

## Berichtsblatt

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                         |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--|
| 1. ISBN oder ISSN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)<br>Schlussbericht |  |
| 3. Titel<br><br>TOMOME – Tomographische Methoden in der Hydrogeologie<br><br>„Gemeinsame geostatistische Inversion von hydraulischer Tomographie, Wärmetracertomographie und geoelektrischer Tomographie während Salztracerversuchen“<br>„Feldversuche zu gekoppelten hydraulischen tomographischen Methoden in einem alluvialen Grundwasserleiter“                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                         |  |
| 4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]<br><br>Prof. Dr.-Ing. Olaf A. Cirpka<br>Dr. Carsten Leven                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 5. Abschlussdatum des Vorhabens<br>31.12.2013                           |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 6. Veröffentlichungsdatum<br>11.07.2014                                 |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 7. Form der Publikation<br>Bericht                                      |  |
| 8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)<br><br>Universität Tübingen<br>Fachbereich Geowissenschaften<br>Zentrum für Angewandte Geowissenschaften<br>Hölderlinstr. 12<br>72076 Tübingen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 9. Ber. Nr. Durchführende Institution                                   |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 10. Förderkennzeichen<br>03G0742A                                       |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 11. Seitenzahl<br>45                                                    |  |
| 12. Fördernde Institution (Name, Adresse)<br><br>Bundesministerium für<br>Bildung und Forschung (BMBF)<br>53170 Bonn                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 13. Literaturangaben<br>118                                             |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 14. Tabellen<br>2                                                       |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 15. Abbildungen<br>17 Abbildungen und 14 Bilder                         |  |
| 16. Zusätzliche Angaben                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                         |  |
| 17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)<br>Projektträger Jülich, Rostock, 11.07.2014                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                         |  |
| 18. Kurzfassung<br><br>Die Teilprojekte WP1 und WP4 im Verbundprojekt „Tomographische Methoden in der Hydrogeologie“ (TOMOME) befassten sich mit der Erfassung und Inversion hydraulischer Daten aus hydrogeologischen Feldstudien mit tomographischer Anordnung. Das Hauptziel war die Entwicklung gekoppelter tomographischer Erkundungs- und Inversionsstrategien, in denen hydraulische und geophysikalische Messungen kombiniert wurden, um die dreidimensionale Verteilung der hydraulischen Eigenschaften von Grundwasserleitern, insbesondere der dreidimensionalen Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeit als Zielgröße zu ermitteln. Dies beinhaltete (1) die Entwicklung von Erkundungsstrategien und tomographischen Feldmethoden sowie (2) die Entwicklung voll gekoppelter hydrogeophysikalischer Inversionsmethoden, die unter anderem im Softwarepaket DUNE, einer Plattform zur parallelen Berechnung von partiellen Differentialgleichungen, implementiert wurden. |                                                                         |  |
| 19. Schlagwörter<br>Tomographische Methoden, Hydrogeologie, Inversionsmethoden, Untergrunderkundung, hydraulische Durchlässigkeitsbestimmung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                         |  |
| 20. Verlag<br>-                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 21. Preis<br>-                                                          |  |





## Endbericht

|                                                                                                                              |                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Zuwendungsempfänger<br><br>Universität Tübingen<br>Fachbereich Geowissenschaften<br>Zentrum für Angewandte Geowissenschaften | Förderkennzeichen<br><br><b>03G0742A</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|

Vorhabenbezeichnung

**TOMOME – Tomographische Methoden in der Hydrogeologie**

Teilprojekte

WP1 „Gemeinsame geostatistische Inversion von hydraulischer Tomographie, Wärmetracertomographie und geoelektrischer Tomographie während Salztracerversuchen“ (Koordination: Prof. Cirpka)“

WP 4 „Feldversuche zu gekoppelten hydraulischen tomographischen Methoden in einem alluvialen Grundwasserleiter“ (Koordination: Dr. Leven)

Laufzeit des Vorhabens

01.10.2010 – 30.09.2013 – verlängert bis 31.12.2013

Berichtszeitraum

01.10.2010 – 31.12.2013

Die Teilprojekte WP1 und WP4 des Verbundprojektes „*Tomographische Methoden in der Hydrogeologie*“ (TOMOME) wurden gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des F+E-Programmes GEOTECHNOLOGIEN unter dem Förderkennzeichen 03G0742A.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



# 1 Kurzdarstellung des Projektes

## 1.1 Aufgabenstellung

Der natürliche Untergrund zeichnet sich durch eine starke räumliche Variabilität aus. Dies beeinflusst die Bewirtschaftung und den Schutz oberflächennaher Grundwasserleiter, die zur Gewinnung von Trinkwasser oder anderweitig genutzt werden. Die räumliche Variabilität der hydraulischen Durchlässigkeit bewirkt einen sehr ungleichförmigen Stofftransport, was die Bewertung und Sanierung kontaminierter Grundwasserleiter erschwert sowie zu Unsicherheiten bei der Einschätzung von Risiken und der Dimensionierung vorbeugender Schutzmaßnahmen führt. Deshalb ist eine möglichst umfassende Erkundung der hydraulischen Untergrundeigenschaften und ihrer räumlichen Variabilität für die Bewirtschaftung und den Schutz von Grundwasserressourcen unerlässlich.

Das Verbundprojekt „*Tomographische Methoden in der Hydrogeologie*“ (TOMOME) befasste sich mit der Erfassung und Inversion hydraulischer Daten aus hydrogeologischen Feldstudien mit tomographischer Anordnung. Das Hauptziel war die Entwicklung gekoppelter tomographischer Erkundungs- und Inversionsstrategien, in denen hydraulische und geophysikalische Messungen kombiniert wurden, um die dreidimensionale Verteilung der hydraulischen Eigenschaften von Grundwasserleitern, insbesondere der dreidimensionalen Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeit als Zielgröße zu ermitteln. Dies beinhaltete (1) die Entwicklung von Erkundungsstrategien und kostengünstigen, wiederverwertbaren Feldgeräten sowie (2) die Entwicklung voll gekoppelter hydrogeophysikalischer Inversionsmethoden, die unter anderem im Softwarepaket DUNE, einer Plattform zur parallelen Berechnung von partiellen Differentialgleichungen, implementiert wurden.

## 1.2 Projektvoraussetzungen

Das Projekt wurde als Verbundprojekt zwischen der Arbeitsgruppe *Hydrogeologie* im Fachbereich Geowissenschaften an der Universität Tübingen mit der Arbeitsgruppe *Paralleles Rechnen* am Interdisziplinären Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen (IWR) der Universität Heidelberg und der Firma *Terrana Geophysik Dr. Patzelt & Partner* durchgeführt. Die Verbundprojektkoordination lag bei Prof. Cirpka an der Universität Tübingen. Innerhalb des Verbundprojektes war die Arbeitsgruppe *Hydrogeologie* an den beiden Arbeitspaketen WP 1 „Gemeinsame geostatistische Inversion von hydraulischer Tomographie, Wärmetracertomographie und geoelektrischer Tomographie während Salztracerversuchen“ (Koordination: Prof. Cirpka) und WP 4 „Feldversuche zu gekoppelten hydraulischen tomographischen Methoden in einem alluvialen Grundwasserleiter“ (Koordination: Dr. Leven) beteiligt.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Teilprojekte WP1 („Gemeinsame geostatistische Inversion“, Leitung: Prof. Cirpka) und WP4 („Feldversuche zu gekoppelten hydraulischen tomographischen Methoden“, Leitung: Dr. Leven) der Universität Tübingen im Verbundprojekt TOMOME konnten wie folgt durchgeführt werden:

| Projekt-monate | Teil-projekt | Durchgeführte Arbeiten                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1-6</b>     | WP1          | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Codeentwicklungen zur Implementierung von tracer-tomographischen Datensätzen</li> <li>▪ Numerische Studien zur Auslegung der Feldexperimente</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|                | WP4          | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zusammenstellung existierender tomographischer und anderer relevanter Studien am Versuchsstandort Lauswiesen</li> <li>▪ Besuch an der Boise State University zum wissenschaftlichen Austausch über Methoden der hydraulischen Tomographie</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>7-12</b>    | WP1          | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Implementierung der Inversion von Wärmetracerdaten und Auslegung von Feldexperimenten für Salztracerversuche mit geoelektrischem Monitoring</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|                | WP4          | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Experimentserien zur hydraulischen Tomographie, Direct-Push- und andere hydrogeologischen Untersuchungen z.B. zum Einfluss des Neckars auf die Grundwasserströmungsbedingungen, Installation von geoelektrischen Sonden (Prototypen)</li> <li>▪ Fertigung gebrauchsfertiger Direct-Push-Sonden durch Vergabe eines Auftrages an Dritte</li> </ul>                                                                                                                                                                                     |
| <b>13-18</b>   | WP1          | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Inversionsrechnungen zur Wärmetracer-Tomographie und Fortsetzung der Studien zur optimalen Auslegung der Feldexperimente</li> <li>▪ Erweiterung des Inversionscodes für die Inversion von Salztracerversuchen mit geoelektrischem Monitoring</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|                | WP4          | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Geoelektrische Messungen zur Bestimmung messtechnisch optimaler Elektrodenkonfigurationen</li> <li>▪ Durchführung verschiedener Messkampagnen zu wärmetracer-tomographischen Untersuchungen</li> <li>▪ Abschluss der Arbeiten von Klein (2011), Haas (2011) und Strasser (2011) mit vollständigen Experimentserien zur hydraulischen Tomographie, der Untersuchung des Einflusses des Neckars auf den Grundwasserleiter und die Erweiterung des Datensatzes hydrogeologischer Parameter am Standort Lauswiesen</li> </ul>             |
| <b>19-24</b>   | WP1          | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fortsetzung der Arbeiten zur Erweiterung des Inversionscodes für die Inversion von Salztracerversuchen mit geoelektrischem Monitoring</li> <li>▪ Abschluss der Arbeit von Emmerich (2012) zur Inversion von Wärmetracer- und hydraulischer Tomographie und der Arbeit von Wang (2012) zur kombinierten Inversion von Salztracerversuchen mit geoelektrischem Monitoring mittels Ensemble Kalman-Filtern</li> </ul>                                                                                                                    |
|                | WP4          | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Erweiterungen des Versuchsaufbaus zu tomographischen Wärmetracerexperimenten und Durchführung von Wärmetracerexperimenten</li> <li>▪ Abschluss der Arbeiten von Stark (2012), Gutierrez (2012), Harbarth (2012), Wolf (2012) zu messtechnischen und hydrogeologischen Aspekten zum Standort Lauswiesen (z.B. Erfassung von vertikale Durchlässigkeitsverteilungen, Messmethoden und Messstellenzustand)</li> <li>▪ Untersuchungen zu Einsatzmöglichkeiten und Experimentkonzepten zu verschiedenen Typen von Drucksensoren</li> </ul> |

| Projekt-monate | Teil-projekt | Durchgeführte Arbeiten                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----------------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 25-30          | WP1          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Arbeiten von Isabaev (2013) zur Inversion von Datensätzen von Experimenten der hydraulischen Tomographie</li> <li>Inversion des zweiten Felddatensatzes: hydraulische Tomographie, Direct-Push Profile und Wärmetracer-Tomographie</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|                | WP4          | <ul style="list-style-type: none"> <li>3-monatiger Besuch im Rahmen eines DAAD-finanzierten projektbezogenen Personenaustausches des Doktoranden an die University of Wisconsin und an die Stanford University</li> <li>Erweiterung der Datensätze zu tomographischen Wärmetracerexperimenten und Testen optimaler Messkonzepte für das Monitoring von Salztracerversuchen mittels Geoelektrik</li> <li>Fertigung modifizierter Direct-Push-basierter Elektrodenketten</li> <li>Abschluss der Arbeiten von Vilches Jarnes (2013) und Skrainka Fabbiani (2013) zu optimalen Messkonfigurationen für das Monitoring von tomographischen Salztracerversuchen und dem Einsatz von Geoelektrik zum Monitoring von Wärmetracerversuchen</li> </ul> |
| 21-36          | WP1          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Weitere Arbeiten zur Inversion von Datensätzen der hydraulischen Tomographie und hydrogeophysikalischen Inversion von Datensätzen der hydraulischen Tomographie, Wärmetracer- und Salztracerversuchen mit geoelektrischem Monitoring</li> <li>Erstellen des Abschlussberichtes und Ausarbeitung von Manuskripten zur Publikation</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|                | WP4          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Wiederholungsmessungen und Anpassung der Messkonzepte zu tomographischen Wärmetracerexperimenten</li> <li>Durchführung von Salztracerversuchen mittels Geoelektrik Salztracerversuche</li> <li>Abschluss der Arbeit von Roller (2013), Beck (2013) und Mühlberger (2013) zum Einsatz von tomographischen Farbtracerversuchen, verbesserter Messkonfigurationen für die hydraulische Tomographie und Umsetzung eines verbesserten Versuchsaufbaus für tracertomographische Untersuchungen</li> <li>Weitere Fertigung modifizierter Direct-Push-basierter Elektrodenketten und eines zugehörigen Packersystems</li> </ul>                                                                               |
| 37-39          | WP1          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Weitere Arbeiten zur Inversion von Datensätzen der hydraulischen Tomographie und hydrogeophysikalischen Inversion von Datensätzen der hydraulischen Tomographie, Wärmetracer- und Salztracerversuchen mit geoelektrischem Monitoring</li> <li>Abschluss der Arbeiten von Sanchez-Leon (2013) und Abdrakhimova (2013)</li> <li>Erstellen des Abschlussberichtes</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|                | WP4          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Erweiterung der Versuchsaufbaus für tomographische Farbtracerversuche</li> <li>Auswertung und Inversion von tomographischen Salz- und Wärmetracerversuchen</li> <li>Erstellen des Abschlussberichtes und Ausarbeitung von Manuskripten zur Publikation</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

#### 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn

Da die stationäre Grundwasserströmungsgleichung der Poisson-Gleichung entspricht, können Untersuchungs- und Inversionsmethoden der Gleichstromgeoelektrik auf hydraulische Versuche übertragen werden, sog. Hydraulische Tomographie (Gottlieb and Dietrich 1995; Butler et al. 1999; Yeh and Liu 2000; Bohling et al. 2002; Brauchler et al. 2013b; Straface et al. 2007; Li et al. 2007; Li et al. 2008; Fienen et al. 2008). Hierbei werden Piezometerhöhen oder Bodenluftdrücke in Experimenten mit einer tomographischen Anordnung von Anregungs- und Beobachtungspunkten gemessen, um die räumliche Verteilung der Durchlässigkeit zu ermitteln. Echte Experimente wurden vornehmlich im Labor durchgeführt, wohingegen Feldanwendungen rar sind (Liu et al. 2002; Liu et al.

2007; Illman et al. 2007; Straface et al. 2007). Die Datensätze werden mit tomographischen Methoden ausgewertet, die denjenigen anderer potentiometrischer Methoden ähneln.

Bislang überwogen Versuche mit stationärer Strömung und erst in letzter Zeit wurde die Methode auf nichtstationäre Bedingungen erweitert (Zhu and Yeh 2005; Liu et al. 2007; Kuhlman et al. 2008), jedoch kaum in Feldversuchen. Die tomographische Auswertung nichtstationärer Pumpversuche ermöglicht es, die Verteilung des Speicherkoeffizienten zu ermitteln. Hierzu wurden Absenkungszeitreihen invertiert (Zhu and Yeh 2005), ihre zeitlichen Momente betrachtet (Li et al. 2005; Li et al. 2007; Zhu and Yeh 2006) oder Fließzeitinversionsmethoden analog zu seismischen Anwendungen verwendet (Vasco and Datta-Gupta 1999; Vasco et al. 2000; Datta-Gupta et al. 2001; Vasco and Finsterle 2004; Brauchler et al. 2003; Kulkarni and Datta-Gupta 2000).

In der Methode der Tracertomographie werden Tracerlösungen in den Untergrund eingebracht und Durchbruchkurven in Entnahmebrunnen erfasst. Diese Durchbruchkurven werden in Analogie zur Inversion seismischer Signale invertiert (Vasco and Datta-Gupta 1999; Datta-Gupta et al. 2002), Zhu und Yeh (2009) betrachteten volle Durchbruchkurven. Für die Inversion nicht-tomographischer Tracerversuche mit vielen Beobachtungspunkten können die zeitlichen Momente der Durchbruchkurven als komprimierte Daten verwendet werden (Harvey and Gorelick 1995; Ezzedine and Rubin 1996; James et al. 2000; Cirpka and Nowak 2003; Nowak and Cirpka 2006b). Die Inversion mittlerer Durchbruchzeiten anstelle ganzer Durchbruchkurven verringert den Rechenaufwand und erhöht die Stabilität des Verfahrens.

Eine echt tomographische Durchführung von Tracerversuchen, bei der nacheinander verschiedene Tests unter Verwendung unterschiedlicher Zugabebrunnen durchgeführt werden, fand im Feld jedoch noch nicht statt, weil in den seltensten Fällen eine vollständige Rückgewinnung des Tracers gewährleistet ist und die verbleibende Restmasse das nächste Experiment stören würde. Die Verwendung von Wärme als Tracer (Zugabe von erwärmten oder abgekühltem Wasser) könnte dieses Problem verringern (Anderson 2005; Wagner et al. 2013), wurde jedoch ebenfalls noch nicht als tomographische Feldmethode eingesetzt.

Die genannten Verfahren setzen hydraulische Beobachtungsmethoden voraus. Dies erfordert die Installation von Beobachtungsrohren, was erhebliche Kosten verursacht und zu einer Störung des Untergrundes führt. Nichtintrusive geophysikalische tomographische Beobachtungsmethoden bieten sich an, um die Veränderung geophysikalischer Untergrundeigenschaften in Folge eines hydraulischen Experimentes zu erfassen. Hierbei spielt die felderprobte geoelektrische Tomographie (ERT) als Monitoringmethode für Salztracerversuche eine besondere Rolle (Binley et al. 1996; Slater et al. 2000; Binley et al. 2002; Kemna et al. 2002; Vanderborght et al. 2005; Singha and Gorelick 2005). Das normale Vorgehen besteht darin, die geoelektrischen Signale mit üblichen Inversionsverfahren in Bilder der elektrischen Leitfähigkeit zu überführen und diese anschließend hydraulisch zu interpretieren. Die Entkopplung der geoelektrischen Inversion von der hydraulischen Interpretation kann physikalisch unmögliche Ergebnisse verursachen, z.B. einen Verlust an Tracermasse (Singha and Gorelick 2005). Deshalb wird in letzter Zeit nach Methoden der voll gekoppelten Inversion des hydraulisch-geoelektrischen Systems gesucht. Pollock and Cirpka (2008) schlagen vor, die zeitlichen Momente der elektrischen Signale aus dem geoelektrischen Monitoring eines Salztracerversuches zu invertieren. Insbesondere stellen sie Momenten generierende



Gleichungen auf, die eine effiziente Simulation dieser Messungen und die Berechnung ihrer Sensitivität bezüglich der hydraulischen Leitfähigkeit ermöglicht. Die Methode wurde in der Arbeitsgruppe Cirpka in einen zweidimensionalen Inversionscode auf der Grundlage des quasilinearen geostatistischen Ansatzes (Kitanidis 1995) integriert und anhand virtueller Tracertests überprüft.

Slater (2007) sowie Rubin and Hubbard (2005) geben einen Überblick über hydrogeophysikalische Methoden, in denen elektrische, magnetische, elektromagnetische oder seismische Eigenschaften des Untergrundes tomographisch ermittelt werden und anschließend hydraulische Aussagen über petrophysikalische Beziehungen abgeleitet werden. Leider sind die petrophysikalischen Beziehungen häufig standortspezifisch und nicht eindeutig. Paasche et al. (2006) und Paasche and Tronicke (2007) verwenden deshalb mehrere Untersuchungsmethoden ausschließlich, um die Fazieszonierung des oberflächennahen Untergrundes zu ermitteln, die eventuell einer hydraulischen Zonierung entspricht. Um tatsächlich hydraulische Eigenschaften zu ermitteln, müssen jedoch hydraulische Tests durchgeführt und ausgewertet werden.

Die geostatistische Beschreibung des Untergrundes ermöglicht die Erfassung der Untergrundvariabilität ohne harte Zuweisungen von Zonen, Blöcken oder Schichten. Die Parameter werden als räumliche, autokorrelierte Zufallsvariablen betrachtet. In der Inversion beschränkt sich das a-priori-Wissen auf die Kovarianzfunktion der Parameter (Hoeksema and Kitanidis 1984; Kitanidis 1995; Ramirez et al. 1993; Yeh et al. 1996; McLaughlin et al. 1993; Gómez-Hernández et al. 1997; Zimmerman et al. 1998), deren Koeffizienten aus den Messungen abgeleitet werden können (Hoeksema and Kitanidis 1984; Kitanidis 1995; Nowak and Cirpka 2006b; Hernandez et al. 2006). In der geostatistischen Inversion werden kontinuierliche Raumfunktionen der unabhängigen Parameter (z.B. der hydraulischen Leitfähigkeit) aus Messungen abhängiger Größen (z.B. der Piezometerhöhe) abgeleitet. Die Berücksichtigung der Kovarianzfunktion wirkt als Regularisierung. Die Effizienz der Inversion wird durch (1) die Verwendung von Matrixidentitäten, die die Anzahl der Unbekannten reduzieren, (2) die Berechnung der Sensitivitäten durch adjungierte Methoden (Sykes et al. 1985; Sun and Yeh 1990), (3) die periodische Einbettung und Verwendung spektraler Methoden zur Berechnung von Kreuzkovarianzen (Dietrich and Newsam 1993; Nowak et al. 2003), die Formulierung des inversen Problems mit Aggregaten der Daten wie ihrer zeitlichen Momente (Harvey and Gorelick 1995; Ezzedine and Rubin 1996; James et al. 2000; Cirpka and Kitanidis 2000; Li et al. 2005; Nowak and Cirpka 2006a; Pollock and Cirpka 2008) und (5) die Verwendung effizienter numerischer Methoden zur Lösung der Gleichungen erhöht.

Statt ein glattes Schätzfeld der Parameter zu ermitteln, können auch viele Realisationen mit Variabilität auf allen Skalen auf die Messungen konditioniert werden (Hendricks-Franssen et al. 1999; Hendricks-Franssen and Gomez-Hernandez 2002). Dies ist für die Unsicherheitsfortpflanzung nichtlinear abhängiger Größen erforderlich (Hendricks-Franssen et al. 2003; Schwede et al. 2008; Schwede and Cirpka 2009). Der Aufwand für die Konditionierung einer Einzelrealisation ähnelt demjenigen für die direkte Ermittlung des besten Schätzwertes.

In jüngster Zeit wird versucht, Grundwasser-relevante Daten unterschiedlicher Herkunft und Charakteristik (z.B. geophysikalische Messungen, Piezometerhöhen, Messungen der Bodenfeuchte) mit Hilfe von data fusion Methoden zu kombinieren (McKenna and Poeter 1995; Porter et al. 2000;

Liu and Yeh 2004; Linde et al. 2007; Yeh et al. 2008; Sun et al. 2008). Gegenwärtig ist noch nicht klar, welche Methoden am effizientesten sind und den kleinsten systematischen Fehler erzeugen.

### 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Nahezu zeitgleich wurde neben dem hier geförderten Verbundprojekt TOMOME in den USA das Projekt „*Subsurface imaging and uncertainty quantification*“ als Verbundprojekt verschiedener US-amerikanischer Universitäten – unter anderem unter Beteiligung der **Stanford University** (SU) und der **Boise State University** (BSU) – durch die US-amerikanische *National Science Foundation* gefördert. Beide Verbundprojekte zielten komplementär auf die Erfassung und Inversion hydraulischer und hydrogeophysikalischer Daten aus entsprechenden Feldexperimenten ab. Dabei lag in beiden Projekten das Hauptziel in der Entwicklung von Erkundungs- und Inversionsstrategien zur Beschreibung der hydraulischen Eigenschaften von Grundwasserleitern. Basierend auf dieser gemeinsamen Zielstellung wurde ein **Projektbezogener Personenaustausch** (PPP) über den Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) beantragt und genehmigt. Über diesen PPP-Austausch fand ein intensiver Wissensaustausch über regelmäßige Webkonferenzen mit den Partnern des US-amerikanischen Verbundprojektes so wie ein Austausch von Wissenschaftlern (Besuch des Post-Doc an der SU, Besuch des Doktoranden an der BSU, SU und der University of Wisconsin-Madison).

Im Anschluss an den DAAD-finanzierten Austausch wurde die Univ. Tübingen als Kooperationspartner zu dem anwendungsorientierten Projekt „*Hydraulic Tomography and Optimal Management of Plumes*“ eingeladen. Das Projekt wurde von der Stanford University unter Beteiligung mit der Boise State University im Auftrag der Umweltberatungsabteilung des italienischen Konzerns **Syndial S.p.A.** (Gesellschaft der ENI S.p.A-Gruppe) durchgeführt. Ziel des Projektes ist die hochaufgelöste hydraulische Charakterisierung eines ca. 50 m x 50 m großen Areal auf einem kontaminierten Standort in Italien. Hierbei kam die Methode der hydraulischen Tomographie zur Ermittlung der 3D-Durchlässigkeitsverteilung zum Einsatz. Das Arbeitspaket WP4 wurde im Projekt für die Konzeption und Durchführung der Experimente der hydraulischen Tomographie eingebunden. Das Projekt ist die erste (teil)kommerzielle Anwendung der Methode der hydraulischen Tomographie.

Des Weiteren fand ein enger Austausch mit der Fa. **Terra-direct GbR** statt. Gegenstand des Austausches war vor allem die Konzeption von Direct Push-basierten Untersuchungstechniken und Direct Push-Sonden.

## 2 Projektdetails

### 2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

#### 2.1.1 ***Geostatistische Inversion von hydraulischer Tomographie, Wärmetracertomographie und geoelektrischer Tomographie während Salztracerversuchen (Arbeitspaket WP 1)***

Dieses Arbeitspaket wurde hauptverantwortlich durch den im Projekt finanzierten Post-Doc durchgeführt. Ihm standen wissenschaftliche Hilfskräfte zur Seite um routinemäßige Arbeiten wie beispielsweise der routinemäßiger Aufruf von Modellläufen und das Prozessieren von Daten. Das Arbeitspaket WP1 war in die drei Themenbereiche untergliedert, deren Ergebnisse in den nachfolgenden Abschnitten näher erläutert werden. Die Verwendung der gewährten Mittel erfolgte entsprechend den Vorgaben und ist im Abschnitt 2.2 des Endberichtes und im Abschnitt 6b des Erfolgskontrollberichtes im Detail dargestellt.

##### *a) Modellbasierte Auslegung tomographischer Feldexperimente*

Die Auslegung tomographischer Experimente in hydrogeologischen Anwendungen beinhaltet die Untersuchung des Einflusses verschiedener experimenteller Randbedingungen wie beispielsweise die Festlegung von Injektionsraten, die Platzierung von Beobachtungspunkten und die Anordnung von Sonden. Um die erwarteten Messergebnisse vorhersagen zu können, wurde die gesamte Untersuchungskette unter Berücksichtigung der vorhandenen Kenntnisse zum Untersuchungsstandort numerisch modelliert. Die Optimierung der experimentellen Auslegung beruhte dabei auf Variantenstudien und wurde als Grundlage für die Auslegung der Experimente im Arbeitspaket WP 4 verwendet.

Für die Auslegung wurden verschiedene Szenarien für tomographische Untersuchungen am Versuchsstandort Lauswiesen simuliert, um den Einfluss verschiedener Versuchsbedingungen zu untersuchen. Bezüglich der tracer-tomographische Experimente wurde dabei untersucht, welche Wasser- und Tracermengen zu injizieren sind, wo und wie die Injektion stattfinden sollte und wo Messungen durchzuführen sind. Die nachfolgende Tabelle 1 fasst die Untersuchung dieser modellbasierten Auslegung tomographischer Feldexperimente zusammen, Abbildung 1 zeigt Beispiele für den Einfluss verschiedener Versuchsbedingungen auf das zu erwartende Temperaturfeld während Wärmetracerversuchen.

Zusammenfassend lieferten die modellbasierten Untersuchungen zum Einfluss verschiedener experimenteller Randbedingungen und zur Auslegung der verschiedenen tomographischen Feldexperimente wertvolle Hinweise für die Durchführung der Experimentserien selbst. Die Lage der Beobachtungspunkte sowie Injektions- und Extraktionspunkte und andere experimentellen Randbedingungen ließen sich dadurch optimieren und das Konzept zur Durchführung der tomographischen Tracerversuche in einem doppelten Dipolfeld zur Minimierung des Einflusses des Neckars als zeitlich stark variabler Randbedingung entwickeln (vgl. Punkt vi in Tabelle 1).

Tabelle 1. Zusammenfassung möglicher Einflussgrößen auf tomographische Untersuchungen.

| Untersuchungs- bzw. Einflussgröße                                                                                    | Ergebnis                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| i. Einfluss der Grundströmung die Potential- und Tracerverteilung auf die Durchführung von Tracerversuchen           | <p>Ohne Grundströmung wird der gesamte Einflussbereich des Tracerversuchs vom Wärmetracer erfasst bzw. unter stationären Bedingungen erwärmt, was eine Pulsinjektion oder zeitlich limitierte Injektion erforderlich macht.</p> <p>Bei vorhandener Grundströmung hängt das Signal an einem gegebenen Beobachtungspunkt bzw. die Tracerverteilung stark von der Fließrichtung und seiner relativen Lage zum Injektions- und den Beobachtungspunkten ab (Abbildung 1a und b). Dies erfordert eine genaue Erfassung und die Berücksichtigung der natürlichen Grundströmung.</p>                                                                                                        |
| ii. Einfluss der Injektionsrate auf die Tracerverteilung und der Distanz zwischen Injektions- und Extraktionsbrunnen | <p>Für größere Injektionsraten vergrößert sich der Einflussbereich des Tracerversuches, allerdings zeigen sich stationäre Bedingungen eine Verringerung der räumlichen Auflösung der Tracersignale (Abbildung 1c bis f). Für eine für die Inversion ausreichende vertikale Auflösung der Tracersignale (in diesem Fall der Temperaturverteilung) ist die Injektionsrate zwischen den beiden Vorgaben eines größtmöglichen Einflussbereiches (erfordert große Injektionsraten) und einer hohen räumlichen Auflösung (erfordert geringe Injektionsraten) zu wählen. Für die experimentellen Untersuchungen wurden abschließend Raten zwischen 1 und 3 l/s als geeignet angesehen.</p> |
| iii. Lage des Injektions- und der Beobachtungspunkte                                                                 | <p>Die Simulationen zeigten, dass bei vorhandener Grundströmung die Lage des Injektionspunktes direkt stromaufwärts vom Extraktionspunkt liegen sollte. Des Weiteren zeigt die Injektion in einen teilverfilterten Brunnen eine höhere räumliche Auflösung der Tracerverteilung im Vergleich zu einem vollständigen, d.h. vollverfilterten Brunnen (Abbildung 1g und h). Bei vorhandener Grundströmung sollte die Beobachtung des Tracersdurchgangs idealerweise in Strömungsrichtung erfolgen. Es zeigte sich außerdem, dass bei großen Injektionsraten die Messungen der Tracerankunftszeiten (erstes zeitliches Moment) am Aussage kräftigsten waren</p>                         |
| iv. Einfluss zeitlich veränderlicher Randbedingungen                                                                 | <p>Für tomographische Untersuchungen können zeitlich veränderlicher Randbedingungen vernachlässigt werden, für den Fall, dass der hydraulische Rand weit vom Untersuchungsbereich entfernt ist oder der Testzeitraum kurz genug ist. Für das gegebene Untersuchungsfeld zeigte sich in den Simulationen, dass im Bereich von 20 m vom hydraulischen Rand für eine Versuchsdauer von &gt; 15 Stunden mit einem signifikanten Einfluss zu rechnen ist.</p> <div data-bbox="507 1630 1340 1960"> </div>                                                                                                                                                                                |

|                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>v. Einfluss der Injektionsrate und –dauer auf die Form und zeitliche Verteilung des Tracerdurchbruches</p> | <p>Für eine kurze Injektionsdauer ist mit weniger ausgeprägten Tracerdurchbruchskurven zu rechnen, was unter Feldbedingungen zu schwachen bzw. schlecht detektierbaren Tracerdurchbrüchen führen kann. Eine lange Injektionsdauer führt zwar zu besser detektierbaren Signalen, hat aber zur Konsequenz, dass die Versuchsdauern deutlich zunehmen können und unter Feldbedingungen ggf. eine vollständige Tracerrückgewinnung nicht erreicht werden kann. Analog hierzu sind hohe Injektionsraten vor geringen zu bevorzugen, allerdings besteht die Gefahr – wie oben diskutiert – dass hohe Injektionsraten zu einer schlechteren räumlichen Auflösung der Tracerverteilung führen können.</p> <div data-bbox="906 208 1385 925"> <p>a) <math>Q = 3 \text{ l/s}</math></p> <p>b) <math>Q = 10 \text{ l/s}</math></p> </div>                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <p>vi. Minimierung des Einflusses von hydraulischen Randbedingungen</p>                                       | <p>Um den Einfluss zeitlich veränderlicher Randbedingungen zu minimieren, wurde weiter untersucht, ob die Anlage der tomographischen Tracerexperimente mittels eines doppelten Dipolfeldes entsprechende Effekte verhindern können. Wie die nebenstehende Abbildung zeigt, wird dabei ein äußeres Dipol-Fließfeld über einen Injektionsbrunnen (IB) und Extraktionsbrunnen (EB) etabliert und der eigentliche Versuch zwischen diesen Injektions- und Extraktionsbrunnen mit einem weiteren Dipolfließfeld durchgeführt.</p> <p>Weitere Simulationen haben ebenfalls gezeigt, dass durch diese Anordnung nicht nur zeitlich veränderliche Randbedingungen vernachlässigbar werden, sondern dass auch ein Einfluss der Grundströmung auf die tomographischen Versuche ausgeschlossen werden kann. Für alle weiteren Arbeiten wurde daher dieses Konzept des doppelten Dipol-Feld zugrunde gelegt. Eine ausführliche Diskussion dieses Untersuchungskonzeptes findet sich in Schwede et al. (2014) und ist der Anlage dem Erfolgskontrollbericht beigelegt.</p> <div data-bbox="802 1451 1401 1915"> </div> |

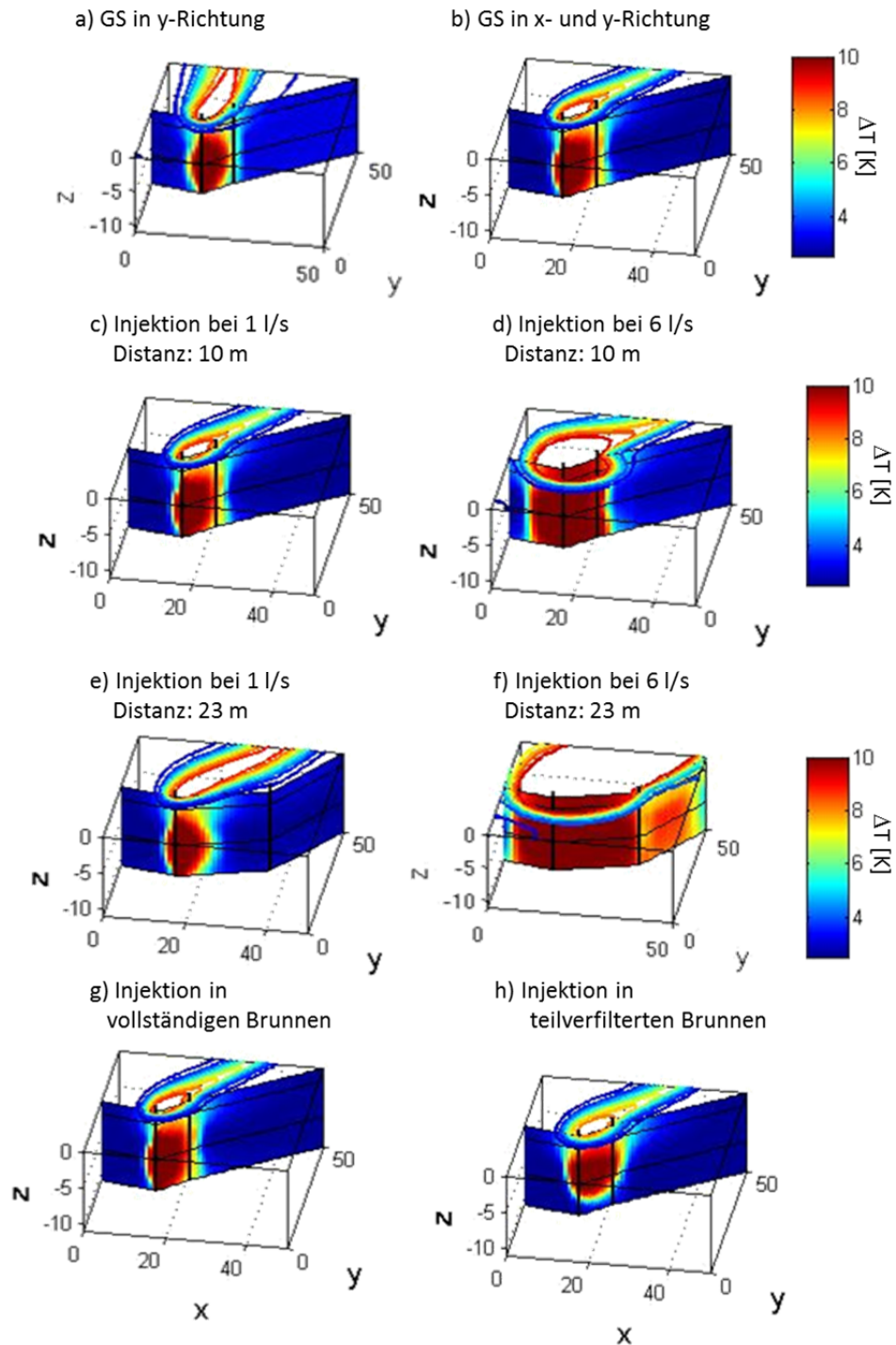


Abbildung 1. Einfluss der verschiedenen Versuchsparameter auf die Temperaturverteilung während eines tomographischen Wärmetracerversuches – Einfluss der Richtung der Grundströmung: a) Grundströmung nur in y-Richtung, b) Grundströmung mit x- und y-Komponenten. Einfluss der Injektionsrate und der Lage des Injektions- und der Beobachtungsorte (c bis f). Einfluss von voll- und teilverfilterten Brunnen (g und h).

*b) Inversion von Daten aus tomographischen Untersuchungen*

Eines der Hauptziele im Arbeitspaket WP1 war die Weiterentwicklung und Anwendung von parallelen Codes für die gekoppelte Inversion von tomographischen Tracerversuchen insbesondere bei der Verwendung von Wärme als Tracer. Daher wurde in diesem Zusammenhang der DUNE-basierte Inversionscode dahin gehend erweitert, dass zeitliche Momente von tracertomographischen Experimenten zur Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit verwendet werden können. Teile der Code-Erweiterungen fanden in enger Kooperation mit dem Arbeitspaket WP2 der Arbeitsgruppe „Paralleles Rechnen“ an der Universität Heidelberg statt.

Hierzu wurde das im Arbeitspaket verwendete geostatistische Inversionsschema über zwei Ebenen parallelisiert: Iterativ wird dabei die jeweils aktuelle Parameterschätzung verwendet, um das Ergebnis des Vorwärtsmodells gegen die Messdaten zu evaluieren. Es zeigte sich, dass der schnellste Weg zur Lösung des Vorwärtsproblems durch eine Zerlegung des Modellgebietes und Verteilung auf die verfügbaren Prozessoren erreicht werden kann. Die vollständige Lösung des Vorwärtsmodells ist allerdings auch für die Evaluierung bzw. Berechnung der Sensitivitätsverteilung erforderlich, die für die Inversion der Messdaten benötigt wird. Dies erfordert die Lösung des adjungierten Gleichungssystems für jede Einzelmessung, was unabhängig von der Lösung des Vorwärtsproblems erfolgt. Für die Lösung des adjungierten Problems wurde ein Algorithmus entwickelt bei dem alle verfügbaren Prozessoren in Gruppen mit mehreren Prozessoren verteilt werden. Jede Prozessorengruppe berechnet dann das adjungierte Problem unter Verwendung von Bereichszerlegung und die Sensitivitäten für jede Messung. Parallele Matrix-Vektor-Multiplikation ist weiterhin für die Aktualisierung der Parameterwerte erforderlich. Die vollständige und detaillierte Beschreibung der Implementierung der Parallelisierung des geostatistischen Inversionsschemas für die vollgekoppelte Inversion von tomographischen Versuchsdaten ist in Schwede et al. (2012) beschrieben und dem Anhang des Erfolgskontrollberichtes beigelegt.

Das Inversionsschema wurde mit einem synthetischen Parameterfeld der hydraulischen Leitfähigkeit Feld getestet (Abbildung 2), aus dem jeweils an 36 Stelle Werte der hydraulischen Durchlässigkeit sowie Werte des hydraulischen Potentials als Messdaten unter Einbeziehung eines theoretischen Messfehlers für die Inversion herangezogen wurden. Es zeigte sich, dass eine höhere Recheneffizienz bei gegebener Anzahl an Prozessoren erzielt werden kann, wenn die Sensitivitäten parallel (Anzahl an Prozessorengruppe  $q > 1$ ) berechnet werden, wobei die Rechenzeit um bis zur Hälfte reduziert werden kann. Unabhängig vom Grad der Parallelisierung, führten alle Inversionsrechnungen zu den gleichen Parameterschätzungen. Der Vergleich zwischen wahren und invertiertem Parameterfeld (Abbildung 2) zeigt, dass die Hauptmuster von Bereichen mit hoher und geringer Durchlässigkeit in der Inversion deutlich reproduziert werden konnte. Obwohl hier nur die Inversion von hydraulischem Potential gezeigt ist, konnte der Inversionsalgorithmus in gleicher Weise erfolgreich für die Inversion von tomographischen Tracerversuchen und die Inversion hydrogeophysikalischer Experimente, wie Salztracerversuche mit geoelektrischem Monitoring erweitert und parallelisiert werden.

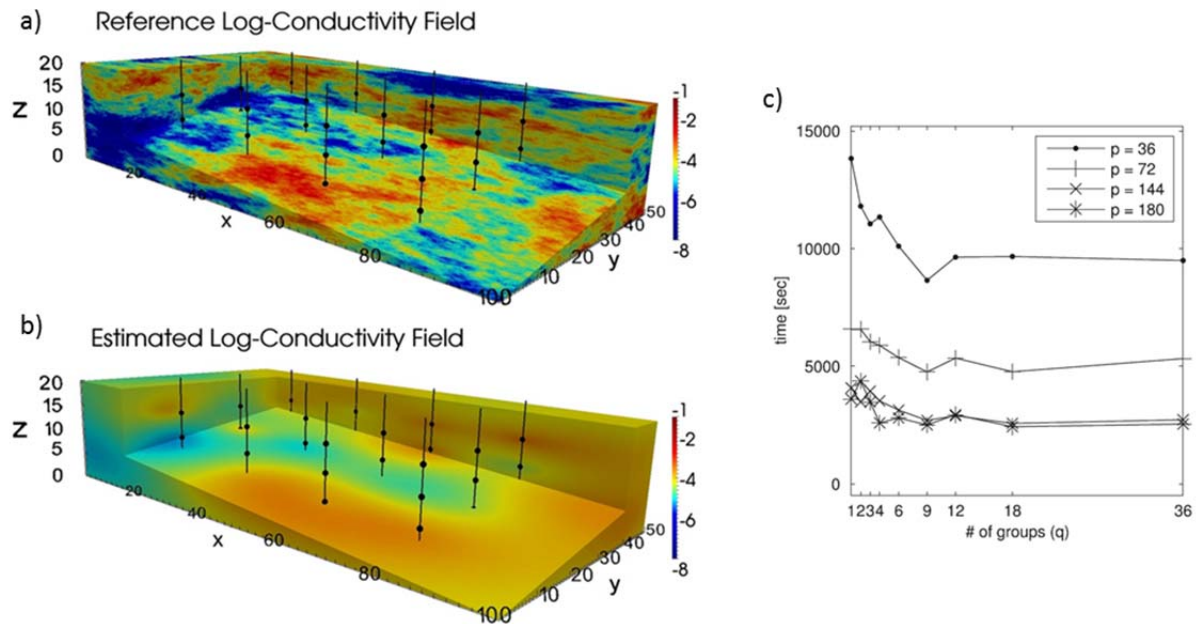


Abbildung 2. Synthetischer Test mit "wahrem" (a) und invertiertem Feld der hydraulischen Durchlässigkeit (b) als  $[\log K \text{ in m/s}]$ . Die schwarzen Linien verdeutlichen die Lage der Beobachtungsmessstellen, die schwarzen Punkte die Lage der Messpunkte. Rechenzeit für eine vollständige Inversion (c) mit dem über zwei Ebenen parallelisierten quasi-linearen geostatistischen Inversionsansatz ( $p$  = Anzahl der Prozessoren,  $q$  = Anzahl der Prozessorgruppen) – aus Schwede et al. (2012).

Des Weiteren wurden verschiedene andere Inversionsansätze für Daten aus hydraulischer Tomographie und Salztracerversuchen mit tomographischem geoelektrischem Monitoring entwickelt:

- Isabaev (2013) verwendete die sog. „Pilot-Point“-Methode für die Inversion von Feldversuchsdaten von Klein (2011) vom Standort Lauswiesen für die Ermittlung der dreidimensionalen Durchlässigkeitsverteilung (Abbildung 3). Die Verwendbarkeit der Pilot-Point-Methode konnte in dieser Arbeit gezeigt werden.
- Die Pilot-Point-Methode wurde von Sacher-Leon (2013) aufgegriffen, der basierend auf einem detaillierten Standortmodell unter Verwendung von *HydroGeoSphere* mittels der Pilot-Point-Methode Feldversuchsdaten für die Ermittlung der dreidimensionalen Durchlässigkeitsverteilung invertierte (Abbildung 4). Auf Grundlage der resultierenden Parameterverteilung führte er Prognoserechnungen zum Transportverhalten im Grundwasserleiter am Standort Lauswiesen basierend auf einem Tracerversuch durch. Weitere Details dieser Arbeit können dem Manuskriptentwurf Sacher-Leon et al. (im Entwurf) entnommen werden, der dem Anhang des Erfolgskontrollberichtes beigelegt ist.
- Wang (2012) entwickelte eine Methode zur Inversion von Salztracerversuchen mit geoelektrischem Monitoring unter Verwendung von Ensemble Kalman Filter (EnKF). Basierend auf einem Salztracerversuch im Labormaßstab konnte er die Anwendbarkeit von EnKF für die Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeitsverteilung basierend auf dem geoelektrischen Monitoring während eines Salztracerversuches zeigen (Abbildung 5).



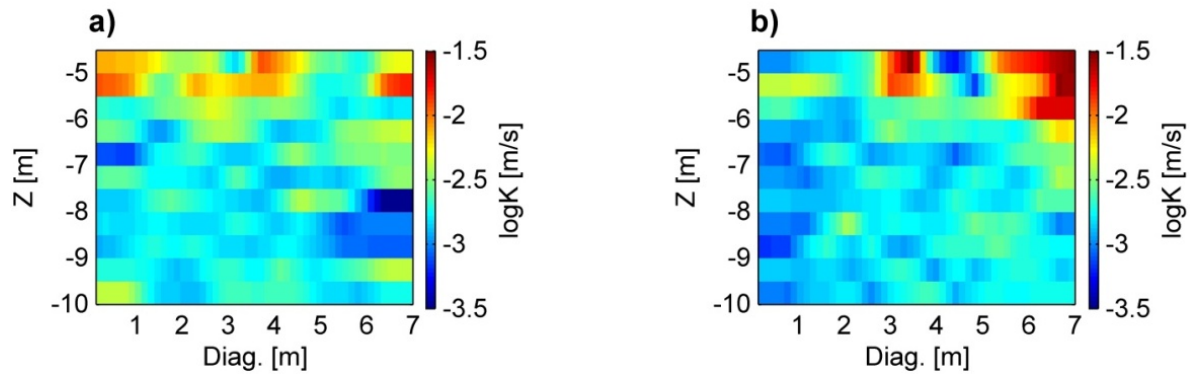


Abbildung 3. Vertikalschnitte der hydraulischen Durchlässigkeit als Diagonalschnitte durch das numerische Strömungsmodell aus Isabaev (2013) basierend auf Experimentdaten von Klein (2011). Beide Profile zeigen den generellen Trend von höheren Durchlässigkeiten im oberen Bereich des Grundwasserleiters und geringeren Werten im unteren Bereich des Grundwasserleiters. Diese Zweiteilung ließ sich durch verschiedene unabhängige Experimente bestätigen und wurde durch Lessoff et al. (2010) für den Versuchstandort Lauswiesen im Detail beschrieben.

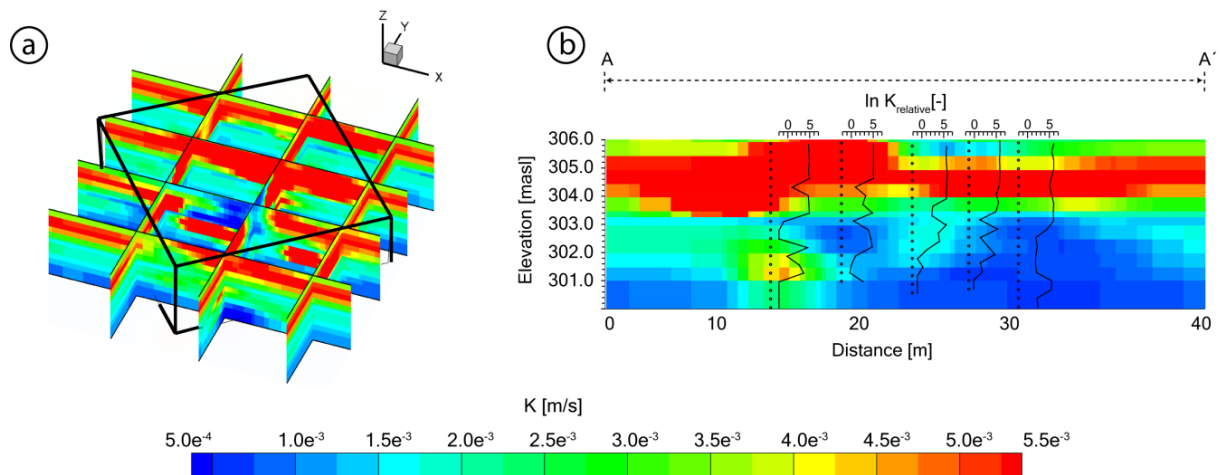


Abbildung 4. Ergebnis der Inversion von Daten der hydraulischen Tomographie am Feldversuchsstandort Lauswiesen. a) Vertikalschnitte als Zaundiagramm, b) Vergleich von Sondierprofilen der hydraulischen Durchlässigkeit aus Direct-Push-Injection Logging mit dem Inversionsergebnis. Für große Teile lässt sich eine qualitative gute Übereinstimmung von Sondier- und Inversionswerten finden.

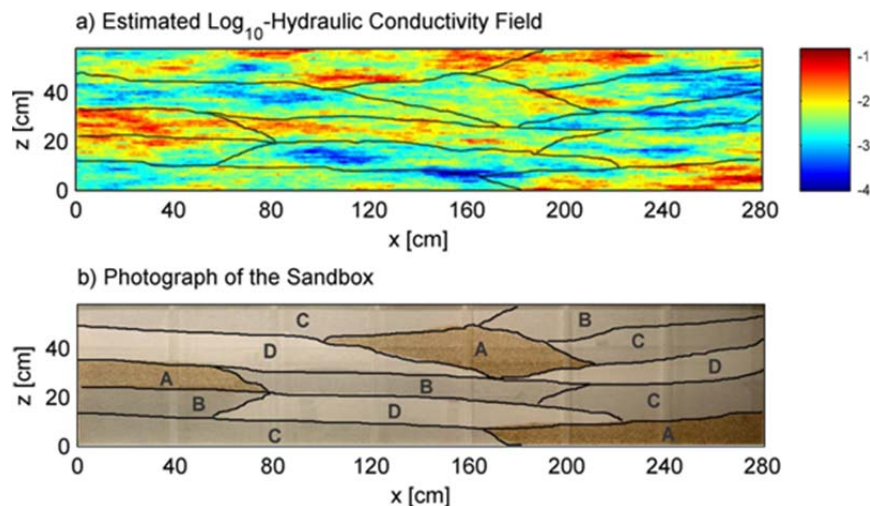


Abbildung 5. a) Räumliche Verteilung der Ensembledittelwerte der hydraulischen Durchlässigkeiten ( $\log_{10}$  im m/s) als Resultat der EnKF-basierten Inversion von tomographischen Salztracerversuchen mit geoelektrischem Monitoring (aus Wang, 2012). b) Photo der Sandbox mit verschiedenen Sedimentmaterialien mit verschiedenen Durchlässigkeiten (von A nach D Abnahme der hydraulischen Durchlässigkeit und Abnahme der mittleren Korngröße).

#### c) Anwendung der Inversionscodes – Synthetische Beispiele und Anwendung auf Felddaten

Die geostatistischen Inversionsmethoden aus diesem Arbeitspaket wurden auf ihre Anwendbarkeit in der Praxis durch die Analyse von synthetischen Daten und Felddaten vom Testfeld Lauswiesen der Universität Tübingen überprüft. Anders als im Antrag vorgesehen, konnten die Inversionscodes nicht auf Datensätze der Boise Hydrogeophysical Research Site angewandt werden. Grundsätzlich sind tomographische Datensätze sehr komplex und umfangreich, weshalb leider mit dem im Projekt zur Verfügung stehenden Mittel von einer Anwendung unserer Inversionscodes auf Datensätze der Boise State University abgesehen werden musste.

Der unter Punkt 2.1.10 beschriebene parallelisierte quasi-lineare geostatistischen Inversionsansatz wurde für verschiedene Teststudien angewandt. So wurde in einer Studie der Wert verschiedener (Mess-)Daten für eine geostatistische Inversion untersucht. Am Beispiel eines synthetischen Referenzfeldes konnte beispielsweise der zusätzliche Informationsgewinn durch die Kombination verschiedener experimenteller Daten gezeigt werden und ist in Schwede et al. (2014 – in der Anlage zum Erfolgskontrollbericht) zusammengefasst. Für diesen Testfall wurde das Konzept des doppelten Dipolfeldes zur Minimierung des Einflusses zeitlich veränderlicher Randbedingungen umgesetzt (vgl. Abschnitt 2.1.1 a - vi). In diesem Ansatz wird warmes Wasser als Tracer in verschiedenen Tiefen in das stationäre Fließfeld injiziert. Im Testfall wurde eine Kombination aus hydraulischer und Tracertomographie für verschiedene Injektions-/Extraktionspaare jeweils parallel und senkrecht zur vorherrschenden Grundwasserfließrichtung umgesetzt. In Abbildung 6 ist das Ergebnis der Inversion für verschiedene Testbedingungen dargestellt: Für die Konfigurationen 1 und 3 wurden für die Inversion nur Daten der hydraulischen Tomographie, für die Konfigurationen 2 und 4 zusätzlich Wärmedurchbruchskurven aus tomographischen Tracerversuchen herangezogen. Für jede Konfiguration wurden ca. 50 mio. Parameter bestimmt. Es zeigte sich einerseits ein verbessertes Auflösungsvermögen (Erhöhung der Varianz) durch die Hinzunahme von tomographischen Tracerdaten zusätzlich zu den Daten der hydraulischen Tomographie und andererseits eine

verbesserte Übereinstimmung zwischen wahren und invertierten Parameterfeldern. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse findet sich in Schwede et al. (2014) und ist dem Bericht im Anhang beigelegt.

Wie im vorangegangenen Abschnitt c) dargestellt, konnte für weitere Versuchsdaten und weitere Inversionsalgorithmen Daten aus tomographischen Untersuchungen invertiert werden:

- Inversion von Daten aus hydraulischer Tomographie unter Verwendung der *Pilot-Point*-Methode durch Isabaev (2013) - Abbildung 3.
- Inversion von Daten aus hydraulischer Tomographie unter Verwendung eines Standortmodells basierend auf *HydroGeoSphere* mit der *Pilot-Point*-Methode durch Sachez-Leon (2013) - Abbildung 4.
- Vollgekoppelte Inversion hydrogeophysikalischer Daten unter Verwendung von Ensemble Kalman-Filtern durch Wang (2012) - Abbildung 5.
- Abdrakhimova (2013) wandte den DUNE-basierten quasi-linearen geostatistischen Inversionsansatz sowie einen parallelisierten Inversionsansatz basierend auf Ensemble Kalman Filter auf kombinierte, tomographische Datensätze an. In der Arbeit konnte sie zeigen, dass sich mit der parallelisierten Inversion basierend auf Ensemble-Kalman-Filter die Recheneffizienz vor allem für sehr große Parameterfelder erheblich steigern lässt. Auch konnte sie zeigen, dass vor allem die gekoppelte Inversion verschiedener Datenarten zu einer deutlichen Verbesserung der Inversionsergebnisse führt.

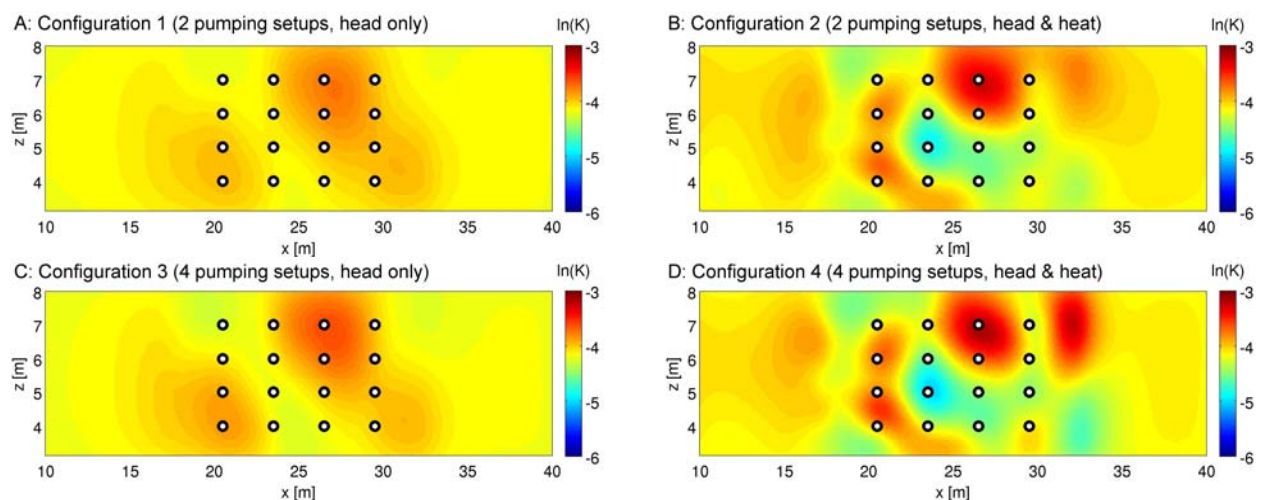


Abbildung 6. Vertikalschnitte der invertierten Felder der hydraulischen Durchlässigkeit für verschiedene Messkonfigurationen und Datensätze: a) für Daten aus hydraulischer Tomographie mit je 2 Injektions-/Extraktionsbrunnen, b) für Daten aus hydraulischer und Wärmetracertomographie mit je 2 Injektions-/Extraktionsbrunnen, c) für Daten aus hydraulischer Tomographie mit je 4 Injektions-/Extraktionsbrunnen, d) für Daten aus hydraulischer und Wärmetracertomographie mit je 4 Injektions-/Extraktionsbrunnen. Aus Schwede et al. (2014).

d) *Zusammenfassung der Arbeiten im Arbeitspaket WP1 „Geostatistische Inversion von hydraulischer Tomographie, Wärmetracertomographie und geoelektrischer Tomographie während Salztracerversuchen“*

Im Arbeitspaket WP1 wurde ein geostatistischer Inversionsalgorithmus basierend auf der DUNE-Plattform zur parallelen Berechnung von partiellen Differentialgleichungen erfolgreich für die Anwendung auf hydrogeologische, tomographische Feldversuche erweitert. Der Algorithmus erlaubt die Inversion von verschiedenen Typen an Felddaten, die während tomographischer hydrogeologischer bzw. hydrogeophysikalischer Experimente (hydraulische Tomographie, Wärmetracertomographie und Salztracerversuche mit tomographischem geoelektrischem Monitoring) gewonnen werden. Im Arbeitspaket WP1 konnte die Recheneffizienz des Inversionsalgorithmus und Anwendbarkeit des geostatistischen Inversionscodes auf parallelen Rechenclustern gezeigt werden. Mit diesem Schritt konnte der für Laborversuche mit zweidimensionalen Strömungsfeldern entwickelte Code auf die Feldskala mit dreidimensionalen Strömungsfeldern erweitert werden, um die Methode auch außerhalb des akademischen Bereichs für Anwendungen in der Praxis nutzbar zu machen. Weitere Inversionscodes basierend auf i) Ensemble-Kalman-Filtern unter Verwendung von zeitlichen Momenten aus transienten Versuchsdaten (Potentialverteilungen und Transportdaten) und ii) der sog. Pilot-Point-Methode wurden ebenfalls im Teilprojekt weiter entwickelt.

Die im Arbeitspaket WP1 entwickelten Codes wurden an realen Teststudien und teilweise auf Feldversuchsdaten angewandt. Hierbei konnte generell der Nutzen von kombinierten tomographischen Methoden für die hydrogeologische Anwendung gezeigt werden. Darüber hinaus zeigen die Studien im WP1, dass der Informationsgehalt verschiedener hydrogeologischer Datentypen (z.B. Potentialverteilungen erweitert um Transportinformationen) verbesserte Inversionsergebnisse für die Bestimmung der dreidimensionalen Durchlässigkeitsverteilung von Grundwasserleitern ergeben.

### **2.1.2 Feldversuche zu gekoppelten hydraulischen tomographischen Methoden in einem alluvialen Grundwasserleiter (Arbeitspaket WP 4)**

Dieses Arbeitspaket wurde hauptverantwortlich durch den im Projekt finanzierten Doktoranden bearbeitet. Ihm standen technische Mitarbeiter und wissenschaftliche Hilfskräfte zur Seite für die technische Umsetzung der tomographischen Experimente bzw. für die routinemäßige Durchführung der Feldexperimente. Das Arbeitspaket WP4 war in die fünf Themenbereiche untergliedert, deren Ergebnisse in den nachfolgenden Abschnitten näher erläutert werden. Die Verwendung der gewährten Mittel erfolgte entsprechend den Vorgaben und ist im Abschnitt 2.2 des Endberichtes und in Abschnitt 6b des Erfolgskontrollberichtes im Detail dargestellt.

#### *a) Zusammenstellung bestehender Datensätze*

Grundlegend für das Gesamtprojekt war die Zusammenfassung bereits existierender Daten von Feldexperimenten und tomographischen Untersuchungen, die bereits am hydrogeologischen Versuchsfeld Lauswiesen der Universität Tübingen durchgeführt wurden. Es wurden Datensätze aus verschiedenen Quellen gesichtet und zusammengestellt und in einer Datenbank und einem ArcGIS-Projekt für die weitere Nutzung im Projekt überführt. Hierzu wurden eine große Anzahl an Studienarbeiten, Berichten, Diplom- und Masterarbeiten sowie Publikationen zusammengefasst und ausgewertet, die sich mit Studien zur räumlichen Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeit und von Transportparametern, geoelektrischen, seismischen und elektromagnetischen Verfahren zur Standortcharakterisierung sowie hydrogeophysikalische Untersuchungen beschäftigten (Röschke 1996; Dietrich und Teutsch 1998; Mourad 1998; Patton 2001; Riva et al. 2006; Sack-Kühner 1996; Schneidewind 2008; Riva et al. 2008; Wagner et al. 2014; Li 2008; Hoffmann and Dietrich 2004; Pedretti and Fiori 2013; Perulero Serrano et al. 2014; Rein et al. 2004; Panzeri et al. 2014; Renard et al. 2005; Franssen et al. 2005; Handel and Dietrich 2012; Alfa 2003; Hoffmann 2013; Hyba 2013).

In diesem Arbeitspaket wurden des Weiteren zusätzliche, grundlegende Untersuchungen zum Standort selbst und zur Aussagefähigkeit verschiedener Untersuchungstechniken durchgeführt. Haas (2011) und Wolf (2012) untersuchten hierfür den Einfluss des nahe am Testfeld liegenden Neckars. Es zeigte sich, dass bei stärkeren Hochwasserereignissen sich der Einfluss des Neckars durch eine starke Änderung der Grundwasserfließrichtungen, die Ausbreitung von Temperatursignalen und die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit des Grundwassers sich signifikant auf die Durchführung von Experimenten auswirken können (Haas 2011). Zudem untersuchte Stark (2012) den hydraulischen Zustand der vorhandenen Brunnen, was bei schlechter Anbindung zwischen Brunnen und Grundwasserleiter bei der Datenauswertung zu berücksichtigen ist. Strasser (2011), Gutierrez-Cirlos (2012) und Harbarth (2012) widmeten sich einerseits der Untersuchung der Durchlässigkeitsverteilung am Standort Lauswiesen für die Generierung von unabhängigen Daten für die Validierung der Inversionen aus WP1 sowie der Aussagefähigkeit und dem Mittelungsvolumen verschiedener hydraulischer Tests (Abbildung 9a).



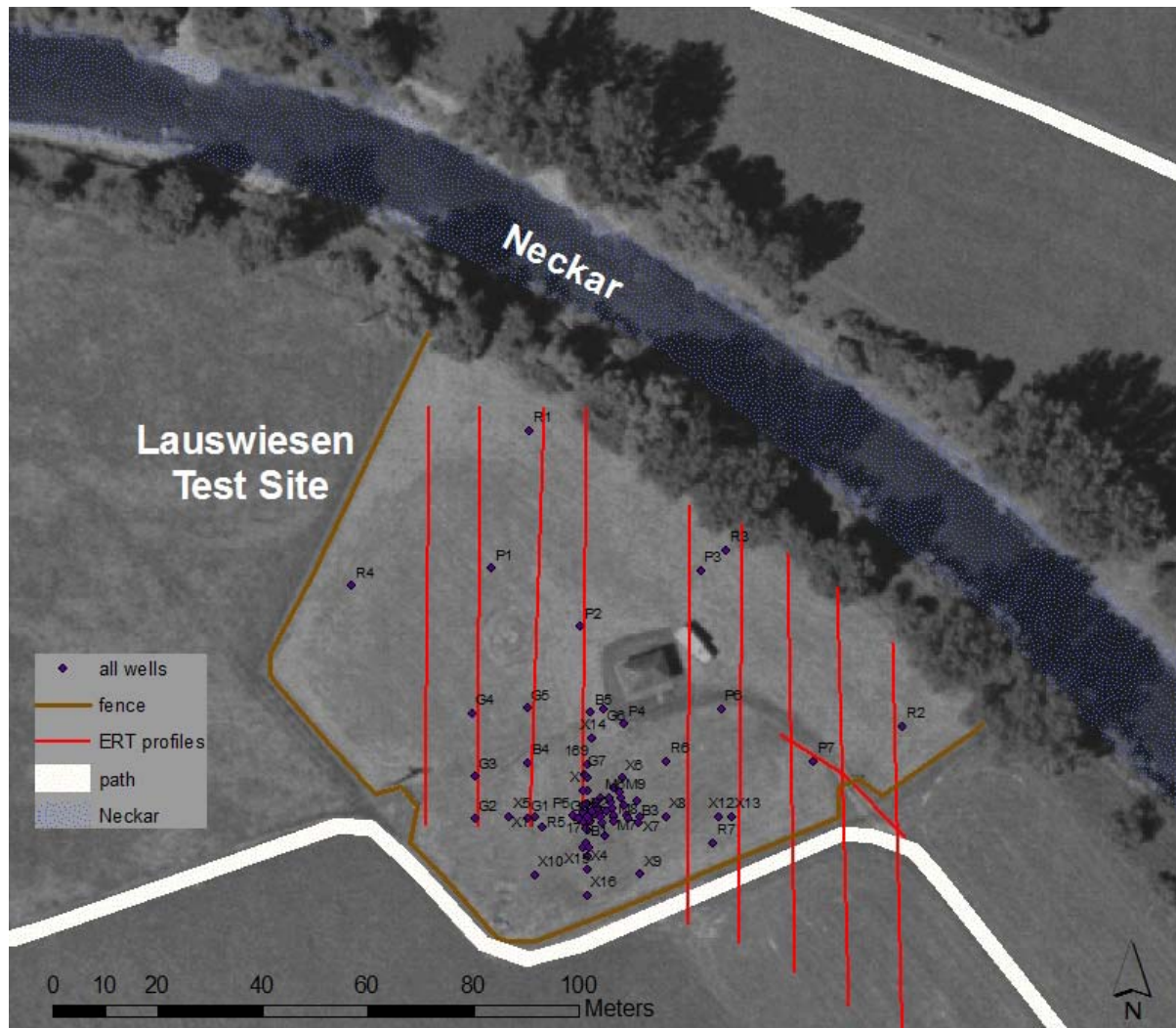


Abbildung 7. Ausschnitt des ArcGIS-Projektes mit der Lage früherer Untersuchungspunkte und durchgeführter geoelektrischer Widerstandskartierungen.

#### b) Hochaufgelöste geohydraulische Charakterisierung

Für die hochaufgelöste geohydraulische Charakterisierung von Grundwasserleitern wurde im Teilprojekte WP4 der Ansatz der hydraulischen Tomographie für instationäre Strömungsbedingungen als Feldmethode weiterentwickelt. Hierzu wurden Versuchsreihen durchgeführt, die in Klein (2011) ausführlich beschrieben sind, bei denen in einem kleinen Ausschnitt des Feldstandortes Lauswiesen instationäre Injektionsversuche in tomographische Anordnung durchgeführt wurden (Abbildung 8). Hierzu kamen verschiedene Messanordnungen (2D- und 3D-tomographisch) zur Anwendung. Die Stimulation des Grundwasserleiters fand durch eine abschnittsweise Wasserinjektion in temporären *Direct-Push*-Messstellen statt. Die Potentialänderung wurde in 2“-Messstellen in verschiedenen hydraulischen getrennten Intervallen aufgezeichnet. Dabei kam ein speziell für die Versuche in WP4 konfektioniertes Packersystem zum Einsatz, mit dem sich sechs Horizonte hydraulisch von einander trennen lassen (Abbildung 8c). Die Versuche wurden in der Arbeit von Isabaev (2013) gemeinsam mit WP1 mittels einer *Pilot-Point*-basierten Inversion der Messdaten basierend auf einem numerischen Grundwasserströmungsmodells ausgewertet (Abbildung 3).

Bei der Arbeit von Klein (2011) zeigte sich, dass die *Direct-Push*-Methode (Dietrich and Leven 2006; Leven et al. 2011) für die experimentelle Durchführung von Versuchen in tomographischer Anordnung besonders praxistauglich ist, wobei der größte Vorteil in der adaptiven Errichtung von Stimulations- bzw. Beobachtungspunkten liegt (Abbildung 8a).

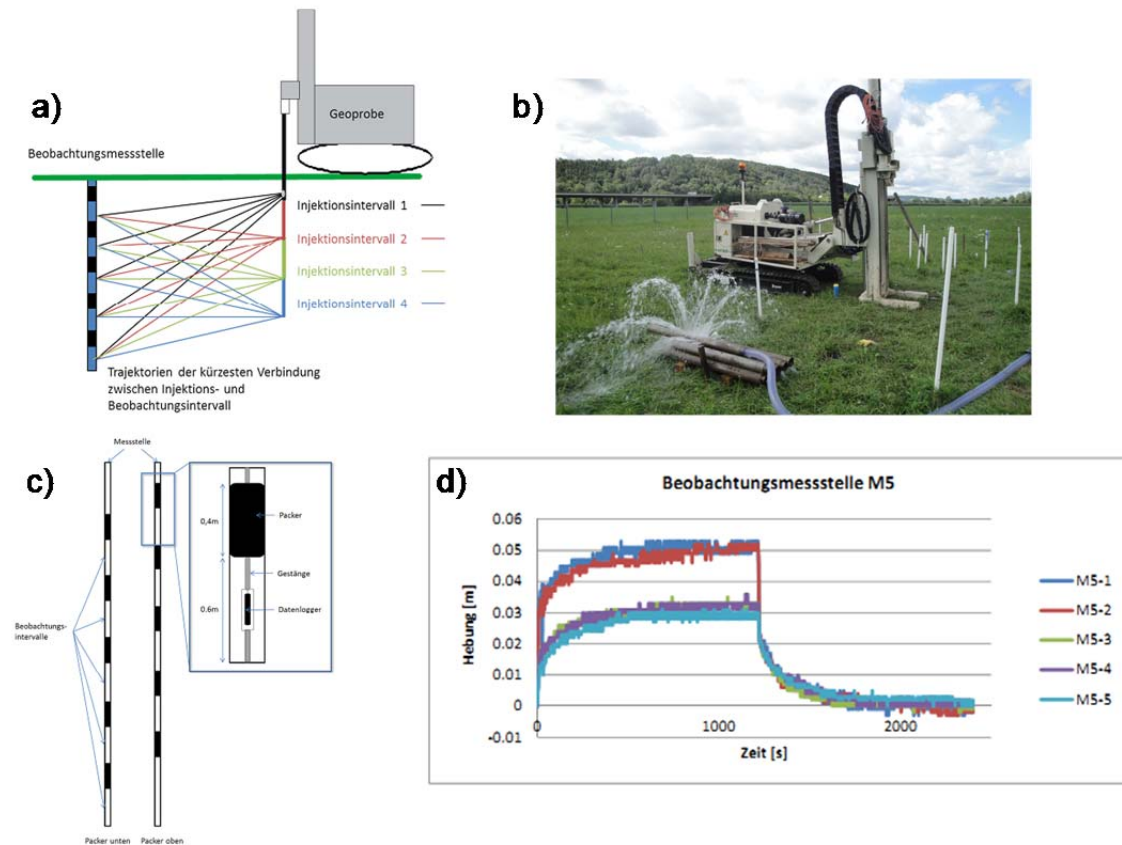


Abbildung 8. a) Skizze des Versuchsaufbaus für die Durchführung der hydraulischen Tomographie mittels Direct-Push-Injektionslanze. b) Das Bild vom Versuchsstandort zeigt vor dem Direct-Push-Gerät liegend die Injektionslanze. c) Skizze des Packersystems für die Beobachtungsmessstellen. d) Beispiel eines Datensatzes der instationären hydraulischen Tomographie für die Messstelle M5.

Sanchez-Leon (2013) erweiterte den Ansatz von Klein (2011) um den Einsatz von Mehrkanalmessstellen und die Verwendung eines faseroptischen Druckmesssystems. In diesem Zusammenhang untersuchte Beck (2013) den optimalen Einsatz von Mehrkanalmessstellen für die Verwendung bei hydraulischer Tomographie und entwickelte dabei eine Messstellenerweiterung, mit der sich in einer Messstelle in bis zu 13 hydraulisch getrennten Einzelintervallen die Druckverteilung aufzeichnen lässt (Abbildung 9b). Eine detaillierte Beschreibung des faseroptischen Druckmesssystems und zur Durchführung der Versuchsserien zur hydraulischen Tomographie finden sich in Leven et al. (2014) und Sanchez-Leon et al. (2014). Beide Manuskriptentwürfe finden sich im Anhang des Erfolgskontrollberichtes.

Weitere Entwicklungen im Arbeitspaket beschäftigten sich mit der Entwicklung von miniaturisierten Packersystemen, mit denen sich in Kleinstmessstellen (Durchmesser: < 19 mm /  $\frac{3}{4}$  Zoll) tiefenaufgelöst die Potentialverteilung mittels faseroptischer Druckaufnehmer aufzeichnen lässt. Das

Packersystem kommt regelmäßig bei der Durchführung der tomographischen Tracerversuche zum Einsatz. Die Entwicklung wurde erforderlich, da sich zeigte, dass mittels Direct-Push-Technologie für vollintegrierte Sondensysteme, bei denen geoelektrische Elektrodenketten in Kombination mit Temperatursensoren und Ports zur Aufzeichnung der Druckänderungen in einem Sondenstrang verbaut wurden (vgl. Endbericht Teilprojekt WP3 – Terrana Geophysik), nur mit geringen Durchmessern in der erforderlichen Tiefe installierbar waren. Eine ausführliche Darstellung der entwickelten Sonden findet sich im Endbericht Teilprojekt WP3 der Terrana Geophysik.

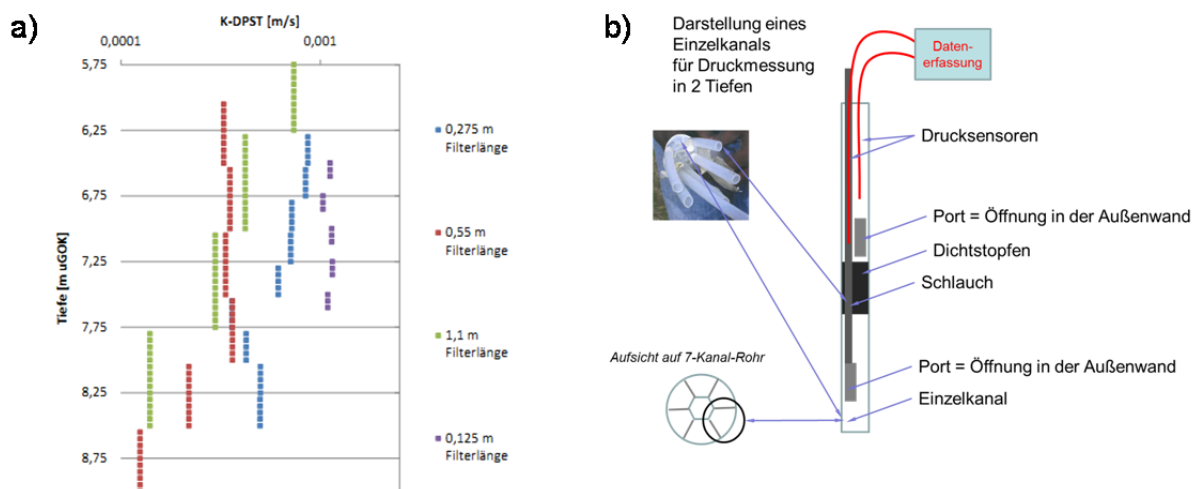


Abbildung 9. a) Vergleich von vertikalen Profilen der hydraulischen Durchlässigkeit für verschiedene Filterlängen bei der Durchführung von Slugtests. b) Entwicklung einer Mehrfachmessstelle mit bis zu 13 hydraulisch getrennten Beobachtungsintervallen. Die Skizze zeigt die Realisierung eines Kanals einer 7-Kanal-Multilevel-Messstelle.

### c) *Entwicklung einer tracertomographischen Methode unter Verwendung von Wärme als Tracer*

In diesem Arbeitspaket fanden Arbeiten zur Entwicklung tracertomographische Experimente statt, bei denen Wärme als Tracer zum Einsatz kam. Vorteil der Verwendung von Wärmetracer ist, dass es möglich ist, wiederholte Tracereperimente in zeitlich dichter Abfolge durchzuführen ohne dass eine Beeinflussung durch vorangegangene Tests erfolgt, da keine Stoffe, wie z.B. Salz oder Farbstoffe in den Grundwasserleiter eingetragen werden müssen. Hierdurch können gleichartige Tests unter verschiedenen Randbedingungen durchgeführt und die Akkumulation künstlicher Tracerkomponenten im Untergrund wird vermieden werden.

Es fanden zahlreiche Kampagnen mit jeweils modifizierter Versuchsanordnung statt, wobei sich zeigte, dass verschiedene experimentelle Aspekte zu berücksichtigen sind wie sie in Tabelle 2 zusammengefasst sind. Als Ergebnis wurde das in Abbildung 10 dargestellte Versuchskonzept entwickelt, bei dem in einen Injektionsbrunnen in drei Tiefen Wasser injiziert wird. Die Injektionsmenge richtet sich dabei nach der hydraulischen Durchlässigkeit in der entsprechenden Tiefe, wobei die Injektion des Wärmetracers im mittleren Intervall stattfindet. Im Intervall ober- und



unterhalb der Tracerinjektion wird „kaltes“ Wasser mit natürlicher Grundwassertemperatur eingepresst, um den Wärmetransport in der Injektionstiefe des Tracers zu fokussieren und Wärmeverluste zu minimieren.

Tabelle 2. Mögliche Herausforderungen der tomographischen Wärmetracerversuche, Design-Kriterien und deren technische Umsetzung.

| Randbedingung für Tracerversuch                                                      | Designkriterien                                                                                                         | Implementation                       |                                 |                                      |                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|----------------------|
|                                                                                      |                                                                                                                         | Fließfeld mit erzwungenem Gradienten | Maßgefertigtes Injektionssystem | Online-Monitoring des Tracerversuchs | Wärmetracererzeugung |
| Testdauer                                                                            | Kurze Testdauer (< 1 - 2 Tage) für aufeinander folgende tomographische Versuche                                         | ✓                                    |                                 |                                      |                      |
| Einfluss vorangegangener Versuche                                                    | Minimierung der Testdauer und advektiv-dominiertes Fließfeld                                                            | ✓                                    |                                 |                                      |                      |
|                                                                                      | Komplette Tracerwiederfindung für jedes Tracerexperiment und Verifizierung mittels kontinuierlicher Tracerbeobachtung   |                                      |                                 | ✓                                    |                      |
| Wärmeleitung und –diffusion durch Top und Basis und innerhalb des Grundwasserleiters | Advektiv-dominiertes Fließfeld zur Minimierung von Wärmeverlusten durch Wärmeleitung und –diffusion                     | ✓                                    |                                 |                                      |                      |
|                                                                                      | Gleichzeitige Injektion von Wasser in drei Tiefen mit Tracerinjektion im mittleren Intervall                            |                                      | ✓                               | ✓                                    |                      |
| Veränderliche Randbedingungen während des Versuches                                  | Erzeugung eines Fließfeldes mit erzwungenem Gradienten zur Minimierung von zeitlich veränderlichen Randbedingungen      | ✓                                    |                                 | ✓                                    |                      |
| Injektion des Tracers in ein vorgegebenes Tiefenintervall                            | Multi-level-Injektion und Minimierung von vertikalen Flüssen innerhalb des Injektionsbrunnens                           |                                      | ✓                               | ✓                                    |                      |
| Hochaufgelöste Temperaturmessungen                                                   | In-situ-Temperaturmonitoring mit hoher vertikaler Auflösung in verschiedenen Beobachtungsmessstellen                    |                                      |                                 | ✓                                    |                      |
| Effekte durch Dichte- und Viskositätsänderungen                                      | Maximaler Temperaturunterschied von 10 – 15 K in einem advektiv-dominierten Fließfeld                                   |                                      |                                 | ✓                                    | ✓                    |
| Erzeugung ausreichender Tracermengen                                                 | Kontinuierliche Erzeugung des Wärmetracer mit konstanter Temperatur über einen längeren Zeitraum in ausreichender Menge |                                      |                                 | ✓                                    | ✓                    |

Das im Projekt entwickelte Injektionssystem zeigt Abbildung 11a. Die Erzeugung des Wärmetracer erfolgte mittels eines Hochleistungsdurchlauferhitzers, der für den Katastrophenschutz entwickelt wurde (Abbildung 11c). Über einen vollverfilterten Entnahmehrbrunnen wird Grundwasser integral über die gesamte Tiefe entnommen, so dass ein Dipolfeld erzeugt wird. Die Hinzunahme eines weiteren Dipolfeldes wie in Schwede et al. (2014) beschrieben ist über weitere Injektions- und Extraktionsbrunnen in Abhängigkeit des Einflusses von hydraulischen Randbedingungen ohne weiteres möglich. Zwischen Injektions- und Extraktionsbrunnen befinden sich mehrere Beobachtungsmessstellen, in denen mit im Projekt entwickelten Temperaturmessketten der Durchbruch des Wärmetracer beobachtet werden kann (Abbildung 11b). Mühlberger (2012)

entwickelte vollautomatisiertes Messsystem, mit dem sich das Tracerversuchsystem steuern und die Daten aufzeichnen lassen.

Eine ausführliche Erklärung der Konzeption der tomographischen Wärmetracerversuche, eine Beschreibung der Durchführung der Wärmetracerexperimente sowie die Darstellung von Versuchsergebnissen finden sich in Doro et al. (2014 – als Manuskriptentwurf im Anhang des Erfolgskontrollberichtes). Exemplarisch sind in Abbildung 12 Wärmetracerdurchbruchkurven dargestellt, die mit dem im Projekt entwickelten Temperaturmesssystem aufgezeichnet wurden. Die Durchbruchkurven zeigen deutlich eine räumliche Variabilität bezüglich des Wärmetransports in verschiedenen Bereichen des Grundwasserleiters, was durch die räumliche Variabilität der hydraulischen Durchlässigkeit verursacht wird und durch die Inversion der Versuchsdaten zu zeigen ist. Diese Arbeiten werden nach Abschluss des Projektes weiter betrieben und in einer Doktorarbeit voraussichtlich im Laufe des Jahres 2015 publiziert.

Ein weiterer Aspekt der Beobachtung des Wärmetracerdurchbruchs wurde von Skrainka-Fabbiani (2013) verfolgt. In seiner Studie untersuchte er die Möglichkeit der Aufzeichnung des Wärmetracers mittels geoelektrischem Monitoring analog zu Pollock and Cirpka (2012). In einem Laborversuch konnte er zeigen, dass es prinzipiell möglich ist, mittels geoelektrischen Messungen die Wärmetracerausbreitung tomographisch zu beobachten. Der Ansatz wurde zunächst aber aufgrund von Kapazitätsengpässen nicht weiter verfolgt.

Weitere Entwicklungen im Teilprojekt WP4 beschäftigten sich mit der Konzeption und Durchführung von tomographischen Tracerversuchen mit Farbstoffen. Entsprechende Vorbereitungen zu Feldexperimenten sowie erste Feldexperimente wurden in der zweiten Jahreshälfte 2013 durchgeführt. Weitere umfangreiche tomographische Tracerversuche wurden nach Abschluss des Projektes durchgeführt und werden derzeit im Rahmen einer Master-Arbeit weiter ausgewertet. Die Ergebnisse der Arbeit sollen in den Dissertationen von Doro und Sanchez-Leon veröffentlicht werden.

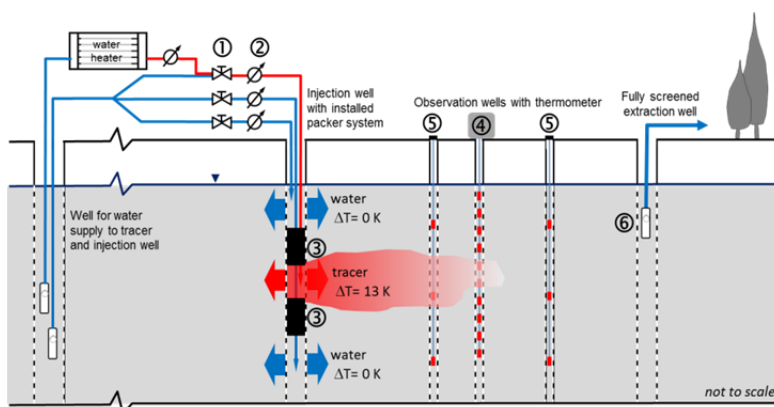


Abbildung 10. Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für Wärmetracerversuche mit Durchflussregler (1), Durchfluss- und Druckaufnehmer (2), Doppelpackersystem (3), Beobachtungsmessstellen mit Thermosensoren, Messketten und Datenerfassungssystem (4 + 5) und Entnahmepumpe in vollverfilterter Messstelle (6). Die rot schraffierte Fläche zeigt zur Veranschaulichung eine mögliche Verteilung des Wärmetracers im Grundwasserleiter. Aus Doro et al. (2014).

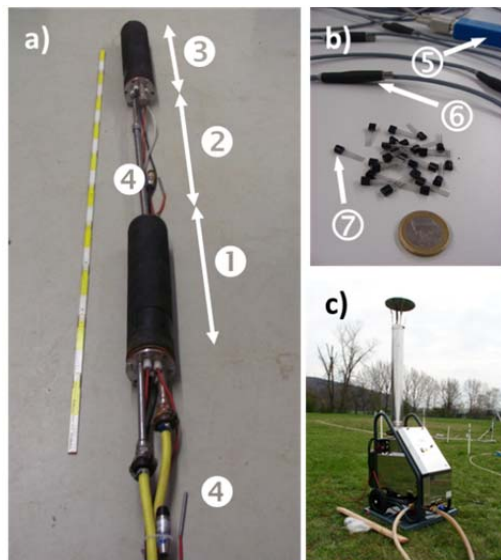


Abbildung 11. a) Bild des Injektionssystems bestehend aus einem oberen Packer (1), dem Tracerinjektionsinterval (2) und dem unteren Packerstück (3). Druck- und Temperatursensoren (4) sind innerhalb sowie ober- und unterhalb des Injektionssystems angeordnet (für unten nicht sichtbar). Die Länge des Packersystems beträgt ca. 2 m. b) Bild des im Projekt entwickelten Temperatursmesssystems mit 64-Kanal-Datenlogger (5), Ketten mit Thermistoren (6) und Temperatursensoren im unverbauten Originalzustand (7) mit Euro-Münze zum Größenvergleich. c) Hochleistungsdurchlauferhitzer auf dem Testgelände Lauswiesen. Aus Doro et al. (2014).

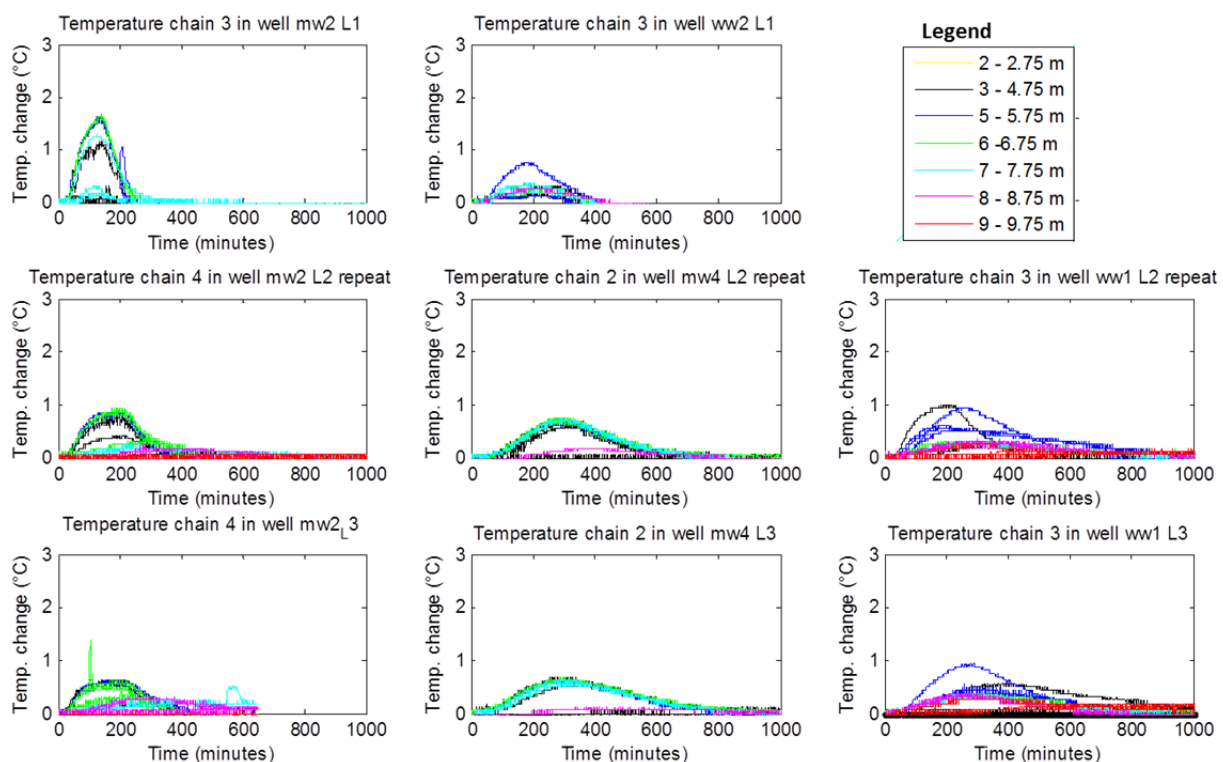


Abbildung 12. a) Durchbruchkurven des Wärmetracers in verschiedenen Tiefen der Beobachtungsmessstellen. Die erste Reihe zeigt das Ergebnis für eine Injektion im oberen Bereich des Grundwasserleiters, während für die zweite und dritte Reihe die Injektion entsprechend in tieferen Bereichen des Grundwasserleiters stattfanden. Eine ausführliche Diskussion der Daten ist in Doro et al. (2014) dargestellt.

d) *Geoelektrisches Monitoring von Salztracorexperimenten*

In diesem Arbeitspaket fanden Arbeiten zur Entwicklung von tracertomographische Experimenten statt, bei dem tomographische Salztracerversuche durch geoelektrische Widerstandstomographie (ERT) beobachtet werden. Allerdings sind Salztracerversuche im Gegensatz zu Wärmetracerversuchen schwierig mehrfach mit verschiedenen hydraulischen Randbedingungen durchzuführen, d.h. eine Injektion in verschiedenen Tiefen in nacheinander folgenden Tracerversuchen ist meist nicht ohne weiteres möglich. Deshalb beschränkte sich die tomographische Untersuchung hier auf das geoelektrische Monitoring zur Beobachtung der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Tracerwolke. Um eine ausreichende vertikale Auflösung zu erhalten, wurde das ERT-Monitoring mit 3-D-Elektrodenkonfigurationen durchgeführt unter Verwendung der im Teilprojekt WP 3 entwickelten modularen Direct Push-Sonden.

In diesem Zusammenhang beschäftigte sich Vilches-James (2013) in diesem Teilprojekt mit dem Vergleich und der Bewertung von verschiedenen geoelektrischen Messmethoden und -konfigurationen, um eine möglichst effiziente Erfassung der Salztracerwolke in dem stark advektiv dominierten Fließfeld während des Tracerversuchs zu gewährleisten. Es zeigte sich, dass eine Kombination aus Oberflächen- und Direct-Push-basierten Bohrlochmessungen am Standort Lauswiesen nur bedingt geeignet ist, da die obersten 2 m am Standort aus einem sandigen Auenlehm besteht, so dass die Oberflächenmessungen nur sensitiv für diesen Bereich sind und lediglich durch Bohrlochmessungen sich höhere Sensitivitäten im Bereich des Grundwasserleiters erreichen lassen (Abbildung 13).

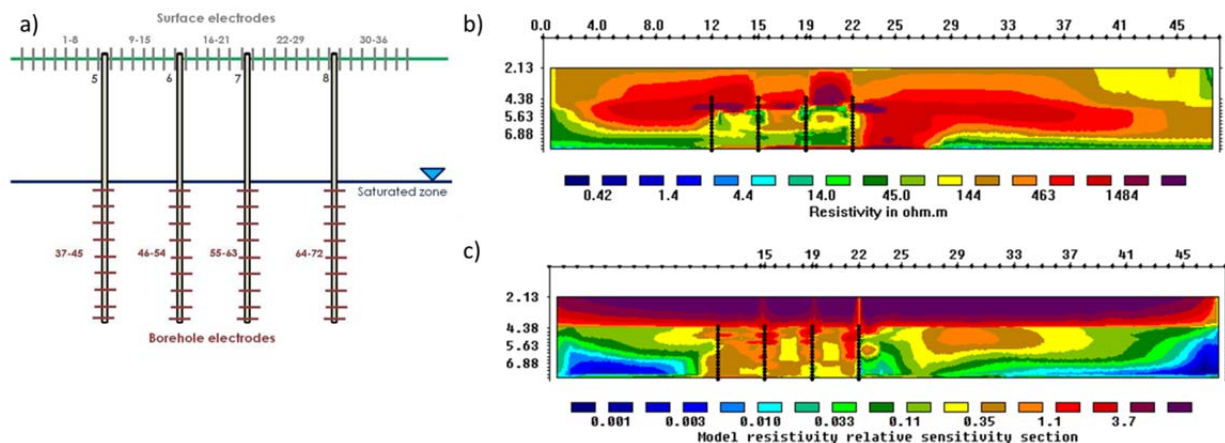


Abbildung 13. a) Schema kombinierter, geoelektrischer Oberflächen- und Direct-Push-basierter Bohrlochmessungen. B) Inversionsergebnis einer kombinierten, geoelektrischen Oberflächen- und Direct-Push-basierter Bohrlochmessung am Standort Lauswiesen (Profil L7). c) Sensitivitätsverteilung des in b) gezeigten Profilschnitts.

Des Weiteren wurden in diesem Arbeitspaket ein Salztracerversuch mit geoelektrischem Widerstandsmonitoring durchgeführt. Abbildung 14 zeigt den Ausschnitt des Untersuchungsgebietes innerhalb des Testfeldes Lauswiesen, in dem die Salztracerversuche mit geoelektrischem Widerstandsmonitoring durchgeführt wurden. Die Salztracerversuche wurden in einem doppelten Dipol-Fließfeld (äußeres Dipol-Feld: B2 nach B7, inneres Dipol-Feld mit Tracerversuch: B3 nach B6)

durchgeführt, um den Einfluss von Wasserspiegelschwankungen des Neckars auf den Tracerversuch auszuschließen bzw. zu minimieren. Die Injektion des Salztracers erfolgte in Messstelle B3. Für das Monitoring wurden geoelektrische Oberflächenmessungen entlang der Profile P1 – P4 in Kombination mit Bohrlochmessungen an 16 Punkten durchgeführt, die in einem Raster von 4 x 4 über dem inneren Messfeld verteilt sind. Für die Bohrlochmessungen wurden die im Projekt TOMOME entwickelten verschiedenen Generation an Direct-Push-basierten Elektrodenketten verwendet (vgl. Abschnitt 2.1.1e).

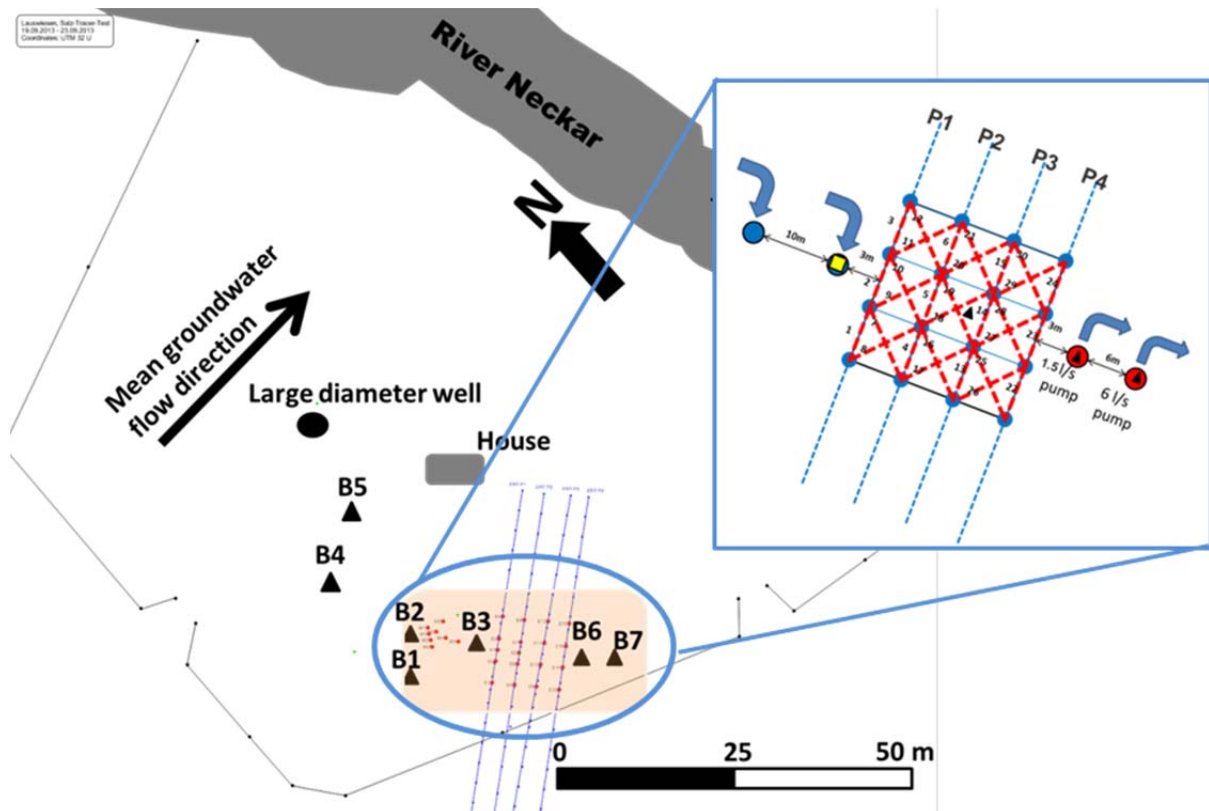


Abbildung 14. Ausschnitt des Untersuchungsgebietes innerhalb des Testfeldes Lauswiesen für die Durchführung der Salztracerversuche mit geoelektrischem Widerstandsmonitoring. Die Salztracerversuche wurden in einem doppelten Dipol-Fließfeld (äußeres Dipol-Feld: B2 → B7, inneres Dipol-Feld mit Tracerversuch: B3 → B6) durchgeführt, um den Einfluss des Neckars zu minimieren. Die Injektion des Salztracers erfolgte in Messstelle B3. Für das Monitoring wurden geoelektrische Oberflächenmessungen entlang der Profile P1 – P4 in Kombination mit Bohrlochmessungen an 16 Punkten durchgeführt, die in einem Raster von 4 x 4 über dem inneren Messfeld verteilt sind. Die roten gestrichelten Linien verdeutlichen die Messanordnung, entlang derer die Bohrlochmessungen stattfanden. Für die Bohrlochmessungen wurden die im Projekt TOMOME entwickelten verschiedenen Generation an Direct-Push-basierten Elektrodenketten verwendet.

Für jede Kombination der geoelektrischen Widerstandsmessung ergibt sich jeweils eine zeitliche Änderungen der elektrischen Leitfähigkeit des Untergrundes, da durch die Passage des Salztracers sich die Leitfähigkeit des Porenfluids ändert. Für die in Abbildung 14 gezeigte Messanordnung ergaben sich demnach 4650 Kurven geoelektrischer Perturbationskurven (dargestellt als elektrischer Widerstand in  $\Omega$ ), d.h. Durchbruchkurven, die mit Dipol-Dipol-Messungen an den im Projekt

entwickelten Bohrlochmessketten für diese Messkonfiguration während eines Salztracerversuches durchgeführt wurden. Abbildung 15 zeigt eine Auswahl der aufgezeichneten geoelektrischen Durchbruchskurven. Mit Hilfe der im Anschluss durchgeführten geoelektrischen Inversion konnte die räumliche und zeitliche Ausbreitung der Salztracerwolke bestimmt werden und ist in Abbildung 16 visualisiert.

Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse finden sich in Doro et al. (2014). Die Arbeit ist als Manuskriptentwurf dem Anhang des Erfolgskontrollberichtes beigelegt. Eine ausführliche Auswertung und vollgekoppelte Inversion der Ergebnisse der Salztracerversuche ist für den Abschluss der Doktorarbeit von K. Doro bis zum ersten Quartal 2015 geplant (vgl. Erfolgskontrollbericht Abschnitt 3).

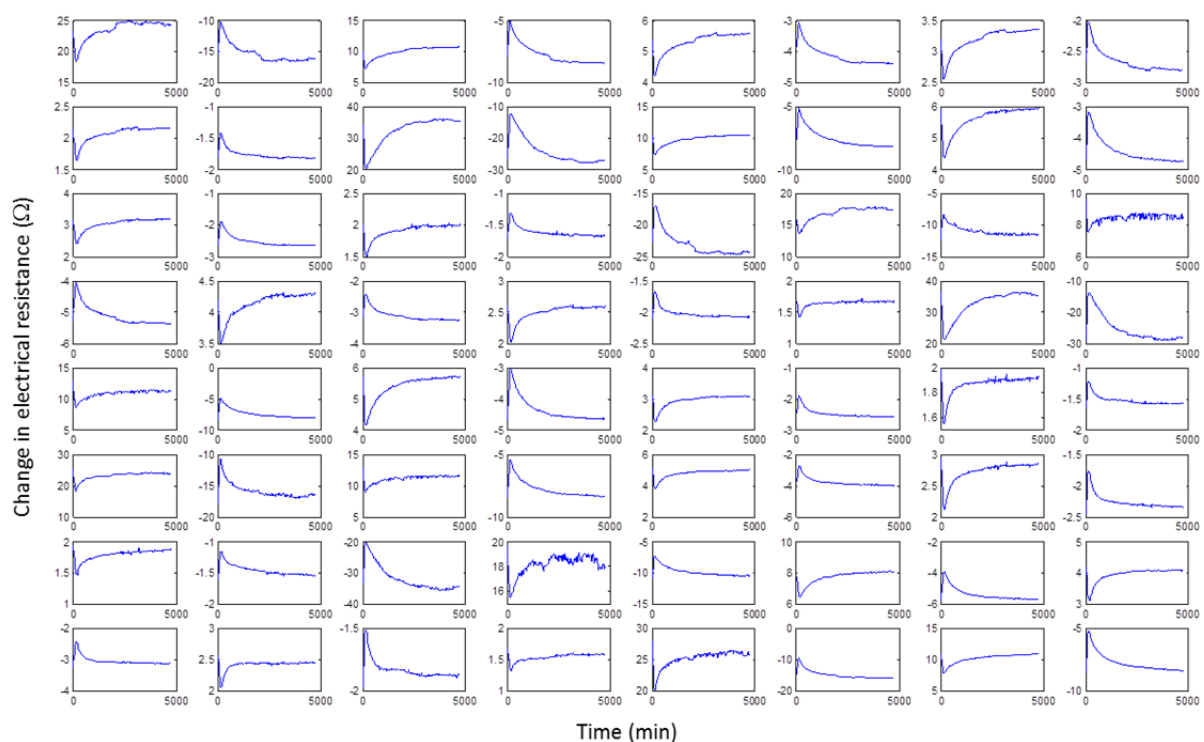


Abbildung 15. Auswahl zeitlicher Perturbationen des elektrischen Widerstandes, d.h. geoelektrische Durchbruchskurven für die in Abbildung 11 gezeigte Messkonfiguration. Insgesamt wurden 4650 zeitlich wiederholte Dipol-Dipol-Messungen an den im Projekt entwickelten Bohrlochmessketten für diese Messkonfiguration während eines Salztracerversuches durchgeführt.



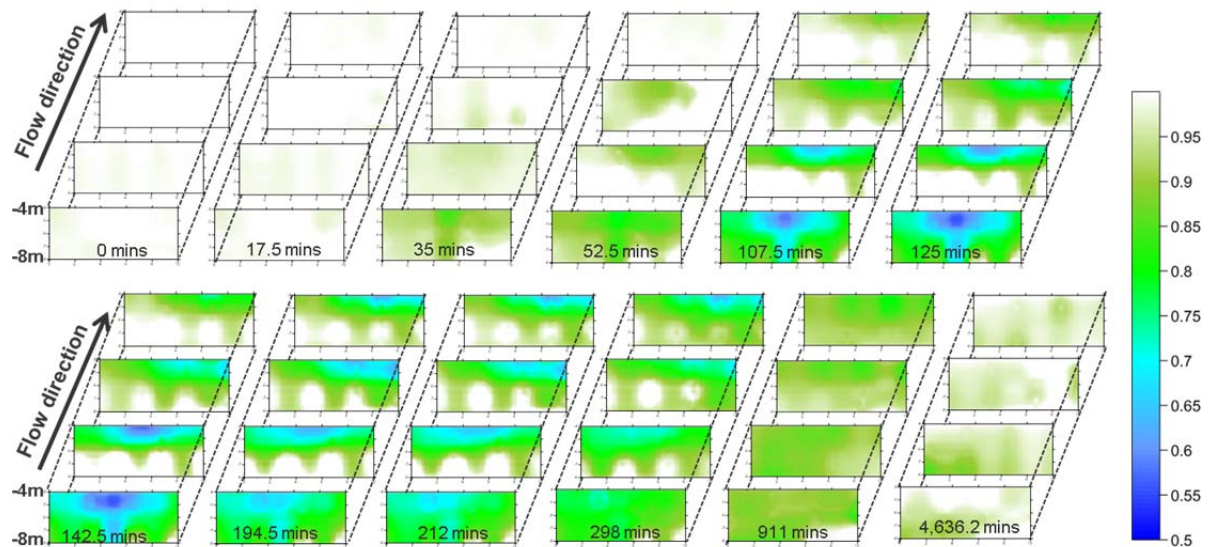


Abbildung 16. Zeitscheiben der relativen Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes invertiert aus geoelektrischen Bohrlochmessungen entlang zweidimensionaler Vertikalprofile. Im oberen Bereich des Grundwasserleiters ist eine deutliche Änderung mit zunehmenden Versuchszeiten ab 52,5 min nach Tracerinjection bis ca. 212 min erkennbar.

#### e) Fertigung gebrauchsfertiger Direct-Push-Sonden

Basierend auf den in Teilprojekt WP3 entwickelten Konzepten, wurden im Teilprojekt WP4 gebrauchsfertige Direct-Push-basierte Sonden zum Monitoring der tomographischen Feldversuche hergestellt. Dies umfasste die Fertigung von Sonden für das geoelektrische Monitoring von Salztracerexperimenten und die Fertigung erweiterter Sonden mit integrierten Temperatur- und Drucksensoren für Wärmetracerexperimente bzw. für Messungen zur hydraulischen Tomographie. Es wurde hierbei verschiedene Generationen an Sonden entwickelt und im Teilprojekt WP4 gefertigt:

- i. Sonden mit Kupferelektroden mit außenliegenden Kabeln auf PVC-Rohren (Durchmesser: 16 mm - Abbildung 17a): bei dieser Variante zeigte sich, dass die Rohre zu weich waren und vergleichsweise schnell altern, so dass Ausbau der Sonden nach mehreren Wochen oder Monaten problematisch werden könnte.
- ii. Sonden mit Edelstahlelektroden mit inliegenden Kabeln und integrierten Temperatursensoren in hochdichtem Polyethylen-Rohren (HDPE, Durchmesser: 19 mm - Abbildung 17b): Bei dieser Variante mit inliegenden Kabeln ist die Möglichkeit eines Ausbaus und damit die Wiederverwendbarkeit gegeben. Durch die Realisierung der Elektroden als Edelstahlfedern (siehe Abbildung 17b) konnte ein besserer Kontakt zur Formation erreicht werden – dieser gewünschte Effekt blieb leider in der ungesättigten Zone aus. Die Fertigung dieses Sondentyps erfolgte als Vorserie über einen Auftrag an Dritte.
- iii. Sonden mit Edelstahlelektroden mit außenliegenden Kabeln auf vollverfilterten HDPE-Rohren (Durchmesser: 19 mm und 25 mm - Abbildung 17c): Das sich bei der Variante ii) zeigte, dass eine Integration von Drucksensoren schwierig zu bewerkstelligen war, wurde dieses System entwickelt, wobei für Druckmessungen zur Bestimmung der Verteilung des hydraulischen

Potentials ein miniaturisiertes Doppelpacker-Systemen entwickelt wurde, wobei faseroptische Drucksensoren erforderlich waren. Die Temperaturmessungen in diesem Sondentyp erfolgt mittels Thermistorenketten, die ebenfalls im Projekt TOMOME entwickelt wurden.

- iv. Sonden mit Edelstahlelektroden mit innenliegenden Kabeln in Mehrkanalmessstellenbündel (CMT – Continuous Multichannel Tubing<sup>1</sup> - Abbildung 17d). Die Leitungen zu den Elektroden sind in einem CMT-Kanal untergebracht (Abbildung 17e) und führen dort zu den Elektroden, die in 50 cm-Abständen entlang des Kanalrohres angebracht sind. Ein Kanal wurde in verschiedenen Tiefenlagen mit Filterschlitz versehen, um die Temperaturverteilung während Wärmetracerversuchen tiefenaufgelöst aufzeichnen zu können. Fünf weitere Kanäle sind in jeweils einer Tiefe geöffnet, um die Tiefenverteilung des hydraulischen Potentials während Messung der hydraulischen Tomographie aufzeichnen zu können.

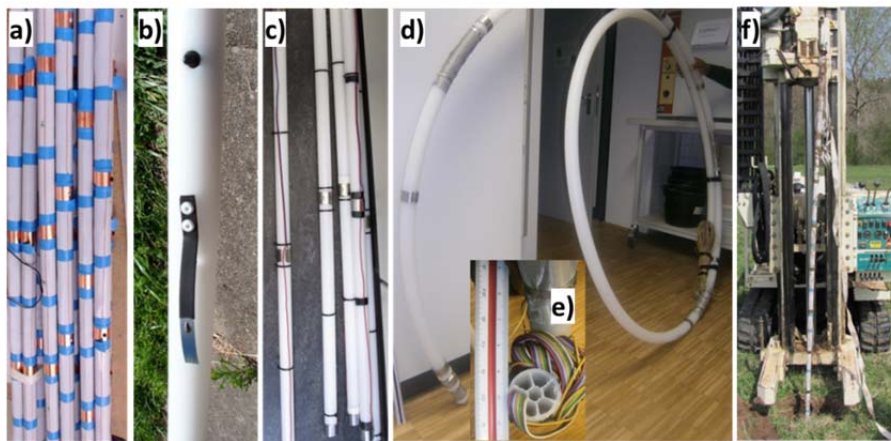


Abbildung 17. Übersicht über die verschiedenen Generationen an Direct-Push-basierten Bohrloch-Sonden: a) Sonden mit Kupferelektroden mit außenliegenden Kabeln auf PVC-Rohren. b) Sonden mit Edelstahlelektroden mit inliegenden Kabeln und integrierten Temperatursensoren in HDPE-Rohren. c) Edelstahlelektroden mit außenliegenden Kabeln auf vollverfilterten HDPE-Rohren mit dem Einsatz von miniaturisierten Doppelpacker-Systemen für Druckmessungen und Thermistorenketten für Temperaturmessungen. d) Mehrkanalmessstellenbündel mit Edelstahlelektroden mit innenliegenden Kabeln (e). Druckmessungen in Einzelkanälen mit Ports in unterschiedlichen Tiefenlagen und einem vollverfilterten Messstellenkanal für Temperaturmessungen mit Thermistorenketten. f) Bild vom Ausbau einer Elektrodenketten des Typs (a).

Des Weiteren war vorgesehen, dass die Sonden so zu konstruieren waren, dass sie nach Abschluss der Experimente wieder leicht aus dem Grundwasserleiter ausgebaut werden können und für weitere Versuche an anderer Stelle wieder verwendet werden können. Es konnte im Gelände gezeigt werden, dass die oben dargestellten Sondenstränge sich ohne Probleme nach einer Standzeit selbst nach mehreren Monaten problemlos deinstallieren lassen. Für eine erneute Installation sind teilweise lediglich die außenliegenden Kabelstränge zu ersetzen bzw. mit den Elektroden neu zu verdrahten und im Falle der Kupferelektroden sind diese aufgrund von starker Korrosion

<sup>1</sup> SOLINST® - CMT Multilevel System - Model 403



auszutauschen. Aus diesem Grund wurde auch für alle Generationen im Projekt nur noch Edelstahl als Elektrodenmaterial verwendet.

*f) Zusammenfassung der Arbeiten im Arbeitspaket WP4 „Feldversuche zu gekoppelten hydraulischen tomographischen Methoden in einem alluvialen Grundwasserleiter“*

Im Arbeitspaket WP4 wurden verschiedenste Feldmethoden für die tomographische Untersuchung von Grundwasserleitern entwickelt. Für die Untersuchung von Grundwasserleitern mit hydraulischer Tomographie wurde das Konzept der faseroptischen Druckmesstechnik eingesetzt und Direct-Push-basierte Multi-level-Grundwassermessstellen adaptiert. Für die tracertomographische Untersuchung wurde das Konzept von Wärmetracern für tomographischen Feldanwendung zur demonstations- bzw. anwendungsreife entwickelt. Dabei wurde ein neuartiger Ansatz zur Durchführung der Wärmetracerversuche konzipiert, der verschiedene Limitierungen und Randbedingungen von Tracerversuche berücksichtigt. Die Konzeption beinhaltete ebenfalls die Entwicklung von Messtechnik wie beispielsweise die Entwicklung eines Tracerinjektionssystems, von Temperaturmessketten und die Adaption von Direct-Push-basierten Messstellen für die tiefenhorizontierte Messung von Temperatur- und Druckverteilungen in den Messstellen. Des Weiteren fand die experimentelle Umsetzung von Salztracerversuchen mit dreidimensionalem geoelektrischen Monitoring statt. Hierfür war in Zusammenarbeit mit Teilprojekt WP3 die Konzeption und die Fertigung von Bohrloch- bzw. Direct-Push-basierten Elektrodenketten erforderlich. Außerdem wurde ein experimentelles Konzept entwickelt, das den Erfordernissen einer zeitlich und räumlich hochauflösenden Erfassung der Ausbreitung des Salztracers Rechnung trägt. Mit den entwickelten Feldversuchstechniken konnten umfangreiche Datensätze zur hydraulischen Tomographie und Tracertomographie generiert werden, die in verschiedenen Inversionsansätzen für die Beschreibung des Grundwasserleiters am Feldversuchsstandort Lauswiesen der Univ. Tübingen verwendet wurden. Arbeiten zu einer weitergehenden Inversion werden sich nach Abschluss des Projektes, u.a. in zwei Doktorarbeiten fortgeführt.

## 2.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind im Folgenden aufgelistet und die Notwendigkeit der Zuwendung jeweils diskutiert:

- Personalkosten: Die Teilprojekte WP1 und WP4 des Verbundprojektes TOMOME wurden durch einen Post-Doc und einen Doktoranden (Personalwechsel im Jan 2012) bearbeitet. Unterstützt wurden die Wissenschaftler einerseits durch 16 wissenschaftliche Hilfskräfte und andererseits in Phasen durch zwei technische Mitarbeiter (Jan – Dez. 2012 und März – Dez. 2013).
- Vergabe von Aufträgen an Dritte: Aufgrund von Verzögerungen in der Einstellung von technischem Personal wurde die Konzeption und der Bau einer Generation an Direct-Push-Sonden durch einen Auftrag an Dritte vergeben. Umfang der Leistung war die Umsetzung eines Konzeptes von Geoelektrik-Messketten mit integrierten Temperaturmessketten für die eine Steuer- und Datenerfassungssoftware zu erstellen war.
- Reisekosten: Reisekosten umfassten die Kosten für Reisen zum Feldversuchsstandort Lauswiesen sowie zu nationalen und internationalen Konferenzen sowie Projekttreffen und Statusseminaren. Des Weiteren wurden die Reisekosten für einen intensiven Austausch mit dem Arbeitspaket WP2 an der Univ. Projektergebnisse wurden außerdem dabei auf den Tagungen der Fachsektion Hydrogeologie in der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften sowie den Herbsttagungen der Amerikanischen Geophysikalischen Union (AGU) präsentiert. Des Weiteren erfolgte ein Besuch der Boise State University durch Dr. Leven für den wissenschaftlichen Austausch bezüglich der Feldanwendung der hydraulischen Tomographie.
- Sachmittel umfassten Verbrauchsmaterialien für die Durchführung der Geländeversuche auf dem Versuchsfeld Lauswiesen sowie von begleitenden Laborversuchen. Dies waren beispielsweise Sondiergestänge und Adapter, Bleche, elektrische und elektronische Kleinteile, Kleinmessgeräte, Schläuche etc.
- Investitionen: Für die Durchführung der Feldversuche waren Investitionen erforderlich, die wie folgt umgesetzt wurden:
  - Datenlogger: Die Position umfasst Datenlogger für das Monitoring aller tomographischen Feldexperimente und besteht aus einem System von Einzelloggern zur Messung von Druck, Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit, ein Messsystem für faseroptisches Druckmesssystem und ein Datenlogger für die Aufzeichnung von tomographischen Tracerversuchen.
  - Packersystem: Die Position umfasst ein Packersystem für den Einsatz während Versuchen zur hydraulischen Tomographie.
  - Temperaturmessketten: Die Position umfasst die Investitionen für den Bau der Temperaturmessketten im Zusammenhang mit tomographischen Wärmetracerversuchen.
  - Mehrkanallogger für Aufzeichnung sämtlicher Daten des Injektionsbrunnens (15 Eingangsgrößen).
  - Durchlauferhitzer für die Erzeugung von temperiertem Wasser für die Wärmetracerversuche.
  - Feldnotebook für die Aufzeichnung und das Prozessieren von Daten im Gelände.
  - Direct-Push-Sonden: Diese Position beinhaltet die Materialien zum Bau der Direct-Push-Sonden und umfasst insgesamt 20 Einzelsonden mit unterschiedlichem Ausbaugrad entsprechend den unter Punkt 2.1.1e) beschriebenen Varianten sowie Messeinrichtungen zum Betreiben der Sondenstränge.

### 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit sowie Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisse

Die im Rahmen des Projektes „Tomographische Methoden in der Hydrogeologie“ geleistete Arbeit und erzielten Ergebnisse konnten nur durch die erhaltene Förderung im Rahmen des GEOTECHNOLOGIEN-Programmes geleistet werden. Ohne diese Förderung wäre weder die Entwicklung und Tests von Inversionscodes noch die Konzipierung, Umsetzung und Durchführung von Feldtechniken und –experimenten möglich gewesen.

Durch die Zuwendung war es somit zum einen möglich, neuartige Inversionsmethoden zu entwickeln und auf ihre Praxistauglichkeit zu testen. Zum anderen konnten neuartige Felduntersuchungstechniken für verschiedenste Testmethoden entwickelt und zur Demonstrationsreife gebracht werden. Die geleistete Arbeit war somit notwendig und angemessen, um tomographische Methoden für den Einsatz in der Hydrogeologie soweit zu entwickeln, dass sie nun auf Demonstrationsprojekte anwendbar sind und später kommerziell nutzbar sein können.

Wie unter Punkt 2.5 aufgelistet, werden die Projektarbeiten in mehreren Publikationen verwertet, eine Doktorarbeit zu den Feldmethoden befindet sich in Vorbereitung (erwartete Einreichung: 1. Quartal 2015) und zahlreiche Abschlussarbeiten konnten angefertigt werden. Eine weitere Doktorarbeit zu tracertomographischen Untersuchungsmethoden konnte an das Projekt angeschlossen werden (Beginn März 2015) und wird derzeit vom „*National Council on Science and Technology of Mexico*“ im Rahmen eines Doktorandenstipendiums finanziert. Die Einreichung eines weiteren drittmittelfinanzierten Projektes zu tracertomographischen Methoden befindet sich in Vorbereitung.

Des Weiteren sollen Teile der methodischen Aspekte des Projektes in einem Statusbericht zu hydrogeologischen Untersuchungsmethoden in der Schriftenreihe des Altlastenforums Baden-Württemberg e.V. veröffentlicht werden, um die Anwendung von tomographischen Methoden in der hydrogeologischen Praxis zu etablieren.

### 2.4 Entwicklung des Stands der Forschung seit Projektbeginn

Seit Projektbeginn wurden weitere Arbeiten zu erweiterten Methoden der Anwendung der hydraulischen Tomographie veröffentlicht und reichen von neuen Messkonzepten (Nutzung von oszillierenden Anregungssignalen (Cardiff et al. 2013a)), über die Anwendung von transienter hydraulischer 3D-Tomographie (Berg and Illman 2011b; Cardiff et al. 2012; Cardiff et al. 2013b) hin zur Verwendung verschiedener Datentypen und Inversionsalgorithmen (Schoniger et al. 2012; Leube et al. 2012; Jankovic et al. 2013; Brauchler et al. 2011; Jiménez et al. 2013; Mao et al. 2013). In weiteren Entwicklungen beschrieben (Berg and Illman (2011a); Illman et al. (2012); Brauchler et al. (2013a)) Laboranwendungen der Methode der Tracertomographie zur Bestimmung von Durchlässigkeitsverteilungen an einem Sandsteinblock bzw. in einer Sandbox. Der kombinierte Einsatz von Wärme und Salz als Tracer wurde in den Arbeiten von Ma et al. (2012) gezeigt, analog hierzu präsentierten Wagner et al. (2014) ebenfalls den Einsatz von Wärme als Tracer. In diesem

Zusammenhang verwendeten Klepikova et al. (2014) passive Temperaturmessungen für die Charakterisierung von Kluftkonnektivitäten und hydraulischer Eigenschaften, (Read et al. 2013) verwendeten faseroptische Temperaturmessungen für denselben Zweck. Giambastiani et al. (2013) untersuchten die Limitierungen von Wärme als Tracer in einem Laborversuch, Leaf et al. (2012) anhand eines Einbohrlochversuches.

Im Zusammenhang mit dem geoelektrischen Monitoring von Salztracerversuchen untersuchten Perri et al. (2012) messtechnische Aspekte von oberflächen- und bohrlochbasierten Messungen. Rucker et al. (2012) entwickelten lange Elektroden für geoelektrische Messungen, LaBrecque and Daily (2008) untersuchten den Einfluss von verschiedenen Elektrodenmaterialien und Sherrod et al. (2012) präsentierten kostengünstige Methoden für die zeitgleiche Erfassung von geoelektrischen Widerstandswerten und Temperaturverteilungen. Weiterhin beschäftigten sich verschiedene Studien mit Inversionsansätzen von geoelektrischen Messungen und deren Anwendung (Pollock and Cirkpa 2012; Jardani et al. 2013; Lochbuhler et al. 2013; Loke et al. 2014b; Wilkinson et al. 2012; Loke et al. 2014a; Karaoulis et al. 2014; Leube et al. 2012).

## 2.5 Erfolgte und geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses

Bislang fand eine Verwertung der Projektergebnisse in zwei *peer-reviewed* Publikationen statt, derzeit liegen vier weitere Manuskriptentwürfe zur Veröffentlichung vor, von denen eines bereits wieder zur Revision eingereicht wurde. 17 Abschlussarbeiten (Diplom-, Master- und Bachelor-Arbeiten) wurden im Rahmen des Projektes angefertigt. Die Arbeiten sind nachfolgend aufgelistet, die Kopien der Veröffentlichungen finden sich im Anhang des Erfolgskontrollberichtes sowie die Rohfassungen der Manuskriptentwürfe. Aufgrund des Veröffentlichungsstatus bzw. von urheberrechtlichen Gründen sind sie lediglich dem vertraulichen Erfolgskontrollbericht als Anlage beigelegt.

Des Weiteren sollen Teile der methodischen Aspekte des Projektes in einem Statusbericht zu hydrogeologischen Untersuchungsmethoden in der Schriftenreihe des Altlastenforums Baden-Württemberg e.V. veröffentlicht werden.

- Schwede, R.L., W. Li, C. Leven, and O.A. Cirpka. 2014. Three-dimensional geostatistical inversion of synthetic tomographic pumping and heat-tracer tests in a nested-cell setup. *Advances in Water Resources* 63 no. 0: 77-90.
- Schwede, R.L., A. Ngo, P. Bastian, O. Ippisch, W. Li, and O.A. Cirpka. 2012. Efficient parallelization of geostatistical inversion using the quasi-linear approach. *Computers & Geosciences* 44: 78-85

### Manuskripte zu eingereichten und in Vorbereitung befindliche Veröffentlichungen

- Doro, K.O., O.A. Cirpka, C. Leven. (in Revision). Tracer tomography: Conceptual design and field experiments using heat as tracer. Method note in *Ground Water*.
- Doro, K.O., A. Patzelt, O.A. Cirpka, C. Leven. (im Entwurf). Monitoring high velocity salt tracer tests via 4-D electrical resistivity tomography with re-useable modular borehole electrodes. Research paper for submission in *Journal of Applied Geophysics*.
- Leven, C., Barrash, W., Cardiff, M. (im Entwurf) - Fiber Optic Pressure Measurements – New Experimental Possibilities in Hydrogeology - Method note for submission in *Ground Water*.
- Sanchez-Leon, E.E., Haslauer, C., Leven, C. (im Entwurf) - Three Dimensional Inverse Modeling of Hydraulic Conductivity Using Advanced Regularization Constraints, Based on Data Collected in a Hydraulic Tomography Field Test. – Research Paper for submission in *Ground Water*.

### Abschlussarbeiten im Projekt

1. Haas, J. (2011): The interaction between the Neckar and the groundwater at the Lauswiesen site. Diploma thesis, Center for Applied Geoscience, Univ. Tübingen.
2. Klein, M. (2011): Experimentelle Anwendung der hydraulischen Tomographie am Testfeld Lauswiesen mittels Direct-Push-Technologie. Diploma thesis, Center for Applied Geoscience, Univ. Tübingen.
3. Strasser, D. (2011): Experimenteller Vergleich hydrogeologischer Messverfahren mit unterschiedlichem Mittelungsvolumen. Diploma thesis, Center for Applied Geoscience, Univ. Tübingen.
4. Emmerich, L. (2012): Geostatistical Inversion of Hydraulic Head and Temperature Tracer Data. BSc thesis, Center for Applied Geoscience, Univ. Tübingen.

5. Gutierrez Cirlos, A.G. (2012): Evaluation of a flux-weighing sampling device using borehole flowmeter and tracer experiments. MSc thesis, Center for Applied Geoscience, Univ. Tübingen.
6. Harbarth, J. (2012): Untersuchung der hydraulischen Durchlässigkeit am Versuchsstandort Lauswiesen sowie ein Vergleich mit anderen Untersuchungsmethoden. BSc thesis, Center for Applied Geoscience, Univ. Tübingen.
7. Stark, L. (2012): Influence of wellbore skin on pumping tests at the Lauswiesen field site, Tübingen. Study thesis, Center for Applied Geoscience, Univ. Tübingen.
8. Wang, B. (2012): Hydrogeophysical Inversion of Tracer Tests Monitored by ERT using the Ensemble Kalman Filter. MSc thesis, Center for Applied Geoscience, Univ. Tübingen.
9. Wolf, K. (2012): Untersuchungen der zeitlichen Variabilität von Grundwasserfließbedingungen am Standort Lauswiesen. BSc thesis, Center for Applied Geoscience, Univ. Tübingen.
10. Beck, J.F. (2013): Konzeption und Umsetzung eines Versuchsaufbaus für Untersuchungen mittels hydraulischer Tomographie. BSc thesis, Center for Applied Geoscience, Univ. Tübingen.
11. Isabaev, K. (2013): Geostatistical Interference of Hydraulic Conductivity using Hydraulic Tomography at the Lauswiesen Test Site. MSc thesis, Center for Applied Geoscience, Univ. Tübingen.
12. Mühlberger, H. (2013): Konzeption und Umsetzung eines Versuchsaufbaus für Wärmetracer-tomographische Untersuchungen. BSc thesis, Center for Applied Geoscience, Univ. Tübingen.
13. Abdrakhimova, P. (2013): Geostatistical Inversion using the Ensemble Kalman Filter. MSc thesis, Center for Applied Geoscience, Univ. Tübingen.
14. Roller, F. (2013): Verwendung von Mehrkanal-Lichtleiter-Fluorometer zum in-situ-Monitoring von Tracerversuchen. BSc thesis, Center for Applied Geoscience, Univ. Tübingen.
15. Sanchez-Leon, E. (2013): Inversion of Collected Transient Pumping Test Data Using HydroGeoSphere and PEST. Case Study: Lauswiesen Test Site, Germany. MSc thesis, Center for Applied Geoscience, Univ. Tübingen.
16. Skrainka Fabbiani, J.A. (2013): Geophysical monitoring of heat tracer experiments using electrical resistivity tomography. MSc thesis, Center for Applied Geoscience, Univ. Tübingen.
17. Vilches James, J.A. (2013): Comparison and evaluation of different electrical resistivity tomography methods and workflows for geoelectrical characterization of the Lauswiesen test site. MSc thesis, Center for Applied Geoscience, Univ. Tübingen.

## Bilddokumentation



Bild 1. unteres Ende von Direct-Push-Sonden mit Elektroden.



Bild 2. oberes Ende Direct-Push-Sonden mit Geoelektrikkabeln.



Bild 3. Installation von Direct-Push-Sonden für das Monitoring von tomographischen Untersuchungen.

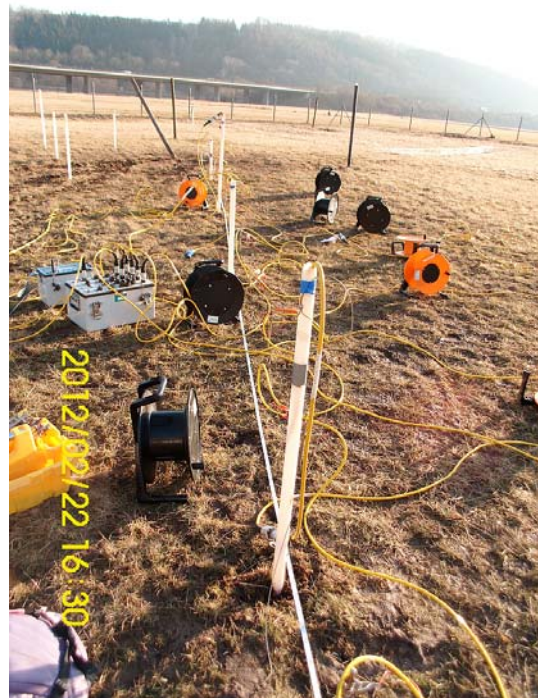


Bild 4. Kombinierte geoelektrische Bohrloch- und Oberflächenmessungen in Vorbereitung zu einem Salztracerversuch.





Bild 5. Messfeld mit fertig installierten Direct-Push-Messsonden in einem Versuchsrastrer von 4 x 4 Messpunkte (weiße und blaue Rohre).



Bild 6. Messfeld während eines Versuchs zur hydraulischen Tomographie unter Verwendung faseroptischer Druckmesstechnik.



Bild 7. Aufsicht auf eine Mehrkanalmessstelle mit Glasfaserkabeln der Drucksensoren während eines Versuchs zur hydraulischen Tomographie unter Verwendung faseroptischer Druckmesstechnik.



Bild 8. Vorbereitung eines Salztracerversuches: Anmischen der Salzlösung in Schwimmbecken.



Bild 9. Messfeld während der Durchführung eines Salztracerversuches mit geoelektrischem Monitoring.



Bild 10. Messfeld nach Überflutung im Frühjahr 2013.





Bild 11. Messfeld während der Durchführung von Versuchen zur hydraulischen Tomographie.



Bild 12. Deinstallation einer Direct-Push-Sonde nach mehrmonatiger Standzeit. Der Ausbau und eine Wiederverwertung sind ohne größere Probleme möglich.

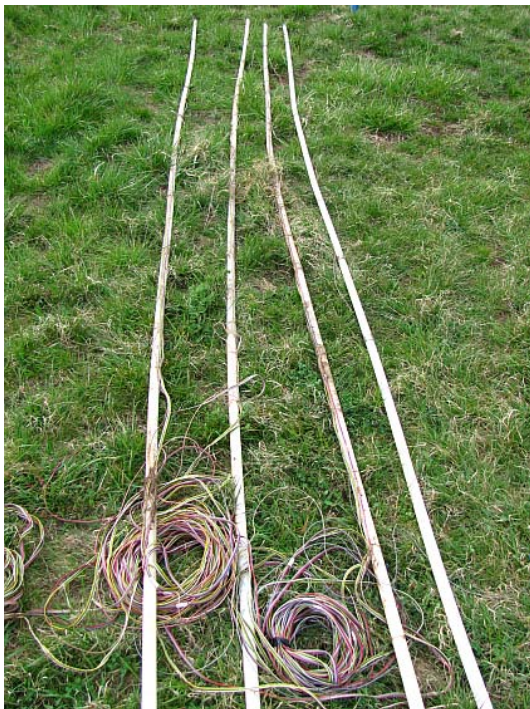


Bild 13. Direct-Push-Sonden nach der Deinstallation nach mehrmonatiger Standzeit. Eine Wiederverwertung sind ohne größere Probleme möglich



Bild 14. Messfeld während einer Kampagne zur Direct-Push-gestützten Experimenten zur hydraulischen Tomographie.

## Literatur

- Alfa, B. 2003. *Shear waves refraction survey at Lauswiesen (South West Germany)*. Tübingen: Tübingen, Univ., Master-Theses, 2003.
- Anderson, M.P. 2005. Heat as a ground water tracer. *Ground Water* 43 no. 6: 951-968.
- Berg, S.J., and W.A. Illman. 2011a. Capturing aquifer heterogeneity: Comparison of approaches through controlled sandbox experiments. *Water Resources Research* 47.
- . 2011b. Three-dimensional transient hydraulic tomography in a highly heterogeneous glaciofluvial aquifer-aquitard system. *Water Resources Research* 47.
- Binley, A., G. Cassiani, R. Middleton, and P. Winship. 2002. Vadose Zone Flow Model Parameterisation Using Cross-Borehole Radar and Resistivity Imaging. *J. Hydrol.* 267 no. 3-4: 147-159.
- Binley, A., S. Henry-Poulter, and B. Shaw. 1996. Examination of Solute Transport in an Undisturbed Soil Coulmn Using Electrical Resistance Tomography. *Water Resour. Res.* 32 no. 4: 763-769.
- Bohling, G.C., X.Y. Zhan, J.J. Butler, and L. Zheng. 2002. Steady shape analysis of tomographic pumping tests for characterization of aquifer heterogeneities. *Water Resources Research* 38 no. 12.
- Brauchler, R., G. Boehm, C. Leven, P. Dietrich, and M. Sauter. 2013a. A laboratory study of tracer tomography. *Hydrogeology Journal* 21 no. 6: 1265-1274.
- Brauchler, R., G. Böhm, C. Leven, P. Dietrich, and M. Sauter. 2013b. A laboratory study of tracer tomography. *Hydrogeology Journal* 21 no. 6: 1265-1274.
- Brauchler, R., R. Hu, P. Dietrich, and M. Sauter. 2011. A field assessment of high-resolution aquifer characterization based on hydraulic travel time and hydraulic attenuation tomography. *Water Resources Research* 47.
- Brauchler, R., R. Liedl, and P. Dietrich. 2003. A travel time based hydraulic tomographic approach. *Water Resources Research* 39 no. 12.
- Butler, J.J., C.D. McElwee, and G.C. Bohling. 1999. Pumping tests in networks of multilevel sampling wells: Motivation and methodology. *Water Resources Research* 35 no. 11: 3553-3560.
- Cardiff, M., T. Bakhos, P.K. Kitanidis, and W. Barrash. 2013a. Aquifer heterogeneity characterization with oscillatory pumping: Sensitivity analysis and imaging potential. *Water Resources Research* 49 no. 9: 5395-5410.
- Cardiff, M., W. Barrash, and P.K. Kitanidis. 2012. A field proof-of-concept of aquifer imaging using 3-D transient hydraulic tomography with modular, temporarily-emplaced equipment. *Water Resour. Res.* 48 no. 5: W05531.
- Cardiff, M., W. Barrash, and P.K. Kitanidis. 2013b. Hydraulic conductivity imaging from 3-D transient hydraulic tomography at several pumping/observation densities. *Water Resources Research* 49 no. 11: 7311-7326.
- Cirpka, O.A., and P.K. Kitanidis. 2000. Sensitivities of temporal moments calculated by the adjoint-state method and joint inverting of head and tracer data. *Advances Water Resour.* 24 no. 1: 89-103.
- Cirpka, O.A., and W. Nowak. 2003. Dispersion on kriged hydraulic conductivity fields. *Water Resources Research* 39 no. 2.
- Datta-Gupta, A., K.N. Kulkarni, S. Yoon, and D.W. Vasco. 2001. Streamlines, Ray Tracing and Production Tomography: Generalization to Compressible Flow. *Petrol. Geosci.* 7 no. Sp. Iss. SI: S75-S86.
- Datta-Gupta, A., S. Yoon, D.W. Vasco, and G.A. Pope. 2002. Inverse Modeling of Partitioning Interwell Tracer Tests: A Streamline Approach. *Water Resour. Res.* 38 no. 6: 1079.
- Dietrich, C.R., and G.N. Newsam. 1993. A fast and exact method for multidimensional Gaussian stochastic simulations. *Water Resour. Res.* 29 no. 8: 2861-2869.
- Dietrich, P., and C. Leven. 2006. Direct push-technologies. In *Groundwater geophysics. A tool for hydrogeology*, ed. R. Kirsch, 321-340. Berlin: Springer.
- Ezzedine, S., and Y. Rubin. 1996. A Geostatistical Approach to the Conditional Estimation of Spatially Distributed Solute Concentration and Notes on the Use of Tracer Data in the Inverse Problem. *Water Resour. Res.* 32 no. 4: 853-862.
- Fienen, M.N., T. Clemo, and P.K. Kitanidis. 2008. An interactive Bayesian geostatistical inverse protocol for hydraulic tomography. *Water Resources Research* 44: 19.
- Franssen, H.J.H., F. Stauffer, P. Renard, H. Demougeot-Renard, and R. Froidevaux. 2005. Inverse stochastic estimation of well capture zones with application to the Lauswiesen site (Tubingen, Germany), 321-330.

- Giambastiani, B.M.S., N. Colombani, and M. Mastrocicco. 2013. Limitation of using heat as a groundwater tracer to define aquifer properties: experiment in a large tank model. *Environmental Earth Sciences* 70 no. 2: 719-728.
- Gómez-Hernández, J.J., A. Sahuquillo, and J.E. Capilla. 1997. Stochastic Simulation of Transmissivity Fields Conditional to Both Transmissivity and Storativity, 1, Theory. *J. Hydrol.* 203: 162-174.
- Gottlieb, J., and P. Dietrich. 1995. IDENTIFICATION OF THE PERMEABILITY DISTRIBUTION IN SOIL BY HYDRAULIC TOMOGRAPHY. *Inverse Problems* 11 no. 2: 353-360.
- Handel, F., and P. Dietrich. 2012. Relevance of Deterministic Structures for Modeling of Transport: The Lauswiesen Case Study. 50: 935-942.
- Harvey, C.F., and S.M. Gorelick. 1995. Temporal Moment-Generating Equations: Modeling Transport and Mass-Transfer in Heterogeneous Aquifers. *Water Resour. Res.* 31 no. 8: 1895-1911.
- Hendricks-Franssen, H.J., J.J. Gomez-Hernandez, J.E. Capilla, and A. Sahuquillo. 1999. Joint Simulation of Transmissivity and Storativity Fields Conditional to Steady-State and Transient Hydraulic Head Data. *Advances Water Resour.* 23 no. 1: 1-13.
- Hendricks-Franssen, H.J., J.J. Gomez-Hernandez, and A. Sahuquillo. 2003. Coupled Inverse Modelling of Groundwater Flow and Mass Transport and the Worth of Concentration Data. *J. Hydrol.* 281 no. 4: 281-295.
- Hendricks-Franssen, H.J.W.M., and J.J. Gomez-Hernandez. 2002. 3D Inverse Modelling of Groundwater Flow at a Fractured Site Using a Stochastic Continuum Model with Multiple Statistical Populations. *Stoch. Environ. Res. Risk Ass.* 16 no. 2: 155-174.
- Hernandez, A.F., S.P. Neuman, A. Guadagnini, and J. Carrera. 2006. Inverse Stochastic Moment Analysis of Steady State Flow in Randomly Heterogeneous Media. *Water Resour. Res.* 42 no. 5.
- Hoeksema, R.J., and P.K. Kitanidis. 1984. An Application of the Geostatistical Approach to the Inverse Problem in Two-Dimensional Groundwater Modeling. *Water Resour. Res.* 20 no. 7: 1003-1020.
- Hoffmann, M. 2013. *Seismische Erkundung des Naturmessfelds Lauswiesen*. Tübingen: Tübingen, Univ., Bachelorarb., 2013.
- Hoffmann, R., and P. Dietrich. 2004. An approach to determine equivalent solutions to the geoelectrical 2D inversion problem. 56: 79-91.
- Hyba, M. 2013. *Geophysical investigation with the purpose of delineating stratigraphic heterogeneities at the Lauswiesen test site : using electrical resistivity techniques (ERT and VES)*. Tübingen: Tübingen, Univ., Bachelorarbeit, 2013.
- Illman, W.A., S.J. Berg, and T.C.J. Yeh. 2012. Comparison of Approaches for Predicting Solute Transport: Sandbox Experiments. *Ground Water* 50 no. 3: 421-431.
- Illman, W.A., X. Liu, and A. Craig. 2007. Steady-State Hydraulic Tomography in a Laboratory Aquifer with Deterministic Heterogeneity: Multi-Method and Multiscale Validation of Hydraulic Conductivity Tomograms. *J. Hydrol.* 341 no. 3-4: 222-234.
- Isabaev, K. 2013. Geostatistical Inference of Hydraulic Conductivity using Hydraulic Tomography at the Lauswiesen Test Site, MSc thesis, Department of Geoscience, University of Tübingen.
- James, A.I., W.D. Graham, K. Hatfield, P.S.C. Rao, and M.D. Annable. 2000. Estimation of spatially variable residual nonaqueous phase liquid saturations in nonuniform flow fields using partitioning tracer data. *Water Resour. Res.* 36 no. 4: 999-1012.
- Jankovic, I., A. Fiori, and G. Dagan. 2013. Effective conductivity of isotropic highly heterogeneous formations: Numerical and theoretical issues. *Water Resources Research* 49 no. 2: 1178-1183.
- Jardani, A., A. Revil, and J.P. Dupont. 2013. Stochastic joint inversion of hydrogeophysical data for salt tracer test monitoring and hydraulic conductivity imaging. *Advances in Water Resources* 52: 62-77.
- Jiménez, S., R. Brauchler, and P. Bayer. 2013. A new sequential procedure for hydraulic tomographic inversion. *Advances in Water Resources* 62, Part A no. 0: 59-70.
- Karaoulis, M., P. Tsourlos, J.H. Kim, and A. Revil. 2014. 4D time-lapse ERT inversion: introducing combined time and space constraints. *Near Surface Geophysics* 12 no. 1: 25-34.
- Kemna, A., J. Vanderborght, B. Kulesa, and H. Vereecken. 2002. Imaging and Characterisation of Subsurface Solute Transport Using Electrical Resistivity Tomography (ERT) and Equivalent Transport Models. *J. Hydrol.* 267 no. 3-4: 125-146.
- Kitanidis, P.K. 1995. Quasi-linear geostatistical theory for inversing. *Water Resour. Res.* 31 no. 10: 2411-2419.
- Klepikova, M.V., T. Le Borgne, O. Bour, K. Gallagher, R. Hochreutener, and N. Lavenant. 2014. Passive temperature tomography experiments to characterize transmissivity and connectivity of preferential flow paths in fractured media. *Journal of Hydrology* 512: 549-562.

- Kuhlman, K.L., A.C. Hinnell, P.K. Mishra, and T.-C.J. Yeh. 2008. Basin-Scale Transmissivity and Storativity Estimation Using Hydraulic Tomography. *Ground Water* 46 no. 5: 706-715.
- Kulkarni, K.N., and A. Datta-Gupta. 2000. Estimating Relative Permeability from Production Data: A Streamline Approach. *SPE Journal* 5 no. 4: 402-411.
- LaBrecque, D., and W. Daily. 2008. Assessment of measurement errors for galvanic-resistivity electrodes of different composition. *Geophysics* 73 no. 2: F55-F64.
- Leaf, A.T., D.J. Hart, and J.M. Bahr. 2012. Active Thermal Tracer Tests for Improved Hydrostratigraphic Characterization. *Ground Water*: no-no.
- Lessoff, S.C., U. Schneidewind, C. Leven, P. Blum, P. Dietrich, and G. Dagan. 2010. Spatial characterization of the hydraulic conductivity using direct-push injection logging. *WATER RESOURCES RESEARCH* 46.
- Leube, P.C., W. Nowak, and G. Schneider. 2012. Temporal moments revisited: Why there is no better way for physically based model reduction in time. *Water Resources Research* 48.
- Leven, C., H. Weiss, T. Vienken, and P. Dietrich. 2011. Direct Push technologies-an efficient investigation method for subsurface characterization. *Grundwasser* 16 no. 4: 221-234.
- Li, T. 2008. Evaluation of thermal tracer test in porous media aquifer, Center for Applied Geoscience, University of Tübingen, Tübingen.
- Li, W., A. Englert, O.A. Cirpka, J. Vanderborght, and H. Vereecken. 2007. Two-dimensional characterization of hydraulic heterogeneity by multiple pumping tests. *Water Resources Research* 43 no. 4.
- Li, W., A. Englert, O.A. Cirpka, and H. Vereecken. 2008. Three-dimensional geostatistical inversion of flowmeter and pumping test data. *Ground Water* 46 no. 2: 193-201.
- Li, W., W. Nowak, and O.A. Cirpka. 2005. Geostatistical inverse modeling of transient pumping tests using temporal moments of drawdown. *Water Resources Research* 41 no. 8.
- Linde, N., A. Revil, A. Boleve, C. Dages, J. Castermant, B. Suski, and M. Voltz. 2007. Estimation of the Water Table Throughout a Catchment Using Self-Potential and Piezometric Data in a Bayesian Framework. *J. Hydrol.* 334 no. 1-2: 88-98.
- Liu, S., T.-C. Yeh, and R. Gardiner. 2002. Effectiveness of Hydraulic Tomography: Sandbox Experiments. *Water Resour. Res.* 38 no. 4: 10.1029/2001WR000338.
- Liu, S.Y., and T.-C.J. Yeh. 2004. An Integrative Approach for Monitoring Water Movement in the Vadose Zone. *Vadose Zone Journal* 3 no. 2: 681-692.
- Liu, X., W.A. Illman, A.J. Craig, J. Zhu, and T.-C.J. Yeh. 2007. Laboratory Sandbox Validation of Transient Hydraulic Tomography. *Water Resour. Res.* 43 no. 5: W05404.
- Lochbuhler, T., J. Doetsch, R. Brauchler, and N. Linde. 2013. Structure-coupled joint inversion of geophysical and hydrological data. *Geophysics* 78 no. 3: ID1-ID14.
- Loke, M.H., T. Dahlin, and D.F. Rucker. 2014a. Smoothness-constrained time-lapse inversion of data from 3D resistivity surveys. *Near Surface Geophysics* 12 no. 1: 5 - 24.
- Loke, M.H., P.B. Wilkinson, J.E. Chambers, and M. Strutt. 2014b. Optimized arrays for 2D cross-borehole electrical tomography surveys. *Geophysical Prospecting* 62 no. 1: 172-189.
- Ma, R., C. Zheng, J.M. Zachara, and M. Tonkin. 2012. Utility of bromide and heat tracers for aquifer characterization affected by highly transient flow conditions. *Water Resources Research* 48 no. 8: n/a-n/a.
- Mao, D.Q., T.C.J. Yeh, L. Wan, C.H. Lee, K.C. Hsu, J.C. Wen, and W.X. Lu. 2013. Cross-correlation analysis and information content of observed heads during pumping in unconfined aquifers. *Water Resources Research* 49 no. 2: 713-731.
- McKenna, S.A., and E.P. Poeter. 1995. Field Example of Data Fusion in Site Characterization. *Water Resour. Res.* 31 no. 12: 3229-3240.
- McLaughlin, D., L.B. Reid, S.-G. Li, and J. Hyman. 1993. A stochastic method for characterizing ground-water contamination. *Ground Water* 31 no. 2: 237-249.
- Nowak, W., and O.A. Cirpka. 2006a. Geostatistical Inference of Hydraulic Conductivity and Dispersion Coefficients from Hydraulic Heads and Tracer Data. *Water Resour. Res.* 42 no. 8: W08416, doi: 10.1029/2005WR004832.
- . 2006b. Geostatistical inference of hydraulic conductivity and dispersivities from hydraulic heads and tracer data. *Water Resources Research* 42 no. 8.
- Nowak, W., S. Tenkleve, and O.A. Cirpka. 2003. Efficient computation of linearized cross-covariance and auto-covariance matrices of interdependent quantities. *Mathematical Geology* 35 no. 1: 53-66.
- Paasche, H., and J. Tronicke. 2007. Cooperative Inversion of 2D Geophysical Data Sets: A Zonal Approach Based on Fuzzy C-Means Cluster Analysis. *Geophysics* 72 no. 3: A35-A39.

- Paasche, H., J. Tronicke, K. Holliger, A.G. Green, and H. Maurer. 2006. Integration of Diverse Physical-Property Models: Subsurface Zonation and Petrophysical Parameter Estimation Based on Fuzzy C-Means Cluster Analyses. *Geophysics* 71 no. 3: H33-H44.
- Panzeri, M., M. Riva, A. Guadagnini, and S.P. Neuman. 2014. Comparison of Ensemble Kalman Filter groundwater-data assimilation methods based on stochastic moment equations and Monte Carlo simulation. 66: 8-18.
- Pedretti, D., and A. Fiori. 2013. Travel time distributions under convergent radial flow in heterogeneous formations: Insight from the analytical solution of a stratified model. 60: 100-109.
- Perri, M.T., G. Cassiani, I. Gervasio, R. Deiana, and A. Binley. 2012. A saline tracer test monitored via both surface and cross-borehole electrical resistivity tomography: Comparison of time-lapse results. *Journal of Applied Geophysics* 79 no. 0: 6-16.
- Perulero Serrano, R., L. Guadagnini, M. Riva, M. Giudici, and A. Guadagnini. 2014. Impact of two geostatistical hydro-facies simulation strategies on head statistics under non-uniform groundwater flow. 508: 343-355.
- Pollock, D., and O.A. Cirpka. 2008. Temporal moments in geoelectrical monitoring of salt tracer experiments. *Water Resources Research* 44 no. 12.
- Pollock, D., and O.A. Cirpka. 2012. Fully coupled hydrogeophysical inversion of a laboratory salt tracer experiment monitored by electrical resistivity tomography. *WATER RESOURCES RESEARCH* 48.
- Porter, D.W., B.P. Gibbs, W.F. Jones, P.S. Huyakorn, L.L. Hamm, and G.P. Flach. 2000. Data Fusion Modeling for Groundwater Systems. *J. Contam. Hydrol.* 42 no. 2-4: 303-335.
- Ramirez, A., W. Daily, D. LaBrecque, E. Owen, and D. Chesnut. 1993. Monitoring an underground steam injection process using electrical resistance tomography. *Water Resour. Res.* 29 no. 1: 73-87.
- Read, T., O. Bour, V. Bense, T. Le Borgne, P. Goderniaux, M.V. Klepikova, R. Hochreutener, N. Lavenant, and V. Boschero. 2013. Characterizing groundwater flow and heat transport in fractured rock using fiber-optic distributed temperature sensing. *Geophysical Research Letters* 40 no. 10: 2055-2059.
- Rein, A., R. Hoffmann, and P. Dietrich. 2004. Influence of natural time-dependent variations of electrical conductivity on DC resistivity measurements. 285: 215-232.
- Renard, P., H. Demougeot-Renard, R. Froidevaux, H.J. Hendricks Franssen, and F. Stauffer. 2005. Inverse stochastic estimation of well capture zones with application to the Lauswiesen site (Tübingen, Germany), 321-330.
- Riva, M., A. Guadagnini, D. Fernandez-Garcia, X. Sanchez-Vila, and T. Ptak. 2008. Relative importance of geostatistical and transport models in describing heavily tailed breakthrough curves at the Lauswiesen site. *Journal of Contaminant Hydrology* 101 no. 1-4: 1-13.
- Riva, M., L. Guadagnini, A. Guadagnini, T. Ptak, and E. Martac. 2006. Probabilistic study of well capture zones distribution at the Lauswiesen field site. *Journal of Contaminant Hydrology* 88 no. 1-2: 92-118.
- Rubin, Y., and S.S. Hubbard. 2005. *Hydrogeophysics*. Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Rucker, D.F., N. Crook, D. Glaser, and M.H. Loke. 2012. Pilot-scale field validation of the long electrode electrical resistivity tomography method. *Geophysical Prospecting* 60 no. 6: 1150-1166.
- Sack-Kühner, B. 1996. Einrichtung des Naturmeßfeldes "Lauswiesen Tübingen": Erkundung der hydraulischen Eigenschaften, Charakterisierung der Untergrundheterogenität und Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Erkundungsverfahren, Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität Tübingen, Tübingen.
- Schneidewind, U. 2008. Determination of hydraulic conductivity using direct-push injection logger, Center for Applied Geoscience, University of Tübingen, Tübingen.
- Schoniger, A., W. Nowak, and H.J.H. Franssen. 2012. Parameter estimation by ensemble Kalman filters with transformed data: Approach and application to hydraulic tomography. *Water Resources Research* 48.
- Schwede, R.L., and O.A. Cirpka. 2009. Use of steady-state concentration measurements in geostatistical inversion. *Advances in Water Resources* 32 no. 4: 607-619.
- Schwede, R.L., O.A. Cirpka, W. Nowak, and I. Neuweiler. 2008. Impact of sampling volume on the probability density function of steady state concentration. *Water Resources Research* 44 no. 12.
- Schwede, R.L., W. Li, C. Leven, and O.A. Cirpka. 2014. Three-dimensional geostatistical inversion of synthetic tomographic pumping and heat-tracer tests in a nested-cell setup. *Advances in Water Resources* 63 no. 0: 77-90.
- Sherrod, L., W. Sauck, and D.D. Werkema. 2012. A Low-Cost, In Situ Resistivity and Temperature Monitoring System. *Ground Water Monitoring & Remediation* 32 no. 2: 31-39.



- Singha, K., and S.M. Gorelick. 2005. Saline Tracer Visualized with Three-Dimensional Electrical Resistivity Tomography: Field-Scale Spatial Moment Analysis. *Water Resour. Res.* 41 no. 5: W05023.
- Slater, L. 2007. Near surface electrical characterization of hydraulic conductivity: From petrophysical properties to aquifer geometries - A review. *Surveys in Geophysics* 28 no. 2-3: 169-197.
- Slater, L., A.M. Binley, W. Daily, and R. Johnson. 2000. Cross-Hole Electrical Imaging of a Controlled Saline Tracer Injection. *J. Appl. Geophys.* 44 no. 2-3: 85-102.
- Straface, S., T.C.J. Yeh, J. Zhu, S. Troisi, and C.H. Lee. 2007. Sequential aquifer tests at a well field, Montalto Uffugo Scalo, Italy. *Water Resources Research* 43 no. 7.
- Sun, A.Y., R.W. Ritzi, and D.W. Sims. 2008. Characterization and modeling of spatial variability in a complex alluvial aquifer: Implications on solute transport. *Water Resources Research* 44 no. 4.
- Sun, N.Z., and W.W.-G. Yeh. 1990. Coupled Inverse Problems in Groundwater Modeling. 1. Sensitivity Analysis and Parameter Identification. *Water Resour. Res.* 26 no. 10: 2507-2525.
- Sykes, J.F., J.L. Wilson, and R.W. Andrews. 1985. Sensitivity analysis for steady-state groundwater-flow using adjoint operators. *Water Resour. Res.* 21 no. 3: 359-371.
- Vanderborght, J., A. Kemna, H. Hardelauf, and H. Vereecken. 2005. Potential of Electrical Resistivity Tomography to Infer Aquifer Transport Characteristics from Tracer Studies: A Synthetic Case Study. *Water Resour. Res.* 41 no. 6: W06013.
- Vasco, D.W., and A. Datta-Gupta. 1999. Asymptotic Solutions for Solute Transport: A Formalism for Tracer Tomography. *Water Resour. Res.* 35 no. 1: 1-16.
- Vasco, D.W., and S. Finsterle. 2004. Numerical Trajectory Calculations for the Efficient Inversion of Transient Flow and Tracer Observations. *Water Resour. Res.* 40 no. 1: W01507.
- Vasco, D.W., H. Keers, and K. Karasaki. 2000. Estimation of reservoir properties using transient pressure data: An asymptotic approach. *Water Resources Research* 36 no. 12: 3447-3465.
- Wagner, V., T. Li, P. Bayer, C. Leven, P. Dietrich, and P. Blum. 2013. Thermal tracer testing in a sedimentary aquifer: field experiment (Lauswiesen, Germany) and numerical simulation. *Hydrogeology Journal* accepted.
- . 2014. Thermal tracer testing in a sedimentary aquifer: field experiment (Lauswiesen, Germany) and numerical simulation. *Hydrogeology Journal* 22 no. 1: 175-187.
- Wilkinson, P.B., M.H. Loke, P.I. Meldrum, J.E. Chambers, O. Kuras, D.A. Gunn, and R.D. Ogilvy. 2012. Practical aspects of applied optimized survey design for electrical resistivity tomography. *Geophysical Journal International* 189 no. 1: 428-440.
- Yeh, T.-C.J., M. Jin, and S. Hanna. 1996. An iterative stochastic inverse method: conditional effective transmissivity and hydraulic head fields. *Water Resour. Res.* 32 no. 1: 85-92.
- Yeh, T.-C.J., C.-H. Lee, K.-C. Hsu, W.A. Illman, W. Barrash, X. Cai, J. Daniels, E. Sudicky, L. Wan, G. Li, and C. L. Winter. 2008. A View Toward the Future of Subsurface Characterization: CAT Scanning Groundwater Basins. *Water Resour. Res.* 44 no. 3: W03301.
- Yeh, T.C.J., and S.Y. Liu. 2000. Hydraulic tomography: Development of a new aquifer test method. *Water Resources Research* 36 no. 8: 2095-2105.
- Zhu, J., X. Cai, and T.-C. Jim Yeh. 2009. Analysis of tracer tomography using temporal moments of tracer breakthrough curves. *Advances in Water Resources* 32 no. 3: 391-400.
- Zhu, J.F., and T.C.J. Yeh. 2005. Characterization of aquifer heterogeneity using transient hydraulic tomography. *WATER RESOURCES RESEARCH* 41 no. 7.
- . 2006. Analysis of hydraulic tomography using temporal moments of drawdown recovery data. *Water Resources Research* 42 no. 2.
- Zimmerman, D.A., G. de Marsily, C.A. Gotway, M.G. Marietta, C.L. Axness, R.L. Beauheim, R.L. Bras, J. Carrera, G. Dagan, P.B. Davies, D.P. Gallegos, A. Galli, J. Gómez-Hernández, P. Grindrod, A.L. Gutjahr, P.K. Kitanidis, A.M. Lavenue, D. McLaughlin, S.P. Neuman, B.S. RamaRao, C. Ravenne, and Y. Rubin. 1998. A comparison of seven geostatistically based inverse approaches to estimate transmissivities for modeling advective transport by groundwater flow. *Water Resour. Res.* 34 no. 6: 1373-1413.