

Der Tracer kann sich irren . . .

Julia Ghergut, Horst Behrens, Martin Sauter

Universität Göttingen, Angewandte Geologie

Keywords: Tracertests, Wärmetauschflächendichte, thermische Lebensdauer, Maßstabkonsistenz

Zusammenfassung

Es werden zwei Beispiele von "tracertestbasierten" Fehlprognosen der thermischen Lebensdauer für HDR / EGS – Systeme vorgestellt und analysiert. Im ersten Beispiel führt der Einsatz einer tracerbasiert gemessenen Fluid-Gestein-Grenzflächendichte (die einer Wärmetauschflächendichte gleichgesetzt wird) in die Prognose der Temperaturentwicklung zu einer erheblichen Unterschätzung der thermischen Lebensdauer des Reservoirs (falsch ungünstige Prognose). Im zweiten Beispiel führt der Einsatz einer tracerbasiert ermittelten Fluidverweilzeit in die Temperaturprognose-rechnung zur Überschätzung der thermischen Lebensdauer (falsch übergünstige Prognose) – die im Widerspruch zur in Wirklichkeit früher eintretenden, an der Produktionsbohrung messbaren Abkühlung steht. Es wird diskutiert, welche tracerbasierten Aussagen zur Geothermalreservoir-charakterisierung unter den jeweiligen Bedingungen noch möglich und nützlich sind.

Einleitung

Für fluidbasierte, durch Bohrlochdubletten erschlossene Tiefengeothermalreservoirs, resultiert ihre

- (a) Wärmegewinnungsleistung zu einem gegebenen Zeitpunkt: aus
 - (a1) Fließraten (Permeabilitäten),
 - (a2) Fluidtemperaturen,
 - (a3) Wärmetauschflächendichten;
- (b) Nachhaltigkeit (thermisch, hydraulisch, geomechanisch): aus der Geschwindigkeit der mit betriebsinduzierten, gekoppelten THMC Prozessen einhergehenden Reservoirabkühlung, Permeabilitätsverringern sowie ggf. Funktionsbeeinträchtigung an Obertageinstallationen
- (c) Betriebskostengrößenordnung: hauptsächlich aus den zur Aufrechterhaltung der Normfließ-raten erforderlichen Druckgradienten (Pumpenenergie, Häufigkeit und Ausmaß von Stimulationsmaßnahmen und hydrochemischen Behandlungen in-situ oder obertägig etc).

Zur Charakterisierung von

- (a1), (a2), (b) und (c) sind hydrogeophysikalische und hydraulische Tests,
- (a3), (b) und (c) sind Fluidmarkierungen

unentbehrlich. Abgesehen von gekoppelten THMC Effekten des Reservoirbetriebs, ist die Temperaturentwicklung an der Produktionsbohrung einer Geothermaldublette (vgl. Formel zur „tracerbasierten Temperaturprognose“, wie im Anhang dargestellt), nebst thermischen Materialparametern, hauptsächlich von den zwei Größen bestimmt:

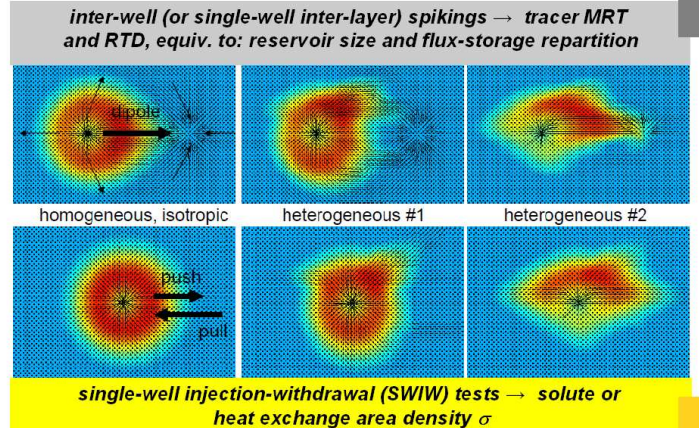
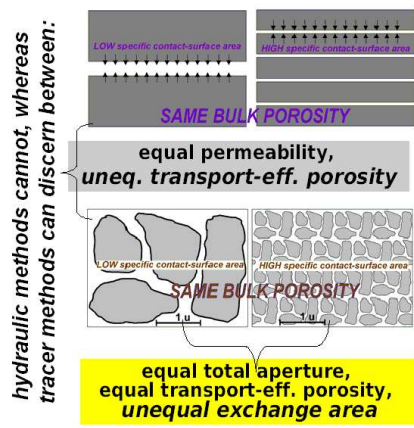
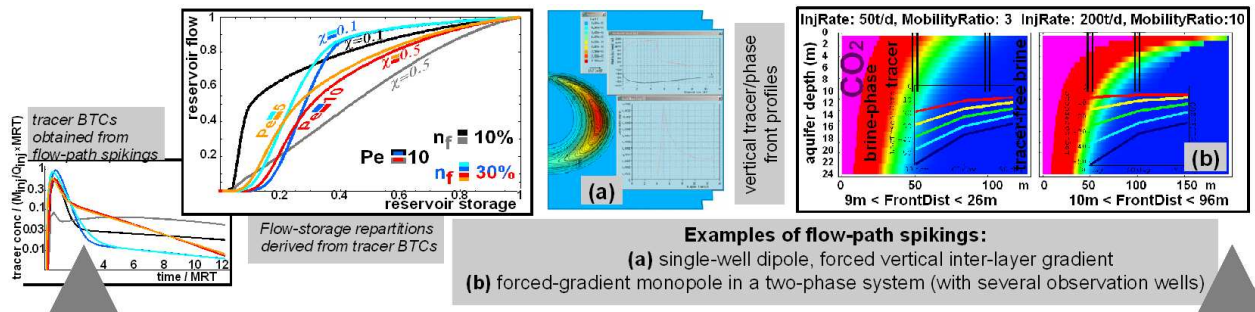
- Verweilzeiten der im Reservoir zirkulierenden Fluide (Verweilzeitverteilung: VZV; mittlere Verweilzeit: MVZ)
- räumliche Dichte der Wärmetauschflächen im Reservoir (WTFD),

die die Temperaturprognoseformel auf stets gleicher Art kontrollieren, wenn auch die Formel, je nach Reservoirgeometriedetails, etwas variieren kann (vgl. PRUESS & BODVARSSON 1984). Da die 2 kontrollierenden Parameter (VZV, WTFD) sich durch geophysikalische und hydraulische Testmethoden nicht eindeutig bestimmen lassen, werden zu ihrer Ermittlung Fluidmarkierungen (Tracertests) eingesetzt. Man geht davon aus, dass Fließwegmarkierungen unter geothermalbetriebsrelevanten Strömungsregimes die Ermittlung der VZV ermöglichen (SHOOK 1999), und zur Bestimmung der WTFD charakteristische Merkmale (Retardation, Dämpfung, Tailing) der Tracer-VZV entweder aus Fließwegmarkierungen oder aus Einbohrloch-Push-Pull-Tests (SAUTER & HERFORT 2002) herangezogen werden können (Abb. 1). – Solange die Heterogenität der Reservoirs keinen Strich durch diese Rechnung macht, wie anhand folgender 2 Modellbeispiele veranschaulicht. Trotz ihrer Reduzierung auf jeweils nur zwei wesentliche Merkmale, die in dieser Reinform in der Natur nie angetroffen werden, sind die vereinfachten Modelle geeignet, um 2 grundsätzliche Probleme der „tracerbasierten Wärmeprognose“ aufzuzeigen. Eine weitere, unwesentliche Vereinfachung stellt die dispersionsfreie Näherung der Transportprozesse dar. Dispersion läßt sich nachträglich „einführen“, z. B. durch Bilanzierung aller Beiträge aus der (tracerbasiert ermittelten) Speicher-Durchfluß-Verteilung der Reservoirfluide, was die Mehrdeutigkeit der Parameteridentifizierung erhöht, ohne dabei der im Folgenden geschilderten Tracer-vs.-Wärme-Diskrepanz entgegenzuwirken.

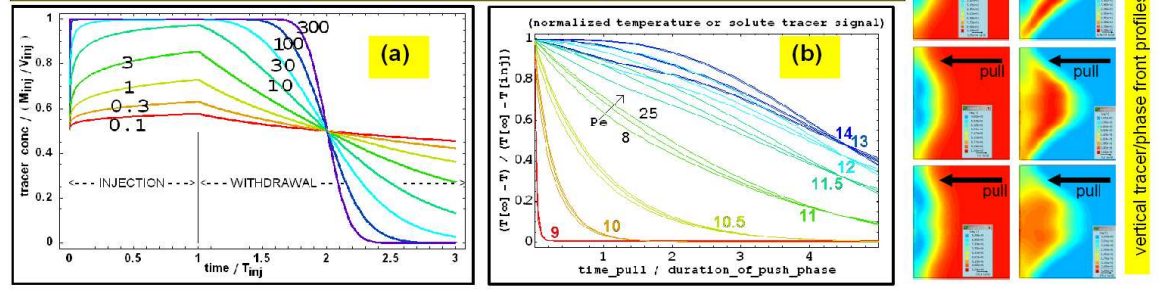
Erstes Beispiel: die Wärmetauschflächendichte (WTFD) „stimmt nicht“

Das Reservoirmodell besteht hier aus einer oder mehreren parallelen, permeablen Kluftzonen in einer geologischen Formation (Abb. 2), mit einem Mindestabstand y ($y > 35$ m) zueinander. Es werden zwei Bohrungen einer Geothermaldublette angesetzt (in einer, oder in zwei verschiedenen Kluftzonen, die Argumentation bleibt gleich); es bildet sich eine stationäre Strömung aus, die mit stofflichen Tracern markiert wird. An der Produktionsbohrung werden Tracerdurchgänge beobachtet, die vom diffusiven Stoffaustausch zwischen beweglichem und unbeweglichem Fluid in den Feinkluft-/Porenstrukturen innerhalb der Kluftzonen (Detail in Abb. 2) geprägt sind. Abhängig von der stofftransportwirksamen Matrixblockgröße $y_{\text{[solute]}}$ (Kehrwert: Grenzflächendichte GFD) können die im oberen Teil der Abb. 3 (beispielhaft für den Fall symmetrischer Dipolströmung in 1 Kluftzone) berechneten Tracerdurchgänge beobachtet werden. Entsprechend dem Prinzip der „tracerbasierten Wärmeprognose“ (vgl. Anhang), werden aus den beobachteten Tracerdurchgängen die 2 Hauptparameter (MVZ, GFD) ermittelt und in die Prognoseformel eingesetzt; damit ergeben sich die im unteren Teil der Abb. 3 gezeigten Temperaturverläufe an der Förderbohrung. Es resultieren damit sehr kurze Lebensdauer (< 3 J.), die im Widerspruch zur tatsächlichen Lebensdauer (in der Größenordnung von $y_{\text{[thermal]}}^2/D_{\text{[g]}}$, also mindestens 32 J.) stehen. Der thermisch relevante Wert der GFD (also WTFD) liegt in der Größenordnung von $1/y_{\text{[thermal]}}$; in Bezug auf diesen Wert sind aber die Stofftracersignale kaum sensitiv, bestimmen lassen sie nur den viel höheren GFD-Wert (Größenordnung $1/y_{\text{[solute]}}$, wobei $y_{\text{[solute]}} =$ Bruchteile der Gesamtöffnungsweite einer Kluftzone), der innerhalb der Kluftzonen, aber nicht zwischen den verschiedenen Kluftzonen vorherrscht. – Wohl auch mit ein Grund, warum KOCABAS (2005) zur Bestimmung der WTFD (bzw. eines Derselbigen äquivalenten Wärmetransferparameters) nur Wärme-Injektion-Rücklauf-tests empfiehlt, dagegen Fließwegmarkierungen mittels stofflicher Tracer nur zur Bestimmung der VZV empfiehlt. Dabei ist leider auch die wärmebasierte Bestimmung des Wärmetransferparameters mit erheblichen Einschränkungen behaftet:

- nicht ausreichende Sensitivität des meßbaren Temperatursignals in Bezug auf den Zielparameter (vgl. Abb. 1-gelb-(b) bei Typkurvenparameter < 9.5)
- Reservoirheterogenität, bzw. Nichtrepräsentativität des durch Tests erfaßten Bohrlochumgebungsmaßstabs für den (benötigten!) Reservoirmaßstab



Principle of a single-well injection-withdrawal (SWIW) or 'push-pull' test: tracer BTCs from single-well push-pull tests using solutes with (a) fast-equilibrium sorption, or with (b) kinetic exchange or matrix diffusion (heat and solutes as tracers); the latter suffers from a certain degree of ambiguity between non-AD parameters



mass conservation for phase "α":

$$\varepsilon \partial_t (\rho_\alpha s_\alpha) + \nabla (\rho_\alpha \mathbf{v}_\alpha) = \dot{M}_\alpha$$

mass conservation for a dissolved tracer "β" within phase "α":

$$\partial_t (\varepsilon \rho_\alpha s_\alpha C_{\alpha,\beta}) + \nabla (\rho_\alpha \mathbf{v}_\alpha C_{\alpha,\beta} - \varepsilon \rho_\alpha s_\alpha \mathbb{D}_{\alpha,\beta} \nabla C_{\alpha,\beta}) = \dot{J}_{\alpha,\beta}$$

the source term $\dot{J}_{\alpha,\beta}$ contains contributions from intra-phase reactions (proportional to ε) and from exchange of solute β between phases α, α'; the latter will be proportional to the density (per-volume area) $\sigma_{\alpha,\alpha'}$ of contact surfaces between phases α, α'

momentum conservation for phase "α":

$$\mathbf{v}_\alpha = -\mathbb{K} \frac{k_\alpha^{rel}}{\mu_\alpha} (\nabla p_\alpha - \rho_\alpha \mathbf{g})$$

with capillary pressures $p_{\alpha,\alpha'}^{cap} \equiv p_\alpha - p_{\alpha'}$ depending upon porosity ε and upon all saturations s_α

for instance, for a two-phase case, $p^{cap} \sim \left(\frac{\varepsilon}{K}\right)^{\frac{1}{2}} f(S)$

and with intrinsic permeability \mathbb{K} generally relating to porosity ε

by some material relation, for instance, $|\mathbb{K}| = 180^{-1} d_p^2 \varepsilon^3 (1 - \varepsilon)^{-2}$

energy conservation for phase "α" (described by specific enthalpy $h_\alpha \equiv h_\alpha(0) + \int_0^T c_\alpha dT$):

$$\partial_t (\varepsilon \rho_\alpha s_\alpha h_\alpha) + \nabla (\rho \mathbf{v}_\alpha h_\alpha - \varepsilon \rho_\alpha s_\alpha \kappa_\alpha \nabla T) = \overset{\circ}{W}_\alpha$$

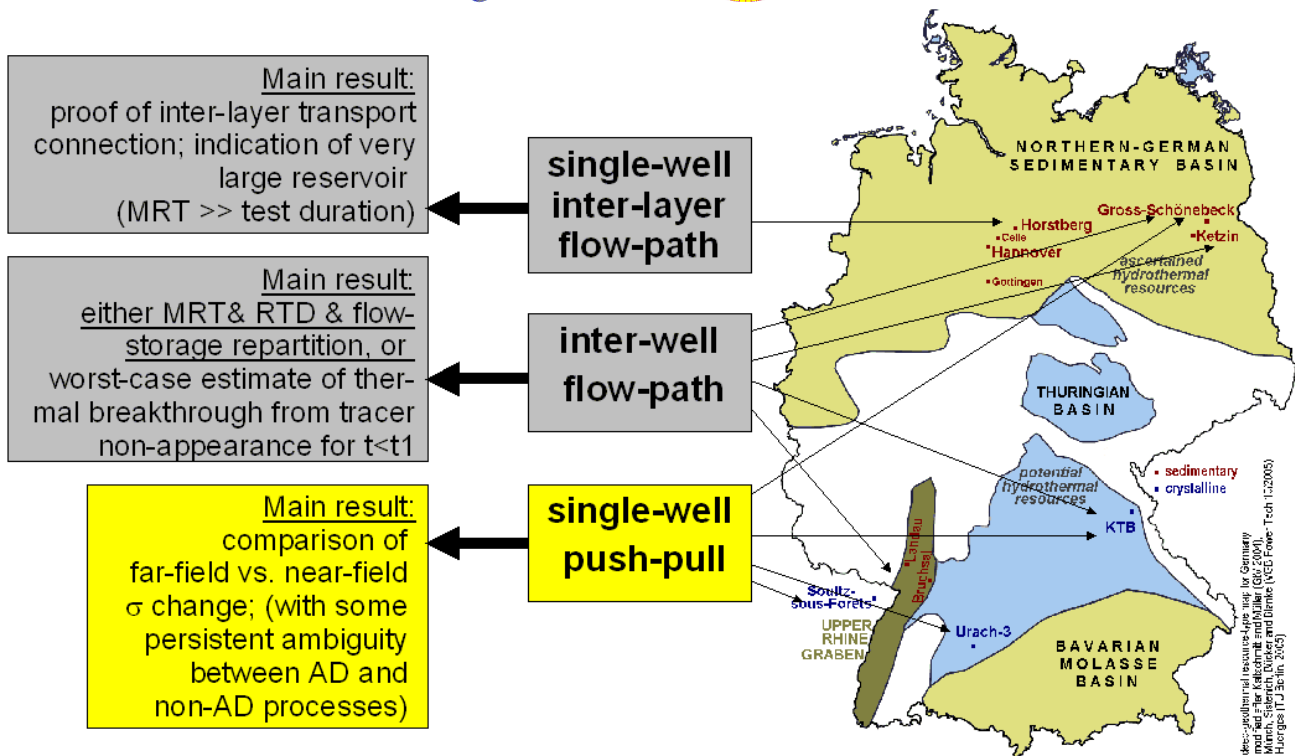
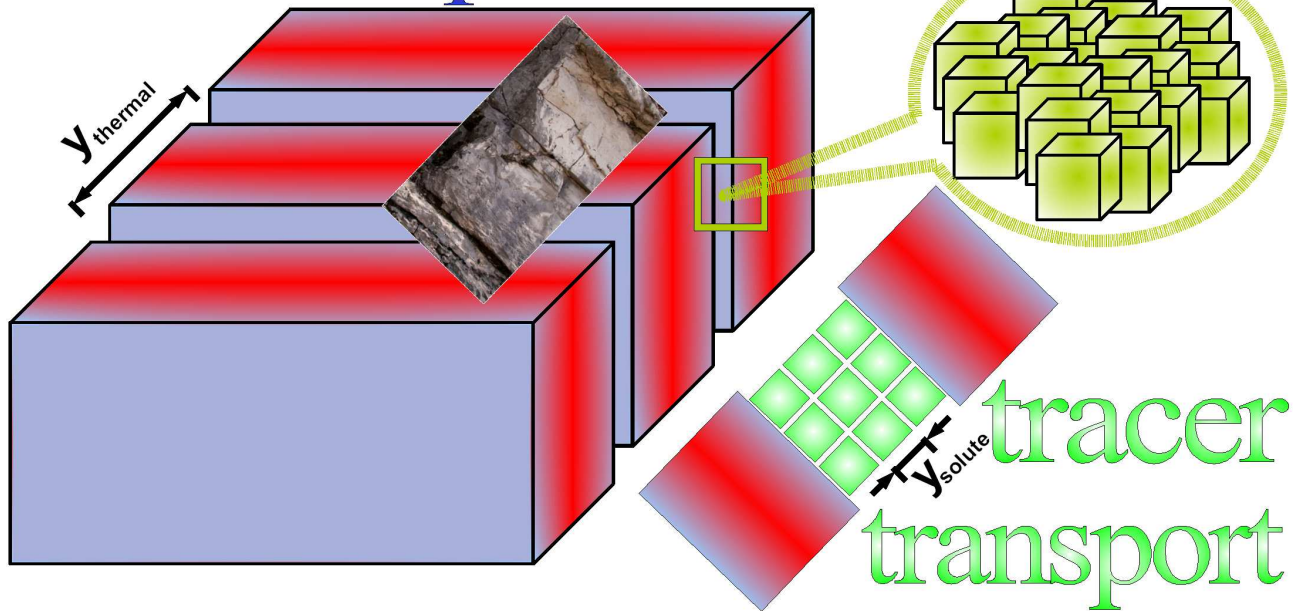


Abb. 1, doppelseitig: Zur Prognose der Wärme- und Stofftransportvorgänge im Reservoir sind die Verweilzeiten der Fluide (äquivalent, die „Reservoirgröße“ oder „transportwirksame Porosität“) von entscheidender Bedeutung, denn sie skalieren in den Transportgleichungen die Zeit-Variabel. Da Reservoirs heterogen sind, muß der Begriff der „transportwirksamen Porosität“ zur „Speicher-Durchfluß-Verteilung“ erweitert (verallgemeinert) werden. Zu ihrer experimentellen Ermittlung sind Fließwegmarkierungen [in den Diagrammen in Grau gekennzeichnet] notwendig, während zur Ermittlung von WTFD, GFD zusätzlich Einbohrloch-Push-Pull-Tests [in den Diagrammen in Gelb gekennzeichnet] eingesetzt werden können. Beide Verfahren weisen im Parameterraum variable Parametersensitivitäten auf, die es durch Experimentdesign und -Dimensionierung zu optimieren gilt. – Beide Verfahren wurden in Deutschland eingesetzt, im Kristallin (KTB und Urach im Moldanubicum, Insheim im Oberrheingraben), im norddeutschen Sedimentärbecken (Horstberg, GroßSchönebeck, Ketzin/ Stuttgartformation), und in Mischsystemen (Landau im Oberrheingraben); Hauptergebnisse waren: Beweis von Transportverbindungen, Ermittlung von VZV und Reservoir(mindest)volumina, worst-case-Prognosen zur thermischen Lebensdauer, hydrogeomechanische Interpretation hydraulisch induzierter GFD-Veränderungen.

heat transport



Parameter	wesentlich für:	durch hydraulische Tests bestimmbar?	durch geophysikal. Erkundung bestimmbar?	mittels Mikroseismik bestimmbar?	durch Tracertests bestimmbar?
y_{thermal}	Prognose des thermischen Durchbruchs	Nein	Nein	vielleicht!	Ja, bedingt (mit Wärme als Tracer)
y_{solute}	Verständnis und Prognose hydrogeochemischer und hydrogeomechanischer Vorgänge	Nein	Nein	Nein	JA (mit löslichen Tracerstoffen)

Abb. 2: Wärmetransportwirksame und stofftransportwirksame Matrixblockgrößen (Kehrwert: Grenzflächendichten); schematische Darstellung und Übersicht in-Frage-kommender Bestimmungsmethoden. Modellsystem zu Beispiel Nr. 1.

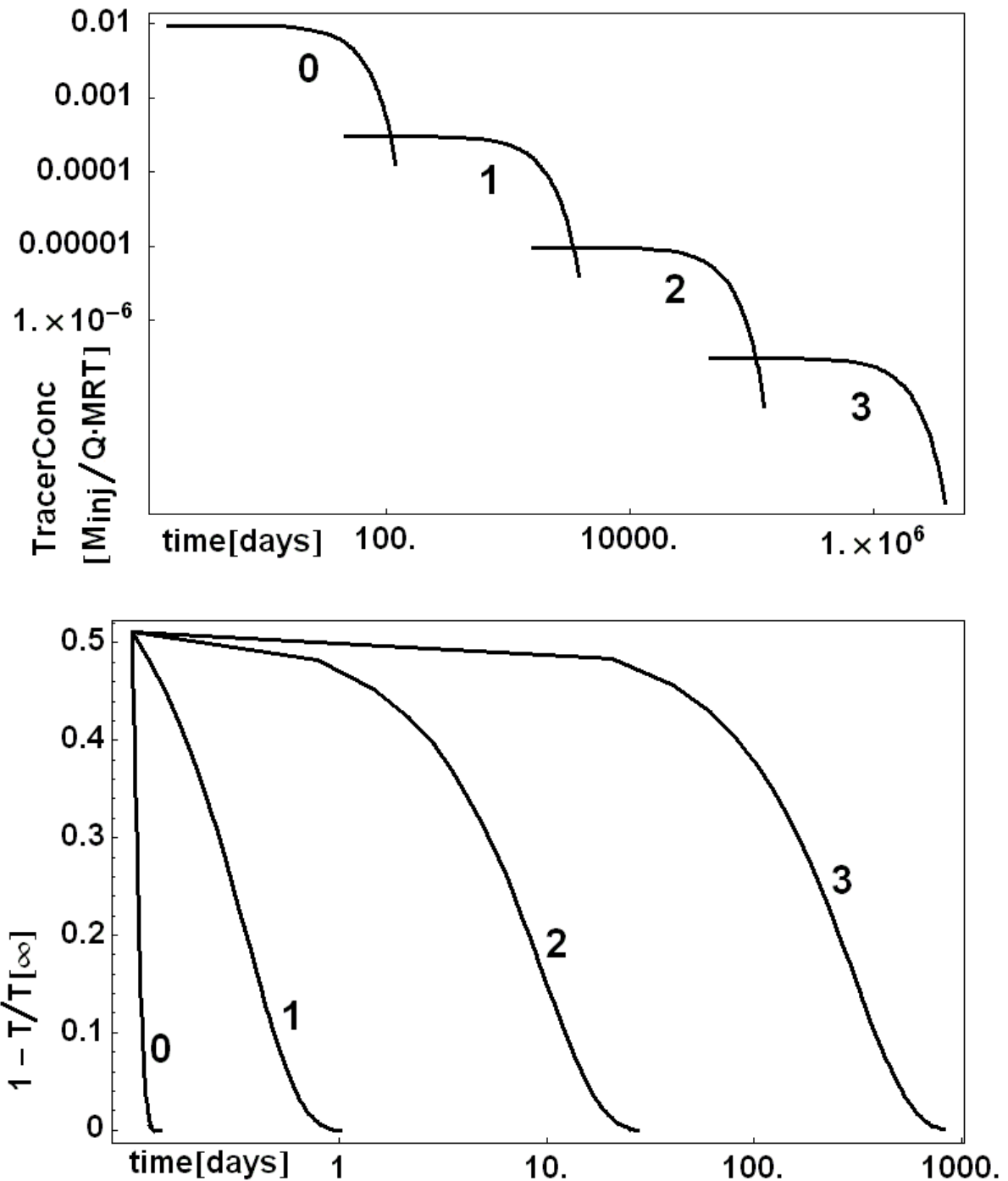


Abb. 3: Simulierte Tracersignale, und tracerbasiert prognostizierbare Temperaturentwicklung für Modellbeispiel Nr. 1. Der angezeigte Kurvenparameter (0, 1, 2, 3) ist logarithmisch-proportional zur (stofftransportwirksamen) GFD. Der aus der dispersionsfreien Näherung resultierende, abrupte Konzentrationsanstieg wurde weggelassen, da er in der Praxis so auch nicht beobachtet wird; relevant ist hier die MVZ und der Konzentrationsabstieg, der für die meisten verfügbaren Tracerstoffe über mindestens 3 Größenordnungen meßtechnisch erfaßt werden kann, ggf. über Anreicherung.

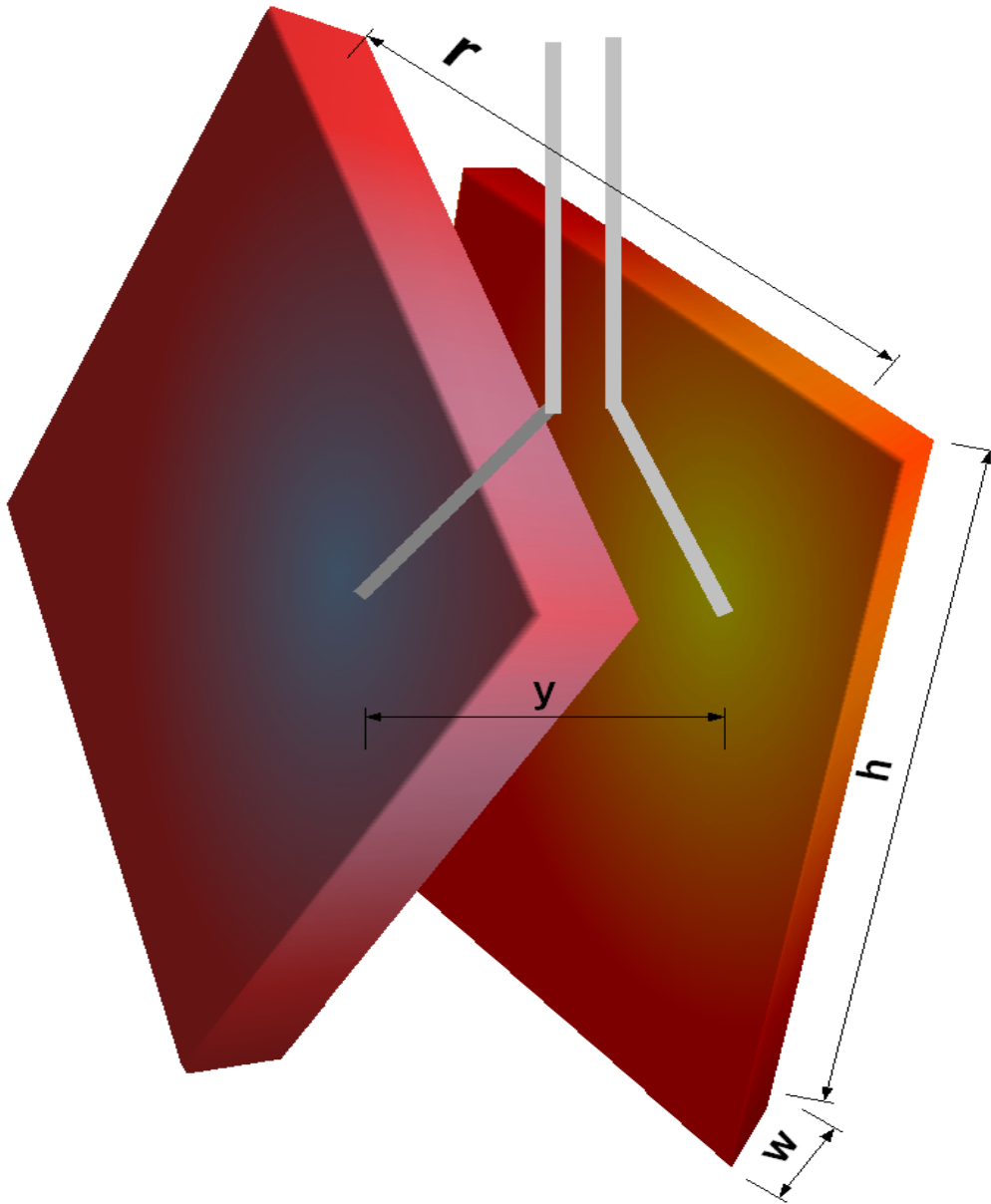


Abb. 4: Modellbeispiel Nr. 2.

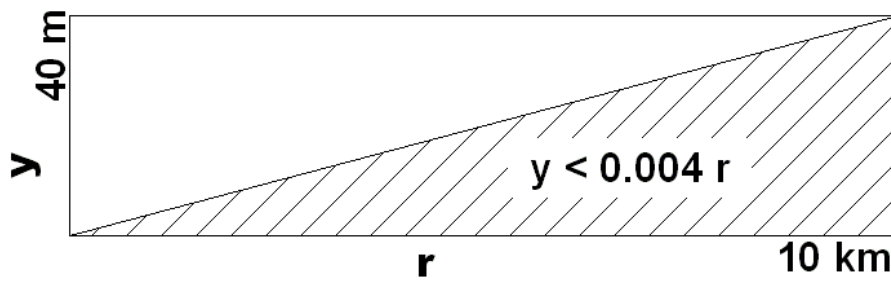


Abb. 5: Thermischer Kurzschlußbereich für Modellbeispiel Nr. 2, ohne Auswirkung auf VZV.

Zweites Beispiel: die Tracerverweilzeit mag „stimmen“, ist aber nicht ausschlaggebend

Das Reservoir besteht hier (Abb. 4) aus 2 permeablen Zonen (Störungen, Klüftzonen) mit Mächtigkeiten h_1 , h_2 , transportwirksamen Gesamtöffnungsweiten w_1 , w_2 , in denen die Produktions- bzw. Injektionsbohrung abgeteuft und offen sind; der Abstand zwischen den offenen Bohrabschnitten beträgt y . Die permeablen Zonen treffen aufeinander in Entfernung r_1 bzw. r_2 von den offenen Bohrabschnitten, mit einer dort gemeinsamen Mächtigkeit h . Im Maßstab oberhalb ihrer Gesamtöffnungsweiten werden die Klüftzonen als homogene Continua betrachtet. Die MVZ der zwischen den Bohrungen mit Rate Q zirkulierenden Fluide beträgt mindestens $(w_1 \cdot r_1 + w_2 \cdot r_2) \cdot h / Q$ oder, bei sehr schwach fokussiertem Strömungsdipol, $\pi \cdot (w_1 \cdot r_1^2 + w_2 \cdot r_2^2) / Q$. Die thermische Durchbruchzeit liegt in der Größenordnung von höchstens $y^2 / D[g]$ (vgl. die zeitliche Skalierung der Matrixdiffusion z. B. in KOLDITZ 1997, CARRERA ET AL. 1998). Wenn die Entfernungen r groß genug sind und/oder der Abstand y nicht groß genug ist, wird die thermische Durchbruchzeit kleiner als die MVZ. Dies geschieht etwa, wenn

$$y < \sqrt{2 \pi D[g] \cdot w / Q} \cdot r,$$

was in Abb. 5 als schraffierter Bereich dargestellt ist (mit w , r stellvertretend für den jeweils kleineren Wert von $\{w_1, w_2\}$ bzw. $\{r_1, r_2\}$). Auch unabhängig von w und Q lässt sich schätzen, etwa: bei einem Abstand < 20 m zwischen den Störungen beträgt die thermische Lebensdauer < 10 Jahre. Somit ist hier der thermische Durchbruch unabhängig vom Wert der (tracerbasiert ermittelten) MVZ. Er ist auch grundsätzlich nicht mehr anhand stofflicher Tracertests prognostizierbar.

Diskussion

Im ersten Beispiel koppeln sich aufgrund der zeitlichen Maßstabsdiskrepanz ihrer Gesteinsdiffusivitäten die effektiven GFD für gelöste Stoffe und für Wärme voneinander ab: Die aus stofflichen Fluidmarkierungen ermittelte GFD hat für den Wärmetransport keine Aussagekraft mehr. Zur Prognose anderer geothermierelevanter Prozesse, wie Fluid-Gestein-Wechselwirkungen, Permeabilitätsverringerung durch Ausfällungen u. a. bleibt die tracerbasiert-ermittelte GFD weiterhin aussagekräftig.

Im zweiten Beispiel ist es vielmehr die räumliche Auslegung der Geothermaldublette, die an der Stoff-vs.-Wärme-Diskrepanz „schuld“ ist. Im Regelfall würde man eine solche räumliche Auslegung, dank geologisch, seismisch etc. vorab gewonnener Reservoirstrukturkenntnis auch zu vermeiden wissen. Dennoch muss weiterhin mit Überraschungen gerechnet werden, insbesondere bei exotischen Reservoirerschließungsansätzen, wie z. B. dem durch das GeoZentrum Hannover entwickelten und getesteten Einbohrloch-Zweischichtverfahren (wie im oberen Teil von Abb. 1 als Fließwegmarkierungsbeispiel „a“ extrem vereinfacht dargestellt).

Weder im ersten noch im zweiten Beispiel kann die Option, Fließwegmarkierungen durch Einbohrloch-Push-Pull-Tests zu ergänzen, und/oder der gleichzeitige Einsatz mehrerer Tracer mit unterschiedlichen physikochemischen Eigenschaften, die geschilderten Probleme beheben.

Auch bei der Auslegung „paradoxe“ Tracersignalvergleiche, insbesondere betreffs räumlicher Verteilung oder zeitlich-veränderter Temperaturverhältnisse – wovon ROBINSON & TESTER (1984), BATCHELOR (1986), DU TEAUX & CALLAHAN (1996) bemerkenswerte Beispiele liefern – ist eine Beschäftigung mit den involvierten Prozessskalen sinnvoll, bevor man zwischen eindeutig zuzuordnenden Reservoirveränderungen (etwa durch hydraulisch- oder abkühlungsbedingte Kluftraufweitung) und nicht eindeutig zuzuordnenden, auf praktischer Ebene ja kaum quantifizierbaren („unreproduzierbaren“) Aspekten des physikochemischen Tracerverhaltens unterscheiden kann.

Zur Feststellung von Transportverbindungen, Ermittlung von VZV und Beobachtung von Reservoirveränderungen sind Tracertests weiterhin nicht nur nützlich, sondern auch unentbehrlich (vgl.

Abb. 1, Abb. 2). Zur Ermittlung der für den Wärmetransport maßgebenden GFD (WTFD) könnte man versuchen, mikroseismisch gewonnene Information heranzuziehen, allerdings wird sich auch diese keineswegs direkt und eindeutig in einen Wert für $y[\text{thermal}]$ „übersetzen“ lassen. Zur direkten Erkundung der Temperaturverhältnisse im Reservoir empfiehlt sich zudem der Einsatz thermosensitiver Tracerstoffe (NOTTEBOHM ET AL. 2009, 2010; CHRYSIKOPOULOS 1993), nach den von LICHA & SAUTER (2002) entwickelten Prinzipien und Verfahren.

Endergebnis

Georeservoirs sind heterogen: Sie enthalten Störungen und Kluffzonen, die für den Wärmetransport von Bedeutung sind, und in den Kluffzonen zusätzlich Klufffeinstrukturen, die den Stofftransport als Erste, bzw. am Stärksten prägen (vgl. Abb. 2). Die Wärmetauschflächendichte WTFD (Kehrwert $y[\text{thermal}]$) ist wesentlich für die Prognose der thermischen Lebensdauer; die Grenzflächendichte GFD innerhalb Klufffeinstrukturen (Kehrwert $y[\text{solute}]$) ist wesentlich für Verständnis und Prognose hydrogeochemischer und hydrogeomechanischer Vorgänge im Reservoir. Aus der stofftransportwirksamen Matrixblockgröße $y[\text{solute}]$ läßt sich kaum auf die wärmetransportwirksame Matrixblockgröße $y[\text{thermal}]$ schließen. Die zwei Größen müssen daher unabhängig voneinander durch geeignete experimentelle Methoden ermittelt werden. Ein lateraler thermischer „Kurzschluß“ zwischen Injektions- und Produktionshorizonten bei einem Dublettenverfahren (insbesondere bei einem Einbohrloch-Zweischichtverfahren) zur Reservoirerschließung wird durch stoffliche Fluidmarkierung nicht erkennbar; er äußert sich nicht in der Fluid-VZV.

Anhang: Tracerbasierte Prognose der Temperaturentwicklung – Variablen und Parameter

$$T(t, X) = (T_\infty - T_{\text{inj}}) \cdot \text{erfc}(\zeta(t, X)) \cdot H(t - \tau(X))$$

Variablen:

T = Temperatur, T_∞ = ungestörte Reservoirtemperatur, T_{inj} = Temperatur reinjizierter Fluide
 t = Zeit-Variabel, X = Raum-Variabel, entspricht einer extensiven Reservoirgröße,
 z.B. Entfernung (Länge), angeströmte Fläche (A) oder durchgeströmtes Volumen (V),
 oder, äquivalent, mittlere Verweilzeit der Fluide im Volumen V : $\text{MVZ} = \frac{V}{q_{\text{prf}}}$

Funktionenzusammensetzung:

für $X \rightarrow \text{MVZ}$: $\zeta(t, \text{MVZ}) = \frac{\sqrt{\lambda_g C_g} \text{WTFD}}{2C_f} \frac{\text{MVZ}}{n_{\text{prf}} \sqrt{t - \tau(\text{MVZ})}}$, $\tau(\text{MVZ}) = \frac{C_{\text{prf}} \text{MVZ}}{C_f n_{\text{prf}}}$
 H = Heavisidefunktion, erfc = komplementäre Fehlerfunktion

Materialparameter:

$C_i = \rho_i c_i$ ($i \rightarrow f[\text{Fluid}]$, $g[\text{Gestein}]$, $\text{prf}[\text{präferentielle Fließwege}]$)
 λ = therm. Leitfähigkeit, c = spezif. therm. Kapazität, ρ = Dichte; $D = \frac{\lambda}{\rho c}$ (Diffusivität)

Strukturparameter:

WTFD = Wärmetauschflächendichte (Kehrwert einer charakteristischen Matrixblockgröße)
 n_{prf} = transportwirksame Porosität innerhalb präferentieller Fließwege
 (abhängig vom Transportmaßstab bzw. von der Diffusivität der transportierten Größe)

Quellenangaben

- BATCHELOR, A. S.: Reservoir Behaviour in a Stimulated Hot Dry Rock System. *Proceedings, Eleventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, January 21-23, 1986*, SGP-TR-93 (1986)
- CARRERA, J.; SÁNCHEZ-VILA, X.; BENET, I.; MEDINA, A.; GALARZA, G.; GUIMERA, J.: On matrix diffusion: formulations, solution methods and qualitative effects. *Hydrogeology Journal*, **6**:178–190 (1998)
- CHRYSIKOPOULOS, C. V.: Artificial tracers for geothermal reservoir studies. *Environmental Geology*, **22**: 60-70 (1993)
- DUTEAUX, R. & CALLAHAN, T. J.: Comparing reactive and non reactive tracers to measure changes in liquid dominated, fractured geothermal reservoirs. *GRC Transactions*, **20**: 447-451 (1996)
- KOCABAS, I.: Geothermal reservoir characterization via thermal injection backflow and interwell tracer testing. *Geothermics*, **34**: 27–46 (2005)
- KOLDITZ, O.: *Strömung, Stoff- und Wärmetransport im Kluffgestein*. Gebr. Borntraeger, Berlin - Stuttgart (1997)
- LICHA, T. & SAUTER, M.: Short chained alkylphenols (SCAP) as reactive Tracers. *DECHEMA, European Conference on Natural Attenuation*, Heidelberg: 49-51 (2002)
- LICHA, T. & SAUTER, M.: Use of Short Chained Alkylphenols (SCAP) in Analysis of Transport Behaviour of Oil Contaminated Groundwater. *J. of Agricultural and Marine Sciences*, **7**(2): 29-38 (2002)
- NOTTEBOHM, M.; LICHA, T.; SAUTER, M.: Thermal decay of selected organic substances for using them as "smart tracers" in geothermal reservoirs. *Stanford Geothermal Program Technical Reports*, SGP-TR-187 (2009)
- NOTTEBOHM, M.; LICHA, T.; NÖDLER, K.; SAUTER, M.: Development of Thermosensitive Tracers for Push-Pull Experiments in Geothermal Reservoir Characterization. *Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010* (accepted for publication)
- PRUESS, K. & BODVARSSON, G. S.: Thermal effects of reinjection in geothermal reservoirs with major vertical fractures. *J. Petrol. Technol.*, **36**:1567-1578 (1984)
- ROBINSON, B. A. & TESTER, J. W.: Dispersed Fluid Flow in Fractured Reservoirs: An Analysis of Tracer-Determined Residence Time Distributions. *J. Geophysical Research*, **89**, B12: 10374-10384 (1984)
- SAUTER, M. & HERFORT, M.: Tracer push-pull experiment at the deep borehole Urach-3 (2002)
- SHOOK, G. M.: Prediction of Thermal Breakthrough From Tracer Tests. *Stanford Geothermal Program Technical Reports*, SGP-TR-162 (1999)

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit für die Finanzierung eines Großteils der hier erwähnten Tracertests an Geothermalreservoiren verschiedener Typen im Norddeutschen Sedimentärbecken (FKZ 0327579 „Smart Tracers“) und im Oberrheingraben, der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Finanzierung der Tracertests an der Kontinentalen Tiefbohrung und damit verbundener Modellierarbeiten (PKZ Sa501/16/1-4, Sa 501/21/5), sowie dem Niedersächsischen MWK und dem EFZN, deren GEBO-Projektinitiative den Anlaß zu dieser Betrachtung lieferte.

Geowissenschaftliches Zentrum der Universität Göttingen, Goldschmidtstr. 3, 37077 Göttingen
 goework@googlemail.com , iulia.ghergut@geo.uni-goettingen.de