

6 Mathematische Formulierung der Strömungs- und Transportprozesse

6.1 Repräsentatives Element Volumen

Die nachfolgenden mathematischen Beschreibungen der Strömungs- und Transportprozesse basieren auf der makroskopischen Betrachtungsweise. Hierbei ist nicht mehr die mikroskopische Skala mit der exakten Strukturbeschreibung der Porenräume und der Kornmatrix von Interesse, sondern man betrachtet einen Volumenbereich, der eine Vielzahl von Poren umfasst. Die Betrachtungsebene entfernt sich von der Mikroskala hin zur Makroskala. Die einzelnen Strukturmerkmale (Pore, Korngerüst) werden bei dem Übergang auf die nächst höhere Skala aufgelöst.

Der auf der Makroskala betrachtete Bereich wird als repräsentatives Elementarvolumen *REV* (BEAR (1972)[5]) oder als äquivalentes Kontinuum bezeichnet. Diesem repräsentativen Elementarvolumen werden neue Eigenschaften zugewiesen, die das Systemverhalten auf der neuen Skala charakterisieren. Der Übergang von der Mikro- zur Makroskala erfolgt über Mittelungsmethoden, wie beispielsweise der Volumenmittlungsmethode. Hierbei sind in jedem Raumpunkt Zustandsgrößen definiert, die auf Mittelwerten basieren, welche über ein Umgebungsvolumen gemittelt werden.

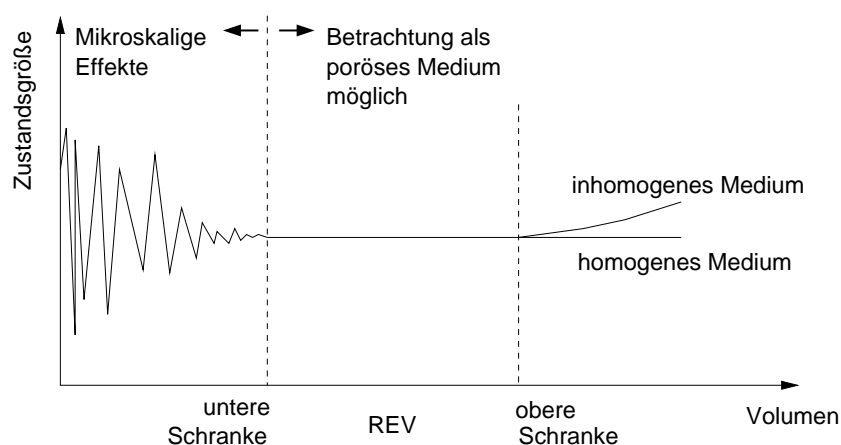


Abbildung 6.1: Repräsentatives Elementarvolumen REV (BEAR (1972)[5])

Die geeignete Größe des Mittelungsvolumens wird, wie in Abbildung 6.1 dargestellt, durch zwei Schranken begrenzt. Die untere Schranke markiert den Bereich, bis zu welchem

Fluktuationen der Zustandsgröße die Mittelwertbildung stark beeinflussen. Das Mittlungsvolumen muss so groß gewählt werden, dass der Einfluss der Fluktuationen möglichst gering ist. Die oberer Schranke definiert den Bereich, ab dem die Abhängigkeit der gemittelten Größen vom Ort nicht mehr wiedergegeben werden kann. Weitere Ausführung zu dem Konzept des repräsentativen Elementarvolumens finden sich z.B. in BEAR (1972) [5] und KINZELBACH (1992)[37].

Abschließend gilt noch anzumerken, dass die Klüfte wie in Kapitel 5 erläutert, als diskrete Elemente in einem Modell erfasst werden. Weist das Untersuchungsgebiet jedoch eine starke Klüftung mit einer großen Konnektivität auf, kann die Möglichkeit bestehen, das Kluftsystem durch ein äquivalentes Kontinuum mit neuen äquivalenten Eigenschaften (z.B. äquivalente Durchlässigkeit, siehe Kapitel 2.2) beschreiben zu können.

6.2 Grundlagen der Strömungsgleichung

6.2.1 Darcy – Gesetz

Das Darcy Gesetz für laminare Strömungen durch poröse Medien wurde im Jahre 1856 von Henry Darcy anhand eindimensionaler Säulenexperimente ermittelt. Darcy konnte aus den Experimenten folgende Beziehung ableiten: Der Volumenstrom Q ist proportional zum hydraulischen Gradienten $\Delta h/\Delta l$:

$$Q = K A \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (6.1)$$

mit

Q	$[m^3/s]$:	Volumenstrom
K	$[m/s]$:	Hydraulische Durchlässigkeit
A	$[m^2]$:	Querschnittsfläche
Δh	$[mWs]$:	Differenz der Standrohrspiegelhöhen
Δl	$[m]$:	Länge zwischen den gemessenen Standrohrspiegelhöhen

Aus Gleichung 6.1 und der Beziehungen

$$Q = vA \quad (6.2)$$

ergibt sich die dreidimensionale Darcy Geschwindigkeit \vec{v} , die in der Literatur auch als Filtergeschwindigkeit \vec{v}_f bekannt ist:

$$\vec{v} = -K \text{ grad } h \quad (6.3)$$

Die hydraulische Durchlässigkeit K ist eine fluidabhängige Größe

$$K = \frac{\rho g k}{\eta} \quad (6.4)$$

mit

ρ	[kg/m ³]	:	Dichte
g	[m ² /s]	:	Gravitationskonstante
k	[m ²]	:	Permeabilität
η	[kg/m · s]	:	Dynamische Zähigkeit

Die Permeabilität charakterisiert den Widerstand der Boden- und der Gesteinsmatrix. Sie ist im Gegensatz zur hydraulischen Durchlässigkeit eine fluidunabhängige Größe. Das Darcy – Gesetz ist nur für laminare Strömungen gültig. Es setzt zudem laminare schleichende Strömung voraus. Eine Maßzahl, die den Strömungstyp charakterisiert, ist die Reynoldszahl Re :

$$Re = \frac{\vec{v} d}{\nu} \quad (6.5)$$

mit

\vec{v}	[m/s]	:	Filtergeschwindigkeit
d	[m]	:	Charakteristische Länge (z.B. mittlerer Korndurchmesser)
ν	[m ² /s]	:	Kinematische Zähigkeit .

Die Reynoldszahl Re beschreibt das Verhältnis der Trägheit zur Zähigkeit. DRACOS (1990)[19] unterscheidet folgende Gültigkeitsbereiche der Reynoldszahl:

- $Re \leq 4$: Das Darcy – Gesetz ist gültig. Die Strömung ist laminar schleichend
- $4 < Re \leq 60 - 70$: Das Darcy – Gesetz ist nicht mehr gültig. Die Strömung ist laminar, aber nicht mehr schleichend. Trägheitseffekte werden bemerkbar. Der lineare Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und dem Druckgefälle ist nicht mehr gegeben. Der Reibungswiderstand wird durch das Gesetz von Forchheimer beschrieben.
- $Re > 70$: Die Strömung ist turbulent.

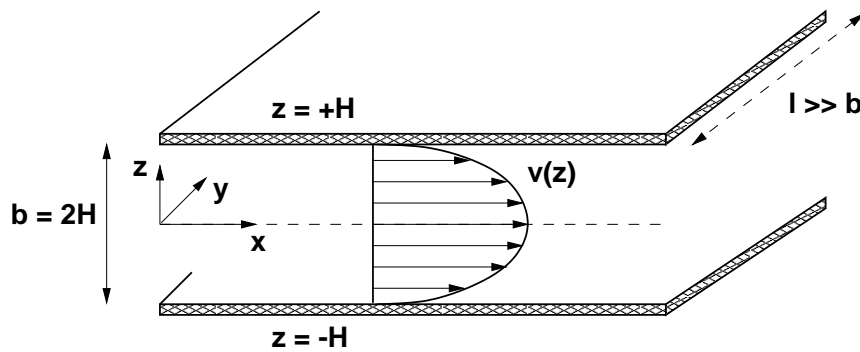


Abbildung 6.2: Laminare Spaltströmung: Parabelförmige Geschwindigkeitsverteilung zwischen zwei parallelen Platten

6.2.2 Hagen – Poiseuille – Gesetz

Mit Hilfe des Hagen – Poiseuille – Gesetzes läßt sich die Strömung in den Klüften beschreiben. Das Hagen – Poiseuille – Gesetz beschreibt die Strömung in einem Spalt, der durch zwei parallele Platten gebildet wird. Die Spallänge l ist hierbei sehr viel größer als die Spaltweite b ($l \gg b$). In Abbildung 6.2 sind die beiden parallelen Platten und die für laminare Spaltströmungen charakteristische parabolförmige Geschwindigkeitsverteilung zu sehen.

Die zeitliche Änderung im Volumenelement kann wie folgt beschrieben werden. Aus der Navier–Stokes Gleichung ergibt sich für eine laminare Einphasenströmung eines inkompressiblen newtonschen Fluids die Geschwindigkeitsverteilung zwischen zwei parallelen Platten zu (SNOW (1969)[74], WHITE (1999)[82]):

$$v(z) = \frac{\rho g}{2\eta} \left[-\frac{d}{dx} \left(\frac{p}{\rho g} + z \right) \right] (H^2 - z^2) \quad (6.6)$$

Die maximale Geschwindigkeit v_{\max} wird bei ($z = 0$) erreicht:

$$v_{\max} = v(z=0) = \frac{\rho g}{2\eta} H^2 \left[-\frac{d}{dx} \left(\frac{p}{\rho g} + z \right) \right] \quad (6.7)$$

Die mittlere Geschwindigkeit \bar{v} ergibt sich für eine parabolförmige Geschwindigkeitsverteilung aus der maximalen Geschwindigkeit v_{\max} :

$$\bar{v} = \frac{2}{3} v_{\max} = \frac{\rho g}{\eta} \frac{H^2}{3} \left[-\frac{d}{dx} \left(\frac{p}{\rho g} + z \right) \right] \quad (6.8)$$

Aus Gleichung 6.8 und unter Einbeziehung der Spaltweite b ($\frac{1}{2}b = H$) kann die mittlere dreidimensionale Geschwindigkeit \bar{v} zwischen zwei plan-parallelen Platten wie folgt

dargestellt werden:

$$\vec{v} = -\frac{b^2}{12} \frac{\rho g}{\eta} \text{grad}h = -K \text{grad}h \quad (6.9)$$

Die hydraulische Durchlässigkeit K und die Permeabilität k stehen dabei in folgendem Zusammenhang:

$$K = -\frac{k\rho g}{\eta} \quad \text{mit} \quad k = \frac{b^2}{12} \quad (6.10)$$

Die Permeabilität einer Kluft, welche als zwei Platten approximiert wird (vergl. Abbildung 6.3), ist nach Gleichung 6.10 proportional dem Quadrat der Kluftöffnungsweite b .

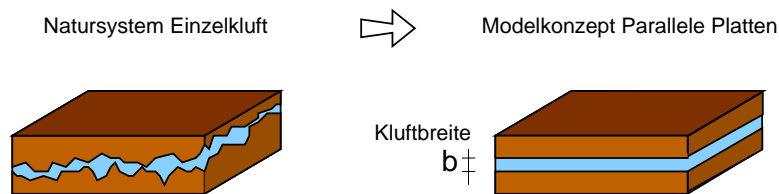


Abbildung 6.3: Vom Natursystem zum parallelen Platten Modell

Der Volumenstrom Q wird aus dem Integral über die Spaltbreite b berechnet:

$$Q = \int_{-h}^{+h} v(z) l dz \quad (6.11)$$

Unter Einbeziehung der Gleichung 6.6 erhält man den Volumenstrom Q :

$$Q = -\frac{\rho g}{\eta} \frac{b^3}{12} l \text{grad}h \quad (6.12)$$

Der Volumenstrom Q ist proportional zur dritten Potenz der Spaltbreite b . Gleichung 6.12 wird aufgrund diesen Zusammenhangs in der Literatur auch als *cubic law* bezeichnet (WITHERSPOON, WANG, IWAI & GALE (1980)[83]).

Eine Zusammenstellung linearer und nicht-linearer Fließgesetze für laminare und nicht-laminare Strömungen in Klüften mit glatten und rauen Oberflächen sind KOLDITZ (1997)[39] zu entnehmen.

6.2.3 Bilanzgleichung – Kontinuitätsgleichung –

Die Kontinuitätsgleichung basiert auf dem Prinzip der Erhaltung der Masse. Sie beschreibt die zeitliche Änderung der Masse im Volumenelement. Die zeitliche Änderung der Masse ist gleich den einströmenden Massenströmen in das Volumenelement abzüglich der ausströmenden Massenströme aus dem Volumenelement. In Abbildung 6.4 ist ein Volumenelement mit den ein- und austretenden Massenströmen exemplarisch dargestellt.

Bei der Betrachtung eines Kontrollvolumens handelt es sich um die Euler-Betrachtungsweise. Hierbei werden die Massenströme, die in das Volumenelement eintreten, austreten und darin gespeichert werden, bilanziert. Dagegen basiert die Lagrange-Betrachtungsweise auf der Betrachtung eines einzelnen Massenpunkts, der hinsichtlich seiner Bahnlinie verfolgt wird.

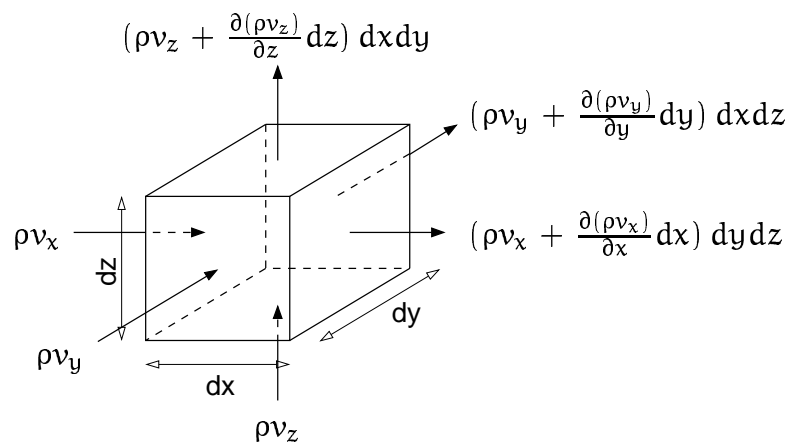


Abbildung 6.4: Bilanzierung der Massenströme am Kontrollvolumen

Die zeitliche Änderung der Masse im Volumenelement kann wie folgt beschrieben werden:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(n\rho)}{\partial t} dx \cdot dy \cdot dz = & (\rho v_x - (\rho v_x + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} dx)) \cdot dy \cdot dz \\ & + (\rho v_y - (\rho v_y + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} dy)) \cdot dx \cdot dz \\ & + (\rho v_z - (\rho v_z + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} dz)) \cdot dx \cdot dy \end{aligned} \quad (6.13)$$

Daraus resultiert die Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial(n\rho)}{\partial t} = - \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \quad (6.14)$$

In Gleichung 6.14 gibt n die Gesamtporosität, d.h. auch den Anteil aus den nicht durchströmten Poren, an. Die Porosität n und die Dichte ρ sind leicht druckabhängig

(KINZELBACH (1992)[37]).

$$\frac{\partial(n\rho)}{\partial t} = \frac{d(n\rho)}{dp} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\rho S_o}{\rho_o g} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \quad (6.15)$$

mit

S_o	[1/m]	:	Spezifischer Speicherkoeffizient
n	[-]	:	Gesamtporosität
ρ_o	[kg/m ³]	:	Dichte des unbelasteten Wassers
ρ	[kg/m ³]	:	Dichte des belasteten Wassers

Der spezifische Speicherkoeffizient gibt an, wieviel m³ Wasser pro m³ Aquifer und einer Änderung der Standrohrspiegelhöhe h um $\Delta h = 1$ m gespeichert werden kann. Er beinhaltet die Kompressibilitätskoeffizienten des Bodens und des Fluids. Unter Berücksichtigung von Gleichung 6.15 lässt sich Gleichung 6.14 umformen:

$$\begin{aligned} \frac{\rho S_o}{\rho_o g} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\rho S_o}{\rho_o g} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) &= 0 \end{aligned} \quad (6.16)$$

Sind die Dichteunterschiede zwischen belastetem und unbelastetem Wasser vernachlässigbar gering und ist die Dichte ortsunabhängig ($\rho_o \approx \rho = \text{const.}$), folgt schließlich

$$\frac{S_o}{g} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) = 0 \quad (6.17)$$

bzw. mit

$$h = \frac{p}{\rho g} + z \quad (6.18)$$

$$S_o \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{v} = 0 \quad (6.19)$$

Die Strömungsgleichung 6.17 bzw. 6.19 ist eine partielle Differentialgleichung 2. Ordnung von parabolischem Typ. Im stationären Fall erhält man eine partielle Differentialgleichung 2. Ordnung von elliptischem Typ:

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0 \quad (6.20)$$

6.3 Grundlagen der Transportgleichung

Wird ein Stoff mit dem Trägerfluid (z.B. Wasser oder Gas) mit transportiert, so unterliegt der Transportvorgang verschiedenen Mechanismen, Energieumwandlungsprozessen und chemischen Reaktionen (KOLDITZ (1997)[39]). Im Rahmen dieser Arbeit werden Advektions-, Dispersions- und Diffusionsprozesse als Ursache für Transportvorgänge betrachtet.

Advektion

Der advective Transport erfolgt auf dem Geschwindigkeitsfeld der Grundströmung. Die maßgebliche Geschwindigkeit ist hierbei jedoch nicht die Filtergeschwindigkeit \vec{v} , die aus der Strömungsberechnung bekannt ist, sondern die Abstandsgeschwindigkeit \vec{v}_a .

Für die Transportberechnung ist lediglich der durchflusswirksame Querschnitt und nicht der Gesamtquerschnitt A bzw. die Gesamtporosität n von Interesse. Im Untergrund kann es z.B. sogenannte "dead-end-Poren," geben, die nicht zum aktiv durchströmten Aquiferbereich gehören. Der durchflusswirksame Querschnitt ist somit verringert. Beschrieben wird der durchflusswirksame Querschnitt über die effektive Porosität n_e , die geringer als die tatsächlich vorhandene Porosität n ist. Aus der Filtergeschwindigkeit \vec{v} und der effektiven Porosität n_e kann die für die Transportmodellierung maßgebliche Abstandsgeschwindigkeit \vec{v}_a ermittelt werden:

$$\vec{v}_a = \frac{\vec{v}}{n_e} \quad (6.21)$$

Die Abstandsgeschwindigkeit \vec{v}_a ist eine gemittelte Größe. Weder Filtergeschwindigkeit \vec{v} noch Abstandsgeschwindigkeit \vec{v}_a sind direkt messbar.

Dispersion

Der Dispersionsterm beschreibt den Massenfluss, der über den mittleren Wert hinaus aufgrund der Geschwindigkeitsfluktuationen innerhalb des Mittelungsvolumens auftritt. Die Größe des Mittelungsvolumen legt einen Schnitt bei der Skalengröße, bis zu der Inhomogenitäten des Strömungsfelds noch explizit bekannt sind. Alle Transporteffekte, die durch kleinere Skalige Inhomogenitäten des Strömungsfelds verursacht werden, werden in der Dispersion zusammengefasst. Der Dispersionseffekt ist i.A. umso kleiner, je detaillierter das tatsächliche Strömungsfeld beschrieben werden kann. Die Dispersionseffekte bzw. die Ursachen der Geschwindigkeitsfluktuationen sind skalenabhängig. In Tabelle 6.1 sind Ursachen der Geschwindigkeitsfluktuation auf unterschiedlichen Skalen genannt. Die Ausführungen sind KINZELBACH (1992)[37] und KOLDITZ (1997)[39] entnommen.

Molekulare Diffusion

Aufgrund eines Konzentrationsgradienten zwischen zwei Zonen, wandern Teilchen aus der hochkonzentrierten Zone in die niederkonzentrierte Zone ab. Der Transport erfolgt in Richtung des Konzentrationsgradienten. Die molekulare Diffusion ist ein sehr langsamer Prozess. In Bereichen hoher Permeabilität ist ihr Einfluss sehr gering. Dagegen darf ihr

Skala	Ursache der Geschwindigkeitsfluktuation
Mikroskala, z.B. Einzelpore	Geschwindigkeitsprofil innerhalb der Pore führt zur Variabilität der lokalen Geschwindigkeit.
Mesoskala, z.B mehrere Poren	Variabilität der Porengröße und die Umlenkung durch die Matrix verursacht die korngerüstbedingte Dispersion.
Makroskala	Inhomogenitäten der Durchlässigkeit des Aquifers führen zur Makrodispersion.

Tabelle 6.1: Dispersionseffekte auf unterschiedlichen Skalen

Einfluss in Bereichen geringer Permeabilität nicht unterschätzt werden. Die Diffusion gewinnt bei geringen Abstandsgeschwindigkeiten an Bedeutung. Wohingegen bei hohen Geschwindigkeiten die advektiven und dispersiven Transportmechanismen das Geschehen dominieren.

Die Schadstofftransportgleichung basiert wie die Strömungsgleichung (siehe Kapitel 6.2.3) auf der Bilanzierung der ein- und austretenden Massenströme am Kontrollvolumen. Die zu bilanzierende Größe ist die makroskopische Massenstromdichte \vec{N} (vergl. HELMIG (1999)[29])

$$\vec{N} = n_e (c\vec{v}_a - D_m \text{grad} c - \mathbf{D}_d \text{grad} c) \quad (6.22)$$

mit

N	$[\text{mg}/\text{m}^2\text{s}]$:	Massenstromdichte des transportierten Stoffes
c	$[\text{mg}/\text{m}^3]$:	Konzentration
n_e	$[-]$:	Effektive Porosität
D_m	$[\text{m}^2/\text{s}]$:	Molekulare Diffusionskonstante
\mathbf{D}_d	$[\text{m}^2/\text{s}]$:	Dispersionstensor

Der Dispersionsterm ($\mathbf{D}_d \text{grad} c$) beschreibt den Massenfluss, der aufgrund von Geschwindigkeitsfluktuationen innerhalb des Mittelungsvolumens auftritt. Der Dispersionsterm wird im Allgemeinen durch einen FICK'schen Ansatz beschrieben. Stimmt die Strömungsrichtung mit einer der beiden Koordinatenachsen überein (hier mit der x-Achse), ergibt sich der Dispersionstensor \mathbf{D}_d zu:

$$\mathbf{D}_d = \begin{bmatrix} D_L & 0 \\ 0 & D_T \end{bmatrix} \quad (6.23)$$

Stimmt die Strömungsrichtung nicht mit der x-Achse überein, muss der Dispersionstensor wie in KINZELBACH (1992)[37] dargestellt, transformiert werden. Der longitudinale

und transversale Dispersionskoeffizient ergibt sich aus der Abstandsgeschwindigkeit \vec{v}_a und den Dispersionslängen α_L und α_T :

$$\begin{aligned} D_L &= \alpha_L \vec{v}_a \\ D_T &= \alpha_T \vec{v}_a \end{aligned} \quad (6.24)$$

mit

D_L / D_T	$[m^2/s]$:	Longitudinaler / transversaler Dispersionskoeffizient
α_L / α_T	$[m]$:	Longitudinale / transversale Dispersionslänge

Die molekulare Diffusion D_m und die Dispersion \mathbf{D}_d werden in dem hydrodynamischen Dispersionstensor \mathbf{D} zusammen gefasst:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_m & 0 \\ 0 & D_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_L & 0 \\ 0 & D_T \end{bmatrix} \quad (6.25)$$

Der gesamte Massenfluss über die Oberfläche ist gleich der Speicherung von Schadstoff und der Entnahme aus Senken im Inneren. Zugaben ins Kontrollvolumen werden als negative Senke betrachtet. Die Massenbilanz unter Einbeziehung von Quellen und Senken führt zur Transportgleichung

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \vec{v}_a \operatorname{grad} c - \operatorname{div}(\mathbf{D} \cdot \operatorname{grad} c) + q = 0 \quad (6.26)$$

mit

$\frac{\partial c}{\partial t}$:	Konzentrationsänderung mit der Zeit
$\vec{v}_a \operatorname{grad} c$:	Advektiver Transport
$\operatorname{div}(\mathbf{D} \cdot \operatorname{grad} c)$:	Hydrodynamisch dispersiver Transport
q	:	Quellen- und Senkterm

Die Transportgleichung 6.26 ist eine partielle Differentialgleichung 2. Ordnung. Die rein dispersive Transportgleichung ist von parabolischem Typ (vergleichbar mit der Diffusionsgleichung). Sie beschreibt Störungen, die sich im ganzen Raum bis zu den Rändern ausbreiten. Dagegen ist die rein advektive Transportgleichung von hyperbolischem Typ. Sie beschreibt Störungen, die sich nur in einem begrenzten Gebiet längs charakteristischer Linien ausbreiten.

Eine Maßzahl, die das Verhältnis zwischen advektivem und dispersivem Transportanteil charakterisiert, ist die Peclet – Zahl Pe . Für große Peclet – Zahlen dominiert der advektive

Anteil. Für $Pe < 1$ ist der dispersive Anteil dominierend.

$$Pe = \frac{\vec{v}_a L}{\mathbf{D}} \quad (6.27)$$

mit

\vec{v}_a	[m/2]	:	Abstandsgeschwindigkeit
\mathbf{D}	[m ² /s]	:	Dispersionstensor
L	[m]	:	typische Längenskala des Transportphänomens

Die vorgestellten Differentialgleichung für die Strömung und den Transport werden mit Hilfe von numerischen Methoden gelöst. Eine ausführliche Darstellung der verschiedensten Verfahren zur Lösung der Differentialgleichungen ist in KINZELBACH (1992)[37], HELMIG (1997)[28], HELMIG (1999)[29] enthalten.

7 Beispiele

7.1 Simulation auf der Aquiferanalog – Feldskala, Pliezhausen

Im Rahmen des Verbundprojekts *Festgesteins – Aquiferanalog: Experimente und Modellierung* wurde durch HÖTZL, THÜRINGER & WITHÜSER (1997)[35] und HÖTZL, BÄUMLE, THÜRINGER & WITHÜSER (2000)[34] für den Feldversuchsblock in Pliezhausen eine sorgfältige Datenerhebung und –auswertung der Klufftgeometrie vorgenommen. Die zum Aufbau eines Strukturmodells vorhandenen Daten und Informationen sind in Tabelle 7.1 dargestellt. Darauf aufbauend wurden von HÖTZL, BÄUMLE, THÜRINGER & WITHÜSER am Feldversuchsblock Gastracertests mit Helium durchgeführt. In HÖTZL, BÄUMLE, THÜRINGER & WITHÜSER (2000)[34] werden die verschiedenen Messkonfigurationen und die erzielten Tracerdurchbruchkurven beschrieben. Zur Untersuchung der Strömungs- und Transportprozesse mit Hilfe der numerischen Modellierung wird im Weiteren der Südost/Ost Bereich des Feldversuchsblocks untersucht. Innerhalb dieses Bereiches liegen die beiden Bohrungen B21 und B31 (siehe Abbildung 7.1). Die Darstellungen der einzelnen Seitenwände und der Oberseite des Feldversuchsblocks sind in Abbildung 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 und 4.36, links, detailliert zu sehen.

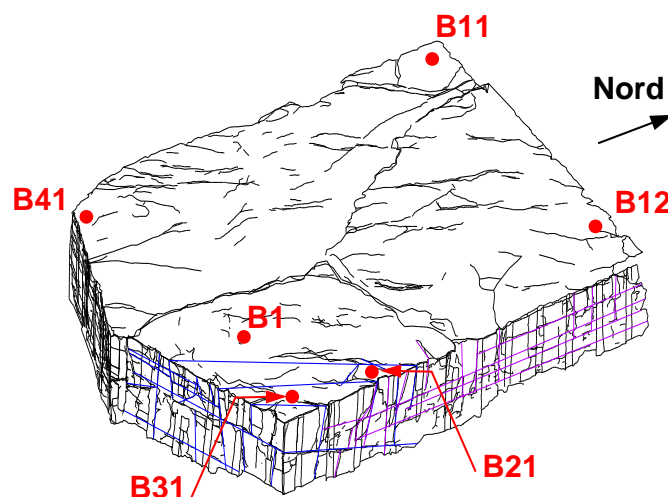


Abbildung 7.1: Blick von Südosten auf den Feldversuchsblock. Kartierung der Klufftspuren an den Außenwänden des Feldversuchsblocks und Approximation der Klufftspuren.

	Verteilungsfunktion	Formparameter der Verteilungsfunktion		
Orientierung	Fisher-Verteilung	Azimut der Normalen	Fallwinkel der Normalen	Spärrischer Öffnungswinkel
Set1		201°	85°	11.22°
Set2		146°	7°	12.05°
Set3		229°	8°	10.20°
Kluftlänge	Exponentialverteilung	lambda		
horizontal		-5.372		
vertikal		-3.933		
Kluftlänge	Erlang-2-Verteilung	lambda		
horizontal		-5.372		
vertikal		-3.933		
Kluftabstände	Exponentialverteilung	lambda		
		-4.565		
Kluftöffnungsweite				
Aus Literatur	Log-Normalverteilt			
Kluftdichte	(Berechnet)	11.337 [m ² /m ³]		
Kartierung der Kluftspuren an den Außenwänden				
Bodenradarmessung				

Tabelle 7.1: Daten und Informationen zur Beschreibung der Kluftstrukturen des Feldversuchsblocks

In einem ersten Schritt wurde ein 3D deterministisches Strukturmodell für den Südost/Ost Bereich des Feldversuchsblocks entwickelt. Anhand der stereophotogrammetrischen Kartierung der Außenwände und anhand von Fotos wurden relevante Kluftspuren detektiert. Die so bestimmten Kluftspuren und Kluftflächen sind für die Südostwand und die Ostwand in Abbildung 7.2a,b,c dargestellt. Die Schwierigkeit bestand nun darin, aus den einzelnen Kluftspuren, die entlang der Außenwände zu erkennen sind, auf das 3D Kluftsystem zu schließen. Die drei steil stehenden Kluftflächen V1, V2 und V3 sind anhand des Verlaufes der Kluftspuren an drei Außenflächen (Oberseite, Südostwand, Ostwand) sehr gut zu erkennen. Dagegen fehlen zu den horizontalen Kluftflächen, die entlang der Ostwand verlaufen, weitere Informationen bzgl. ihrer Ausdehnung.

In der Diskussion mit HÖTZL, BÄUMLE, THÜRINGER & WITTHÜSER ergab sich, dass es sich bei den nahezu horizontal ausgeprägten Strukturen um Schichtgrenzen handelt, die im Verlauf der Genese gebildet wurden. Diese Schichtgrenzen fallen mit ca. 5° – 10° leicht nach Nordosten ein. Es wird in einer ersten Annahme davon ausgegangen, dass diese Schichtgrenzen durch den gesamten Feldversuchsblock nahezu horizontal verlaufen, wie in Abbildung 7.2d zu sehen ist.

Um die hochkomplexen Strömungs- und Transportprozesse innerhalb des Feldversuchsblocks besser verstehen zu können, wurde das Modellgebiet mit seinen Materialeigenschaften, den vorhandenen geologischen Strukturen und den Randbedingungen zunächst auf ein möglichst einfaches Modell reduziert. Das Modell stellt ein *Lernmodell* dar, das die Analyse des Prozessverhaltens unterstützen soll.

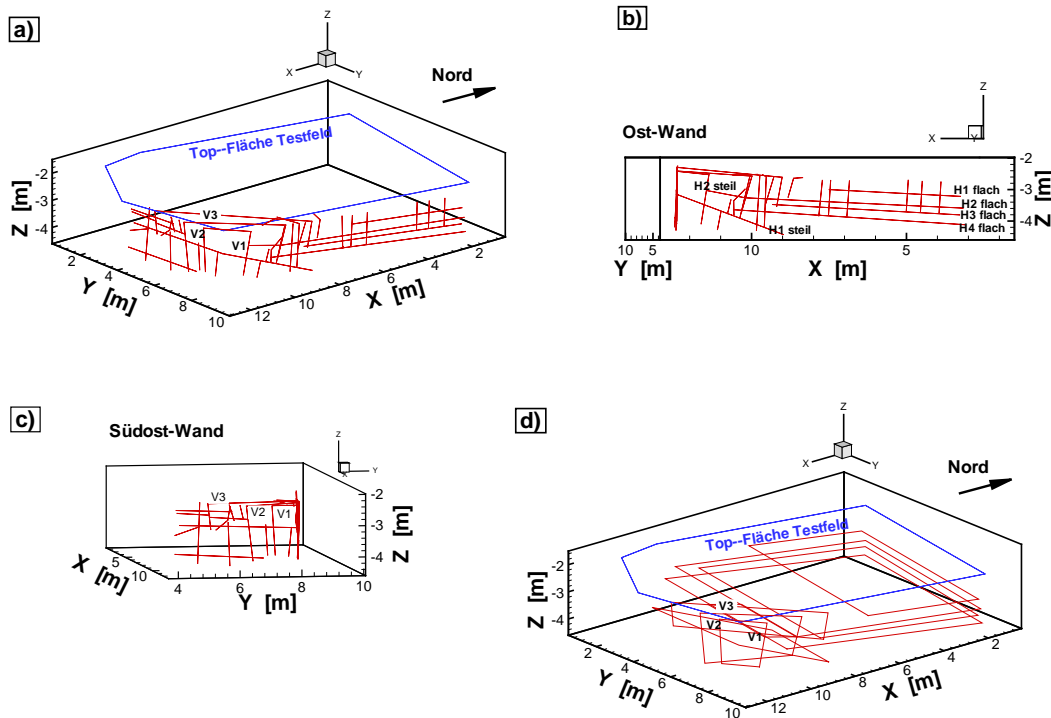


Abbildung 7.2: Detektierte Kluftspuren (a,b,c) und das daraus entwickelte 3D deterministische Kluftmodell (d)

7.1.1 Modellgebiet 1: 2D - Ebene zwischen Bohrung B21 und Bohrung B31

Hierzu wurde aus dem generierten 3D - Kluftnetzwerkmodell eine 2D - Ebene, die sich zwischen den Bohrungen B21 und B31 aufspannt, ausgeschnitten. In Abbildung 7.3 ist ein Schnitt durch den Feldversuchsblock und dessen Umgebung schematisch dargestellt. Das eigentliche Modellgebiet 1 befindet sich zwischen den Bohrungen B21 und B31. Wie zu erkennen ist, ruht der Feldversuchsblock auf einer tonig-feinsandigen Schluffschicht. Entlang den Außenseiten der Schluffschicht (in südlicher Richtung bis zum Steinbruchsee, in nördlicher Richtung bis zum Deponiehang) herrschte Atmosphärendruck. Die gesamte Oberfläche des Feldversuchsblocks wurde abgedichtet und kann, wie in HÖTZL, BÄUMLE, THÜRINGER & WITTHÜSER (2000)[34] beschrieben, als nahezu undurchlässig angenommen werden. Der Feldversuchsblock und die Schluffschicht stehen entlang der gemeinsamen Schichtgrenze in direktem Kontakt zueinander. Diese Tatsache wird bei der Diskussion der Strömungsergebnisse noch von Bedeutung sein.

In Tabelle 7.2 sind die Materialeigenschaften der Klüfte und der Gesteinsmatrix, die der Modellierung zugrunde gelegt wurden, aufgelistet. Die Angaben basieren auf Messungen, die im Rahmen der experimentellen Arbeiten von HÖTZL, BÄUMLE, THÜRINGER & WITTHÜSER durchgeführt wurden. Für einige Parameter, für die keine konkreten Messwerte vorlagen, wurden Standardwerte aus der Literatur entnommen. Die Daten stellen einen Basisdatensatz dar, der im weiteren Verlauf der Projektarbeiten durch Messungen und Simulationsergebnisse erweitert und spezifiziert werden wird.

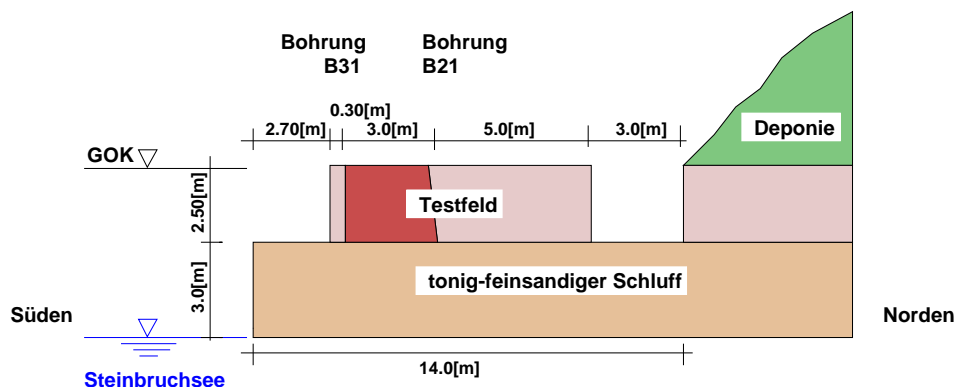


Abbildung 7.3: Systembild: zweidimensionaler Schnitt durch den Feldversuchsblock

		Öffnungsweite b [m]	Permeabilität K [m ²]	Porosität n [%]	Längs- dispersivität α_l [m]
Klüfte	horizontal	0.001 ^(Ann)	8.33e-08 ^B		
	vertikal	0.001 ^(Ann)	8.33e-08 ^B		
	Tonfüllung			38.0 ^(Mes)	
	Sandfüllung			20.0 ^(Ann)	
Sandsteinlage	obere		2.2607e-15 ^C	20.0 ^(Mes)	0.002 ^F
	untere		2.2607e-15 ^C	15.0 ^(Mes)	
Zwischenschicht ^A			1.330e-16 ^D	35.0 ^(Mes)	
Basisschicht			1.33e-12 ^E	30.0 ^(Ann)	

Tabelle 7.2: Materialeigenschaften des Feldversuchsblocks und der Schluffschicht aus Messungen ([35], [34]) bzw. Standardwerte aus der Literatur; (e – x) steht für (10^{-x}).

Anmerkungen zu Tabelle 7.2:

Weitere Modellparameter finden sich in den Tabellen 7.3 und 7.4.

Mes Messung. Wert wurde experimentell ermittelt.

Ann Annahme. Wert wurde angenommen.

A Die Zwischenschicht wird in den folgenden Modellen noch nicht berücksichtigt.

B Die Permeabilität der Klüfte errechnet sich über das *cubic law* aus der Öffnungsweite: $K = b^2/12$

C Hydraulische Durchlässigkeit wurde im Rahmen der Diplomarbeit D. Schubart (1996), Univ. Karlsruhe, für Wasser (10° C) ermittelt: $k_f = 1.7 \cdot 10^{-8}$ [m/s] → Permeabilität: $K = \frac{k_f \cdot \eta}{\rho \cdot g}$

D Hydraulische Durchlässigkeit (10° C) wurde mit $k_f = 1.0 \cdot 10^{-9}$ [m/s] angenommen. → Permeabilität: $K = \frac{k_f \cdot \eta}{\rho \cdot g}$

E Für die tonig-feinsandige Schluff-Basisschicht wäre eigentlich eine hydraulische Durchlässigkeit von $k_f = 1.0 \cdot 10^{-9}$ [m/s] (→ Permeabilität $K = 1.33 \cdot 10^{-16}$ [m²]) anzunehmen. Durch die trockenfallene Basisschicht und der damit verbundenen Rissbildung, ist jedoch davon auszugehen, dass die Basisschicht eine wesentlich höhere Permeabilität besitzt.

F Aus Tracertests mit CO₂ und He, Teilprojekt TP1: $\alpha_l = 0.0019 - 0.0026$. → Angenommen $\alpha_l = 0.002$, $\alpha_d = 0.0002$

Die in HÖTZL, BÄUMLE, THÜRINGER & WITTHÜSER (2000)[34] beschriebenen Tracermessungen und die dabei eingestellten bzw. gemessenen Injektions- und Extraktionsraten zeigen, dass es neben dem Zufluss, der über die Injektionsbohrung erfolgt, noch einen weiteren Zufluss geben muss. Die Dichtigkeitsprüfungen ergaben, dass die Absaugrate zur Nachströmrates in einem Verhältnis von bis zu 100:1 stehen kann. Dies deutet auf eine nicht zu vernachlässigende Zustromrate über den unteren Rand des Feldversuchsblocks hin, da die Oberfläche des Feldversuchsblocks als nahezu undurchlässig angenommen werden kann.

Im Modell wurde ein möglicher Zufluss über die Schichtgrenze Feldversuchsblock – Schluffschicht durch das Anlegen von Atmosphärendruck am unteren Gebietsrand erzwungen. Die Randbedingungen für diese Simulation sind in Abbildung 7.4 dargestellt. Für das 2D - Kluftnetzwerk (Abbildung 7.5, links), das aus dem 3D - Gebiet ausgeschnitten wurde, ergab sich nur ein minimaler Zufluss über den unteren Rand ($Q_{in,unten} = 0.02\% \cdot Q_{ex,Bohrung}$). Der Grund liegt darin, dass im Modell kein hochdurchflusswirksamer Anschluss des Kluftnetzes an die Schichtgrenze zur Schluffschicht existiert.

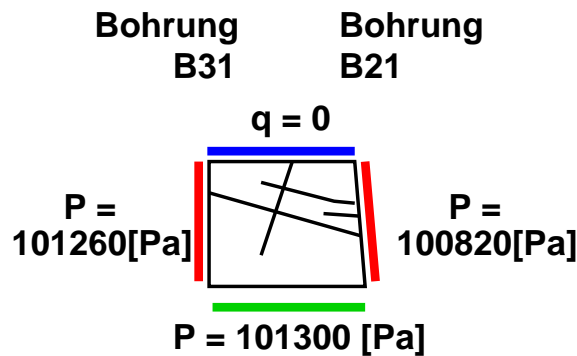


Abbildung 7.4: Modellgebiet 1: Randbedingungen

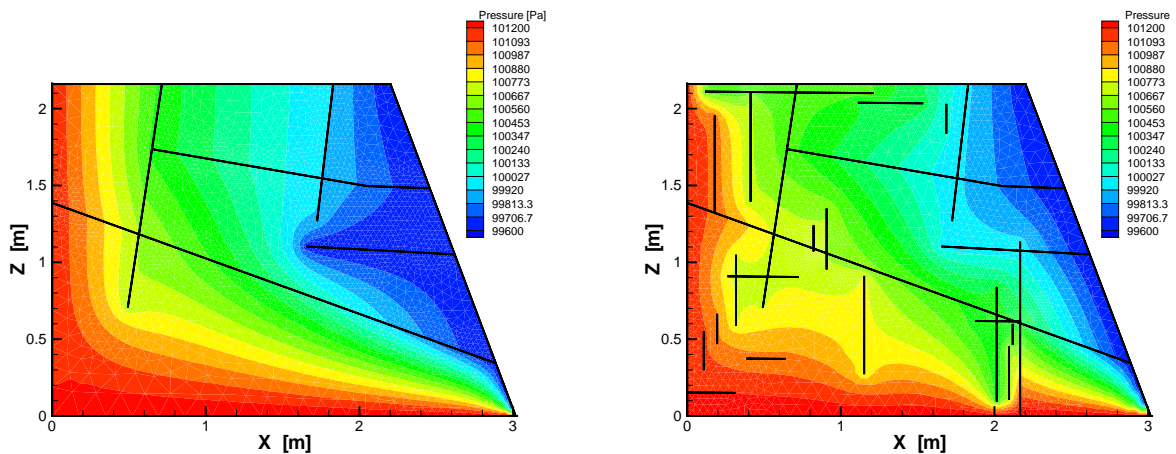


Abbildung 7.5: Modellgebiet 1, Druckverteilung: Links: deterministisches Kluftnetz. Rechts: Kombination deterministisches und stochastisches Kluftnetz

In einem nächsten Schritt wurde dem deterministischen 3D - Kluftnetzwerk ein stochastisches 3D - Kluftnetzwerk basierend auf den Werten in Tabelle 7.1 überlagert. Der 2D - Schnitt des Kluftnetzwerkes und die Druckverteilung ist in Abbildung 7.5, rechts, zu sehen. Das Kluftnetzwerk ist über eine Kluft direkt mit dem unteren Rand verbunden. Der Einfluss dieser Kluft zeigt sich deutlich in der Bilanzierung der Zu- und Abflüsse: $68.02\% \cdot Q_{\text{ex,Bohrung}}$ strömen über den unteren Rand zu. Aus den Simulationsergebnissen dieser Studie lässt sich Folgendes ableiten:

- Ein nicht zu vernachlässigender Zustrom in das Untersuchungsgebiet erfolgt über die Schichtgrenze Feldversuchsblock – Schluffschicht.
- Ein reiner Matrixanschluss an der Schichtgrenze Feldversuchsblock und Schluffschicht führt nicht zu den hohen Zustromraten. Um den hohen Zustrom über die Schichtgrenze zu ermöglichen, muss der Feldversuchsblock und die Schluffschicht durch hochdurchflusswirksame Klüfte miteinander in direktem Kontakt stehen.
- Den Atmosphärendruck direkt am unteren Modellrand anzulegen, kommt nahezu einer *worst case* Bedingung gleich. Jedoch zeigt das einfache Beispiel den deutlichen Einfluss des unteren Modellrandes, insbesondere wenn er direkt über eine Kluft an den Feldversuchsblock angeschlossen ist.

7.1.2 Modellgebiet 2: 2D - Ebene zwischen Bohrung B21 und Bohrung B31 unter Einbeziehung der Schluffschicht

Um das Modellsystem hinsichtlich der Randbedingung am unteren Modellrand realistischer zu gestalten, wurde in einer weiteren Studie das Modellgebiet um die tonigfeinsandige Schluffschicht gemäß der Systemskizze in Abbildung 7.3 erweitert. Zudem wurde das generierte 3D - Kluftnetzwerk nochmals mit den Informationen aus der Oberflächenkartierung und der Lage der Bohrpunkte abgeglichen. Hierbei ergab sich eine Modifizierung des 3D - Kluftnetzwerkes: Die steilstehenden Klüfte reichen bis zur Schluffschicht. In Abbildung 7.6, links, ist die Umsetzung des Natursystems im Modell durch die gewählten Randbedingungen skizziert. In der rechten Abbildung ist die Kennzeichnung der Kluftelemente, wie sie in Tabelle 7.3 verwendet wird, dargestellt.

Bei der Diskretisierung des Modellgebietes wurde darauf geachtet, dass entlang der Kluftspuren sehr fein vernetzt wird, wohingegen im Bereich der Schluffschicht ein gröberes Netz vorliegen darf. Das vernetzte Gebiet mit einer Anzahl von 4140 Knoten ist in Abbildung 7.7 zu sehen.

Die in Tabelle 7.2 genannten Strömungsparameter dienen als Eingangswerte zur Berechnung des Durchflusses Q_{out} . Um in der Modellrechnung den gleichen Durchfluss wie in der Messung B31E_B21_Kurz (TP1) zu erzielen, wurden die Modellparameter *Matrixpermeabilität*, *Schluffpermeabilität* und *Kluftöffnungsweite Kluft-i* variiert. In Tabelle 7.3 sind die Variationen der Modellparameter und die entsprechenden Zu- und Abflüsse protokolliert. Hier gilt anzumerken, dass die Parameter, insofern sie nicht variiert wurden, aus der vorhergehenden Spalte zu übernehmen sind.

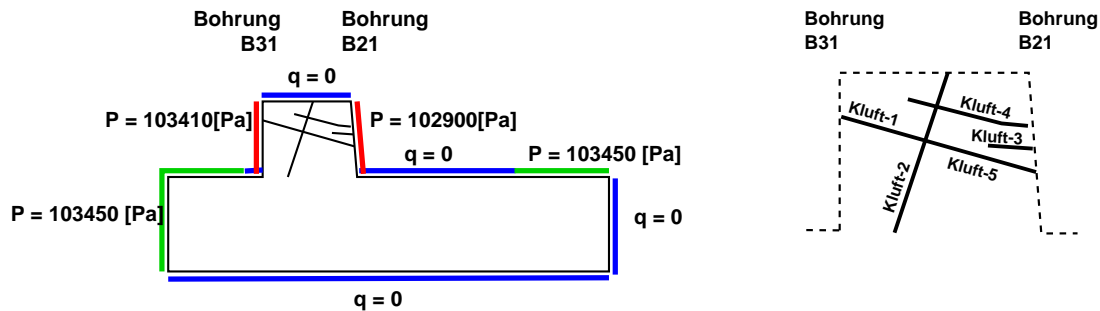


Abbildung 7.6: Um die tonig-feinsandige Schluffschicht erweitertes Modellgebiet. Links: Darstellung der Randbedingungen in Anlehnung an Messung B31E_B21_Kurz ([34]). Rechts: Kennzeichnung der Kluftspuren im Modell.

	run01a	run01b	run01c	run01d	run01e	run01f	run01g
Permeabilität [m^2]							
Matrix				5.0e-13			
Schluff	1.33e-12					1.0e-11	7.07e-10
Öffnungsweite [m]							
Kluft-1	0.001	0.002	0.0005		0.00045		0.00047
Kluft-2	0.001	0.010			0.015	0.02	
Kluft-3	0.001	0.002			0.005		
Kluft-4	0.001	0.002			0.005		
Kluft-5	0.001	0.002			0.010	0.02	
Permeabilität [m^2]							
Kluft-1	8.333e-8	3.333e-7	2.0833e-8		1.6875e-8		1.8408e-8
Kluft-2	8.333e-8	8.333e-6			1.875e-5	3.333e-5	
Kluft-3	8.333e-8	3.333e-7			2.0833e-6		
Kluft-4	8.333e-8	3.333e-7			2.0833e-6		
Kluft-5	8.333e-8	3.333e-7			8.333e-6	3.333e-5	
Q_{in} [m^3/s] (Bohrung B31 Q _{in} = 1.833e-5 [m^3/s])							
Simulation	1.1453e-4	9.898e-4	2.253e-5	2.263e-5	1.668e-5	1.668e-5	1.898e-5
Q_{out} [m^3/s] (Bohrung B21 Q _{out} = 9.240e-4 [m^3/s])							
Simulation	1.1453e-4	9.911e-4	2.426e-5	2.955e-5	2.365e-5	3.679e-5	9.3234e-4

Tabelle 7.3: Kalibrierung der Durchflüsse des 2D - Modellgebietes: Variation der Strömungsparameter

Eine Erhöhung der Kluftöffnungsweiten (*run01b*) gegenüber dem Basisfall *run01a* wirkt sich deutlich auf die Durchflussrate aus. Die erzielte Abflussrate kommt dem gemessenen Abfluss sehr nahe. Jedoch ist der dadurch erzielte Zufluss entlang der Bohrung B31 im Vergleich zur Messung zu groß. Um den Zufluss entlang der Bohrung B31 stärker einzugrenzen, wurde die direkte Kluftverbindung zwischen Bohrung B31 und B21 in zwei Kluftabschnitte *Kluft-1* und *Kluft-5* unterteilt (siehe Abbildung 7.6.rechts). Die Wahl einer sehr kleinen Öffnungsweite für die Kluft *Kluft-1* führt zu der gewünschten Verminderung des Zuflusses entlang der Bohrung B31 (siehe *run01c* und *run01e*), wohingegen die geringe Abflussrate am Ausflussrand nicht gewollt ist. Das Kluftsystem reguliert sehr stark die Durch-

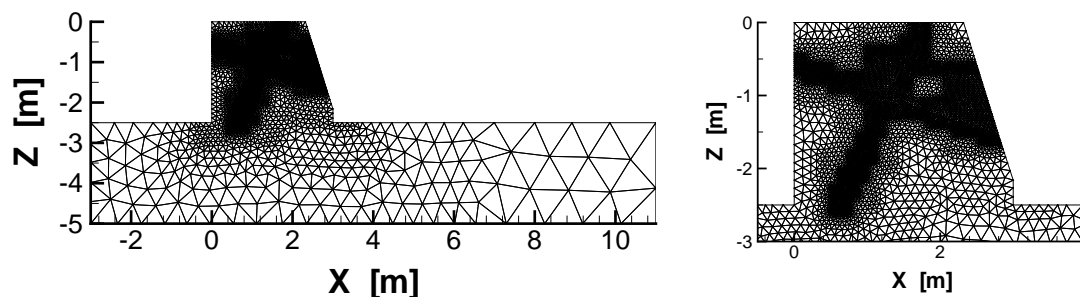


Abbildung 7.7: FE - Netz des Modellgebietes 2 (4140 Knoten) mit Zoomausschnitt aus dem Bereich *Feldversuchsblock*

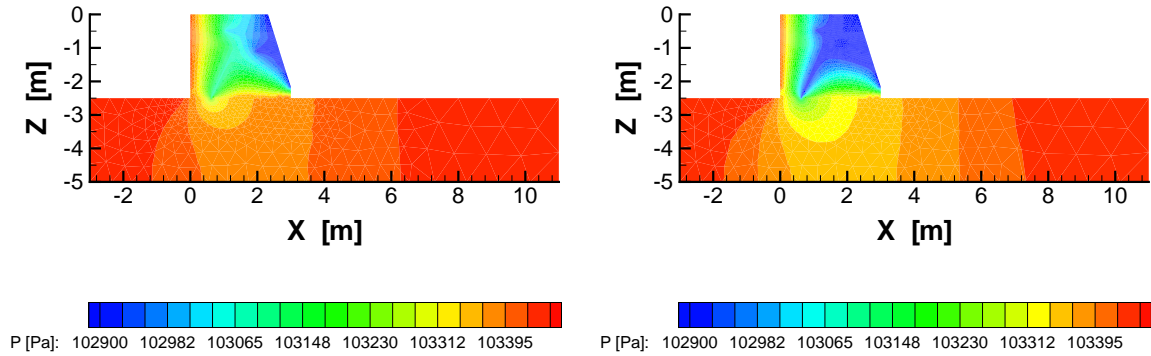
flussmenge, wohingegen die Sandsteinmatrix lediglich zur Feinabstimmung des gewünschten Durchflusses beiträgt (siehe *run01d*). Der gewählte Wert von $k_{\text{Sandstein}} = 5.0 \cdot 10^{-13} [\text{m}^2]$ stellt hier einen effektiven Wert dar, der neben der Gesteinsmatrix auch weitere Klüfte, die im Untersuchungsgebiet vorliegen, wiedergibt.

Wie man aus den Messungen und aus der Studie Modellgebiet 1 (siehe Kapitel 7.1.1) ersehen kann, erfolgt der Hauptzufluss zum Untersuchungsgebiet über die Schichtgrenze *Feldversuchsblock* – *Schluffschicht*. Um dieses Verhalten im Modell wiedergeben zu können, wurde die Kluftöffnungsweite der steilstehenden Kluft *Kluft-2* in *run01b*, *run01e* und *run01f* nochmals deutlich erhöht. Zudem wurde die Schluffpermeabilität zu $k_{\text{Schluff}} = 7.07 \cdot 10^{-10} [\text{m}^2]$ gesetzt (*run01f*). Die in Fall *run01f* erzielten Zu- und Abflussraten stimmen nahezu mit den gemessenen Werten überein. Der Parameterdatensatz *run01f* dient als Basisdatensatz für die weiteren Strömungs- und Transportberechnungen.

Exemplarisch für die in Tabelle 7.3 vorgestellten Strömungsberechnungen sind in Abbildung 7.8 die Druckverteilungen für die Berechnungen *run01a* und *run01f* dargestellt. Bedingt durch die höhere Schluffpermeabilität, die größere Kluftöffnungsweite der steilstehenden Kluft *Kluft-2* und die sehr geringe Kluftöffnungsweite der linksseitigen Kluft *Kluft-1* erfolgt in *run01f* ein stärkerer Druckabbau im Bereich der Schluffschicht und insbesondere entlang der steilstehenden Kluft *Kluft-2*.

Für die Transportberechnungen wurden als Randbedingungen an der Injektionsbohrung über die Einleitdauer $t_{\text{ein}} = 60 [\text{s}]$ eine konstante Konzentration $[c/c_0] = 1.0$ vorgegeben. An der Extraktionsbohrung wurde ein freier Ausstromrand angesetzt. In Tabelle 7.4 sind die Datensätze der Parametervariationen protokolliert. Hier gilt anzumerken, dass die Parameter, insofern sie nicht variiert wurden, aus der vorhergehenden Spalte zu übernehmen sind. In Abbildung 7.9 sind die Durchbruchkurven für die verschiedenen Simulationen aus Tabelle 7.4 zu sehen. In der rechten Abbildung ist das Ergebnis Simulation *run03* nicht enthalten. Man beachte zudem die unterschiedliche Achsenskalierung in den beiden Abbildungen.

Wie in Abbildung 7.9, links, zu erkennen ist, weicht die Simulation *run03* stark von den Ergebnissen der anderen Simulationen ab. Die Erstankunftszeit ist in allen fünf Kurven sehr

Abbildung 7.8: Druckverteilung: Studie *run01a* und Studie *run01f*

	run01	run02	run03	run04	run05	run06
Porosität [–]						
Matrix	0.30					
Schluff	0.30					
Klüfte 1 – 5	0.30			0.40	0.30	
Dispersivität [m]						
Matrix längs	0.002	0.01	0.001		0.01	
Matrix quer	0.002	0.01	0.001		0.01	
Klüfte 1 – 5	0.001				0.01	0.01
Molekulare Diffusion [m ² /s]	6.12 · 10 ⁻⁵		0.0	6.12 · 10 ⁻⁵	0.0	6.12 · 10 ⁻⁵

Tabelle 7.4: Variation der Transportparameter

früh. Die Kurve *run03* steigt sehr steil an und fällt nach Erreichen des Maximalwertes sofort wieder ab. Ein zweiter, sehr viel geringerer Peak lässt auf einen zweiten Fließweg innerhalb des Kluftsystems schließen. Für den stark advektiv ausgeprägten Transport ist die geringe hydrodynamische Dispersion verantwortlich: die molekulare Diffusion ist zu Null gesetzt und die Dispersivität der Klüfte und der Sandsteinmatrix ist relativ klein. Der zweite Peak in *run03* deutet auf einen weiteren Hauptfließweg im System hin.

Die Durchbruchkurven der Simulationen *run01*, *run02*, *run04* und *run05*, die gesondert in Abbildung 7.9, rechts, zu sehen sind, unterscheiden sich kaum voneinander. Sie steigen ebenfalls steil an, jedoch ist ihr Maximum geringer als der Maximalwert in *run03*. Das Tailoring weist auf einen nicht zu vernachlässigenden Matrixeinfluss hin. Die Kurve *run05* erreicht einen etwas höheren Maximalwert als die Kurven *run01*, *run02* und *run04*. Wie in *run03* ist auch in *run05* die molekulare Diffusion zu Null gesetzt, jedoch unterbindet die relativ hohe Dispersion die Ausbildung eines stark advektiv geprägten Transportes, wie man ihn in *run03* beobachten kann.

Die Konzentrationsverteilungen im Bereich des Feldversuchsblocks sind für die Simulationen *run01* und *run03* für $t = 60[s]$, $t = 180[s]$ und $t = 3000[s]$ in den Abbildung 7.10 und

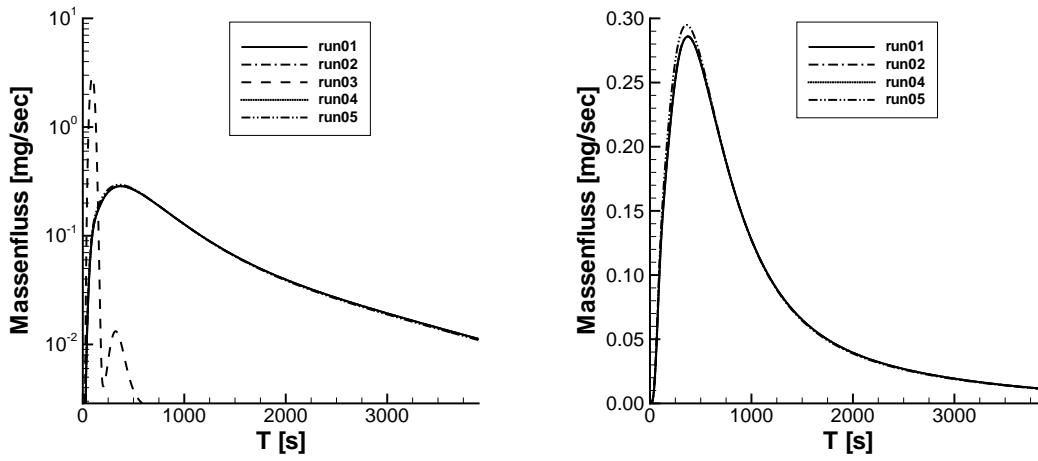


Abbildung 7.9: Durchbruchkurven für die Simulationen aus Tabelle 7.4

7.11 dargestellt.

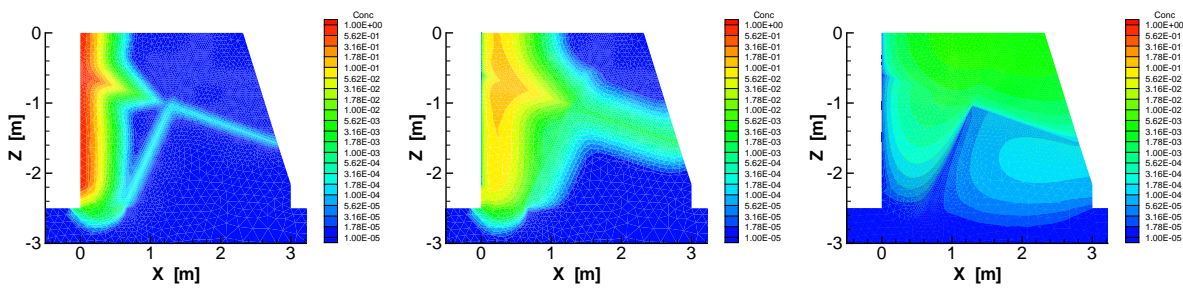


Abbildung 7.10: run01: Konzentrationsverteilung $[c/c_0]$ nach $t=60[s]$, $t=180[s]$ und $t=3000[s]$

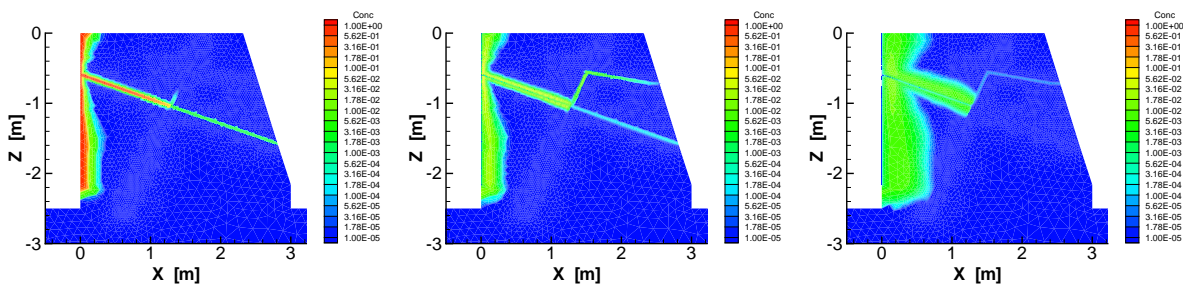


Abbildung 7.11: run03: Konzentrationsverteilung $[c/c_0]$ nach $t=60[s]$, $t=180[s]$ und $t=3000[s]$

Die Simulationsergebnisse von *run01* zeigen, dass neben den Klüften auch die Matrix einen nicht zu vernachlässigenden Anteil am Transportgeschehen besitzt (siehe Abbildung 7.10). Ein großer Anteil des Tracers dringt in die Matrix ein und strömt dann langsam dem Kluftsystem wieder zu. Der Haupttransport erfolgt jedoch weiterhin durch das Kluftsystem. Bedingt durch die geringe hydrodynamische Dispersion und die zu Null gesetzte molekulare Diffusion bildet sich in Simulation *run03* ein nahezu advektiver Transport durch das Untersuchungsgebiet aus. Wie in Abbildung 7.11 deutlich zu sehen ist, wird der Tracer nur durch das Kluftsystem ($t = 60[s]$, $t = 180[s]$) transportiert. Am Intersektionspunkt der Klüfte *Kluft-1*, *Kluft-2* und *Kluft-5* kommt es zu einer sehr starken Verdünnung der Konzentrationsfront. Nach Beendigung der Eingabe bleibt ein großer Anteil des Tracers im Matrixbereich der Kluft *Kluft-1* zurück. In Abbildung 7.11, mitte, ist in dem rechten, oberen Kluftabschnitt die zweite Tracerfront zu sehen, die als zweiter Peak in der Durchbruchskurve (*run03*, Abbildung 7.9, links) zu erkennen ist.

7.1.3 Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen

Die von HÖTZL, BÄUMLE, THÜRINGER & WITTHÜSER gemessenen Durchflussraten und Tracerdurchbruchskurven zwischen den Bohrungen B21 und B31 (siehe Abbildung 7.1) wurden auf der Basis der diskreten Modellierung unter Anwendung verschiedener 2D - Modellgebiete (Kapitel 7.1.1 und 7.1.2) simuliert.

Kalibrierung des Modelles bzgl. der Durchflussraten

Um die im Feld beobachteten hohen Zuflussraten im Modell gewährleisten zu können, muss ein direkter Kontakt zwischen dem hochdurchflusswirksamen Kluftnetzwerk des Feldversuchsblocks und der Schluffschicht bestehen. Um die gemessenen Durchflussraten im Modell erzielen zu können, wurde die Kluftöffnungsweite der steilstehenden Kluft sehr groß und die an der Bohrung B31 anschließende Kluft sehr klein gewählt. Die Öffnungsweite der steilstehenden Kluft ist, wie man im Feld beobachten kann, im Vergleich zu den horizontal verlaufenden Klüften bzw. Sedimentationsgrenzen größer. Jedoch ist die hier gewählte Öffnungsweite eher als effektive Größe zu verstehen, die stellvertretend für die Öffnungsweite aller Klüfte im Natursystem steht, die mit der Trennfläche Feldversuchsblock – Schluffschicht in Kontakt stehen und somit einen Zufluss entlang der Trennfläche in den Feldversuchsblock ermöglichen. In einem nächsten Schritt soll ein 2D - Modell, das die deterministischen und stochastischen Informationen des Feldversuchsblocks beinhaltet, für die weiteren Untersuchungen herangezogen werden. Die Unsicherheiten des geometrischen Modelles sollen somit verringert werden.

Transportsimulationen

In Abbildung 7.12 sind die Durchbruchskurven für die Messungen B31E.B21_Kurz und die berechneten Kurven der Simulationen *run01*, *run02*, *run04* und *run05* dargestellt. Die Durchbruchskurven in Abbildung 7.12 sind als Massenfluss [mg/s] über die Zeit t aufgetragen. Folgende Beobachtungen können gemacht werden:

- Die Ankunftszeit in den Simulationen ist sehr viel früher als in der Messung. Kurz

nach Beginn der Tracerzugabe tritt in den Simulationen schon das Antwortsignal an der Extraktionsstelle auf, wohingegen in den Messungen erst nach einigen Minuten das erste Antwortsignal gemessen werden kann.

- Die berechneten Kurven und die gemessene Kurve unterschieden sich hinsichtlich des Maximalwertes, jedoch sind die Kurven bzgl. ihrer Charakteristik (Kurvenanstieg, Kurvenabfall, Tailing) ähnlich.
- Ein leichtes Tailing in den Berechnungen und der Messung deutet auf einen geringen Matrixeinfluss hin.

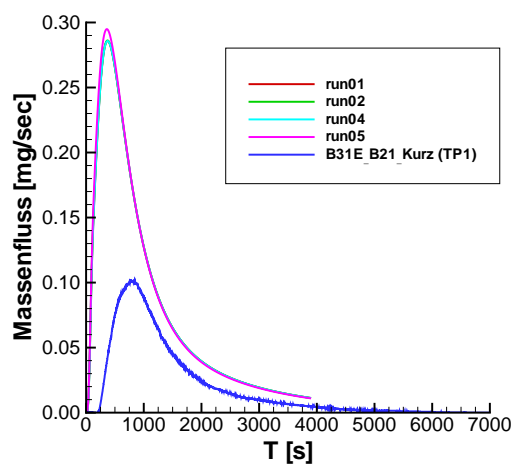


Abbildung 7.12: Vergleich der gemessenen und der berechneten Durchbruchkurven

Diese erste Vergleichsstudie zwischen gemessenen und berechneten Durchbruchkurven zeigt, dass weitere Untersuchungen notwendig sind, um das hochkomplexe Systemverhalten simulieren zu können. Die Studie bietet jedoch eine gute Grundlage, auf der die Modelle hinsichtlich der bisher getroffenen Vereinfachungen und Annahmen sukzessive erweitert werden können. Das Lernmodell dient dazu, die umfangreichen Feldmessungen zu begleiten und gegebenenfalls zu optimieren. Man kann davon ausgehen, dass die folgenden Vereinfachungen und Annahmen, die bisher im Modell enthalten sind, maßgeblich für die oben genannten Unstimmigkeiten zwischen den Messungen und den Berechnungen verantwortlich sind.

- Der Feldversuchsblock liegt in der ungesättigten Zone, die durch das Vorhandensein einer Luft- und einer Wasserphase gekennzeichnet ist. Die Mobilität der Luftphase kann somit je nach Sättigungsgrad der Wasserphase stark vermindert sein, was zu einer Verzögerung und Dämpfung der Konzentrationsfront führen kann.

- Im Südost/Ost - Bereich des Feldversuchsblocks verläuft ca. 1[m] unter GOK eine poröse Zwischenschicht, die eine Mächtigkeit von 0.20[m] aufweist. Es ist anzunehmen, dass diese, im Vergleich zur Gesteinsmatrix sehr viel geringer durchlässige Schichtung, das Transportgeschehen maßgeblich beeinflussen wird.
- Die Klüfte wurden als parallele Platten mit einer konstanten Öffnungsweite im Modell abgebildet. Feldbeobachtungen haben jedoch gezeigt, dass die Klüfte stellenweise ton- bzw. sandverfüllt sind. Durch die heterogene Struktur der Klüfte können sich Channels bilden, die wiederum zu einer Veränderung des Strömungsverhalten in den Klüften führen können (siehe HÖTZL, THÜRINGER & WITTHÜSER (1997)[35]).
- Die Simulationen erfolgten auf der Basis eines vertikalen 2D - Schnittes durch den Feldversuchsblock. Das 2D - Modell kann das ausgeprägte 3D - Verhalten eines Kluftsystemes nur bedingt wiedergeben. Zukünftig sollen Untersuchungen zum Strömungs- und Transportverhalten in einem 3D - Modell sowohl für ein 2D - Kluftnetzwerk im 3D - Raum als auch für ein 3D - Kluft - Matrix - System durchgeführt werden. In Abbildung 7.13 - Abbildung 7.16 sind erste Ansätze und Strömungsberechnungen dazu dargestellt. Die bisher angesetzten Randbedingungen sind noch nicht an die Messungen angepasst.
- Bisher wurde nur das deterministische Kluftmodell in der Transportbetrachtung untersucht. Um die Unsicherheiten und die fehlenden Informationen des deterministischen Kluftmodells zu vermindern, sollen stochastisch generierte Kluftfelder dem vorhandenen Modell überlagert werden (siehe Kapitel 5.1).
- Der Einfluss der geometrischen Beschreibung des Kluftnetzwerkes und der Modellparameter auf das Strömungs- und Transportverhalten wird zur Zeit im Rahmen einer Studienarbeit ausführlich untersucht (VOGELMANN (2000)[78]).

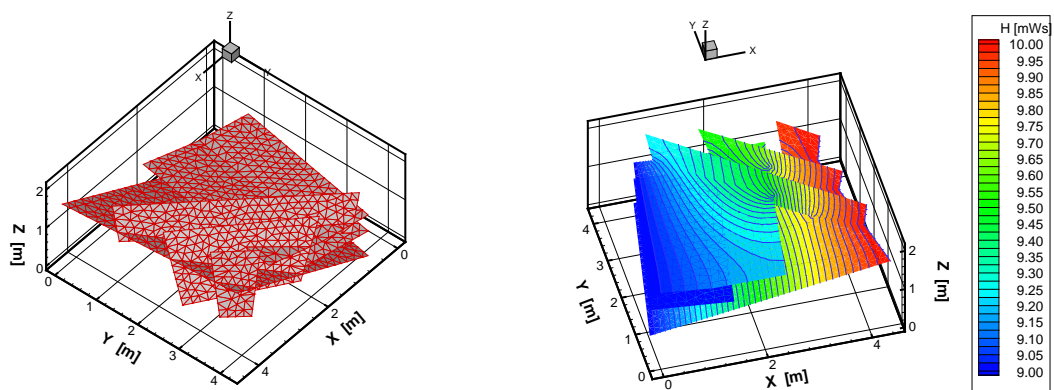


Abbildung 7.13: Links: FE - Netz 3D - Kluftnetzwerk. Rechts: Piezometerhöhenverteilung.

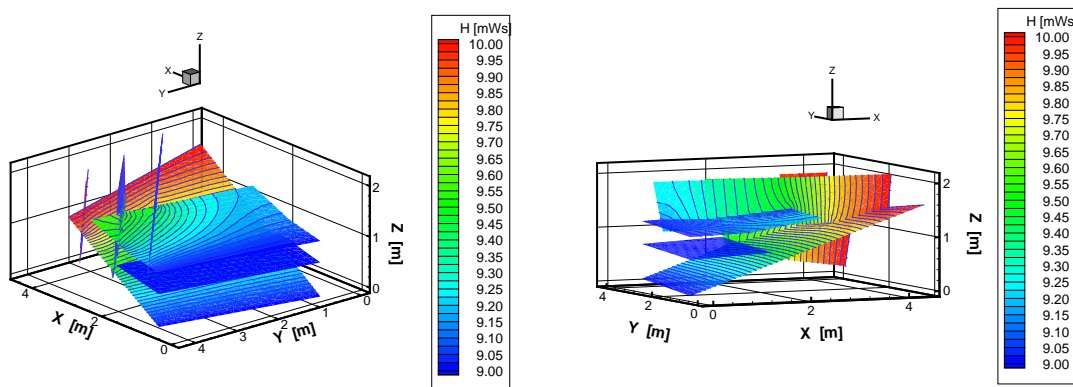


Abbildung 7.14: 3D - Kluftnetzwerk: Piezometerhöhenverteilung

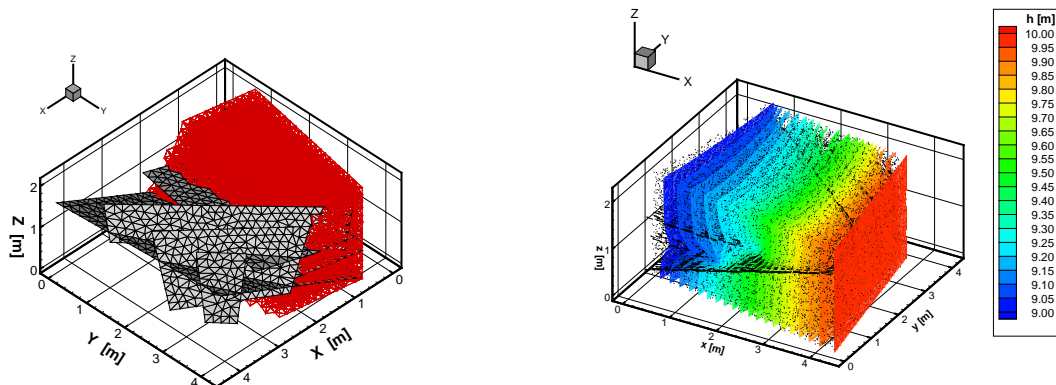


Abbildung 7.15: Links: FE - Netz 3D - Kluft - Matrix - System, Matrixdiskretisierung in Teilen dargestellt. Rechts: Piezometerhöhenverteilung und Geschwindigkeitsfeld.

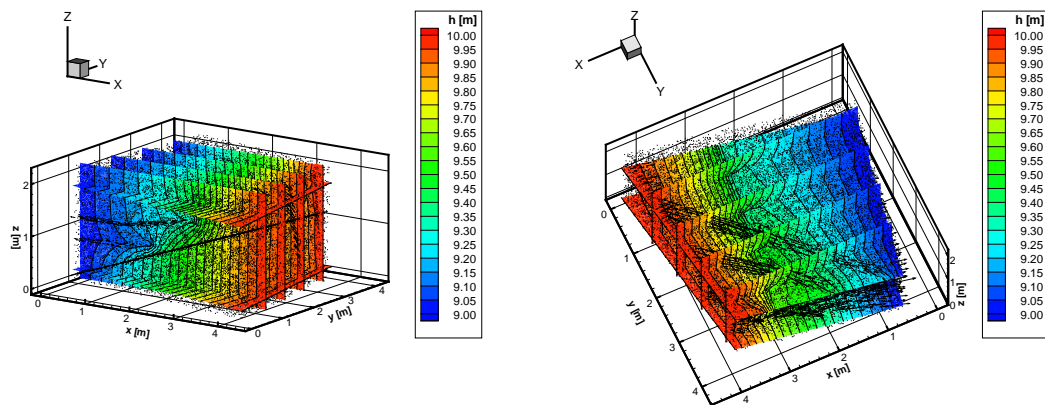


Abbildung 7.16: 3D - Kluft - Matrix - System: Schnitte durch die Piezometerhöhenverteilung, Geschwindigkeitsfeld

7.2 Mehrphasenströmung in einem Kluft – Matrix – System

Um den Brückenschlag vom Strukturmodell zur komplexen Simulation zu zeigen, wird in diesem Beispiel das Mehrphasenströmungsverhalten in einem Kluft – Matrix – System diskutiert. In das zunächst vollständig wassergesättigte System dringt ein Fluid ein, das schwerer als die Wasserphase und nicht mit Wasser mischbar bzw. darin nur sehr gering löslich ist. Diese Fluide werden i.A. als DNAPL (*Dense Non Aqueous Phase Liquid*) bezeichnet. Im Untersuchungsgebiet liegen somit zwei getrennte Fluide vor: Wasser und DNAPL. Dadurch kommt es zur Ausbildung einer Mehrphasenströmung. Auf die Theorie der komplexen Mehrphasenströmungsvorgänge soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Eine umfangreiche Darstellung der Theorie der Mehrphasenprozesse im Untergrund und ihre modelltechnische Umsetzung ist z.B. in HELMIG (1997)[28] gegeben.

Das nachfolgende Beispiel betrachtet das Mehrphasenströmungsverhalten in einem geklüfteten System unter Einbeziehung der Gesteinsmatrix. Die Klüfte werden als diskrete Elemente in das Modell integriert. Zunächst wird das Kluft – Strukturmodell unter Anwendung des Kluftgenerators FRAC3D (Kapitel 5) generiert. Das generierte Kluftsystem muss anschließend vernetzt werden. Hierzu wird der Netzgenerator ART (FUCHS (1999)[22]) verwendet. Die Berechnung der Mehrphasenströmung erfolgt mit dem Programm MUFTE_UG in Zusammenarbeit mit Volker Reichenberger, IWR, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg (REICHENBERGER (2001)[69]).

7.2.1 Kluft – Strukturmodell

Die Eingangsdaten für die Kluftgenerierung wurden so gewählt, dass das Kluft – Strukturmodell eine hohe Konnektivität aufweist und die einzelnen Kluftflächen das Modellgebiet möglichst vollständig durchdringen. Die entsprechenden Eingangsdaten sind Tabelle 7.5 zu entnehmen. Drei Hauptorientierungen wurden vorgegeben. Die Verteilung der einzelnen Orientierungen wird über die Fisher – Verteilung (siehe Kapitel 3.5) beschrieben. Um eine große Variation der Kluftorientierungen erreichen zu können, wurde ein geringer Konzentrationsparameter κ vorgegeben. Für den Parameter der Kluftlänge wurde ein konstanter Wert gewählt, der annähernd der Ausdehnung des Generierungsgebietes entspricht. Durch die große Variation der Kluftorientierung um die gegebene Hauptorientierung und durch die großen Kluftlänge konnte die Vorgabe einer hohen Konnektivität und eine möglichst vollständigen Durchdringung des Modellgebietes durch die Kluftelemente erzielt werden. Abbildung 7.17 zeigt zwei Ansichten des generierten Kluftsystems, das aus 6 Klüften besteht.

Die anschließende Vernetzung erfolgte mit dem Netzgenerator ART (FUCHS (1999)[22]). Abbildung 7.18 zeigt das vernetzte System. In der linken Darstellung ist die Vernetzung auf der Außenfläche zu sehen. Die mittlere Darstellung zeigt das gesamte Gitternetz. Zur besseren Orientierung sind zusätzlich die Kluftelemente dargestellt. Die Vernetzung auf den Kluftflächen bzw. die Tetraederelemente, deren Seitenflächen die Gitterelemente auf den Kluftflächen darstellen, sind in der rechten Darstellung abgebildet. Wie aus Abbildung 7.18 deutlich zu sehen ist, kann die komplexe Struktur des Kluftnetzwerkes und der umgebenden Matrix durch ein unstrukturiertes Gitternetz, das jedoch sehr gleichmäßige

Kluftparameter	Verteilungsfunktion	Formparameter der Verteilungsfunktion		
		Azimut A	Fallwinkel D	Konzentrationsparameter κ
Orientierung	Fisher-Verteilung			
Set1		45°	90°	10.0
Set2		135°	90°	10.0
Set3		180°	0°	10.0
Dichte		0.5 [m ² /m ³]		
Länge	Konstant	13.0 [m]		
Gebietsgröße		12 × 12 × 12 [m ³]		

Tabelle 7.5: Eingangsdaten für die Kluftgenerierung

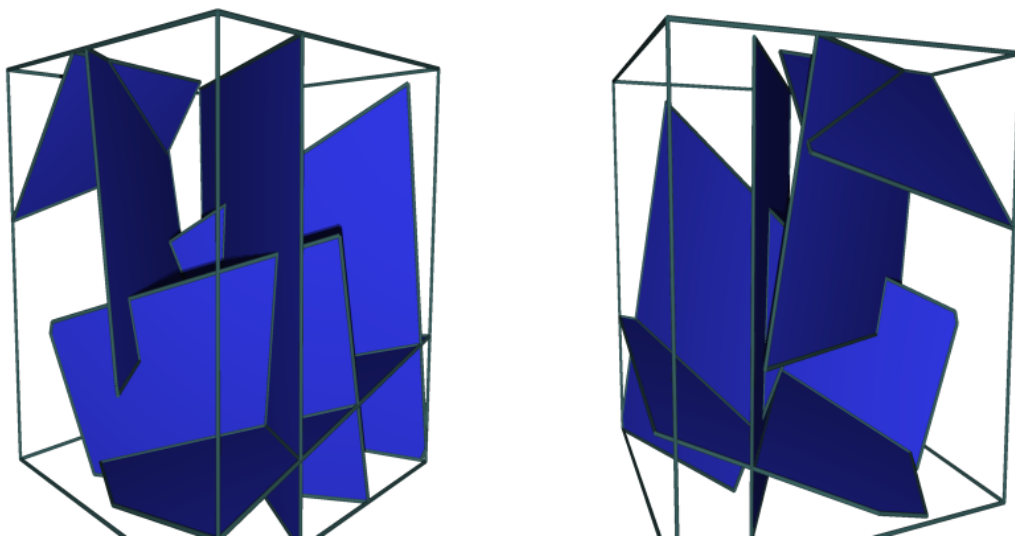


Abbildung 7.17: Kluftnetzwerk mit 6 Klüften, Darstellung des ausgeschnittenen Modellgebietes

Gitterelemente beinhaltet, abgebildet werden. Die erzielten Gitternetze sind von hoher Qualität, was für die anschließende numerische Berechnung der Mehrphasenströmungsvorgänge von großer Wichtigkeit ist.

7.2.2 Simulation der Mehrphasenströmung

Als Ausgangszustand liegt ein vollständig wassergesättigtes System vor. An den Seitenflächen herrscht eine hydrostatische Druckverteilung. Auf der Oberseite wird im Bereich $[5,8] \times [5,8]$ [m²] eine DNAPL – Quelle mit $0,8$ [kg/ms²] aufgegeben. Die Eigenschaften der beiden Fluide (w =Wasser, n =DNAPL) sind in Tabelle 7.6 protokolliert. Die Materialeigenschaften sowie die Parameter der konstitutiven Beziehungen sind Tabelle 7.7 zu entnehmen. Die Berechnung der DNAPL – Infiltration in das wassergesättigte System

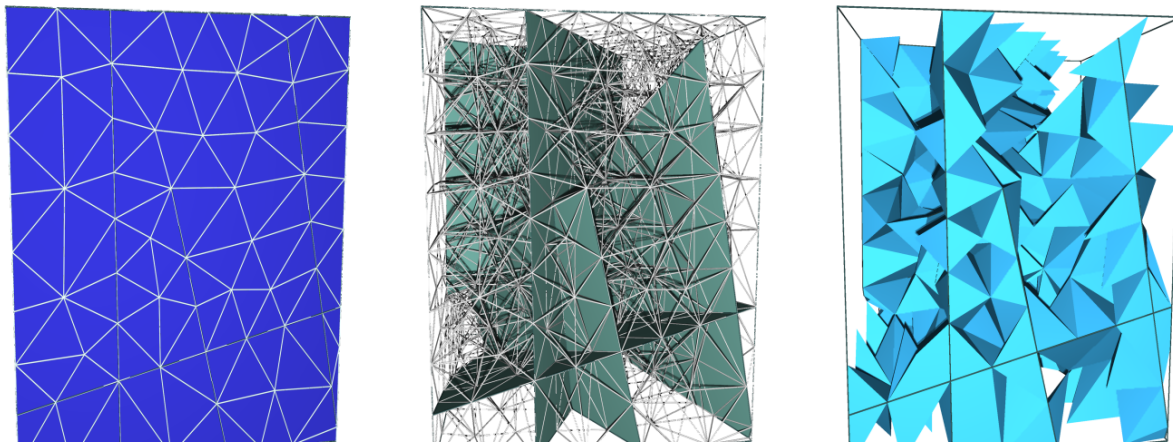


Abbildung 7.18: Vernetzung des Kluftsystems mit Netzgenerator ART[22]

erfolgte mit dem Programm MUFTE_UG in Zusammenarbeit mit Volker Reichenberger, IWR, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg (REICHENBERGER (2001)[69]).

Fluide	Dichte ρ [kg/m ³]	Dynamische Viskosität μ [Pa s]
Wasser	1000	$1.0 \cdot 10^{-3}$
DNAPL	5000	$1.65 \cdot 10^{-5}$

Tabelle 7.6: Fluideigenschaften von Wasser und DNAPL

	Porosität	Permeabilität	Residuale Sättigung		Brooks-Corey Parameter	Eintrittsdruck
	n [-]	k [m ²]	Wasser S_{wr} [-]	DNAPL S_{nr} [-]	λ [-]	p_d [Pa]
Matrix	0.3	10^{10}	0.10	0.0	2	1466
Kluft	0.4	10^8	0.12	0.0	577	1000

Tabelle 7.7: Materialeigenschaften und Parameter der konstitutiven Beziehungen nach BROOKS-COREY

In Abbildung 7.19 sind die ausgewählten 2D – Schnitte dargestellt, die im Weiteren die Simulationsergebnisse zeigen. Die nachfolgenden Abbildungen 7.20, 7.21 und 7.22 zeigen den Sättigungsverlauf der DNAPL – Phase zu drei verschiedenen Zeitpunkten.

Aufgrund der Unterschiede in den Permeabilitäten und im Eintrittsdruck (siehe Tabelle 7.6 und 7.7) zwischen Kluft und Matrix bildet sich eine stark heterogene Sättigungsfront aus. Die DNAPL Phase dringt sehr schnell in die Klüfte ein und verdrängt dabei die Wasserphase. In den beiden Vertikalschnitten ist dieses Verhalten deutlich zu sehen. Dagegen verdrängt die DNAPL Phase die Wasserphase nur sehr verhalten aus der Matrix. Die Front schreitet hier nur langsam voran. Zum Zeitpunkt $t = 22470$ [s] in Abbildung 7.22 kann zudem

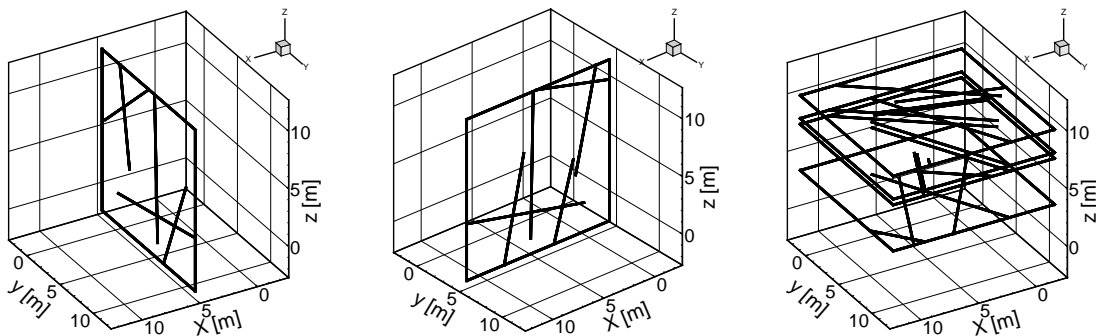


Abbildung 7.19: 2D Schnitte aus dem 3D Gebiet: $x=5.0[m]$ / $y=5.0[m]$, $6.0[m]$ / $z=10.0[m]$, $8.0[m]$, $3.5[m]$

in den beiden Vertikalschnitten beobachtet werden, dass die DNAPL Front nach Erreichen der Kluftverschneidung sich in der horizontal ausgeprägten Kluft weiter ausbreitet.

Endet eine Kluft in der Matrix, staut sich die DNAPL Phase am Ende der Kluft auf. Die DNAPL Phase kann erst dann in die umgebende Gesteinsmatrix eindringen, wenn die Sättigung groß genug ist bzw. wenn der Eintrittsdruck p_d erreicht wird. Zum Zeitpunkt $t = 11830[s]$ (Abbildung 7.21) hat die DNAPL Phase das Ende der mittleren Kluft erreicht. Die DNAPL Phase staut sich bereits auf, wie an den erhöhten Sättigungswerten zu erkennen ist. Eine kleine DNAPL Wolke scheint sich bereits in der umgebenden Matrix auszubreiten. Dieses Verhalten tritt zum Zeitpunkt $t = 22470[s]$ in Abbildung 7.22 noch deutlicher auf. Die Sättigungswerte der DNAPL Phase erreichen sehr hohe Werte, das DNAPL staut sich am Ende der Kluft zunehmend auf. Diese Verhalten ist durch folgenden Zusammenhang bedingt: Der Anteil an DNAPL, der in die umgebende Matrix eindringen kann ist geringer als der Anteil an DNAPL, der durch die Kluft kontinuierlich zuströmt. Dadurch kommt es zum Aufstau der DNAPL Phase. Die Vertikalschnitte in den Abbildungen 7.21 und 7.22 und die horizontalen Schnitte in Abbildung 7.22 zeigen dieses Verhalten sehr klar.

Das vorgestellte Beispiel zeigt deutlich den Einfluss eines geklüftet porösen Mediums auf das Mehrphasenströmungsverhalten. Die Klüfte sind für die schnelle Ausbreitung der DNAPL Phase verantwortlich. Dies führt zu einem stark heterogenen, weit verzweigten Frontverlauf innerhalb des gesamten Untersuchungsgebietes.

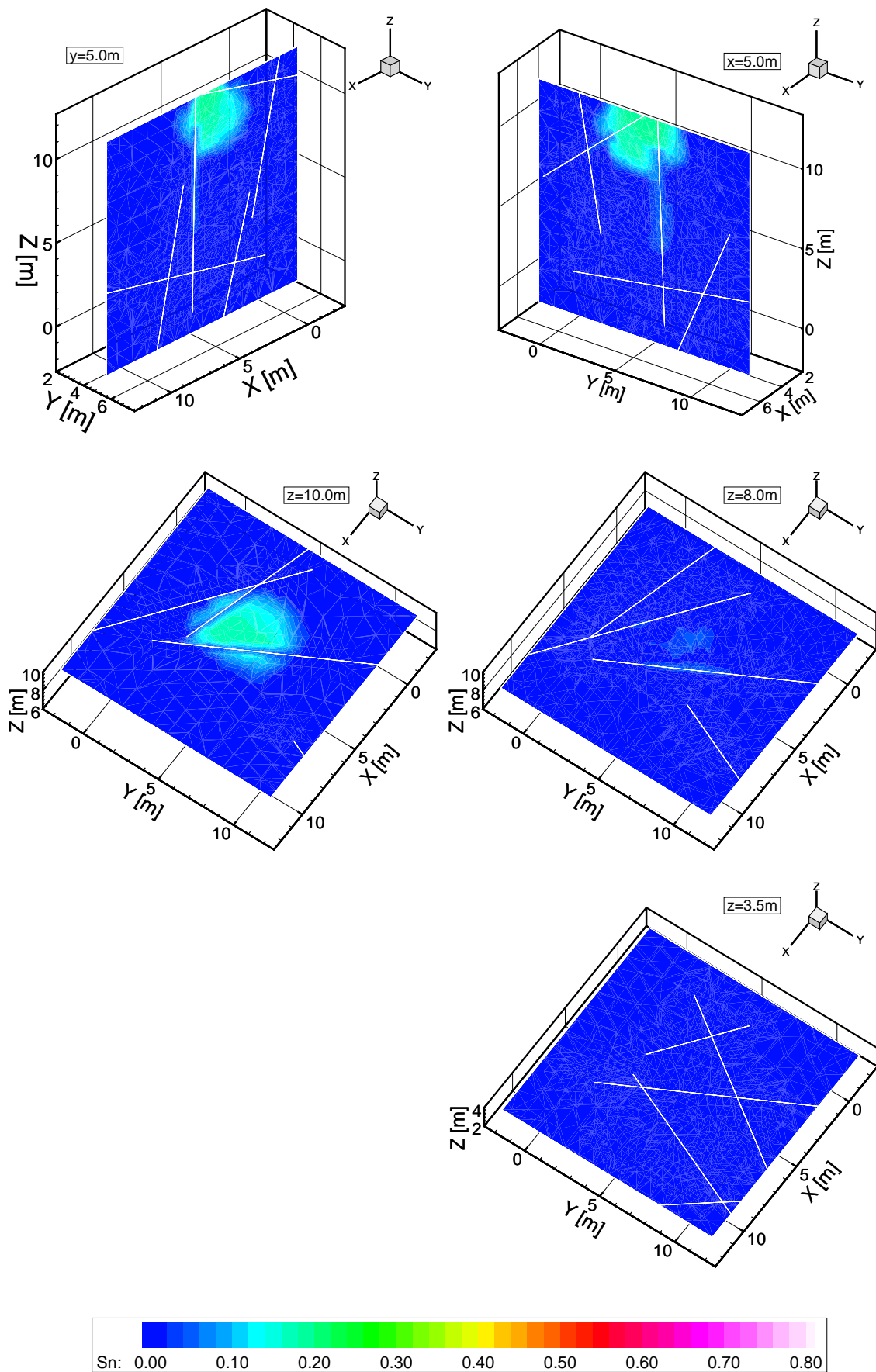


Abbildung 7.20: DNAPL Infiltration in ein mit Wasser gesättigtes geklüftetes poröses Medium: Darstellung der DNAPL Sättigung zum Zeitpunkt $t=7030$ [s]

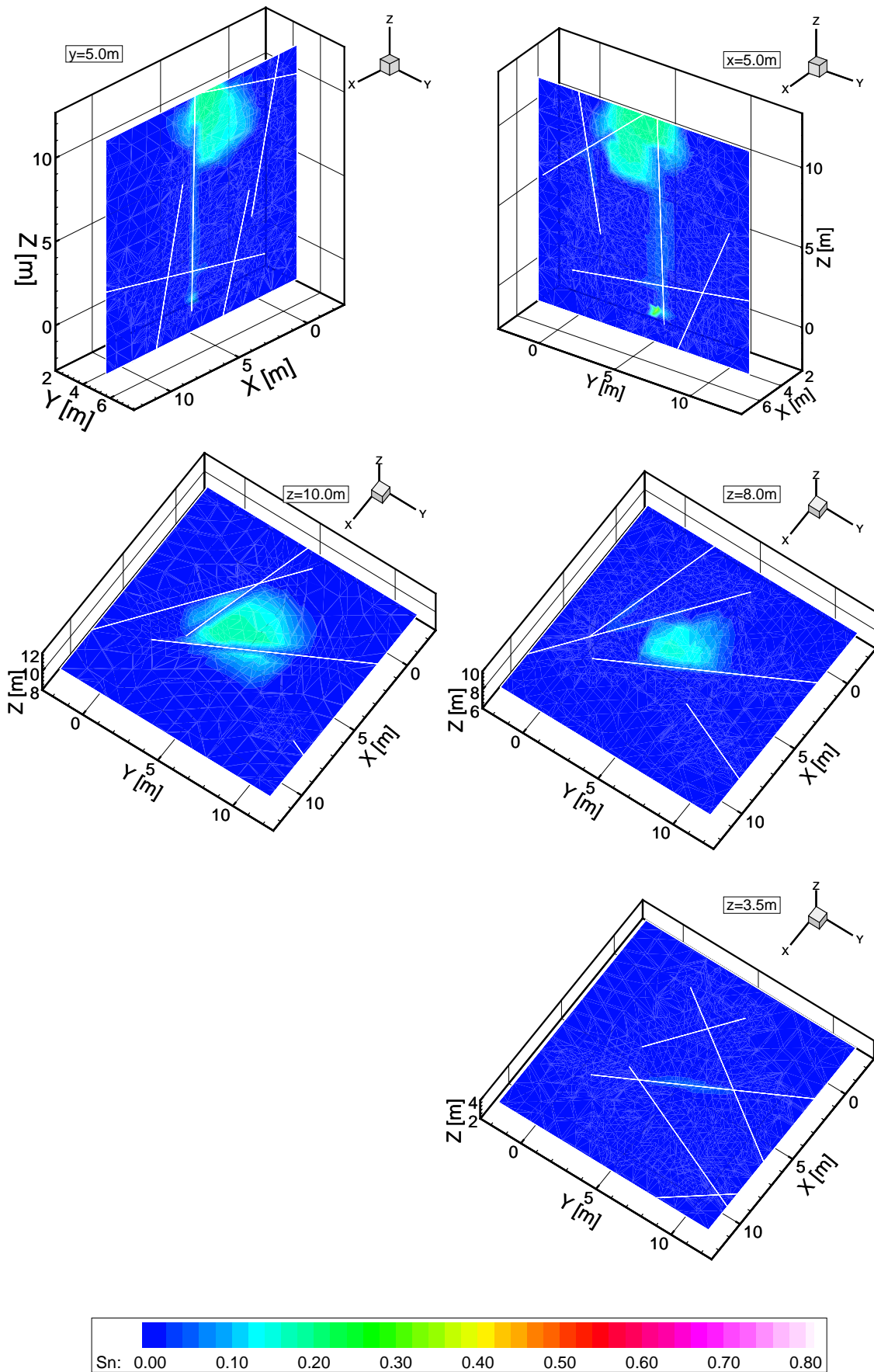


Abbildung 7.21: DNAPL Infiltration in ein mit Wasser gesättigtes geklüftetes poröses Medium: Darstellung der DNAPL Sättigung zum Zeitpunkt $t=11830\text{[s]}$

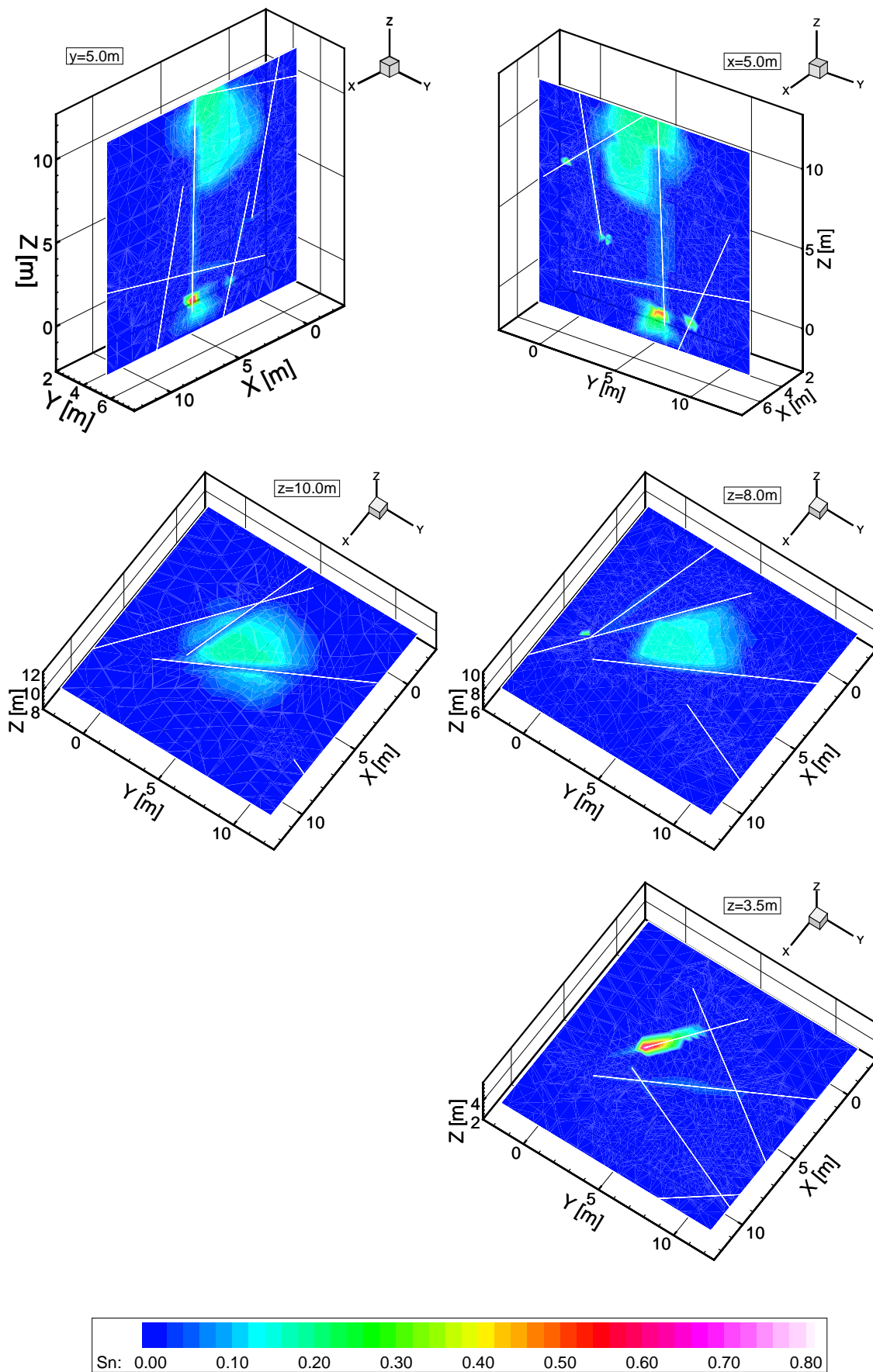


Abbildung 7.22: DNAPL Infiltration in ein mit Wasser gesättigtes geklüftetes poröses Medium: Darstellung der DNAPL Sättigung zum Zeitpunkt $t=22470$ [s]

8 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Arbeit war es, das räumliche Verhalten der Klüfte unter Anwendung einer geostatistischen Analyse zu untersuchen sowie die Entwicklung eines Kluftgenerators zur dreidimensionalen deterministisch – stochastischen Simulation von Kluft – Strukturmodellen. Diese Strukturmodelle dienen als Basis für eine anschließende numerische Modellierung der Strömungs- und Transportprozesse in einem Kluftaquifersystem.

Zunächst mussten Kriterien und Eigenschaften festgelegt werden, mit deren Hilfe ein geklüftetes Gestein charakterisiert werden kann. Diese Kriterien und Eigenschaften müssen im Feld oder im Labor qualitativ und quantitativ zu erfassen und beispielsweise durch einen funktionalen Zusammenhang zu beschreiben sein. Für den Aufbau eines Strukturmodells ist in erster Linie die geometrische Beschreibung eines Kluftsystems von Interesse. Hierzu wird das Kluftsystem bzw. die Kluft in einzelne Komponenten zerlegt. Man muss dabei beachten, dass die ursprüngliche „Einheit“ eines Kluftsystems durch diese Vorgehensweise aufgegeben wird.

Die einzelnen Komponenten der Kluft, die Kluftparameter, wurden von HÖTZL, THÜRINGER & WITTHÜSER (1997)[35] im Feld ermittelt und im Rahmen einer univariaten Statistik analysiert. Die Ergebnisse der univariaten Statistik liefern jedoch keinen Hinweis auf die räumliche Variabilität der einzelnen Kluftparameter. Eine zusätzliche geostatistische Analyse bietet die Möglichkeit, weitere Informationen, insbesondere bzgl. des räumlichen Verhaltens der Klüfte, erlangen zu können. Dadurch ist eine umfassendere Charakterisierung des Kluftsystems gegeben. Am Beispiel der geostatistischen Analyse des Kluftaquifersystems Pliezhausen wurden die Oberflächenkartierungen der Kluftspuren des Feldversuchsblocks hinsichtlich ihrer räumlichen Variabilität untersucht. Das Augenmerk der Untersuchungen lag hierbei auf der räumlichen Variabilität der Kluftabstände bzw. der Anordnung der Klüfte sowie auf der räumlichen Variabilität der Kluftlängen bzw. der Kluftausdehnungen.

Aufbauend auf deterministischen und/oder stochastischen Daten der Kluftparameter wurde ein Konzept entwickelt, mit dem Kluft – Strukturmodelle, die die Basis für die diskrete Modellierung von Strömungs- und Transportvorgängen im geklüfteten Gestein darstellen, generiert werden können. Die Kluftgenerierung hat die Aufgabe, basierend auf den im Feld und im Labor aufgenommenen Strukturinformationen, ein diskretes Strukturmodell zu erstellen. Sie stellt dabei das Bindeglied zwischen der Natur und dem numerischen Modell dar. Die Klüfte werden hierbei als diskrete Elemente im Raum abgebildet. Im 2D Modell werden die diskreten Klüfte als 1D Stabelemente beschrieben, im 3D Modell als 2D Viereckselemente. Ausgeprägte Fließwege innerhalb von Klüften, sogenannte Channels, können als 1D - Stabelemente approximiert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der 3D – Kluftgenerator FRAC3D entwickelt, der neben den notwendigen Schnittstellen für die Netzgenerierung und die Strömungs- und Trans-

portsimulation die Möglichkeit bietet, verschiedenste Verfahren (z.B. Verfahren zur Bewertung und Analyse der generierten Kluffnetze, Optimierungsverfahren) in den Programmalgorithmus zu implementieren und zu testen, um eine bestmögliche Aussage hinsichtlich ihrer Anwendungsmöglichkeiten geben zu können. Die Generierung der Strukturmodelle kann auf dem deterministischen, dem stochastischen oder dem konditionierten Ansatz, einer Kombination der beiden ersten Ansätze, basieren. Die Wahl des zur Anwendung kommenden Generierungsansatzes ist abhängig von der Quantität und Qualität der vorliegenden Eingangsdaten.

Anhand ausgewählter Beispielrechnungen konnte die erfolgreiche Modellbildung mit den Teilschritten Kluffgenerierung, Netzgenerierung sowie Strömungs- und Transportsimulationen von Kluftaquifersystemen aufgezeigt werden. Im Rahmen der Berechnungen wurden zudem Sensitivitätsanalysen durchgeführt, die dazu dienen, den Einfluss der Kluffparameter und der Materialeigenschaften (Kluft/Matrix) quantifizieren zu können.

Die vorliegenden Ergebnisse der geostatistischen Analyse der Kluffabstände/Anordnung der Klüfte und der Klufflängen/Kluftausdehnungen liefern die Grundlage für ein zukünftiges, erweitertes Konzept zur Kluffgenerierung, das neben deterministischen und stochastischen Daten auch geostatistische Informationen des Natursystems enthält. Eine mögliche Vorgehensweise besteht darin, Realisationen der Variablenfelder *Indikator* und *Kluffhäufigkeit* zu simulieren. Die Felder müssen anschließend entweder in heterogene Permeabilitätsfelder oder Felder von diskreten Kluffnetzwerken rücktransformiert werden. Auf diesen transformierten Felder, die wiederum Strukturmodelle darstellen, können nun numerische Strömungs- und Transportsimulationen durchgeführt werden. GÓMEZ-HERNÁNDEZ, FRANSEN, SAHUQUILLO & CAPILLA[24] stellen in ihrer Arbeit die Möglichkeit vor, ein geklüftetes, poröses System durch ein heterogenes Permeabilitätsfeld zu repräsentieren.

Daneben bietet das entwickelte Kluffgenerierungsprogramm FRAC3D zusammen mit dem Netzgenerator ART [22] und dem Strömungs- und Transport-Simulationsprogramm MUFTE_UG [30] eine sehr gute Basis zur numerischen Untersuchung von Einphasen- und Mehrphasenprozessen in geklüftet porösen Medien. Insbesondere die Betrachtung des für Kluff-Matrix Systeme charakteristischen, stark dreidimensionalen Systemverhaltens kann durch die Abstimmung der drei Modellierungsschritte *Kluffgenerierung*, *Netzgenerierung* und *Strömungs- und Transportsimulation* zukünftig sehr detailliert erfolgen. Schwerpunkte für zukünftige Forschungsfragen sind hierbei vor allem in der Ermittlung von effektiven Strömungs- und Transport-Parametern und in dem Einsatz von Parallelrechnern zur Simulation großräumiger Kluff-Matrix Systeme zu sehen.

Literaturverzeichnis

- [1] Akin, H. und Siemes, H. *Praktische Geostatistik*. Springer-Verlag, Berlin, 1988.
- [2] Baecher, G., Lanney, N. und Einstein, H. Statistical Description of Rock Properties and Sampling. American Institute of Mining Engineers, Proc. of the 18th U.S. Symposium on Rock Mechanics, 1977. 5C 1–8.
- [3] Bai, M., Elsworth, D. und Roegiers, J.-C. Multiporosity / Multipermeability Approach to the Simulation of Naturally Fractured Reservoirs. *Water Resources Research*, 29(6):1621 – 1633, 1993.
- [4] Barenblatt, G., Zheltov, I. und Kochina, I. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks. *Prikl. Mat. Mekh.*, 24(4):825 – 864, 1960.
- [5] Bear, J. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Elsevier, New York, 1972.
- [6] Bour, O. und Davy, P. Connectivity of random fault networks following a power law fault length distribution. *Water Resources Research*, 33(7):1567 – 1583, 1997.
- [7] Bour, O. und Davy, P. On the connectivity of three-dimensional fault networks. *Water Resources Research*, 34(10):2611 – 2622, 1998.
- [8] Cacas, M., Ledoux, E., de Marsily, G., Barbreau, A., Calmels, P., Gaillard, B. und Margritta, R. Modeling Fracture Flow With a Stochastic Discrete Fracture Network: Calibration and Validation 2. The Transport Model. *Water Resources Research*, 26(3):491 – 500, 1990.
- [9] Cacas, M., Ledoux, E., de Marsily, G., Tillie, B., Barbreau, A., Durand, E., Feuga, B. und Peaudecerf, P. Modeling Fracture Flow With a Stochastic Discrete Fracture Network: Calibration and Validation 1. The Flow Model. *Water Resources Research*, 26(3):479 – 489, 1990.
- [10] Chilès, J.-P. und Delfiner, P. *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. Wiley, New York, 1999.
- [11] Chilès, J.-P. und de Marsily, G. Stochastic models of fracture systems and their use in flow and transport modeling. In Bear, J., Tsang, C.-F. und de Marsily, G., Hrsg., *Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock*, San Diego, California, 1993. Academic Press.
- [12] Clauser, C. Permeability of Crystalline Rocks. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 73(21):233 and 237, 1992.

-
- [13] Clauser, C. Scale Effects of Permeability and Thermal Methods as Constraints for Regional-Scale Averages. In Quintard, M. und Todorović, M., Hrsg., *Heat and Mass Transfer in Porous Media*, S. 447 – 454, The Netherlands, 1992. Elsevier Science Publisher.
- [14] Dershowitz, W. und Einstein, H. Characterizing Rock Joint Geometry with Joint System Models. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 21:21 – 51, 1988.
- [15] Dershowitz, W. und Fidelibus, C. Derivation of equivalent pipe network analogues for three-dimensional discrete fracture networks by the boundary element method. *Water Resources Research*, 35(9):2685 – 2691, 1999.
- [16] Desbarats, A. und Bachu, S. Geostatistical analysis of aquifer heterogeneity from the core scale to the basin scale, A case study. *Water Resources Research*, 30(3):673 – 684, 1994.
- [17] Deutsch, C. und Journel, A. *Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press, Oxford, 1992.
- [18] Dougherty, D. und Marryott, R. Optimal Groundwater Management 1. Simulated Annealing. *Water Resources Research*, 27(10):2493 – 2508, 1991.
- [19] Dracos, T. *Hydraulik*. Verlag der Fachvereine Zürich, Zürich, 3 Auflage, 1990.
- [20] Fisher, N., Lewis, T. und Embleton, B. *Statistical analysis of spherical data*. Cambridge University Press, 2 Auflage, 1993.
- [21] Fishman, G. *Monte Carlo: concepts, algorithms, and applications*. Springer-Verlag, New York, 1996.
- [22] Fuchs, A. *Optimierte Delaunay-Triangulierungen zur Vernetzung getrimmter NURBS-Körper*. Dissertation, Universität Stuttgart, 1999.
- [23] Gilks, W., Richardson, S. und Spiegelhalter, D. Introducing Markov chain Monte Carlo. In Gilks, W., Richardson, S. und Spiegelhalter, D., Hrsg., *Markov Chain Monte Carlo in Practice*. Chapman & Hall, 1996.
- [24] Gómez-Hernández, J., Franssen, H., Sahuquillo, A. und Capilla, J. Calibration of 3D transient groundwater flow models for fractured rock. In Stauffer, F., Kinzelbach, W., Kovar, K. und Hoehn, E., Hrsg., *IAHS Publication*, 265, Wallingford, Oxfordshire, UK, 1999. IAHS Press.
- [25] Guéguen, Y., Gavrilenko, P. und le Ravalec, M. Scales of Rock Permeability. *Surveys in Geophysics*, 17:245 – 263, 1996.
- [26] Guimerà, J., Vives, L. und Carrera, J. A discussion of scale effects on hydraulic conductivity at a granitic site (El Berrocal, Spain). *Geophysical Research Letters*, 22(11):1449 – 1452, 1995.
- [27] Hastings, W. Monte Carlo Sampling methods using Markov chains and their applications. *Biometrika*, 57(1):97 – 109, 1970.

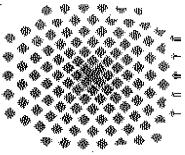
- [28] Helmig, R. *Multiphase Flow and Transport Processes in the Subsurface*. Springer-Verlag, Heidelberg, 1997.
- [29] Helmig, R. Einführung in die numerischen Methoden der Umweltströmungsmechanik. Forschungsbericht, Institut für Computeranwendungen im Bauingenieurwesen, Technische Universität Braunschweig, 1999.
- [30] Helmig, R., Class, H., Huber, R., Sheta, H., Ewing, R., Hinkelmann, R., Jakobs, H. und Bastian, P. Architecture of the Modular Program System MUFTE_UG for Simulating Multiphase Flow and Transport Processes in Heterogeneous Porous Media. *Mathematische Geologie*, 2, 1998.
- [31] Hemminger, A., Hötzl, H. und Witthüser, K. 3D-Kluftgenerierung unter Einbeziehung geostatistischer Optimierungsverfahren: Datenerhebung und erste Ansätze. In König, C., Hrsg., *2. Workshop Kluft-Aquifere, September 1998*, S. 37 – 46. gkw, Aachen 1998.
- [32] Hemminger, A., Neunhäuserer, L., Bardossy, A. und Helmig, R. Identification of equivalent parameters on different scales in fractured-porous media . In Holz, K., Bechteler, W., Wang, S. und Kawahara, M., Hrsg., *Advances in Hydro-Science and -Engineering*, Band 3, S. 205. 3rd International Conference on Hydroscience and Engineering, Center for Computational Hydroscience and Engineering, The University of Mississippi, 1998. cdrom.
- [33] Hohn, M. *Geostatistics and Petroleum Geology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1999.
- [34] Hötzl, H., Bäuml, R., Thüringer, C. und Witthüser, K. Festgesteins-Aquiferanalog: Experimente und Modellierung, Teilprojekt 1: Feldexperimente zur Wasser- und Stoffausbreitung in Abhängigkeit von Kluft- und Gesteinsdurchlässigkeit . Forschungsbericht, Lehrstuhl für Angewandte Geologie , Universität Karlsruhe, 2000.
- [35] Hötzl, H., Thüringer, C. und Witthüser, K. Festgesteins-Aquiferanalog: Experimente und Modellierung, Teilprojekt 1: Feldexperimente zur Wasser- und Stoffausbreitung in Abhängigkeit von Kluft- und Gesteinsdurchlässigkeit . Arbeitsbericht 1/96 – 12/97, Lehrstuhl für Angewandte Geologie , Universität Karlsruhe, 1997. DFG – Projekt Nr. Ho502/9-1.
- [36] Isaaks, E. und Srivastava, R. *Applied Geostatistics*. Oxford University Press, Oxford, 1989.
- [37] Kinzelbach, W. *Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser*. Schriftenreihe Wasser - Abwasser. Oldenbourg, Berlin, 2. Auflage, 1992.
- [38] Kobus, H., Barczewski, B. und Koschitzky, H.-P., Hrsg. *Groundwater and Subsurface Remediation*. Environmental Engineering. Springer-Verlag, Berlin, 1996.
- [39] Kolditz, O. *Strömung, Stoff- und Wärmetransport im Kluftgestein*. Gebr. Borntraeger, Berlin – Stuttgart, 1997.

- [40] Kolditz, O., Kasper, H. und Kosakowski, G. Hydrogeologische Systemanalyse: Modellierung von Strömungs- und Transportprozessen, 1996. Beitrag zur Jahrestagung 1996 der Fachsektion Geoinformatik der Deutschen Geologischen Gesellschaft.
- [41] Koltermann, C. und Gorelick, S. Heterogeneity in sedimentary deposits: A review of structure-imitating, process-imitating and descriptive approaches. *Water Resources Research*, 32(9):2617 – 2658, 1996.
- [42] Köngeter, J., Jansen, D. und Lagendijk, V. Festgesteins-Aquiferanalog: Experimente und Modellierung, Teilprojekt 4: Einsatz von äquivalenten Modellansätzen . Arbeitsbericht nov. 1997, Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen, 1997. DFG – Projekt Nr. Ko1573/2-1.
- [43] Köngeter, J., Lagendijk, V. und Vogel, T. Festgesteins-Aquiferanalog: Experimente und Modellierung, Teilprojekt 4: Einsatz von äquivalenten Modellansätzen . Arbeitsbericht märz 2000, Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen, 2000.
- [44] König, C., 1998. Persönliche Kommunikation.
- [45] Krige, D. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*, S. 119 – 139, December, 1951.
- [46] Krige, D. A statistical analysis of some of the borehole values in the Orange Free State goldfield. *Journal of Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*, S. 47 – 64, September, 1951.
- [47] Kröhn, K.-P. Simulation von Transportvorgängen im klüftigen Gestein mit der Methode der Finiten Elemente. Forschungsbericht 29, Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen, Universität Hannover, 1991.
- [48] La Pointe, P. und Hudson, J. Characterization and Interpretation of Rock Mass Joint Patterns. Special paper 199, Geological Society of America, 1985.
- [49] Lang, U. *Simulation regionaler Strömungs- und Transportvorgänge in Karstaquiferen mit Hilfe des Doppelkontinuum – Ansatzes: Methodenentwicklung und Parameteridentifikation*. Dissertation, Universität Stuttgart, 1995.
- [50] Langrock, P. und Jahn, W. *Einführung in die Theorie der Markovschen Ketten und ihre Anwendung*. Teubner, Leipzig, 1979.
- [51] Laubach, S. Fractured networks in selected Cretaceous sandstones of the Green River and San Juan Basins, Wyoming, New Mexico, and Colorado. Geological studies relevant to horizontal drilling: Examples from Western North America. S. 61 – 73. Rocky Mountain Assoc. of Geologists, 1992.
- [52] Long, J. *Investigation of equivalent porous medium permeability in networks of discontinuous fractures*. Dissertation, Berkeley, 1983.

- [53] Long, J. und Billaux, D. From Field Data to Fracture Network Modeling: An Example Incorporating Spatial Structure. *Water Resources Research*, 23(7):1201 – 1216, 1987.
- [54] Long, J., Gilmour, P. und Witherspoon, P. A Model for Steady Fluid Flow in Random Three-Dimensional Networks of Disc-Shaped Fractures. *Water Resources Research*, 21(8):1105 – 1115, 1985.
- [55] Lunn, R. und Mackay, R. Geostatistical Analysis of Fractured Rock Characteristics. In Soares, A., Gomez-Hernandez, J. und Froidevaux, R., Hrsg., *geoENV I – Geostatistics for Environmental Applications*, Proceedings of the Geostatistics for Environmental Applications Workshop, Lisbon, Portugal, 18.–19. November 1996, 1996. Kluwer Academic Publisher.
- [56] Mauldon, A., Karasaki, K., Martel, S., Long, J., Landsfeld, M., Mensch, A. und Vomvoris, S. An Inverse Technique for Developing Models for Fluid Flow in Fracture Systems Using Simulated Annealing. *Water Resources Research*, 29(11):3775 – 3789, 1993.
- [57] McDermott, C. *New Experimental Modelling Techniques to Investigate the Fractured Porous System*. Dissertation, Eberhard-Karls Universität Tübingen, 1999.
- [58] Meier, D. und Kronberg, P. *Klüftung in Sedimentgesteinen*. Enke Verlag, Stuttgart, 1989.
- [59] Murawski, H. *Geologisches Wörterbuch*. dtv, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 9 Auflage, 1992.
- [60] Neumann, S. Generalized Scaling of Permeabilities: Validation and Effect of Support Scale. *Geophysical Research Letters*, 21(5):349 – 352, 1994.
- [61] Neunhäuserer, L., Fuchs, A., Hemminger, A. und Helmig, R. Flow and transport processes in fractured porous media. Kreta, Greece, 1998. 12th International Conference on Computational Methods in Water Resources.
- [62] Neunhäuserer, L., Hemminger, A. und Helmig, R. Festgesteins-Aquiferanalog: Experimente und Modellierung, Teilprojekt 3: Einsatz von diskreten Modellansätzen. Arbeitsbericht 5/96 – 10/97, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart und NMI, Technische Universität Braunschweig, 1997. DFG – Projekt Nr. He2531/1 – 1.
- [63] Neunhäuserer, L., Hemminger, A. und Helmig, R. Festgesteins-Aquiferanalog: Experimente und Modellierung, Teilprojekt 3: Einsatz von diskreten Modellansätzen. Arbeitsbericht 11/97 – 03/2000, Institut für ComputerAnwendungen im Bauingenieurwesen, Technische Universität Braunschweig, 2000. DFG – Projekt Nr. He2531/1-2, He2531/1-3.
- [64] Niemi, A., Kontio, K., Kuusela-Lathinen, A. und Poteri, A. Hydraulic characterization and upscaling of fracture networks based on multiple-scale well test data. *Water Resources Research*, 36(12):3481 – 3497, 2000.
- [65] Nordqvist, A., Tsang, Y., Tsang, C., Dverstorp, B. und Andersson, J. A Variable Aperture Fracture Network Model for Flow and Transport in Fractured Rocks. *Water Resources Research*, 28(6):1703 – 1713, 1992.

- [66] Press, W., Teukolsky, S., Vetterling, W. und Flannery, B. *Numerical Recipes in Fortran*. Cambridge University Press, Cambridge, 2. Auflage, 1992.
- [67] Priest, S. *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*. Chapman & Hall, London, 1993.
- [68] Raftery, A. und Lewis, S. Implementing MCMC. In Gilks, W., Richardson, S. und Spiegelhalter, D., Hrsg., *Markov Chain Monte Carlo in Practice*. Chapman & Hall, 1996.
- [69] Reichenberger, V. Discretization and Multigrid Methods for Multiphase Flow in Fractured Porous Media. In *SIAM Conference on Mathematical and Computational Issues in the Geosciences* SIAM Conference, Boulder, USA, June 2001.
- [70] Renshaw, C. Connectivity of joint networks with power law length distributions. *Water Resources Research*, 35(9):2661 – 2670, 1999.
- [71] Sachs, L. *Angewandte Statistik*. Springer-Verlag, Berlin, 8. Auflage, 1997.
- [72] Sahimi, M. *Flow and Transport in Porous Media and Fractured Rock*. VCH, Weinheim, 1995.
- [73] Singhal, B. und Gupta, R. *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 1999.
- [74] Snow, D. Anisotropic Permeability of Fractured Media. *Water Resources Research*, 5(6):1273 – 1289, 1969.
- [75] Srivastava, R. An annealing procedure for honouring change of support statistics in conditional simulation. In Dimitrakopoulos, R., Hrsg., *Geostatistics for the Next Century*, S. 277 – 290. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1994.
- [76] Teutsch, G., Sauter, M., Liedl, R. und Leven, C. Festgesteins–Aquiferanalog: Experimente und Modellierung, Teilprojekt 2: Laborexperimente und Entwicklung neuer Untersuchungsmethoden. Forschungsbericht, Geologisches Institut, Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Eberhard–Karls–Universität Tübingen, 2000.
- [77] Teutsch, G., Sauter, M., Liedl, R., McDermott, C. und Baraka-Lokmane, S. Festgesteins–Aquiferanalog: Experimente und Modellierung, Teilprojekt 2: Laborexperimente und Entwicklung neuer Untersuchungsmethoden. Forschungsbericht lag 97–01/1909, Geologisches Institut, Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Eberhard–Karls–Universität Tübingen, 1997. DFG – Projekt Nr. Te155/8–1.
- [78] Vogelmann, S. Strömungs– und Transportvorgänge in einem Kluft-Matrix System: Sensitivitätsanalyse. Studienarbeit, 2000.
- [79] Wackernagel, H. *Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications*. Springer-Verlag, Berlin, 2. Auflage, 1998.
- [80] Wallbrecher, E. *Tektonische und gefügeanalytische Arbeitsweisen*. Enke Verlag, Stuttgart, 1986.

-
- [81] Warren, J. und Root, P. The behavior of naturally fractured reservoirs. *Soc. Pet. Eng. J.*, 3:245 – 255, 1963.
- [82] White, F. *Fluid Mechanics*. McGraw–Hill, USA, 4 Auflage, 1999.
- [83] Witherspoon, P., Wang, J., Iwai, K. und Gale, J. Validity of Cubic Law for Fluid Flow in a Deformable Rock Fracture. *Water Resources Research*, 16(6):1016 – 1024, 1980.
- [84] Witthüser, K. und Himmelsbach, T. Erhebungsmethoden von Kluftparametern für eine stochastische Kluftnetzgenerierung. *Grundwasser*, 3(3):103 – 109, 1998.
- [85] Wollrath, J. Ein Strömungs- und Transportmodell für klüftiges Gestein und Untersuchungen zu homogenen Ersatzsystemen. Forschungsbericht 28, Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen, Universität Hannover, 1990.



Institut für Wasserbau Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 61
70550 Stuttgart (Vaihingen)
Telefon (0711) 685 - 4714/51
Telefax (0711) 685 - 7020 o. 4746
email: iws@iws.uni-stuttgart.de
<http://www.iws.uni-stuttgart.de>

Direktor

Prof. Dr.-Ing. Rainer Helmig

Vorstand

Prof. Dr.-Ing. R. Helmig
Prof. Dr. Pieter Vermeer
Prof. Dr.-Ing. Dr. A. Bárdossy
(Wassermengenwirtschaft)
Prof. Dr.-Ing. habil. B. Westrich
PD Dr.-Ing. B. Barczewski
Dr.-Ing. R. Hinkelmann
Dr.-Ing. H.-P. Koschitzky
PD Dr.-Ing. W. Marx

Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Leiter: Prof. Dr. Pieter Vermeer (kom.)
Stellv.: Dr.-Ing. Walter Marx, AOR
Prof. Dr.-Ing. Dr. András Bárdossy
(Wassermengenwirtschaft)

Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung

Leiter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Helmig
Stellv.: Dr.-Ing. Reinhard Hinkelmann

VEGAS, Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung

Wiss. Leiter: PD Dr.-Ing. Baldur Barczewski
Techn. Leiter: Dr.-Ing. Hans-Peter Koschitzky

Versuchsanstalt

Leiter: apl. Prof. Dr.-Ing. Bernhard Westrich

Verzeichnis der Mitteilungshefte

- 1 Röhnisch, Arthur: *Die Bemühungen um eine Wasserbauliche Versuchsanstalt an der Technischen Hochschule Stuttgart*, und Fattah Abouleid, Abdel: *Beitrag zur Berechnung einer in lockeren Sand gerammten, zweifach verankerten Spundwand*, 1963
- 2 Marotz, Günter: *Beitrag zur Frage der Standfestigkeit von dichten Asphaltbelägen im Großwasserbau*, 1964
- 3 Gurr, Siegfried: *Beitrag zur Berechnung zusammengesetzter ebener Flächentragwerke unter besonderer Berücksichtigung ebener Stauwände, mit Hilfe von Randwert- und Lastwertmatrizen*, 1965
- 4 Plica, Peter: *Ein Beitrag zur Anwendung von Schalenkonstruktionen im Stahlwasserbau*, und Petrikat, Kurt: *Möglichkeiten und Grenzen des wasserbaulichen Versuchswesens*, 1966
- 5 Plate, Erich: *Beitrag zur Bestimmung der Windgeschwindigkeitsverteilung in der durch eine Wand gestörten bodennahen Luftschicht*, und Röhnisch, Arthur; Marotz, Günter: *Neue Baustoffe und Bauausführungen für den Schutz der Böschungen und der Sohle von Kanälen, Flüssen und Häfen; Gesteinskosten und jeweilige Vorteile*, sowie Unny, T.E.: *Schwingungsuntersuchungen am Kegelstrahlschieber*, 1967

- 6 Seiler, Erich: *Die Ermittlung des Anlagenwertes der bundeseigenen Binnenschiffahrtsstraßen und Talsperren und des Anteils der Binnenschiffahrt an diesem Wert*, 1967
- 7 *Sonderheft anlässlich des 65. Geburtstages von Prof. Arthur Röhnisch mit Beiträgen von Benk, Dieter; Breitling, J.; Gurr, Siegfried; Haberhauer, Robert; Honekamp, Hermann; Kuz, Klaus Dieter; Marotz, Günter; Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg; Miller, Rudolf; Plate, Erich J.; Radomski, Helge; Schwarz, Helmut; Vollmer, Ernst; Wildenhahn, Eberhard*; 1967
- 8 Jumikis, Alfred: *Beitrag zur experimentellen Untersuchung des Wassernachschubs in einem gefrierenden Boden und die Beurteilung der Ergebnisse*, 1968
- 9 Marotz, Günter: *Technische Grundlagen einer Wasserspeicherung im natürlichen Untergrund*, 1968
- 10 Radomski, Helge: *Untersuchungen über den Einfluß der Querschnittsform wellenförmiger Spundwände auf die statischen und rammtechnischen Eigenschaften*, 1968
- 11 Schwarz, Helmut: *Die Grenztragfähigkeit des Baugrundes bei Einwirkung vertikal gezogener Ankerplatten als zweidimensionales Bruchproblem*, 1969
- 12 Erbel, Klaus: *Ein Beitrag zur Untersuchung der Metamorphose von Mittelgebirgsschneedecken unter besonderer Berücksichtigung eines Verfahrens zur Bestimmung der thermischen Schneequalität*, 1969
- 13 Westhaus, Karl-Heinz: *Der Strukturwandel in der Binnenschiffahrt und sein Einfluß auf den Ausbau der Binnenschiffskanäle*, 1969
- 14 Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg: *Ein Beitrag zur Berechnung des Erdwiderstandes unter Ansatz der logarithmischen Spirale als Gleitflächenfunktion*, 1970
- 15 Schulz, Manfred: *Berechnung des räumlichen Erddruckes auf die Wandung kreiszylindrischer Körper*, 1970
- 16 Mobasseri, Manoutschehr: *Die Rippenstützmauer. Konstruktion und Grenzen ihrer Standsicherheit*, 1970
- 17 Benk, Dieter: *Ein Beitrag zum Betrieb und zur Bemessung von Hochwasserrückhaltebecken*, 1970
- 18 Gál, Attila: *Bestimmung der mitschwingenden Wassermasse bei überströmten Fischbauchklappen mit kreiszylindrischem Staublech*, 1971, vergriffen
- 19 Kuz, Klaus Dieter: *Ein Beitrag zur Frage des Einsetzens von Kavitationserscheinungen in einer Düsenströmung bei Berücksichtigung der im Wasser gelösten Gase*, 1971, vergriffen

- 20 Schaak, Hartmut: *Verteilungen von Wasserkraftanlagen*, 1971
- 21 *Sonderheft zur Eröffnung der neuen Versuchsanstalt des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart mit Beiträgen von*
Brombach, Hansjörg; Dirksen, Wolfram; Gál, Attila; Gerlach, Reinhard; Giesecke, Jürgen; Holthoff, Franz-Josef; Kuz, Klaus Dieter; Marotz, Günter; Minor, Hans-Erwin; Petrikat, Kurt; Röhnisch, Arthur; Rueff, Helge; Schwarz, Helmut; Vollmer, Ernst; Wildenhahn, Eberhard; 1972
- 22 Wang, Chung-su: *Ein Beitrag zur Berechnung der Schwingungen an Kegelstrahlschiebern*, 1972
- 23 Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg: *Erdwiderstandsbeiwerte nach dem Ohde-Variationsverfahren*, 1972
- 24 Minor, Hans-Erwin: *Beitrag zur Bestimmung der Schwingungsanfachungsfunktionen überströmter Stauklappen*, 1972
- 25 Brombach, Hansjörg: *Untersuchung strömungsmechanischer Elemente (Fluidik) und die Möglichkeit der Anwendung von Wirbelkammerelementen im Wasserbau*, 1972, vergriffen
- 26 Wildenhahn, Eberhard: *Beitrag zur Berechnung von Horizontalfilterbrunnen*, 1972
- 27 Steinlein, Helmut: *Die Eliminierung der Schwebstoffe aus Flußwasser zum Zweck der unterirdischen Wasserspeicherung, gezeigt am Beispiel der Iller*, 1972
- 28 Holthoff, Franz Josef: *Die Überwindung großer Hubhöhen in der Binnenschiffahrt durch Schwimmerhebewerke*, 1973
- 29 Röder, Karl: *Einwirkungen aus Baugrundbewegungen auf trog- und kastenförmige Konstruktionen des Wasser- und Tunnelbaues*, 1973
- 30 Kretschmer, Heinz: *Die Bemessung von Bogenstaumauern in Abhängigkeit von der Talform*, 1973
- 31 Honekamp, Hermann: *Beitrag zur Berechnung der Montage von Unterwasserpipelines*, 1973
- 32 Giesecke, Jürgen: *Die Wirbelkammertriode als neuartiges Steuerorgan im Wasserbau, und*
Brombach, Hansjörg: *Entwicklung, Bauformen, Wirkungsweise und Steuereigenschaften von Wirbelkammerverstärkern*, 1974
- 33 Rueff, Helge: *Untersuchung der schwingungserregenden Kräfte an zwei hintereinander angeordneten Tiefschützen unter besonderer Berücksichtigung von Kavitation*, 1974

- 34 Röhnisch, Arthur: *Einpreßversuche mit Zementmörtel für Spannbeton - Vergleich der Ergebnisse von Modellversuchen mit Ausführungen in Hüllwellrohren*, 1975
- 35 *Sonderheft anlässlich des 65. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. Kurt Petrikat mit Beiträgen von:* Brombach, Hansjörg; Erbel, Klaus; Flinspach, Dieter; Fischer jr., Richard; Gàl, Attila; Gerlach, Reinhard; Giesecke, Jürgen; Haberhauer, Robert; Hafner Edzard; Hausenblas, Bernhard; Horlacher, Hans-Burkhard; Hutarew, Andreas; Knoll, Manfred; Krummet, Ralph; Marotz, Günter; Merkle, Theodor; Miller, Christoph; Minor, Hans-Erwin; Neumayer, Hans; Rao, Syamala; Rath, Paul; Rueff, Helge; Ruppert, Jürgen; Schwarz, Wolfgang; Topal-Gökceli, Mehmet; Vollmer, Ernst; Wang, Chung-su; Weber, Hans-Georg; 1975
- 36 Berger, Jochum: *Beitrag zur Berechnung des Spannungszustandes in rotationssymmetrisch belasteten Kugelschalen veränderlicher Wandstärke unter Gas- und Flüssigkeitsdruck durch Integration schwach singulärer Differentialgleichungen*, 1975
- 37 Dirksen, Wolfram: *Berechnung instationärer Abflußvorgänge in gestauten Gerinnen mittels Differenzenverfahren und die Anwendung auf Hochwasserrückhaltebecken*, 1976
- 38 Horlacher, Hans-Burkhard: *Berechnung instationärer Temperatur- und Wärmespannungsfelder in langen mehrschichtigen Hohlzylindern*, 1976
- 39 Hafner, Edzard: *Untersuchung der hydrodynamischen Kräfte auf Baukörper im Tiefwasserbereich des Meeres*, 1977, ISBN 3-921694-39-6
- 40 Ruppert, Jürgen: *Über den Axialwirbelkammervverstärker für den Einsatz im Wasserbau*, 1977, ISBN 3-921694-40-X
- 41 Hutarew, Andreas: *Beitrag zur Beeinflußbarkeit des Sauerstoffgehalts in Fließgewässern an Abstürzen und Wehren*, 1977, ISBN 3-921694-41-8, vergriffen
- 42 Miller, Christoph: *Ein Beitrag zur Bestimmung der schwingungserregenden Kräfte an unterströmten Wehren*, 1977, ISBN 3-921694-42-6
- 43 Schwarz, Wolfgang: *Druckstoßberechnung unter Berücksichtigung der Radial- und Längsverschiebungen der Rohrwandung*, 1978, ISBN 3-921694-43-4
- 44 Kinzelbach, Wolfgang: *Numerische Untersuchungen über den optimalen Einsatz variabler Kühlsysteme einer Kraftwerkskette am Beispiel Oberrhein*, 1978, ISBN 3-921694-44-2
- 45 Barczewski, Baldur: *Neue Meßmethoden für Wasser-Luftgemische und deren Anwendung auf zweiphasige Auftriebsstrahlen*, 1979, ISBN 3-921694-45-0
- 46 Neumayer, Hans: *Untersuchung der Strömungsvorgänge in radialen Wirbelkammerverstärkern*, 1979, ISBN 3-921694-46-9

- 47 Elalfy, Youssef-Elhassan: *Untersuchung der Strömungsvorgänge in Wirbelkammerdioden und -drosseln*, 1979, ISBN 3-921694-47-7
- 48 Brombach, Hansjörg: *Automatisierung der Bewirtschaftung von Wasserspeichern*, 1981, ISBN 3-921694-48-5
- 49 Geldner, Peter: *Deterministische und stochastische Methoden zur Bestimmung der Selbstdichtung von Gewässern*, 1981, ISBN 3-921694-49-3
- 50 Mehlhorn, Hans: *Temperaturveränderungen im Grundwasser durch Brauchwassereinleitungen*, 1982, ISBN 3-921694-50-7, vergriffen
- 51 Hafner, Edzard: *Rohrleitungen und Behälter im Meer*, 1983, ISBN 3-921694-51-5
- 52 Rinnert, Bernd: *Hydrodynamische Dispersion in porösen Medien: Einfluß von Dichteunterschieden auf die Vertikalvermischung in horizontaler Strömung*, 1983, ISBN 3-921694-52-3
- 53 Lindner, Wulf: *Steuerung von Grundwasserentnahmen unter Einhaltung ökologischer Kriterien*, 1983, ISBN 3-921694-53-1, vergriffen
- 54 Herr, Michael; Herzer, Jörg; Kinzelbach, Wolfgang; Kobus, Helmut; Rinnert, Bernd: *Methoden zur rechnerischen Erfassung und hydraulischen Sanierung von Grundwasserkontaminationen*, 1983, ISBN 3-921694-54-X
- 55 Schmitt, Paul: *Wege zur Automatisierung der Niederschlagsermittlung*, 1984, ISBN 3-921694-55-8
- 56 Müller, Peter: *Transport und selektive Sedimentation von Schwebstoffen bei gestautem Abfluß*, 1985, ISBN 3-921694-56-6
- 57 El-Qawasmeh, Fuad: *Möglichkeiten und Grenzen der Tropfbewässerung unter besonderer Berücksichtigung der Verstopfungsanfälligkeit der Tropfelemente*, 1985, ISBN 3-921694-57-4
- 58 Kirchenbaur, Klaus: *Mikroprozessorgesteuerte Erfassung instationärer Druckfelder am Beispiel seegangsbelasteter Baukörper*, 1985, ISBN 3-921694-58-2
- 59 Kobus, Helmut (Hrsg.): *Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser*, Tätigkeitsbericht 1984/85 (DFG-Forschergruppe an den Universitäten Hohenheim, Karlsruhe und Stuttgart), 1985, ISBN 3-921694-59-0
- 60 Spitz, Karlheinz: *Dispersion in porösen Medien: Einfluß von Inhomogenitäten und Dichteunterschieden*, 1985, ISBN 3-921694-60-4
- 61 Kobus, Helmut: *An Introduction to Air-Water Flows in Hydraulics*, 1985, ISBN 3-921694-61-2

- 62 Kaleris, Vassilios: *Erfassung des Austausches von Oberflächen- und Grundwasser in horizontalebene Grundwassermodellen*, 1986, ISBN 3-921694-62-0
- 63 Herr, Michael: *Grundlagen der hydraulischen Sanierung verunreinigter Porengrundwasserleiter*, 1987, ISBN 3-921694-63-9
- 64 Marx, Walter: *Berechnung von Temperatur und Spannung in Massenbeton infolge Hydratation*, 1987, ISBN 3-921694-64-7
- 65 Koschitzky, Hans-Peter: *Dimensionierungskonzept für Sohlbelüfter in Schußbrinnen zur Vermeidung von Kavitationsschäden*, 1987, ISBN 3-921694-65-5
- 66 Kobus, Helmut (Hrsg.): *Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser*, Tätigkeitsbericht 1986/87 (DFG-Forschergruppe an den Universitäten Hohenheim, Karlsruhe und Stuttgart) 1987, ISBN 3-921694-66-3
- 67 Söll, Thomas: *Berechnungsverfahren zur Abschätzung anthropogener Temperaturanomalien im Grundwasser*, 1988, ISBN 3-921694-67-1
- 68 Dittrich, Andreas; Westrich, Bernd: *Bodenseeufererosion, Bestandsaufnahme und Bewertung*, 1988, ISBN 3-921694-68-X, vergriffen
- 69 Huwe, Bernd; van der Ploeg, Rienk R.: *Modelle zur Simulation des Stickstoffhaushaltes von Standorten mit unterschiedlicher landwirtschaftlicher Nutzung*, 1988, ISBN 3-921694-69-8, vergriffen
- 70 Stephan, Karl: *Integration elliptischer Funktionen*, 1988, ISBN 3-921694-70-1
- 71 Kobus, Helmut; Zilliox, Lothaire (Hrsg.): *Nitratbelastung des Grundwassers, Auswirkungen der Landwirtschaft auf die Grundwasser- und Rohwasserbeschaffenheit und Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers*. Vorträge des deutsch-französischen Kolloquiums am 6. Oktober 1988, Universitäten Stuttgart und Louis Pasteur Strasbourg (Vorträge in deutsch oder französisch, Kurzfassungen zweisprachig), 1988, ISBN 3-921694-71-X
- 72 Soyeaux, Renald: *Unterströmung von Stauanlagen auf klüftigem Untergrund unter Berücksichtigung laminarer und turbulenter Fließzustände*, 1991, ISBN 3-921694-72-8
- 73 Kohane, Roberto: *Berechnungsmethoden für Hochwasserabfluß in Fließgewässern mit überströmten Vorländern*, 1991, ISBN 3-921694-73-6
- 74 Hassinger, Reinhard: *Beitrag zur Hydraulik und Bemessung von Blocksteinrampen in flexibler Bauweise*, 1991, ISBN 3-921694-74-4
- 75 Schäfer, Gerhard: *Einfluß von Schichtenstrukturen und lokalen Einlagerungen auf die Längsdispersion in Porengrundwasserleitern*, 1991, ISBN 3-921694-75-2

- 76 Giesecke, Jürgen: *Vorträge, Wasserwirtschaft in stark besiedelten Regionen; Umweltforschung mit Schwerpunkt Wasserwirtschaft*, 1991, ISBN 3-921694-76-0
- 77 Huwe, Bernd: *Deterministische und stochastische Ansätze zur Modellierung des Stickstoffhaushalts landwirtschaftlich genutzter Flächen auf unterschiedlichem Skalenniveau*, 1992, ISBN 3-921694-77-9
- 78 Rommel, Michael: *Verwendung von Kluftdaten zur realitätsnahen Generierung von Kluftnetzen mit anschließender laminar-turbulenter Strömungsberechnung*, 1993, ISBN 3-92 1694-78-7
- 79 Marschall, Paul: *Die Ermittlung lokaler Stofffrachten im Grundwasser mit Hilfe von Einbohrloch-Meßverfahren*, 1993, ISBN 3-921694-79-5
- 80 Ptak, Thomas: *Stofftransport in heterogenen Porenaquiferen: Felduntersuchungen und stochastische Modellierung*, 1993, ISBN 3-921694-80-9
- 81 Haakh, Frieder: *Transientes Strömungsverhalten in Wirbelkammern*, 1993, ISBN 3-921694-81-7
- 82 Kobus, Helmut; Cirpka, Olaf; Barczewski, Baldur; Koschitzky, Hans-Peter: *Versucheinrichtung zur Grundwasser und Altlastensanierung VEGAS, Konzeption und Programmrahmen*, 1993, ISBN 3-921694-82-5
- 83 Zang, Weidong: *Optimaler Echtzeit-Betrieb eines Speichers mit aktueller Abflußregenerierung*, 1994, ISBN 3-921694-83-3
- 84 Franke, Hans-Jörg: *Stochastische Modellierung eines flächenhaften Stoffeintrages und Transports in Grundwasser am Beispiel der Pflanzenschutzmittelproblematik*, 1995, ISBN 3-921694-84-1
- 85 Lang, Ulrich: *Simulation regionaler Strömungs- und Transportvorgänge in Karstaquiferen mit Hilfe des Doppelkontinuum-Ansatzes: Methodenentwicklung und Parameteridentifikation*, 1995, ISBN 3-921694-85-X, vergriffen
- 86 Helmig, Rainer: *Einführung in die Numerischen Methoden der Hydromechanik*, 1996, ISBN 3-921694-86-8
- 87 Cirpka, Olaf: *CONTRACT: A Numerical Tool for Contaminant Transport and Chemical Transformations - Theory and Program Documentation -*, 1996, ISBN 3-921694-87-6
- 88 Haberlandt, Uwe: *Stochastische Synthese und Regionalisierung des Niederschlages für Schmutzfrachtberechnungen*, 1996, ISBN 3-921694-88-4
- 89 Croisé, Jean: *Extraktion von flüchtigen Chemikalien aus natürlichen Lockergesteinen mittels erzwungener Luftströmung*, 1996, ISBN 3-921694-89-2

- 90 Jorde, Klaus: *Ökologisch begründete, dynamische Mindestwasserregelungen bei Ausleitungskraftwerken*, 1997, ISBN 3-921694-90-6
- 91 Helmig, Rainer: *Gekoppelte Strömungs- und Transportprozesse im Untergrund - Ein Beitrag zur Hydrosystemmodellierung*-, 1998, ISBN 3-921694-91-4
- 92 Emmert, Martin: *Numerische Modellierung nichtisothermer Gas-Wasser Systeme in porösen Medien*, 1997, ISBN 3-921694-92-2
- 93 Kern, Ulrich: *Transport von Schweb- und Schadstoffen in staugeregelten Fließgewässern am Beispiel des Neckars*, 1997, ISBN 3-921694-93-0
- 94 Förster, Georg: *Druckstoßdämpfung durch große Luftblasen in Hochpunkten von Rohrleitungen* 1997, ISBN 3-921694-94-9
- 95 Cirpka, Olaf: *Numerische Methoden zur Simulation des reaktiven Mehrkomponententransports im Grundwasser*, 1997, ISBN 3-921694-95-7
- 96 Färber, Arne: *Wärmetransport in der ungesättigten Bodenzone: Entwicklung einer thermischen In-situ-Sanierungstechnologie*, 1997, ISBN 3-921694-96-5
- 97 Betz, Christoph: *Wasserdampfdestillation von Schadstoffen im porösen Medium: Entwicklung einer thermischen In-situ-Sanierungstechnologie*, 1998, ISBN 3-921694-97-3
- 98 Xu, Yichun: *Numerical Modeling of Suspended Sediment Transport in Rivers*, 1998, ISBN 3-921694-98-1
- 99 Wüst, Wolfgang: *Geochemische Untersuchungen zur Sanierung CKW-kontaminierter Aquifere mit Fe(0)-Reaktionswänden*, 2000, ISBN 3-933761-02-2
- 100 Sheta, Hussam: *Simulation von Mehrphasenvorgängen in porösen Medien unter Einbeziehung von Hysterese-Effekten*, 2000, ISBN 3-933761-03-4
- 101 Ayros, Edwin: *Regionalisierung extremer Abflüsse auf der Grundlage statistischer Verfahren*, 2000, ISBN 3-933761-04-2
- 102 Huber, Ralf: *Compositional Multiphase Flow and Transport in Heterogeneous Porous Media*, 2000, ISBN 3-933761-05-0
- 103 Braun, Christopherus: *Ein Upscaling-Verfahren für Mehrphasenströmungen in porösen Medien*, 2000, ISBN 3-933761-06-9
- 104 Hofmann, Bernd: *Entwicklung eines rechnergestützten Managementsystems zur Beurteilung von Grundwasserschadensfällen*, 2000, ISBN 3-933761-07-7

- 105 Class, Holger: *Theorie und numerische Modellierung nichtisothermer Mehrphasenprozesse in NAPL-kontaminierten porösen Medien*, 2001, ISBN 3-933761-08-5
- 106 Schmidt, Reinhard: *Wasserdampf- und Heißluftinjektion zur thermischen Sanierung kontaminierter Standorte*, 2001, ISBN 3-933761-09-3
- 107 Reinhold Josef: *Schadstoffextraktion mit hydraulischen Sanierungsverfahren unter Anwendung von grenzflächenaktiven Stoffen*, 2001, ISBN 3-933761-10-7
- 108 Schneider, Matthias: *Habitat- und Abflussmodellierung für Fließgewässer mit unscharfen Berechnungsansätzen*, 2001, ISBN 3-933761-11-5
- 109 Rathgeb, Andreas: *Hydrodynamische Bemessungsgrundlagen für Lockerdeckwerke an überströmbaren Erddämmen*, 2001, ISBN 3-933761-12-3
- 110 Lang, Stefan: *Parallele numerische Simulation instationärer Probleme mit adaptiven Methoden auf unstrukturierten Gittern*, 2001, ISBN 3-933761-13-1
- 111 Appt, Jochen; Stumpp Simone: *Die Bodensee-Messkampagne 2001, IWS/CWR Lake Constance Measurement Program 2001, 2002*, ISBN 3-9337 61-14-X
- 112 Heimerl, Stephan: *Systematische Beurteilung von Wasserkraftprojekten*, 2002, ISBN 3-933761-15-8
- 113 Iqbal, Amin: *On the Management and Salinity Control of Drip Irrigation*, 2002, ISBN 3-933761-16-6
- 114 Silberhorn-Hemminger, Annette: *Modellierung von Kluftaquifersystemen: Geostatistische Analyse und deterministisch-stochastische Kluftgenerierung*, 2002, ISBN 3-933761-17-4
- 115 Winkler, Angela: *Prozesse des Wärme- und Stofftransports bei der In-situ-Sanierung mit festen Wärmequellen*, 2002, ISBN 3-933761-18-2

ISSN 0343-1150