuklearer Abfälle (z.B. USA, Schweden und Finnland). In Deutschland sollen gemäß den Ergebnissen des Arbeitskreises Endlager (AkEnd 2002) Kluffgesteine als potenzielles Wirtsgestein für die Einlagerung nuklearer Abfälle nicht ausgeschlossen werden. Abgesehen von der Einlagerung radioaktiver Abfälle kann die hier vorgestellte Methode auch im Bereich der Altlastenuntersuchung (z.B. Schadstoffausbreitung im Kluffgestein), in der Einlagerung nicht-radioaktiver toxischer Stoffe in ehemalige Bergwerke und in der Modellierung von geothermischen, Erdöl- und Erdgasreservoirs angewendet werden. Für die Bewertung der hydraulischen Eigenschaften einer potenziellen Einlagerung radioaktiver Abfälle in Kluffgesteine ist das Verständnis und die Quantifizierung der Unsicherheiten dieser geologischen Systeme von großer Bedeutung. Der Transport von Radionukliden in Kluffgesteinen erfolgt dabei fast ausschließlich durch das vorhandene Kluffnetz dieser Gesteine, die meistens den Hauptfließweg zwischen dem Untergrund und der zu schützenden Biosphäre darstellen. Aufgrund dieser Tatsache ist das Verständnis der Kluffnetzgeometrie und deren Einfluss auf das Fließ- und Transportverhalten von großer Bedeutung für die Bewertung der Einlagerung radioaktiver Abfälle in Kluffgesteine.

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des internationalen Forschungsvorhabens DECOVALEX III (1999–2004), das sich mit thermisch-hydraulisch-mechanischen (THM) Prozessen in geotechnischen Barrierestoffen und im Kluffgestein auseinandersetzt. DECOVALEX ist das Synonym für die Entwicklung von gekoppelten Modellen und deren Validierung mit Experimenten in der Isolation radioaktiver Abfälle (DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments in nuclear waste isolation). Die erste Phase dieses Forschungsvorhabens beschäftigte sich von 1992 bis 1995 mit der Entwicklung und der Validierung von gekoppelten Modellen (Stephansson et al. 1996). Die zweite Phase hingegen untersuchte spezielle Probleme von geotechnischen Barriersystemen und bearbeitete realistische Fragestellungen bezüglich der Lagerung radioaktiver Abfälle (z.B. Hudson et al. 2001). In der dritten Phase des Forschungsvorhabens DECOVALEX III wurde u. a. ein Vergleichstest (Bench Mark Test 2) definiert, der sich mit der Problematik des Aufskalierens (Upscaling) und der Bedeutsamkeit von gekoppelten hydro-mechanischen (HM) Prozessen im Kluffgestein befasste (Stephansson et al. 2004). Die Datengrundlagen für diesen Vergleichstest stammten aus den Untersuchungsprogrammen zur geplanten Einlagerung radioaktiver Abfälle aus der Umgebung von Sellafield (Großbritannien) und wurden zum Teil durch eigene Felduntersuchungen ergänzt. Die Untersuchungen zur Standortcharakterisierung wurden in den 90er Jahren von United Kingdom Nirex Limited durchgeführt (z.B. Nirex 1997a) und bilden die Grundlage der vorliegenden Studie.



**Abb. 1** Prinzip der Ermittlung des repräsentativen Elementarvolumens (REV) nach Bear (1972).

Das untersuchte Kluffgestein im Bereich der potenziellen Einlagerung besteht aus einem vulkanischen Kluffgestein, der Borrowdale Volcanic Group aus dem Ordovizium in Cumbria, England.

Die vorhandenen Kluffdaten und die Ermittlung der stochastischen Kluffparameter werden anschließend ausführlich diskutiert. Die ermittelten Daten zur Beschreibung der Kluffnetzgeometrie stellen die Grundlage für die Modellierung stochastischer Kluffnetze dar, welche für die hydraulische Modellierung verwendet wurden. Das Fließverhalten in Kluffnetzen spielt ebenfalls eine sehr große Rolle bei der Eignungsprüfung. Zur Ermittlung der Eignung eines Kluffgesteins zur Einlagerung radioaktiver Abfälle müssen u. a. großräumige hydraulische Modellierungen im Kilometermaßstab durchgeführt werden, die die Grundwasserfließzeit zwischen tiefgelagerten radioaktiven Abfällen und der Biosphäre ermitteln (z.B. Heathcote et al. 1996, McKeown et al. 1999). Solche großräumigen Kluffsysteme bestehen aus Millionen von Einzelklüften, die aufgrund der fehlenden Speicherkapazitäten zum heutigen Zeitpunkt nicht erfolgreich simuliert werden können. Infolgedessen ist es unmöglich, diese Systeme durch reine hydraulische Kluffnetzmodellierungen zu untersuchen. Das Kluffsystem kann jedoch nach Prüfung eventuell durch ein äquivalentes poröses Kontinuum ersetzt werden, welches eine großräumige hydraulische Modellierung mit einem für Porengrundwasserleiter entwickelten Modellierungsprogramm ermöglicht (z.B. MODFLOW, Harbaugh et al. 2000, FAT3D, Blum et al. 2005). Das äquivalente poröse Kontinuum kann für zwei- und dreidimensionale (2D- und 3D-) Kluffsysteme ermittelt werden (z.B. Long et al. 1982, Andersson et al. 1984). Die hier simulierten Kluffnetze, deren Charaktereigenschaften wie die Kluffdichte und -länge mit einer Power-law-Funktion beschrieben werden können, waren ausschließlich zweidimensionaler Natur, sodass u. a. Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt werden konnten, um somit die Sensitivitäten der einzelnen Kluffparameter und besonders der Kluffdichte eingehender untersuchen zu können. Zur Berechnung des äquivalenten porösen Kontinuums (EPK) wird der äquivalente Durchlässigkeitstensor des repräsentativen Elementarvolumens (REV) benötigt. Das Konzept des REV

im porösen Medium basiert auf der Charakterisierung und Extrapolation kontinuierlicher hydraulischer Eigenschaften im Raum. Ein REV ist das minimale Volumen eines untersuchten Systems, nach dem die betrachtete Eigenschaft des Systems überwiegend konstant bleibt (Bear 1972, Abb. 1).

Kann ein REV ermittelt werden, so kann für dieses Volumen der äquivalente Durchlässigkeitstensor bestimmt werden. Eine Garantie, dass ein REV für jedes Kluftsystem ermittelt werden kann, besteht aber nicht (Neuman 1994). Für fraktale Systeme zum Beispiel kann kein REV definiert werden, da das REV-Konzept lediglich lineares Skalieren betrachtet (Barton 1995). Ziel der vorliegenden Studie ist die Entwicklung einer Methode zur Ermittlung des REV im Kluftgestein als Grundlage für die hydraulische Modellierung von großräumigen Kluftsystemen. Besondere Berücksichtigung erfahren dabei die dargelegten Unsicherheiten bzw. Sensitivitäten der einzelnen Kluftparameter und deren Einfluss auf das Fließverhalten im Kluftgestein.

### Ermittlung und Auswertung von Kluftdaten

Das hydraulische Verhalten von Kluftgesteinen ist stark abhängig von der Geometrie des Kluftsystems. Aus diesem Grunde sind die Beschreibung und Ermittlung der Kluftparameter von großer Bedeutung für die Untersuchung des Fließverhaltens von Kluftgesteinen. Pollard & Aydin (1988) fassen die Kenntnisse über das allgemeine Verständnis von Klüften, wie z. B. deren Entstehung, zusammen. Diese Arbeit stellt eine ausführliche Einführung in die Problematik von Klüften dar. Im Allgemeinen sind folgende 10 Kluftparameter zur Beschreibung von Kluftsystemen notwendig (z. B. Lee & Farmer 1993):

- (1) Kluftorientierung,
- (2) Kluftabstand bzw. Kluftdichte,
- (3) Kluftlänge bzw. Kluftfläche,
- (4) Kluftrauigkeit,
- (5) Kluftfestigkeit,
- (6) Kluftöffnungsweite,
- (7) Kluftfüllung,
- (8) Kluftverbindung,
- (9) Anzahl der Kluftscharen,
- (10) Kluftfläche bzw. Blockgröße.

Priest (1993) beinhaltet eine ausführliche Zusammenfassung, wie Klüfte beschrieben und beprobt werden. Bei der Ermittlung der einzelnen Kluftparameter werden grundsätzlich Erfassungsfehler eingeführt, die bei der anschließenden Auswertung berücksichtigt werden müssen. Zhang & Einstein (1998) diskutieren 4 verschiedene Haupttypen von Erfassungsfehlern: (1) Orientierungsfehler, (2) Größenfehler, (3) Kürzungsfehler (truncation bias) und (4) Zensierungsfehler. Infolgedessen muss zum Beispiel die beobachtete relative Klufthäufigkeit vor der statistischen Auswertung der

Kluftorientierung durch den Orientierungsfehler korrigiert werden (z. B. Terzaghi 1965, Wathugala et al. 1990).

Für die Simulation von 2D-Kluftnetzen sind grundsätzlich drei Kluftparameter erforderlich: (1) Kluftorientierung, (2) Kluftdichte und (3) Kluftlänge. Die Ermittlung und Auswertung dieser Kluftparameter werden anschließend ausführlich beschrieben. Die weiteren Kluftparameter werden für hydraulische und mechanische Untersuchungen im Kluftgestein benötigt (Blum et al. 2005). Die Kluftdaten, die für den Vergleichstest zur Verfügung gestellt wurden, stammen überwiegend aus zwei Gutachten (Nirex 1997a und 1997b). Drei unterschiedliche vulkanische Gesteinsformationen wurden genauer untersucht und deren 2D-stochastische Kluftnetze simuliert und visualisiert. Diese Kluftnetze dienen als Grundlage für die hydraulische Modellierung und zur Ermittlung des hydraulischen repräsentativen Elementarvolumens (REV). Ein Beispiel für das untersuchte Kluftsystem bestehend aus einem Ignimbrit vom Craghouse Park in Cumbria (Lake District, England) ist in Abbildung 2 dargestellt.

### Kluftorientierung

Die Kluftorientierung ist definiert durch das Streichen (Fallrichtung orthogonal zum Streichen) und das Fallen (Fallwinkel) einer Kluftfläche. Beide Parameter zur Ermittlung der Kluftorientierung können an Bohrkernen, in Bohrlöchern und/oder an Aufschlüssen ermittelt werden. Das Einmessen der Kluftorientierung im Feld erfolgt gewöhnlich mit einem Geologenkompass. Feng et al. (2001) hingegen entwickelten eine alternative und indirekte Methode unter Verwendung eines Theodoliten, die es erlaubt, die Kluftorientierung ohne direktes Auflegen eines Kompasses zu bestimmen. Mit dieser Methode ist es möglich, auch unzugängliche Kluftflächen, wie zum Beispiel an steilen Steinbruchböschungen einzumessen. Jede einzelne Gesteinsformation bzw. Kluftaufnahme kann durch statistische Analysen untersucht werden. Die Kluftparameter der vorliegenden Studie wurden anhand von Bohrloch- und Aufschlussdaten ermittelt. Die durchgeführten Cluster-Analysen zeigten, dass alle drei Gesteinsformationen aus 4 Einzelkluftscharen bestehen (Nirex 1997a). Durch die statistische Auswertung konnte jede Kluftschar durch eine mittlere Fallrichtung und einen mittleren gemessenen Fallwinkel eindeutig beschrieben werden (Tab. 1). Die ermittelten Werte der einzelnen Gesteinsformationen wichen bis auf die 1. Kluftschar der Gesteinsformation 1 nur geringfügig voneinander ab und deuten auf eine ähnliche Kluftgeometrie.

Aufgrund der Tatsache, dass in der vorliegenden Arbeit 2D-Kluftnetze simuliert werden, müssen die 3D-gemessenen Fallwinkel  $\alpha$  in 2D-äquivalente (scheinbare) Fallwinkel  $\beta$  umgerechnet werden. Diese Umrechnung ist abhängig

von der gewählten Orientierung der Schnittebene für die 2D-Kluftmodellierung, die gewählte Orientierung betrug 159°. Folgende Gleichung wurde für die Ermittlung der scheinbaren Fallwinkel verwendet:

$$[1] \quad \tan\beta = \tan\alpha \cdot \cos\theta$$

Der Winkel  $\theta$  ist dabei der Winkel zwischen der Schnittebene und der mittleren Fallrichtung der gewählten Kluftschar. Durch die Tatsache, dass die 4. Kluftschar bei allen drei Gesteinsformationen beinahe parallel zur Schnittebene orientiert ist, wurde diese Kluftschar bei der weiteren Betrachtung vernachlässigt. Ein Sachverhalt, der lediglich durch eine 3D-Kluftnetzmodellierung vermieden werden könnte. Generell ist hier festzustellen, dass 3D-Kluftnetze, die eine bessere Vernetzung als 2D-Kluftnetze aufweisen, grundsätzlich eine höhere hydraulische Verbindung als 2D-Kluftnetze aufweisen und aus diesem Grund einen erhöhten hydraulischen Durchfluss besitzen.

Neben der mittleren Fallrichtung und dem mittleren Fallen kann bei der Kluftorientierung auch die Streuung um die mittlere Kluftorientierung beschrieben werden. Verschiedene Verteilungsfunktionen stehen hierfür grundsätzlich zur Verfügung, wie z. B. die Fisher-, die Bingham bivariate Normal- und die bivariate logarithmische Normalverteilung (Lee & Farmer 1993). Die Streuung der Kluftorientierung der einzelnen Kluftscharen wurde in dieser Studie mit der häufig verwendeten Fisher-Verteilung angepasst (Tab. 1). Die Form dieser Verteilungsfunktion wird durch die Fisher-Konstante  $K$  beeinflusst. Eine große Konstante bedeutet eine kleine Streuung und eine kleine Konstante hingegen eine große Streuung. Die in Tabelle 1 aufgeführten Konstanten wurden für die drei untersuchten

Gesteinsformationen bestimmt und liegen zwischen 5,9 und 13, was auf eine relativ große Streuung deutet. Der Einfluss der Fisher-Konstante auf die Kluftnetzgeometrie und das Fließverhalten im Kluftgestein wird nachfolgend im Zusammenhang der Modellierung von stochastischen Kluftnetzen diskutiert.

### Kluftdichte

Die Kluftdichte und der Kluftabstand kann wie die Kluftorientierung auch an Bohrkernen, in Bohrlöchern und/oder an Aufschlüssen ermittelt werden. Die am häufigsten angewendete Methode für die Ermittlung der Kluftabstände und der Kluftdichten ist die lineare Scanline-Methode (z. B. Priest 1993, Narr 1996). Folgende Verteilungsfunktionen werden überwiegend zur Beschreibung der Kluftabstände verwendet: (1) Negative exponentiale Verteilungsfunktion (z. B. Priest & Hudson 1981), (2) logarithmische Verteilungsfunktion (z. B. Dershowitz & Einstein 1988), (3) gamma-Funktion (Castaing et al. 1996) und die Power-law-Funktion (z. B. Bonnet et al. 2001). Ein wichtiger Aspekt bei der Auswertung der einzelnen Kluftparameter insbesondere der Kluftdichte ist deren räumliche Verteilung in der untersuchten Gesteinsformation (z. B. Ryan et al. 2000). Die räumliche Verteilung der Kluftdichte und die räumliche Anhäufung von Klüften wird häufig auch mit einer fraktalen Verteilung beschrieben. Barton (1995) beschreibt verschiedene Methoden zur Ermittlung der fraktalen Dimension von Kluftnetzen. Bonnet et al. (2001) geben eine ausführliche Zusammenfassung über das Skalieren von Kluftsystemen.

**Tab. 1** Zusammenfassung einzelner Kluftparameter.

Gesteinseinheit	Kluftschar	Fallrichtung	Gemessener Fallwinkel $\alpha$	Scheinbarer Fallwinkel $\beta$	Mittlerer realer Kluftabstand [m]	Mittlerer scheinbarer Kluftabstand [m]	Maximaler Kluftabstand [m]	Fisher-Konstante
Gesteinsformation 1	1	145	8	7,8	0,29	0,29	5,35	5,9
	2	148	88	88,0	0,26	0,25	2,21	9,0
	3	21	76	71,5	0,28	0,19	2,01	10,0
	4*	87	69	38,8	0,31	0,14	3,54	10,0
Gesteinsformation 2	1	28	25	17,0	0,51	0,49	4,29	7,2
	2	156	81	81,0	0,35	0,35	2,50	9,4
	3	20	72	66,7	0,28	0,19	3,83	11,0
	4*	90	68	41,6	0,41	0,21	2,26	8,1
Störungszone	1	21	8	6,0	0,18	0,18	1,43	6,8
	2	150	76	75,8	0,18	0,18	1,41	11,0
	3	21	72	66,4	0,19	0,13	1,06	13,0
	4*	85	74	43,9	0,22	0,08	1,32	6,9

\* vernachlässigte Kluftschar

**Abb. 2** Aufschluss 1 des untersuchten Kluftsystems bestehend aus einem Ignimbrit am Craghouse Park in Cumbria, England (Die Spitze des Geologenhammers zeigt in Richtung Norden).



In der vorliegenden Studie standen grundsätzlich drei unterschiedliche Datensätze zur Beschreibung der Kluftabstände und der Kluftdichten zur Verfügung (Nirex 1997a und b). Der erste Datensatz wurde ausschließlich aus Bohrlochdaten (Tab. 1) und der zweite wurde aus Aufschlusskartierungen ermittelt (Gl. 2). Der dritte Datensatz, der ebenfalls auf Aufschlusskartierungen basiert, wird anschließend im Rahmen der Kluftlänge diskutiert. Der Erfassungsfehler bei der Ermittlung der Kluftabstände aus den Bohrlochern wurde mithilfe der Methode von Terzaghi korrigiert (Terzaghi 1965). Der Kluftabstand bzw. die Kluflhäufigkeit (= Anzahl der Klüfte/Einheitslänge,  $P_{10}$  nach Dershowitz 1984) wurde anhand des mittleren vertikalen Kluftabstands für alle drei Gesteinsformationen berechnet (Tab. 1) und ergab folgende Kluflhäufigkeiten: Gesteinsformation 1 mit  $P_{10} = 14,1 \text{ m}^{-1}$ , Gesteinsformation 2 mit  $P_{10} = 10,8 \text{ m}^{-1}$  und die Störungszone mit  $P_{10} = 20,9 \text{ m}^{-1}$ . Im zweiten Datensatz wurde die Kluftdichte anhand von Aufschlusskartierungen und Luftbildaufnahmen ermittelt, dabei konnte die geringe, mittlere und große Kluftdichte (= Gesamtkluftlänge/Fläche,  $P_{21}$  nach Dershowitz 1984) in Abhängigkeit der minimalen Kluftlänge  $L_{\min}$  durch folgende Power-law-Funktion angepasst und beschrieben werden (Nirex 1997b):

$$[2] \quad P_{21} = k \cdot L_{\min}^{-1}$$

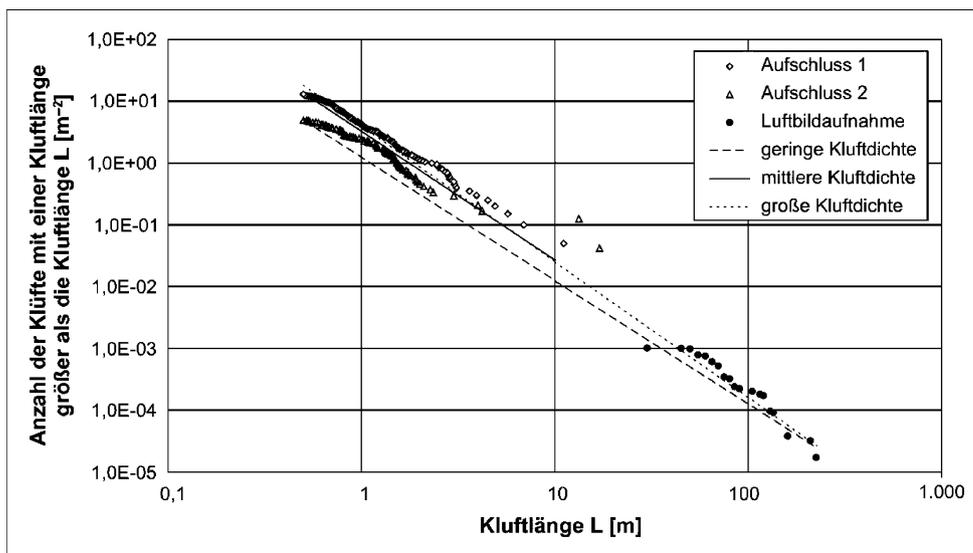
In der vorliegenden Arbeit wurde eine minimale Kluftlänge  $L_{\min}$  von 0,5 m gewählt, da kleinere Kluftlängen aufgrund des zu hohen Aufwands bei der Kluftaufnahme nicht aufgenommen wurden. Für die geringe Kluftdichte wurde eine Konstante  $k$  von 1,0, für die mittlere Kluftdichte eine

Konstante  $k$  von 2,4 und für die große Kluftdichte eine Konstante  $k$  von 5,0 angepasst. Daraus ergibt sich eine geringe Kluftdichte  $P_{21}$  von  $2,0 \text{ m}^{-1}$ , eine mittlere Kluftdichte von  $4,8 \text{ m}^{-1}$  und eine große Kluftdichte von  $10,0 \text{ m}^{-1}$  für Kluftnetze mit einer Kluftlänge von  $\geq 0,5 \text{ m}$ . Sowohl die Kluflhäufigkeit  $P_{10}$  als auch die Kluftdichte  $P_{21}$  zeigen große Unterschiede und verdeutlichen, wie heterogen die Kluftdichte im Untersuchungsgebiet verteilt ist. Aufgrund dieser Tatsache und der Beobachtung im dritten Datensatz, der anschließend ausführlich diskutiert wird, wurde eine Sensitivitätsstudie für die Kluftdichte und deren Auswirkung auf die Ermittlung des REV durchgeführt.

### Kluftlänge

Die Kluftlänge kann im Gegensatz zu den zwei vorherigen Kluftparametern, Kluftorientierung und Kluftdichte, nur sehr bedingt an Bohrkernen und/oder in Bohrlöchern ermittelt werden. Daher ist es erforderlich die Kluftlänge anhand von Aufschlüssen und/oder Luftbildaufnahmen aufzunehmen. Die Erfassungsfehler bei der Aufnahme der Kluftlänge müssen ebenfalls korrigiert werden (z. B. Pickering et al. 1995). Die Kluftlängendaten werden häufig durch eine logarithmische Normal- und Exponentialverteilung angepasst (z. B. Lee & Farmer 1993), jedoch zeigen mehrere Autoren, dass die Kluftlängenverteilung und die Verteilung der Störungslängen ebenfalls durch eine Power-law-Verteilung angepasst werden kann (z. B. Bonnet et al. 2001). Der Vorteil der Power-law-Verteilung gegenüber den gebräuch-

**Abb. 3** Verteilung und Anpassung der kumulativen Kluftlängenverteilung mithilfe der Power-law-Funktion (Daten aus Nirex 1997b).



lichen Verteilungen (Normal-, logarithmische Normal- und Exponentialverteilung) ist die genauere Beschreibung der langen Kluft- bzw. Störungslängen, die aufgrund des Verbindungspotenzials bei der hydraulischen Charakterisierung von Kluftnetzen eine besondere Bedeutung haben (Bour & Davy 1997).

Der dritte Datensatz beschreibt sowohl die Kluftlänge als auch die Kluftdichte in Abhängigkeit von einer minimalen Kluftlänge  $L_{min}$ . Die Kluftlängen wurden anhand von zwei Aufschlüssen (Aufschluss 1, Abb. 2) und einer Luftbildaufnahme, die beide Aufschlüsse beinhaltet, am Craghouse Park in der Nähe von Gosford bei Sellafeld (England) aufgenommen (Nirex 1997b). Die längenabhängige Anzahl der Klüfte und der Lineamente der Luftbildaufnahme konnten mithilfe der Power-law-Funktion angepasst werden und sind in Abbildung 3 dargestellt (3. Datensatz). Die Kluftanzahl pro Fläche ( $P_{20}$  nach Dershowitz 1984) mit einer Kluftlänge größer als die Kluftlänge  $L_{min}$  kann im Allgemeinen wie folgt beschrieben werden:

$$[3] \quad P_{20} = C \cdot L_{min}^{-D}$$

Die Konstante C ist dabei abhängig von der Kluftdichte und der Größe des beobachteten Kluftsystems und nimmt grundsätzlich bei steigender Kluftdichte zu. Die fraktale Dimension D hingegen beschreibt die Steigung der Funktion und ist abhängig von der Kluftlängenverteilung. Eine fraktale Dimension D von  $< 2,0$  bedeutet, dass lange Kluftlängen im 2D-Kluftsystem dominieren und eine fraktale Dimension D von  $> 2,0$  hingegen bedeutet, dass überwiegend kurze Kluftlängen im 2D-Kluftsystem dominieren.

Die kumulative Verteilungsfunktion der Kluftlängenverteilung der Power-law-Funktion in Gleichung 3, die zum Erstellen von stochastischen Kluftnetzen erforderlich ist, lautet (Riley 2004):

$$[4] \quad F(L) = 1 - \left( \frac{L}{L_{min}} \right)^{-D}$$

Durch diese Funktion kann die Kluftlänge L in Abhängigkeit von der minimalen Kluftlänge  $L_{min}$  und der fraktalen Dimension D berechnet werden. Des Weiteren kann die mittlere Kluftlänge  $\mu_L$  mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$[5] \quad \mu_L = \frac{D}{D-1} L_{min}$$

Folglich ist es möglich, bei Kenntnis der minimalen Kluftlänge  $L_{min}$ , der fraktalen Dimension D und der Konstanten C, die Kluft Häufigkeit  $P_{20}$  mit Gleichung 3, die mittlere Kluftlänge  $\mu_L$  mit Gleichung 5 und die Kluftdichte wie folgt zu berechnen:

$$[6] \quad P_{21} = \mu_L \cdot P_{20}$$

Die Kluftlängen, die in den beiden Aufschlüssen 1 und 2 aufgenommen wurden, lagen zwischen 0,5 und 17,0 m. Die Längen der Lineamente aus der Luftbildaufnahme lagen hingegen zwischen 30,0 und 225,0 m (Abb. 3). Die Kluftdichte  $P_{21}$  im Aufschluss 1, bei der ausschließlich die ursprünglichen Kluftdaten (ohne Anpassung mit der Power-law-Funktion) betrachtet wurden, beträgt  $8,7 \text{ m}^{-1}$ . Im Aufschluss 2 hingegen beträgt die Kluftdichte  $P_{21}$   $16,5 \text{ m}^{-1}$ . Bereits bei der Auswertung des 1. (Tab. 1) und 2. Datensatzes (Gl. 2) wurden stark schwankende Kluft Häufigkeiten  $P_{10}$  und Kluftdichten  $P_{21}$  beobachtet, die vom 3. unabhängigen Datensatz (Abb. 3) grundsätzlich bestätigt wurden.

Aus diesem Grunde wurde eine Sensitivitätsstudie mit einer geringen (1. Fall), mittleren (2. Fall) und großen (3. Fall) Kluftdichte betrachtet, um dadurch die Sensitivität der Kluftdichte auf das hydraulische Verhalten eines

**Tab. 2** Zusammenfassung der Sensitivitätsstudie mit unterschiedlichen Kluftdichten.

Fall	Konstante $C$ [–]	Fraktale Dimension $D$ [–]	Kluft-häufigkeit $P_{20}$ [m <sup>-2</sup> ]	Mittlere Kluftlänge $\mu_L$ [m]	Kluftdichte $P_{21}$ [m <sup>-1</sup> ]
1. Fall: große Kluftdichte	4,00	2,20	18,38	0,92	16,91
2. Fall: mittlere Kluftdichte	3,23	2,08	13,66	0,96	13,11
3. Fall: geringe Kluftdichte	1,20	2,20	5,51	0,92	5,07

Kluftsystems genauer untersuchen zu können. Der 3. Datensatz (Abb. 3) besitzt gegenüber dem 1. und 2. Datensatz grundsätzlich zwei Vorteile. Zum einen können sowohl die Kluftdichte als auch die Kluftlänge statistisch mit den Gleichungen 3 und 4 beschrieben werden. Zum Anderen lässt der 3. Datensatz aufgrund seiner Beobachtung von langen Kluftlängen die Erstellung von Kluftnetzen mit Kluftlängen von > 17,0 m zu. Die Anpassung der drei untersuchten Fälle erfolgte deshalb ausschließlich mithilfe des 3. Datensatzes aus Abbildung 3, in der die jeweilige Anpassung graphisch dargestellt ist. Die aus der Anpassung resultierenden Parameter  $C$  und  $D$  mit Gleichung 3 und die daraus berechneten Klufterhäufigkeiten  $P_{20}$  (Gl. 3), die mittleren Kluftlängen  $\mu_L$  (Gl. 5) und die Kluftdichten  $P_{21}$  sind in Tabelle 2 für alle 3 Fälle zusammengefasst.

### Modellierung von stochastischen Kluftnetzen

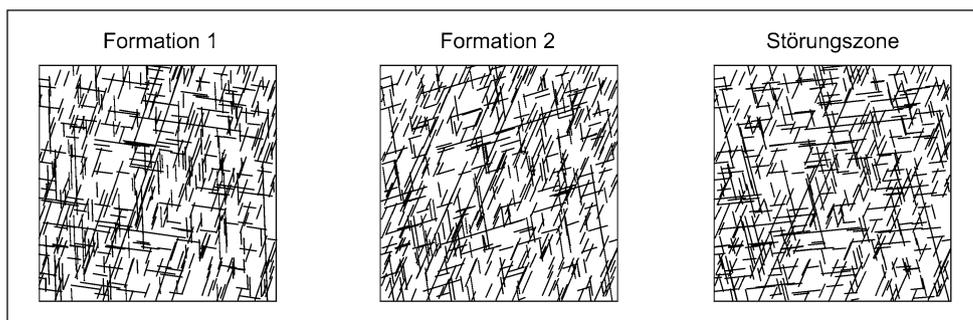
Für die Modellierung von stochastischen Kluftnetzen stehen grundsätzlich mehrere kommerzielle Programme, wie z. B. NAPSAC (Herbert & Lanyon 1994), FracMan (Dershowitz et al. 1998) und UDEC (Itasca 2000), zur Verfügung. Dennoch wurde aufgrund der besseren Handhabung und der individuellen Anpassung ein eigenes Programm mithilfe von Visual Basic für Applikationen in Microsoft® Excel entwickelt (Blum 2004). Das entwickelte Programm FracFrac ermöglicht die Modellierung 2D-stochastischer Kluftnetze mit einer Kluftlängenverteilung gemäß Gleichung 3. Chilès (1988) unterscheidet grundsätzlich zwischen zwei verschiedenen Kluftnetzmodellen. Diese sind (1) das Poisson-Modell, bei dem der Kluftmittelpunkt zufällig auf der Fläche bzw. im Raum verteilt wird und (2) das fraktale Modell, bei dem der Kluftmittelpunkt gemäß einer fraktalen Funktion im Raum verteilt wird (z. B. Acuna & Yortsos 1995). Die betrachteten Kluftnetze am Craghouse Park bei Gosford zeigen optisch keine fraktale Verteilung der Kluftmittelpunkte, deswegen wurde zur Festlegung des Kluftmittelpunkts das Poisson-Modell in FracFrac gewählt.

Durch Gleichung 3 und der in Tabelle 2 aufgeführten Parameter  $C$  und  $D$  wird die gesamte Kluftanzahl in Abhängigkeit einer definierten Fläche bestimmt. Diese Ge-

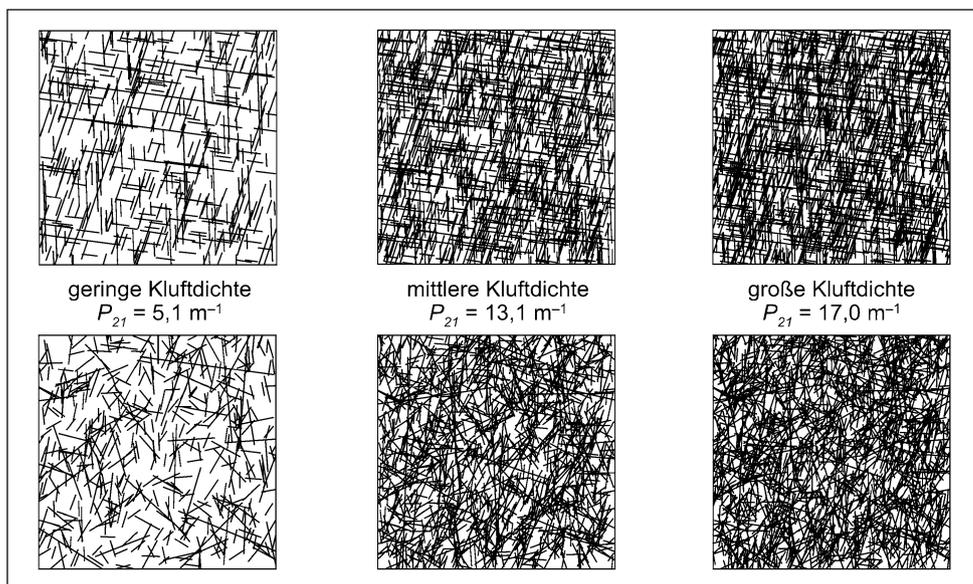
samtluftanzahl wurde anschließend mit den mittleren scheinbaren Kluftabständen aus Tabelle 1 gewichtet, sodass für jede Einzelkluftschar eine definierte Anzahl an Klüften in Abhängigkeit des Kluftabstands generiert werden kann. Nach Festlegung des zufällig generierten Kluftmittelpunkts wurden für jede Kluft der entsprechende scheinbare Fallwinkel  $\beta$  und die Kluftlänge  $L$  benötigt. Der scheinbare Fallwinkel einer bestimmten Kluftschar kann in FracFrac durch die in Tabelle 1 aufgeführten Mittelwerte definiert werden oder auch durch einen von der Fisher-Verteilung definierten Wert bestimmt werden. Eine ausführliche Beschreibung zur Bestimmung des scheinbaren Fallwinkels anhand der Fisher-Verteilung ist in Blum (2004) aufgeführt. Die Ermittlung der Kluftlänge erfolgt durch eine zufällige Beprobung der in Gleichung 5 definierten kumulativen Verteilungsfunktion. Mit dem Kluftmittelpunkt, dem scheinbaren Fallwinkel und der Kluftlänge ist eine Kluft mit ihren zwei Endpunkten eindeutig in einer Fläche definiert. Dieser Vorgang wird nun so lange für jede Kluftschar wiederholt, bis die vorher bestimmte Kluftanzahl erreicht ist. Für jeden untersuchten Fall konnten somit für alle drei Gesteinsformationen 2D-stochastische Kluftnetze mit einer Power-law-Kluftlängenverteilung und einer Fisher-Verteilung für die Kluftorientierung generiert werden (Abb. 4 und Abb. 5).

Die 2D-stochastischen Kluftnetze der drei Gesteinsformationen ähneln sich sehr und zeigen nur geringfügige Unterschiede bei deren Kluftorientierung auf (Abb. 4). Der 1. Fall der drei untersuchten Fälle mit unterschiedlicher Kluftdichte hingegen weist ein sichtbar unterschiedliches Kluftnetz hinsichtlich der Kluftdichte auf, individuelle Klüfte sind deutlich erkennbar (Abb. 5). Ein ganz anderes Erscheinungsbild hingegen weisen die 2D-stochastischen Kluftnetze mit der Fisher-Verteilung zur Berücksichtigung der Streuung der Kluftorientierung auf (Abb. 5). Diese Kluftnetze scheinen rein zufälliger Natur zu sein und zeigen keinerlei Ordnung. Der visuelle Vergleich dieser Kluftnetze mit Kluftnetzen aus dem Feld veranschaulicht deutlich, dass Kluftnetze mit einer großen Streuung der Kluftorientierung keine realistischen Kluftnetze produzieren und nicht mit beobachteten Kluftnetzen vergleichbar sind (Blum 2004). Aus dieser Beobachtung wird deutlich, dass die Streuung

**Abb. 4** Zweidimensionale stochastische Klufnetzwerke mit einer geringen Kluftdichte der drei untersuchten Gesteinsformationen (Klufnetzgröße = 10 m × 10 m, geringe Kluftdichte = 1. Fall).



**Abb. 5** Zweidimensionale stochastische Klufnetzwerke mit unterschiedlicher Kluftdichte ohne (oben) und mit Fisher-Verteilung (unten, Klufnetzgröße = 10 m × 10 m, Formation 1).



der Kluftorientierung abhängig ist von der Kluftlänge, dabei zeigen die langen Klüfte eine kleine Streuung und die kurzen Klüfte eine große Streuung. Wu & Pollard (2002) beobachteten ebenfalls eine Abnahme von der Abweichung der Kluftorientierung innerhalb einer Kluftschar mit zunehmender Kluftlänge. Aus diesem Grund wurden die Klufnetzwerke mit der Fisher-Verteilung für die nachfolgende hydraulische Modellierung nicht weiter betrachtet.

**Hydraulische Modellierung**

Ziel der hydraulischen Modellierung ist die Bestimmung des Durchlässigkeitstensors und die Ermittlung des repräsentativen Elementarvolumens (REV) in Abhängigkeit von der Kluftdichte. Die hydraulische Modellierung der Klüfte wurde mit dem Simulationsprogramm FRAC2D durchgeführt (Blum et al. 2005), das mithilfe analytischer Lösungen und dem kommerziellen Programm UDEC (Universal Distinct Element Code, Itasca 2000) verifiziert wurde. Dabei zeigte FRAC2D gegenüber UDEC eine höhere Genauigkeit im Strömungsbudget (Blum 2004). Das Fließverhalten im

Klufgestein wird grundsätzlich durch das kubische Gesetz (cubic law) beschrieben (Snow 1965 und Louis 1967), das in allen hier erwähnten kommerziellen Programmen (z. B. FracMan, NAPSAC und UDEC) verwendet wird, um den Durchfluss in Klüften zu berechnen. Dieses Gesetz für Klufgesteine entspricht dem Gesetz nach Darcy für poröse Lockergesteine. Das kubische Gesetz, das den zweidimensionalen laminaren Durchfluss Q zwischen zwei unendlich ausgedehnten parallelen Platten beschreibt, lautet:

$$[7] \quad Q = \frac{\rho g}{12\mu} a^3 \nabla h$$

Zur Berechnung des Durchfluss Q [L<sup>3</sup>T<sup>-1</sup>] in einer Kluft benötigt man die Dichte des durchströmenden Wassers ρ [ML<sup>-3</sup>], die Gravitationsbeschleunigung g [LT<sup>-2</sup>], die dynamische Viskosität des Wassers μ [ML<sup>-2</sup>T<sup>-1</sup>], den hydraulischen Gradienten ∇h [-] und die Klufthöhenweite a [L], die die wichtigste Größe zur Berechnung des Durchflusses in einer Kluft darstellt. Aufgrund der Vereinfachung der Kluft in Gleichung 7 als parallele und ebene Platten, wurden die Gültigkeit und die Anwendung des kubischen Gesetzes auf natürliche, nicht-parallele und raue Klüfte vielfach angezweifelt und ausführlich diskutiert (z. B. Witherspoon

et al. 1980, Thompson & Brown 1991, Renshaw 1995 und Berkowitz 2002). Tsang (1993) zum Beispiel untersuchte den Einfluss 3D-variabler Kluftöffnungsweiten anhand hydraulischer Modellierungen in einem 3D-Kluftsystem und fand heraus, dass variable Kluftöffnungsweiten zu einer Kanalisierung (Channeling) des Durchflusses entlang der größten verbindenden Kluftöffnungsweiten führen.

Dennoch kann festgestellt werden, dass das parallele Plattenmodell des kubischen Gesetzes seine Gültigkeit besitzt, wenn die Veränderungen der Kluftöffnungsweite entlang des Fließweges nur geringfügig sind und eine geeignete hydraulische Kluftöffnungsweite gewählt wird (z. B. Brown 1987, Moreno et al. 1988). Die mittlere Kluftöffnungsweite ist die effektive Kluftöffnungsweite, die auch als die hydraulische Kluftöffnungsweite bezeichnet wird. Diese hydraulische Kluftöffnungsweite sollte nicht auf der Basis eines Punkt-zu-Punkt-Kontaktes gemessen werden, was der mechanischen Kluftöffnungsweite entsprechen würde, sondern als ein Mittelwert über eine bestimmte Länge (Oron & Berkowitz 1998). Generell gibt es zwei Methoden zur Ermittlung der Kluftöffnungsweiten, die direkte und die indirekte Methode. Die direkte Methode ermittelt die echte natürliche Verteilung der Kluftöffnungsweite (z. B. Hakami & Larsson 1996). Die indirekte Methode hingegen ermittelt die mittlere effektive Kluftöffnungsweite mithilfe von Tracer-, Pump- und Einschwingversuchen (z. B. Tsang 1992, Poteri et al. 2002). Lee et al. (1996) verglichen eine indirekte (Infiltrationsexperiment) und eine direkte Methode, welche auf der Grundlage des Barton-Bandis-Modells basiert (Bandis et al. 1983), miteinander. Sie konnten demonstrieren, dass die zwei ermittelten mittleren hydraulischen Kluftöffnungsweiten die gleiche Größenordnung besitzen. In der vorliegenden Arbeit wurde aufgrund von Vorgaben aus dem Vergleichstest (Bench-Mark-Test 2) eine konstante hydraulische Kluftöffnungsweite von 130,7  $\mu\text{m}$  gewählt. Dennoch kann anhand Gleichung 16 auf eine beliebige Kluftöffnungsweite unter Annahme des kubischen Gesetzes (Gl. 7) skaliert werden. Für die nachfolgenden hydraulischen Berechnungen wurde die Dichte des Wassers mit 1.000  $\text{kg}/\text{m}^3$ , die Gravitationsbeschleunigung mit 9,81  $\text{m}/\text{s}^2$  und die dynamische Viskosität des Wassers mit 0,001  $\text{kg}/\text{ms}$  angenommen.

### Ermittlung des Durchlässigkeitstensors

Verschiedene Methoden wurden zur Ermittlung des Durchlässigkeitstensors im Kluftgestein entwickelt. Eine Methode beispielsweise verwendet die Randbedingungen eines Permeameters, was bedeutet, dass auf der linken und rechten Seite eines 2D-Kluftnetzes eine konstante Druckhöhe angenommen wird und auf der unteren und oberen Seite kein Zufluss und keine Druckhöhe verwendet wird (z. B. Panda &

Kulatilake 1999). Der Nachteil dieser Methode ist die obere und untere Randbedingung, die das Fließverhalten an den Rändern nicht vollständig erfassen kann und dadurch die Heterogenität des Kluftnetzes nur eingeschränkt beschreiben kann. Long et al. (1982) hingegen entwickelten eine Methode, die an allen vier Seiten eine Druckhöhe annimmt und während der wiederholenden Berechnung des Durchflusses durch das Kluftnetz unter gleichen Randbedingungen das 2D-Kluftnetz rotieren. Eine vergleichbare Methode, die im Gegensatz zur Methode von Long et al. (1982) nicht das Kluftnetz, sondern die Randbedingungen rotiert, wurde von Jackson et al. (2000) entwickelt. Auf Grundlage dieser Methode wurde die nachfolgende Methode zur Ermittlung des 2D-Durchlässigkeitstensor hergeleitet.

Der 2D-Durchlässigkeitstensor wird mittels der sechsmaligen Rotation der Randbedingungen berechnet, dabei wird der hydraulische Gradient in jeweils 30°-Schritten von 0° bis 150° an das Kluftnetz angelegt. Anschließend wird für jede Simulation der Durchfluss innerhalb des Kluftnetzes mit dem Programm FRAC2D berechnet. Der auf diese Weise simulierte Durchfluss pro Einheitsfläche für jede Kluftnetzseite basiert folglich auf dem kubischen Gesetz (Gl. 7). Darauf folgend wird nun angenommen, dass dieser simulierte Durchfluss über die Kluftnetzseiten ebenfalls mit dem Gesetz von Darcy beschrieben werden kann. Mithilfe dieser Annahme können dadurch die Durchflussraten in x- und y-Richtung pro Einheitsfläche  $q_x$  und  $q_y$  [ $\text{LT}^{-1}$ ] und die drei Komponenten des Durchlässigkeitstensors  $k_{xx}$ ,  $k_{xy}$  und  $k_{yy}$  [ $\text{LT}^{-1}$ ] mit folgender Gleichung nach Darcy beschrieben werden:

$$[8] \quad \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{xy} & k_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial h}{\partial y} \end{bmatrix}$$

Zur Vereinfachung wurde ein Einheitsgradient  $h$  von 1 gewählt, aus dem sich der hydraulische Gradient in x- und y-Richtung durch folgende Gleichungen ergibt:

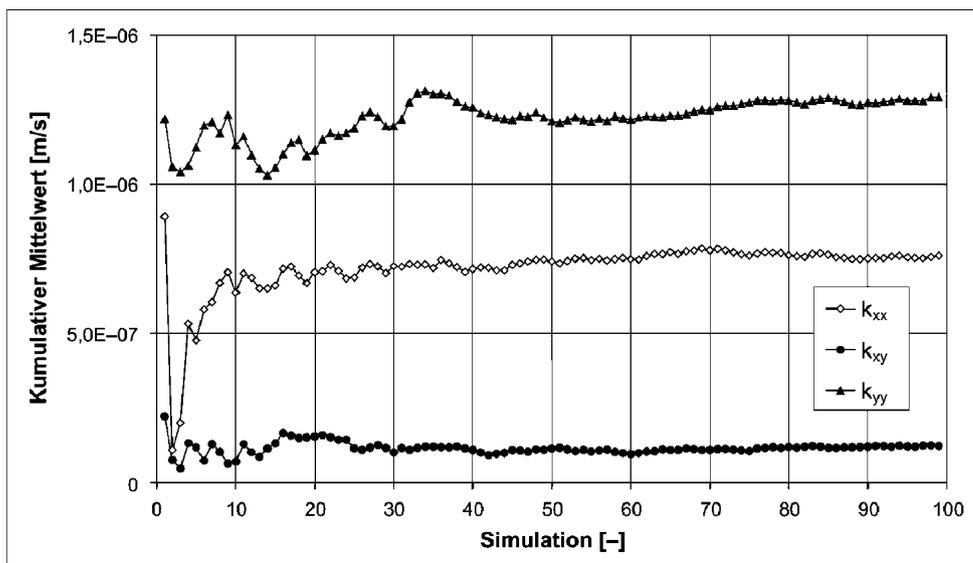
$$[9] \quad \frac{\partial h}{\partial x} = \cos \theta$$

$$[10] \quad \frac{\partial h}{\partial y} = \sin \theta$$

Der Winkel  $\theta$  in Gleichung 9 und 10 ist der Winkel des angelegten hydraulischen Gradienten von der x-Achse gegen den Uhrzeigersinn. Die drei Komponenten des 2D-Durchlässigkeitstensors können nun durch die Anpassung bzw. Minimalisierung des sechsfach simulierten Durchflusses mit FRAC2D basierend auf der Gleichung 7 und des Durchflusses nach Gleichung 8 mit folgender Funktion abgeschätzt werden:

$$[11] \quad \sum_{i=1}^6 \left\{ [q_x - (k_{xx} \cos \theta_i + k_{xy} \sin \theta_i)]^2 + [q_y - (k_{xy} \cos \theta_i + k_{yy} \sin \theta_i)]^2 \right\}$$

**Abb. 6** Kumulative Mittelwerte der drei angepassten Komponenten des Durchlässigkeitsensors (Kluftnetzgröße = 5 m × 5 m, Kluftdichte = 1. Fall, Formation 1).



Die Qualität der Anpassung  $\chi^2$  wurde für jedes Kluftnetz mit folgender Gleichung bestimmt:

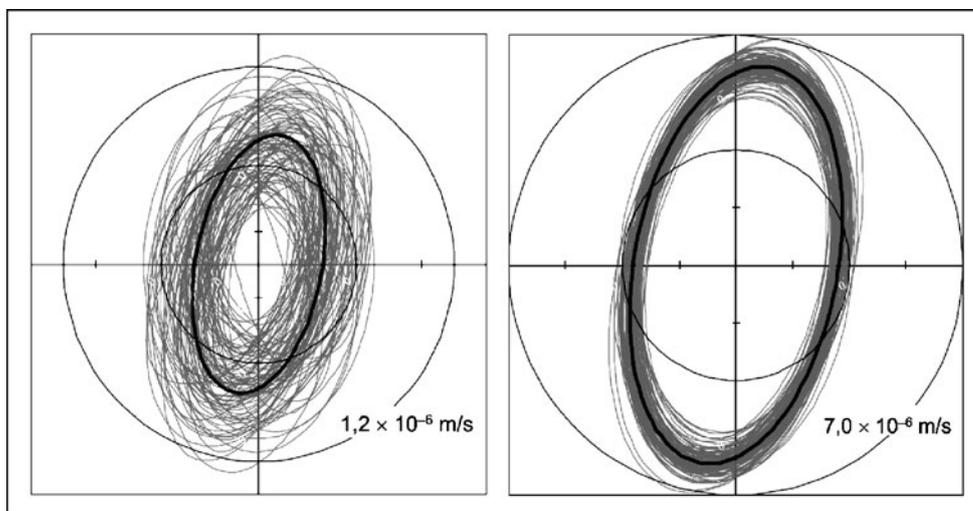
$$[12] \chi^2 = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=6}^n \frac{[q_i - q_i']^2}{\sigma_{q_i}^2}$$

Dabei wird die Durchflussrate  $q_i$  aus der hydraulischen Kluftnetzmodellierung mit dem Programm FRAC2D bestimmt, die Durchflussrate  $q_i'$  aus der Anpassung mit Gleichung 11 und  $\sigma_{q_i}^2$  ist die Standardabweichung der berechneten Durchflussraten  $q_i$ . Ein  $\chi^2$ -Wert zwischen 0,95 und 1,0 bedeutet grundsätzlich eine sehr gute Anpassung, welche überwiegend für Kluftnetze mit einer großen Kluftdichte (3. Fall) ermittelt wurde. Eine gute Anpassung ( $\chi^2 = 0,90-0,95$ ) wurde für die Kluftnetze mit einer mittleren Kluftdichte (2. Fall) festgestellt. Eine weniger gute Anpassung ( $\chi^2 < 0,90$ ) hingegen ergab sich vor allem für Kluftnetze mit einer geringen Kluftdichte (1. Fall). Die Qualität der Anpassung er-

höhte sich grundsätzlich mit der Zunahme der Kluftdichte und mit der Zunahme der betrachteten Kluftnetzgröße.

Im nächsten Schritt wurde festgelegt, wie viele Einzelsimulationen für eine bestimmte Kluftnetzgröße erforderlich sind, um einen hinreichend genauen mittleren Durchlässigkeitsensor, bestehend aus seinen drei Komponenten, bestimmen zu können. Der kumulative Mittelwert und die kumulative Varianz der drei angepassten Komponenten wurden hierzu als Konvergenzkriterium verwendet. Wie erwartet nimmt die Konvergenz grundsätzlich mit zunehmender Kluftdichte und zunehmender Kluftnetzgröße zu. Für Kluftnetze mit einer geringen Kluftdichte (1. Fall) und einer Kluftgröße von 5 m × 5 m wurde eine hinreichende Konvergenz erst bei ungefähr 100 Simulationen erreicht (Abb. 6). Die berechnete kumulative Varianz vom Mittelwert der drei Komponenten des Durchlässigkeitsensors war nach dieser Anzahl von Simulationen < 2%. Für die

**Abb. 7** Durchlässigkeitsellipsen für Kluftnetze mit einer geringen und mittleren Kluftdichte (Formation 1, Kluftnetzgröße = 25 m × 25 m, je 50 Simulationen; schwarze Ellipse = mittlere Durchlässigkeitsellipse, x- und y-Achse = Durchlässigkeit in m/s; linke Abbildung: geringe Kluftdichte, innerer Kreis =  $0,6 \cdot 10^{-6}$  m/s und äußerer Kreis =  $1,2 \cdot 10^{-6}$  m/s; rechte Abbildung: mittlere Kluftdichte, innerer Kreis =  $3,5 \cdot 10^{-6}$  m/s, äußerer Kreis =  $7,0 \cdot 10^{-6}$  m/s).



Kluftnetze mit einer mittleren und großen Kluftdichte hingegen wurde eine hinreichende Konvergenz bereits nach 50 Simulationen erreicht.

Die Abweichungen zwischen den Einzelsimulationen zur Bestimmung des Durchlässigkeitstensors mit unterschiedlicher Kluftdichte und die Unsicherheit bei der Bestimmung einer repräsentativen Durchlässigkeit für eine bestimmte Kluftdichte in Abhängigkeit der Kluftnetzgröße lässt sich mithilfe der Durchlässigkeitsellipsen sehr gut veranschaulichen (Abb. 7). Die Durchlässigkeitsellipse wird durch die zwei Hauptkomponenten des Durchlässigkeitstensors  $k_{max}$  und  $k_{min}$  und die Orientierung der Durchlässigkeitsellipse  $\theta_{max}$  (Winkel zwischen  $k_{max}$  und der x-Achse, gegen den

Uhrzeigersinn) beschrieben und können wie folgt bestimmt werden:

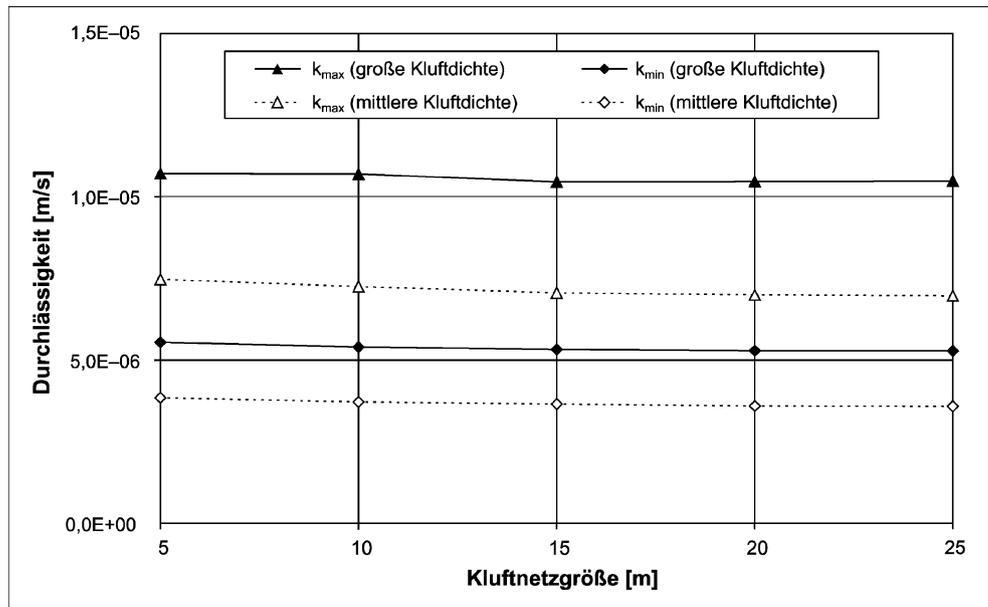
$$[13] \quad k_{max} = \frac{k_{xx} + k_{yy} + \sqrt{(k_{xx} + k_{yy})^2 - 4(k_{xx}k_{yy} - k_{xy}^2)}}{2}$$

$$[14] \quad k_{min} = \frac{k_{xx} + k_{yy} - \sqrt{(k_{xx} + k_{yy})^2 - 4(k_{xx}k_{yy} - k_{xy}^2)}}{2}$$

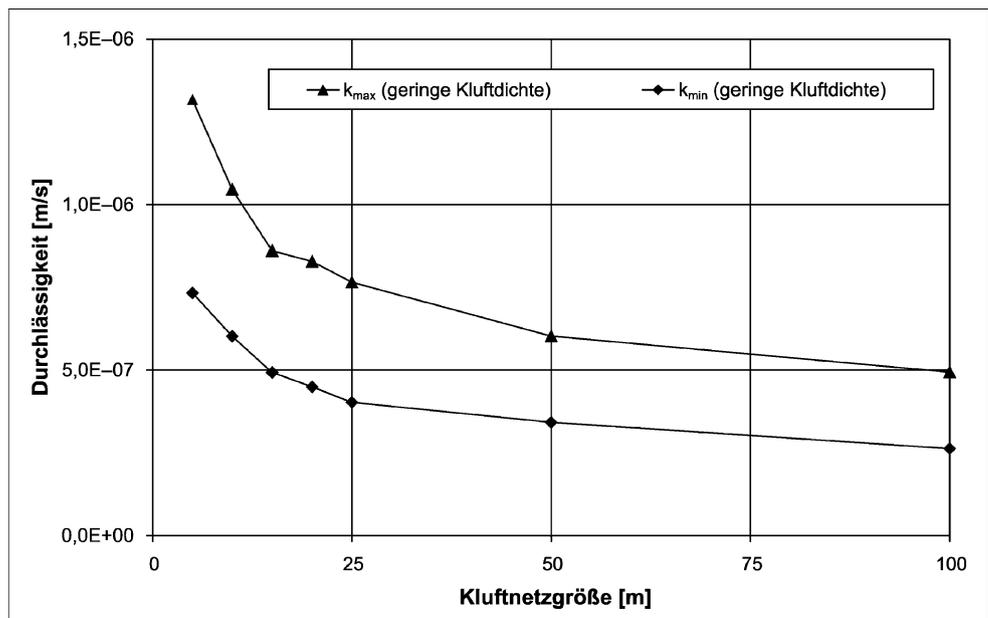
$$[15] \quad \theta_{max} = \tan^{-1}\left(\frac{k_{max} - k_{xx}}{k_{xy}}\right)$$

Abbildung 7 zeigt, dass die Ermittlung der mittleren Durchlässigkeitsellipsen nicht für alle Kluftdichten ein-

**Abb. 8** Die zwei mittleren Hauptkomponenten der Durchlässigkeitsellipse mit zunehmender Kluftnetzgröße und für Kluftnetze mit einer großen und mittleren Kluftdichte (Gesteinsformation 1).



**Abb. 9** Die zwei mittleren Hauptkomponenten der Durchlässigkeitsellipse mit zunehmender Kluftnetzgröße und für Kluftnetze mit einer geringen Kluftdichte (Gesteinsformation 1).



deutig ist. Die Abweichung zwischen den einzelnen Simulationen bei Klufnetzen mit einer geringen Kluftdichte ist aufgrund der stark wechselnden Klufnetzgeometrie und deren hydraulischen Verbindung sehr groß. Für Klufnetze mit einer mittleren und großen Kluftdichte zeigt sich hingegen eine sehr geringe Abweichung zwischen den einzelnen Simulationen, was auf die gute hydraulische Verbindung aufgrund der relativ großen Kluftdichte zurückzuführen ist (Abb. 7, rechte Abbildung). Mit der hier dargestellten Methode lassen sich die drei mittleren Komponenten des Durchlässigkeitsensors für alle drei Gesteinsformationen, für die drei untersuchten Kluftdichten und für verschiedene Klufnetzgrößen berechnen (Tab. 3, 4 und 5), die zur Ermittlung des REV und der dazugehörigen Durchlässigkeitsellipse notwendig sind.

**Ermittlung des repräsentativen Elementarvolumens (REV)**

Für die Ermittlung des repräsentativen Elementarvolumens (REV) wurden die mittleren Hauptkomponenten der Durchlässigkeitsellipse mit zunehmender Klufnetzgröße bestimmt (Abb. 8). Die Klufnetze mit einer mittleren und

großen Kluftdichte zeigten bereits bei kleinen Klufnetzgrößen eine geringe Abweichung bei der Ermittlung der mittleren Hauptkomponenten. Mit zunehmender Klufnetzgröße von größer 10 m × 10 m veränderten sich die berechneten Größen nur noch geringfügig. Bei den Klufnetzen mit einer geringen Kluftdichte hingegen wurde eine ständige Abnahme der berechneten Komponenten festgestellt, die für Klufnetze mit einer Größe von bis zu 100 m × 100 m anhielt (Abb. 9). Größere Klufnetze konnten aufgrund der fehlenden Speicherkapazität (maximaler Speicher von 2,0 GB) nicht mehr hydraulisch modelliert werden. Bei Klufnetzen mit einer geringen Kluftdichte nimmt die Durchlässigkeit mit zunehmender Klufnetzgröße aufgrund der fehlenden hydraulischen Verbindung bzw. Klufvernetzung zwischen den Randbedingungen ab. Dies lässt sich vor allem auf die Klufnlänge zurückführen, die nicht mehr lang genug ist, um das Klufnetzwerk hydraulisch zu verbinden.

Die zwei Hauptkomponenten der Durchlässigkeitsellipse und die Orientierung wurden für alle drei Gesteinsformationen, für die unterschiedlichen Kluftdichten und für zunehmende Klufnetzgrößen bestimmt (Tab. 3, 4 und 5). Obgleich die Durchlässigkeiten unter der Annahme einer konstanten hydraulischen Kluföffnungsweite  $a_h$  von 130,7 µm ermittelt wurden, lassen sich die Ergebnisse ( $k_{xx}$ ,  $k_{xy}$ ,  $k_{yy}$ ,  $k_{max}$  und  $k_{min}$ )

**Tab. 3** Zusammenfassung aller Ergebnisse der hydraulischen Modellierung für die Gesteinsformation 1 mit unterschiedlicher Kluftdichte in Abhängigkeit der Klufnetzgröße.

Gesteinsformation 1								
Größe [m × m]	$k_{xx}$ [m/s]	$k_{xy}$ [m/s]	$k_{yy}$ [m/s]	$k_{max}$ [m/s]	$k_{min}$ [m/s]	$k_{max}/k_{min}$	$\theta_{max}$ [Grad]	REV
<b>Minimale Kluftdichte (1. Fall)</b>								
5 × 5	$7,6 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$7,3 \cdot 10^{-7}$	1,8	77	*
10 × 10	$6,3 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-7}$	1,7	76	nein
15 × 15	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$6,2 \cdot 10^{-8}$	$8,5 \cdot 10^{-7}$	$8,6 \cdot 10^{-7}$	$4,9 \cdot 10^{-7}$	1,7	80	nein
20 × 20	$4,6 \cdot 10^{-7}$	$5,6 \cdot 10^{-8}$	$8,2 \cdot 10^{-7}$	$8,3 \cdot 10^{-7}$	$4,5 \cdot 10^{-7}$	1,8	82	nein
25 × 25	$4,2 \cdot 10^{-7}$	$7,1 \cdot 10^{-8}$	$7,5 \cdot 10^{-7}$	$7,7 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	1,9	79	nein
50 × 50	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$6,0 \cdot 10^{-7}$	$6,0 \cdot 10^{-7}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$	1,8	84	nein
100 × 100	$2,6 \cdot 10^{-7}$	$-1,1 \cdot 10^{-8}$	$4,9 \cdot 10^{-7}$	$4,9 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-7}$	1,9	93	nein
<b>Mittlere Kluftdichte (2. Fall)</b>								
5 × 5	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$7,6 \cdot 10^{-7}$	$7,3 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$	$3,8 \cdot 10^{-6}$	1,9	78	*
10 × 10	$3,8 \cdot 10^{-6}$	$6,6 \cdot 10^{-7}$	$7,1 \cdot 10^{-6}$	$7,3 \cdot 10^{-6}$	$3,7 \cdot 10^{-6}$	2,0	79	ja
15 × 15	$3,8 \cdot 10^{-6}$	$5,8 \cdot 10^{-7}$	$7,0 \cdot 10^{-6}$	$7,1 \cdot 10^{-6}$	$3,7 \cdot 10^{-6}$	1,9	80	ja
20 × 20	$3,7 \cdot 10^{-6}$	$5,9 \cdot 10^{-7}$	$6,9 \cdot 10^{-6}$	$7,0 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	1,9	80	ja
25 × 25	$3,7 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-7}$	$6,9 \cdot 10^{-6}$	$7,0 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	1,9	80	ja
<b>Maximale Kluftdichte (3. Fall)</b>								
5 × 5	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-6}$	1,9	78	*
10 × 10	$5,6 \cdot 10^{-6}$	$9,9 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$5,4 \cdot 10^{-6}$	2,0	79	ja
15 × 15	$5,5 \cdot 10^{-6}$	$8,8 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-6}$	2,0	80	ja
20 × 20	$5,5 \cdot 10^{-6}$	$9,1 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-6}$	2,0	80	ja
25 × 25	$5,5 \cdot 10^{-6}$	$9,5 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-6}$	2,0	79	ja

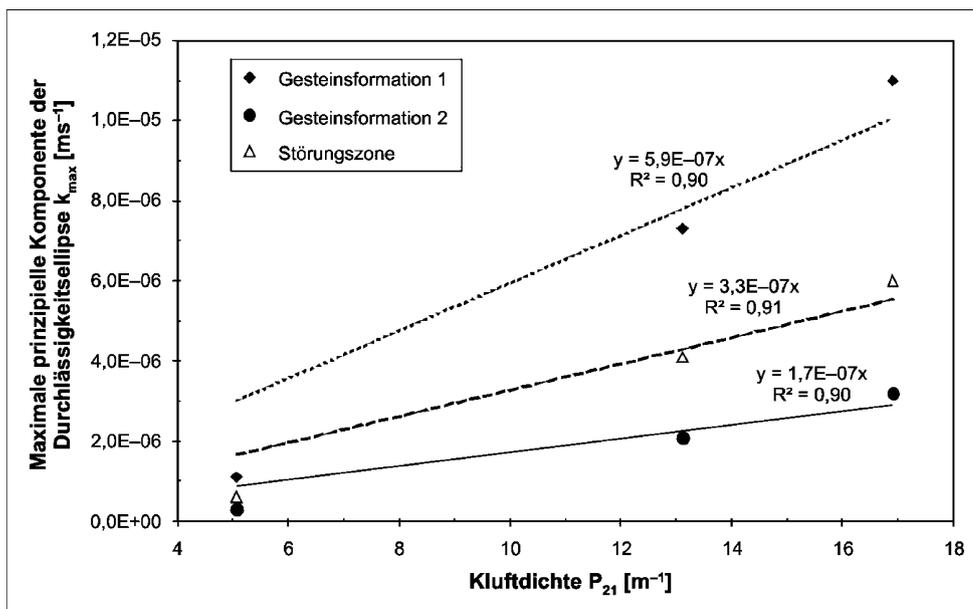
**Tab. 4** Zusammenfassung aller Ergebnisse der hydraulischen Modellierung für die Gesteinsformation 2 mit unterschiedlicher Kluftdichte in Abhängigkeit der Klufnetzgröße.

Gesteinsformation 2								
Größe [m × m]	$k_{xx}$ [m/s]	$k_{xy}$ [m/s]	$k_{yy}$ [m/s]	$k_{max}$ [m/s]	$k_{min}$ [m/s]	$k_{max}/k_{min}$	$\theta_{max}$ [Grad]	REV
<b>Minimale Kluftdichte (1. Fall)</b>								
5 × 5	$5,9 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	3,6	64	*
10 × 10	$4,4 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-7}$	$8,7 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$3,1 \cdot 10^{-7}$	3,2	65	nein
15 × 15	$3,7 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$7,7 \cdot 10^{-7}$	$8,6 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-7}$	3,1	67	nein
20 × 20	$3,0 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$6,6 \cdot 10^{-7}$	$7,2 \cdot 10^{-7}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$	3,1	69	nein
25 × 25	$2,8 \cdot 10^{-7}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$6,3 \cdot 10^{-7}$	$7,1 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	3,4	67	nein
50 × 50	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$4,9 \cdot 10^{-7}$	$5,3 \cdot 10^{-7}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$	2,9	71	nein
100 × 100	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$3,7 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	2,8	80	nein
<b>Mittlere Kluftdichte (2. Fall)</b>								
5 × 5	$3,2 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$7,2 \cdot 10^{-6}$	$8,1 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	3,6	67	*
10 × 10	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$	$6,7 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	3,5	68	nein
15 × 15	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$6,7 \cdot 10^{-6}$	$7,4 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	3,4	69	ja
20 × 20	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$6,6 \cdot 10^{-6}$	$7,2 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	3,4	69	ja
25 × 25	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$6,5 \cdot 10^{-6}$	$7,2 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	3,4	68	ja
<b>Maximale Kluftdichte (3. Fall)</b>								
5 × 5	$4,4 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	3,5	68	*
10 × 10	$4,3 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	3,5	68	ja
15 × 15	$4,2 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$9,9 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	3,4	69	ja
20 × 20	$4,2 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	3,5	69	ja
25 × 25	$4,2 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$9,8 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	3,5	68	ja

**Tab. 5** Zusammenfassung aller Ergebnisse der hydraulischen Modellierung für die Störungszone mit unterschiedlicher Kluftdichte in Abhängigkeit der Klufnetzgröße.

Störungszone								
Größe [m × m]	$k_{xx}$ [m/s]	$k_{xy}$ [m/s]	$k_{yy}$ [m/s]	$k_{max}$ [m/s]	$k_{min}$ [m/s]	$k_{max}/k_{min}$	$\theta_{max}$ [Grad]	REV
<b>Minimale Kluftdichte (1. Fall)</b>								
5 × 5	$9,1 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$8,1 \cdot 10^{-7}$	1,7	65	*
10 × 10	$7,0 \cdot 10^{-7}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$6,1 \cdot 10^{-7}$	1,8	64	nein
15 × 15	$6,2 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$8,8 \cdot 10^{-7}$	$9,5 \cdot 10^{-7}$	$5,5 \cdot 10^{-7}$	1,7	65	nein
20 × 20	$5,4 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$7,8 \cdot 10^{-7}$	$8,4 \cdot 10^{-7}$	$4,8 \cdot 10^{-7}$	1,7	66	nein
25 × 25	$5,2 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$7,6 \cdot 10^{-7}$	$8,2 \cdot 10^{-7}$	$4,6 \cdot 10^{-7}$	1,8	66	nein
<b>Mittlere Kluftdichte (2. Fall)</b>								
5 × 5	$4,8 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$7,6 \cdot 10^{-6}$	$8,1 \cdot 10^{-6}$	$4,3 \cdot 10^{-6}$	1,9	68	*
10 × 10	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$7,2 \cdot 10^{-6}$	$7,7 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-6}$	1,9	68	ja
15 × 15	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$7,0 \cdot 10^{-6}$	$7,0 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-6}$	1,8	69	ja
20 × 20	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$7,0 \cdot 10^{-6}$	$7,0 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-6}$	1,8	69	ja
25 × 25	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$6,9 \cdot 10^{-6}$	$6,9 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	1,8	68	ja
<b>Maximale Kluftdichte (3. Fall)</b>								
5 × 5	$6,9 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$6,2 \cdot 10^{-6}$	1,8	68	*
10 × 10	$6,7 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	1,8	68	ja
15 × 15	$6,6 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	1,8	69	ja
20 × 20	$6,6 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	1,8	69	ja
25 × 25	$6,6 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$5,9 \cdot 10^{-6}$	1,9	68	ja

**Abb. 10** Zusammenhang zwischen der Kluftdichte  $P_{21}$  und der maximalen Hauptkomponente der Durchlässigkeitsellipse  $k_{max}$ .



mit folgender Gleichung 16, die auf dem kubischen Gesetz basiert, beliebig auf weitere konstante Kluftöffnungsweiten ( $a_h^*$ ) skalieren. Hierfür müssen die Ergebnisse nur mit folgendem Faktor  $f$  multipliziert werden:

$$[16] \quad f = \left( \frac{a_h^*}{a_h} \right)^3$$

Alle Ergebnisse in der vorliegenden Arbeit basieren auf der Annahme einer konstanten Kluftöffnungsweite. Diese Annahme ist zweifellos eine Vereinfachung der natürlichen beobachteten Verteilung der Kluftöffnungsweiten. Deshalb wurden weiterführende Berechnungen unter Berücksichtigung hydromechanischer (HM) Prozesse durchgeführt und deren Einfluss auf die Verteilung der Kluftöffnungsweiten basierend auf der dargestellten Methode genauer untersucht (z. B. Blum et al. 2004 a und b). Die Ergebnisse zeigen, dass mit zunehmender Tiefe die hydraulischen Kluftöffnungsweiten nicht linear abnehmen und bei einer Tiefe von ungefähr 750 m eine residuale Kluftöffnungsweite erreicht ist, die überwiegend von den mechanischen Kluftigenschaften abhängt (Blum et al. 2005).

Das Verhältnis der maximalen und minimalen Hauptkomponenten ( $k_{max}/k_{min}$ ) wurde ebenfalls für alle Ergebnisse bestimmt (Gl. 13 und Gl. 14), da dies eine Aussage über die Anisotropie der Durchlässigkeit der Gesteinsformationen zulässt (Tab. 3, 4 und 5). Das bestimmte Verhältnis und die Durchlässigkeit der Gesteinsformation 1 und der Störungszone sind sich sehr ähnlich und zeigen daher eine vergleichbare Anisotropie. Die Gesteinsformation 2 hingegen weist vor allem aufgrund der höheren Kluftdichte der vertikalen Klufscharen (Klufschar 2 und 3, Tab. 2) eine noch grö-

ßere Anisotropie in vertikaler Richtung auf. Alle simulierten Kluftnetze zeigen eine ausgeprägte Durchlässigkeit in y-Richtung, die größer als die Durchlässigkeit in x-Richtung ist, was von den relativ steil stehenden Orientierungen bestätigt wird. Dieser Sachverhalt kann in einem natürlich aufwärts gerichteten Fließregime zu einer schnelleren Ausbreitung der Radionuklide in Richtung Biosphäre führen.

Zur Ermittlung des REV wurde in der vorliegenden Arbeit ein subjektives REV-Kriterium gewählt. Wenn die kumulativen Varianzen der zwei Hauptkomponenten und der Orientierung der Durchlässigkeitsellipse kleiner als 5% der kumulativen Mittelwerte betragen, dann entspricht die betrachtete Kluftnetzgröße dem minimalen REV. Die Anwendung dieses REV-Kriteriums zeigte, dass aufgrund der abnehmenden Durchlässigkeiten mit zunehmender Kluftgröße für alle Kluftnetze mit einer geringen Kluftnetzdichte kein REV gefunden werden konnte (Tab. 3, 4 und 5). Für die mittleren und großen Kluftdichten hingegen konnte, bis auf eine einzige Ausnahme (Gesteinsformation 2, mittlere Kluftdichte), für alle drei Gesteinsformationen ein REV mit einer Größe von  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  ermittelt werden. Folglich kann nicht für jede Kluftdichte ein REV bestimmt werden, hingegen existiert im Übergangsbereich zwischen der geringen ( $P_{21} = 5,1\text{ m}^{-1}$ ) und mittleren Kluftdichte ( $P_{21} = 13,1\text{ m}^{-1}$ ) eine Scheidelinie unterhalb der kein REV bestimmt werden kann. Oberhalb dieser Scheidelinie jedoch kann ein REV und seine dazugehörige Durchlässigkeitsellipse, die für eine großräumige hydraulische Modellierung verwendet werden kann, ermittelt werden. Hier ist anzumerken, dass herkömmliche poröse Grundwassermodellierungsprogramme, wie z.B. MODFLOW-2000 (Harbaugh et al. 2000), nur bedingt durch die globale Ausrichtung des

numerischen Gitters eine Modellierung mit einer richtungsabhängigen Durchlässigkeit und Porosität ermöglichen. Das 3D-Grundwassermodellierungsprogramm FAT3D, das an der Universität Birmingham entwickelt wurde, hingegen ermöglicht eine Modellierung mit einem richtungsabhängigen Durchlässigkeitstensor (Blum et al. 2004b).

Des Weiteren wurde in der vorliegenden Studie ein linearer Zusammenhang zwischen der Kluftdichte und der Durchlässigkeit des untersuchten 2D-Kluftnetzes festgestellt (Abb. 10), der es ermöglicht die Durchlässigkeiten für weitere Kluftnetze in Abhängigkeit ihrer Kluftdichte zu berechnen. Dieser lineare Zusammenhang verdeutlicht die starke Abhängigkeit der Durchlässigkeit im Kluftgestein von dessen Kluftdichte.

## Diskussion

Die hier vorgestellte Methode zur hydraulischen Modellierung und zur Ermittlung des REV im Kluftgestein kann grundsätzlich auch für 3D-Kluftsysteme angewendet werden. In diesem Fall müsste jedoch ein anderes Simulationsprogramm als FRAC2D verwendet werden. Dennoch stellt die Methode eine Annäherung zur Berechnung der Durchlässigkeit im Kluftgestein dar und erlaubt die Ermittlung des 2D-REV für jedes Kluftgestein. Ein weiteres Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Unsicherheiten bzw. die Sensitivitäten der einzelnen Kluftparameter genauer zu untersuchen. Hier ist festzustellen, dass die verwendeten Kluftdaten aus einem definierten Vergleichstest stammen, für den nicht alle Daten, die im Zuge der Standortcharakterisierung ermittelt wurden, zur Verfügung standen. Ferner sind die hier dargelegten Ergebnisse nicht universal anwendbar und müssen daher individuell für jedes zu untersuchende Kluftsystem erneut durchgeführt werden.

Bei der Ermittlung und der Auswertung der Kluftparameter für die hydraulische Modellierung 2D-stochastischer Kluftnetze wurden folgende Unsicherheiten mit in dieser Reihenfolge zunehmenden Bedeutung festgestellt:

- Die Streuung der Kluftorientierung ist abhängig von der Kluftlänge.
- Lineamente aus der Luftbildaufnahme wurden wie Klüfte behandelt.
- Alle Datensätze zur Beschreibung der Kluftdichte weisen sehr unterschiedliche Kluftdichten auf.
- Die effektive hydraulische Kluftdichte wurde nicht explizit ermittelt.
- Die räumliche Verteilung der effektiven hydraulischen Kluftdichte wurde nicht hinreichend genau untersucht.

Die Datengrundlage bei der Ermittlung der Kluftorientierung war unvollständig. Die Tatsache, dass die Kluftorientierung stark abhängig ist von der Kluftlänge, wurde bei der Datenerhebung nicht berücksichtigt. Weiterführende

Untersuchungen zeigten jedoch, dass der Einfluss der Streuung auf das hydraulische Fließverhalten generell gering ist und im Vergleich zur Kluftdichte vernachlässigt werden kann (Blum 2004). Trotzdem sollte die Kluftlänge in der Zukunft bei der Ermittlung der Kluftorientierung stets mit einbezogen werden.

Die Lineamente aus der Luftbildaufnahme wurden wie Klüfte behandelt, was die Frage aufwirft, bis zu welchem Grad diese Annahme gültig ist und welche Auswirkung diese Annahme auf die Berechnung der Durchlässigkeit hat. Frohlich et al. (1996) wendeten Methoden zur Fernerkundung und Geoelektrik bei der Suche nach wasserführenden Klüften im Granit an. Sie fanden heraus, dass nicht alle Lineamente eine große Kluftdichte und eine große hydraulische Durchlässigkeit aufweisen. Die Frage nach der hydraulischen effektiven Kluftdichte wird daher anschließend weiterführend diskutiert, da diese Größe bis zum heutigen Zeitpunkt nicht hinreichend genau untersucht bzw. berücksichtigt wird.

Eine weitere Unsicherheit sind die sehr unterschiedlichen Kluftdichten ( $P_{21}$ ) im Untersuchungsgebiet; diese liegen zwischen 2,0 und 16,5  $m^{-1}$ . Infolgedessen wurde eine Sensitivitätsstudie durchgeführt, um den Einfluss der Kluftdichte auf das hydraulische Fließverhalten im Kluftgestein genauer untersuchen zu können. Die Studie zeigt den starken Einfluss der Kluftdichte auf die Durchlässigkeit im Kluftgestein.

Ein wichtiger Parameter, der nicht Bestandteil des vorgegebenen Vergleichstests war, ist die effektive hydraulische Kluftdichte, obgleich Beobachtungen aus Bohrungen im Untersuchungsgebiet darauf hindeuten, dass die effektive hydraulische Kluftdichte bedeutend geringer ist, als die in Aufschlüssen ermittelte Kluftdichte (z. B. Nirex 1997c). Dieser Tatsache kann bei der Ermittlung der Durchlässigkeit und des REV eine extrem bedeutende Rolle zukommen, da eine reduzierte Kluftdichte zu einer Verkleinerung der Durchlässigkeit (Abb. 10) und zu einer Zunahme bei der Größe des REV führen kann. Daher sollte bei der Datenerhebung von Kluftparametern die Ermittlung der hydraulischen effektiven Kluftdichte besondere Priorität eingeräumt werden. Mithilfe einer optischen Bohrlochkamerabefahrung in Kombination mit Fluidmessungen im Bohrloch, wie z. B. Tracerfluid- und Wärme-Impuls-Messungen unter Verwendung eines Doppelpackersystems, kann die hydraulische effektive Kluftdichte ermittelt werden. Der Zusammenhang zwischen Aufschluss- und Bohrlochdaten hinsichtlich der Kluftdichte sollte dabei grundsätzlich genauer erforscht werden. Die Frage, warum eine Kluft hydraulisch aktiv bzw. nicht aktiv ist, sollte dabei im Mittelpunkt der Untersuchungen stehen.

Der wichtigste Punkt bei der Erhebung von Kluftdaten kombiniert die zwei vorherigen Punkte miteinander. Der Interpretation der räumlichen Verteilung der hydraulischen

effektiven Kluftdichte wurde in der Standortcharakterisierung nicht genügend Bedeutung zuteil, obwohl diese bei einer großräumigen Betrachtung einen sehr großen Einfluss auf das regionale Fließverhalten besitzt. Deshalb sollte in der Zukunft die strukturgeologische Position bei der Kluftaufnahme stets mitberücksichtigt werden. Bourne et al. (2001) zum Beispiel zeigen die Bedeutung der strukturgeologischen Position auf die räumliche Verteilung von Kluftgeometrien bei der Reservoirmodellierung auf, die besonders durch bestehende Störungssysteme beeinflusst wird. Die geodynamische und zeitliche Entwicklung des Kluftsystems ist dabei entscheidend für die bestehende Kluftgeometrie.

Alle vorherigen Unsicherheiten haben einen direkten Einfluss auf die Ermittlung des REV. Die Ergebnisse zeigen, dass nicht für alle Kluftdichten ein REV ermittelt werden konnte. Zwischen der geringen ( $P_{21} = 5,1 \text{ m}^{-1}$ ) und mittleren Kluftdichte ( $P_{21} = 13,1 \text{ m}^{-1}$ ) besteht daher wahrscheinlich eine Scheidelinie, unterhalb der kein REV bestimmt werden kann. Unter Berücksichtigung einer hydraulischen effektiven Kluftdichte, die stets unterhalb der ermittelten Kluftdichte liegt, würde sich die Scheidelinie nach oben verschieben, d. h. die in dieser Studie ermittelten REV entsprechen der absolut minimalen Größe des REV. Eine weitere Annahme, die in der vorliegenden Studie vorgenommen wurde, ist die Annahme einer konstanten hydraulischen Kluftöffnungsweite. Diese Annahme entspricht jedoch nicht der Realität, in der die Kluftöffnungsweite, wie die Kluftdichte, im Kluftgestein stark variieren kann. Die Tatsache einer variierenden Kluftöffnungsweite wurde in weiterführenden numerischen Experimenten, die die hydro-mechanischen (HM) Prozesse im Kluftgestein genauer untersuchten, erörtert. Die Ergebnisse zeigten grundsätzlich eine sehr starke Abhängigkeit von den mechanischen Kluft-eigenschaften, welche eine noch größere Bedeutung als der Kluftdichte zukommt (Blum et al. 2005). Aus diesem Grund sollten mechanische Kluft-eigenschaften, wie z. B. die Kluft-festigkeit und die Kluft-rauhigkeit, bei der Datenerhebung von Kluftparameter stets mit aufgenommen werden.

## Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur Ermittlung der Durchlässigkeit und des repräsentativen Elementarvolumens (REV) im Kluftgestein. Beide Größen können bei der großräumigen Modellierung von Kluftsystemen verwendet werden.

Der erste Schritt zur Berechnung der Durchlässigkeit im Kluftgestein ist die Ermittlung der benötigten Kluftparameter. Für die Simulation der 2D-Kluftnetze sind grundsätzlich drei Kluftparameter erforderlich: (1) Kluftorientierung, (2) Kluftdichte und (3) Kluftlänge. Die mittleren Kluftorientierungen der drei Gesteinsformationen gleichen sich und

deuten auf eine ähnliche Kluftgeometrie hin. Diese Tatsache wurde grundsätzlich durch die Simulation der 2D-stochastischen Kluftnetze bestätigt. Die ermittelten Kluftdichten hingegen weisen große Unterschiede auf und verdeutlichen eine starke Heterogenität hinsichtlich der Verteilung der Kluftdichte im Untersuchungsgebiet. Die Kluftlänge wurde anhand der Power-law-Funktion angepasst, die darüber hinaus die Ermittlung der Kluftdichte in Abhängigkeit einer minimalen Kluftlänge zulässt. Aufgrund der Tatsache, dass die Kluftdichten im Untersuchungsgebiet stark variieren, wurde eine Sensitivitätsstudie durchgeführt, die drei verschiedene Kluftdichten hinsichtlich ihrer hydraulischen Eigenschaften genauer untersuchte. Für die Modellierung von 2D-stochastischen Kluftnetzen wurde das Programm FracFrac entwickelt, das die Simulation von 2D-stochastischen Kluftnetzen mit einer Power-law-Kluftlängenverteilung und einer Fisher-Verteilung für die Kluftorientierung ermöglicht. Diese Kluftnetze dienen als Grundlage für die Bestimmung der Durchlässigkeit im Kluftgestein.

Das Fließverhalten in den 2D-stochastischen Kluftnetzen wurde durch das kubische Gesetz (cubic law) beschrieben. Eine Methode zur Bestimmung der drei Komponenten des Durchlässigkeitstensors, die es ermöglicht die hydraulische Heterogenität der Kluftnetze vollständig zu erfassen, wurde eigens entwickelt. Für die hydraulische Kluftnetzmodellierung wurde das Simulationsprogramm FRAC2D verwendet. Die Berechnung des Durchlässigkeitstensors erfolgte durch die Annahme, dass der mithilfe des kubischen Gesetzes bestimmte Durchfluss im Kluftgestein auch anhand des Gesetzes mit Darcy beschrieben werden kann. Für die Bestimmung der drei mittleren Komponenten des Durchlässigkeitstensors waren ungefähr 50 Simulationen für Kluftnetze mit einer mittleren und großen Kluftdichte notwendig, um eine hinreichende Konvergenz zu erreichen. Hingegen waren 100 Simulationen für Kluftnetze mit einer geringen Kluftdichte erforderlich um eine vergleichbare Konvergenz zu erzielen. Mithilfe der zwei mittleren Hauptkomponenten des Durchlässigkeitstensors konnte somit die Durchlässigkeitsellipse bestehend aus den zwei Hauptkomponenten und der Orientierung für jede Gesteinsformation, Kluftnetzgröße und Kluftdichte bestimmt werden.

Die Ermittlung des minimalen repräsentativen Elementarvolumens (REV) im Kluftgestein erfolgte anhand der ermittelten Durchlässigkeitsellipsen. Die Anwendung eines subjektiven REV-Kriteriums zeigte, dass nicht für alle Kluftnetze ein REV gefunden werden konnte. Für Kluftnetze mit einer mittleren ( $P_{21} = 13,1 \text{ m}^{-1}$ ) und großen Kluftdichte ( $P_{21} = 16,9 \text{ m}^{-1}$ ) konnte bis auf eine einzige Ausnahme für alle drei Gesteinsformationen ein minimales REV mit einer Größe von  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  ermittelt werden. Hingegen konnte für Kluftnetze mit einer geringen Kluftdichte ( $P_{21} = 5,1 \text{ m}^{-1}$ ) aufgrund der abnehmenden Durchlässigkeit mit zunehmender Kluftnetzgröße selbst bei einer Größe von  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$

kein REV ermittelt werden. Folglich besteht wahrscheinlich im Übergangsbereich zwischen Kluftnetzen mit einer geringen und mittleren Kluftdichte eine Scheidelinie unterhalb der kein REV bestimmt werden kann. Für diese Kluftnetzsysteme ist daher eine poröse Grundwassermodellierung nicht zulässig und die großräumige hydraulische Modellierung sollte durch eine Kluftnetzmodellierung anhand von Einzelklüften durchgeführt werden. Oberhalb hingegen kann ein REV mit einer Durchlässigkeitsellipse bestimmt werden, die für eine großräumige poröse Grundwassermodellierung verwendet werden kann. In der vorliegenden Studie besteht bei den untersuchten 2D-Kluftnetzen zwischen Kluftdichte und Durchlässigkeit ein linearer Zusammenhang, der die starke Abhängigkeit der Durchlässigkeit im Kluftgestein von dessen Kluftdichte verdeutlicht. Demzufolge hat die Kluftdichte unter den untersuchten Kluftparameter mit Ausnahme der Kluftöffnungsweite, die in dieser Untersuchung nicht ausführlich diskutiert worden ist, die größte Bedeutung bei der Bestimmung der Durchlässigkeit im Kluftgestein.

**Danksagung** Wir bedanken uns bei allen unseren Kollegen vom DECOVALEX/BENCHPAR-Forschungsvorhaben für die zahlreichen Diskussionen und Anregungen. Ein besonderer Dank geht an Dr. Ki-Bok Min, Dr. Lanru Jing vom Royal Institute of Technology (KTH) in Stockholm und an Dr. Johan Öhman von der Universität Uppsala in Schweden für den anhaltenden Austausch und Dialog. Des Weiteren möchten wir uns bei Dr. Klaus Schnell von der ERM GmbH für seine Kommentare und Anregungen bedanken. Die Finanzierung dieser Arbeit erfolgte durch United Kingdom Nirex Limited.

## Literatur

- Acuna, J.A., Yortsos, Y.C.: Application of fractal geometry to the study of networks of fractures and their pressure transient.- *Water Resour. Res.* **31** (3): 527–540. (1995)
- AkEnd: Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte.- 45 S., 8 Tab.; Köln. (2002)
- Andersson, J., Shapiro, A.M., Bear, J.: A stochastic model of a fractured rock conditioned by measured information.- *Water Resour. Res.* **20** (1): 79–88. (1984)
- Bandis, S.C., Lumdsen, A.C., Barton, N.R.: Fundamental of rock joint deformation.- *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geom. Abstr.* **20**: 249–268. (1983)
- Barton, C.C.: Fractal analysis of scaling and spatial clustering of fractures.- In: Barton, C.C., La Pointe, P.R. (Hrsg.): *Fractal in earth sciences*: 141–178. (1995)
- Bear, J.: *Dynamics of fluids in porous media*.- 764 S.; New York. (1972)
- Berkowitz, B.: Characterizing flow and transport in fractured geological media: A review.- *Adv. Water Resour.* **25**: 861–884. (2002)
- Bonnet, E., Bour, O., Odling, N.E., Davy, P., Main, I., Cowie, P., Berkowitz, B.: Scaling of fracture systems in geological media.- *Rev. Geophys.* **39** (3): 347–383. (2001)
- Bour, O., Davy, P.: Connectivity of random fault networks following a power-law fault length distribution.- *Water Resour. Res.* **33**: 1567–1583. (1997)
- Bourne, S.J., Rijkels, L., Stephenson, B.J., Willemsse, E.J.M.: Predictive modelling of naturally fractured rock reservoirs using geomechanics and flow simulations.- *GeoArabia* **6** (1): 27–42. (2001)
- Blum, P., Mackay, R., Riley, M.S.: Coupled hydro-mechanical modelling of flow in fractured rock.- In: Krásný, Hrkal, Bruthans (Hrsg.): *International Conference on Groundwater in Fractured Rock*: 399–400. (2003)
- Blum, P.: Upscaling of hydro-mechanical processes in fractured rock.- Ph.D. Thesis, School of Geography, Earth and Environmental Sciences, University of Birmingham, United Kingdom. (2004)
- Blum, P., Mackay, R., Riley, M.S.: Development of a methodology to quantify the importance of hydro-mechanical processes in radionuclide migration assessments.- In: Stephansson, O., Hudson, J.A., Jing, L. (Hrsg.): *Coupled thermo-hydro-mechanical-chemical processes in geo-systems*: 231–236. (2004a)
- Blum, P., Mackay, R., Riley, M.S.: Understanding the impact of hydro-mechanical coupling on performance assessment of deep waste disposal.- In: Stephansson, O., Hudson, J.A., Jing, L. (Hrsg.): *Coupled thermo-hydro-mechanical-chemical processes in geo-systems*: 237–242. (2004b)
- Blum, P., Mackay, R., Riley, M.S., Knight, J.L.: Performance assessment of a nuclear waste repository: upscaling coupled hydro-mechanical properties for far-field transport analysis.- *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **42**: 781–792. (2005)
- Brown, S.R.: Fluid flow through rock joints: the effects of surface roughness.- *Journal of Geophysical Research* **92**: 1337–1347. (1987)
- Castaing, C., Halawani, M.A., Gervais, F., Chilès, J.P., Genter, A., Bourguin, B., Ouillon, G., Brosse, J.M., Martin, P., Genna, A., Janjou, D. (1996): Scaling relationships in intraplate fracture systems related to Red Sea rifting.- *Tectonophysics*. **261**: 291–314.
- Chilès, J.P.: Fractal and geostatistical methods for modelling of a fracture network.- *Math. Geol.* **20** (6): 631–654. (1988)
- Dershowitz, W.S.: Rock joint systems.- Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts. (1984)
- Dershowitz, W.S., Einstein, H.H.: Characterizing rock joint geometry with joint system models.- *Rock Mech. Rock Eng.* **21**: 21–51. (1988)
- Dershowitz, W.S., Lee, G., Geier, J., Foxford, T., LaPointe, P., Thomas, A.: User documentation, FracMan.- Version 2.6, Golder Associates Inc., Seattle, Washington, D.C. (1998)
- Feng, Q., Sjögren, P., Stephansson, O., Jing, L.: Measuring fracture orientation at exposed rock faces by using non-reflector total station.- *Eng. Geol.* **59**: 133–146. (2001)
- Frohlich, R.K., Fisher, J.J., Summerly, E.: Electric-hydraulic conductivity correlation in fractured crystalline bedrock: Central Landfill, Rhode Islands, USA.- *J. Appl. Geophys.* **35**: 249–259. (1996)
- Hakami, E., Larsson, E.: Aperture Measurements and flow Experiments on a Single Natural Fracture.- *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **33** (4): 395–404. (1996)
- Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., McDonald, M.G.: MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model – User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process.- 121 S., U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, Virginia. (2000)
- Heathcote, J.A., Jones, M.A., Herbert, A.W.: Modelling groundwater flow in the Sellafeld area.- *Q.J. Eng. Geol.* **29**: 39–57. (1996)
- Herbert, A.W., Lanyon, G.W.: NAPSAC (Release 3.0) Command Reference Manual.- AEA D&R 0273 Release 3.0, AEA Technology, Harwell. (1994)
- Hudson, J.A., Stephansson, O., Andersson, J., Tsang, C.-F., Jing, L.: Coupled T-H-M- issues relating to radioactive waste repository design and performance.- *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **38**: 143–161. (2001)
- Itasca: UDEC: User's Guide.- Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, Minnesota. (2000)
- Jackson, C.P., Hoch, A.R., Todman, S.: Self-consistency of a heterogeneous continuum porous medium representation of fractured media.- *Water Resour. Res.* **36** (1): 189–202. (2000)

- Lee, C.-H., Farmer, I.: Fluid flow in discontinuous rock.- 169 S.; London. (1993)
- Lee, C.-H., Chang, J.-L., Hsu, K.-T.: Investigation of hydraulic aperture at surface exposed rock fractures in situ.- *Géotechn.* **46** (2): 343–349. (1996)
- Long, J.C.S., Remer, J.S., Wilson, C.R., Witherspoon, P.A.: Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures.- *Water Resour. Res.* **18** (3): 645–658. (1982)
- Louis, C.: Strömungsvorgänge in klüftigen Medien und ihre Wirkung auf die Standsicherheit von Bauwerken und Böschungen im Fels.- Ph.D. Thesis, Technische Universität Karlsruhe, Karlsruhe. (1967)
- McKeown, C., Haszeldine, R.S., Couples, G.D.: Mathematical modelling of groundwater flow at Sellafeld, UK.- *Eng. Geol.* **52**: 231–250. (1999)
- Moreno, L., Tsang, Y.W., Tsang, C.-F., Hale, F.V., Neretnieks, I.: Flow and transport in a single fracture: a stochastic model and its relation to some field observations.- *Water Resour. Res.* **24**, 2033–2048. (1988)
- Narr, W.: Estimating fracture spacing in subsurface rock.- *AAPG Bull.* **80** (10): 1565–1586. (1996)
- Neuman, S.P.: Generalized scaling of permeabilities: validation and effect of support scale.- *Geophys. Res. Lett.* **21** (5): 349–352. (1994)
- Nirex: The lithological and discontinuity characteristics of the Borrowdale Volcanic Group at the outcrop in the Craghouse Park and Latterbarrow areas.- *Nirex Report SA/97/029*, Harwell. (1997a)
- Nirex: Evaluation of heterogeneity and scaling of fractures in the Borrowdale Volcanic Group in the Sellafeld area.- *Nirex Report SA/97/028*, Harwell. (1997b)
- Nirex: An assessment of the post-closure performance of a deep waste repository at Sellafeld: Volume 2 – Hydrogeological model development – Effective parameters.- *Nirex Science Report S/97/012*, Harwell. (1997c)
- Oron, A.P., Berkowitz, B.: Flow in fractures: The local cubic law assumption reexamined.- *Water Resour. Res.* **34** (11): 2811–2825. (1998)
- Panda, B.B., Kulatilake, P.H.S.W.: Effect of geometry and transmissivity on jointed rock hydraulics.- *Journal of Engineering Mechanics* **125** (1): 41–50. (1999)
- Pickering, G., Bull, J.M., Sanderson, D.J.: Sampling power-law distributions.- *Tectonophys.* **248**: 1–20. (1995)
- Pollard, D.D., Ayadin, A.: Progress in understanding jointing over the past century.- *Geol. Soc. Am. Bull.* **100**: 1181–1204. (1988)
- Poteri, A., Billaux, D., Dershowitz, W., Gómez-Hernández, J., Cvetkovic, V., Hautojärvi, A., Holton, D., Medina, A., Winberg, A.: Final report of the TRUE Block Scale project – 3. Modelling of flow and transport.- SKB, Technical Report, TR-02-15; Stockholm, Sweden. (2002)
- Priest, S.D.: Discontinuity analysis for rock engineering.- 472 S.; London. (1993)
- Priest, S.D., Hudson, J.A.: Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys.- *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geo. Abstr.* **18**: 183–197. (1981)
- Renshaw, C.E.: On the relationship between mechanical and hydraulic apertures in rough-walled fractures.- *Journal of Geophysical Research* **100** (B12): 24.629–24.636. (1995)
- Riley, M.S.: An algorithm for generating rock fracture patterns: mathematical analysis.- *Math. Geol.* **36** (6): 683–702. (2004)
- Ryan, J.L., Lonergan, L., Jolly, R.J.H.: Fracture spacing and orientation distributions for two-dimensional data sets.- *J. Geophys. Res.- Solid Earth* **105** (B8): 19305–19320. (2000)
- Snow, D.T.: A parallel plate model of fractured permeable media.- Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley. (1965)
- Stephansson, O., Jing, L., Tsang, C.-F. (Hrsg.): Coupled thermo-hydro-mechanical processes of fractured media.- *Developments in Geotechnical Engineering 79*; Amsterdam. (1996)
- Stephansson, O., Hudson, J.A., Jing, L. (Hrsg.): Coupled thermo-hydro-mechanical-chemical processes in geo-systems: Fundamentals, modelling, experiments and applications.- 807 S.; Amsterdam. (2004)
- Terzaghi, R.D.: Sources of error in joint surveys.- *Geotechnique* **15**: 287–304. (1965)
- Thompson, M.E., Brown, S.R.: The effect of anisotropic surface roughness on flow and transport in fractures.- *Journal of Geophysical Research* **96**: 21.923–21.932. (1991)
- Tsang, C.-F.: Tracer transport in fractured systems.- In: Bear, J., Tsang, C.-F., de Marsily, G. (Hrsg.): Flow and contaminant transport in fractured rock: 237–266. (1993)
- Tsang, Y.W.: Usage of „equivalent apertures“ for rock fractures as derived from hydraulic and tracer tests.- *Water Resour. Res.* **28** (5): 1451–1455. (1992)
- Wathugala, D.N., Kulatilake, P.H.S.W., Wathugala, G.W., Stephansson, O.: A general procedure to correct sampling bias on joint orientation using a vector approach.- *Comp. Geotech.* **10**: 1–31. (1990)
- Witherspoon, P.A., Bodvardsson, G.S. (Hrsg.): Geological challenges in radioactive waste isolation: Third worldwide review.- Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-38915, Berkeley, CA. (2001)
- Whitherspoon, P.A., Wang, J.S.Y., Iwai, K., Gale, J.E.: Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture.- *Water Resour. Res.* **16** (6): 1016–1024. (1980)
- Wu, H., Pollard, D.D.: Imaging 3-D fracture networks around boreholes.- *AAPG Bulletin* **86** (4): 593–604. (2002)
- Zhang, L., Einstein, H.H.: Estimating the mean trace length of rock discontinuities.- *Rock Mech. Rock Eng.* **31** (4): 217–235. (1998)