Beitrag “Der Geothermiekongress DGK 2021”, 30. November – 2. Dezember 2021

‘Impfdurchbrüche’: stoffliche und thermische Ausbeute im Licht niederparametrischer Modelle und künstlicher Tracersignale

Horst Behrens, Julia Ghergut, Bianca Wagner, Bettina Wiegand und Martin Sauter

Georg-August-Universität Göttingen, Geowissenschaftliches Zentrum

Keywords: *Lithium co-production*, *trace element*, *geothermal*, *reservoir lifetime*, *turnover volume*, *margin utility*, *tracer*, Grenznutzen, stoffliche Ausbeute, thermische Lebensdauer, Spurenelement, Oberrheingraben, Norddeutsches Becken, Cameron-Klute, Verteilungskoeffizient, Kinetik, BMWi-Vorhaben “TRENDS”, “UnLimiteD” (“Untersuchungen zur Lithiumproduktion aus heißen Tiefenwässern in Deutschland”; Teilvorhaben: “Lithiumressource und deren Nachhaltigkeit”, FKZ: 0325515, 03EE4023E)

Summary

Solute co-production lifetime in a geothermal well doublet,
assessed by bulk-parameter reactive transport models

For geothermal reservoirs operated by production / reinjection wells, thermal lifetime (TLT) is usually defined in terms of a temperature drop threshold, and estimated as a function of extensive (reservoir size-proportional) and intensive (size-independent) parameters like fluid turnover rates and heat exchange areas, or fluid turnover times (FT) and heat exchange rates (e. g., Horne 1985, Pruess and Bodvarsson 1984, Grant and Bixley 2011).

What about ‘lifetime’ for solute co-production during the operation of a geothermal reservoir? If we define a solute lifetime (SLT) analogously to thermal lifetime, in terms of a threshold on solute concentration drop, we may formally recover two basic patterns of extensive (size-dependent) contributions, i. e. a linear plus a quadratic dependence of SLT on FT, formally similar to those of TLT as a function of FT – with one important difference: whereas TLT is usually significantly larger than FT (typically, decades vs. few years), SLT can barely be expected to significantly exceed FT.

To visualize these comparisons in a semi-quantitative manner, we set up a bulk-parameter, dispersive or dispersion-free advection–reaction model, moulded after the two-site (equilibrium plus kinetic ad-/desorption) model of Cameron and Klute (1977). For hydrothermal or aquifer-like reservoirs, SLT prolongement prospects beyond once or twice FT are found to depend primarily on hydrogeochemical factors, whereas for petrothermal reservoirs they also essentially depend on hydrogeostructural characteristics. In other words, an aquifer-like reservoir showing premature thermal breakthrough can still be successful in solute co-production; whereas a petrothermal reservoir which proves too small in terms of thermal drawdown is bound to be short-lived for solute co-production, as well.

1. Motivation

Bei der Gewinnung wirtschaftlich-relevanter (Spuren-)Stoffe X aus dem Thermalwasserkreislauf einer geothermischen Dublette stellt sich die Frage, wie schnell und wie 'nachhaltig' nennenswerte X-Gehalte nachgeliefert werden können (vom umliegenden Gestein zum zirkulierenden Fluid), nachdem das sowohl an Wärme als auch an X 'verarmte' Fluid in das Reservoir reinjiziert wird. Diese Frage stellt sich für ein theoretisches *piston-flow* System bereits ab dem Zeitpunkt, wo die mittlere Fluidverweilzeit (*FT*, *fluid turnover time*) bzw. das Reservoirumsatzvolumen (*TOV*, *fluid turnover volume*) annähernd 'ein Mal', sozusagen, 'durchlaufen' bzw. 'verbraucht' worden ist. Mit derlei Fragen beschäftigt sich u. A. das Arbeitspaket 3.2 im BMWi-Verbundvorhaben UnLimiteD.

Das Interesse an einer Lithiumgewinnung aus Thermalwässern fußt einerseits auf der Hoffnung, Wirtschaftlichkeitslücken der geothermischen Energiegewinnung durch eine gleichzeitige 'stoffliche Nutzung' zu verkürzen, andererseits auf der Erwartung einer steil steigenden Nachfrage für Lithium als Rohstoff elektrochemischer Energiespeicher, dessen Gewinnung aus natürlichen (oder nach technischem Eingriff weiterhin 'naturnah' verbleibenden) Quellen zugleich umweltverträglicher werden soll (etwa dank geschlossenem Thermalwasserkreislauf), als die herkömmlichen Abbauverfahren (etwa durch großflächige Soleverdunstung oder im offenen Tagebau).

Andere Spielarten von 'Impfdurchbrüchen' (thermisch sowie 'Quertracer'-bezogen) werden im BMWi-Vorhaben TRENDS verfolgt; neu gegenüber zuvor berichteten Ergebnissen (Behrens et al. 2020) sind die im Appendix grafisch-zusammengefassten 'Quer'signale zweier Tracer und ihre vorläufige Deutung.

2. Niederparametrische Modellansätze

Unabhängig von Kenntnis und Unwägbarkeiten *play*-spezifischer geohydrochemischer Merkmale, lässt bereits ein niederparametrisches Modell dispersionsfreier Transportprozesse im Reservoir zwei generelle Unterschiede zwischen petrothermalen und aquiferähnlichen Systemen erkennen, hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung ihrer Stoffnachlieferungsraten im Thermalwasserkreislauf – in beschränkter Analogie zum vertrauten Unterschied ihrer Wärmenachlieferungsraten, welche ihre jeweilige thermische Lebensdauer bestimmen.

2.1 Dispersionsfreies Modell

Als maßgebend unter den nicht-advektiven Prozessen werden die Matrixdiffusion (wie beim Wärmetransport) sowie die physikochemisch-bedingten X-Austauschprozesse zwischen Gestein und X-verarmtem Fluid angenommen. Letztere retardieren den *FT*-proportionalen Beitrag zur stofflichen Nutzungsdauer, für petrothermale wie für aquiferähnliche Systeme. Bei Gleichgewicht der Austauschprozesse ergibt sich hierfür formal ein konstanter 'Retardationsfaktor' (dimensionslos; Beispiele für $R = 2$, $R = 5$, $R = 8$ in Abb. 1).

Die Matrixdiffusion erzeugt einen mit *FT* quadratisch steigenden Beitrag zur thermischen Lebensdauer (*TLT*), welcher für petrothermale Systeme entscheidend, für aquiferähnliche Systeme i. d. R. nachrangig ist (cf. Abb. 1 obere Reihe). Die stoffliche Nutzungsdauer ergibt sich als Summe *FT*-proportionaler und *FT*-quadratischer Beiträge, ungefähr analog zur *TLT*, definiert wie bei Pruess and Bodvarsson (1984), Horne (1985), Grant and Bixley (2011). Die Definition beinhaltet einen je nach Betriebsart gesetzten Schwellenwert für die Abnahme der Produktionstemperatur (höheren, d. h. schneller erreichten Schwellenwert für Stromerzeugung, als etwa für Direktheizen), dessen Unterschreiten als "thermischer Durchbruch" bezeichnet wird. Analog gilt für die stoffliche Nutzung

ein Schwellenwert der Stoffverdünnung im Thermalwasserkreislauf, unterhalb dessen die “Co-Erzeugung” wirtschaftlich oder politisch nicht mehr attraktiv ist.

Bei aquiferähnlichen Reservoiren werden wesentlich höhere Werte des X-Verteilungskoeffizienten (an Gestein gegenüber wässriger Lösung; äquivalenter Retardationsfaktor etwa >5) in der mobilen Fluidzone (in den permeablen Reservoirschichten) benötigt, damit die X-Nachlieferungsrate nicht bereits ab der Zeit >~*FT*, d. h. lange vor dem thermischen Durchbruch, rapide sinkt auf geringe (wirtschaftlich nicht mehr darstellbare) Werte. Höhere Werte des X-Verteilungskoeffizienten in der stagnierenden Fluidzone (in den gering-durchlässigen Reservoirschichten) können dieses rapide Sinken etwas, jedoch nicht wesentlich verlangsamen; der ‘stoffliche Durchbruch’ erfolgt verhältnismäßig abrupt.

Hingegen genügen bei Petrothermalreservoiren kleinere Werte der X-Verteilungskoeffizienten (äquivalenter Retardationsfaktor zwischen 1 und 2) in der mobilen Fluidzone (in den maßgebenden Klüften bzw. ‘HydroFracs’), um eine stoffliche Nutzungsdauer des Reservoirs in dessen thermischer Lebensdauer vergleichbarer Höhe zu gewährleisten. Dies ist jedoch keineswegs gleichbedeutend mit einer größeren Gesamtausbeute, als bei einem *caeteris-paribus*-Hydrothermalsystem.

Und, anders als beim aquiferähnlichen Reservoir, erweist sich die stoffliche Nutzungsdauer des Petrothermalreservoirs als weitgehend unabhängig vom X-Verteilungskoeffizienten in der stagnierenden Fluidzone – auf den ersten Blick überraschend, angesichts deren Anteils >90% am Reservoirvolumen. Hier zeigt sich aber auch die Grenze des niederparametrischen Modells, denn in Wirklichkeit sind die Verteilungskoeffizienten beider Zonen zeit- und kinetisch voneinander abhängig. Mit einem abrupten stofflichen ‘Durchbruch’ ist beim petrothermalen System allerdings weniger zu rechnen.

2.2 Dispersive und kinetische Modelle

Als maßgebend für die Nutzstoff-Nachlieferung durch nicht-advektive Prozesse rückt die Kinetik des Nutzstoff-Austausches zwischen Gestein und zirkulierendem Fluid in den Vordergrund – wobei der schneller ablaufende Teil hiervon eventuell weiterhin als ‘Gleichgewichtskomponente’ durch einen einfachen Retardationsfaktor darstellbar ist, wie im sogenannten ‘two-site’ Ad-/Desorptionsmodell von Cameron und Klute (1977), welches zudem die Heterogenität der Fließwege in Gestalt eines longitudinalen Dispersionskoeffizienten berücksichtigt und für 1-D Advektion-Dispersion noch ‘analytisch’ lösbar ist (was dem Cameron-Klute-Modell eine gewisse Popularität in der Schadstoff-hydrologie einbrachte, etwa für Radionuklid- und Schwermetalltransportprognosen: cf. Klotz et al. 1988, Małoszewski et al. 2004, Okońska et al. 2017). Einfacher als die Auswertung ‘analytischer’ Transportgleichungs‘lösungen’ (de facto, deren Doppelintegraldarstellung) lässt sich das ursprüngliche System partieller Differentialgln., nach räumlicher Diskretisierung, als System gewöhnlicher DGln. betrachten und mittels der ‘*method of lines*’ numerisch mit geringem Aufwand lösen (wie z. B. von Ghergut und Behrens 2000 mit einem *computer algebra system* wie *Maple* oder *Mathematica* für die Säulenexperimente von Fohrmann 2002 bereitgestellt).

3. Parameterfreier Modellansatz

Liegt für das betrachtete Reservoir bereits ein auswertbares Tracersignal vor, aus einer künstlichen Thermalwasserkreislaufmarkierung mit einem konservativen Tracer unter Strömungsbedingungen, welche auch für die künftig beabsichtigte stoffliche Nutzung repräsentativ sind, dann ‘erübrigt’ sich, in erster Näherung, die Ermittlung weiterer Reservoir- und Prozessparameter, denn die stoffliche Ausbeute als Funktion der Zeit lässt sich ‘quasi-universell’ aus dem Tracersignal herleiten:

$$MASS_{out}(t) = (C_{ini} - C_{resid}) \left\{ VOL(t) - \int_0^t Q(t') \int_0^{t'} Q(T)\ G(T)\ dT\ dt' \right\}$$

Darin bezeichnet $G(T)$ die Fluidverweilzeitverteilungsdichte (ein räumlich-fixierter Green'scher Kern des konservativen Transports; Dimension: 1/Volumen), gewonnen durch Dekonvolution und Normierung aus dem gemessenen Tracersignal. Optional lässt sich diese $G(T)$ zusätzlich mit Cameron-Klute-Modellparametern in eine passende Reaktivtransport-Kernelfunktion umwandeln.

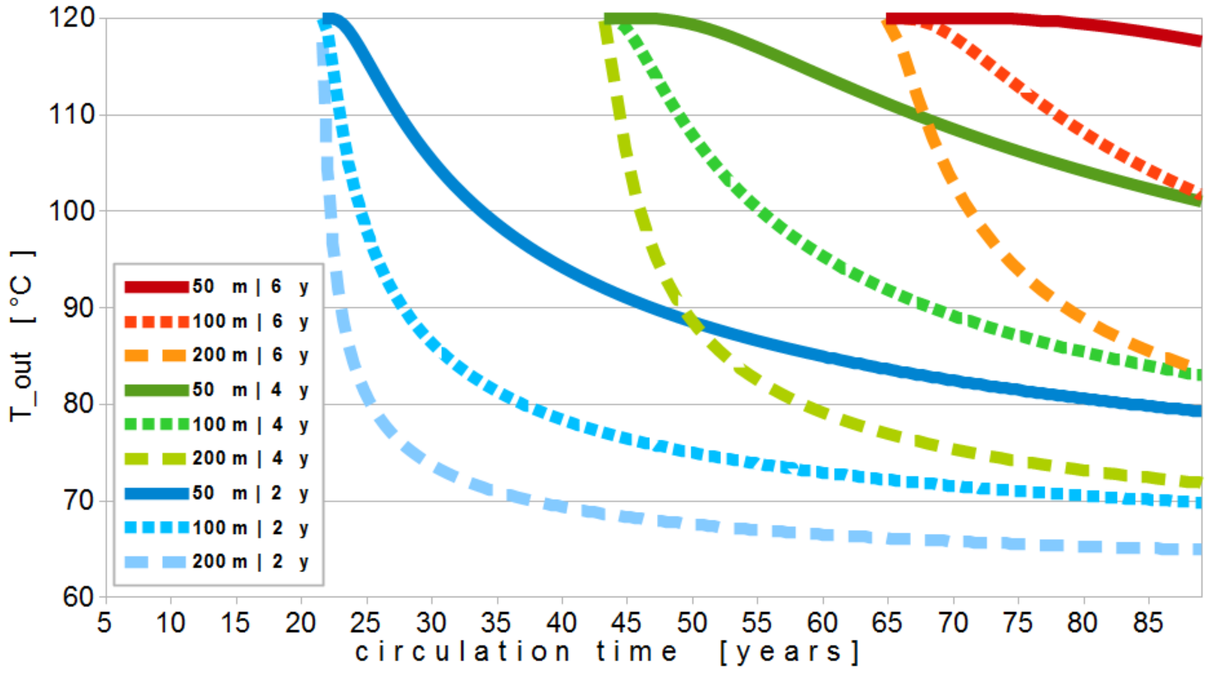
C_{ini} bezeichnet die (ungestörte) Anfangskonzentration des Nutzstoffs X im Reservoirfluid, C_{resid} dessen unextrahiert verbliebene (Residual-)Konzentration im reinjizierten Fluid, und *VOL* das kumulativ (mit der evtl. zeitlich-variablen Fließrate *Q*) geförderte Fluidvolumen.

'Universell' funktioniert dies in dem Sinne, dass kein Reservoirmodell (etwa mit räumlich-verteilten Parametern) benötigt wird, auch keine Kenntnis der Reservoirstruktur überhaupt; ist die Fluidverweilzeitverteilungsdichte $G(T)$ ermittelt (nach erfolgreichem Tracertest), 'dürfen' sonst alle Reservoireigenschaften in dessen '*black box*' verborgen bleiben. Die Einschränkung ('quasi-') rührt daher, dass bei zeitlich stärker variabler Fließrate $Q(t)$ die Green'sche Kernelfunktion nicht mehr wohldefiniert ist, und die Herleitung (incl. Dekonvolution) einer äquivalenten $G(T)$ aus dem gemessenen Tracersignal dann doch gewisser Annahmen zur Reservoirstruktur unterliegt. Letzteres betrifft auch die (praktisch immer benötigte) Extrapolierung des gemessenen Tracersignals auf Jahr(zehnt)e hinaus; zeitliche Extrapolierungen sind grundsätzlich immer modellabhängig.

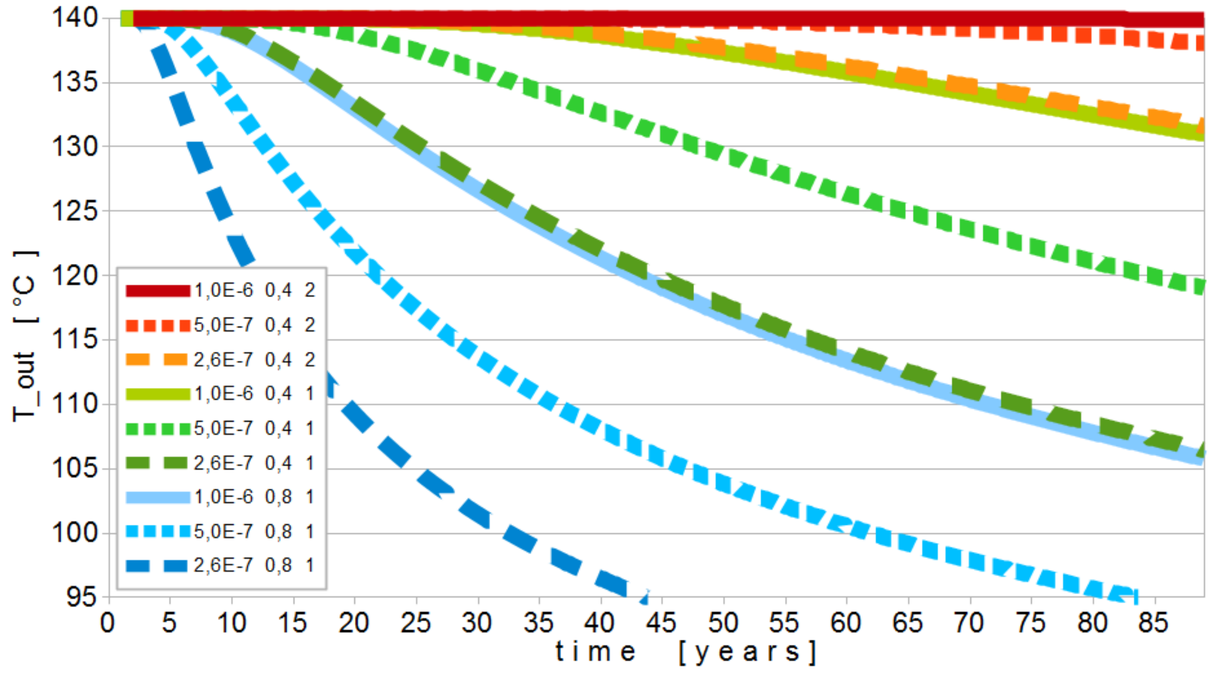
Die Anwendung dieses Verfahrens wird in Abb. 2 und 3 veranschaulicht für vier aquiferähnliche Reservoire im Oberrheingraben und einem petrothermalen Reservoir im Norddeutschen Becken, für welche Konservativtracersignale aus Thermalwasserkreislaufmarkierungen mehr oder weniger 'vollständig' vorliegen. Um der Langzeitextrapolierungsunsicherheit der Tracersignale Rechnung zu tragen, wird für den asymptotischen Tracerwiedererhaltsfaktor eine breite Spanne betrachtet, von 60% (offenes System, Abb. 2) bis 100% (isoliertes System, 'abgedichtete Reservoirblase', Abb. 3). Letzteres ist offensichtlich unrealistisch; Ersteres wird es erst nach längerer Zeit, da sich auch das sog. 'offene System' aus einem finiten, wenngleich deutlich größeren Vorrat speist, der irgendwann zur Neige geht.

4. Populäre Größenordnungen

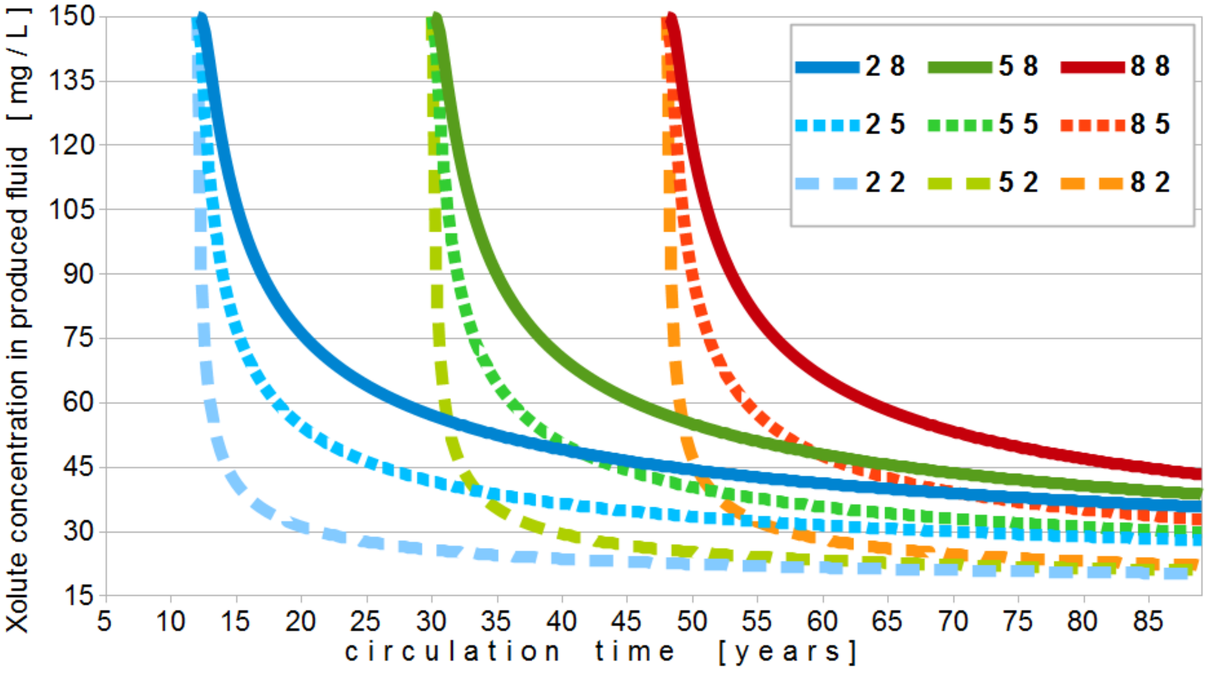
Bereits durchgeführte Tracertests (Behrens et al. 2014, 2021) deuten auf Fluidumsatzvolumina in der Größenordnung 10–50 Mio.m³ hin, bei den derzeit machbaren Reservoirerschließungsarten im Oberrheingraben; im Norddeutschen Becken tendenziell kleiner, etwa 0.3–5 Mio.m³. Wenn aus jedem (mit welcher Rate auch immer) geförderten Kubikmeter Reservoirfluid sich etwa 150 Gramm Nutzstoff extrahieren lassen (über welche Betriebsdauer auch immer, bis das mobile Reservoirfluid, im Thermalwasserkreislauf, sozusagen 'ein Mal ausgetauscht' worden ist), dann wären mit einer Reservoir'passage' etwa 50 t bis 7500 t zu erwarten (bei den derzeit *theoretisch* als machbar angenommenen Verfahren für NDB bzw. ORG). Mit steigender Fluidumsatzrate wächst i. d. R. auch die Größe des Reservoirs, d. h. dessen Fluidumsatzvolumen (*TOV*), allerdings nur sub-linear (solange Anzahl und Lage der Injektions- und Produktionsbohrungen so bleibt, wie vorgegeben). Eine Augmentierung der Reservoirgröße durch 'disruptive' Ansätze, etwa [A] unkonventionelle Geometrien von Mehrbohrlochanordnungen, oder [B] Vertikalbohren mit ultraweitem Durchmesser (was signifikant höhere Fließraten bei bohrlochnah weniger steilen hydraulischen Gradienten



aquiferähnliches Reservoir im Oberrheingraben



petrothermales Reservoir im Norddeutschen Becken



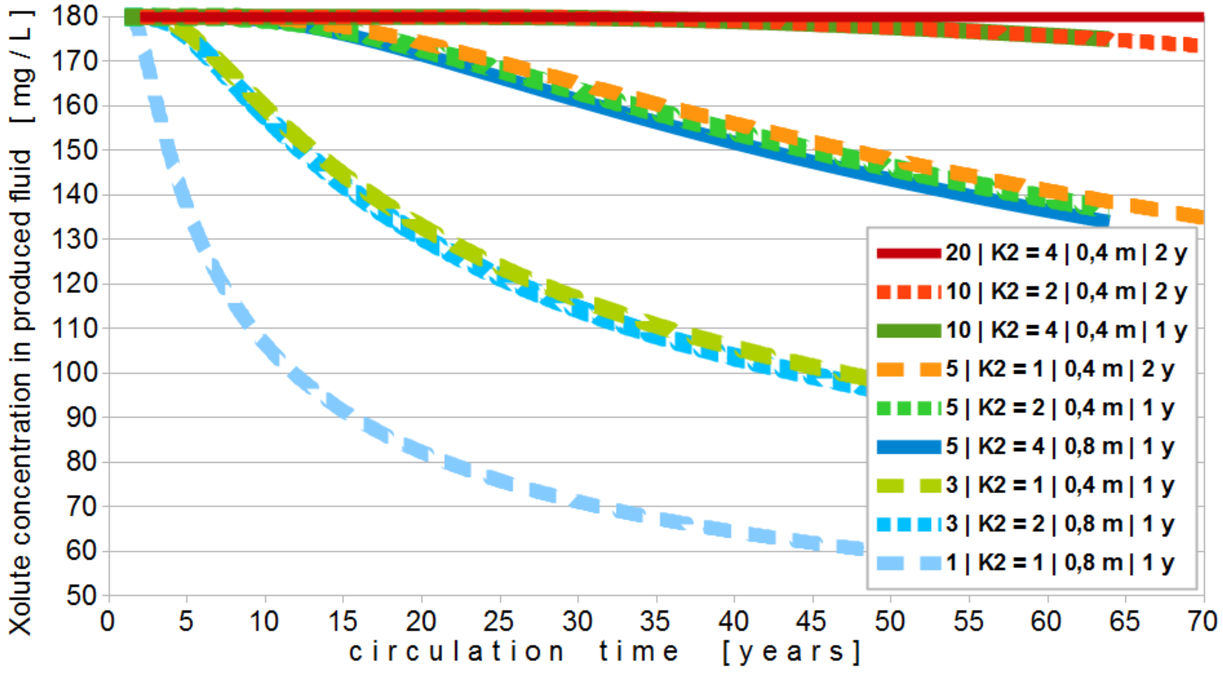


Abb. 1 : Thermische Lebensdauer (oben) versus stoffliche Nutzungsdauer (unten) für aquiferähnliche (links) und für petrothermale Systeme (rechts) in für Mitteleuropa typischen Größen, laut dispersionsfreiem Reaktivtransportmodell.

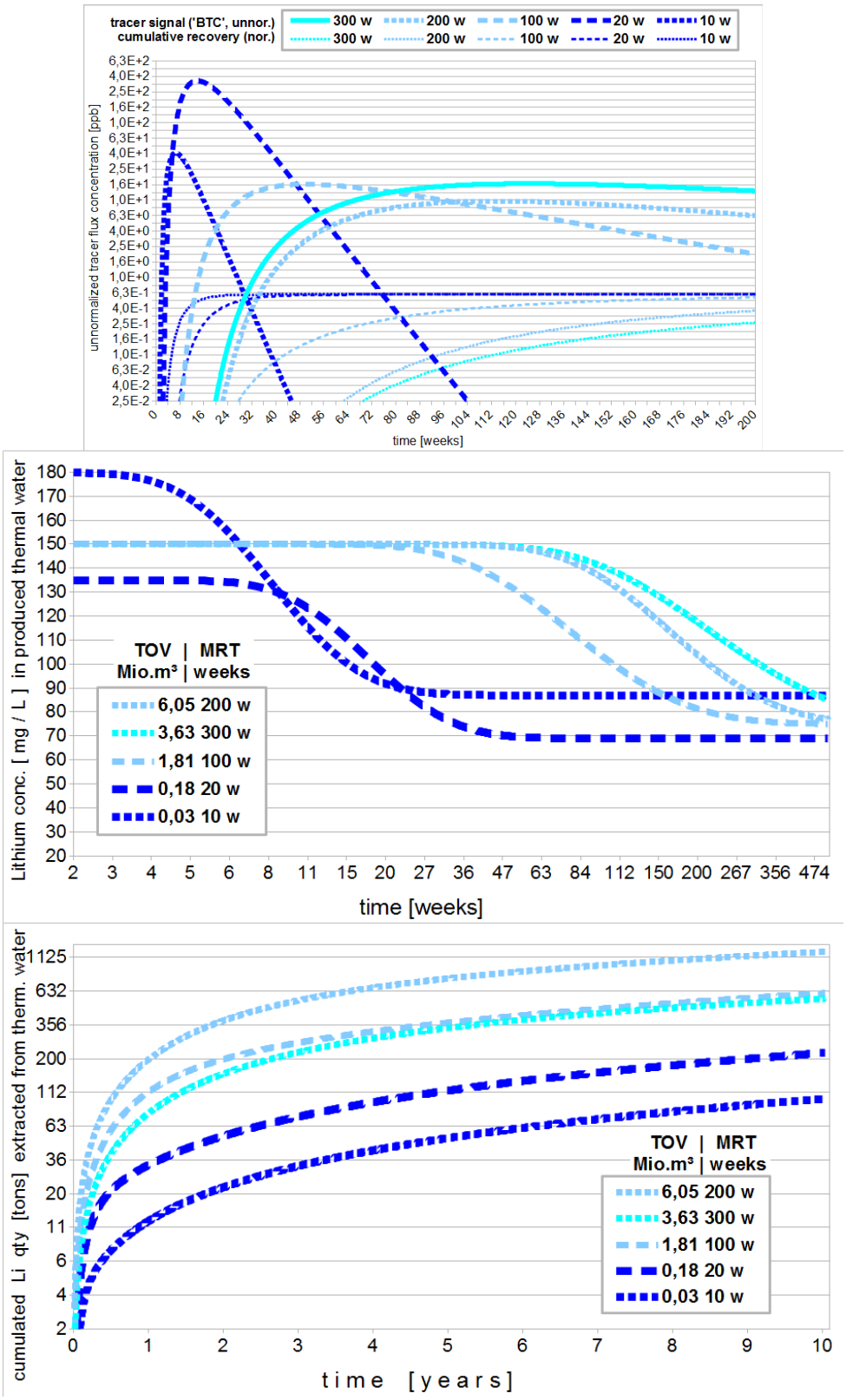


Abb. 2: Tracergestützte Prognose der (zeitabhängigen) stofflichen Ausbeute, für offene Systeme. Oben: angenommene Tracersignale und ihre normierten Wiedererhalte (max. 60%). Mittig: graduelle Abreicherung der Stoffkonzentration im geförderten Fluid. Unten: kumulative stoffliche Ausbeute als Funktion der Zeit.

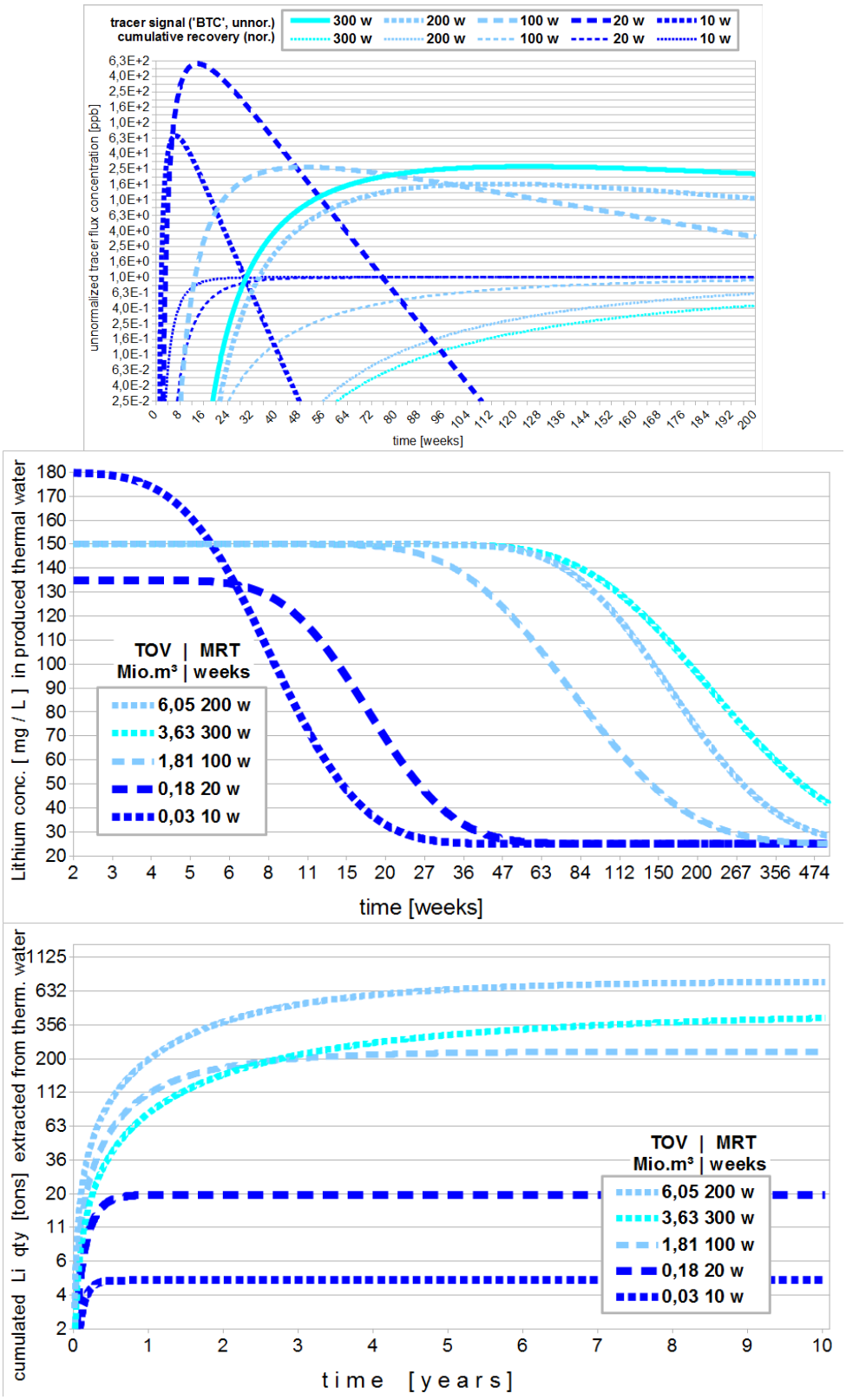


Abb. 3: Tracergestützte Prognose der (zeitabhängigen) stofflichen Ausbeute, für isolierte Systeme. Oben: angenommene Tracersignale und ihre normierten Wiedererhalte (max. 100%). Mittig: graduelle Abreicherung der Stoffkonzentration im geförderten Fluid. Unten: kumulative stoffliche Ausbeute als Funktion der Zeit.

ermöglichen soll), speziell auch in Verbindung mit [A], oder [H] Horizontalbohren über signifikant längere Strecken, könnte die Ausbeute des Reservoirs, thermisch und stofflich, um Faktoren ca. 10 bis 30 erhöhen, zugleich jedoch auch die Wirtschaftlichkeitslücke 'augmentieren', derzeit noch prohibitiv; der 'Grenznutzen' einer Reservoir-Augmentierung wäre sozusagen negativ. Technologisch erscheinen am Ehesten [H] und [A], mit Einschränkungen auch [B] machbar, mit zurzeit noch als prohibitiv empfundenen Kosten. Wenn dank MMT die Kostenfrage zunehmend bis komplett postfaktisch wird, steht dann der Reservoiraugmentierung gar nichts mehr im Wege.

O.-g. Pauschalabschätzungen "Menge pro *FT*" oder "Menge pro *TOV*" (ohne Augmentierung) decken sich durchschnittlich mit den tracergestützt-*zeitabhängigen* Prognosen von Abb. 2 und 3.

5. Fazit (vorläufig)

Solange die Nutzstoff-Nachlieferungsraten, zum Nutzstoff-verarmten Fluid, vom anliegenden Reservoirgestein und/oder durch Fluidaustausch zwischen dem bewirtschafteten Thermalwasser-'kreislauf' und weiträumigeren Zirkulationssystemen, unter den tatsächlichen Betriebsbedingungen des Fluidkreislaufs, nicht näher bestimmbar, im Ursprungszustand quantitativ wohl wenig versprechend, und technologisch noch wenig beeinflussbar bleiben, ist von einer stofflichen Nutzungsdauer auszugehen, welche die Fluidverweilzeit-Größenordnung des jeweiligen Reservoirbetriebs nicht erheblich überschreitet – sowohl für aquiferähnliche als auch für petrothermale Systeme. Für Letztere ist die stoffliche Nutzungsdauer eventuell 'gestreckt', bei entsprechend langsamer-wachsender Ausbeute, als in einem aquiferähnlichen System mit der gleichen Fluidverweilzeit.

Demnach erscheint die Nachhaltigkeitsfrage betreffs (Spuren-)Elementausbeute nicht so sehr als eine Frage der geologischen Ressourcen-'Höffigkeit' (cf. Ohrdorf 1968), sondern vielmehr als eine Frage der Hydrogeologie, Hydrogeomechanik sowie der Tiefbohrtechnologie, welche die Art und Größe der Reservoirerschließung bedingen bzw. begrenzen. Vulgo: Bevor die Nachhaltigkeit der stofflichen Ausbeute beurteilt werden kann, muss erst ein Reservoir erschließbar und darin ein Fluidkreislauf (nicht nur kurzzeitig 'probehalber') betreibbar werden. Dies wird im Rahmen weiterer BMWi- und EU-Vorhaben untersucht: für Sedimentärformationen im Norddeutschen Becken u. A. von Wolfgramm und Franz (2016), in überregionaler Betrachtung für 'variszische' EGS-Kandidaten Mitteleuropas u. A. von Leiss und Wagner (2019) im Rahmen des EU-Projektes MEET.

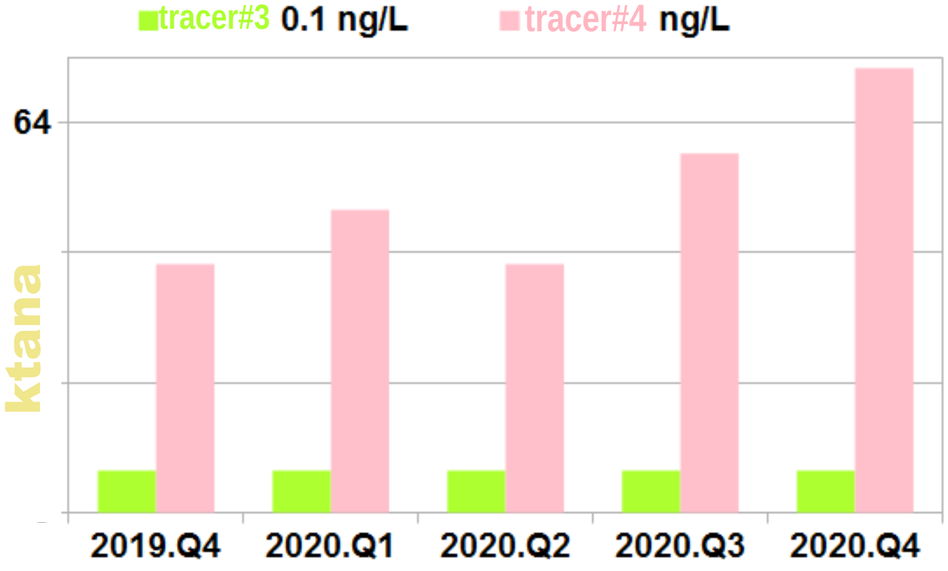
Danksagung

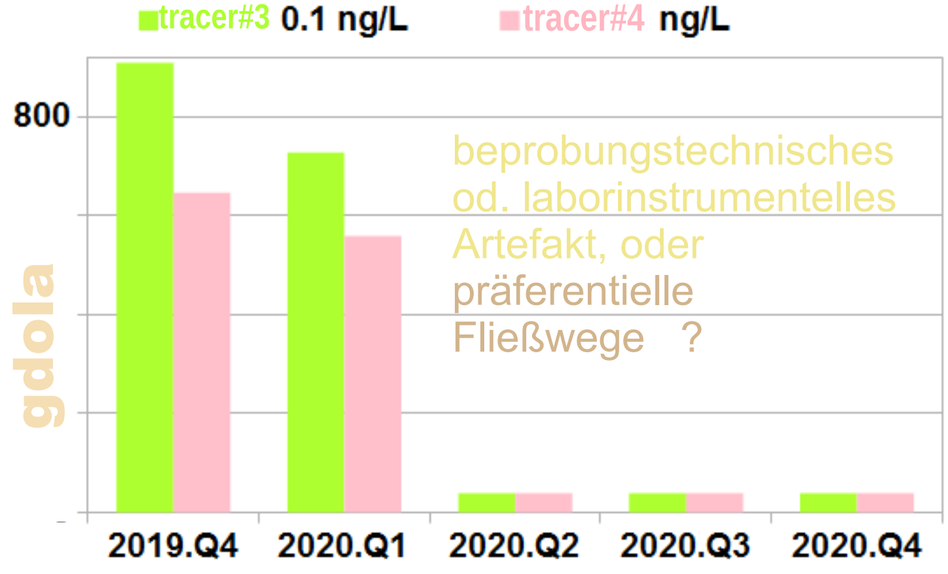
Die mit Mitteln des **Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie** (BMWi) geförderten Vorhaben "TRENDS" (FKZ: 0325515) und "UnLimiteD" (FKZ: 03EE4023E) wären nicht denkbar gewesen, ohne das stete Mitwirken – in Labor und Werkstatt, am Bohrplatz und am Schreibtisch – von **Hydroisotop**, **BESTEC**, **EnBW**, **GGA** (LIAG) und **BGR**, **Projektträger Jülich**, **Stadtwerke München**, **ERDWERK**, **Petzoldt-Chemie**, **renerco plan consult** und nicht zuletzt **GFZ Potsdam**. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Kurzberichts liegt beim federführenden (zweiten) Autor.

Quellenangaben

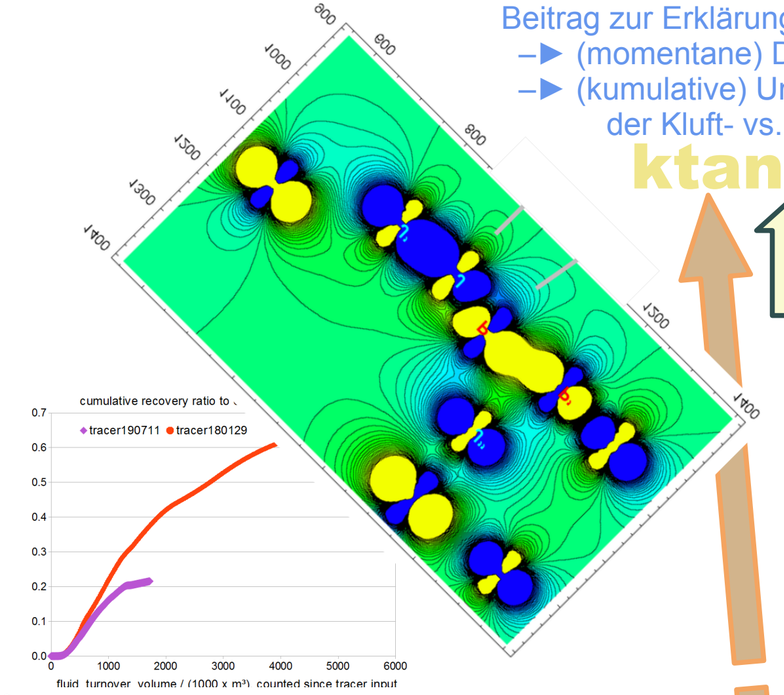
zu finden nach der Appendix-Seite

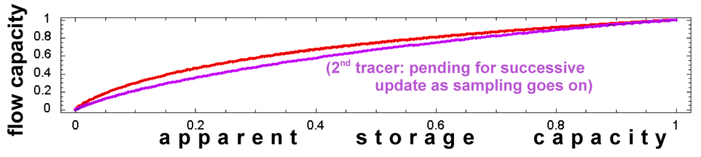
APPENDIX : grafisches Update betreffs etwaiger ‘Impfdurchbrüche’ im BMWi-Vorhaben TRENDS (FKZ 0325515)

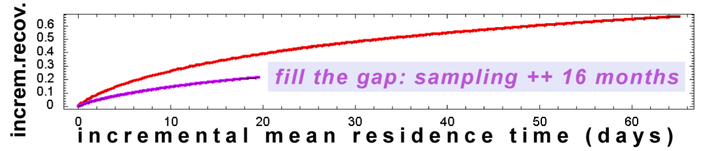


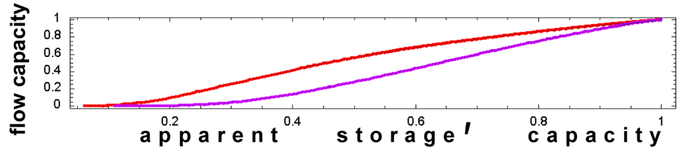


beprobungstechnisches od. laborinstrumentelles Artefakt, oder präferentielle Fließwege ?









Beitrag zur Erklärung der Reservoirdynamik:
–► (momentane) Durchsatzabhängigkeit
–► (kumulative) Umsatzabhängigkeit
der Kluft- vs. Matrix-Anteile der *forced-gradient* Strömung
durch kurz-/mittel-/langfristige Poroelastizität;
hier: Mohrkreisabstandsverkürzung (gelb)
bzw. -zunahme (blau), mit spürbarer
gegenseitiger Beeinflussung im Umkreis

ktana

gdola

1. Tracertest: ‘Monokluft’?
(Tailing typisch für Matrixdiffusion)
2. Tracertest: Hat die Fließratenerhöhung eine zweite Kluft in Axialrichtung induziert ?

Überlagerung zweier Advektiv-Dispersivsignale
(Tailing noch atypisch, Matrixdiff. ggf. erst später sichtbar)

$$\frac{C(t)\,Q_{tot}}{M_{tot}} = \underbrace{x\,f(P_1,T_1,t)}_{\text{erklärt die Abkühlung}} + \underbrace{(1-x)\,f(P_2,T_2,t)}_{\text{wichtig für Umbau des Reservoirs}}$$

$$x \equiv \frac{M_1}{M_{tot}}\ ,\ T_1 \approx 58\ d\ ,\ T_2 > T_1\ \ (\ T_2 \gg T_1\ )$$

Umkreis-Fluidbeprobung,
Langzeitmonitoring zur Erkennung gegenseitiger Beeinflussungen
(Kernaufgabe des TRENDS-Vorhabens)

–► bis dato ca. 70% planmäßig erfolgt
–► Monitoring weiterhin Q4/2021 ff.
–► zeitnahe laborinstrum. Traceranalytik

Quellenangaben

BEHRENS, H., GHERGUT, J., SAUTER, M.: Some insights gained from tracer tests conducted in geothermal reservoirs in Southern Germany, 2009–2013. Stanford University, SGP-TR-202 (2014), 171–176.

BEHRENS, H., GHERGUT, J., SAUTER, M., WAGNER, B., WIEGAND, B.: Premature decline of production temperature – can tracer test tell why? Stanford University, SGP-TR-216 (2020), 195–201.

BEHRENS, H., GHERGUT, J., SAUTER, M.: Non-penetrated large-/mid-scale fractures: blind spot or 'nebula' for artificial tracers in inter-well tests. *EGUsphere*, DOI: 10.5194/egusphere-egu21-13435 (2021), 1–8.

CAMERON, D. R. and KLUTE, A.: Convective-dispersive solute transport with a combined equilibrium and kinetic adsorption model. *Water Resources Research*, **13** (1977), 183–188.

FOHRMANN, G.: Untersuchungsergebnisse zur Mobilität und Remobilisierung von Kupfer und Antimon in wasserwirtschaftlich relevanten, porösen Lockergesteinen durch Säulenversuche und mit reaktiver Transportmodellierung. Dissertation, LMU München (2002).

GHERGUT, J. und BEHRENS, H.: Method-of-lines solutions to selected classes of environmental models. Vorlesungsskript IAAG-AGH, LMU München (2000). – Anwendungsbeispiele: cf. Fohrmann (2002).

GRANT, M. A. and BIXLEY, P.F.: *Geothermal Reservoir Engineering*. Academic Press, Elsevier (2nd ed., 2011), 259–262.

HORNE, R. N.: Reservoir engineering aspects of reinjection. *Geothermics*, **14**(2/3) (1985), 449–457.

KLOTZ, D., MAŁOSZEWSKI, P., MOSER, H.: Mathematical modelling of radioactive tracer migration in water flowing through saturated porous media. *Radiochimica Acta*, **44/45** (1988), 373–379.

LEISS, B., WAGNER, B. und das MEET-KONSORTIUM: EU-Projekt MEET: neue Ansätze 'Enhanced Geothermal Systems (EGS)' – Göttinger Unicampus als Demoprojekt. *Geothermische Energie*, **91** (2019), 26–28.

MAŁOSZEWSKI, P., STICHLER, W., ZUBER, A.: Interpretation of environmental tracers in groundwater systems with stagnant water zones. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, **40** (2004), 21–33.

OHRDORF, R.: Ein Beitrag zur Geochemie des Lithiums in Sedimentgesteinen. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **32** (1968), 191–208.

OKOŃSKA, M., KACZMAREK, M., MAŁOSZEWSKI, M., MARCINIAK, M.: The verification of the estimation of transport and sorption parameters in the MATLAB environment. A column test. *Geology, Geophysics & Environment*, **43**(3) (2017), 213–227.

PRUESS, K. and BODVARSSON, G. S.: Thermal effects of reinjection in geothermal reservoirs with major vertical fractures. *J. Petrol. Technol.*, **36** (1984), 1567–1578.

WOLFGRAMM, M. und FRANZ, M.: Das geothermische Potenzial mesozoischer Sandsteine des Norddeutschen Beckens. *Geothermische Energie*, **85** (2016), 6–7.

Weitere Quellenangaben
werden unter sites.google.com/view/bmwi-0325515-trends und sites.google.com/view/unlimitt laufend ergänzt und aktualisiert. Dort finden sich auch Datensätze laufender Tracertests, weitere Infos und Photos.

Universität Göttingen, Geowissenschaftliches Zentrum, Abt. 1, Goldschmidtstr. 3, 37077 Göttingen
iulia.ghergut@geo.uni-goettingen.de