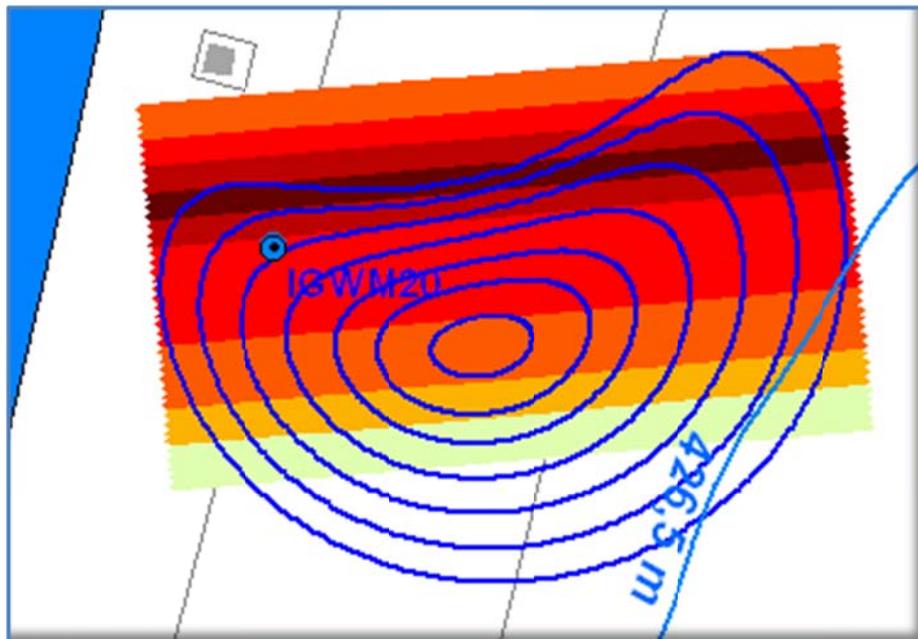


## Vergleichsstudie

„Aufwand-/Qualitätsverhältnis  
von Auswerteverfahren  
für Immissionspumpversuche“

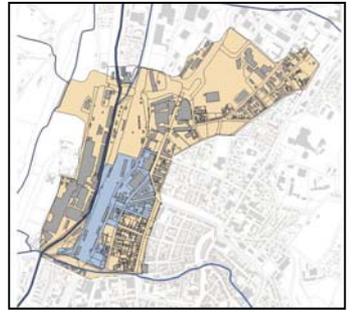


**Bericht Juni 2012**

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG

---



**Autor** Dr. Uwe Hekel, HPC AG, Schütte 12-16, 72108 Rottenburg

**Auftraggeber** Stadt Ravensburg – Bauordnungsamt

**Projektleitung** Stadt Ravensburg, Bauordnungsamt  
Landratsamt Ravensburg, SG Bodenschutz/Altlasten

**Projektleitung** Firmenkonsortium Berghof GmbH & Co. KG und HPC AG

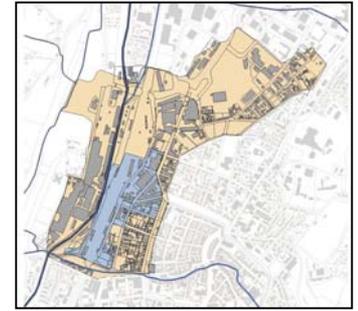
**Projektbeirat**

- Stadt Ravensburg
- Landratsamt Ravensburg
- Regierungspräsidium Tübingen
- Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Karlsruhe
- Bayerisches Landesamt für Umwelt
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Stuttgart
- Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) Freiburg
- Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS) Stuttgart
- Amt für Umweltschutz Stadt Stuttgart
- Deutsche Bahn AG - Sanierungsmanagement Karlsruhe
- Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) Leipzig

**Das Projekt wurde gefördert vom Altlastenfonds Baden-Württemberg**

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg / LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof / HPC AG

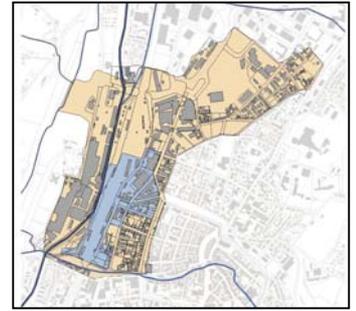


- 3 -

<b>INHALT:</b>		<b>Seite</b>
1	Zusammenfassung.....	7
2	Veranlassung und Ziele.....	9
3	Methodischer Ansatz.....	11
3.1	Einführung .....	11
3.2	Untersuchte Auswerteverfahren .....	12
3.2.1	Vorwärtsrechnung nach SCHWARZ.....	14
3.2.2	Inversionsrechnung nach TEUTSCH ET AL.....	17
3.2.3	IPV-Tool der LUBW (ROTHSCHINK) .....	18
3.2.4	C-SET (HUSS) .....	21
3.2.5	CSTREAM – analytische Lösung (BAYER-RAICH) .....	24
3.2.6	CSTREAM – numerische Lösung (BAYER-RAICH).....	26
3.3	Randbedingungen der Fallstudien zur Untersuchung der Auswerteverfahren.....	28
3.4	Probanden .....	29
3.5	Ermittlung von Aufwand und Ergebnisqualität .....	30
3.5.1	Aufwands- und Kostenermittlung .....	30
3.5.2	Ergebnisermittlung .....	31
3.5.3	Fehlerermittlung .....	32
4	Aufgabenstellungen und Ergebnisdokumentation der Fallstudien .....	33
4.1	Fallgruppe 1 (homogener Aquifer, geringe Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen).....	33
4.2	Fallgruppe 2 (homogener Aquifer, starke Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen).....	34
4.3	Fallgruppe 3 (homogener Aquifer, geringe Grundströmung, mit hydraulischer Vorbeeinflussung) .....	35
4.4	Fallgruppe 4 (inhomogener Aquifer, mit Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen).....	36
5	Aufwand und Praxistauglichkeit der Auswerteverfahren .....	37
5.1	Vorwärtsrechnung nach SCHWARZ.....	38
5.2	Inversionsrechnung nach TEUTSCH ET AL. ....	39
5.3	IPV-Tool (ROTHSCHINK).....	39
5.4	C-SET (HUSS).....	40
5.5	CSTREAM – analytische Lösung (BAYER-RAICH).....	40
5.6	CSTREAM – numerische Lösung (BAYER-RAICH) .....	41
6	Ergebnisqualität der Auswerteverfahren .....	42
6.1	Fallgruppe 1 (homogener Aquifer, geringe Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen).....	42
6.2	Fallgruppe 2 (homogener Aquifer, starke Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen).....	44
6.3	Fallgruppe 3 (homogener Aquifer, geringe Grundströmung, mit hydraulischer Vorbeeinflussung) .....	45
6.4	Fallgruppe 4 (inhomogener Aquifer, mit Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen).....	46

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG



- 4 -

<b>INHALT:</b>		<b>Seite</b>
7	Empfehlungen zum Einsatz der Auswerteverfahren .....	48

## **TABELLEN:**

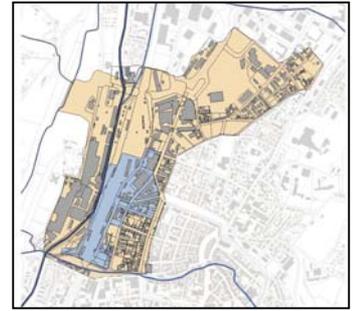
Tabelle 1:	Verfahrenssteckbrief für die Vorwärtsrechnung nach SCHWARZ (2002).....	16
Tabelle 2:	Verfahrenssteckbrief für die Inversionsrechnung aus TEUTSCH ET AL. (2000) .....	18
Tabelle 3:	Verfahrenssteckbrief für das IPV-Tool der LUBW (ROTHSCHINK, 2007) .....	20
Tabelle 4:	Verfahrenssteckbrief für das Programm C-SET.....	23
Tabelle 5:	Verfahrenssteckbrief für die analytische Lösung von CSTREAM.....	25
Tabelle 6:	Verfahrenssteckbrief für die numerische Lösung von CSTREAM .....	27
Tabelle 7:	Auswahlmatrix für geeignete Auswerteverfahren entsprechend der .....	
	Aquiferbedingungen und Einflussfaktoren .....	54

## **ABBILDUNGEN:**

Abbildung 1:	Prinzipdarstellung zum Aufwands-/Qualitätsverhältnis von IPV-Auswertungen (aus ROTHSCHINK, 2005, geringfügig verändert) .....	9
Abbildung 2:	Umsetzung der Vorwärtsrechnung als Excel-Arbeitsblatt .....	15
Abbildung 3:	Inversionsrechnung mit Excel: Eingabetabelle, Berechnung, Ergebnistabelle, Diagramme für die Konzentrationsverteilung auf der Kontrollebene sowie Isochronen und Stromstreifen. Für raumbezogene Kartendarstellungen können die Isochronen und Stromstreifengeometrien im bln-Format exportiert werden.....	17
Abbildung 4:	Eingabetabelle und Konzentrationsverteilungsdigramme des IPV-Tools (aus ROTHSCHINK, 2007) .....	19
Abbildung 5:	Gestaltung des Programms C-SET. Die berechneten Isochronen und Stromstreifenkonzentrationen können unmittelbar als shp-Dateien ausgegeben werden.....	22
Abbildung 6:	Eingabedatei, Berechnung mit CSTREAM und Aufbereitung der Ascii-Datenausgabe mittels Excel – hier im direkten Vergleich mit der analytischen Inversionsrechnung ohne Grundströmung. Die Isochronen werden von CSTREAM als bln-Datei ausgegeben und können mit Surfer dargestellt werden .....	24

# Integrale Atlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG

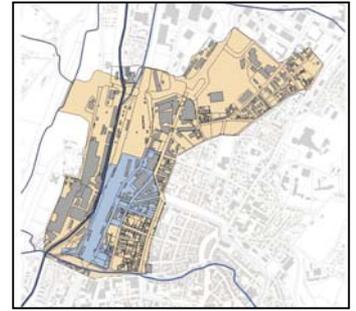


- 5 -

Abbildung 7:	Modflow-Modell zur Berechnung des Strömungsfelds, Eingabedatei und Berechnung mit CSTREAM. Die Isochronen werden von CSTREAM als bin-Datei ausgegeben und können mit Surfer dargestellt werden. Zur Darstellung der Konzentrationsverteilung werden drei Grid-Dateien (linksseitige, rechtsseitige und symmetrische Lösungen) ausgegeben, die ebenfalls in Surfer dargestellt werden können. Zur Darstellung der Konzentrationsverteilung auf der Kontrollebene (hier z. B. mit Excel im direkten Vergleich mit der analytischen Inversionsrechnung) muss auf die Ascii-Ausgabedatei zurückgegriffen werden, die auch die berechneten Volumenströme und Frachten enthält .....	26
Abbildung 8:	Aufwand der Probanden für die Verfahrensanwendungen innerhalb der IPV-Studie .....	37
Abbildung 9:	Aufwand je Verfahrensanwendung in Abhängigkeit von der Häufigkeit der Anwendungen.....	38
Abbildung 10:	Fehlerbereiche für Fahnenlage, $C_{max}$ und Fracht der Auswertungen für homogene Aquiferverhältnisse ohne Einfluss der Grundströmung und ohne hydraulische Beeinflussungen. Unter diesen Randbedingungen liefern alle Verfahren bis auf die zu stark vereinfachende Vorwärtsrechnung nach SCHWARZ gute Ergebnisse mit tolerierbaren Fehlern unter +/- 20 % .....	43
Abbildung 11:	Fehlerbereiche für Fahnenlage, $C_{max}$ und Fracht der Auswertungen für homogene Aquiferverhältnisse mit relevantem Einfluss der Grundströmung und ohne hydraulische Beeinflussungen. Unter diesen Randbedingungen liefern C-SET und CSTREAM (analytisch und numerisch) gute Ergebnisse mit tolerierbaren Fehlern unter +/- 20%. Das IPV-Tool produziert größere Frachtenfehler, wenn sich bei Annäherung an stationäre Bedingungen die Zuwachsbeträge der Entnahmebreite stark verkleinern. ....	44
Abbildung 12:	Fehlerbereiche für Fahnenlage, $C_{max}$ und Fracht der Auswertungen für homogene Aquiferverhältnisse, ohne relevanten Einfluss der Grundströmung jedoch hydraulischen Beeinflussungen durch Nachbarbrunnen. Diesen Einflussfaktor berücksichtigt nur C-SET, die anderen Verfahren produzieren entsprechend der Beeinflussung größere Fehler im Hinblick auf die Fahnenlage .....	46
Abbildung 13:	Fehlerbereiche für Fahnenlage, $C_{max}$ und Fracht der Auswertungen für inhomogene Aquiferverhältnisse, ohne relevante Einflüsse durch Grundströmung und Nachbarbrunnen. Inhomogene Aquiferverhältnisse können nur mit der numerischen Lösung von CSTREAM berücksichtigt werden, sämtliche anderen Verfahren produzieren fehlerhafte Ergebnisse.....	47
Abbildung 14:	Einfache Abschätzung für den Einfluss der Grundströmung. In der Fallstudie 1 (links) kann die Grundströmung vernachlässigt werden, in der Fallstudie 6 (rechts) übersteigt der Einfluss der Grundströmung den Entnahmebreitenzuwachs während des IPV.....	49

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG



- 6 -

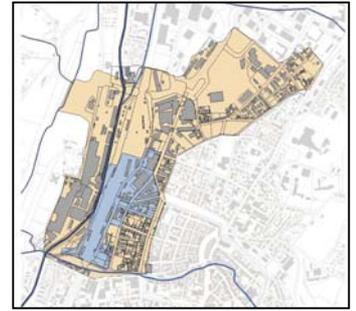
Abbildung 15: Abschätzung der hydraulischen Beeinflussung von Immissionspumpversuchen durch vorausgegangene Pumpversuche in Nachbarbrunnen für die Fallstudien 8 und 9. Weitere Erläuterungen im Text..... 50

## ANHANG:

- 1 Literaturverzeichnis
- 2 Prinzip des Immissionspumpversuchs

## ANLAGEN:

- 1 Aufgabenstellungen der Fallstudien
  - 1.1 Fallstudie 1
  - 1.2 Fallstudie 2
  - 1.3 Fallstudie 3
  - 1.4 Fallstudie 4
  - 1.5 Fallstudie 5
  - 1.6 Fallstudie 6
  - 1.7 Fallstudie 8
  - 1.8 Fallstudie 9
- 2 Ergebnisse für Erfassungsbereich (Isochronen), Konzentration und Fracht
  - 2.1 Fallstudie 1
  - 2.2 Fallstudie 2
  - 2.3 Fallstudie 3
  - 2.4 Fallstudie 4
  - 2.5 Fallstudie 5
  - 2.6 Fallstudie 6
  - 2.7 Fallstudie 8
  - 2.8 Fallstudie 9
- 3 Einzelergebnisse der Aufwands- und Qualitätsauswertung
  - 3.1 Fallstudien der Fallgruppe 1 „homogener Aquifer, geringe Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen“
  - 3.2 Fallstudien der Fallgruppe 2 „homogener Aquifer, starke Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen“
  - 3.3 Fallstudien der Fallgruppe 3 „homogener Aquifer, geringe Grundströmung, mit hydraulischer Vorbeeinflussung“
  - 3.4 Fallstudien der Fallgruppe 4 „inhomogener Aquifer, mit Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen“



## 1 Zusammenfassung

Im Rahmen des durch den Altlastenfonds Baden-Württemberg geförderten Projekts „Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg“ wurden in einer Vergleichsstudie Auswerteverfahren für Immissionspumpversuche untersucht und bewertet. Ziele waren zum einen die Quantifizierung des Aufwand-/Qualitätsverhältnisses der verschiedenen Methoden und zum anderen die Ableitung von Empfehlungen für den Methodeneinsatz bei verschiedenen Randbedingungen, damit Fachbehörden und Landesumweltverwaltung bei künftigen Projekten Geldmittel effizient einsetzen können.

In der Vergleichsstudie werden sechs Verfahren bzw. Tools untersucht, die entsprechend der berücksichtigten Randbedingungen vier Kategorien zuzuordnen sind:

1. Analytische Verfahren für homogene Aquiferverhältnisse ohne Grundströmung
  - Einfache Vorwärtsrechnung nach SCHWARZ, implementiert in Excel
  - Inversionsrechnung nach TEUTSCH ET AL., implementiert in Excel
2. Analytische Verfahren für homogene Aquiferverhältnisse mit Grundströmung
  - IPV-Tool (ROTHSCHINK)
  - CSTREAM – analytische Lösung (BAYER-RAICH)
3. Partikelverfahren für homogene Aquiferverhältnisse mit Grundströmung und hydraulischen Beeinflussungen durch Versuche in Nachbarmessstellen
  - C-SET (Huss)
4. Modellgestützte Verfahren für inhomogene Aquiferverhältnisse mit Grundströmung
  - CSTREAM – numerische Lösung (BAYER-RAICH)

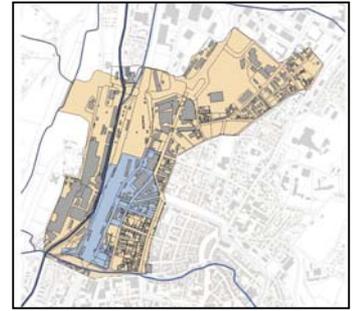
Nicht Gegenstand der Vergleichsstudie sind Ansätze zur Auswertung von Immissionspumpversuchen mit Hilfe komplexerer numerischer Standortmodelle.

In der Vergleichsstudie werden Aufwand und Fehleranfälligkeit der Verfahren bzw. Tools in acht Fallstudien unter verschiedenen Randbedingungen und Einflussfaktoren untersucht. Vier Fallstudien sind reelle Immissionspumpversuche aus der Praxis, sie ermöglichen eine relative Qualitätseinschätzung der Verfahren. Vier Fallstudien mit simulierten Immissionspumpversuchen unter vorgegebenen Aquiferbedingungen und Konzentrationsverteilungen lassen eine absolute Erfassung der Auswertefehler zu.

Die insgesamt 110 Verfahrensanwendungen der Vergleichsstudie wurden von vier Probanden durchgeführt, die Erfahrung aus drei verschiedenen Ingenieurbüros einbringen.

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG

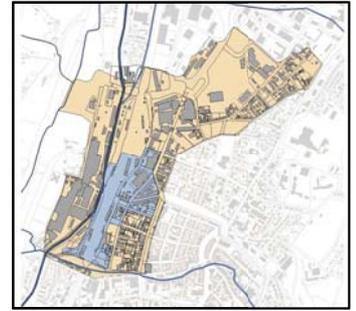


- 8 -

Der ermittelte Zeit- und Kostenaufwand für die Verfahrensanwendung umfasst Beschaffungs- und Einarbeitungsaufwendungen sowie die Zeitdauer für die Datenaufbereitung, Berechnung und Ergebnisdarstellung. Die Studie zeigt, dass der Aufwand einer Verfahrensanwendung unabhängig ist von den Randbedingungen der Fallstudien. Für die analytischen Verfahren und das Partikelverfahren liegt der unter definierten Annahmen für Erfahrung und Fallzahlen ermittelte Aufwand für eine Verfahrensanwendung zwischen ca. 150,- € und 250,- €. Der Aufwand für die numerische Lösung von CSTREAM liegt in einer Größenordnung von 1.000,- €, i. W. bedingt durch die Erstellung des numerischen Modells zur Darstellung der Grundwasserströmungsverhältnisse.

Die Qualität des Ergebnisses wird bestimmt durch die Fehler bei der Berechnung von Fahnenlage, Maximalkonzentration und Fracht. Eine Streuung der Ergebnisse von +/- 10 % ist i. d. R. auf die individuelle Vorgehensweise der Probanden zurückzuführen. Die Vorwärtsverfahren produzieren dabei durch die individuell vorzugebende Ausgangskonzentrationsverteilung eine etwas größere Ergebnisstreuung als die Inversionsverfahren. Wenn die Randbedingungen des Auswerteverfahrens die Aquiferbedingungen und hydraulischen Einflüsse des Immissionspumpversuchs nicht adäquat berücksichtigen, liegen die Fehler i. d. R. deutlich über 20 %. Wenn das Auswerteverfahren überhaupt nicht zu den Aquiferbedingungen passt, sind auch Fehler von über 100 % möglich. Daher ist es für die Auswahl eines geeigneten Auswerteverfahrens unabdingbar, zunächst die Randbedingungen und Einflussfaktoren des auszuwertenden Immissionspumpversuchs zu klären und auf die Annahmen des Auswerteverfahrens abzustimmen.

Die Studie gibt Empfehlungen zur Beurteilung der Relevanz von Aquiferinhomogenitäten, Grundströmung sowie hydraulischen Beeinflussungen durch Versuche in Nachbarbrunnen und zu den jeweils geeigneten Auswerteverfahren.



## 2 Veranlassung und Ziele

Seit mehr als zehn Jahren sind Immissionspumpversuche eine bewährte Methode für die integrale Untersuchung von Schadstoffbelastungen im Grundwasser. In dieser Zeit wurden auch zahlreiche Rechenverfahren, Tools und Programme zur Auswertung von Immissionspumpversuchen entwickelt. Neben weiter verbreiteten einfachen Formeln und Tools gibt es seltener genutzte, aufwendigere Verfahren, die höhere Anforderungen hinsichtlich der Eingabedaten oder Bedienung stellen. Mit diesen aufwendigeren Verfahren können jedoch i. d. R. mehr hydraulische Einflussfaktoren Berücksichtigung finden.

Im Zuge der in Baden-Württemberg durchgeführten integralen Altlastenuntersuchungen wurde des Öfteren die Frage aufgeworfen, ob aufwendigeren Verfahren zur Auswertung von Immissionspumpversuchen ein verhältnismäßiger Nutzen gegenüber steht. Dabei traten prinzipielle Unsicherheiten über den Aufwand einzelner Methoden und die Qualität bzw. die Fehler ihrer jeweiligen Ergebnisse auf.

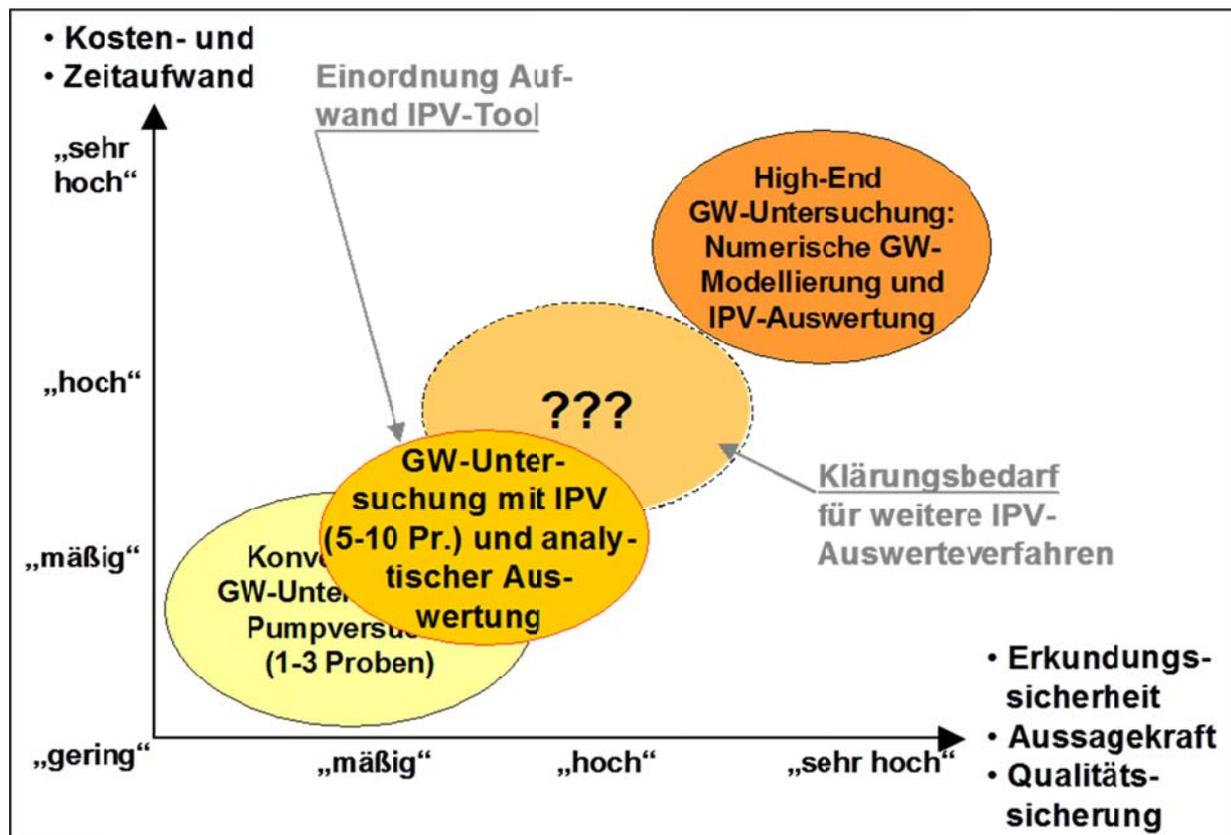
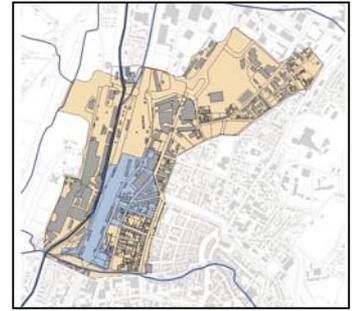


Abbildung 1: Prinzipdarstellung zum Aufwands-/Qualitätsverhältnis von IPV-Auswertungen (aus ROTHSCHINK, 2005, geringfügig verändert)

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG



- 10 -

ROTHSCHINK (2005) präsentiert ein Diagramm (Abbildung 1), das den Kosten- und Zeitaufwand einer Grundwasseruntersuchung mit Immissionspumpversuchen und einfacher analytischer Auswertung als „mäßig“ und die Erkundungssicherheit als deutlich höher gegenüber einer konventionellen Grundwasseruntersuchung einordnet. Er geht davon aus, dass mit dem „sehr hohen Aufwand einer High-End-Grundwasseruntersuchung“ mit einem numerischen Grundwassermodell zur IPV-Auswertung eine „sehr hohe“ Erkundungssicherheit erreicht werden kann. Klärungsbedarf sieht er im Hinblick auf das Aufwand-/Qualitätsverhältnis von Grundwasseruntersuchungen mit Immissionspumpversuchen und neuerer, noch weniger in der Praxis eingesetzter Auswerteverfahren.

Aus dieser Unsicherheit heraus wurde die Idee entwickelt, die vorhandenen Verfahren in einer Vergleichsstudie zu untersuchen, um hieraus Empfehlungen für die Anwendung der einzelnen Methoden abzuleiten. Mit der „Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg“ bestand zudem eine gute Datengrundlage für eine Vergleichsstudie verschiedener Auswertemethoden für Immissionspumpversuche unter verschiedenen Randbedingungen.

Die Idee der Vergleichsstudie wurde im Projektbeirat für die „Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg“ am 15.03.2007 diskutiert. Die Vertreter der beteiligten Fachbehörden sprachen sich für die Durchführung aus. Dabei wurden die folgenden Ziele definiert:

1. Quantifizierung des Aufwand-/Qualitätsverhältnisses der verschiedenen Methoden
2. Ableitung von Empfehlungen für den Methodeneinsatz bei verschiedenen Randbedingungen, damit Fachbehörden und Landesumweltverwaltung bei künftigen Projekten Geldmittel effizient einsetzen können

Anhand ausgewählter Praxisfälle und Immissionspumpversuche mit simulierten Schadstoffverteilungen sollten der Einfluss folgender Faktoren auf das Aufwand-/Qualitätsverhältnis bei den verschiedenen Methoden analysiert werden:

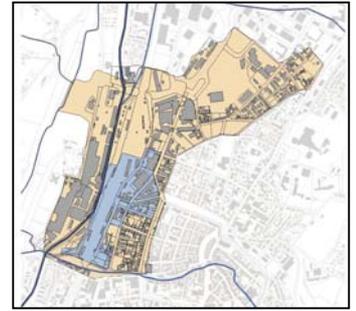
- Relevanz der Grundströmung
- Homogenität des Aquifers
- Konstanz der Entnahmerate
- Gegenseitige Beeinflussung der Entnahmebereiche
- Retardierung
- Anzahl der IPV(-Auswertungen)

Das Firmenkonsortium Berghof/HPC AG erhielt mit dem Ingenieurvertrag vom 22.11.2007 den Auftrag zur Durchführung der Vergleichsstudie.

Die unter den o. a. Vorgaben durchgeführte Studie ist Gegenstand dieses Berichts. Zielsetzung war keine wissenschaftlich-theoretische Arbeit, sondern eine Vergleichsstudie mit Daten aus praktischen Anwendungen, mit „Praktikern“ aus Ingenieurbüros als Probanden und mit allgemein verfügbaren Auswerteverfahren, Tools und Programmen als Untersuchungsgegenstand.

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG



- 11 -

Die Anzahl der Probanden und durchführbaren Fallstudien wurde durch das Budget limitiert. Aus diesem Grund konnte auch der Einflussfaktor „Retardierung“ in der Vergleichsstudie nicht weiter verfolgt werden.

## 3 Methodischer Ansatz

### 3.1 Einführung

Das Prinzip der integralen Untersuchung sowie des Immissionspumpversuchs wird in dieser Studie als bekannt vorausgesetzt. Als sehr gute Zusammenfassung zum Prinzip des Immissionspumpversuchs ist in Anhang 2 die Darstellung aus SCHOLLENBERGER ET AL. (2008) wiedergegeben, die sich i. W. auf die in TEUTSCH ET AL., (2000) veröffentlichte Verfahrensbeschreibung bezieht.

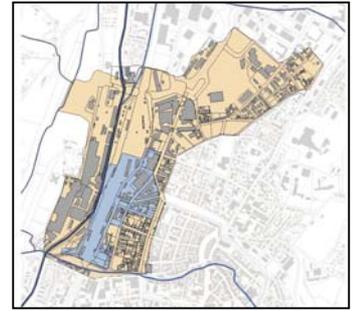
Das Verfahren der Immissionspumpversuche (IPV) wurde Ende der 90er-Jahre am Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Tübingen zur räumlich integralen Grundwasseruntersuchung entwickelt (PTAK & TEUTSCH, 1997, SCHWARZ, PTAK & TEUTSCH, 1997a, b, TEUTSCH ET AL., 2000, PTAK ET AL., 2000, JARSJÖ ET AL. 2002, BAYER-RAICH ET AL., 2003, 2004).

Bedeutende Impulse für die Entwicklung des Verfahrens gingen von einer der ersten großen Praxisanwendung der integralen Grundwasseruntersuchung mittels Immissionspumpversuchen bei der Altlastenuntersuchung im Stuttgarter Neckartal aus (HOLDER ET AL. 1998, HOLDER & TEUTSCH 1999). In den Folgejahren wurde die Methode der Immissionspumpversuche bei weiteren, mit öffentlichen Mitteln geförderten integralen Altlastenuntersuchungen eingesetzt, so z. B. in Ravensburg, Albstadt und Stuttgart-Feuerbach, wobei zur Untersuchung der Schadstoffimmission im Aquifer jeweils 30 - 60 Immissionspumpversuche durchgeführt wurden.

Aber auch bei vielen Altlastenuntersuchungen unterhalb des Maßstabs ganzer Stadtviertel ist der integrale Untersuchungsansatz über das Grundwasser mittels Immissionspumpversuche inzwischen bewährte und bevorzugte Untersuchungsmethode. So wurden allein durch die unterzeichnende HPC AG seit 2003 weit über 250 Immissionspumpversuche in über 20 Projekten mit Flächengrößen zwischen 500 m<sup>2</sup> und 1 km<sup>2</sup> geplant, durchgeführt und ausgewertet. Die hierbei gesammelten Erfahrungen bilden die Grundlage einer vom UfZ Leipzig über TASK (Terra-, Aqua- und Sanierungskompetenzzentrum) geförderten Studie zur Bewertung des Kosten-/Nutzen-Verhältnisses von Immissionspumpversuchen (Handlungsanleitung Kosten-Nutzen-Analyse für Immissionspumpversuche – UfZ, liegt im Entwurf vor – [www.ufz.de](http://www.ufz.de)). Eine weitere, in Arbeit befindliche TASK-Studie beschäftigt sich mit dem Vergleich der analytischen und numerischen Inversion des CSTREAM-Tools mit dem einfachen IPV-Tool (PTAK, mündl. Mitteilung). Der auf diese beiden Tools beschränkte Vergleich wird auf Grundlage simulierter Fälle mit verschiedenen Randbedingungen durch die Autoren selbst vorgenommen. Ein Methodenvergleich unter Praxisbedingungen (Praxisfälle und Probanden) ist dabei nicht vorgesehen.

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG



- 12 -

Aufgrund neuerer wissenschaftlicher Arbeiten (u. a. am Geowissenschaftlichen Zentrum der Universität Göttingen), Weiterentwicklungen der Auswerteverfahren und der in zahlreichen Praxisanwendungen gesammelten Erfahrungen ist für 2013 eine Aktualisierung des 2003 vom Altlastenforum Baden-Württemberg herausgegebenen Statusberichts geplant (BEER ET AL., 2003).

## 3.2 Untersuchte Auswerteverfahren

Gegenstand der Studie sind die in den letzten ca. zehn Jahren bei den in der Altlastenuntersuchung tätigen Ingenieurbüros etablierten einfacheren und komplexeren Verfahren bzw. Tools zur Auswertung von Immissionspumpversuchen. Besonderes Augenmerk der Studie liegt dabei auf den bei der „Integralen Altlastenuntersuchung Ravensburg“ eingesetzten Verfahren. Mit dem Programm C-SET wurde eine relativ neue Programmentwicklung in die Studie aufgenommen, die den in der Praxis häufig auftretenden hydraulischen Störfaktoren „nicht konstante Entnahmerate“ und „gegenseitige Beeinflussung von IPV“ Rechnung trägt. Im Rahmen der „Integralen Altlastenuntersuchung Ravensburg“ wurde C-SET im Nachgang zur Überprüfung und ggf. Eliminierung dieser hydraulischen Einflussfaktoren eingesetzt.

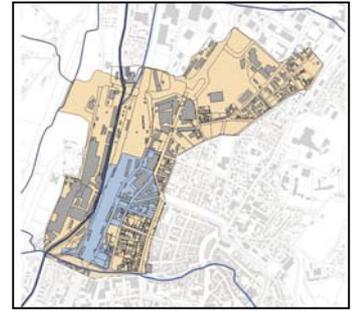
In der Vergleichsstudie wurden sechs Verfahren bzw. Auswertetools untersucht, die entsprechend der berücksichtigten Randbedingungen vier Kategorien zuzuordnen sind:

1. Analytische Verfahren für homogene Aquiferverhältnisse ohne Grundströmung
  - Einfache Vorwärtsrechnung nach SCHWARZ, implementiert in Excel
  - Inversionsrechnung nach TEUTSCH ET AL., implementiert in Excel
2. Analytische Verfahren für homogene Aquiferverhältnisse mit Grundströmung
  - IPV-Tool (Rothschink, LUBW)
  - CSTREAM – analytische Lösung (Bayer-Raich)
3. Partikelverfahren für homogene Aquiferverhältnisse mit Grundströmung und hydraulischen Beeinflussungen durch Versuche in Nachbarmessstellen
  - C-SET (Huss)
4. Modellgestützte Verfahren für inhomogene Aquiferverhältnisse mit Grundströmung
  - CSTREAM – numerische Lösung (Bayer-Raich)

Nicht untersucht wurde der Ansatz des Projekts MAGIC (SCHOLLENBERGER ET AL.). Hierbei wurden die Konzentrationsdurchgänge der Immissionspumpversuche mit einem (vorhandenen) regionalen Grundwasserströmungs- und Transportmodell berechnet. Hierbei wird die Lage der Fahnen solange variiert, bis sich eine bestmögliche Übereinstimmung der gerechneten mit den gemessenen Konzentrationsdurchgängen ergibt. Allein zur Auswertung von Immissionspumpversuchen ist diese Methode jedoch zu aufwendig und daher nicht Gegenstand der Vergleichsstudie. Ihr Vorteil liegt jedoch darin, dass mit dem Modell weitere Fragestellungen untersucht werden können, wie z. B. eine Emittentenermittlung, Prognosen für die Schadstoffausbreitung sowie Sicherungs- und Sanierungsszenarien.

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG



- 13 -

Ebenfalls nicht untersucht wurde auch die modellgestützte Auswertung der Immissionspumpversuche, die bei der „Integralen Altlastenuntersuchung Ravensburg“ zusätzlich mit einem numerischen Grundwasserströmungs- und Transportmodell durchgeführt wurde. Hierbei werden bei invertierter Grundströmung analog zur Pumprate eine Injektionsrate und die (zeitlich umgekehrte) Konzentrationsdurchgangskurve als instationärer Quellterm für den Stofftransport vorgegeben. Aus dieser Berechnung ergibt sich eine Schadstoffverteilung um den Brunnen entsprechend der Isochronen. Diese scheinbare Konzentrationsverteilung muss in einem weiteren, außerhalb des numerischen Modells durchzuführenden Berechnungsschritt in eine stromstreifenförmige Konzentrationsverteilung umgerechnet werden.

Im Rahmen des o. a. MAGIC-Projekts wurde mit dem „MAGIC Software Tool“ auch eine nutzerfreundliche Software zur analytischen Auswertung von Immissionspumpversuchen entwickelt (SCHOLLENBERGER ET AL., download unter [www.magic-cadses.com](http://www.magic-cadses.com)). Wie das IPV-Tool von ROTHSCHINK beruht diese Software auf einem Inversionsansatz, der den Einfluss der Grundströmung durch den nach BEAR & JACOB berechneten Zuwachs der Entnahmebreite berücksichtigt. Das Programm ermöglicht wie das IPV-Tool von ROTHSCHINK eine grafikgestützte IPV-Planung, darüber hinaus jedoch eine weitergehende Visualisierung und Ausgabemöglichkeiten für die Ergebnisse in Form von Isochronen- und Stromstreifendarstellungen. Da das „MAGIC Software Tool“ im Vergleich zum IPV-Tool von ROTHSCHINK keinen grundlegend neuen Ansatz oder andere Randbedingungen enthält, wurde im Rahmen der vorliegenden Studie das gebräuchlichere IPV-Tool von ROTHSCHINK untersucht.

Für die nachfolgend behandelten Verfahren zur Auswertung eines Immissionspumpversuchs müssen folgende Aquifer- und Versuchsparameter vorliegen:

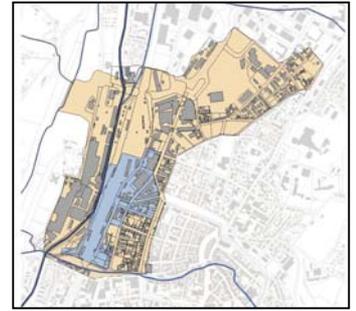
- Aquifermächtigkeit
- effektive Porosität des Aquifers
- Durchlässigkeitsbeiwert des Aquifers
- hydraulischer Gradient
- Pumprate
- Zeit-Konzentrationswerte für die Proben während des IPV

Zusätzlich für Verfahren mit einer raumbezogenen Darstellung von Isochronen- und Stromstreifenkonzentrationen:

- Fließrichtung
- Brunnenkoordinaten

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG



- 14 -

Zusätzlich für Verfahren mit Berücksichtigung hydraulischer Einflüsse:

- Brunnenkoordinaten der beeinflussenden Brunnen
- Pumpraten und Pumpzeiten der beeinflussenden Brunnen
- Pumpratenerverlauf des IPV-Brunnen

Zusätzlich für Verfahren mit Berücksichtigung von Aquiferinhomogenitäten und Randbedingungen im Einflussbereich des Immissionspumpversuchs:

- Grundwasserströmungsmodell, das die inhomogene Parameterverteilung und hydraulische Randbedingungen abbildet

Im Hinblick auf den berechneten Abstand einer Schadstofffahne vom Brunnen besteht bei allen Verfahren die Unsicherheit, ob diese links oder rechts vom Brunnen liegt oder ob eine beidseitige Konzentrationsverteilung vorliegt. Diese Unsicherheit kann durch die Auswertung eines einzelnen Immissionspumpversuchs nicht aufgelöst werden. Hierzu sind Befunde aus Nachbarbrunnen auf der Kontrollebene mit überlappendem Einzugsgebiet oder sonstige Informationen zur Schadstoffverteilung im Aquifer oder Lage des Emittenten notwendig.

## 3.2.1 Vorwärtsrechnung nach SCHWARZ

Eine einfache Berechnung des Konzentrationsdurchgangs im Brunnen während eines IPV ohne Berücksichtigung der Grundströmung präsentiert SCHWARZ (2002). Die Fahnenlage wird dabei durch den Abstand der Fahnenränder zum Brunnen und einen (konstanten) Wert für die Fahnenkonzentration vorgegeben.

Für jeden Probennahmezeitpunkt wird das (konzentrische) Einzugsgebiet berechnet. Über Winkelbeziehungen werden die Flächenanteile der Fahne berechnet. Die Konzentration im Brunnen wird durch Verdünnung der belasteten Flächenanteile mit der Gesamtfläche des Einzugsgebiets bestimmt.

Als Vorwärtsverfahren müssen für die Bestimmung der räumlichen Konzentrationsverteilung die Annahmen für die Fahnenrandabstände und die Fahnenkonzentration so lange variiert werden, bis eine bestmögliche Anpassung des errechneten zum im Brunnen gemessenen Konzentrationsdurchgang erreicht wird.

Das Berechnungsverfahren kann relativ leicht in Form einer Tabellenkalkulation umgesetzt werden. Dabei ist es auch möglich, mehrere Fahnenannahmen zu überlagern und somit auch etwas komplexere Fahnen, z. B. mit einem stärker belasteten Fahnenkern und geringeren Konzentrationen in den Randbereichen, darzustellen.

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

## Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg

### Firmenkonsortium Berghof/HPC AG

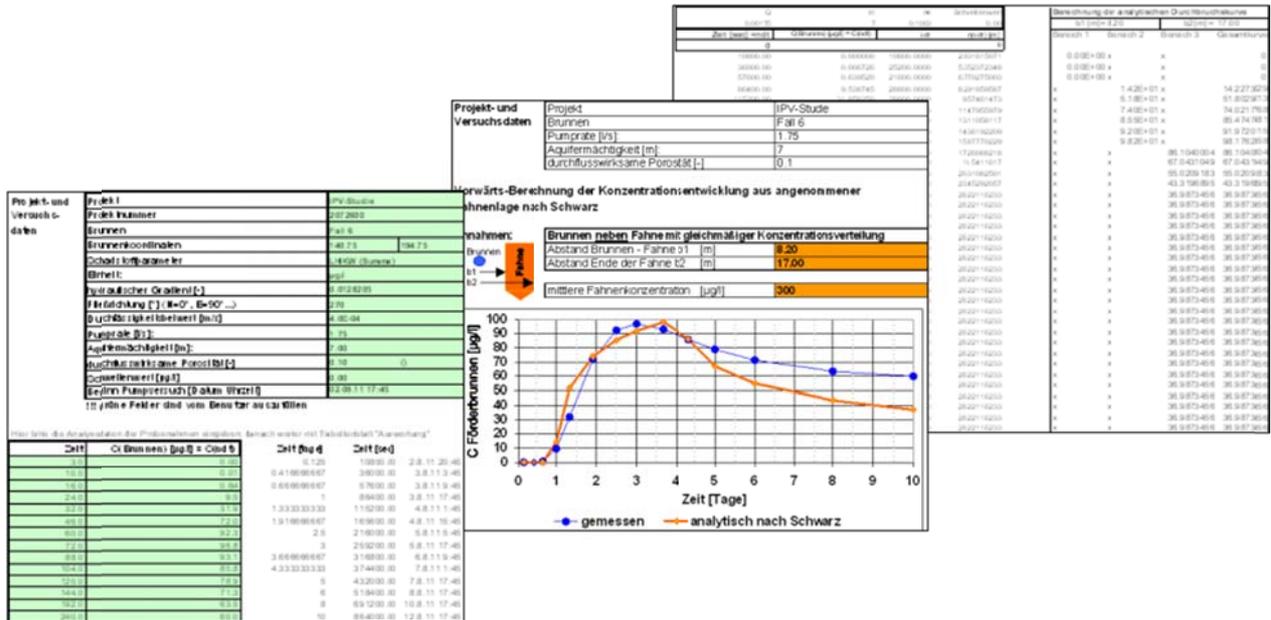
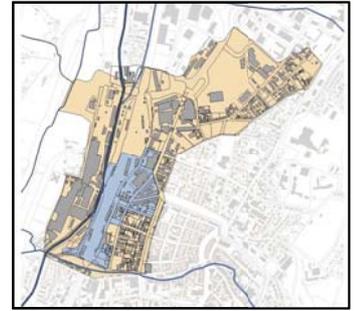
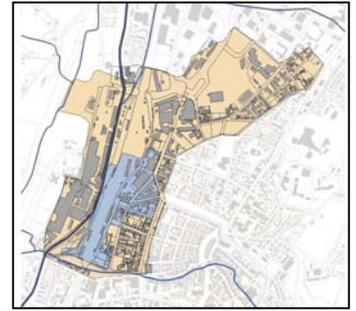


Abbildung 2: Umsetzung der Vorwärtsrechnung als Excel-Arbeitsblatt

Die Randbedingungen der Vorwärtsrechnung sowie die Vorgehensweise zu Dateneingabe, Berechnung und Datenausgabe sind in Tabelle 1 dargestellt.

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

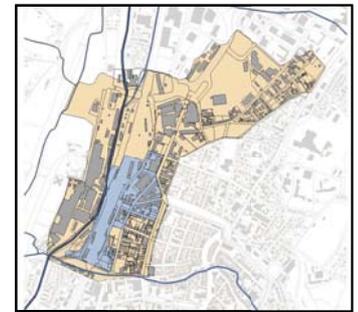
Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG



- 16 -

<b>Programm/Tool</b>	<b>Excel/"C-vorwärts"</b>
Betriebssystem Autor Verfahren Verfügbarkeit  Methode	WINDOWS SCHWARZ (2002) entsprechend der in Schwarz (2002) angegebenen Formeln leicht in Excel-Arbeitsblatt umsetzbar  Vorwärtsrechnung des Konzentrationsdurchgangs im Brunnen aus Vorgabe der Fahnenlage und einer konstanten Fahnenkonzentration
<b>Randbedingungen</b> Schadstofffahne  Aquifer Grundströmung Pumprate Benachbarte IPV gleichzeitig Benachbarte IPV vorangegangen	kein Konzentrationsgradient in Fließrichtung kein Konzentrationsgradient über die Aquifermächtigkeit keine Schadstoffquelle im Einzugsbereich keine chemischen Reaktionen, Dispersion, Sorption, Desorption homogen (Durchlässigkeit, Aquifermächtigkeit und Porosität konstant) keine, radialsymmetrische Brunnenanströmung konstant keine keine
<b>Dateneingabe</b> Aquiferparameter Brunnenkoordinaten Pumprate Konzentrationsverlauf im Brunnen Besonderheiten	Eingabe in Excel-Arbeitsblatt Raumbezug wird nicht berücksichtigt Eingabe in Excel-Arbeitsblatt Eingabe in Excel-Arbeitsblatt keine
<b>Berechnung</b> Erforderliche Arbeitsschritte  Bildschirmgrafik Werteanzeige	Interaktive Vorgabe des Fahnenabstands vom Brunnen und der Fahnenkonzentration durch Werteeingabe in Excel-Arbeitsblatt. Vergleich und Anpassung des gerechneten und gemessenen Konzentrationsdurchgangs; Fahnen beidseitig und einseitig vom Brunnen lassen sich kombinieren.  gerechneter und gemessener Konzentrationsdurchgang im Brunnen vorgegebene Fahnenabstände und vorgegebener Konzentrationswert maximale Reichweite und Fracht
<b>Datenausgabe</b> Konzentration auf Kontrollebene Isochronen Stromstreifen Zusätzl. benötigte Programme	<b>keine</b>

**Tabelle 1:** Verfahrenssteckbrief für die Vorwärtsrechnung nach SCHWARZ (2002)

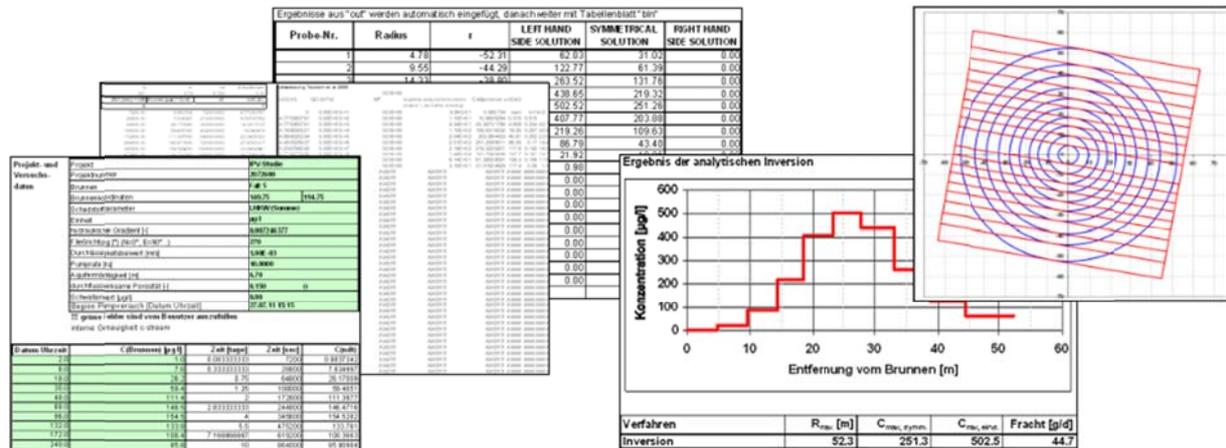


### 3.2.2 Inversionsrechnung nach TEUTSCH ET AL.

Neben der Vorwärtsrechnung präsentiert SCHWARZ (2002) auch eine analytische Inversionsrechnung ohne Berücksichtigung der Grundströmung. Der Ansatz sowie die Berechnungsformeln sind in TEUTSCH ET AL. (2000) dargestellt.

Nach SCHWARZ (2002) basiert das Auswerteverfahren auf einer Inversion der während der Pumpmaßnahmen im Förderstrom gemessenen Konzentrationsganglinien. Die im Förderstrom gemessene Konzentration wird dabei als eine Mischkonzentration des räumlichen Bereichs zwischen zwei Isochronen interpretiert. Ergebnis der Inversionsrechnung ist die räumliche Konzentrationsverteilung auf der Kontrollebene in Form von Stromstreifen mit den berechneten Stromstreifenkonzentrationen. Die mögliche räumliche Auflösung der Konzentrationsverteilung wird von der Anzahl und Verteilung der Probennahmezeitpunkte bestimmt.

Die in TEUTSCH ET AL. (2000) präsentierte Inversionsformel kann in Form einer Tabellenkalkulation umgesetzt werden. Gewisse Herausforderungen stellen dabei die Umsetzung der Winkelfunktionen und die Summenbildung dar.

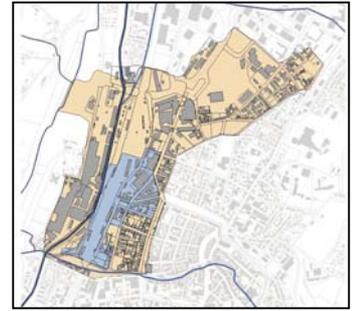


**Abbildung 3:** Inversionsrechnung mit Excel: Eingabetabelle, Berechnung, Ergebnistabelle, Diagramme für die Konzentrationsverteilung auf der Kontrollebene sowie Isochronen und Stromstreifen. Für raumbezogene Kartendarstellungen können die Isochronen und Stromstreifengeometrien im bIn-Format exportiert werden.

Die Randbedingungen der analytischen Inversionsrechnung sowie die Vorgehensweise bei Dateneingabe, Berechnung und Datenausgabe sind in Tabelle 2 dargestellt.

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG



- 18 -

Programm/Tool	Excel/"C-invers"
Betriebssystem Autoren Verfahren Verfügbarkeit Methode	WINDOWS TEUTSCH ET AL. (2000), SCHWARZ (2002) Die in TEUTSCH ET AL. (2000) angegebenen Formeln sind in einem Excel-Arbeitsblatt umsetzbar. Inversionsrechnung der Schadstoffimmission aus Konzentrationsdurchgang im Brunnen
<b>Randbedingungen</b> Schadstofffahne  Aquifer Grundströmung Pumprate Benachbarte IPV gleichzeitig Benachbarte IPV vorangegangen	kein Konzentrationsgradient in Fließrichtung kein Konzentrationsgradient über die Aquifermächtigkeit keine Schadstoffquelle im Einzugsbereich keine chemischen Reaktionen, Dispersion, Sorption, Desorption homogen (Durchlässigkeit, Aquifermächtigkeit und Porosität konstant) keine, radialsymmetrische Brunnenanströmung konstant keine keine
<b>Dateneingabe</b> Aquiferparameter Brunnenkoordinaten Pumprate Konzentrationsverlauf im Brunnen Besonderheiten	Eingabe in Excel-Arbeitsblatt Eingabe in Excel-Arbeitsblatt Eingabe in Excel-Arbeitsblatt Eingabe in Excel-Arbeitsblatt keine
<b>Berechnung</b> Erforderliche Arbeitsschritte  Bildschirmgrafik  Werteanzeige	automatische Inversionsrechnung aus eingegebenem Konzentrationsverlauf im Brunnen  <ul style="list-style-type: none"> <li>• gemessener Konzentrationsdurchgang im Brunnen</li> <li>• berechnete Konzentrationsverteilung im Abstand vom Brunnen (linksseitige, rechtsseitige und symmetrische Lösung)</li> <li>• Darstellung von Isochronen und Stromstreifen als x-y-Diagramm</li> </ul> maximale Reichweite, maximale Konzentration und Fracht
<b>Datenausgabe</b> Konzentration auf Kontrollebene Isochronen Stromstreifen Zusätzl. benötigte Programme	Excel-Tabelle (linksseitige, rechtsseitige und symmetrische Lösungen) Export als raumbezogene bln-Datei Export als raumbezogene bln-Datei (ohne Konzentrationen) zur Darstellung der Fahnenkonzentrationen können die bln-Datei mit surfer in das shp-Format umgewandelt und die Stromstreifenkonzentrationen aus der Excel-Tabelle in die Attributtabelle kopiert werden

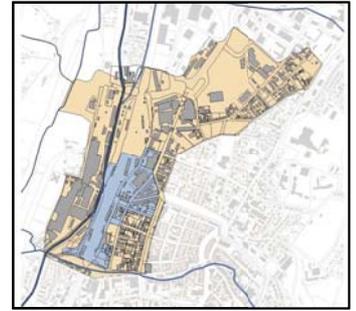
**Tabelle 2:** Verfahrenssteckbrief für die Inversionsrechnung aus TEUTSCH ET AL. (2000)

### 3.2.3 IPV-Tool der LUBW (ROTHSCHINK)

Das IPV-Tool von ROTHSCHINK (2007) ist eine Planungs- und Auswertungshilfe für die Durchführung von Immissionspumpversuchen mittels eines analytischen Ansatzes auf Excel-Basis. Die Berechnung der Geometrie der Entnahmebreite (bzw. ihrer Zunahme von Probe zu Probe) erfolgt über die Strömungsgleichung von BEAR & JACOBS.

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

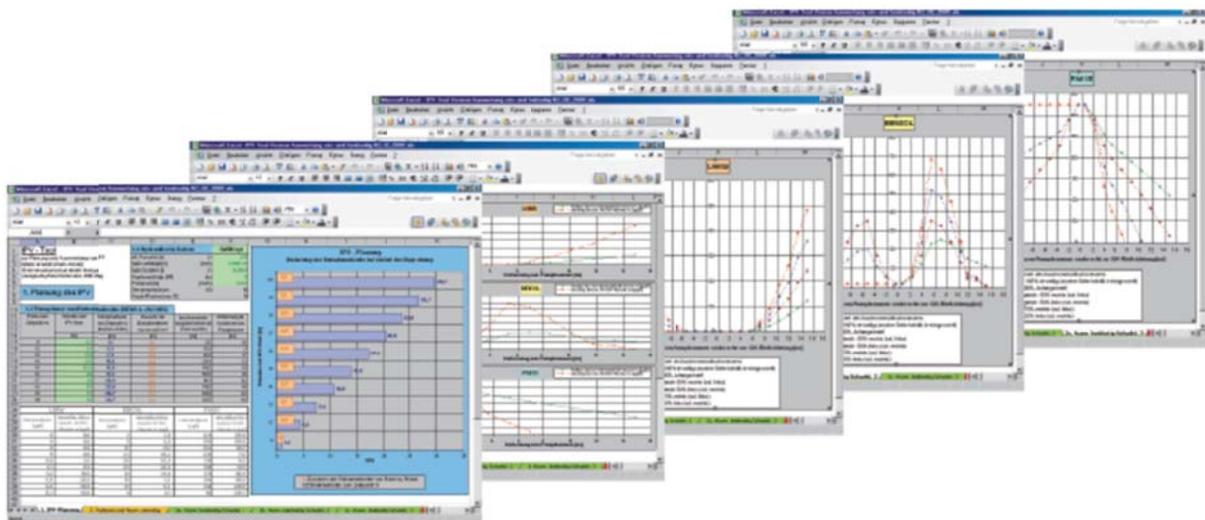
Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG



- 19 -

Das IPV-Tool enthält eine Vielzahl nützlicher Auswertungen und Plausibilitätsprüfungen bei der Vorbereitung und Nachberechnung von (Immissions-)Pumpversuchen, wie z. B.:

- Abschätzung der erreichbaren Entnahmebreite eines Pumpversuchs (analytischer Lösungsansatz nach BEAR & JACOBS, 1965)
- Optimierung von Pumpdauer und Förderrate
- Optimale Festlegung der Beprobungszeitpunkte eines IPV (max. zehn Proben)
- Abschätzung der „tatsächlichen“ Schadstoffkonzentration im Grundwasser
- Abschätzung der Entfernung der „tatsächlichen“ Schadstoffkonzentration vom Pumpbrunnen
- Ermittlung des Grundwasservolumenstroms durch den erfassten Grundwasserquerschnitt
- Ermittlung der durchschnittlichen Schadstoffkonzentrationen im erfassten Grundwasserquerschnitt
- Ermittlung der Schadstofffracht im erfassten Grundwasserquerschnitt



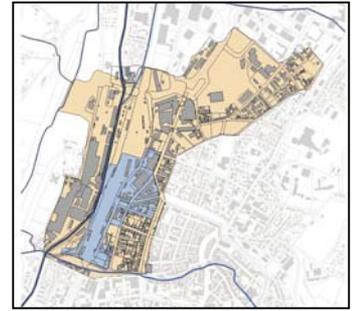
**Abbildung 4:** Eingabetabelle und Konzentrationsverteilungsdiagramme des IPV-Tools (aus ROTHSCHINK, 2007)

Die Randbedingungen der Berechnung mit dem IPV-Tool sowie die Vorgehensweise bei Dateneingabe, Berechnung und Datenausgabe sind in Tabelle 3 dargestellt.

Insbesondere wird vorausgesetzt, dass die Probennahmezeitpunkte einem äquidistanten Entnahmebreitenzuwachs entsprechen und die Isochronen nahezu radialsymmetrisch bleiben. Dies schränkt die Verwendbarkeit des Tool bei stärkerer Grundströmung ein.

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG



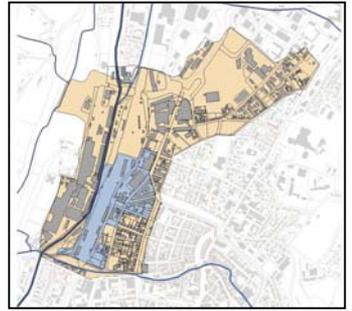
- 20 -

Programm/Tool	IPV-Tool (LUBW Baden-Württemberg)
Betriebssystem Autoren Verfahren Verfügbarkeit  Methode	WINDOWS ROTHSCHINK (2007) Download bei LUBW ( <a href="http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de">www.lubw.baden-wuerttemberg.de</a> ) Themen > Altlasten > Anwendungsprogramme > IPV-Tool Berechnung der Entnahmebreite nach BEAR & JACOBS, Berechnung der Schadstoffkonzentrationsverteilung auf der Kontrollebene aus Konzentrationsdurchgang im Brunnen auf Grundlage des Entnahmebreitenzuwachses
<b>Randbedingungen</b> Schadstofffahne  Aquifer Grundströmung  Pumprate Benachbarte IPV gleichzeitig Benachbarte IPV vorangegangen	kein Konzentrationsgradient in Fließrichtung kein Konzentrationsgradient über die Aquifermächtigkeit keine Schadstoffquelle im Einzugsbereich keine chemischen Reaktionen, Dispersion, Sorption, Desorption homogen (Durchlässigkeit, Aquifermächtigkeit u. Porosität konstant) Durch die Berechnung der Entnahmebreite nach BEAR&JACOBS wird der durch die Grundströmung verminderte Zuwachs berücksichtigt. Dennoch wird vorausgesetzt, dass die Isochronen der Entnahmepunkte nahezu radialsymmetrisch sind. Die Probennahmezeitpunkte sind so zu wählen, dass sich in etwa gleiche Zuwachsbeträge der Entnahmebreite ergeben. konstant keine keine
<b>Dateneingabe</b> Aquiferparameter Brunnenkoordinaten Pumprate Konzentrationsverlauf im Brunnen Besonderheiten	Eingabe in Excel-Arbeitsblatt Raumbezug wird nicht berücksichtigt Eingabe in Excel-Arbeitsblatt Eingabe in Excel-Arbeitsblatt Integrierte Planungshilfe für sinnvolle Probennahmezeitpunkte
<b>Berechnung</b> Erforderliche Arbeitsschritte  Bildschirmgrafik  Werteanzeige	automatische Berechnung der Konzentrationsverteilung auf der Kontrollebene als einseitige oder beidseitige Lösung <ul style="list-style-type: none"> <li>• Änderung der Entnahmebreite im Verlauf der Beprobung</li> <li>• gemessener Konzentrationsdurchgang im Brunnen</li> <li>• berechnete Konzentrationsverteilung im Abstand vom Brunnen (einseitige und beidseitige Lösungen)</li> </ul> Ø-Konzentration, Volumenstrom und Fracht
<b>Datenausgabe</b> Konzentration auf Kontrollebene Isochronen  Stromstreifen Zusätzl. benötigte Programme	Excel-Tabelle (einseitige und beidseitige Lösungen) Excel-Tabelle mit Entfernung angenommen konzentrischer Isochronen zum Brunnen keine keine

**Tabelle 3:** Verfahrenssteckbrief für das IPV-Tool der LUBW (ROTHSCHINK, 2007)

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG



- 21 -

Ausgehend von einer radialsymmetrischen Brunnenanströmung setzt der Berechnungsalgorithmus die gemessene Anfangskonzentration der Probe 1 als in Strömungsrichtung halbseitig konstant an. Konzentrationsänderungen der Durchgangskurve werden somit zunächst vollständig (d. h. zu 100 %) nur einer Seite, d. h. der halben Entnahmebreite, zugeschrieben. Die für den jeweiligen Stromstreifen errechnete Schadstoffkonzentration kann somit von der tatsächlich im Grundwasser vorhandenen Konzentration abweichen. Bei unplausibler Konzentrationsverteilung bietet das IPV-Tool weitere Varianten für die Schadstoffverteilung. So ist z. B. auch eine symmetrische Schadstoffverteilung möglich, indem die Konzentrationsänderung zu jeweils 50 % beiden Seiten zugerechnet wird.

## 3.2.4 C-SET (Huss)

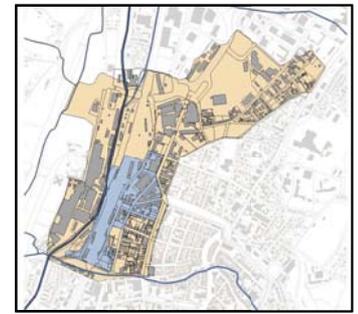
Das Programm C-SET (Concentration-Superposition Evaluation Tool) ist ein Windows-Programm zur Auswertung von Immissionspumpversuchen.

Mit C-SET wird in einer Vorwärtsrechnung aus einer vorzugebenden Konzentrationsverteilung der Konzentrationsdurchgang im Brunnen während des Immissionspumpversuchs berechnet. Durch Vergleich mit dem gemessenen Konzentrationsdurchgang und iterative Anpassung lässt sich eine passende Ausgangskonzentrationsverteilung bestimmen (Huss, 2012).

Der Vorteil von C-SET ist, dass neben einer (parallelen) Grundströmung viele in der Praxis häufig auftretende hydraulische Einfluss- bzw. Störfaktoren berücksichtigt werden können, wie z. B.

- Beeinflussungen durch parallel betriebene Brunnen
- Fahnenverschleppungen durch Pumpmaßnahmen vor dem betrachteten IPV, z. B. durch IPVs in Nachbarbrunnen
- Schwankungen der Pumprate(n)
- Pumpausfallzeiten

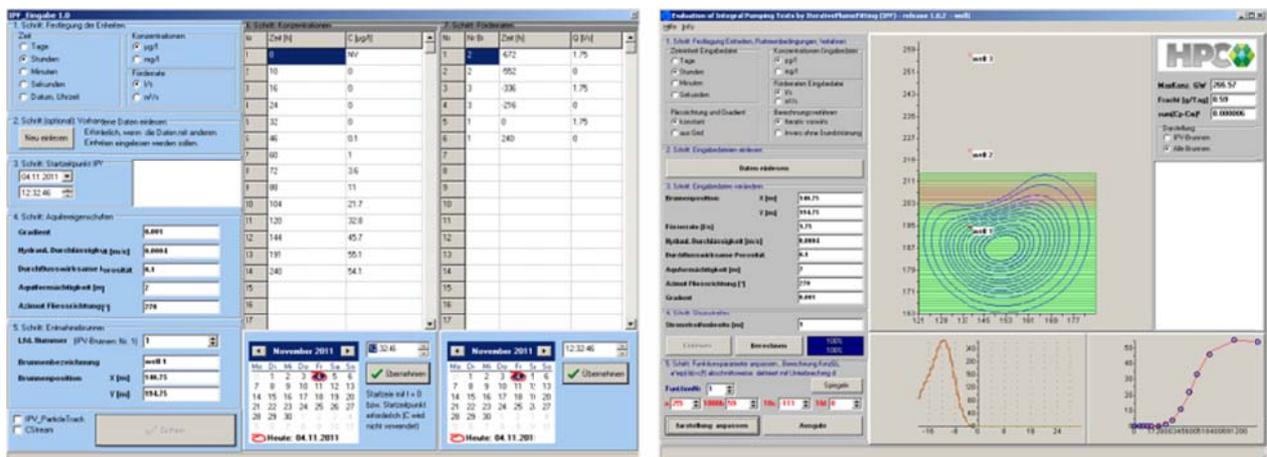
Die Eingabe aller hydraulischen Einflüsse erfolgt in einfacher Weise über die Koordinaten des einflussnehmenden Brunnens sowie die Zeit (in Bezug auf den Start des betrachteten IPV) und die (jeweilige) Pumprate.



Die zeitliche Konzentrationsentwicklung im Entnahmebrunnen wird mit Hilfe eines Particle-Tracking-Verfahrens ermittelt. Jedes Partikel repräsentiert hierbei das gleiche Elementarvolumen Grundwasser. In einem ersten Schritt werden unter Berücksichtigung von Brunnenanströmung, Grundströmung und hydraulischer Vor- und Quereinflüsse die Startpositionen von Partikeln rückgerechnet, welche den Brunnen zum Zeitpunkt der Probennahme erreichen. Aus der Verbindung der Startpunkte ergeben sich die Isochronen für die Probennahmezeitpunkte. Im nächsten Schritt wird den Partikeln die für ihre jeweilige Ortskoordinate vorgegebene Konzentration zugeordnet. Die Konzentration im Brunnen zum jeweiligen Probennahmezeitpunkt ergibt sich aus dem Mittelwert der Partikelkonzentrationen. Aus den berechneten Konzentrationswerten der einzelnen Probennahmezeitpunkte ergibt sich der Konzentrationsdurchgang im Brunnen.

Die Konzentrationsverteilung im Aquifer wird über Gauß-Funktionen vorgegeben, wobei durch Überlagerung mehrerer Gauß-Funktionen auch komplexere Schadstofffahnen dargestellt werden können. Lage, (Konzentrations-)Höhe, Breite und Konzentrationsgradient am Fahnenrand können über „Scroll“-Schalter verändert werden, wobei gleichzeitig der nach o. a. Particle-Tracking-Verfahren berechnete Konzentrationsdurchgang im Brunnen als Kurve über den gemessenen Konzentrationen angezeigt wird. Durch entsprechendes „scrollen“ kann der berechnete Konzentrationsdurchgang relativ rasch und einfach an die beim IPV gemessenen Konzentrationen angepasst werden. Für jede Konzentrationsverteilung werden die Werte für die maximale Schadstoffkonzentration sowie die resultierende Schadstofffracht angezeigt.

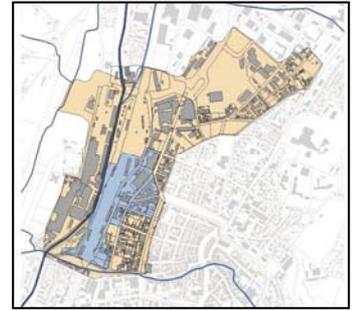
Mit „C-SET“ ist die Ausgabe von Isochronen und Stromstreifenkonzentrationen in Form von shp-Dateien möglich, die unmittelbar mittels GIS raumbezogen dargestellt werden können. Daneben wird die berechnete Konzentrationsverteilung auch tabellarisch als Konzentration entlang der Kontrollebene ausgegeben.



**Abbildung 5:** Gestaltung des Programms C-SET. Die berechneten Isochronen und Stromstreifenkonzentrationen können unmittelbar als shp-Dateien ausgegeben werden

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG

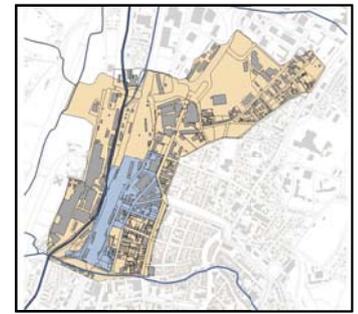


- 23 -

Die Randbedingungen der Berechnung mit C-SET sowie die Vorgehensweise bei Dateneingabe, Berechnung und Datenausgabe sind in Tabelle 4 dargestellt.

Programm/Tool	C-SET
Betriebssystem Autor Verfahren Verfügbarkeit Methode	WINDOWS Huss (2012) Download bei LUBW ( <a href="http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de">www.lubw.baden-wuerttemberg.de</a> ) geplant Berechnung von Partikelstartpunkten der Probennahmezeitpunkte durch Überlagerung der Brunnenanströmung, der Grundströmung sowie beliebiger hydraulischer Einflüsse durch weitere Brunnen Vorwärtsrechnung des Konzentrationsdurchgangs im Brunnen aus Vorgabe der Konzentrationsverteilung über Gauß-Funktionen; Berechnung des Konzentrationsdurchgangs aus Partikelmischung
<b>Randbedingungen</b> Schadstofffahne  Aquifer Grundströmung Pumprate Benachbarte IPV gleichzeitig Benachbarte IPV vorangegangen	kein Konzentrationsgradient in Fließrichtung kein Konzentrationsgradient über die Aquifermächtigkeit keine Schadstoffquelle im Einzugsbereich keine chemischen Reaktionen, Dispersion, Sorption, Desorption homogen (Durchlässigkeit, Aquifermächtigkeit und Porosität konstant) parallele Grundströmung wird berücksichtigt Ratenschwankungen und Pumpunterbrechungen werden berücksichtigt möglich möglich
<b>Dateneingabe</b> Aquiferparameter Brunnenkoordinaten Pumprate Konzentrationsverlauf im Brunnen Besonderheiten	vorgegebene Eingabemasken vorgegebene Eingabemasken vorgegebene Eingabemasken vorgegebene Eingabemasken Zeitformate und Einheiten wählbar
<b>Berechnung</b> Erforderliche Arbeitsschritte  Bildschirmgrafik  Werteanzeige	Vorgabe und Anpassung von Fahnenkonzentration, Fahnenlage und Fahnenbreite mittels „Scroll“-Schalter; der resultierende Konzentrationsdurchgang im Brunnen wird unmittelbar grafisch dargestellt und mit dem gemessenen Konzentrationsdurchgang zur Deckung gebracht. <ul style="list-style-type: none"><li>• vorgegebene Konzentrationsverteilung auf der Kontrollebene</li><li>• Fahnengeometrie mit vorgegebene Stromstreifenkonzentrationen</li><li>• Isochronendarstellung</li><li>• gerechneter und gemessener Konzentrationsdurchgang im Brunnen</li></ul> Güte der Anpassung, maximale Konzentration und Fracht
<b>Datenausgabe</b> Konzentration auf Kontrollebene Isochronen Stromstreifen Zusätzl. benötigte Programme	Excel-Datei mit C(r)-Tabelle raumbezogene shp-Datei (Isochronen.shp) raumbezogene shp-Datei (Stromstreifen.shp mit Konzentrationen) keine

**Tabelle 4:** Verfahrenssteckbrief für das Programm C-SET

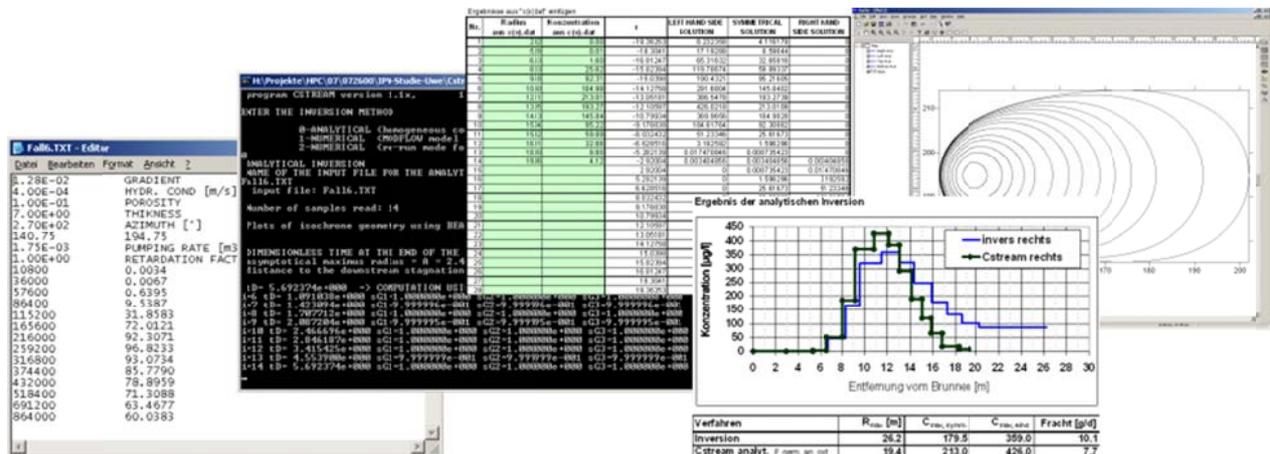


### 3.2.5 CSTREAM – analytische Lösung (BAYER-RAICH)

Sowohl die analytische wie auch die numerische Inversionsrechnung (vgl. Kap. 3.2.6), die im Programm CSTREAM implementiert sind, gehen auf die Arbeiten von BAYER-RAICH ET AL. (2003, 2004) zurück.

Das analytische Lösungsverfahren geht von einem homogenen Aquifer aus und berücksichtigt die natürliche Grundwasserströmung. Mit Hilfe der Integraltransformation nach ABEL wird eine Lösung in geschlossener Form ermittelt. Somit setzt das Programm mit gegebenen Aquifer- und Versuchsdaten den zeitlichen Konzentrationsdurchgang im Brunnen in eine mögliche räumliche Schadstoffverteilung auf der Kontrollebene um.

Das Programm CSTREAM verlangt für die Anwendung der analytischen Inversionsrechnung Eingabedateien im Ascii-Format und erzeugt Ausgabedateien ebenfalls im Ascii-Format. In einer Ascii-Datei ist die für die symmetrische Lösung berechnete Konzentrationsverteilung auf der Kontrollebene gelistet, eine weitere Ascii-Datei enthält Angaben zum Volumenstrom über die Kontrollebene, zur mittleren Konzentration sowie zur Schadstofffracht. Zur Darstellung der Stromstreifen und Fahnenkonzentrationen müssen die Ascii-Daten aufbereitet und in Stromstreifengeometrie transformiert werden, z.B. durch eine Überführung mit Hilfe von Excel und Surfer in eine shp-Datei. Die Isochronengeometrie wird von CSTREAM in eine bln-Datei ausgelesen, die mit dem Programm Surfer weiterverarbeitet werden kann (vgl. Abbildung 6).

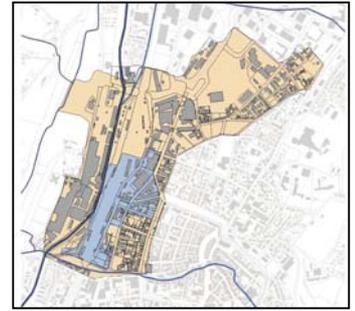


**Abbildung 6:** Eingabedatei, Berechnung mit CSTREAM und Aufbereitung der Ascii-Datenausgabe mittels Excel – hier im direkten Vergleich mit der analytischen Inversionsrechnung ohne Grundströmung. Die Isochronen werden von CSTREAM als bln-Datei ausgegeben und können mit Surfer dargestellt werden

Die Randbedingungen der analytischen Lösung in CSTREAM sowie die Vorgehensweise bei Dateneingabe, Berechnung und Datenausgabe sind in Tabelle 5 dargestellt.

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG

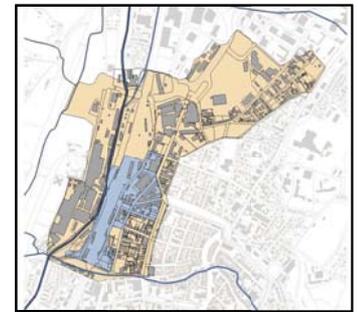


- 25 -

<b>Programm/Tool</b>	<b>CSTREAM – analytische Inversion</b>
Betriebssystem Autor Verfahren Verfügbarkeit  Methode	DOS BAYER-RAICH (2004) im Rahmen unregelmäßig stattfindender Schulungen, zuletzt des TASK Leipzig 2011 ( <a href="http://www.task-leipzig.info">www.task-leipzig.info</a> - Thema IPV) Analytische Berechnung der Grundwasserströmung, Inversionsrechnung der Schadstoffimmission aus Konzentrations- durchgang im Brunnen
<b>Randbedingungen</b> Schadstofffahne  Aquifer Grundströmung Pumprate Benachbarte IPV gleichzeitig Benachbarte IPV vorangegangen	kein Konzentrationsgradient in Fließrichtung kein Konzentrationsgradient über die Aquifermächtigkeit keine Schadstoffquelle im Einzugsbereich keine chemischen Reaktionen, Dispersion, Sorption, Desorption homogen (Durchlässigkeit, Aquifermächtigkeit u. Porosität konstant) parallele Grundströmung wird berücksichtigt konstant keine keine
<b>Dateneingabe</b> Aquiferparameter Brunnenkoordinaten Pumprate Konzentrationsverlauf im Brunnen Besonderheiten	Eingabe in Ascii-Datei Eingabe in Ascii-Datei Eingabe in Ascii-Datei Eingabe in Ascii-Datei Format der Ascii-Eingabedatei muss eingehalten werden
<b>Berechnung</b> Erforderliche Arbeitsschritte  Bildschirmgrafik Werteanzeige Werteausgabe	automatische Inversionsrechnung aus eingegebenem Konzentrations- verlauf im Brunnen keine keine Fracht (Ausgabe in Ascii-Datei)
<b>Datenausgabe</b> Konzentration auf Kontrollebene Isochronen Stromstreifen Zusätzl. benötigte Programme	Ascii-Datei (c(x).dat) mit symmetrischer Konzentrationsverteilung raumbezogene bln-Datei (isochanalit.blm) keine zur Darstellung der Stromstreifen und Fahnenkonzentrationen müssen die Ascii-Daten aufbereitet und in Stromstreifengeometrie transformiert werden, z. B. Überführung mit Hilfe von Excel und Surfer in eine shp- Datei

**Tabelle 5:** Verfahrenssteckbrief für die analytische Lösung von CSTREAM

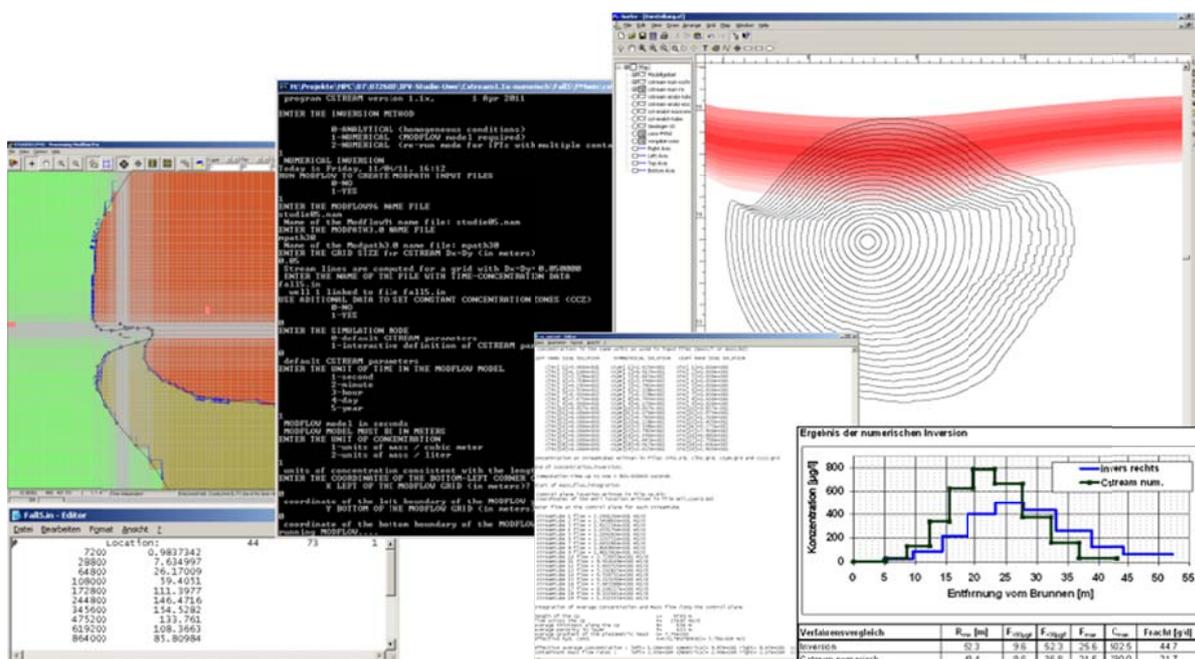
Da CSTREAM spezielle Eingabe-Datenformate voraussetzt und die DOS-Oberfläche von CSTREAM keine Hinweise oder Hilfen enthält, muss der Anwender von CSTREAM in die Nutzung der Software unterwiesen und im Besitz der Programmdokumentation mit den Formatvorgaben sein.



## 3.2.6 CSTREAM – numerische Lösung (BAYER-RAICH)

Die numerische Inversionsrechnung mit CSTREAM geht wie die analytische Inversionsrechnung mit CSTREAM (vgl. Kap. 3.2.5) auf die Arbeit von BAYER-RAICH ET AL. (2003, 2004) zurück.

Im Gegensatz zum analytischen Lösungsverfahren kann das numerische Verfahren Aquiferinhomogenitäten, also variable Verteilungen von Durchlässigkeit, Aquifermächtigkeit und Porosität sowie verschiedene Randbedingungen wie Festpotenziale oder weitere Brunnen berücksichtigen. Das zugehörige Grundwasserströmungsfeld wird zur Laufzeit von CSTREAM aus einem entsprechenden MODFLOW-Modell bezogen. Auf diese Weise setzt das Programm mit gegebenen Aquifer- und Versuchskenndaten den zeitlichen Konzentrationsdurchgang im Brunnen in mögliche räumliche Schadstoffverteilungen um (Schadstoff-fahne linksseitig, rechtsseitig und symmetrisch zum Brunnen).

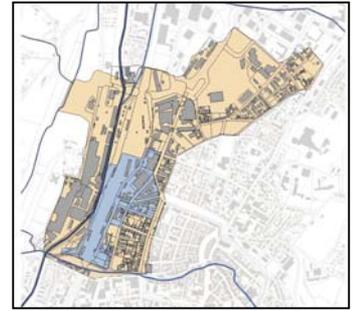


**Abbildung 7:** Modflow-Modell zur Berechnung des Strömungsfelds, Eingabedatei und Berechnung mit CSTREAM. Die Isochronen werden von CSTREAM als bin-Datei ausgegeben und können mit Surfer dargestellt werden. Zur Darstellung der Konzentrationsverteilung werden drei Grid-Dateien (linksseitige, rechtsseitige und symmetrische Lösungen) ausgegeben, die ebenfalls in Surfer dargestellt werden können. Zur Darstellung der Konzentrationsverteilung auf der Kontrollebene (hier z. B. mit Excel im direkten Vergleich mit der analytischen Inversionsrechnung) muss auf die Ascii-Ausgabedatei zurückgegriffen werden, die auch die berechneten Volumenströme und Frachten enthält

Die Randbedingungen der numerischen Lösung in CSTREAM sowie die Vorgehensweise bei Dateneingabe, Berechnung und Datenausgabe sind in Tabelle 6 dargestellt.

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

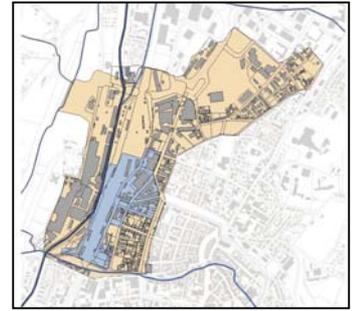
Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG



- 27 -

<b>Programm/Tool</b>	<b>CSTREAM – numerische Inversion</b>
Betriebssystem Autor Verfahren Verfügbarkeit  Methode	DOS BAYER-RAICH (2004) im Rahmen von Schulungen, zuletzt durch TASK Leipzig im April 2011 (www.task-leipzig.info - Thema IPV) Berechnung der Grundwasserströmung mittels numerischem Grundwassermodell (MODFLOW96 und MODPATH3.0) Inversionsrechnung der Schadstoffimmission aus Konzentrationsdurchgang im Brunnen
<b>Randbedingungen</b> Schadstofffahne  Aquifer Grundströmung  Pumprate Benachbarte IPV gleichzeitig Benachbarte IPV vorangegangen	kein Konzentrationsgradient in Fließrichtung kein Konzentrationsgradient über die Aquifermächtigkeit keine Schadstoffquelle im Einzugsbereich Retardation kann berücksichtigt werden inhomogen (Durchlässigkeit, Aquifermächtigkeit, Porosität räumlich variabel) Grundströmung wird entsprechend dem numerischen Strömungsmodell berücksichtigt. Hinsichtlich des Modflow-Modells sind mit der verfügbaren CSTREAM-Version Einschränkungen zu beachten (2D, max. 250 x 250 Zellen, max. 8 Stressperioden in aktueller Version) konstant möglich möglich, soweit mit 8 Stressperioden darstellbar
<b>Dateneingabe</b> Aquiferparameter Brunnenkoordinaten Pumprate Konzentrationsverlauf im Brunnen Besonderheiten zusätzl. benötigte Programme	Eingabe in Modflow-Modell Eingabe in Modflow-Modell und Ascii-Datei Eingabe in Modflow-Modell Eingabe in Ascii-Datei Format der Ascii-Eingabedatei muss eingehalten werden. PMWIN oder VMOD
<b>Berechnung</b> Erforderliche Arbeitsschritte  Bildschirmgrafik Werteanzeige Werteausgabe	Zur Berechnung der Grundwasserströmung vor und während des IPV muss zunächst mit PMWIN oder VMOD ein numerisches Standort-Prinzipmodell erstellt werden. Zur Interaktion von CSTREAM mit Modflow und Modpath müssen beim Start von CSTREAM Eingaben zu Dateinamen der Modelldaten und zur Koordinatenpassung gemacht werden. Automatische Inversionsrechnung aus eingegebenem Konzentrationsverlauf im Brunnen mit CSTREAM und Modflow/Modpath keine keine Fracht (Ausgabe in Ascii-Datei)
<b>Datenausgabe</b> Konzentration auf Kontrollebene  Isochronen Stromstreifen  Zusätzl. benötigte Programme	Ascii-Datei (cs_out.txt) mit linksseitiger, rechtsseitiger und symmetrischer Konzentrationsverteilung raumbezogene bln-Datei (isochnum.bln) Surfer-Grid-Dateien mit Stromstreifen und Konzentrationsverteilung (linksseitige, rechtsseitige und symmetrische Lösungen) Surfer zur Darstellung der Grid-Dateien bzw. zur Umwandlung in Gis-Formate

**Tabelle 6:** Verfahrenssteckbrief für die numerische Lösung von CSTREAM



Die Anwendung der numerischen Lösung in CSTREAM setzt ein Modflow-Prinzipmodell für den Standort voraus, in dem das instationäre Strömungsfeld während des IPV berechnet wird. Die Eingabe des Konzentrationsdurchgangs im Brunnen in CSTREAM erfolgt über eine Ascii-Datei, die von CSTREAM zur Laufzeit eingelesen wird. Über entsprechende Eingaben in CSTREAM wird die Inversionsrechnung des IPV mit den Modelldaten verknüpft. Je nach Problemstellung, gewünschter räumlicher Auflösung und Rechnerleistung kann die Dauer der numerischen Inversionsrechnung mit CSTREAM zwischen einigen Minuten und einer Stunde betragen.

Die Ausgabe der berechneten Konzentrationsverteilungen erfolgt recht komfortabel als Grid-Datei, die in Surfer unmittelbar als Stromstreifenkonzentrationen dargestellt werden können. Die berechneten Isochronen werden als bin-Datei ausgegeben und können ebenfalls mittels Surfer dargestellt und in andere Formate exportiert werden. In einer Ascii-Ausgabedatei finden sich fernerhin die Lösungen für die Konzentrationsverteilungen auf der Kontrollebene sowie die Rechenergebnisse für Volumenströme und Fracht.

Da CSTREAM spezielle Eingabe-Datenformate voraussetzt und die DOS-Oberfläche von CSTREAM keine Hinweise oder Hilfen enthält, muss der Anwender von CSTREAM in die Nutzung der Software unterwiesen und im Besitz der Programmdokumentation mit den Formatvorgaben sein. Außerdem muss er über die notwendigen Kenntnisse zur Erstellung des Modflow-Modells verfügen.

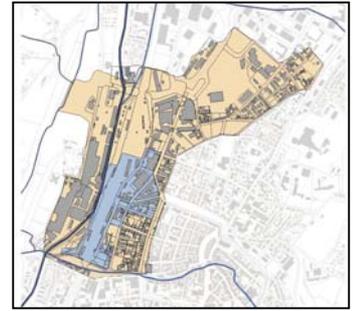
### 3.3 Randbedingungen der Fallstudien zur Untersuchung der Auswerteverfahren

Eine wesentliche Zielsetzung der Vergleichsstudie war die Untersuchung der Einflussfaktoren Grundströmung, Homogenität des Aquifers und hydraulische Beeinflussungen auf die Ergebnisqualität der verschiedenen Auswerteverfahren.

Daher wurden Fallgruppen mit folgenden Randbedingungen gebildet:

1. homogener Aquifer, geringe Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen
2. homogener Aquifer, starke Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen
3. homogener Aquifer, geringe Grundströmung, mit hydraulischer Vorbeeinflussung
4. inhomogener Aquifer, mit Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen

Für jede Fallgruppe wurde mindestens ein Fallbeispiel mit vorgegebener Fahnenlage und Fahnenkonzentrationsverteilung erstellt. Dabei wurde aus der vorgegebenen Schadstoffverteilung im Aquifer der Konzentrationsdurchgang im Brunnen während des IPV entweder mit der Vorwärtsrechnung nach SCHWARZ (zwei einfache Fallbeispiele) oder mittels eines Modflow-Transportmodells (drei Fallbeispiele) simuliert. Diese Fallbeispiele haben den Vorteil, dass das Ergebnis der Auswerteverfahren auf Grundlage der bekannten, da vorgegebenen Schadstoffverteilung bewertet werden kann.



Des Weiteren wurden für die Fallgruppen 1, 3, und 4 Durchgangskurven von Immissionspumpversuchen aus der Praxis ausgewählt. Die Zuordnung zu den Fallgruppen erfolgte nach den hydrogeologischen Verhältnissen am jeweiligen Standort. Diese Fallbeispiele haben zwar den Vorteil des Praxisbezugs, jedoch den Nachteil, dass die tatsächliche Schadstoffverteilung nicht genau bekannt ist. Referenz für die Bewertung der Ergebnisse der einzelnen Auswerteverfahren war in diesen Fällen das Ergebnis des Verfahrens, das die jeweiligen Randbedingungen am besten berücksichtigt. Das Referenzverfahren selbst wurde im Hinblick auf die Ergebnisqualität nicht bewertet.

### 3.4 Probanden

Zur Bearbeitung der Fallstudien und Erfassung des Aufwands der untersuchten Auswerteverfahren wurden vier Probanden eingesetzt. Damit sollte der Faktor der individuellen Variabilität des Aufwands bei der Anwendung der einzelnen Auswerteverfahren erfasst werden.

Die Probanden erfüllten folgende Voraussetzungen:

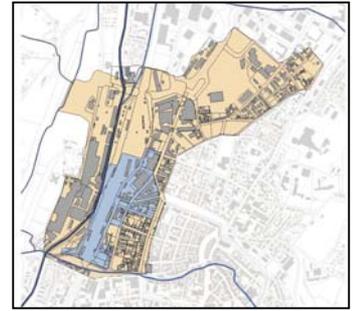
- Geowissenschaftlicher Studienabschluss (Dipl.-Geologe, Dipl.-Geoökologe)
- Mehrjährige Erfahrung mit der Planung, Durchführung und Auswertung von Immissionspumpversuchen
- Know-how aus drei verschiedenen Ingenieurbüros
- Angleichung des Wissensstands durch gemeinsame Einweisung in die Handhabung der Auswerteverfahren
  - Vorwärtsrechnung nach SCHWARZ
  - Inversionsrechnung nach TEUTSCH ET AL.
  - IPV-Tool (ROTHSCHINK)
  - C-SET (Huss)
  - CSTREAM – analytische Lösung (BAYER-RAICH)

Für die Anwendung der Auswerteprozedur mit der numerischen Lösung von CSTREAM in Verbindung mit der Erstellung eines Modflow-Modells konnte wegen des relativ hohen Aufwands nur ein Proband eingesetzt werden.

Nach einer Einweisung in die standardisierte Erfassung ihres Aufwands erhielten die Probanden die in Anlage 1 dokumentierten (auch für Dritte nachvollziehbaren) acht Fallstudien zur Auswertung mit den o. a. Verfahren. Rückfragen waren erlaubt, mussten jedoch in der Aufwandserfassung berücksichtigt werden.

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG



- 30 -

## 3.5 Ermittlung von Aufwand und Ergebnisqualität

### 3.5.1 Aufwands- und Kostenermittlung

Zu den Aufwendungen für die Auswertung eines Immissionspumpversuchs gehören anteilig Beschaffungskosten und Einarbeitung in das Verfahren, die Datenaufbereitung für den zu bearbeitenden Einzelfall, die Durchführung der Berechnung sowie die Darstellung der Ergebnisse. In der Kostenermittlung wird jeglicher zeitliche Aufwand mit einem Stundensatz von 70,- €/Std. angesetzt.

#### Beschaffungskosten und Einarbeitung

Für das IPV-Tool (ROTHSCHINK) sowie das Programm CSTREAM (analytisch und numerisch) gibt es eintägige Einführungskurse, für C-SET ist dies geplant. Für die numerische Lösung von CSTREAM ist ein zusätzlicher Modflow-Kurs eingerechnet. In den Kursgebühren ist auch die Software enthalten. In die analytischen Formeln (Vorwärtsrechnung nach SCHWARZ und die Inversionsrechnung nach TEUTSCH ET AL.) muss eine individuelle Einarbeitung und eine Umsetzung der veröffentlichten Formeln erfolgen, z. B. als Tabellenkalkulation.

Berücksichtigt werden die Kursgebühren, der Zeitaufwand für die Kurse bzw. anteilig die Aufwendungen zur Umsetzung der analytischen Formeln sowie der darüber hinaus erforderliche Einarbeitungsaufwand.

Um die für die einzelnen Auswerteverfahren durchaus unterschiedlichen Aufwendungen für Beschaffung und Einarbeitung vergleichbar zu machen, wurden diese auf eine Fallzahl von zehn Auswertungen umgelegt. Die Abhängigkeit der Auswertekosten von der Anzahl der IPV-Auswertungen wird in Kap. 5 dargestellt.

#### Datenaufbereitung

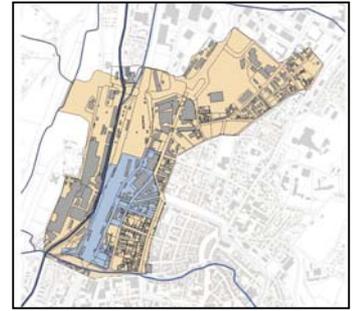
Es wird vorausgesetzt, dass die für die Auswertung erforderlichen Versuchsdaten und Informationen vorliegen:

- IPV-Betriebsdaten
- Ggf. Betriebsdaten weiterer Brunnen im Einflussbereich
- Konzentrationsdurchgang (Probennahmeplan und Analysenergebnisse)
- Aquiferdaten
- Grundwassergleichen
- Lagepläne (analog und digital)

Der erste Schritt der Auswertung umfasst die Sichtung und Aufbereitung dieser in beliebigen Formaten (analog oder digital) vorliegenden Daten für das jeweilige Auswerteverfahren. Besonders aufwendig gestaltet sich die Datenaufbereitung für die numerische Lösung von CSTREAM, da sie die Erstellung eines kompletten Modflow-Standortmodells enthält, in dem sämtliche Aquiferdaten zur Generierung des Strömungsfelds verarbeitet werden müssen.

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG



- 31 -

## Berechnung

Zum Aufwand für die Berechnung gehören bei den Vorwärts-Verfahren die für die iterative Anpassung erforderlichen Eingaben und die Eingaben während der Programmlaufzeit. Die Rechendauer selbst spielt jedoch nur bei der numerischen Lösung von CSTREAM eine Rolle. Des Weiteren wird die Aufbereitung der jeweiligen Ausgabedaten für die Darstellung der Ergebnisse zur Berechnung gezählt.

## Darstellung der Ergebnisse

Die Ausgabe der berechneten Konzentrationen  $C$  in Abhängigkeit von der Entfernung  $r$  zum Brunnen, also die Konzentrationsverteilung auf der Kontrollebene, in tabellarischer Form sowie als  $C/r$ -Diagramm gehört zu den Basics der Darstellung der Berechnungsergebnisse. In der Regel sind die entsprechenden Diagramme in die Tools implementiert, bei CSTREAM ist eine weitere Aufbereitung der in Ascii-Ausgabedatei geschriebenen Ergebnisse erforderlich.

Da in der Praxis auch die kartografische Präsentation der Ergebnisse zum Standard gehört, wird auch der Aufwand einer GIS- bzw. CAD-basierten, raumbezogenen Darstellung der Isochronen und Stromstreifenkonzentrationen erfasst. Hierzu bieten die untersuchten Auswerteverfahren mehr oder weniger komfortable Schnittstellen. Bei den Tools „Vorwärtsrechnung nach SCHWARZ“ und „IPV-Tool“ (ROTHSCHINK) sind keine raumbezogenen Darstellungen vorgesehen. Hier wurde der Aufwand für eine entsprechende händische Planzeichnung in GIS oder CAD mit 15 Minuten (einfache Rechteckfahne) bzw. 30 Minuten (Konzentrationsverteilung) angesetzt.

### 3.5.2 Ergebnisermittlung

Mit einem Immissionspumpversuch soll die Schadstoffimmission im Aquifer sowie abströmende Schadstoffemission erkundet und quantifiziert werden.

Die Schadstoffimmission wird definiert durch die Lage der Ränder der Schadstofffahne und die Konzentrationsverteilung in der Schadstofffahne. In der Altlastenbeurteilung spielt dabei der Wert der maximalen Konzentration eine wichtige Rolle. Die Schadstoffemission ist durch den Wert für die Schadstofffracht gekennzeichnet, der den Massenfluss über einen Kontrollquerschnitt beschreibt.

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG



- 32 -

Als numerisch greifbare Ergebnisse des Immissionspumpversuchs können daher – soweit sie im Einzugsbereich des Versuchs liegen – die ermittelten Abstände für die Fahnenränder und des Konzentrationsmaximums vom Brunnen herangezogen werden. Weitere Ergebnisse sind die Werte für die maximale Konzentration und für die Fracht. In die Fracht gehen letztendlich die mittlere Schadstoffkonzentration sowie nochmals die (erfasste) Fahnenbreite ein, i. d. R. differenziert als Summe der Massenflüsse der berechneten Stromstreifen mit ihrer jeweiligen Breite und Konzentration.

Somit bilden in dieser Vergleichsstudie folgende drei Größen das Ergebnis eines Immissionspumpversuchs:

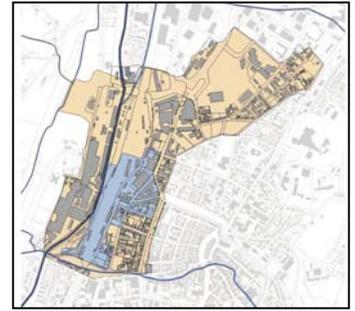
1. Lage der Fahne, bestehend aus Abstand des ersten Fahnenrands vom Brunnen, Abstand des zweiten Fahnenrands vom Brunnen und Abstand des Konzentrationsmaximums vom Brunnen. Liegen die Fahnenränder nicht im Einzugsgebiet, so wird der (erfasste) Fahnenrand von der berechneten maximalen Breite des Einzugsgebiets bestimmt
2. C<sub>max</sub> (maximale Schadstoffkonzentration) als berechneter maximaler Konzentrationswert der Schadstofffahne
3. Fracht als die vom Auswerteverfahren berechnete Summe der Massenflüsse der berechneten Stromstreifen mit ihrer jeweiligen Breite und Konzentration

### 3.5.3 Fehlerermittlung

Bei der Fehlerermittlung werden nur die bei der Auswertung möglichen Fehler betrachtet. Hierbei kommen folgende Fehlerursachen in Betracht:

- Abweichung der Randbedingungen des Verfahrens von den Randbedingungen und Einflussfaktoren des Immissionspumpversuchs. Hierdurch werden die Fehler der Anwendung von Verfahren mit unzutreffenden Randbedingungen quantifiziert
- Streuung der Ergebnisse durch die individuelle Vorgehensweise der Probanden. Hierdurch kann neben dem individuellen Interpretationsspielraum auch erkannt werden, ob bestimmte Verfahrensweisen eine hohe Sensitivität im Hinblick auf das Ergebnis besitzen

Nicht betrachtet werden die Fehler, die sich für das Ergebnis des Immissionspumpversuchs aus fehlerhaften Aquiferparametern (z. B. fehlerhafte Porosität), aus Analysefehlern oder sonstigen Messfehlern während des IPV ergeben. Diese Fehler wirken sich für alle Verfahren gleichermaßen aus und sind nicht Gegenstand des hier betrachteten Vergleichs der Auswerteverfahren.



Für die Fehlerermittlung muss zunächst ein Bewertungsstandard definiert werden, der den Sollwert für die Berechnung der Abweichung des Istwerts darstellt. Bei den Fallstudien mit simulierten Immissionspumpversuchen ergeben sich die Sollwerte einfach aus den angenommenen Vorgaben der Berechnung des Konzentrationsdurchgangs. Bei den Fallstudien mit reellen Immissionspumpversuchsdaten werden die Sollwerte durch die Ergebnisse des Auswerteverfahrens mit den zutreffendsten Randbedingungen bestimmt. Das den Bewertungsstandard bildende Verfahren wird in diesen Fällen dann selbst nicht bewertet.

Die Ermittlung der Ergebnisgenauigkeit bzw. des Fehlers wurde getrennt nach Lage,  $C_{\max}$  und Fracht nach

$$\text{Fehler} = \frac{\text{Istwert} - \text{Sollwert}}{\text{Sollwert}} \quad [\%]$$

vorgenommen. Der Lagefehler wurde als Mittelwert der Fehler für die Abstände des ersten und zweiten Fahnenrandes sowie des Konzentrationsmaximums vom Brunnen gebildet.

## 4 Aufgabenstellungen und Ergebnisdokumentation der Fallstudien

Die im Rahmen der vorliegenden Studie untersuchten Fallstudien basieren teilweise auf reellen Daten, teilweise auf simulierten Schadstoffverteilungen. Zur Illustration der Probleme und ihrer Größenmaßstäbe wurden die Fallstudien auf Lagepläne oder Luftbilder aus dem Stadtgebiet von Ravensburg projiziert. Die räumliche Zuordnung ist jedoch frei erfunden oder in ihrer Lage verschoben, sodass die dargestellten „Fahnen“ keine Rückschlüsse auf tatsächlich vorliegende Schadstoffbelastungen zulassen.

### 4.1 Fallgruppe 1 (homogener Aquifer, geringe Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen)

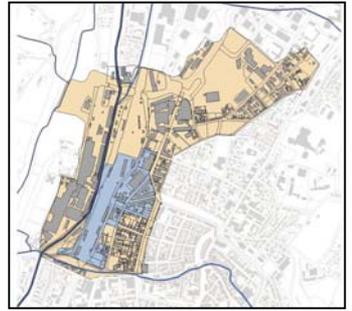
Die Fallgruppe 1 umfasst drei Fallstudien mit homogenen Aquiferbedingungen, geringer Grundströmung und ohne hydraulische Beeinflussungen.

Fallstudie 1 ist ein simulierter Datensatz zu einem 36-stündigen Immissionspumpversuch. Drei Probanden bekamen den in Anlage 1.1 dokumentierten Grundwassergleichenplan mit Angaben zur Pumprate, eff. Porosität, Aquifermächtigkeit, Durchlässigkeit sowie den zehn Proben umfassende Konzentrationsdurchgang im Brunnen zur Auswertung.

Der Simulation mittels Vorwärtsrechnung nach SCHWARZ lag eine (scharf abgegrenzte) Schadstofffahne in 4,0 bis 6,0 m Entfernung neben dem Brunnen mit einer konstanten Konzentration von 125 µg/l zugrunde, woraus sich mit den gegebenen hydraulischen Daten eine Fracht von 0,249 g/d berechnet. Anlage 2.1 dokumentiert die von Proband 1 mit den verschiedenen Auswerteverfahren berechneten Isochronen, Konzentrationsverteilungen und Frachten. Dabei zeigen die einzelnen Auswerteverfahren untereinander keine relevanten Abweichungen.

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG



- 34 -

Fallstudie 2 ist ebenfalls ein simulierter Datensatz zu einem 96-stündigen Immissionspumpversuch. Drei Probanden bekamen den in Anlage 1.2 dokumentierten Grundwassergleichenplan mit Angaben zur Pumprate, eff. Porosität, Aquifermächtigkeit, Durchlässigkeit sowie den zehn Proben umfassende Konzentrationsdurchgang im Brunnen zur Auswertung.

Der Simulation mittels Vorwärtsrechnung nach SCHWARZ lag eine (scharf abgegrenzte) Schadstofffahne mit einer beidseitig vom Brunnen liegenden Grundbelastung von 100 mg/l (Fahnenränder 10 m links bzw. 10 m rechts vom Brunnen) und einer einseitig vom Brunnen liegenden Kernbelastung (14 bis 24 m rechts vom Brunnen) zugrunde. Hieraus ergibt sich mit den hydraulischen Daten eine Fracht von 5,148 g/d.

Anlage 2.2 dokumentiert die von Proband 1 mit den verschiedenen Auswerteverfahren berechneten Isochronen, Konzentrationsverteilungen und Frachten. Dabei zeigen die einzelnen Auswerteverfahren untereinander nur bei den berechneten Konzentrationsverteilungen geringfügige Abweichungen.

Fallstudie 4 ist ein reeller Datensatz eines 100-stündigen Immissionspumpversuchs aus der Integralen Altlastenuntersuchung Ravensburg. Drei Probanden bekamen den in Anlage 1.3 dokumentierten Grundwassergleichenplan mit Angaben zu relevanter Fließrichtung, Pumprate, eff. Porosität, Aquifermächtigkeit, Durchlässigkeit sowie den sieben Proben umfassende Konzentrationsdurchgang im Brunnen zur Auswertung.

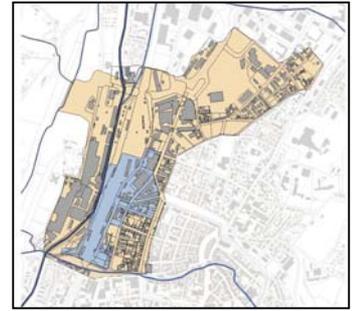
Die Berechnung des Einzugsgebiets mit dem Standortmodell (Anlage 2.3, Bild rechts unten) zeigt, dass nur noch annähernd homogene Aquiferverhältnisse vorliegen und sowohl der nahe Vorfluter wie auch die Grundströmung einen erkennbaren Einfluss ausüben. Die von Proband 1 mit den verschiedenen Auswerteverfahren berechneten Isochronen, Konzentrationsverteilungen und Frachten zeigen jedoch noch keine relevanten Abweichungen untereinander und von den mit dem aufwendigen Standortmodell ermittelten Ergebnissen.

Eine Zusammenstellung der für die Fälle der Fallgruppe 1 von allen Probanden ermittelten Ergebnisse für Fahnenlage,  $C_{max}$  und Fracht zeigt Anlage 3.1.

## 4.2 Fallgruppe 2 (homogener Aquifer, starke Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen)

Die Fallgruppe 2 enthält mit der Fallstudie 6 eine Untersuchung mit starker Grundströmung, homogenen Aquiferbedingungen und ohne hydraulische Beeinflussungen.

Fallstudie 6 ist ein simulierter Datensatz zu einem 240-stündigen Immissionspumpversuch. Drei Probanden bekamen den in Anlage 1.6 dokumentierten Grundwassergleichenplan mit Angaben zur Pumprate, eff. Porosität, Aquifermächtigkeit, Durchlässigkeit sowie den 14 Proben umfassende Konzentrationsdurchgang im Brunnen zur Auswertung.



Der Immissionspumpversuch wurde mittels eines Modflow-Transportmodells simuliert. Vorgegeben wurde eine relativ scharf abgegrenzte Schadstofffahne mit einer Konzentration von 500 µg/l in ca. 9 - 15 m Entfernung vom Brunnen, woraus sich mit den vorgegebenen hydraulischen Daten eine Fracht von 7,75 g/d berechnet. Anlage 2.6 zeigt für die von Proband 1 berechneten Isochronen, Konzentrationsverteilungen und Frachten bereits deutliche Unterschiede zwischen den Verfahren, die die Grundströmung berücksichtigen und der einfachen Inversionsrechnung, die die Grundströmung nicht berücksichtigt.

Eine Zusammenstellung der für die Fallstudie 6 von allen Probanden ermittelten Ergebnisse für Fahnenlage,  $C_{\max}$  und Fracht zeigt Anlage 3.2.

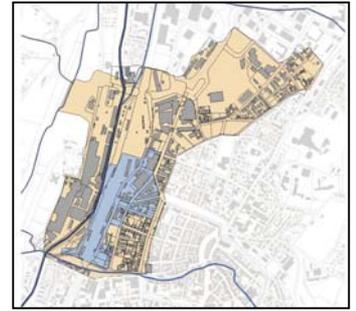
#### **4.3 Fallgruppe 3 (homogener Aquifer, geringe Grundströmung, mit hydraulischer Vorbeeinflussung)**

Die Fallgruppe 3 umfasst zwei Fallstudien mit Immissionspumpversuchen, die durch vorausgegangene Immissionspumpversuche in Nachbarmessstellen hydraulisch beeinflusst wurden. In dieser Fallgruppe wurde die numerische Lösung von CSTREAM nicht eingesetzt, da die zum Zeitpunkt der Studie verfügbare Version mit 2 Stressperioden die vorgegebenen hydraulischen Vorbeeinflussungen nicht berücksichtigen konnte.

Fallstudie 8 ist ein simulierter Datensatz zu einem 240-stündigen Immissionspumpversuch. Drei Probanden bekamen den in Anlage 1.7 dokumentierten Grundwassergleichenplan mit den Versuchs- und Aquiferdaten sowie den Betriebsdaten der in der Nachbarschaft vorausgegangenen Immissionspumpversuche.

Die hydraulische Vorgeschichte sowie der eigentliche Immissionspumpversuch in Brunnen well 1 wurde mittels eines Modflow-Transportmodells simuliert. Vorgegeben wurde eine relativ scharf abgegrenzte Schadstofffahne mit einer Konzentration von 500 µg/l in ca. 9 - 15 m Entfernung vom Brunnen, woraus sich mit den vorgegebenen hydraulischen Daten eine Fracht von 0,62 g/d berechnet. Durch das vorausgehende Pumpen in den weiter nördlich gelegenen Brunnen well 2 und well 3 wird die ursprünglich vorgegebene Schadstofffahne um ca. 12 m nach Norden verlagert und durch die mit der hydraulischen Beeinflussung einhergehenden Dispersion verbreitert. Anlage 2.7 zeigt die vorgegebene Schadstofffahne in ihrer ursprünglichen Lage (Bild oben links), die Fahnenlage nach den Immissionspumpversuchen in den nördlichen Nachbarbrunnen sowie die Ergebnisse der untersuchten Auswerteverfahren von Proband 1. Hierbei wird deutlich, dass die Verfahren, die die hydraulische Beeinflussung nicht berücksichtigen, die Lage der Fahne fehlerhaft berechnen.

Fallstudie 9 ist ein reeller Datensatz eines Immissionspumpversuchs der Integralen Altlastenuntersuchung Ravensburg. In Brunnen IGWM20 wurde hierbei über 96 Stunden gepumpt und der Konzentrationsdurchgang mit sieben Proben dokumentiert. Neun Tage zuvor war im 45 m nördlich gelegenen Brunnen GWM1 ein vergleichbarer IPV durchgeführt worden. Der in Anlage 1.8 dokumentierte Datensatz wurde von einem Probanden mit sämtlichen Verfahren und von drei Probanden mit C-SET ausgewertet.



Anlage 2.8 zeigt die von Proband 1 berechneten Isochronen, Konzentrationsverteilungen und Frachten der untersuchten Verfahren. Deutliche Abweichungen hinsichtlich der berechneten Fahnenlage (14 m), aber auch der maximalen Fahnenkonzentration und der Fracht zeigt das Ergebnis von C-SET, das als einziges der eingesetzten Verfahren die hydraulische Vorbeeinflussung berücksichtigt. Dieses Ergebnis wurde daher als Referenz für die Bewertung der Abweichungen der übrigen Verfahren bzw. der C-SET-Ergebnisse der übrigen Probanden genommen. Der Betrag für die Fahnenverlagerung und damit die Relevanz der hydraulischen Vorbeeinflussung lässt sich in der Planungsphase bereits abschätzen (vgl. Kap.7, Abbildung 15).

Eine Zusammenstellung der Ergebnisse für Fahnenlage,  $C_{\max}$  und Fracht aller Probanden für die Fälle der Fallgruppe 3 zeigt Anlage 3.3.

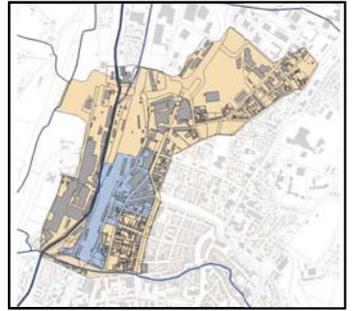
#### **4.4 Fallgruppe 4 (inhomogener Aquifer, mit Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen)**

Die Fallgruppe 4 umfasst zwei Fallstudien mit Immissionspumpversuchen bei inhomogenen Aquiferverhältnissen.

Fallstudie 3 ist ein reeller Datensatz eines Immissionspumpversuchs der Integralen Altlastenuntersuchung Ravensburg. In Brunnen IGWM21 wurde hierbei über 96 Stunden gepumpt und der Konzentrationsdurchgang mit sieben Proben dokumentiert. Aus mehreren, auf der Kontrollebene platzierten Nachbarbohrungen war eine starke Zunahme der Aquifermächtigkeit von 0,7 auf über 2 m nach Norden bekannt. Die drei Probanden für diese Fallstudie bekamen neben dem Grundwassergleichenplan und den Versuchsdaten eine tabellarische Zusammenstellung der Aquiferdaten von 25 Bohrungen im Umkreis von 250 m (Anlage 1.3).

Anlage 2.3 zeigt die von Proband 1 berechneten Isochronen, Konzentrationsverteilungen und Frachten der untersuchten Verfahren. Erkennbare Abweichungen hinsichtlich der berechneten Fahnengeometrie und der Konzentrationsverteilung zeigt das Ergebnis von CSTREAM in Verbindung mit der numerischen Modellierung. Dies ist das einzige Verfahren, das die bekannten Aquiferinhomogenitäten berücksichtigen kann. Dieses Ergebnis wurde daher als Referenz für die Bewertung der übrigen Verfahren herangezogen, kann daher jedoch selbst in dieser Fallstudie nicht bewertet werden.

Fallstudie 5 ist eine in Anlehnung an die hydrogeologischen Verhältnisse in Ravensburg konstruierte Aquifersituation, bei der ein Immissionspumpversuch im Grenzbereich zwischen höher durchlässigen Schussenkiesen und geringer durchlässigen Schwemmfächerablagerungen angenommen wird. Der 240-stündige Immissionspumpversuch wurde mit einem Modflow-Transportmodell simuliert. Der Datensatz wurde drei Probanden zusammen mit einer hydrogeologischen Karte überlassen (Anlage 1.5). Aus der Modellrechnung konnte die „wahre“ Konzentrationsverteilung auf der Kontrollebene sowie die Schadstofffracht als Bewertungsstandard entnommen werden.



Anlage 2.5 zeigt die von Proband 1 berechneten Isochronen, Konzentrationsverteilungen und Frachten der untersuchten Verfahren. Während die Isochronen noch einigermaßen ähnlich ausfallen, unterscheiden sich die mit CSTREAM in Verbindung mit der numerischen Modellierung berechneten Konzentrationen und Frachten erheblich von den Ergebnissen der übrigen Verfahren. Die Nichtberücksichtigung der inhomogenen Aquiferverhältnisse führt bei den übrigen Verfahren zu deutlichen Abweichungen bei den Konzentrationswerten und Frachten.

Eine Zusammenstellung der Ergebnisse für Fahnenlage,  $C_{max}$  und Fracht aller Probanden für die Fälle der Fallgruppe 4 zeigt Anlage 3.4.

## 5 Aufwand und Praxistauglichkeit der Auswerteverfahren

Bei der Anwendung der Auswerteverfahren zeigten die Aufwendungen für die Verfahrensbeschaffung und Einarbeitung, die Datenaufbereitung, die Berechnung und die Darstellung der Ergebnisse keine Abhängigkeiten vom Probanden oder von den Randbedingungen der jeweiligen Fallgruppe. Lediglich der Aufwand zur Erstellung des Modflow-Modells für die numerische Auswertung mit CSTREAM war größer, wenn statt Einheitswerten für die Aquiferparameter für die räumliche Verteilung Kartengrundlagen oder größere Datensätze zu verarbeiten waren.

Die Aufwendungen der Probanden für die bearbeiteten Fallstudien mit einem Verfahren zeigen eine insgesamt relativ geringe zufällige Streuung (Abbildung 8).

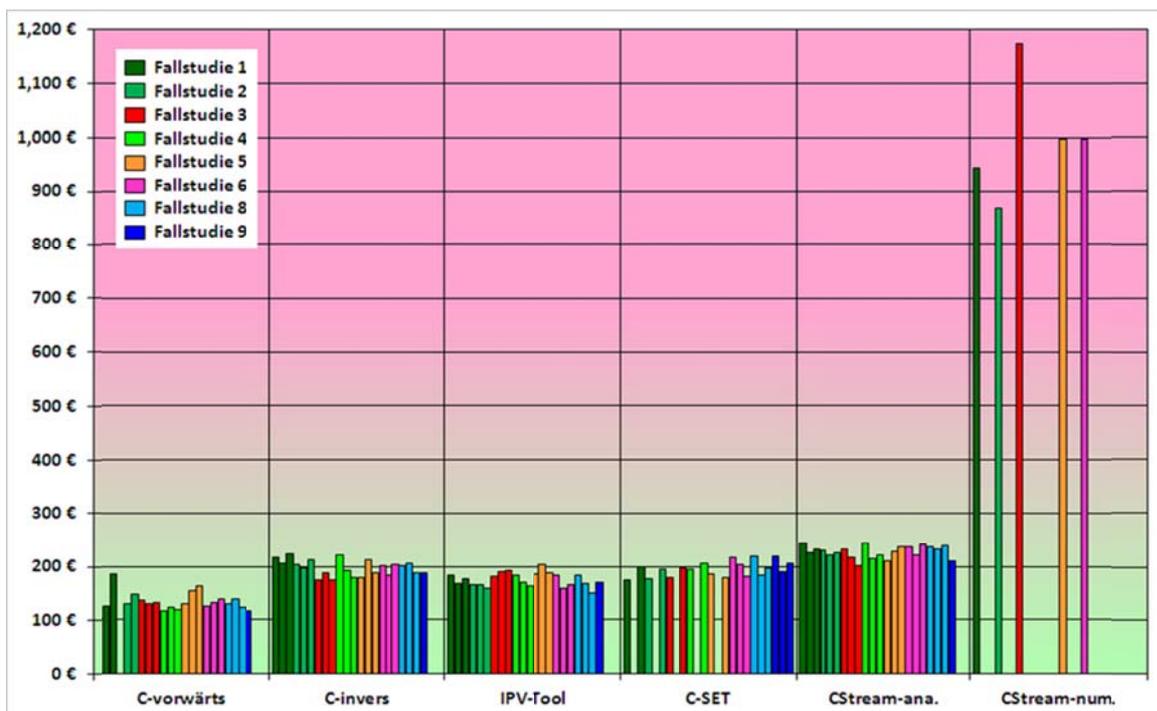
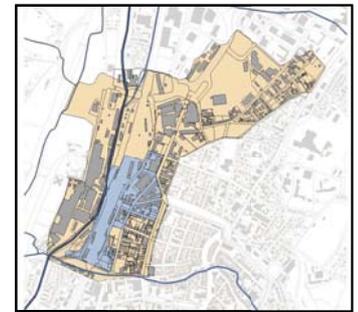


Abbildung 8: Aufwand der Probanden für die Verfahrensanwendungen innerhalb der IPV-Studie



Die für die Verfahrensbeschaffung und Einarbeitung anzusetzenden Kosten sind natürlich stark von der Häufigkeit der Verfahrensanwendung abhängig. Um die Verfahrensaufwendungen miteinander vergleichen zu können, wurden die Beschaffungsaufwendungen auf zehn Anwendungen bezogen. Abbildung 9 zeigt die Abhängigkeit der (mittleren) Verfahrensaufwendungen von der Anwendungshäufigkeit. Ein Seminarbesuch, ggf. Ausgaben für die Beschaffung und der Zeitaufwand für die Einarbeitung schlagen natürlich für eine einzige IPV-Auswertung sehr teuer zu Buche, ab 10 - 15 Auswertungen fallen diese Beschaffungsaufwendungen kaum noch ins Gewicht. In der Aufwandsermittlung der Vergleichsstudie wurden 10 Anwendungen je Verfahren zugrunde gelegt.

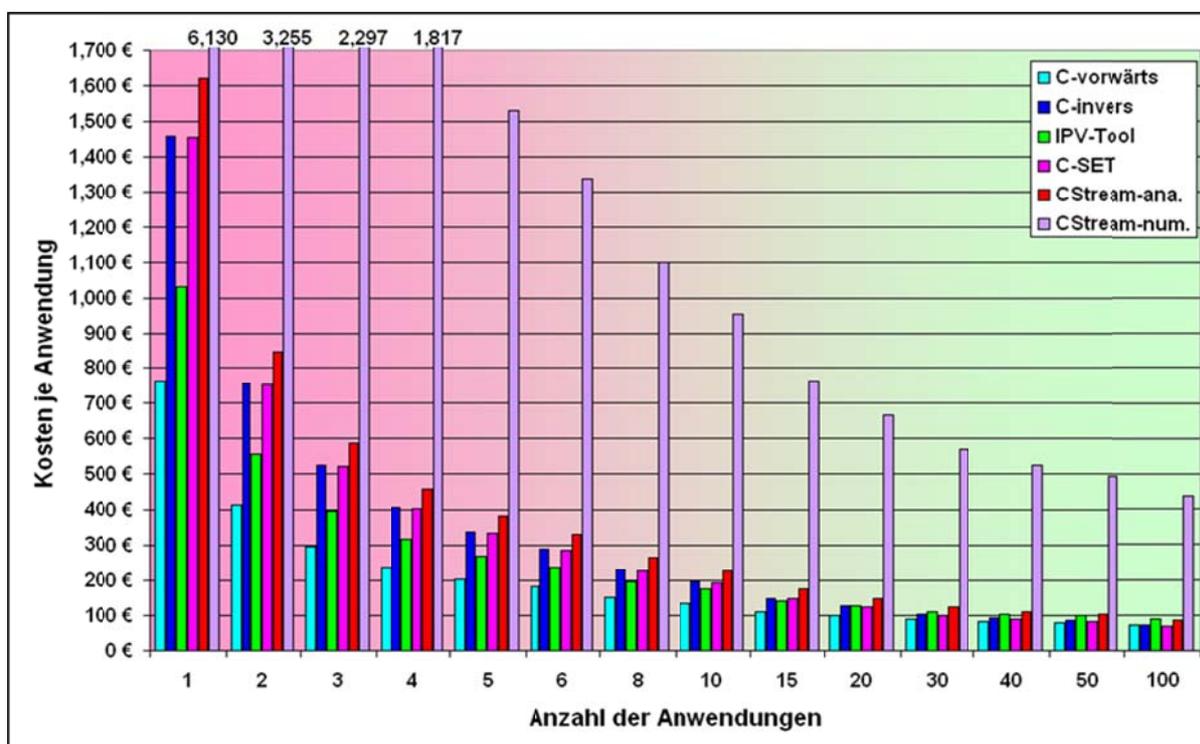
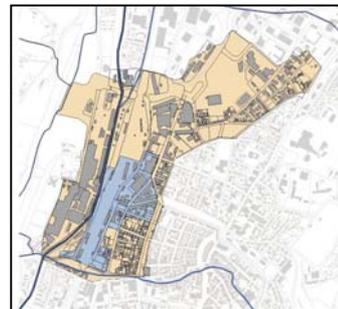


Abbildung 9: Aufwand je Verfahrensanwendung in Abhängigkeit von der Häufigkeit der Anwendungen.

## 5.1 Vorwärtsrechnung nach SCHWARZ

Der Aufwand für die IPV-Auswertung mit der Vorwärtsrechnung nach SCHWARZ lag bei den 20 Anwendungen der Studie im Mittel bei 135,- € (117,- bis 163,- €, Ausreißer 185,- €).

Die mit einem Aufwand von ca. einem Tag in Excel umgesetzte Formel ist nicht besonders bedienerfreundlich und praxistauglich. Die Probanden hatten Mühe, insbesondere komplexere Fahnen mit der Eingabe von Werten für die Entfernung der Fahnenränder und der Fahnenkonzentration anzupassen.



## 5.2 Inversionsrechnung nach TEUTSCH ET AL.

Der Aufwand für die IPV-Auswertung mit der Inversionsrechnung nach TEUTSCH ET AL. lag bei den 22 Anwendungen der Studie im Mittel bei **197,- €** (Spannbreite 175,- bis 224,- €).

Der mit einem Aufwand von ca. zwei Tagen in Excel umsetzbare Inversionsalgorithmus ist bedienerfreundlich und praxistauglich. Die Probanden hatten keine Probleme, ihre Daten einzugeben. Die Inversionsrechnung und die Darstellung der berechneten räumlichen Konzentrationsverteilung auf der Kontrollebene (Tabelle und Diagramm) erfolgt automatisch, was Bedienungsfehler nahezu ausschließt. Auch die Darstellung der Isochronen und Stromstreifenkonzentrationen war mit Hilfe der in separaten Excel-Tabellen über automatische Formelbezüge im bin-Format berechneten Polygonkoordinaten mit Surfer und GIS problemlos möglich.

## 5.3 IPV-Tool (ROTHSCHINK)

Der Aufwand für die IPV-Auswertung mit dem IPV-Tool von ROTHSCHINK lag bei den 22 Anwendungen der Studie im Mittel bei **175,- €** (Spannbreite 150,- bis 202,- €).

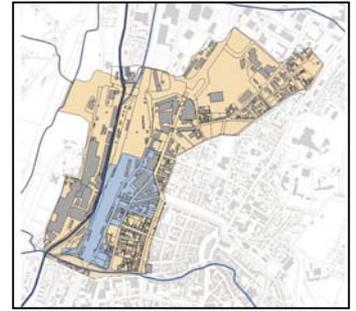
Für den Umgang mit dem IPV-Tool reicht der (i. d. R. jährlich) angebotene Seminartag „Durchführung und Auswertung von Immissionspumpversuchen“ (2011 im IHK Bildungszentrum Augsburg, Kursgebühr 250,- €) völlig aus, das Excel-Tool gehört zu den Kursunterlagen oder kann kostenfrei von der Homepage der LUBW Baden-Württemberg heruntergeladen werden. Ebenfalls herunterzuladen ist eine ausführliche Bedienungsanleitung, die neben allen notwendigen Informationen auch Beispiele enthält.

Das IPV-Tool hat sich bei zahlreichen Nutzern und Anwendungen bewährt. In dieser Vergleichsstudie hatten die Probanden bei einigen Fallstudien Probleme mit der Dateneingabe. Da das IPV-Tool Probennahmezeiten voraussetzt, die einen +/- konstanten Zuwachs der Entnahmebreite ermöglichen, mussten Durchgangskurven mit stärker abweichenden Probennahmezeiten händisch nachgebessert werden, indem z. B. anfänglich fiktive Proben eingefügt oder späte, im stationären Zustand entnommene Proben verworfen wurden. Eine Auswahl von Proben war auch erforderlich, wenn die maximal mögliche Anzahl von zehn Proben überschritten wurde.

Komfortabel ist die automatische Berechnung der räumlichen Konzentrationsverteilung auf der Kontrollebene, wobei für eine beidseitige Konzentrationsverteilung mehrere Varianten angeboten werden. Trotz dieser Variantenangebote war es bei einigen Fallstudien (z. B. Fallstudien 2 und 9) problematisch, für Fahnen, die größtenteils einseitig vom Brunnen liegen, eine zutreffende Konzentrationsverteilung zu finden. Wenn die erste Probe bereits relativ hohe Konzentrationen aufweist, bedürfen die angezeigten möglichen Konzentrationsverteilungen fallweise noch einer Interpretation und ggf. händischen Rechts-links-Verteilung der Kontrollebenenkonzentrationen. Die fehlende Möglichkeit einer kartografischen Darstellung von Isochronen und Stromstreifenkonzentrationen erfordert eine separate zeichnerische Umsetzung der Ergebnisse.

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG



- 40 -

## 5.4 C-SET (Huss)

Der Aufwand für die IPV-Auswertung mit dem Programm C-SET lag bei den 19 Anwendungen der Studie im Mittel bei **195,- €** (Spannbreite 174,- bis 219,- €).

Für C-SET sind wie für das IPV-Tool ein kostenloser Download und eine Einweisung im Rahmen eines Seminars geplant. Die Aufwendungen für diese Beschaffung und Einarbeitung wurde mit zwei Tagen abgeschätzt.

Die Probanden kamen mit der Dateneingabe auch bei komplexeren Betriebsplänen mehrerer Brunnen sehr gut zurecht. Problematisch erwies sich jedoch die Einstellung der vier Stellschrauben für Maximalkonzentration, Lage, Breite und Steilheit des Konzentrationsgradienten, mit denen der Prozess der Anpassung des Konzentrationsdurchgangs gesteuert wird. Das Auffinden der am besten passenden Kombination der vier Stellschrauben war zumeist zeitaufwendig, teilweise auch nicht ganz eindeutig. Hier sind noch Verbesserungen für eine nutzerfreundliche Anwendung erforderlich.

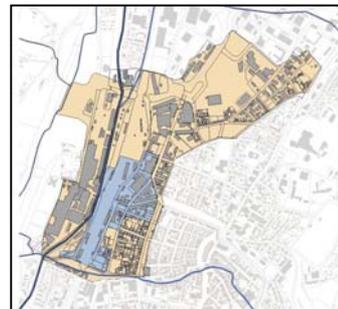
Sehr praxistauglich hingegen ist, dass die berechneten Isochronen und Stromstreifenkonzentrationen auf Knopfdruck sofort als shp-Dateien ausgegeben und ohne weiteren Aufwand in GIS dargestellt werden können.

## 5.5 CSTREAM – analytische Lösung (BAYER-RAICH)

Der Aufwand für die IPV-Auswertung mit der analytischen Lösung des Programms CSTREAM lag bei den 22 Anwendungen der Studie im Mittel bei **227,- €** (Spannbreite 202,- bis 243,- €).

Für den Erwerb und das Erlernen von CSTREAM ist ein eintägiges Seminar vorgesehen, das bislang nur unregelmäßig alle paar Jahre angeboten wurde, zuletzt 2011 vom TASK Leipzig ([www.task-leipzig.info](http://www.task-leipzig.info) – Thema IPV). Die Software ist in den Kursgebühren von 150,- € enthalten. Die Kursunterlagen enthalten ein gutes Handbuch (englisch) zur Bedienung von CSTREAM mit allen notwendigen Informationen.

Nach entsprechender Einweisung hatten die Probanden keine Probleme mit der Eingabe der Daten über die vorgesehenen Ascii-Dateien. Mit dem Programmstart läuft die Inversionsrechnung automatisch ab. Dabei werden die Erfassungsradien und die möglichen Konzentrationsverteilungen auf der Kontrollebene in eine Ascii-Ausgabedatei, die Polygonkoordinaten der Isochronen in eine bin-Datei geschrieben. Während die Darstellung der Isochronen mit dem Programm Surfer unmittelbar möglich ist, erfordert die kartographische Darstellung der Stromstreifenkonzentrationen weitere Bearbeitungsschritte, bei denen die eindimensionalen Erfassungsbreiten in Stromstreifenpolygone umgewandelt und diesen die entsprechende Stromstreifenkonzentration zugeordnet werden. Für diesen Schritt muss sich der Nutzer entsprechende Tools basteln, z. B. in Excel. Insgesamt kamen mit der analytischen Lösung von CSTREAM alle Probanden gut zurecht. Die Praxistauglichkeit sollte jedoch durch eine komfortablere Ausgabe der errechneten Stromstreifenkonzentrationen verbessert werden. Ein weiteres Problem ist, dass DOS-Programme unter dem aktuellen 64-



Bit-Windows nicht mehr lauffähig sind. Auch dies erfordert dringend eine Weiterentwicklung von CSTREAM.

## 5.6 CSTREAM – numerische Lösung (BAYER-RAICH)

Der Aufwand für die IPV-Auswertung mit der numerischen Lösung des Programms CSTREAM lag bei den fünf Anwendungen der Studie im Mittel bei **956,- €** (Spannbreite 867,- bis 1172,- €). Wegen des hohen Aufwands für die Erstellung eines numerischen Prinzipmodells wurden die Auswertungen nur von einem Probanden durchgeführt.

Für den Erwerb und das Erlernen von CSTREAM ist ein eintägiges Seminar vorgesehen, das bislang nur unregelmäßig alle paar Jahre angeboten wurde, zuletzt 2011 vom TASK Leipzig ([www.task-leipzig.info](http://www.task-leipzig.info) - Thema IPV). Die Software ist in den Kursgebühren von 150,- € enthalten. Die Kursunterlagen enthalten ein gutes Handbuch (englisch) zur Bedienung von CSTREAM mit allen notwendigen Informationen für die Interaktion mit Modflow. Für das Auffrischen der Modflow-Kenntnisse besuchte der Proband einen Kurs an der Sommeruniversität Bremen. Hierfür gingen fünf Seminartage und Kursgebühren in Höhe 600,- € in die Aufwandsberechnung ein. Für das Beherrschen der Interaktion von CSTREAM und Modflow war noch ein weiterer, intensiver Einarbeitungstag erforderlich.

Die Erstellung des Prinzipmodells sowie die Dateneingabe erfordert ein genaues Einhalten der im Handbuch genannten Bedingungen und Formate. Die Erstellung des Prinzipmodells dauerte je nach Umfang der Datengrundlage inklusive Einarbeitung zwischen zwei und sechs Stunden. Dieser Aufwand kann sich reduzieren, wenn bereits ein (Modflow-) Standortmodell vorhanden ist. Allerdings ist auch der Aufwand für den Umbau eines größer-räumigen Modells mit der i. d. R. für die IPV-Auswertung erforderlichen feineren räumlichen und zeitlichen Diskretisierung nicht zu unterschätzen und wird sich in der Praxis in einer ähnlichen Größenordnung bewegen.

Die nach dem Start von CSTREAM und der Eingabe der zur Interaktion mit dem Modflow-Prinzipmodell notwendigen Angaben automatisch ablaufende numerische Inversionsrechnung dauerte bis zu 30 Minuten. Die Ausgabe der Isochronen erfolgt wie bei der analytischen Lösung als bin-Datei. Im Gegensatz zur analytischen Lösung bietet die numerische Lösung in CSTREAM jedoch den Komfort, dass Stromstreifenkonzentrationen in Grid-Dateien (grd-Datei) exportiert werden und mit Hilfe des Programms Surfer als linksseitige, rechtsseitige oder symmetrische Konzentrationsverteilung dargestellt werden können.

Nach dem o. a. Aufwand für die Beschaffung und Einarbeitung war eine praxistaugliche Anwendung der numerischen Lösung von CSTREAM möglich. Wie für die analytische Lösung von CSTREAM bereits ausgeführt, sollte jedoch die Praxistauglichkeit durch eine komfortablere und den aktuellen Betriebssystemen angepasste Programmoberfläche verbessert werden.



Mit der ab 2011 verteilten Version von CSTREAM ist die numerische Lösung nach Erhöhung der Anzahl der möglichen Stressperioden auf acht mittlerweile auch in der Lage, hydraulische Einflüsse durch vorausgegangene Immissionspumpversuche in Nachbarbrunnen sowie zu berücksichtigen. Soweit mit den acht Stressperioden möglich, können auch variable Pumpraten dargestellt werden.

## 6 Ergebnisqualität der Auswerteverfahren

Die Auswertefehler, also Abweichungen der berechneten Fahnenlage, Maximalkonzentration und Fracht, resultieren aus der individuellen Vorgehensweise und Interpretation der Probanden sowie aus der Anwendung von Verfahren mit unzutreffenden Randbedingungen.

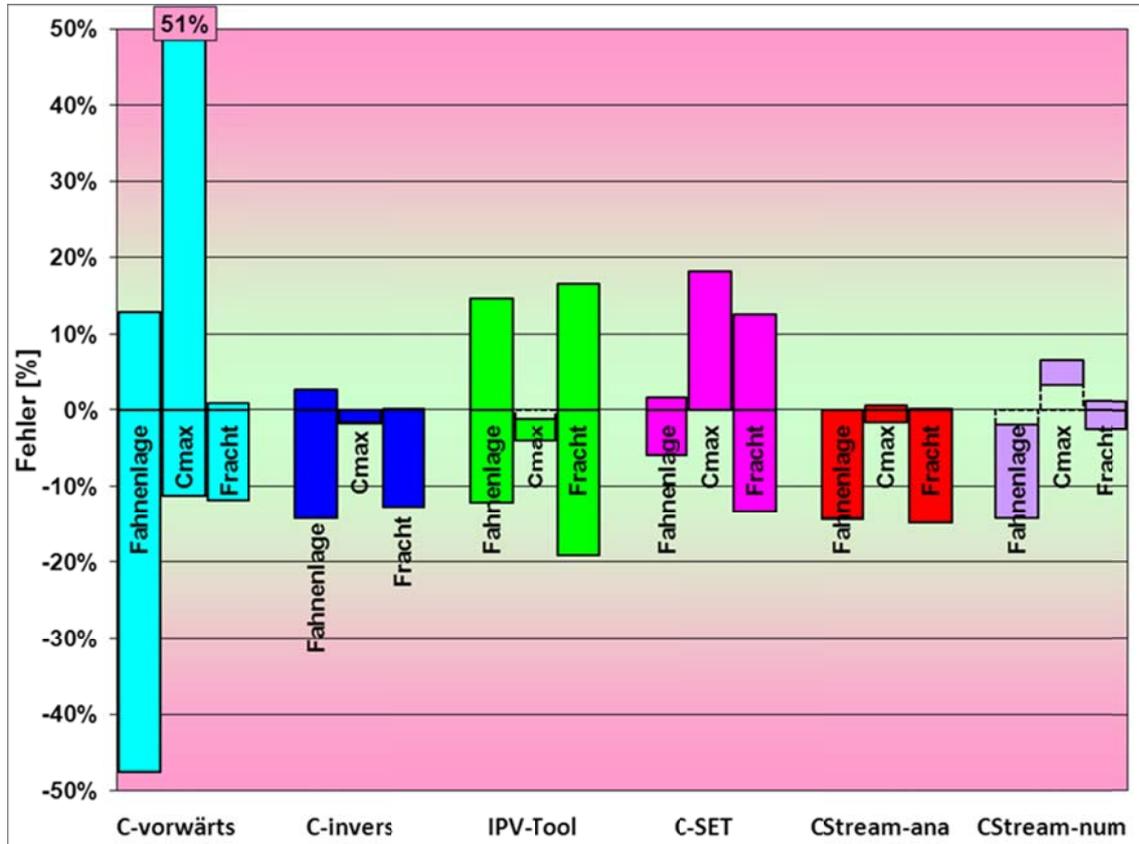
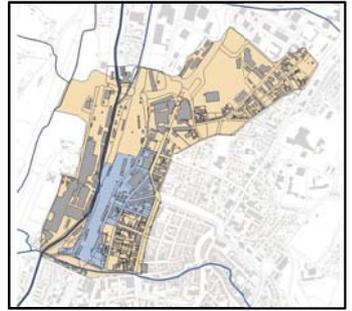
Die Einzelergebnisse aller Fallstudien und Probanden sind in der Anlage 3 gelistet. Der Vergleich der Ergebnisse der Probanden untereinander zeigt, dass die individuellen „Fehler“ bei den Inversionsverfahren i. d. R. unter 10 % liegen. Bei den Vorwärtsverfahren ist die Streubreite der Ergebnisse der Probanden größer, liegt jedoch i. d. R. unter 20 %. Dies zeigt, dass die Vorwärtsverfahren (Vorwärtsrechnung nach SCHWARZ und C-SET) einen größeren individuellen Spielraum bei der Vorgabe der Konzentrationsverteilung zur Anpassung der gerechneten mit den gemessenen Konzentrationen aufweisen.

Auswertefehler, die deutlich über diese „individuelle Streubreite“ von 20 % hinausgehen, sind i. d. R. auf unzutreffende Randbedingungen der Verfahren zurückzuführen. Daher wird im Folgenden die Ergebnisqualität der Verfahren differenziert nach den wesentlichen Randbedingungen und Einflussfaktoren bewertet.

Die Ergebnisqualität wird für die einzelnen Verfahren in Form von Fehlerbalken dargestellt, innerhalb derer sich die Ergebnisse für Fahnenlage, Maximalkonzentration und Fracht der Probanden bewegen. Negative Fehler zeigen an, dass die berechneten Werte zu niedrig ausfallen, positive Fehler zeigen eine Überschätzung der Sollwerte. Bei der Beurteilung der Ergebnisqualität wird die (unvermeidliche) Streuung von ca. 20 % als „tolerierbar“ eingestuft.

### 6.1 Fallgruppe 1 (homogener Aquifer, geringe Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen)

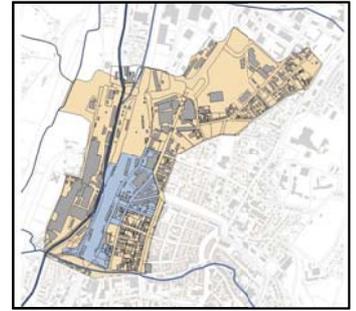
Unter homogenen Aquiferbedingungen ohne hydraulische Einflüsse durch Grundströmung oder Nachbarbrunnen zeigen die untersuchten Auswerteverfahren gute Ergebnisse mit tolerierbaren Fehlern unter 20 % (Abbildung 10). Eine Ausnahme bildet die Vorwärtsrechnung nach Schwarz, die teilweise große Fehler produziert. Diese sind sowohl auf die stark vereinfachende Annahme konstanter Fahnenkonzentrationen wie auch auf große individuelle Interpretationsspielräume bei der Anpassung zurückzuführen.



**Abbildung 10:** Fehlerbereiche für Fahnenlage,  $C_{\max}$  und Fracht der Auswertungen für homogene Aquiferverhältnisse ohne Einfluss der Grundströmung und ohne hydraulische Beeinflussungen. Unter diesen Randbedingungen liefern alle Verfahren bis auf die zu stark vereinfachende Vorwärtsrechnung nach SCHWARZ gute Ergebnisse mit tolerierbaren Fehlern unter +/- 20 %

Die mit knapp 20 % etwas größeren Fehler der Ergebnisse des IPV-Tools (ROTHSCHINK) resultieren i. W. aus den Unterschieden der individuellen Auswahl und Anpassung der Probenahmezeitpunkte, die bei diesem Verfahren einen großen Einfluss auf die Ergebnisqualität haben.

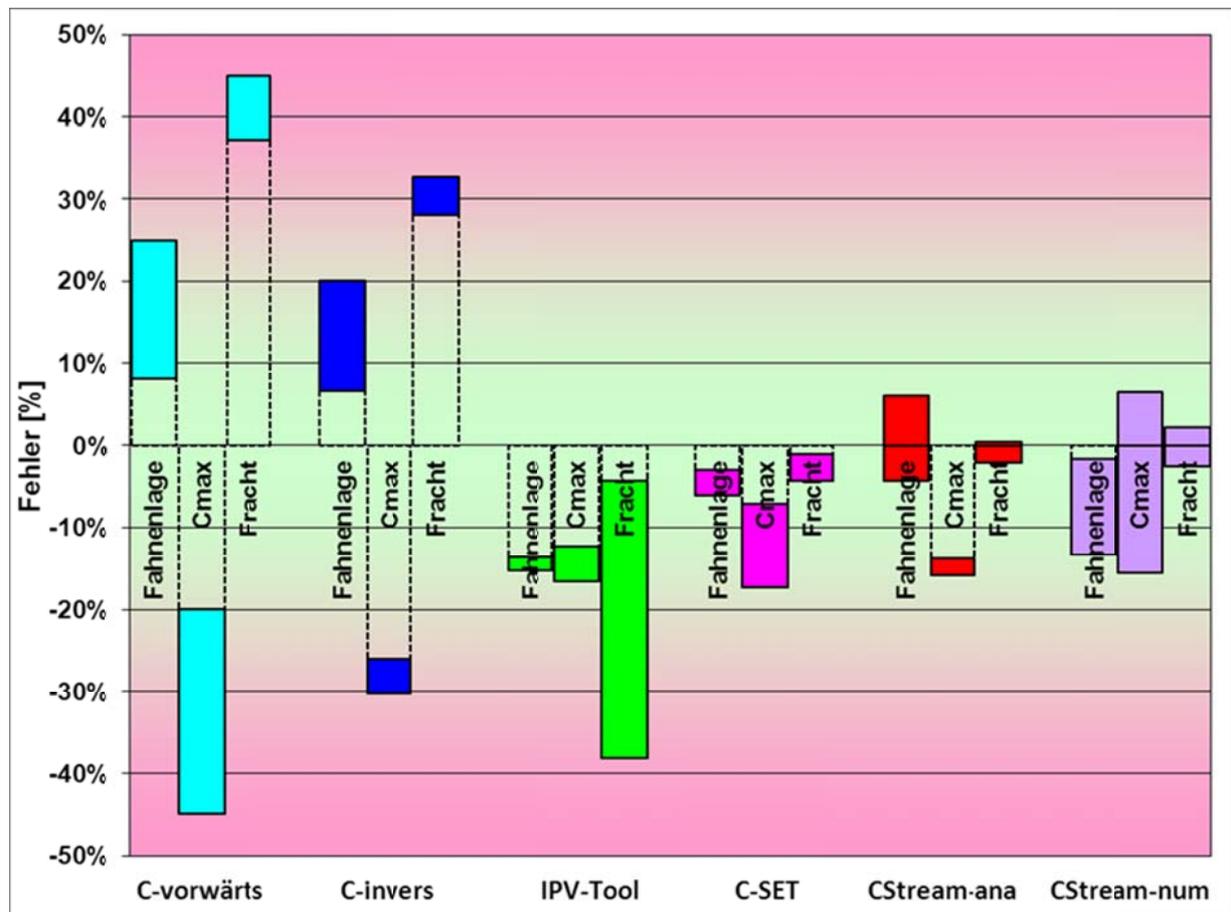
Die mit knapp 20 % etwas größeren Fehler der Ergebnisse von C-SET resultieren aus den individuellen Differenzen bei der Vorgabe der Konzentrationsverteilung auf der Kontrollebene zur Anpassung des gemessenen Konzentrationsdurchgangs. Die vorzugebenden Gauß-Funktionen lassen einen relativ großen Spielraum bei der Kombination von Fahnengeometrie und Konzentrationsverteilung zu.



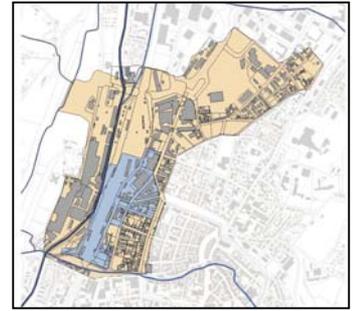
## 6.2 Fallgruppe 2 (homogener Aquifer, starke Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen)

Für homogene Aquiferbedingungen mit relevantem Einfluss der Grundströmung zeigen sich die Anwendungsgrenzen der Vorwärtsrechnung nach SCHWARZ und der Inversionsrechnung nach TEUTSCH ET AL. Diese beiden Verfahren können die Grundströmung nicht berücksichtigen und produzieren in den untersuchten Fallstudien Fehler bis 50 % (Abbildung 11).

Gute Ergebnisse mit tolerierbaren Fehlern unter 20 % liefern C-SET und CSTREAM (analytisch und numerisch).



**Abbildung 11:** Fehlerbereiche für Fahnenlage,  $C_{\max}$  und Fracht der Auswertungen für homogene Aquiferverhältnisse mit relevantem Einfluss der Grundströmung und ohne hydraulische Beeinflussungen. Unter diesen Randbedingungen liefern C-SET und CSTREAM (analytisch und numerisch) gute Ergebnisse mit tolerierbaren Fehlern unter +/- 20%. Das IPV-Tool produziert größere Frachtenfehler, wenn sich bei Annäherung an stationäre Bedingungen die Zuwachsbeträge der Entnahmebreite stark verkleinern.

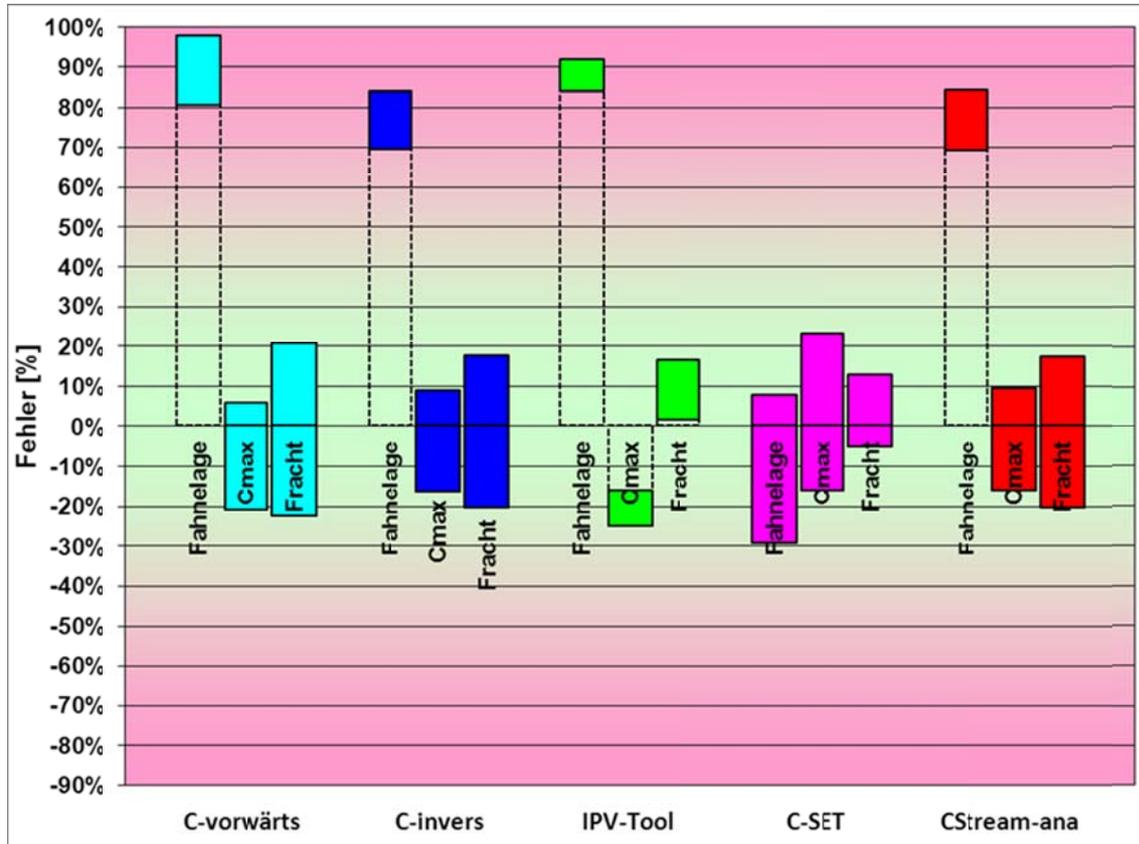
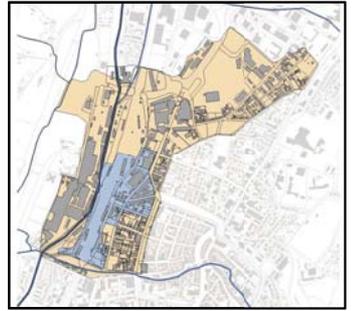


Beim IPV-Tool (ROTHSCHINK) zeigt sich das Problem der Abhängigkeit des Ergebnisses (insbesondere für die Fracht) vom äquidistanten Entnahmebreitenzuwachs zwischen den Probennahmezeitpunkten und dem Kriterium möglichst kreisförmiger Isochronen. Bei starker Grundströmung sind kreisförmige Isochronen und ein äquidistanter Entnahmebreitenzuwachs zumindest bei den späteren Probennahmen nicht mehr gegeben. Dieser Fehler kann im Nachhinein nur noch durch eine individuelle Auswahl oder Anpassung der Probennahmezeitpunkte verbessert werden, unterliegt damit aber individuellen Interpretationsspielräumen.

### **6.3 Fallgruppe 3 (homogener Aquifer, geringe Grundströmung, mit hydraulischer Vorbeeinflussung)**

Für homogene Aquiferbedingungen mit hydraulischen Vorbeeinflussungen durch Nachbarbrunnen zeigen sich die Anwendungsgrenzen sämtlicher Verfahren bis auf C-SET, das beliebige hydraulische Ereignisse vor oder während des Immissionspumpversuchs berücksichtigen kann. Die numerische Lösung von CSTREAM wurde hier nicht untersucht und bewertet, da mit der zum Zeitpunkt der Studie verfügbaren Version mit zwei „Stessperioden“ hydraulische Vorbeeinflussungen durch Nachbarbrunnen nicht adäquat berücksichtigt werden konnten.

Die Fehler bei Nichtberücksichtigung hydraulischer Vorbeeinflussungen wirken sich insbesondere auf die Bestimmung der Fahnenlage aus. Genau diese wird ja auch durch vorausgehende Pumpmaßnahmen in der Nachbarschaft verändert. Bei den untersuchten Fallstudien lagen die Lagefehler bei 100 % (Abbildung 12), was u. U. die Emittentenzuordnung erschwert oder verfälscht.

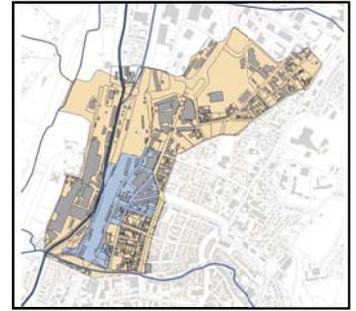


**Abbildung 12:** Fehlerbereiche für Fahnelage, C<sub>max</sub> und Fracht der Auswertungen für homogene Aquiferverhältnisse, ohne relevanten Einfluss der Grundströmung jedoch hydraulischen Beeinflussungen durch Nachbarbrunnen. Diesen Einflussfaktor berücksichtigt nur C-SET, die anderen Verfahren produzieren entsprechend der Beeinflussung größere Fehler im Hinblick auf die Fahnelage

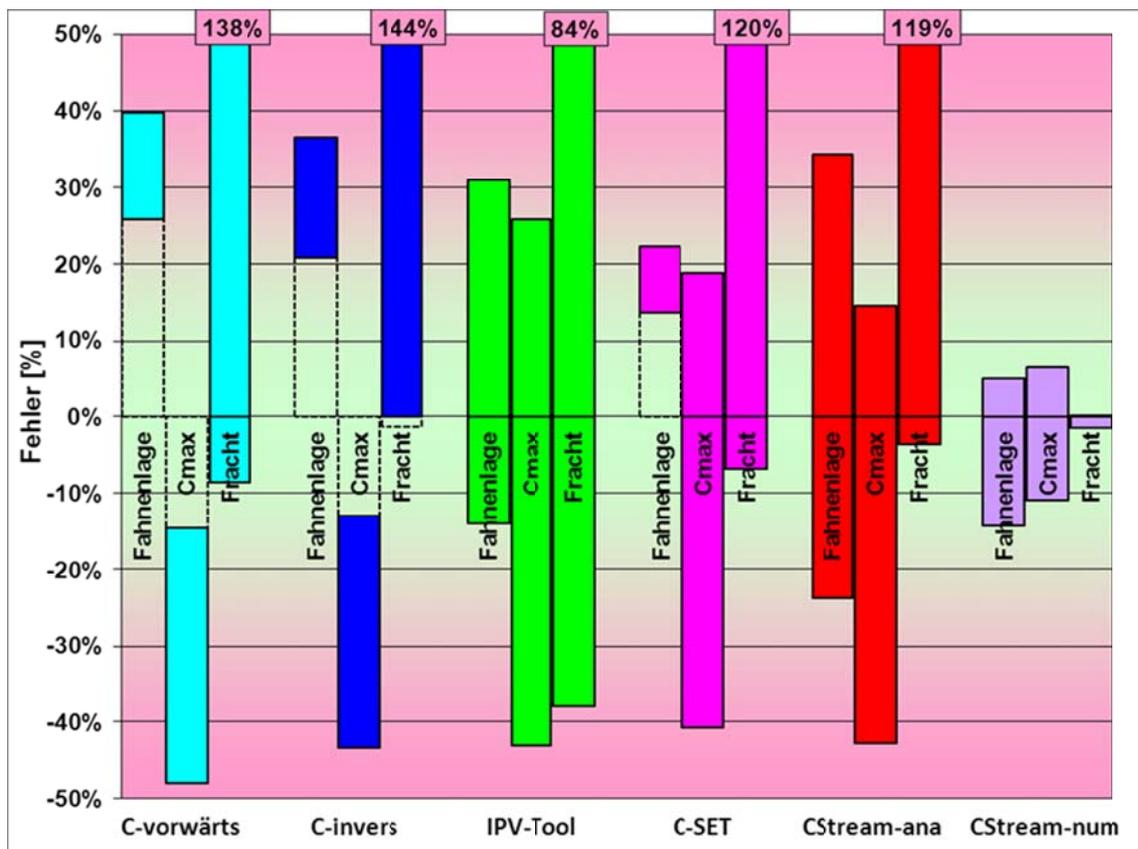
Durch die mögliche Berücksichtigung der „hydraulischen Vorgeschichte“ liefert C-SET gute Ergebnisse auch bei der Lagebestimmung mit tolerierbaren Fehlern unter 20 - 30 %.

## 6.4 Fallgruppe 4 (inhomogener Aquifer, mit Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen)

Bei der Auswertung von Immissionspumpversuchen können inhomogene Aquiferbedingungen nur mit einem numerischen Modell in Verbindung mit CSTREAM berücksichtigt werden. Dementsprechend liefert auch allein dieses Verfahren hierfür eine gute Ergebnisqualität.

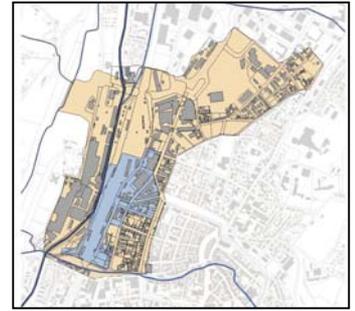


Die Fehler sämtlicher anderer Verfahren, mit denen inhomogene Aquiferbedingungen nicht berücksichtigt werden können, sind so groß wie mögliche Schwankungsbreiten der Aquiferparameter. In den untersuchten Fallstudien lagen die Fehler für die Fahnenlage und die Maximalkonzentration dabei zwischen 20 und 50 %, die Frachtenfehler lagen i. d. R. über 100 % (Abbildung 13).



**Abbildung 13:** Fehlerbereiche für Fahnenlage,  $C_{max}$  und Fracht der Auswertungen für inhomogene Aquiferverhältnisse, ohne relevante Einflüsse durch Grundströmung und Nachbarbrunnen. Inhomogene Aquiferverhältnisse können nur mit der numerischen Lösung von CSTREAM berücksichtigt werden, sämtliche anderen Verfahren produzieren fehlerhafte Ergebnisse.

Voraussetzung zur Berücksichtigung inhomogener Aquiferverhältnisse ist jedoch eine hinreichende Kenntnis der Parameterverteilung.



## 7 Empfehlungen zum Einsatz der Auswerteverfahren

Ein geeignetes Auswerteverfahren muss in erster Linie entsprechend der Einflussfaktoren und Randbedingungen des jeweiligen Falls ausgewählt werden. Bei mehreren geeigneten Auswerteverfahren kann sich die weitere Auswahl auf die Aufwandsbewertung der vorliegenden Vergleichsstudie stützen oder, da der Aufwand vieler Verfahren ähnlich ist, nach der Verfügbarkeit und der bereits vorhandenen individuellen Erfahrung richten. Für den einfachen relativen Vergleich des Aufwands wurde der Aufwand des weit verbreiteten IPV-Tools (ROTHSCHINK) = 1 gesetzt. Ein weiteres Auswahlkriterium kann sein, dass Inversionsverfahren im Gegensatz zu Vorwärtsverfahren i. d. R. weniger anfällig gegenüber individuellen Interpretationsspielräumen sind, die bei der Vorgabe von Konzentrationsverteilungen zur Anpassung des Konzentrationsdurchgangs auftreten. Eine weitere Rolle spielt, ob bereits ein (Modflow-)Standortmodell vorhanden ist und sich damit der Aufwand für die Anwendung der numerischen Lösung von CSTREAM vermindern lässt.

Wesentlich für die Verfahrensauswahl ist jedoch, dass vorab die Faktoren Aquiferhomogenität, Grundströmung und hydraulische Einflüsse geklärt werden:

### Aquiferhomogenität

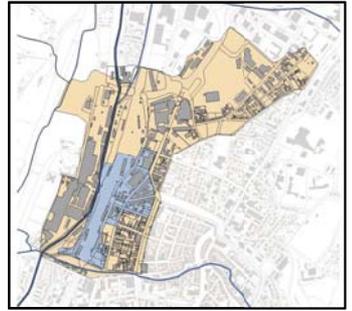
In Bezug auf die Aquiferhomogenität ist zu überprüfen, ob im Einzugsbereich des IPV Variationen der Aquiferparameter vorliegen. Dies betrifft insbesondere die Parameter Durchlässigkeitsbeiwert, Aquifermächtigkeit und eff. Porosität. In diesem Fall können die Strömungsverhältnisse nicht mehr analytisch berechnet, sondern nur noch mittels Grundwassermodell dargestellt werden. Voraussetzung hierfür sind aber entsprechende Informationen und Daten zur Verteilung der Aquiferparameter. In vielen Fällen mag es zwar Hinweise auf inhomogene Aquiferverhältnisse geben, selten werden diese in ihrer räumlichen Verteilung auch nur annähernd bekannt sein.

Der Einsatz eines Grundwassermodells ist auch zu erwägen, wenn im Einflussbereich des IPV hydraulische Randbedingungen wie dichte Ränder oder angeschlossene Vorfluter liegen.

### Grundströmung

Der Einfluss der Grundströmung auf den Entnahmebreitenzuwachs bei einem IPV ist nicht auf den ersten Blick erkennbar, da hierbei die Parameter Durchlässigkeitsbeiwert  $k$ , hydraulisches Gefälle  $i$ , eff. Porosität  $n_e$ , Aquifermächtigkeit  $M$ , Pumprate  $Q$  sowie die Pumpzeit  $t$  eine Rolle spielen. Natürlich lässt sich der Einfluss der Grundströmung auf den Entnahmebreitenzuwachs mit einem entsprechenden Auswerteverfahren erkennen und braucht dann nicht vorher überprüft werden. Beim Einsatz eines Verfahrens ohne oder mit eingeschränkter Berücksichtigung der Grundströmung sollte deren möglicher Einfluss jedoch vorher ausgeschlossen werden. Eine einfache Überprüfung ist möglich, wenn in einem Diagramm (mit Hilfe einer Tabellenkalkulation) die Grundströmung

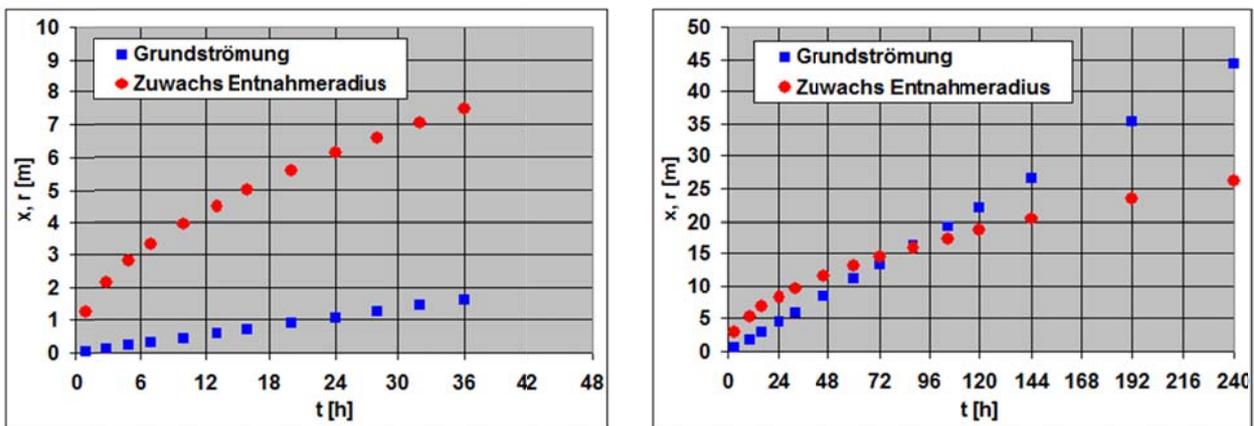
$$x(t) = \frac{k \cdot i \cdot t}{n_e}$$



und der Zuwachs des Entnahmeradius beim IPV

$$r(t) = \sqrt{\frac{Q \cdot t}{\pi \cdot M \cdot n_e}}$$

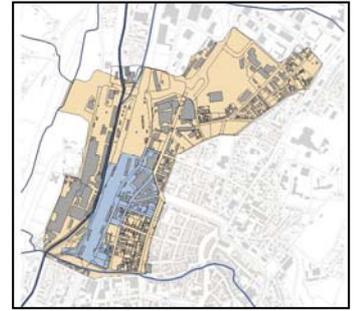
gegenübergestellt werden (Abbildung 14). Ist der Breitenzuwachs beim IPV gegenüber der Grundströmung groß, so kann ein Verfahren ohne Berücksichtigung der Grundströmung gewählt werden. Liegt dagegen der Breitenzuwachs beim IPV in der Größenordnung der Grundströmung oder sogar darunter, so muss ein Auswerteverfahren mit Berücksichtigung der Grundströmung gewählt werden.



**Abbildung 14:** Einfache Abschätzung für den Einfluss der Grundströmung. In der Fallstudie 1 (links) kann die Grundströmung vernachlässigt werden, in der Fallstudie 6 (rechts) übersteigt der Einfluss der Grundströmung den Entnahmebreitenzuwachs während des IPV.

## Hydraulische Beeinflussungen

Kontinuierliche Abweichungen von der idealerweise konstanten Pumprate gehen als Wurzel in die Bestimmung der Fahnengeometrie und Fracht ein. Sinkt die Pumprate z. B. auf den halben Wert, ohne dass dies berücksichtigt wird, so kann die Fracht um den Faktor 1,4 zu niedrig bestimmt werden. Der gleichen Ungenauigkeit unterliegt auch die Bestimmung der Fahnengeometrie. Zur Beschränkung des Ergebnisfehlers auf +/-10 % sollte demzufolge bei kontinuierlichen Abweichungen von der konstanten Pumprate von +/- 20 % ein Auswerteverfahren gewählt werden, das die hydraulischen Einflüsse berücksichtigt.

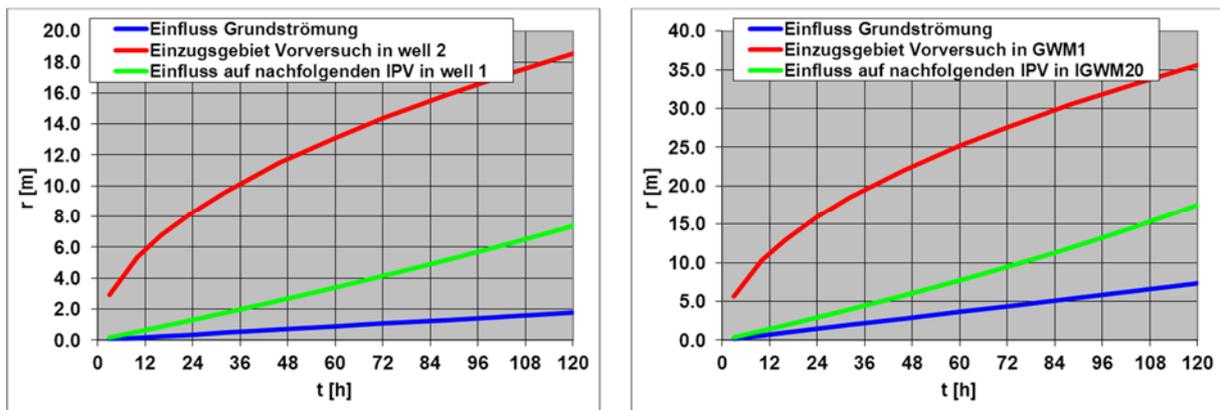


Pumpunterbrechungen sind etwas komplexer zu beurteilen. Sofern die Grundströmung vernachlässigt werden kann, passiert bei Pumpunterbrechungen in erster Näherung nichts. Die Stagnation des Entnahmetrennungszuwachses ist in diesem Fall durch eine entsprechende Korrektur der nachfolgenden Probenahmetermine einfach zu berücksichtigen. Bei relevanter Grundströmung wird der bisherige Breitenzuwachs durch die Verschiebung der Isochronen mit der Grundströmung wieder reduziert. Wenn die Grundströmung ähnlich groß oder gar größer als der (potenzielle) Zuwachs des Entnahmeradius während der Unterbrechung ist, sollte ein Auswerteverfahren gewählt werden, das die hydraulischen Einflüsse berücksichtigt.

Hydraulische Beeinflussungen treten in der Praxis am häufigsten durch gleichzeitige oder vorausgegangene Immissionspumpversuche in Nachbarbrunnen auf. Beides hat Auswirkungen auf die Lage des beim Immissionspumpversuch erfassten Einzugsgebiets und damit auf die Bestimmung der Lage der Schadstofffahne. Ein Immissionspumpversuch mit der Rate  $Q$  und der Dauer  $t$  verschiebt das Einzugsgebiet eines im Abstand  $r_w$  liegenden Nachbarbrunnens um den Betrag  $x_w(t)$ :

$$x_w(t) = r_w - \sqrt{r_w^2 - \frac{Q \cdot t}{\pi \cdot M \cdot n_e}}$$

Mit dieser Formel<sup>1</sup> kann über eine Tabellenkalkulation ein Diagramm erstellt werden, mit dem neben dem Einfluss der Grundströmung auch der Verlagerungseffekt durch vorausgegangene Versuche in Nachbarbrunnen abgeschätzt werden kann.

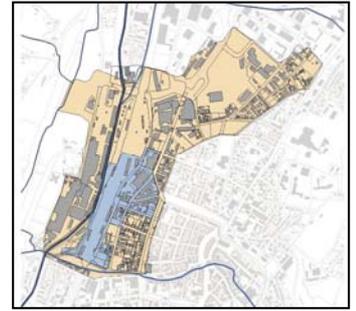


**Abbildung 15:** Abschätzung der hydraulischen Beeinflussung von Immissionspumpversuchen durch vorausgegangene Pumpversuche in Nachbarbrunnen für die Fallstudien 8 und 9. Weitere Erläuterungen im Text.

<sup>1</sup> Für die Herleitung der Formel danke ich Kollegin Shenghua Yue

# Integrale Atlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG



- 51 -

Abbildung 15 (Diagramm links) zeigt für die Fallstudie 8, dass der Einzugsbereich des IPV in Brunnen well 1 durch den vorausgegangenen 120-stündigen Versuch im 27 m entfernten Brunnen well 2 um mehr als 7 m verlagert wurde. Entsprechend groß wird auch ohne Berücksichtigung der hydraulischen Vorbeeinflussung der Fehler der Lagebestimmung einer Schadstofffahne beim IPV in Brunnen well 1 ausfallen. Die Dauer bis zur „Neutralisierung“ der hydraulischen Beeinflussung durch die Grundströmung kann grob aus dem Verhältnis der Einzugsgebietsgröße zur Grundströmung abgeschätzt werden und würde in diesem Fall ca. die 10-fache Pumpzeit betragen.

Bild 15 (Diagramm rechts) zeigt für die Fallstudie 9, dass der Einzugsbereich des IPV in IGWM 20 durch den vorausgegangenen 120-stündigen Versuch in der 45 m entfernten Messstelle GWM1 um knapp 18 m verlagert wurde. Entsprechend groß wird auch ohne Berücksichtigung der hydraulischen Vorbeeinflussung der Fehler der Lagebestimmung einer Schadstofffahne beim IPV in IGWM 20 ausfallen. Die Dauer bis zur „Neutralisierung“ der hydraulischen Beeinflussung durch die Grundströmung kann grob aus dem Verhältnis der Einzugsgebietsgröße zur Grundströmung abgeschätzt werden und müsste in diesem Fall ca. die 5-fache Pumpzeit betragen. Dies war mit einer Zwischenpause von neun Tagen nicht eingehalten.

In der Praxis integraler Untersuchungen zeigt sich immer wieder, dass aus wirtschaftlichen Erwägungen zur Neutralisierung hydraulischer Einflüsse notwendige Pausen zwischen benachbarten Immissionspumpversuchen nicht eingehalten werden oder Immissionspumpversuche in benachbarten Brunnen auch gleichzeitig ausgeführt werden. In beiden Fällen stoßen Auswerteverfahren ohne die Möglichkeit zur Berücksichtigung dieser Einflüsse rasch an ihre Grenzen bzw. produzieren entsprechende Fehler insbesondere bei der Bestimmung der Lage von Schadstofffahnen.

Nach der Klärung der Einflussfaktoren und Randbedingungen können auf Grundlage der Vergleichsstudie Empfehlungen zum Einsatz der untersuchten Auswerteverfahren gegeben werden. Zur Abgrenzung geeigneter von weniger geeigneten Verfahren wurde eine tolerierbare Fehlergrenze von 20 % herangezogen.

## Homogener Aquifer, kein Einfluss der Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen

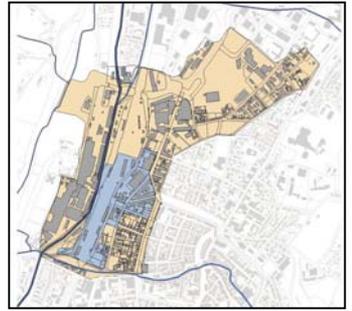
Alle untersuchten Verfahren sind prinzipiell anwendbar. Die einfache Vorwärtsrechnung nach SCHWARZ lieferte in der Studie aufgrund der zu vereinfachenden Annahme einer konstanter Fahnenkonzentration qualitativ nicht akzeptable Ergebnisse.

Aufgrund der guten Ergebnisqualität mit Fehlern < 20 % (Abbildung 10) können auf Grundlage der Studie folgende Auswerteverfahren empfohlen werden:

- IPV-Tool (ROTHSCHINK) (Referenz, Aufwandsfaktor 1,0)
- Inversionsrechnung nach TEUTSCH ET AL. (Aufwandsfaktor 1,1)
- C-SET (HUSS) (Aufwandsfaktor 1,1)
- CSTREAM – analytische Lösung (BAYER-RAICH) (Aufwandsfaktor 1,3)

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG



- 52 -

Zur ausschließlichen IPV-Auswertung verursacht der Einsatz von CSTREAM in Verbindung mit der numerischen Lösung (Standortmodell) einen gegenüber dem Standard um den Faktor 5 - 6 erhöhten Aufwand ohne signifikante Verbesserung der Qualität.

## Homogener Aquifer, mit Einfluss der Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen

Die Verfahren, die den Einfluss der Grundströmung nicht berücksichtigen, produzieren erwartungsgemäß bei der Auswertung entsprechend große Fehler ( $>> 20\%$ ) und sind daher ungeeignet, wenn die Grundströmung nicht zu vernachlässigen ist.

Das IPV-Tool (ROTHSCHINK) erweist sich als fehleranfällig bei starker Grundströmung. Werden in die Auswertung (spätere) Proben eingegeben, bei denen der Entnahmebreitenzuwachs nur noch gering ist, so resultieren daraus größere Fehler bei der Bestimmung der Fracht. Abhilfe ist hier möglich, wenn auf die Eingabe dieser Proben verzichtet wird. Bei sorgfältiger Einhaltung der in der Bedienungsanleitung genannten Bedingungen ist das Tool jedoch geeignet.

Uneingeschränkt empfohlen werden können aufgrund der guten Ergebnisqualität mit Fehlern  $< 20\%$  (Abbildung 11) auf Grundlage der Studie folgende Auswerteverfahren:

- C-SET (Huss) (Aufwandsfaktor 1,1)
- CSTREAM – analytische Lösung (BAYER-RAICH) (Aufwandsfaktor 1,3)

Zur ausschließlichen IPV-Auswertung verursacht der Einsatz von CSTREAM in Verbindung mit der numerischen Lösung (Standortmodell) einen gegenüber dem Standard um den Faktor 5 - 6 erhöhten Aufwand ohne signifikante Verbesserung der Qualität.

## Homogener Aquifer, mit Einfluss der Grundströmung, mit hydraulischer Beeinflussung durch Nachbarbrunnen

Hydraulische Einflüsse und Fahnenverlagerungen durch Nachbarbrunnen mit zeitgleich oder vorab betriebenen Immissionspumpversuchen konnten nur mit C-SET berücksichtigt und eliminiert werden. Mit diesem Programm konnte in den untersuchten Fällen mit Fehlern unter 20 - 30 % eine gute Ergebnisqualität erreicht werden. Mit der aktuellen Version von CSTREAM (ab 2011) ist nach Erhöhung der in Modflow möglichen Stressperiodenzahl von 2 auf 8 ebenfalls eine Berücksichtigung hydraulischer Einflüsse von Nachbarbrunnen möglich, konnte jedoch innerhalb der Studie nicht mehr untersucht werden. Die Verfahren Inversionsrechnung nach TEUTSCH ET AL., IPV-Tool (ROTHSCHINK) und CSTREAM – analytische Lösung (BAYER-RAICH) produzierten in den untersuchten Fällen im Hinblick auf die Fahnenlage Fehler im Bereich bis Faktor 2 (100 %).

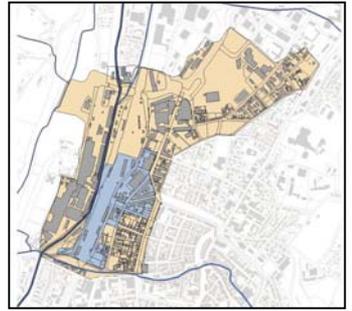
Aufgrund der guten Ergebnisqualität mit Fehlern  $< 20 - 30\%$  (Abbildung 12) kann auf Grundlage der Studie folgendes Auswerteverfahren empfohlen werden:

- C-SET (Huss) (Aufwandsfaktor 1,1)

Ebenfalls geeignet ist die numerische Lösung von CSTREAM (Version ab 2011) mit entsprechend höherem Aufwand für das angekoppelte Modflow-Modell.

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG



- 53 -

## Inhomogener Aquifer, mit Einfluss der Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen

Verfahren für homogene Aquiferbedingungen liefern bei der Auswertung von Immissionspumpversuchen in inhomogenen Aquiferen fehlerhafte Ergebnisse. Die Fehler der in der Studie untersuchten Fälle liegen mit den Verfahren Inversionsrechnung nach TEUTSCH ET AL., IPV-Tool (ROTHSCHINK), C-SET (HUSS) und CSTREAM – analytische Lösung (BAYER-RAICH) deutlich über dem Toleranzbereich von 20 %, wobei das Ergebnis für die Fracht um mehr als den Faktor 2 abweicht (Abbildung 13).

Immissionspumpversuche bei inhomogenen Aquiferbedingungen können daher nur mit dem numerischen Ansatz von CSTREAM in Verbindung mit einem Modflow-Modell entsprechend genau ausgewertet werden:

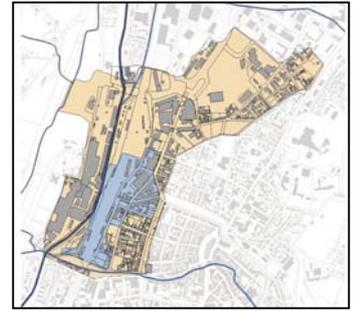
- CSTREAM – numerische Lösung (BAYER-RAICH) (Aufwandsfaktor 6)

Der gegenüber der Standardauswertung um den Faktor 6 erhöhte Aufwand ist auf den Aufwand für das numerische Modell zurückzuführen, mit dem die inhomogenen Aquiferverhältnisse darzustellen sind. Die numerische Lösung setzt voraus, dass die räumliche Verteilung der Aquiferparameter hinreichend genau bekannt ist.

Die Ergebnisse der Vergleichsstudie lassen sich in einer Auswahlmatrix (Tabelle 7) zusammenfassen:

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG



Aquiferbedingungen und Einflussfaktoren	Tool	Inversion (Excel) Teutsch et al.	IPV-Tool (Excel) Rothschink	C-SET Huss	CSTREAM analytisch Bayer-Raich	CSTREAM numerisch Bayer-Raich
<b>homogener Aquifer</b> kein Einfluss der Grundströmung ohne hydraulische Beeinflussungen		1,1	1,0	1,1	1,3	5 - 6
<b>homogener Aquifer mit Einfluss der Grundströmung</b> ohne hydraulische Beeinflussungen			*) , **)	1,1	1,3	5 - 6
<b>homogener Aquifer mit Einfluss der Grundströmung mit hydraulischer Beeinflussungen</b>				1,1		***)
<b>heterogener Aquifer mit Einfluss der Grundströmung</b> ohne hydraulische Beeinflussungen						5 - 6

\*) konstanter Zuwachs der Entnahmebreite erforderlich

\*\*) nur bei moderater Grundströmung mit annähernd kreisförmigen Isochronen

\*\*\*) max. 8 Stressperioden, verfügbar ab Programmversion 2011 (nicht Gegenstand der Studie)



Tool geeignet

Aufwandsfaktor relativ zu IPV-Tool (1,0)



Tool eingeschränkt geeignet



Tool ungeeignet

**Tabelle 7:** Auswahlmatrix für geeignete Auswerteverfahren entsprechend der Aquiferbedingungen und Einflussfaktoren

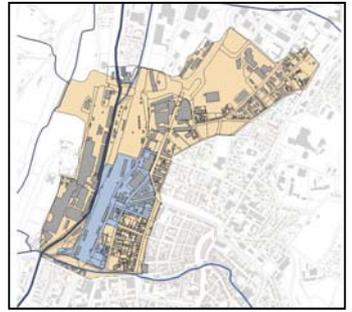
In der Auswahlmatrix finden sich grüne Felder, wenn die Aquiferbedingungen und Einflussfaktoren des auszuwertenden Immissionspumpversuchs zu den Verfahrensannahmen passen und sich das Verfahren in der Vergleichsstudie mit tolerierbarem Fehler anwenden ließ. Der Aufwand für die Verfahrensanwendung ist als Faktor angegeben, wobei der Aufwand für das einfache IPV-Tool (ROTHSCHINK) als Referenz mit dem Faktor 1 angesetzt wird.

Gelbe Felder weisen darauf hin, dass sich ein Verfahren zwar anwenden lässt, jedoch bestimmte Einschränkungen zu beachten sind.

Rote Felder bedeuten, dass ein Verfahren für die jeweiligen Aquiferbedingungen und Einflussfaktoren nicht angewendet werden kann bzw. bei der Anwendung große Fehler resultieren können.

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg / LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof / HPC AG



## ANHANG 1

### Literaturverzeichnis

BAYER-RAICH, M. (2004): Integral pumping tests for the characterization of groundwater contamination. Ph. D. Thesis, University of Tübingen, Center for Applied Geoscience, Germany. Tübingen, 112 pp

BAYER-RAICH, M., JARSJÖ, J., HOLDER, T. & PTAK, T. (2003): Numerical Estimations of contaminant concentration and mass flow in aquifers from time dependent pumping wells. Model Care 2002: A Few Steps Closer to Reality, IAHS Publication No. 277

BAYER-RAICH, M., J. JARSJÖ, R. LIEDL, T. PTAK, & G. TEUTSCH (2004), Average contaminant concentration and mass flow in aquifers from time-dependent pumping well data: Analytical framework, Water Resour. Res., 40 (8)

BAYER-RAICH, M., JARSJÖ, J., LIEDL, R., PTAK, T. & TEUTSCH, G. (2004): Correction to "Average contaminant concentration and mass flow in aquifers from time-dependent pumping well data: analytical framework" by Martí Bayer-Raich et al. Water Resour. Res. 40 (11)

BEAR, J. & JACOBS, M. (1965): On the movement of waterbodies injected into aquifers. – Journ. Hydrol. 3 (1), S. 37 – 57

BEER, H.-P., KIEFER, R., HOLDER, T. & PTAK, T. (2003): Grundwasserabstromerkundung durch Immissionsmessung. – Stand der Technik, Planung, Implementierung. Schriftenreihe Altlastenforum Baden-Württemberg e.V., Heft 8

BOCKELMANN, A., PTAK, T. & TEUTSCH, G. (2001): "An analytical quantification of mass fluxes and natural attenuation rate constants at a former gasworks site", J. Contam. Hydrol., 53(3-4), 429-453, ISSN 0169-7722

ERTEL, T. & SCHOLLENBERGER, U., Eds. (2008): Handbook for Integral Groundwater Investigation. MAGIC – Management of Groundwater at Industrially Contaminated Sites. - Polish Geological Institute, Warsaw

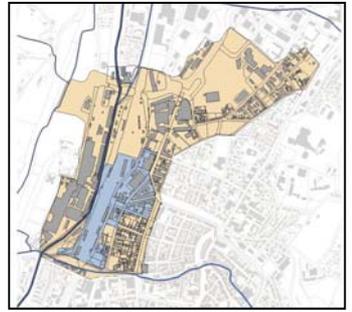
HOLDER, T., TEUTSCH, G., PTAK T. & SCHWARZ, R. (1998): A new approach for source zone characterization: the Neckar Valley study. In Groundwater Quality: Remediation and Protection, IAHS Publication No. 250, ISSN 0144-7815, 49-55

HOLDER, T. & TEUTSCH, G. (1999): Prinzip des neuen Immissionsmessverfahrens, Anwendung der Immissionsmessung im Neckartal; in: Integrale Altlastenerkundung im Stuttgarter Neckartal, Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, 4/1999, Stuttgart

HUSS, A. (2012): Immissionspumpversuche mit gegenseitiger Beeinflussung – Anforderungen und Chancen; in: Handbuch der Altlastensanierung (HdA), Hrsg.: FRANZIUS, V., ALTENBOCKUM, M. & GERHOLD, T., Müller-Verlag, Heidelberg. 67. Ergänzungslieferung

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG



- 2 -

JARSJÖ, J., PTAK, T., BAYER-RAICH, M. & HOLDER, T. (2002): Uncertainties in contaminant plume characterisations based on concentration measurements in pumping wells: The Stuttgart-Neckartalaue site. Paper for the 4th International Conference on Calibration and Reliability in Groundwater Modelling, Prague, Czech Republic, 17-20 June 2002

MCDONALD, M. & HARBAUGH, W. (1988): MODFLOW – A Modular 3-dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model. – U.S. Geological Survey

POLLOCK, D.W. (1994): User's Guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, Version 3: A particle tracking post-processing package for MODFLOW, the U.S. Geological Survey finite-difference ground-water flow model. - U.S. Geological Survey

ROTHSCHINK, P. (2005): Technik der integralen Grundwasseruntersuchung – Durchführung und erste Auswertungen. – Beitrag zum Seminar 11/2005 des Fortbildungsverband Boden und Altlasten Baden-Württemberg – unveröffentlichte Kursunterlagen; VEGAS Stuttgart

ROTHSCHINK, P. (2007): IPV-Tool, Programmbeschreibung. – Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (homepage-download)

PTAK, T. & TEUTSCH, G. (1997): Grundwasser-Gefährdungsabschätzung durch Emissions- und Immissionsmessungen an Deponien und Altlasten – Numerische Untersuchungen zur Anwendung und Auswertung, Projekt Wasser-Abfall-Boden PWAB, Projekt-Nr.: PD 96 181, Bericht, Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Tübingen

PTAK, T., SCHWARZ R., HOLDER, T. & TEUTSCH, G. (2000): "Ein neues integrales Verfahren zur Quantifizierung der Grundwasserimmission: II. Anwendungsbeispiel in der Praxis", Grundwasser

SCHOLLENBERGER, U., ERTEL, T., UFRECHT, W., SCHÄFER, W., ROTHSCHINK, P., SPITZBERG, S., HEKEL, U., KIRCHHOLTES, H.-J., GZYL, G. & KOHOUT, P. (2008): Integrale Grundwasseruntersuchung, Strategie und Technik - Handbuch mit Hinweisen zur Planung, Durchführung und Auswertung von Immissionspumpversuchen. - Entwurf Stand 30.06.2008; Hrsg. Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz

SCHWARZ, R., PTAK, T. & TEUTSCH, G. (1997a): Demonstrationsprojekt zur technischen Erprobung eines neuen Erkundungskonzepts zur Untersuchung der Emission und Immission an Altlastenstandorten: Technischer Bericht Projektphase 1, Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität Tübingen

SCHWARZ, R., PTAK, T. & TEUTSCH, G. (1997b): Demonstrationsprojekt zur technischen Erprobung eines neuen Erkundungskonzepts zur Untersuchung der Emission und Immission an Altlastenstandorten: Auswertung Projektphase 2, Bericht Nr. LAG97-01/0460, Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität Tübingen

SCHWARZ, R. (2002): Grundwasser-Gefährdungsabschätzungen durch Emissions- und Immissionsmessungen an Deponien und Altlasten. – Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten (TGA), C66

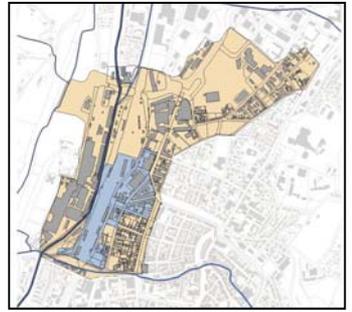
# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg

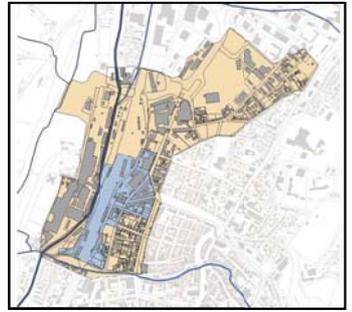
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG

---

- 3 -



TEUTSCH, G.; PTAK, T.; SCHWARZ, R.; HOLDER, T. (2000): Ein neues integrales Verfahren zur Quantifizierung der Grundwasserimmission, Teil 1: Beschreibung der Grundlagen; Grundwasser 4/2000



## ANHANG 2

### Prinzip des Immissionspumpversuchs (aus SCHOLLENBERGER ET AL., 2008)

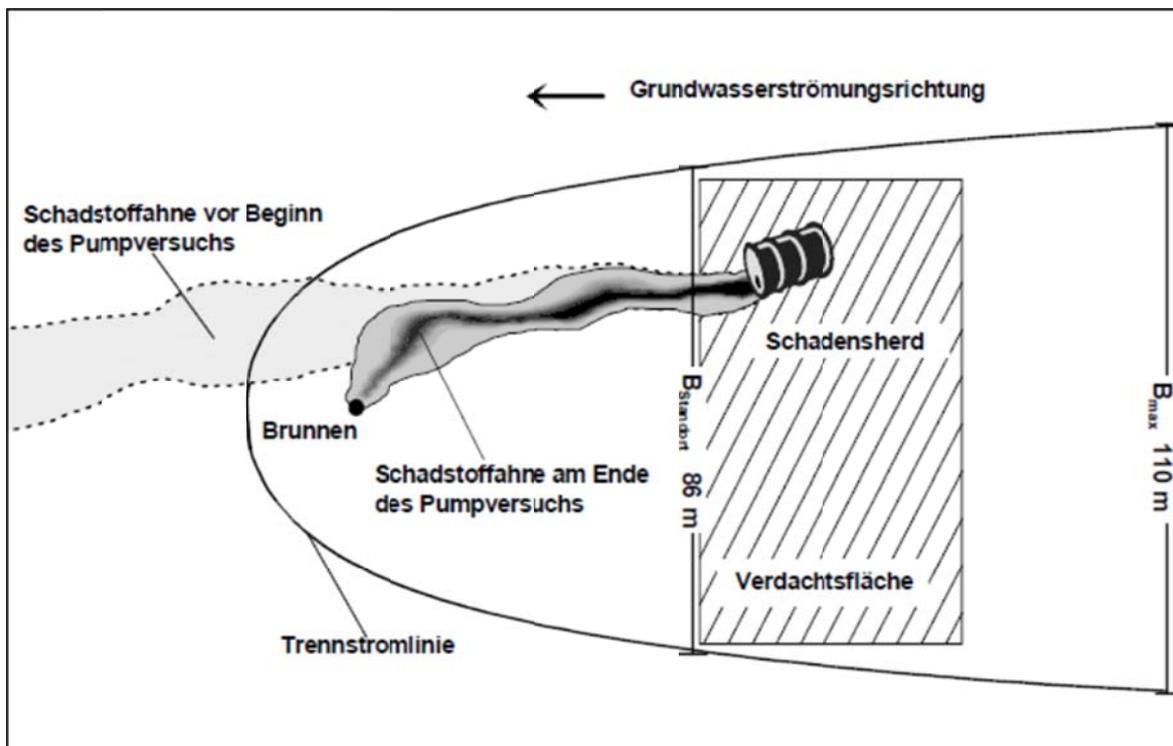
Das Immissionsmessverfahren basiert auf einer räumlich integralen Bestimmung des Massenflusses im Grundwasserabstrom einer Verdachtsfläche. Im einfachsten Fall wird der Abstrom der Verdachtsfläche durch einen Pumpversuch in einer Grundwassermessstelle vollständig erfasst, wenn die Trennstromlinie nach einer entsprechenden Pumpdauer außerhalb der Schadstofffahne liegt (siehe Abbildung A2.1). In diesem quasistationären Fall ist die Schadstofffracht  $E$  das Produkt aus der gemessenen Schadstoffkonzentration  $C_p$  und der Pumprate  $Q_p$ . Zur Berechnung der Schadstofffracht reicht hier eine einzige Grundwasserprobe am Ende des Pumpversuchs. Die stationäre Erfassungsbreite  $B$  lässt sich über die Formel  $B = Q/(k_f \times i \times m)$  abschätzen.

$Q$ : Förderrate des Brunnens [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

$k_f$ : hydraulische Durchlässigkeit des Aquifers [ $\text{m}/\text{s}$ ]

$i$ : Gefälle der Grundströmung [ $\text{m}/\text{m}$ ]

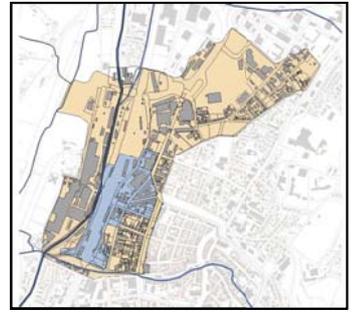
$m$ : Mächtigkeit des Aquifers [ $\text{m}$ ]



**Abbildung A2.1:** Prinzip der stationären Immissionsmessung (nach TEUTSCH ET. AL. 2000)

# Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg

Stadt Ravensburg/LRA Ravensburg  
Firmenkonsortium Berghof/HPC AG

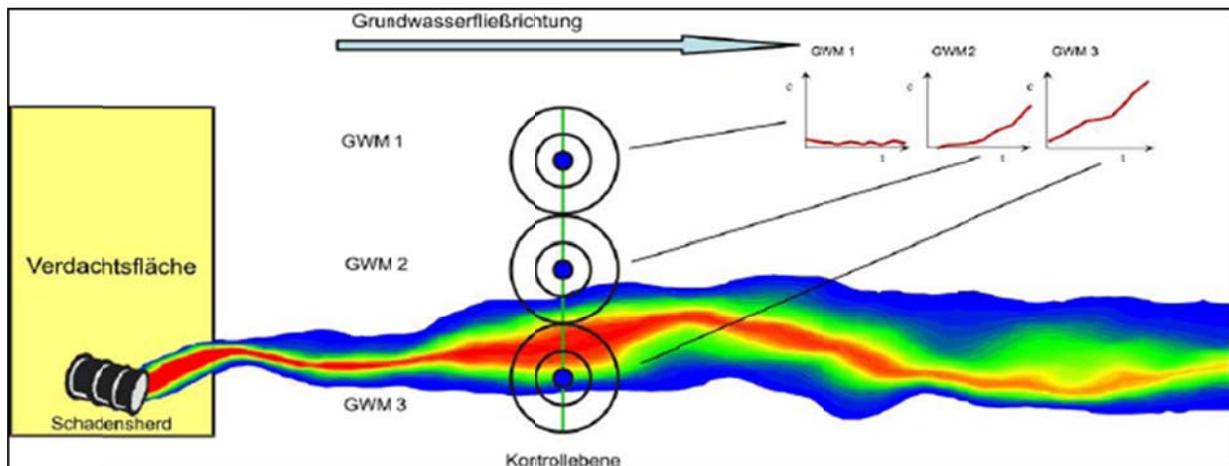


- 5 -

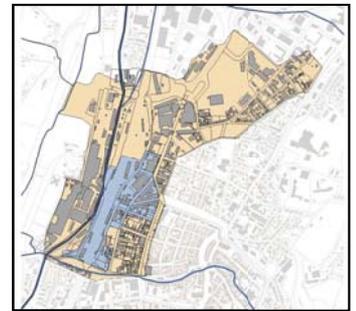
In der Praxis ist es meist nicht möglich, den Abstrom einer Verdachtsfläche mit nur einem Pumpversuch hinreichend zu erfassen. Zum einen kann die Lage der Fahne normalerweise nicht genau genug abgeschätzt werden um einen einzigen Pumpbrunnen optimal zu platzieren, zum andern würden sich meist sehr lange Pumpzeiten ergeben, um den hierfür erforderlichen quasi-stationären Zustand zu erreichen.

Die Schadstofffracht und die mittlere Konzentration lassen sich aber auch instationär bestimmen. Die Bestimmung erfolgt auf Grundlage zeitlich aufgelöster Konzentrationsganglinien von Pumpversuchen. Hierzu werden im Einflussbereich der Schadstofffahne Pumpversuche durchgeführt, wobei die Position der Pumpbrunnen, die Pumpzeiten und -raten so gewählt werden, dass die Fahne auf Höhe der Kontrollebene im Idealfall vollständig erfasst wird. Die Anzahl der dafür erforderlichen Pumpbrunnen hängt im Wesentlichen von der Breite der zu untersuchenden Kontrollebene und von der erreichbaren Entnahmebreite der Brunnen ab.

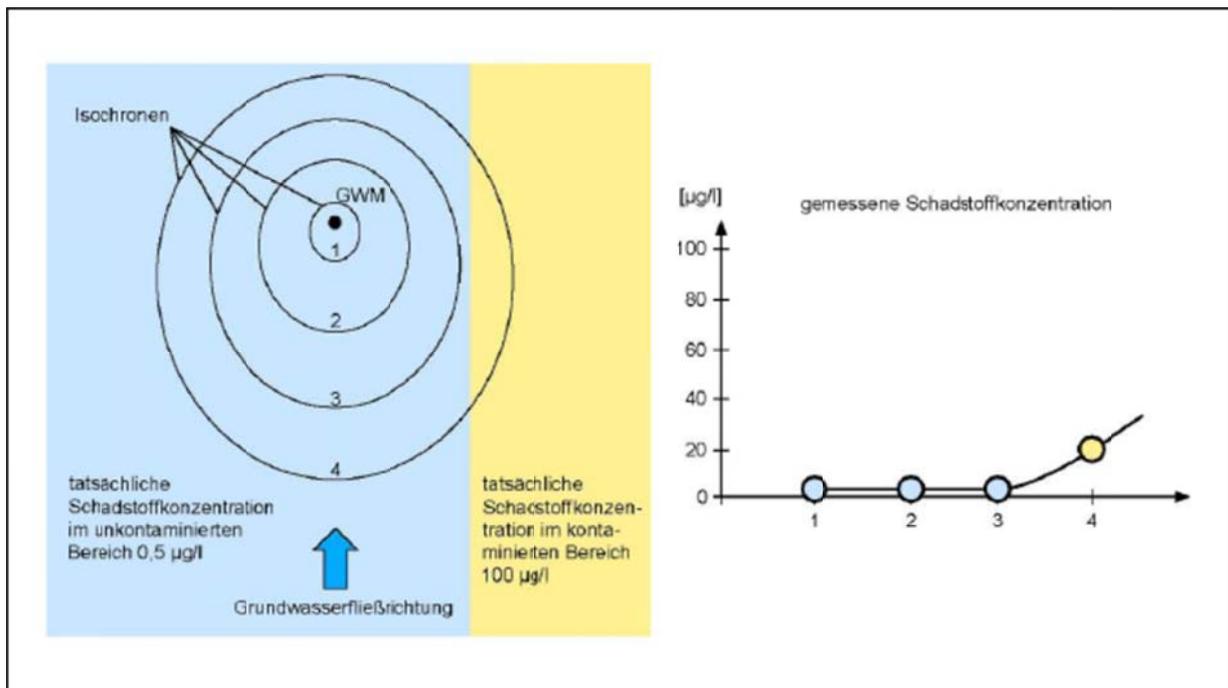
Während der Pumpversuche werden zu definierten Zeitpunkten Grundwasserproben entnommen und auf die relevanten Stoffe untersucht. Für jeden Stoff wird eine Konzentrationsganglinie über die Pumpversuchsdauer erstellt. Das Prinzip der Immissionsmessung beruht auf der Überlegung, dass die während eines Pumpversuchs als Funktion der Zeit gemessene Schadstofffracht von der zeitabhängigen räumlichen Entwicklung des Einzugsgebiets und der räumlichen Verteilung der Schadstoffmasse im Grundwasserleiter bestimmt wird. In Abbildung A2.2 ist das Prinzip der instationären Immissionsmessung dargestellt.



**Abbildung A2.2:** Prinzip der instationären Immissionsmessung (nach TEUTSCH ET AL. 2000)

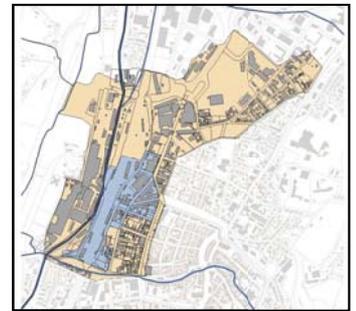


Durch die Entnahme und Untersuchung von Grundwasserproben während des Pumpversuchs erhält man Informationen über die Grundwasserbeschaffenheit innerhalb der zu den jeweiligen Probennahmezeitpunkten erfassten Entnahmebereiche. Im obigen Beispiel liegt der Entnahmebereich von GWM 1 während der gesamten Pumpversuchsdauer außerhalb der Schadstofffahne. Erhöhte Schadstoffkonzentrationen sind deshalb in keiner Probe feststellbar. In GWM 2 wird die Schadstofffahne erst nach einiger Zeit erreicht. Die zu Pumpversuchsbeginn entnommenen Grundwasserproben sind deshalb unbelastet bzw. nur gering belastet. Mit zunehmender Versuchsdauer steigen die Konzentrationen an, da zunehmend belastetes Grundwasser aus der Fahne gefördert wird. Weil aber gleichzeitig weiterhin auch unbelastetes Grundwasser außerhalb der Fahne erfasst wird, sind die gemessenen Schadstoffkonzentrationen geringer als die tatsächlichen innerhalb des erfassten Fahnenabschnitts. In GWM 3 wird schließlich schon zu Beginn des Pumpversuchs belastetes Wasser gefördert, da der Brunnen innerhalb der Fahne liegt. Dennoch sind auch bei diesem Beispiel die gemessenen Konzentrationen stets niedriger als die tatsächlichen, weil auch hier unbelastetes Grundwasser erfasst wird. In Abbildung A2.3 ist der Zusammenhang zwischen gemessenen und tatsächlichen Konzentrationen schematisch dargestellt.

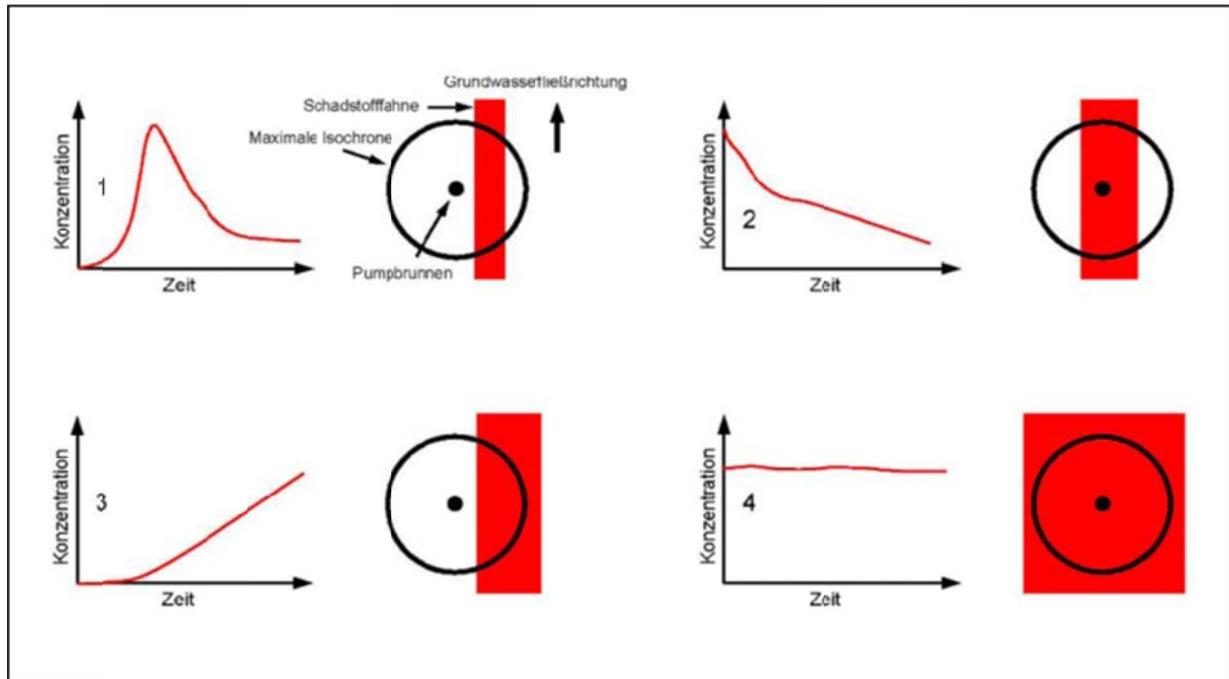


**Abbildung A2.3:** Zusammenhang zwischen gemessenen und tatsächlichen Konzentrationen (verändert nach BOCKELMANN ET AL., 2001)

Mit Hilfe eines Inversionsansatzes kann aus den Konzentrationsganglinien die mögliche Schadstoffverteilung im Einzugsgebiet des Brunnens berechnet werden. Aus der errechneten mittleren Schadstoffkonzentration  $C_{AV}$  im Kontrollquerschnitt und der natürlichen Ruhestromung  $Q_A$  errechnet sich die Emission  $E = Q_A \cdot C_{AV}$  über dem Kontrollquerschnitt.



In Abbildung A2.4 sind vier charakteristische Konzentrationsganglinien und die dazugehörigen Fahnengeometrien dargestellt.



**Abbildung A2.4:** Charakteristische Konzentrationsganglinien verschiedener Fahnengeometrien (nach HOLDER & TEUTSCH, 1999)

Sofern sich die Einzugsgebiete mehrerer Pumpbrunnen überlagern, enthalten die Konzentrationsganglinien Mehrfachinformationen, die – unter günstigen Voraussetzungen – die räumliche Zuordnung verschiedener Einzelfahnen ermöglichen. Falls mehrere hintereinander liegende Kontrollebenen untersucht werden, können durch eine hinreichend genaue Bilanzierung der Frachten prinzipiell auch Rückhalte- und Abbauprozesse quantifiziert werden.

## **ANLAGE 1**

### Aufgabenstellungen der Fallstudien

- 1.1 Fallstudie 1
- 1.2 Fallstudie 2
- 1.3 Fallstudie 3
- 1.4 Fallstudie 4
- 1.5 Fallstudie 5
- 1.6 Fallstudie 6
- 1.7 Fallstudie 8
- 1.8 Fallstudie 9



426,0 m

427,0 m



IPV in GWM 1

Zeit [Std.]	Konz. [ $\mu\text{g/l}$ ]
10	0,0
10,5	5,0
11	9,9
15	23,5
18	28,3
23	33,3
23,5	29,5
24	26,9
27	20,8
36	14,6

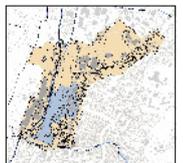
Zeichenerklärung:

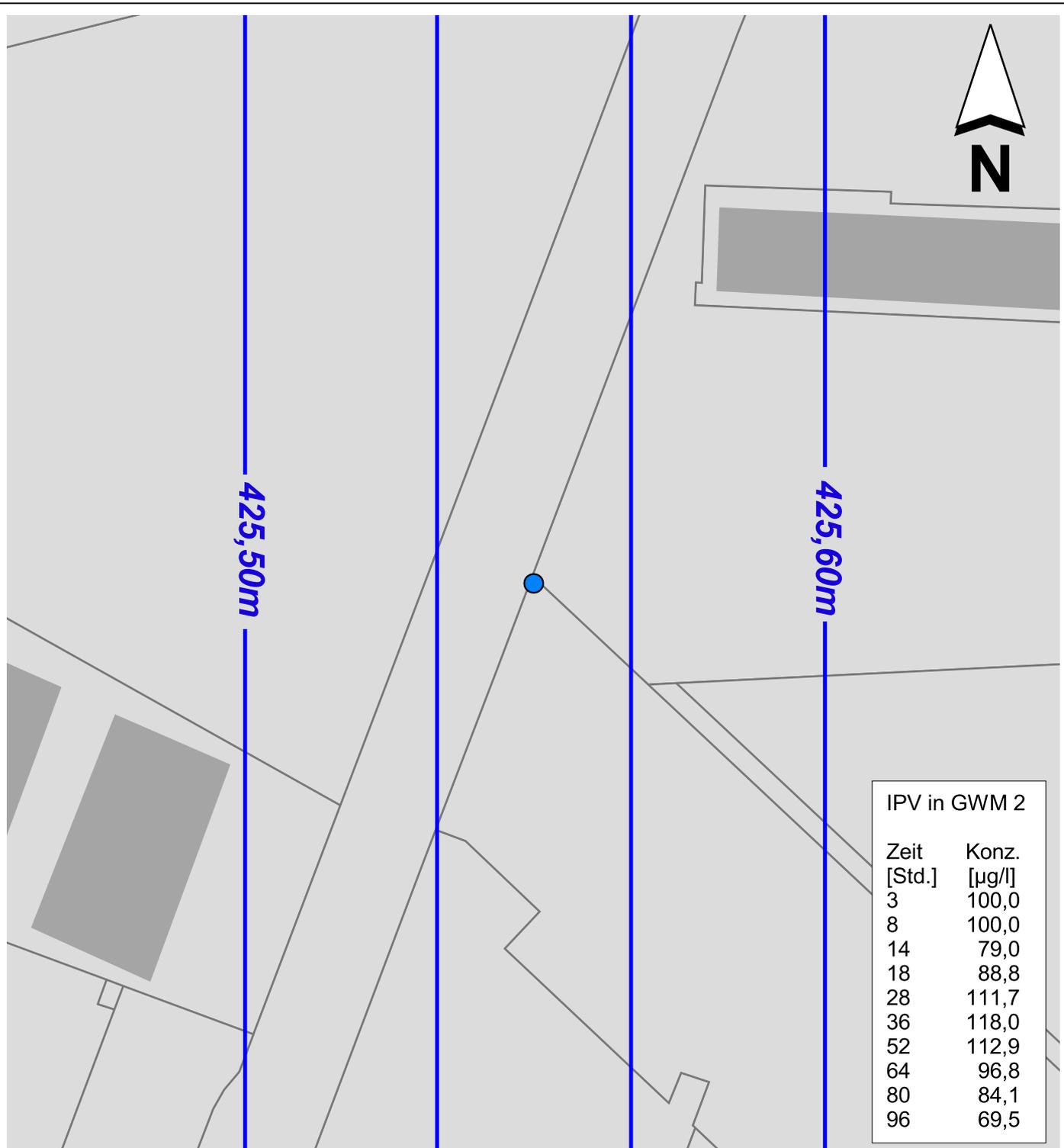


Pumprate 1,25 l/s  
 Porosität 0,125  
 Mächtigkeit 7,4 m  
 Durchlässigkeit 5,1E-05 m/s



Projekt-Nr.: 2 07 2600	Anlage: 1.1
Projekt: Vergleichsstudie "Aufwand-/Qualitätsverhältnis von Auswerteverfahren für Immissionspumpversuche"	
Darstellung: Fallstudie 1 aus Fallgruppe 1 "homogener Aquifer, geringe Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen"	
Maßstab: 1:250	Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg Stadt Ravensburg / LRA Ravensburg Firmenkonsortium Berghof / HPC AG
Bearbeiter: uhek	
erstellt: uhek	
geprüft:	
Datum: 14.10.11	

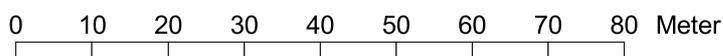




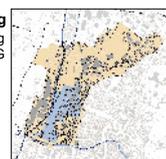
IPV in GWM 2	
Zeit [Std.]	Konz. [ $\mu\text{g/l}$ ]
3	100,0
8	100,0
14	79,0
18	88,8
28	111,7
36	118,0
52	112,9
64	96,8
80	84,1
96	69,5

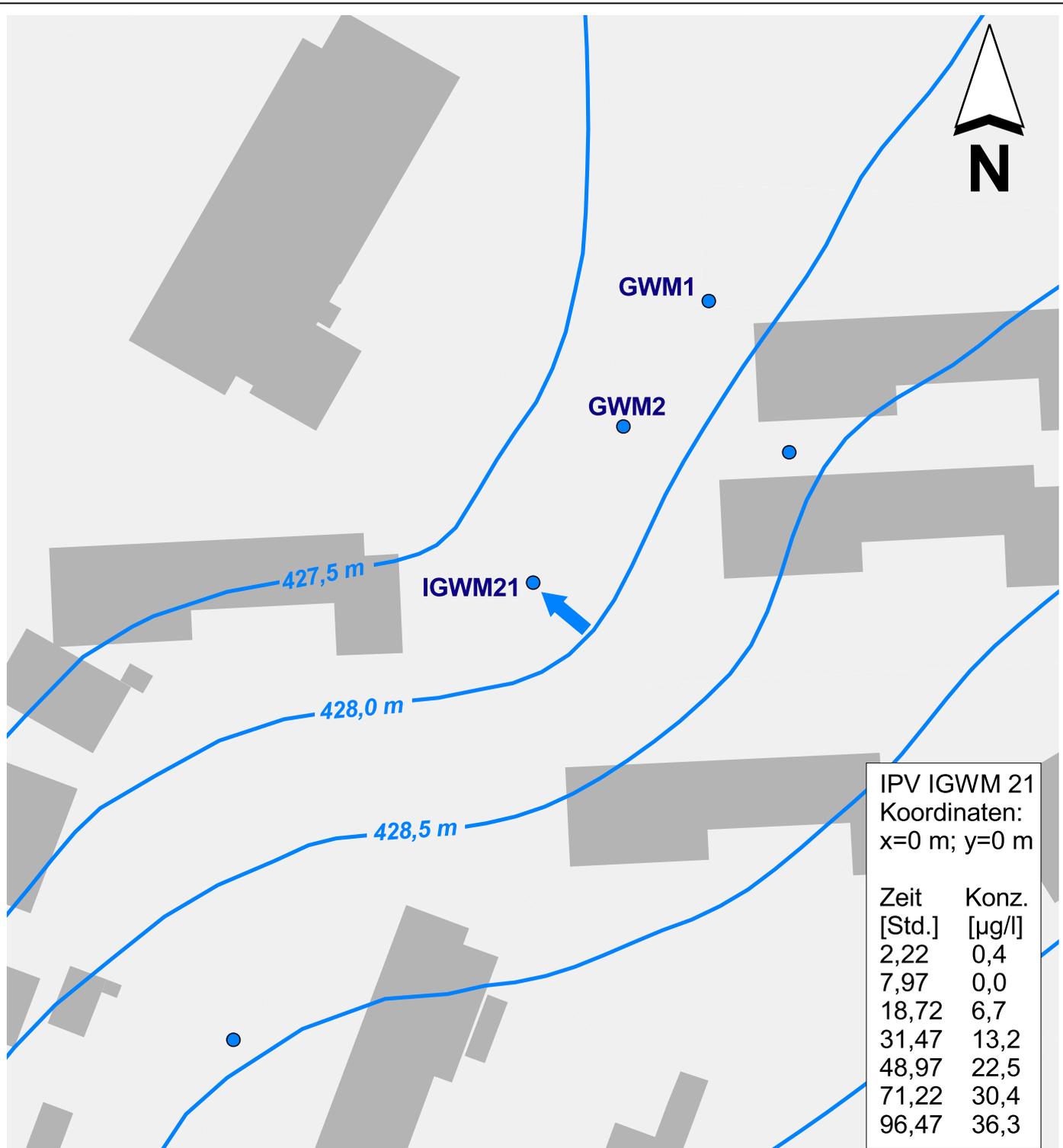
Zeichenerklärung:

- GWM 2
  - Grundwasserhöhe
- Pumprate            5,0 l/s  
 Porosität            0,10  
 Mächtigkeit        5,00 m  
 Durchlässigkeit    0,002 m/s



Projekt-Nr.:	2 07 2600	Anlage:	1.2
Projekt:	<b>Vergleichsstudie          "Aufwand-/Qualitätsverhältnis          von Auswerteverfahren für          Immissionspumpversuche"</b>		
Darstellung:	<b>Fallstudie 2          aus Fallgruppe 1 "homogener Aquifer,          geringe Grundströmung,          ohne hydraulische Beeinflussungen"</b>		
Maßstab:	1:1000	Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg Stadt Ravensburg / LRA Ravensburg Firmenkonsortium Berghof / HPC AG	
Bearbeiter:	uhek		
erstellt:	uhek		
geprüft:			
Datum:	13.10.11		





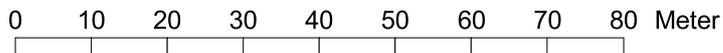
IPV IGWM 21  
 Koordinaten:  
 x=0 m; y=0 m

Zeit [Std.]	Konz. [ $\mu\text{g/l}$ ]
2,22	0,4
7,97	0,0
18,72	6,7
31,47	13,2
48,97	22,5
71,22	30,4
96,47	36,3

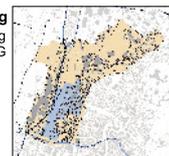
Zeichenerklärung

● GWM  
 GWGleichen 22.10.2007

Pumprate 0,32 l/s  
 Porosität 0,10  
 Mächtigkeit siehe Tabelle  
 Durchlässigkeit siehe Tabelle



Projekt-Nr.:	2 07 2600	Anlage:	1.3
Projekt:	Vergleichsstudie "Aufwand-/Qualitätsverhältnis von Auswerteverfahren für Immissionspumpversuche"		
Darstellung:	Fallstudie 3 aus Fallgruppe 4 "inhomogener Aquifer, mit Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen"		
Maßstab:	1:1000	Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg Stadt Ravensburg / LRA Ravensburg Firmenkonsortium Berghof / HPC AG	
Bearbeiter:	uhek		
erstellt:	uhek		
geprüft:			
Datum:	13.10.11		



## Anlage 1.3 - Beiblatt 1

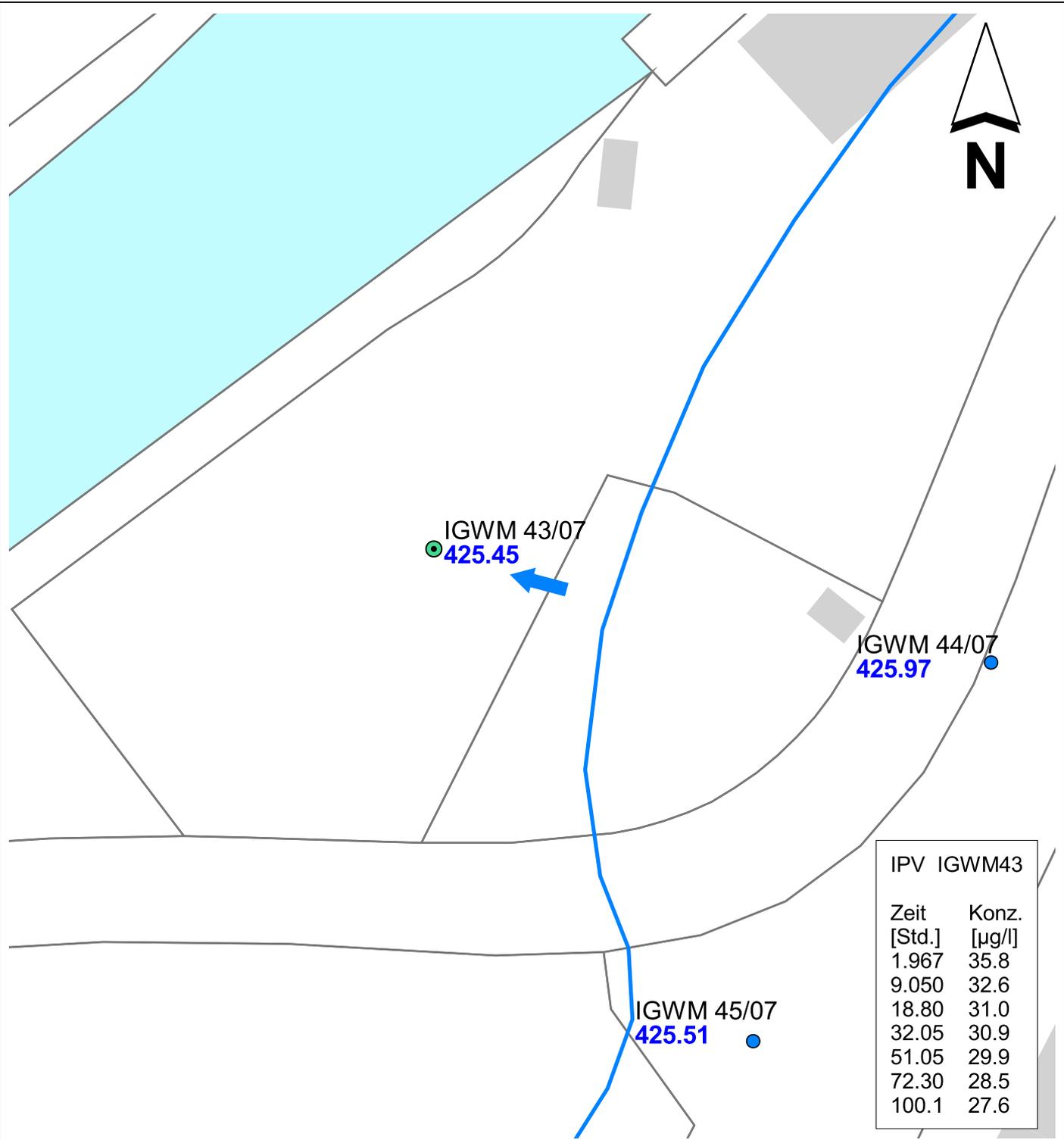
**Fallstudie 3**  
**Aquiferdaten**  
**für MODFLOW**

Rechtswert	Hochwert	GOK	GW-Basis	GW-Top	GW-Höhe	GW	M	T_m <sup>2</sup> /s	kf_m/s
-174.00	139.18	430.84	421.04	425.34	427.31	gesp.	4.30	7.7E-03	1.8E-03
-172.37	79.76	430.84	421.49	425.49	427.18	gesp.	4.00	3.8E-03	9.5E-04
-185.79	29.89	431.86	421.96	425.11	427.00	gesp.	3.15	1.5E-03	4.8E-04
-182.74	-9.00	431.87	421.37	425.57	427.06	gesp.	4.20	1.2E-03	2.9E-04
-177.78	-43.86	432.03	422.43	425.73	427.04	gesp.	3.30	1.0E-03	3.0E-04
-170.61	-77.13	430.97	420.72	424.87	426.84	gesp.	4.15	5.1E-04	1.2E-04
-188.44	-106.95	430.95	423.05	423.95	426.65	gesp.	0.90	4.3E-04	4.8E-04
-220.95	242.84	430.60	421.00	425.30	426.99	gesp.	4.30	1.1E-02	2.6E-03
-213.30	193.63	437.49	419.49	427.24	427.20	frei	7.71	9.4E-03	1.2E-03
-311.94	-53.97	429.36	421.26	425.76	426.46	gesp.	4.51	4.0E-03	8.9E-04
-320.21	-98.55	430.12	421.92	426.72	426.47	frei	4.55	2.0E-03	4.4E-04
30.30	49.10	430.38	423.08	425.08	427.71	gesp.	2.00	1.7E-03	8.5E-04
15.52	27.24	430.29	423.19	425.19	427.61	gesp.	2.00	1.5E-03	7.5E-04
0.00	0.00	430.44	424.14	424.84	427.58	gesp.	0.70	5.7E-04	8.1E-04
-121.10	-54.86	431.05	421.75	424.85	427.27	gesp.	3.10	5.0E-04	1.6E-04
-129.81	-76.73	431.07	423.87	427.17	428.47	gesp.	3.30	7.3E-04	2.2E-04
-136.00	-93.22	431.16	423.56	427.86	428.51	gesp.	4.30	5.6E-04	1.3E-04
-69.36	-189.30	432.67	427.87	431.27	428.94	frei	1.07	5.0E-04	4.7E-04
56.63	228.50	430.94	422.94	425.64	427.98	gesp.	2.70	9.9E-03	3.7E-03
98.54	184.32	429.71	423.51	425.91	427.91	gesp.	2.40	5.0E-03	2.1E-03
130.46	130.70	429.56	424.76	426.06	428.05	gesp.	1.30	2.8E-03	2.2E-03
-298.57	-146.69	430.92	423.32	425.62	426.27	gesp.	2.30	1.8E-03	7.8E-04
-134.29	-261.67	431.87	427.17	430.87	428.19	frei	1.02	1.0E-03	9.8E-04
290.3	188.10	430.68	424.28	425.88	428.45	gesp.	1.60	1.1E-03	6.7E-04
188.84	167.8	430.92	424.52	426.82	428.2	gesp.	2.30	1.6E-03	7.0E-04

**Fallstudie 3**

**Grundwasserhöhen**  
**Stichtag 22.10.2007**

<b>x</b>	<b>y</b>	<b>GW-Höhe</b>
212.33	238.14	428.35
290.30	188.10	428.39
173.75	208.97	428.20
188.84	167.80	428.19
-174.00	139.18	426.96
-170.43	76.46	426.98
-238.36	46.98	426.83
-156.33	23.52	427.42
-177.92	-34.72	426.92
-211.44	-160.74	427.64
-24.89	-286.29	430.53
-51.76	-79.56	429.29
157.19	18.17	429.26
-46.32	-151.75	429.06
-134.29	-261.67	428.19
56.63	228.50	427.98
-201.01	284.87	427.11
-176.18	124.80	426.95
30.30	49.10	427.73
15.52	27.24	427.64
44.14	22.75	428.54
-311.94	-53.97	426.30
-165.68	156.88	426.99
-341.81	-122.18	426.18
-185.79	29.89	426.97
-182.74	-9.00	427.00
-177.78	-43.86	426.89
-188.44	-106.95	426.60
-220.95	242.84	427.06
-213.30	193.63	426.98
-320.21	-98.55	426.28
0.00	0.00	427.63
-121.10	-54.86	427.06
-129.81	-76.73	428.31
-136.00	-93.22	428.26
-69.36	-189.30	428.59
98.54	184.32	427.91
130.46	130.70	428.05
-298.57	-146.69	426.27



IPV IGWM43	
Zeit [Std.]	Konz. [ $\mu\text{g/l}$ ]
1.967	35.8
9.050	32.6
18.80	31.0
32.05	30.9
51.05	29.9
72.30	28.5
100.1	27.6

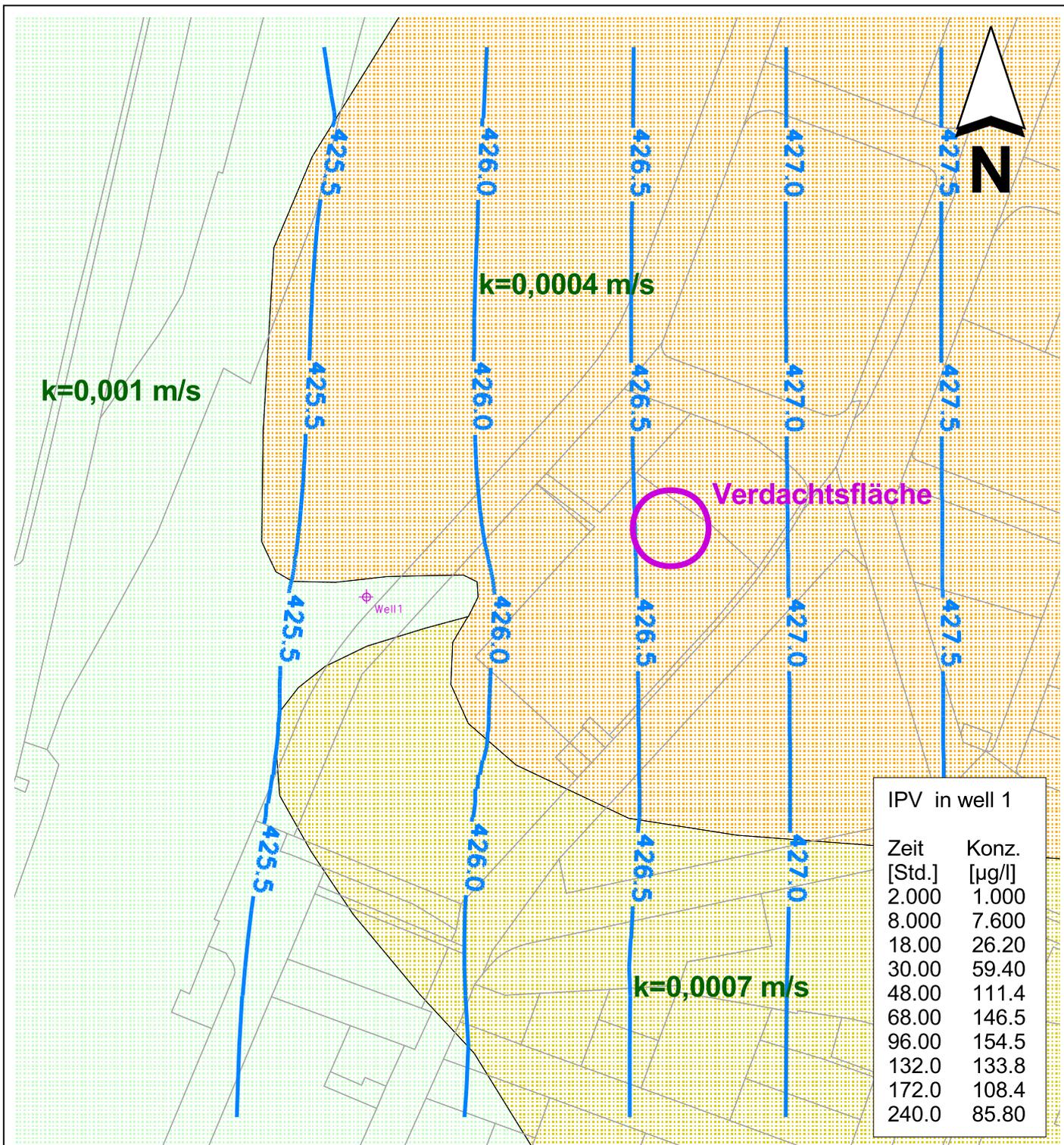
Zeichenerklärung:

- IGWM43 (IPV)
- GWM
- GW-Gleichen (0,5 m)
- Schussen

Pumprate 2,2 l/s  
 Porosität 0,09  
 Mächtigkeit 3,61 m  
 Durchlässigkeit 0,0013 m/s  
 hydraul. Gradient 0,0025



Projekt-Nr.:	2 07 2600	Anlage:	1.4
Projekt:	<b>Vergleichsstudie          "Aufwand-/Qualitätsverhältnis          von Auswerteverfahren für          Immissionspumpversuche"</b>		
Darstellung:	<b>Fallstudie 4          aus Fallgruppe 1 "homogener Aquifer,          geringe Grundströmung,          ohne hydraulische Beeinflussungen"</b>		
Maßstab:	1:500	Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg Stadt Ravensburg / LRA Ravensburg Firmenkonsortium Berghof / HPC AG	
Bearbeiter:	uhek		
erstellt:	uhek		
geprüft:			
Datum:	14.10.11		



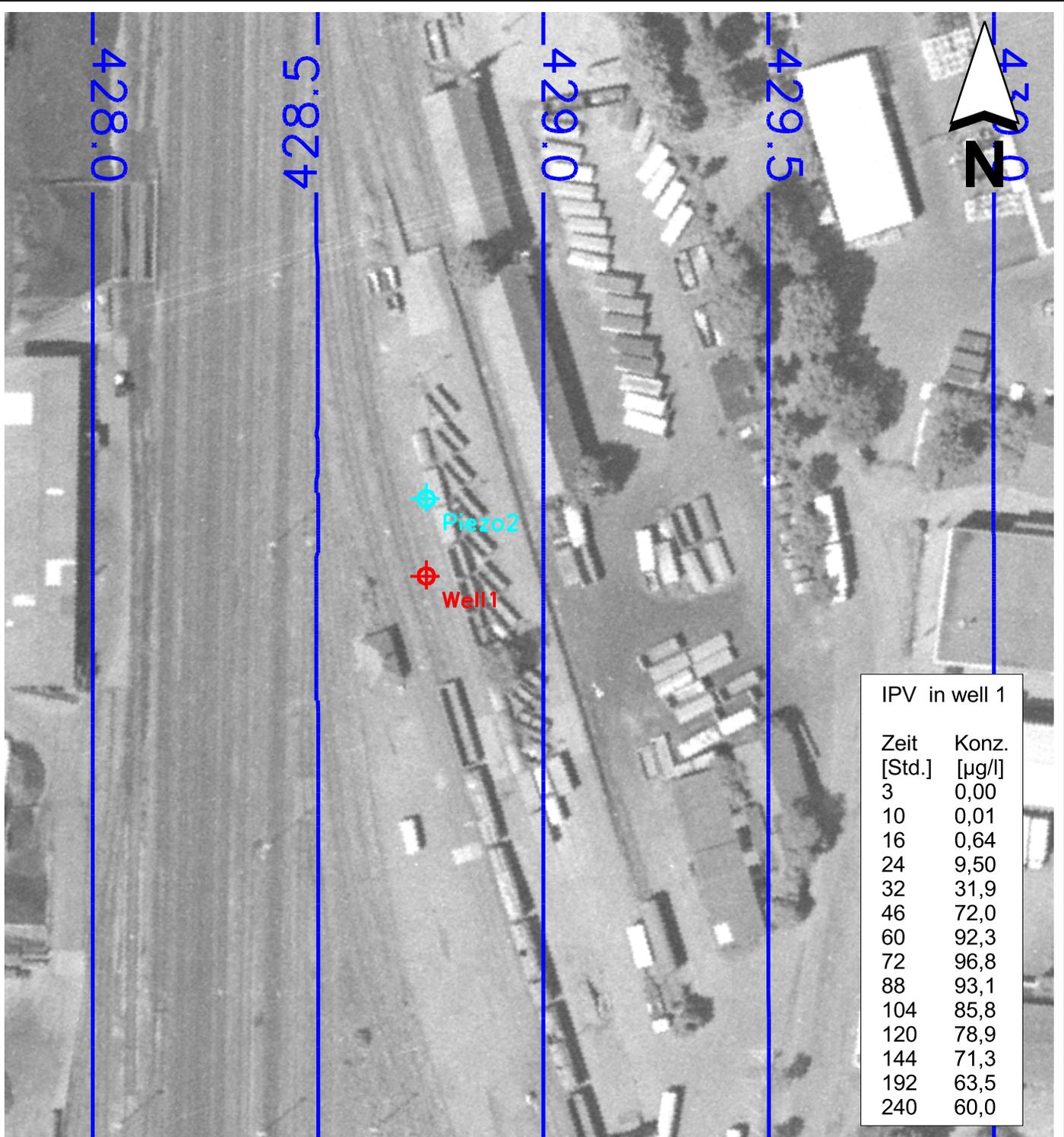
IPV in well 1	
Zeit [Std.]	Konz. [µg/l]
2.000	1.000
8.000	7.600
18.00	26.20
30.00	59.40
48.00	111.4
68.00	146.5
96.00	154.5
132.0	133.8
172.0	108.4
240.0	85.80

**Zeichenerklärung:**

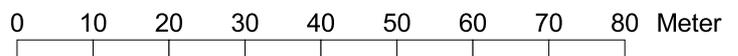
- GW-Gleichen
- GW-Gleichen
- Brunnen
- Hydrogeologische Einheiten
- Schussenkies
- Flappbach-Schwemmfächer
- Seitental-Schwemmfächer
  
- Pumprate 10,0 l/s
- Porosität 0,15
- Mächtigkeit 6,70 m
- Durchlässigkeit s. Hydro-Einheiten



Projekt-Nr.:	2 07 2600	Anlage:	1.5
Projekt:	Vergleichsstudie "Aufwand-/Qualitätsverhältnis von Auswerteverfahren für Immissionspumpversuche"		
Darstellung:	Fallstudie 5 aus Fallgruppe 4 "inhomogener Aquifer, mit Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen"		
Maßstab:	1:2000	Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg Stadt Ravensburg / LRA Ravensburg Firmenkonsortium Berghof / HPC AG	
Bearbeiter:	uhek		
erstellt:	uhek		
geprüft:			
Datum:	14.10.11		



IPV in well 1	
Zeit [Std.]	Konz. [ $\mu\text{g/l}$ ]
3	0,00
10	0,01
16	0,64
24	9,50
32	31,9
46	72,0
60	92,3
72	96,8
88	93,1
104	85,8
120	78,9
144	71,3
192	63,5
240	60,0

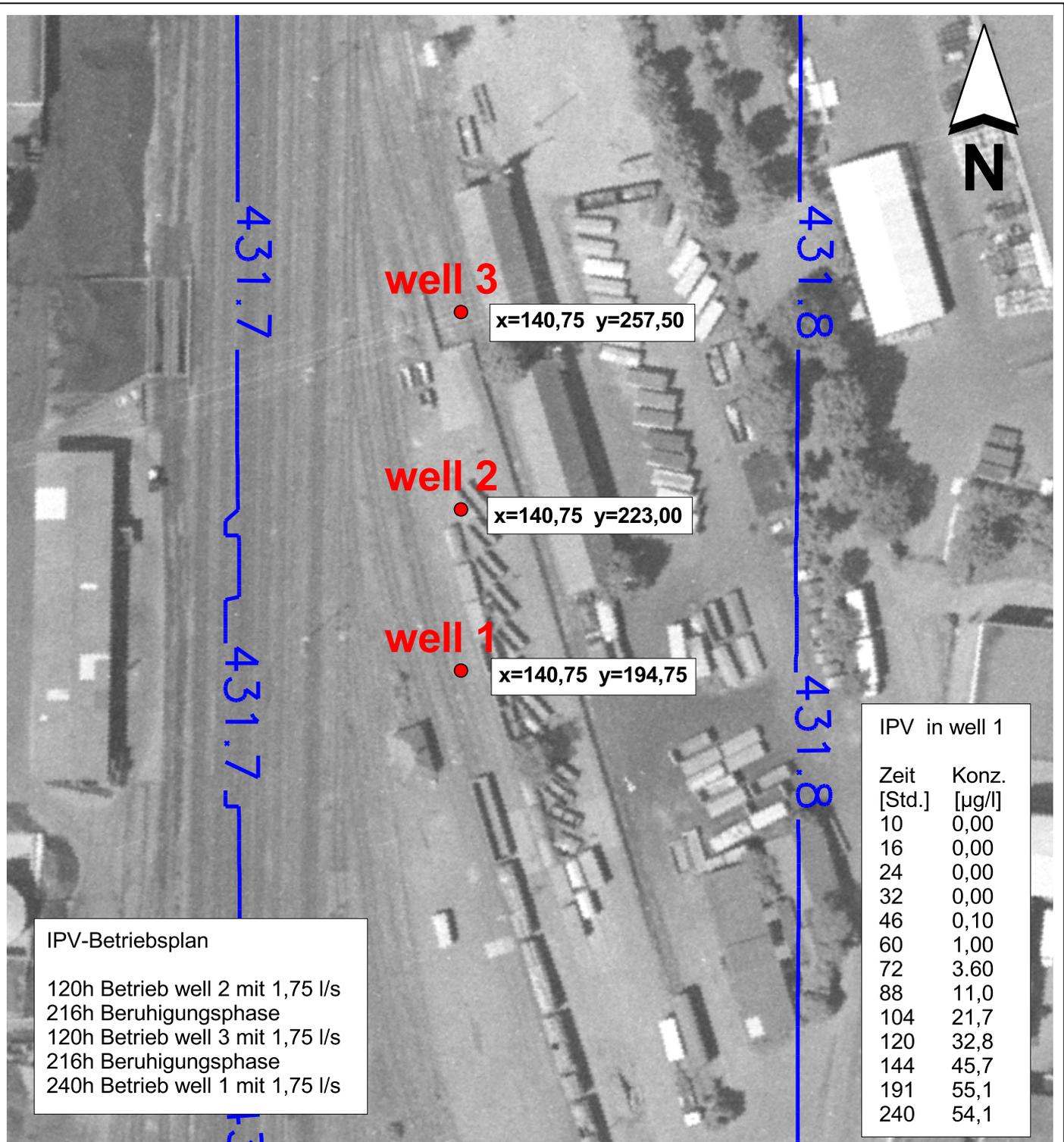


Zeichenerklärung:

- GW-Gleichen
- 0,5 m-Gleichen
- Brunnen well 1
- Piezometer

Pumprate 1,75 l/s  
 Porosität 0,10  
 Mächtigkeit 7,0 m  
 Durchlässigkeit 0,0004 m/s

Projekt-Nr.:	2 07 2600	Anlage:	1.6
Projekt:	<b>Vergleichsstudie          "Aufwand-/Qualitätsverhältnis          von Auswerteverfahren für          Immissionspumpversuche"</b>		
Darstellung:	<b>Fallstudie 6          aus Fallgruppe 2 "homogener Aquifer,          starke Grundströmung,          ohne hydraulische Beeinflussungen"</b>		
Maßstab:	1:1000	Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg Stadt Ravensburg / LRA Ravensburg Firmenkonsortium Berghof / HPC AG	
Bearbeiter:	uhek		
erstellt:	uhek		
geprüft:			
Datum:	13.10.11		



**IPV-Betriebsplan**

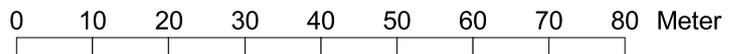
120h Betrieb well 2 mit 1,75 l/s  
 216h Beruhigungsphase  
 120h Betrieb well 3 mit 1,75 l/s  
 216h Beruhigungsphase  
 240h Betrieb well 1 mit 1,75 l/s

IPV in well 1	
Zeit [Std.]	Konz. [ $\mu\text{g/l}$ ]
10	0,00
16	0,00
24	0,00
32	0,00
46	0,10
60	1,00
72	3,60
88	11,0
104	21,7
120	32,8
144	45,7
191	55,1
240	54,1

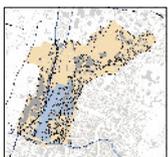
Zeichenerklärung

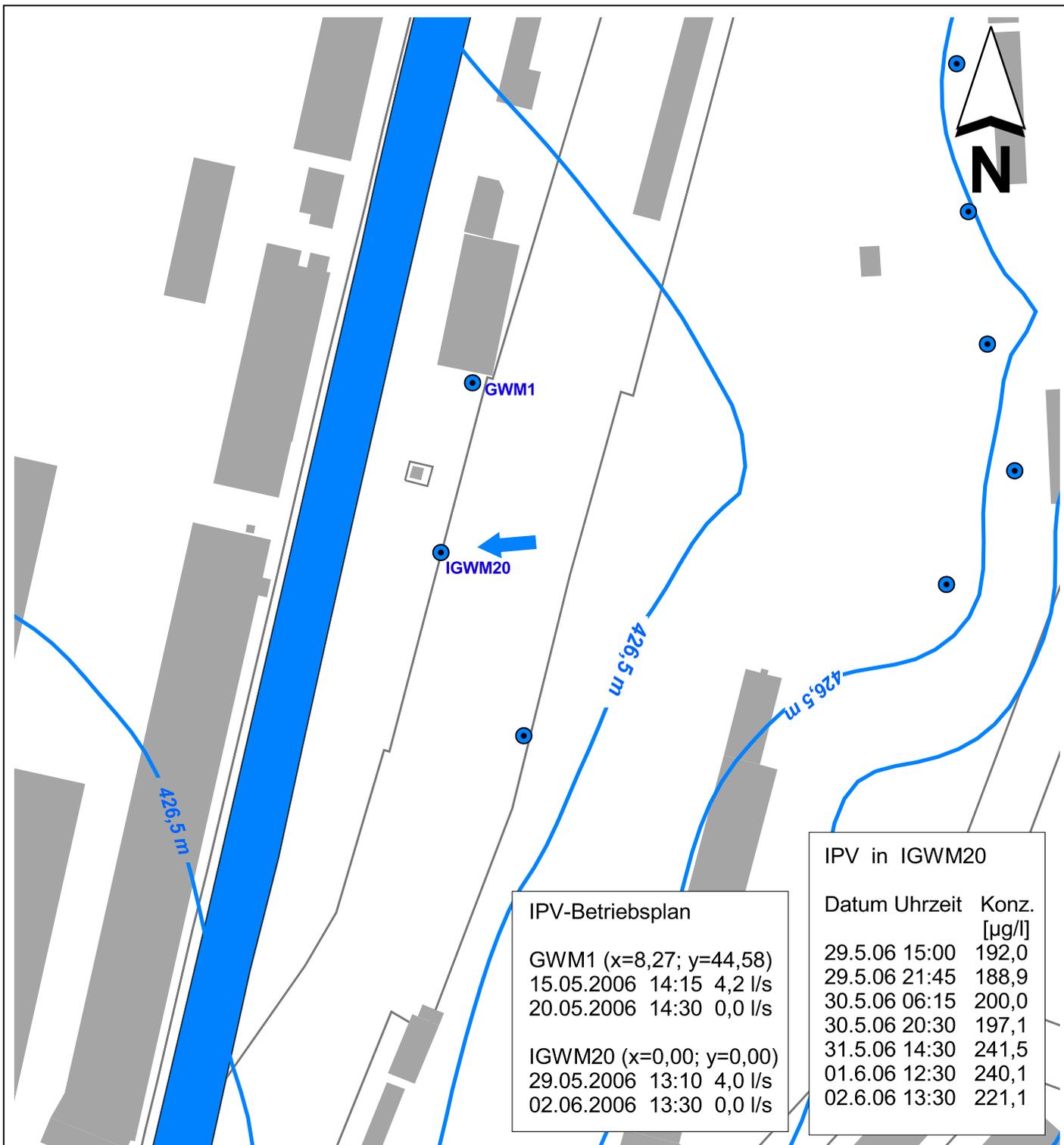
GW-Gleichen  
 0,1 m  
 Brunnen

Pumprate well 1 1,75 l/s  
 Porosität 0,10  
 Mächtigkeit 7,0 m  
 Durchlässigkeit 0,0004 m/s



Projekt-Nr.:	2 07 2600	Anlage:	1.7
Projekt:	Vergleichsstudie "Aufwand-/Qualitätsverhältnis von Auswerteverfahren für Immissionspumpversuche"		
Darstellung:	Fallstudie 8 aus Fallgruppe 3 "homogener Aquifer, geringe Grundströmung, mit hydraulischer Vorbeeinflussung"		
Maßstab:	1:1000	Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg Stadt Ravensburg / LRA Ravensburg Firmenkonsortium Berghof / HPC AG	
Bearbeiter:	uhek		
erstellt:	uhek		
geprüft:			
Datum:	13.10.11		





**IPV-Betriebsplan**

GWM1 (x=8,27; y=44,58)			
15.05.2006	14:15	4,2 l/s	
20.05.2006	14:30	0,0 l/s	
IGWM20 (x=0,00; y=0,00)			
29.05.2006	13:10	4,0 l/s	
02.06.2006	13:30	0,0 l/s	

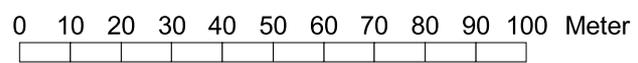
**IPV in IGWM20**

Datum	Uhrzeit	Konz. [µg/l]
29.5.06	15:00	192,0
29.5.06	21:45	188,9
30.5.06	06:15	200,0
30.5.06	20:30	197,1
31.5.06	14:30	241,5
01.6.06	12:30	240,1
02.6.06	13:30	221,1

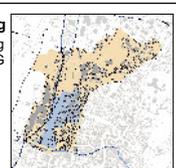
Zeichenerklärung

Kontrollbrunnen  
 GW-Gleichen

Porosität 0,10  
 Mächtigkeit 4,55 m  
 Durchlässigkeit 0,00044 m/s



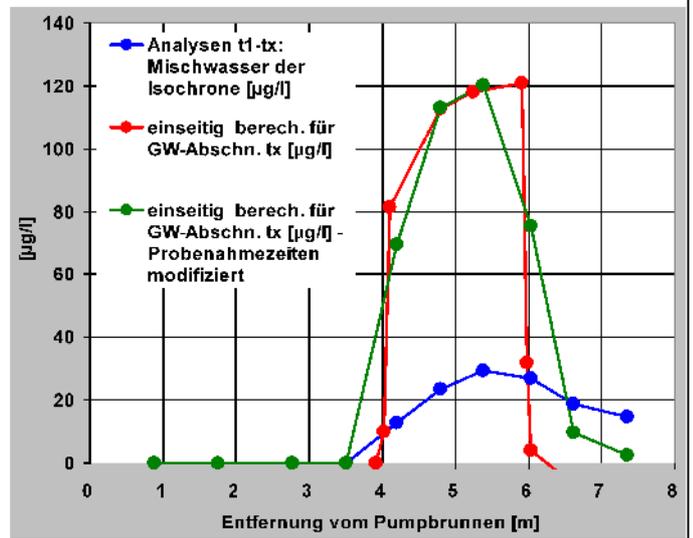
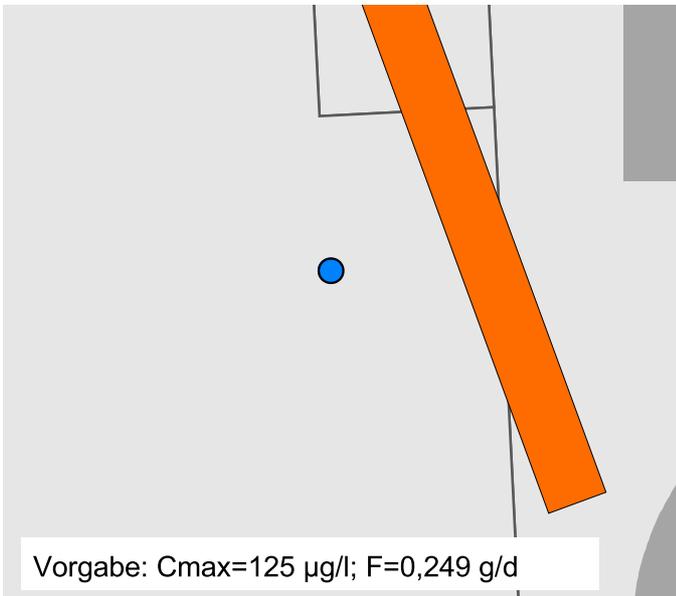
Projekt-Nr.:	2 07 2600	Anlage:	1.8
Projekt:	Vergleichsstudie "Aufwand-/Qualitätsverhältnis von Auswerteverfahren für Immissionspumpversuche"		
Darstellung:	Fallstudie 9 aus Fallgruppe 3 "homogener Aquifer, geringe Grundströmung, mit hydraulischer Vorbeeinflussung"		
Maßstab:	1:1500	Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg Stadt Ravensburg / LRA Ravensburg Firmenkonsortium Berghof / HPC AG	
Bearbeiter:	uhek		
erstellt:	uhek		
geprüft:			
Datum:	17.10.11		



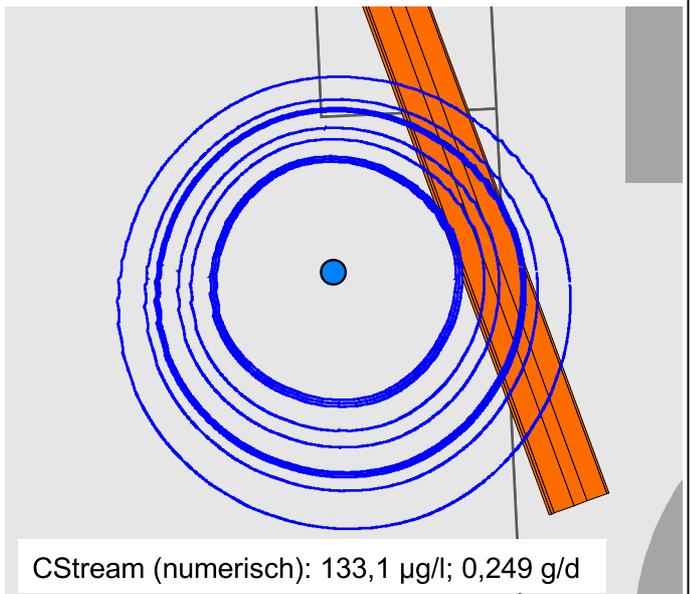
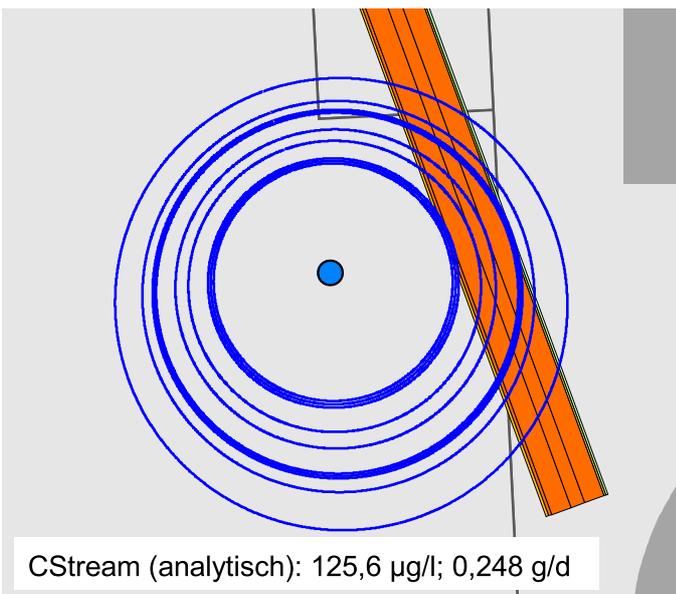
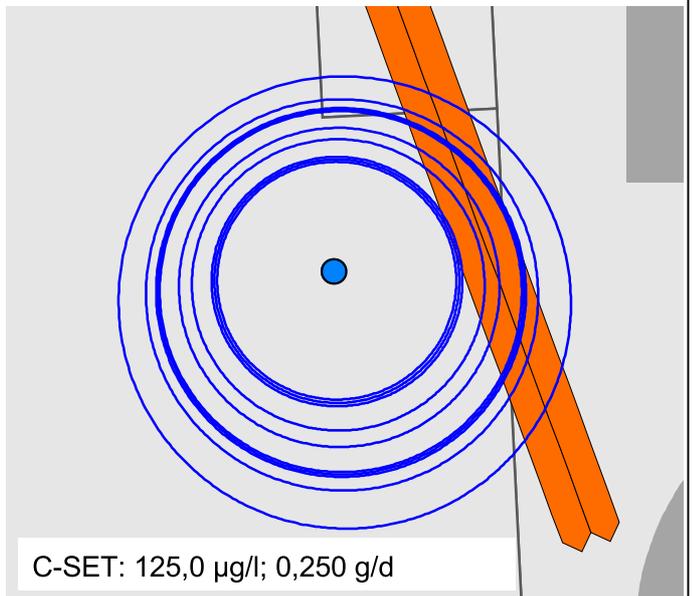
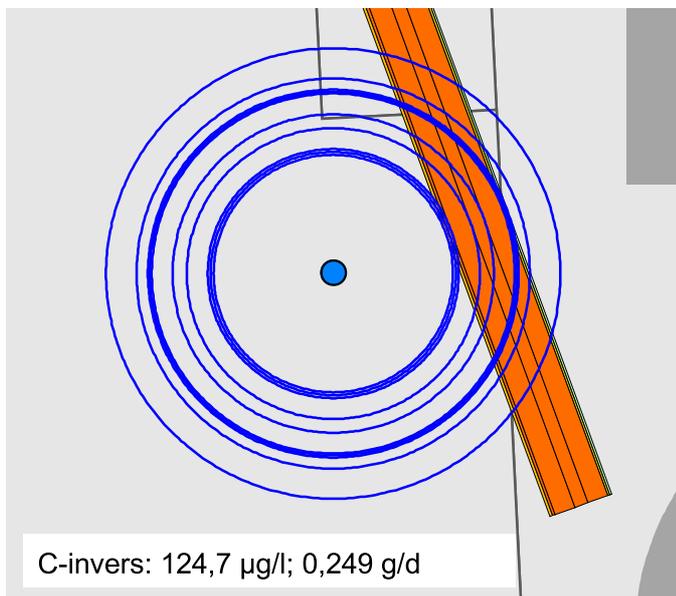
## **ANLAGE 2**

Ergebnisse für Erfassungsbereich (Isochronen), Konzentration und Fracht

- 2.1 Fallstudie 1
- 2.2 Fallstudie 2
- 2.3 Fallstudie 3
- 2.4 Fallstudie 4
- 2.5 Fallstudie 5
- 2.6 Fallstudie 6
- 2.7 Fallstudie 8
- 2.8 Fallstudie 9



LUBW-TOOL:  $121,0 \mu\text{g/l}$ ;  $0,35 \text{ g/d}$   
 Probezeiten optimiert:  $120,3 \mu\text{g/l}$ ;  $0,29 \text{ g/d}$

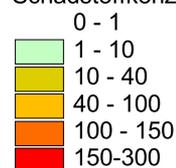


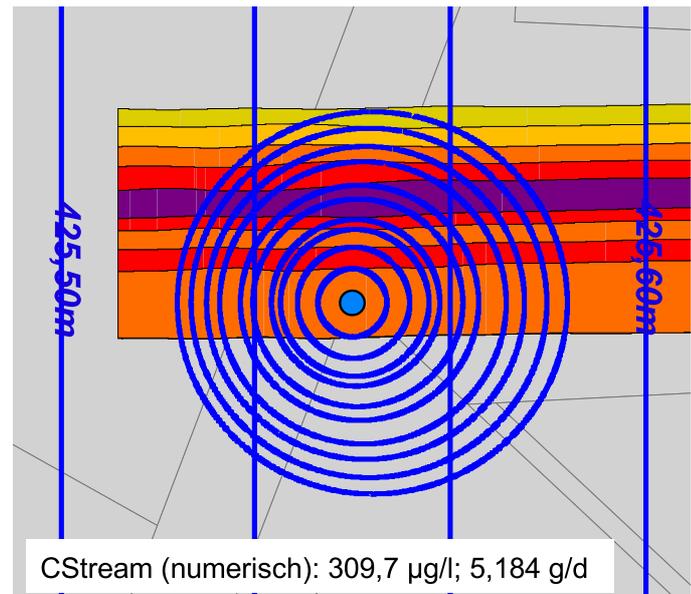
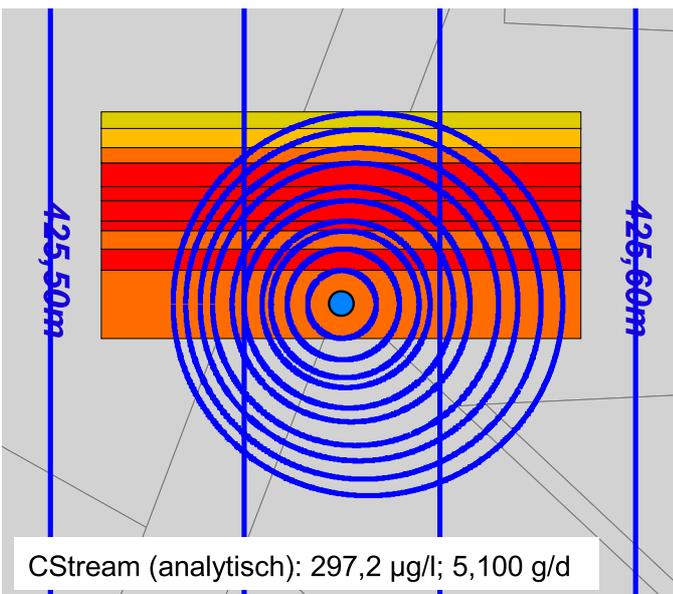
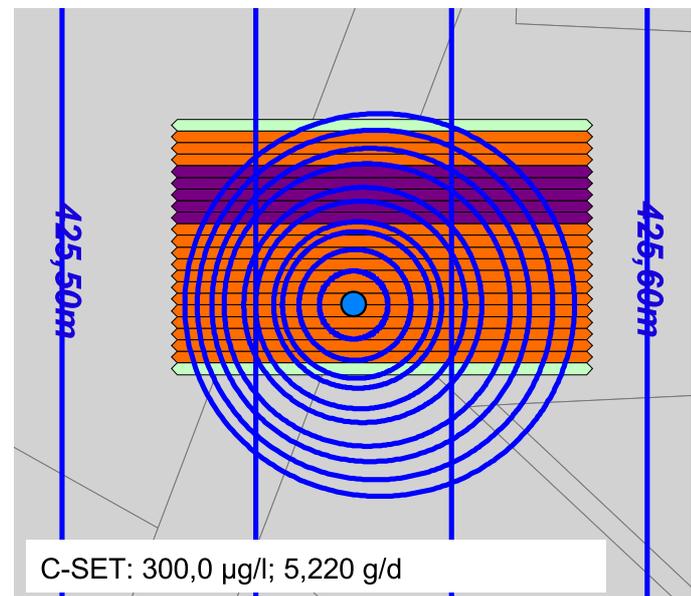
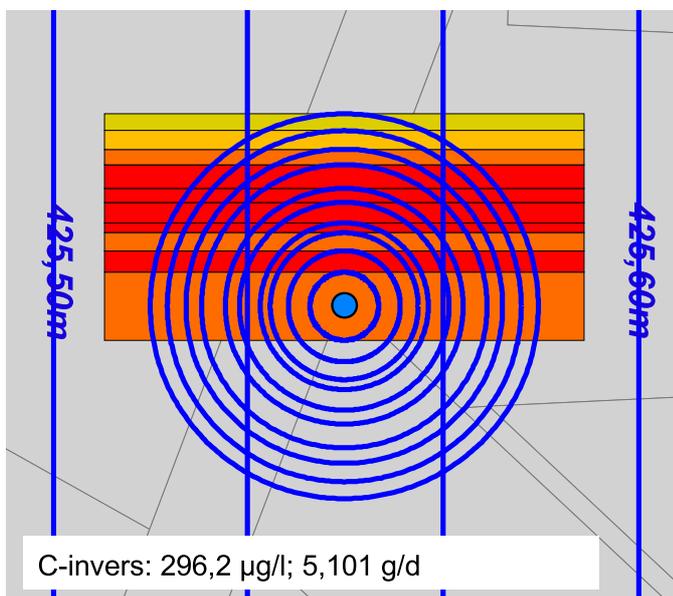
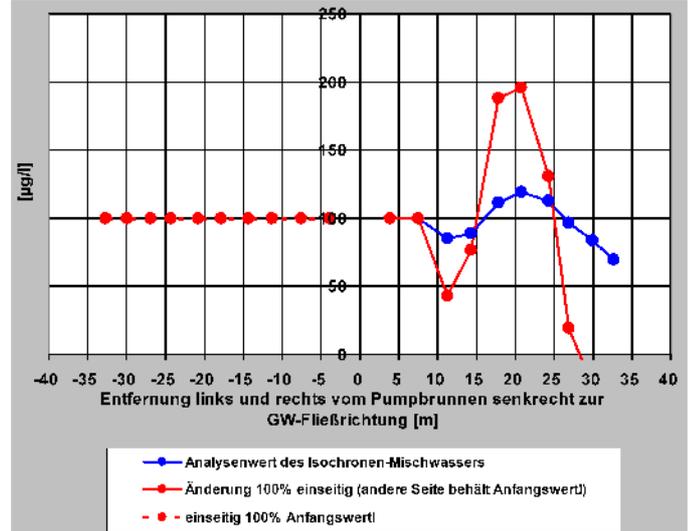
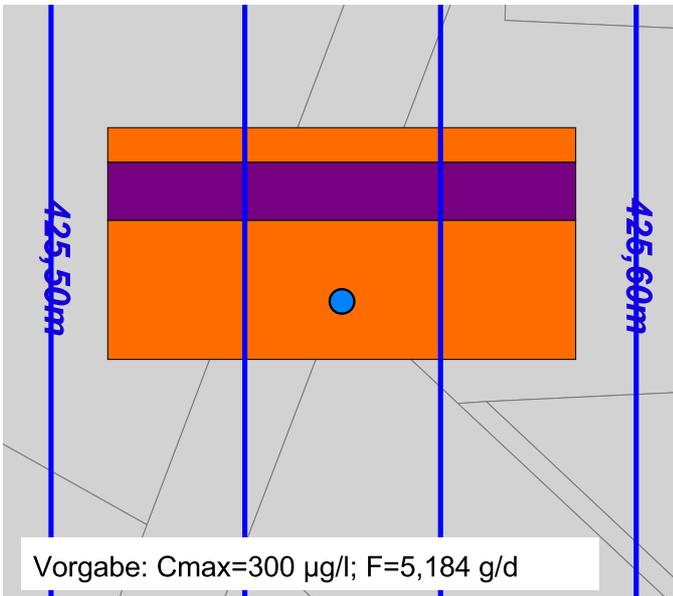
### Anlage 2.1 - Fallstudie 1

(homogener Aquifer, geringe Grundströmung ohne hydraulische Beeinflussungen)

### Ergebnisse für Erfassungsbereich (Isochronen), Konzentration und Fracht

Schadstoffkonzentration



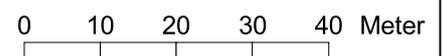
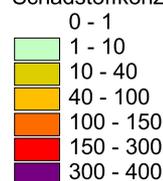


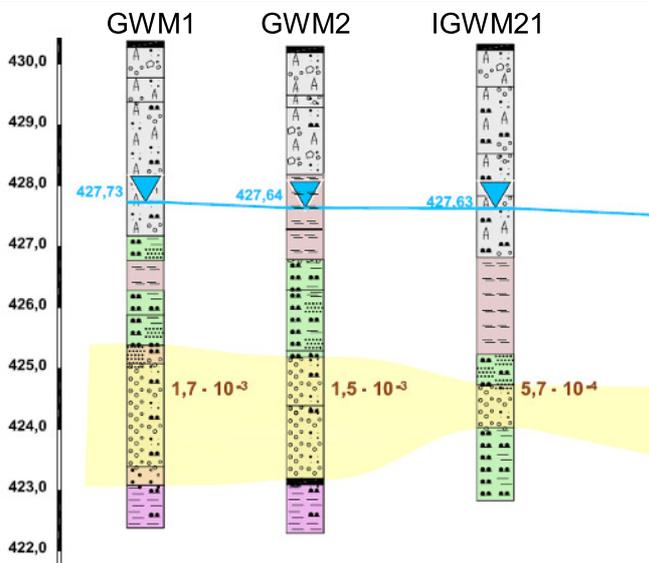
### Anlage 2.2 - Fallstudie 2

(homogener Aquifer, geringe Grundströmung ohne hydraulische Beeinflussungen)

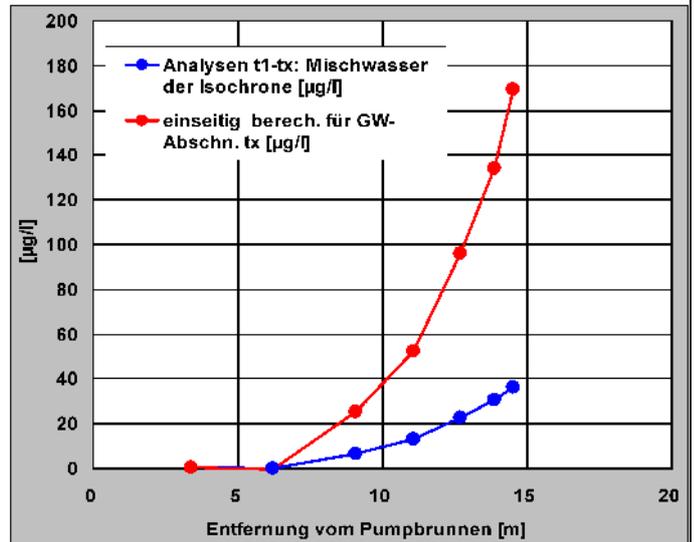
**Ergebnisse für Erfassungsbereich (Isochronen), Konzentration und Fracht**

Schadstoffkonzentration

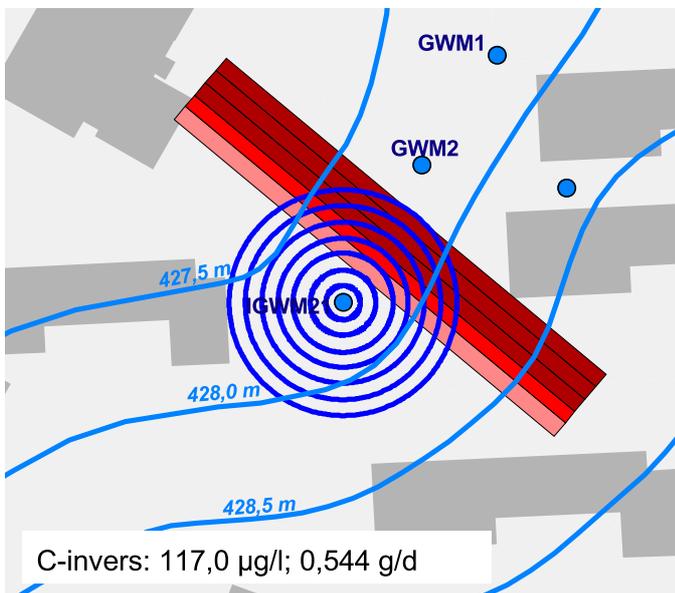




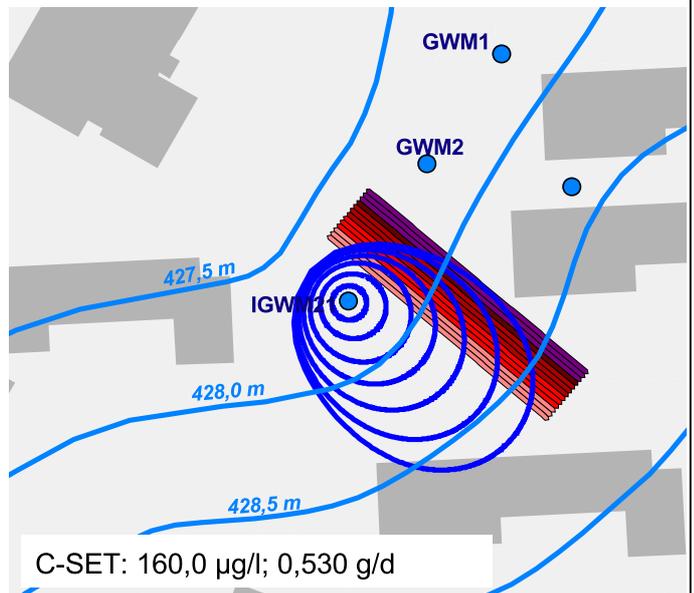
Vorgabe (Modflow): Cmax=135 µg/s; F=0,515 g/d



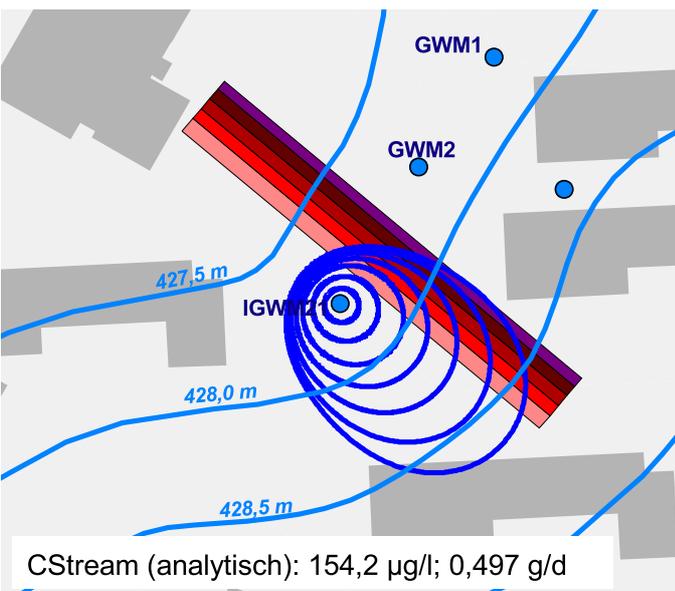
LUBW-TOOL: 169,3 µg/l; 0,454 g/d



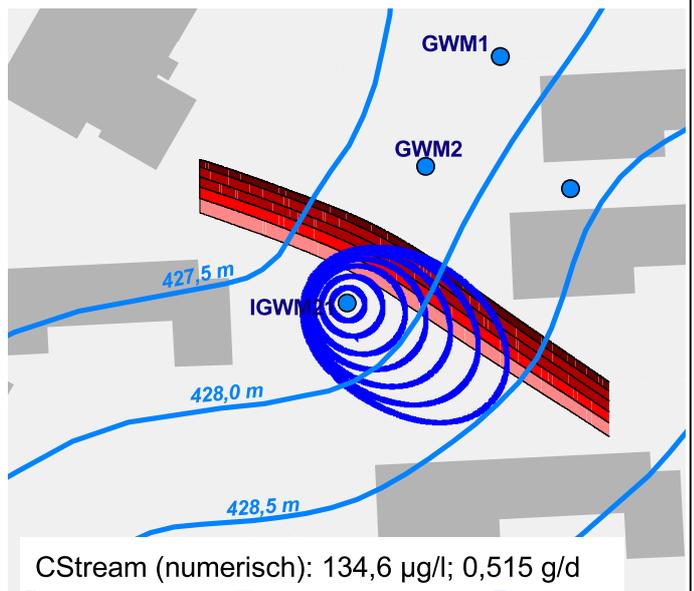
C-invers: 117,0 µg/l; 0,544 g/d



C-SET: 160,0 µg/l; 0,530 g/d



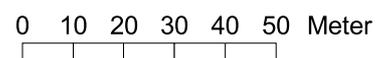
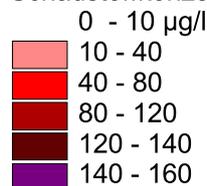
CStream (analytisch): 154,2 µg/l; 0,497 g/d

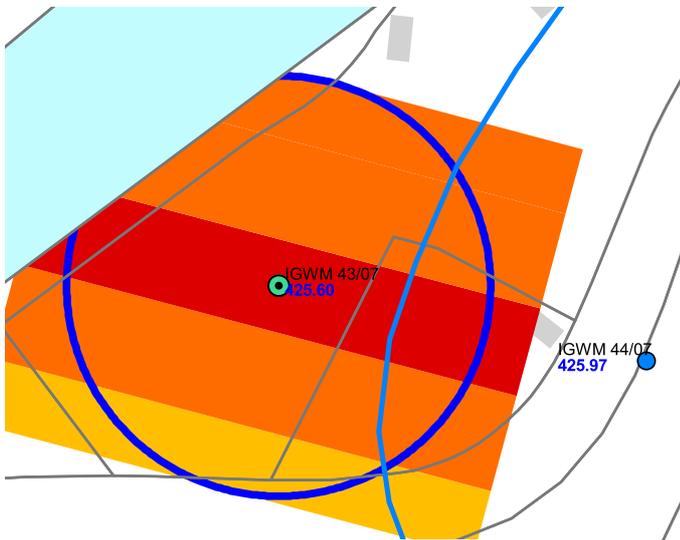


CStream (numerisch): 134,6 µg/l; 0,515 g/d

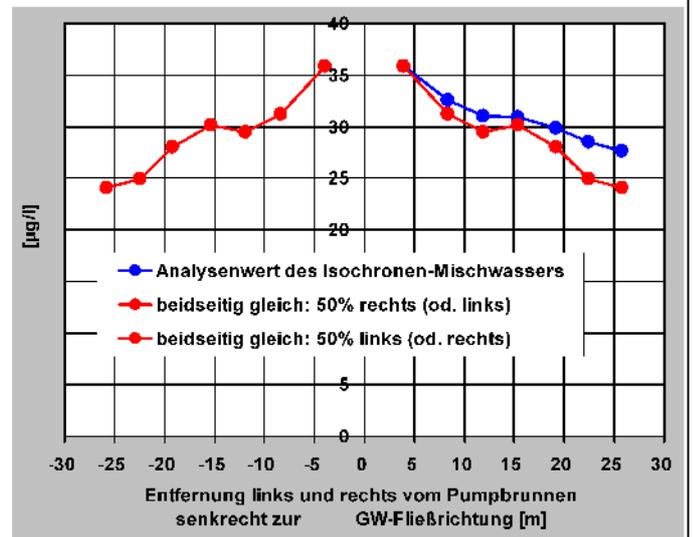
**Anlage 2.3 - Fallstudie 3**  
 (inhomogener Aquifer, mit Grundströmung ohne hydraulische Beeinflussungen)  
**Ergebnisse für Erfassungsbereich (Isochronen), Konzentration und Fracht**

Schadstoffkonzentration

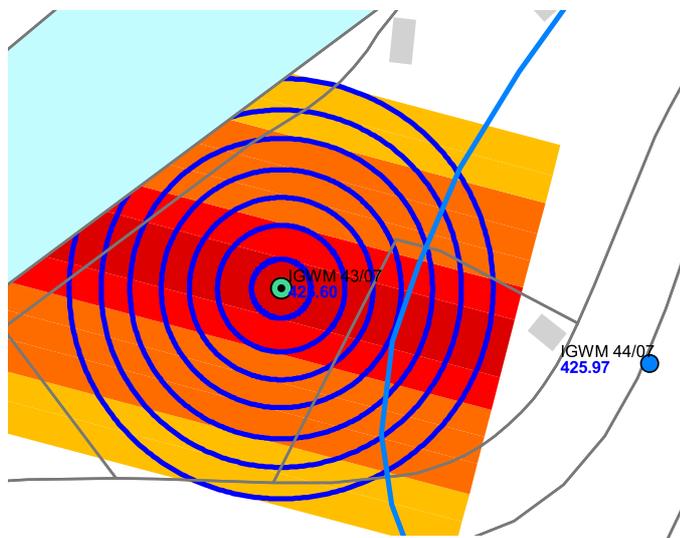




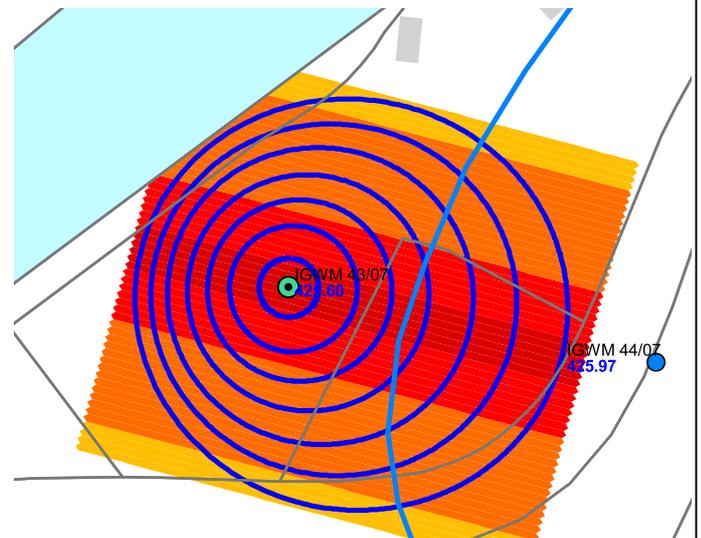
C-vorwärts: Cmax=35,8 µg/l; F=1,71 g/d



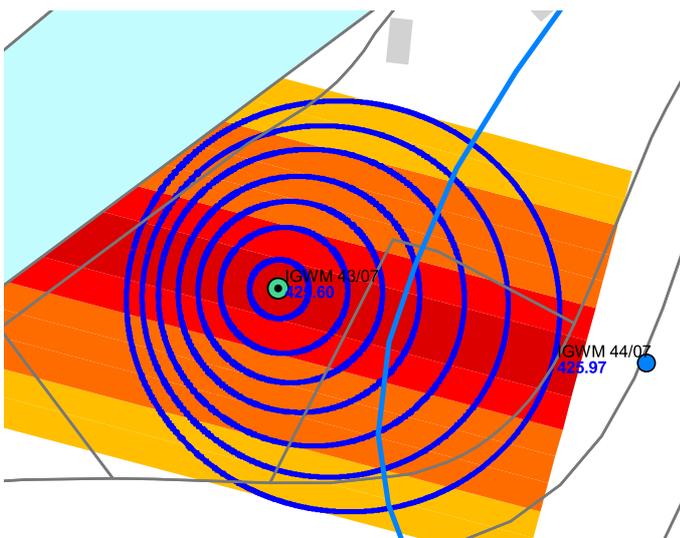
LUBW-TOOL: 35,8 µg/l; 1,58 g/d



C-invers: 35,8 µg/l; 1,694 g/d



C-SET: 39,0 µg/l; 1,690 g/d



CStream (analytisch): 35,8 µg/l; 1,652 g/d



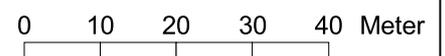
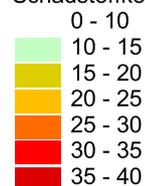
Einzugsgebiet berechnet mit Feflow-Standortmodell: 38 µg/l; 1,94 g/d

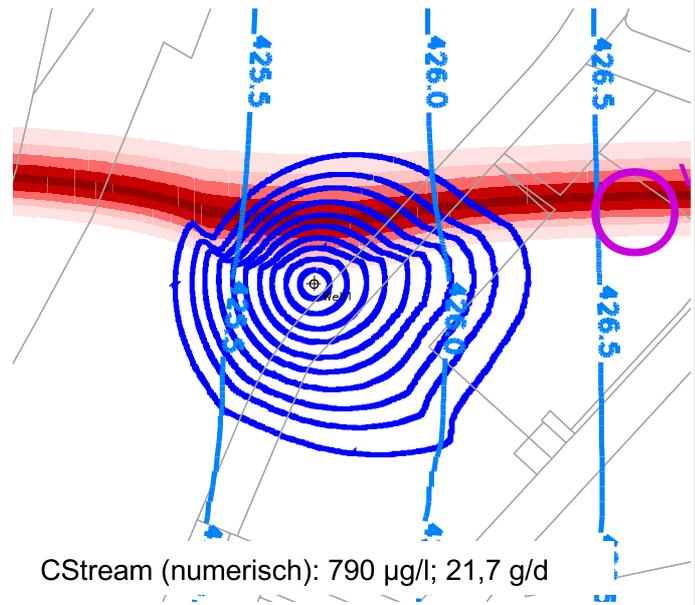
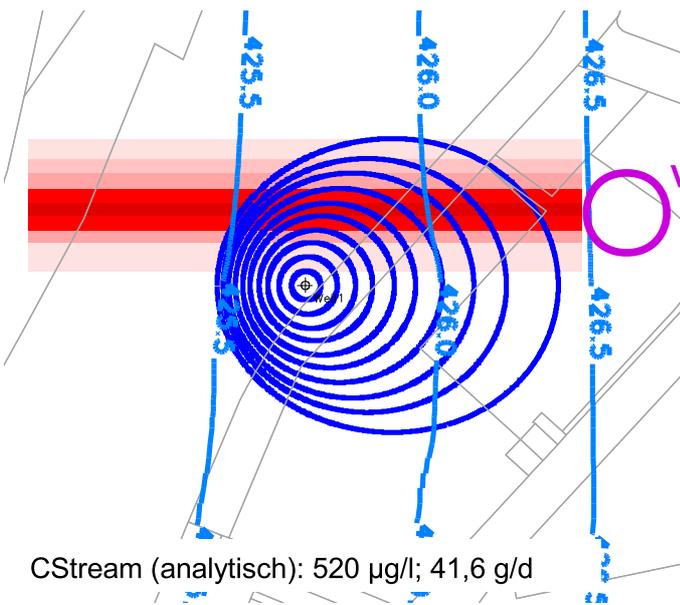
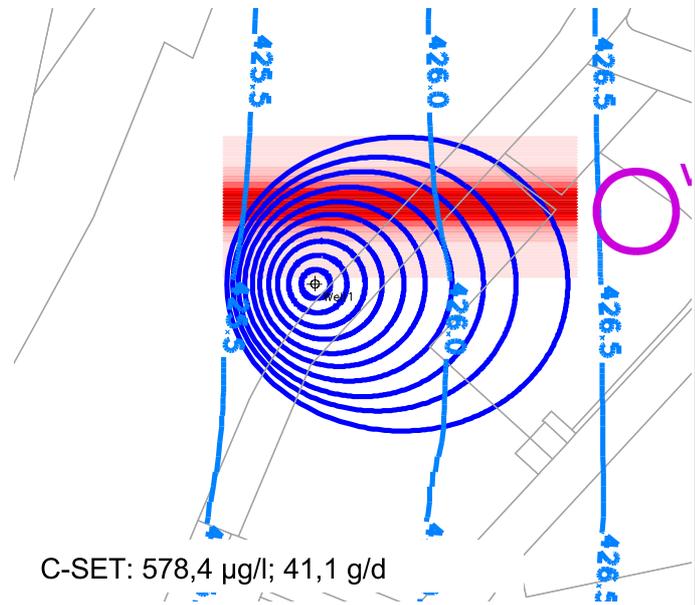
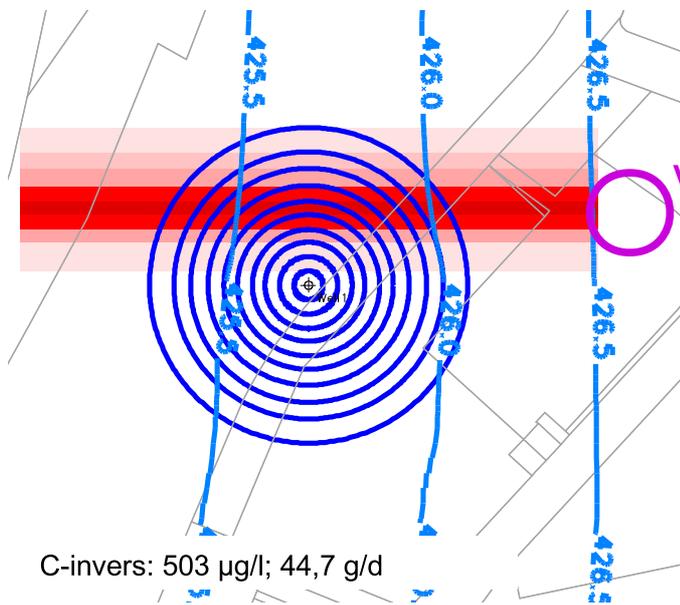
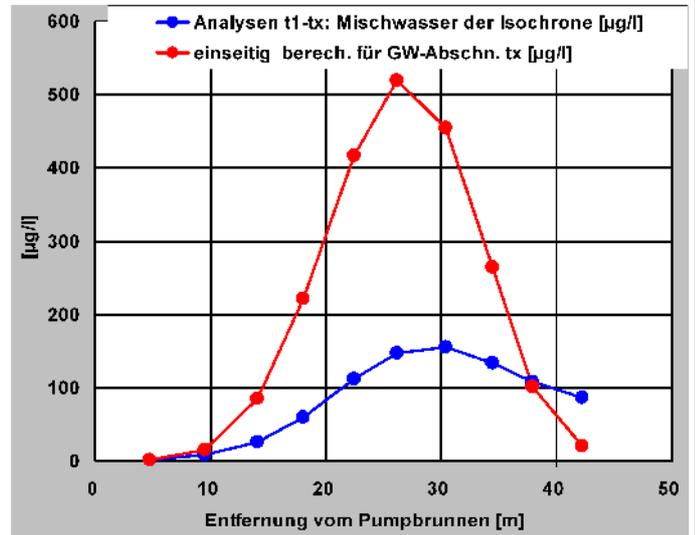
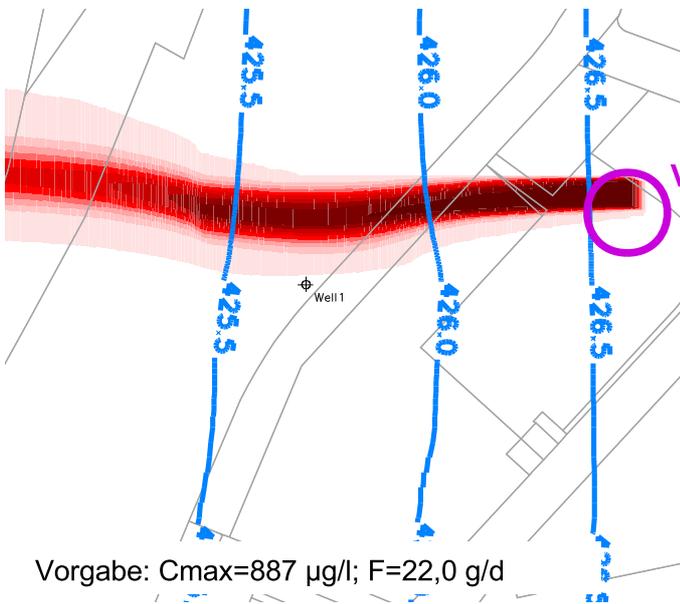
### Anlage 2.4 - Fallstudie 4

(homogener Aquifer, geringe Grundströmung ohne hydraulische Beeinflussungen)

### Ergebnisse für Erfassungsbereich (Isochronen), Konzentration und Fracht

Schadstoffkonzentration



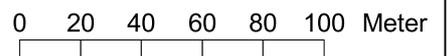
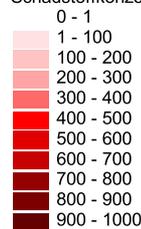


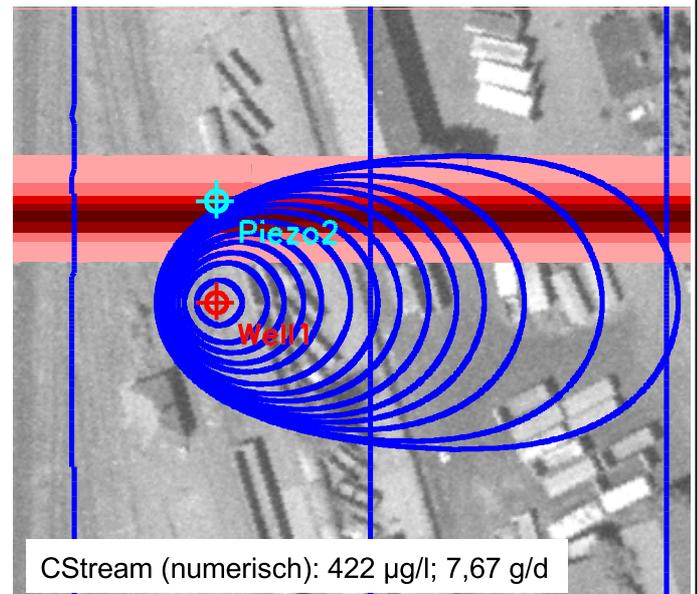
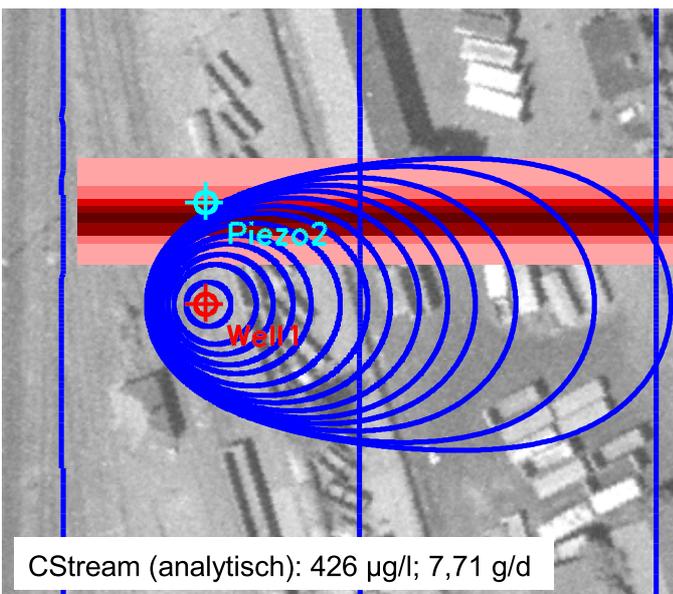
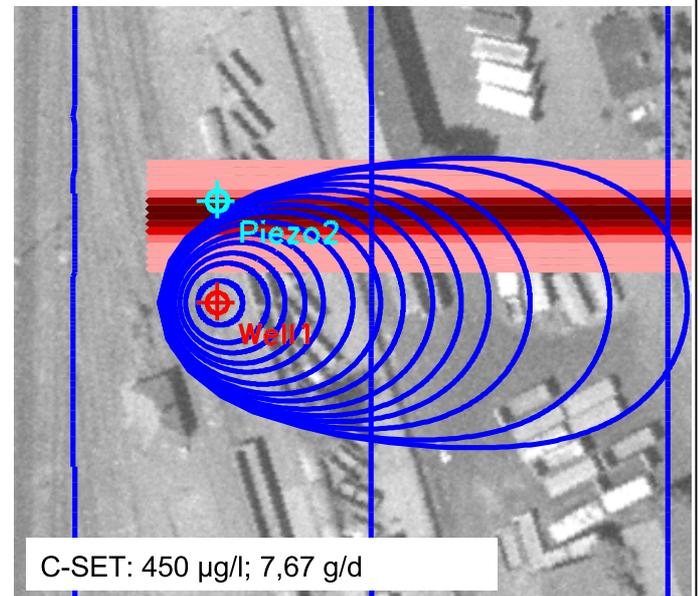
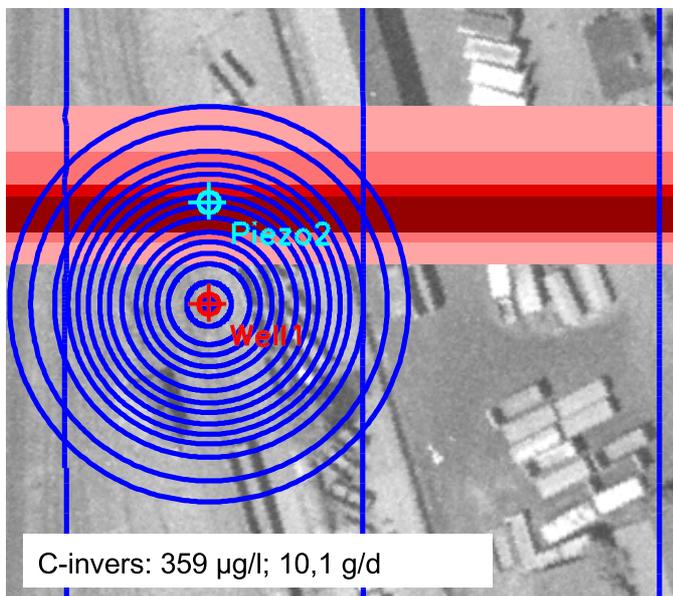
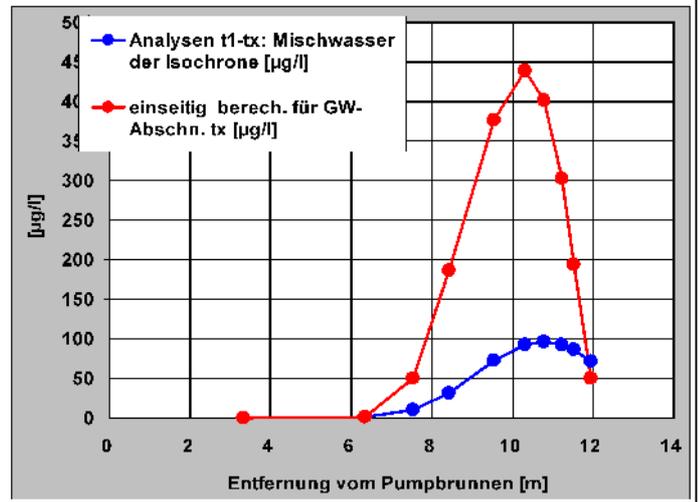
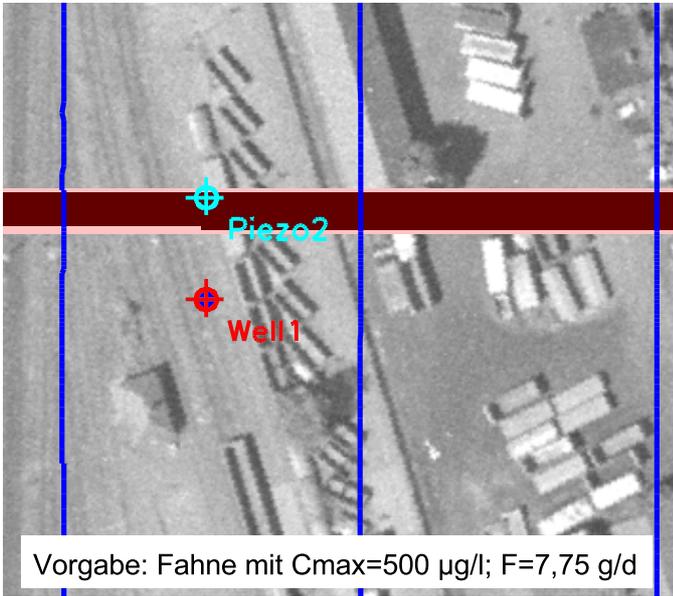
### Anlage 2.5 - Fallstudie 5

(inhomogener Aquifer, mit Grundströmung ohne hydraulische Beeinflussungen)

**Ergebnisse für Erfassungsbereich (Isochronen), Konzentration und Fracht**

Schadstoffkonzentration



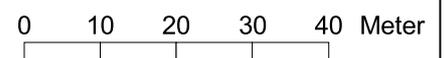
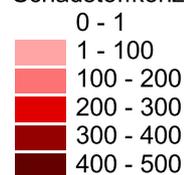


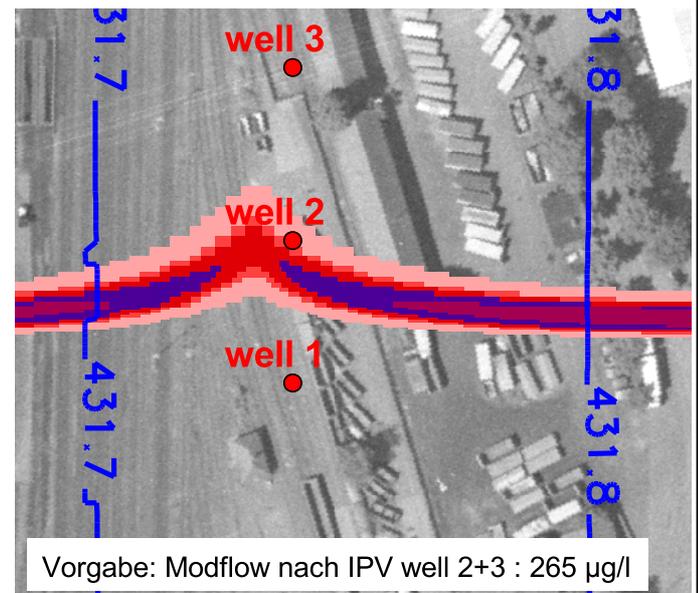
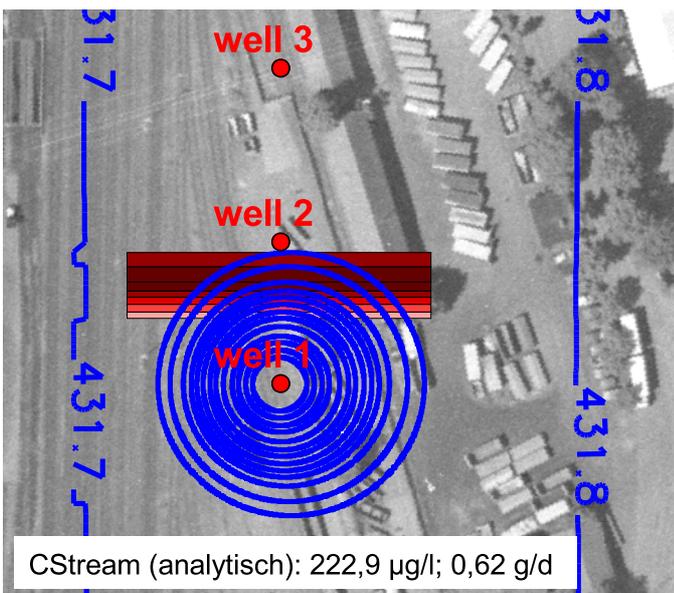
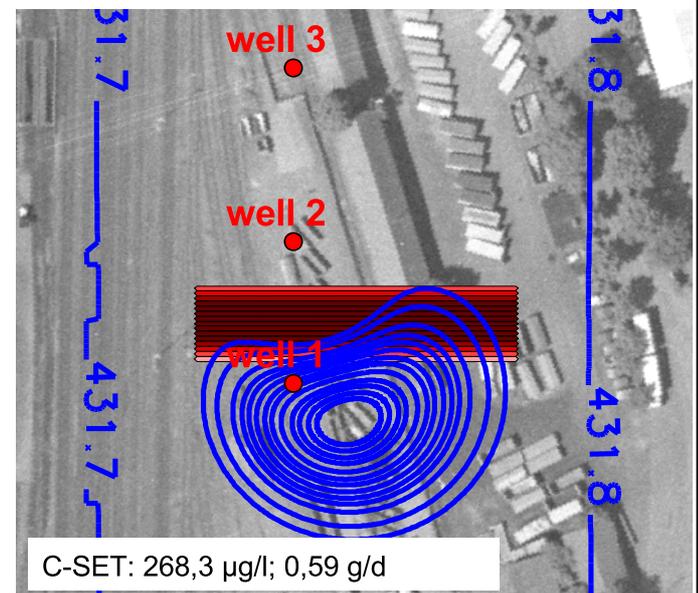
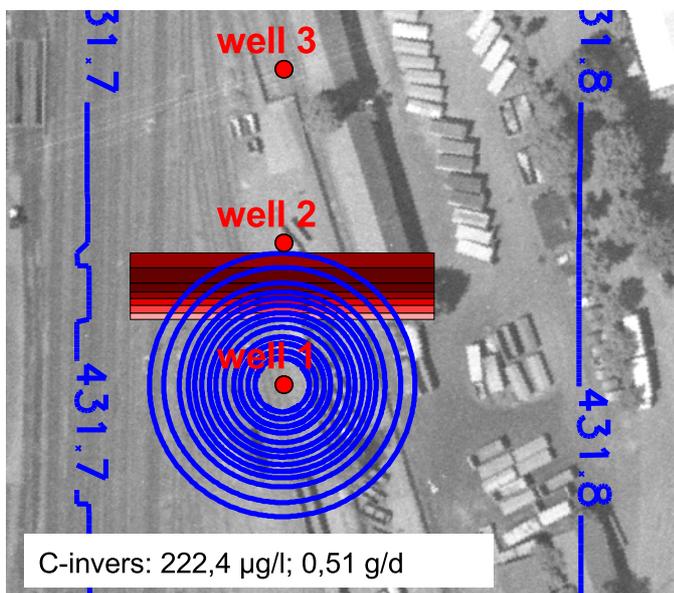
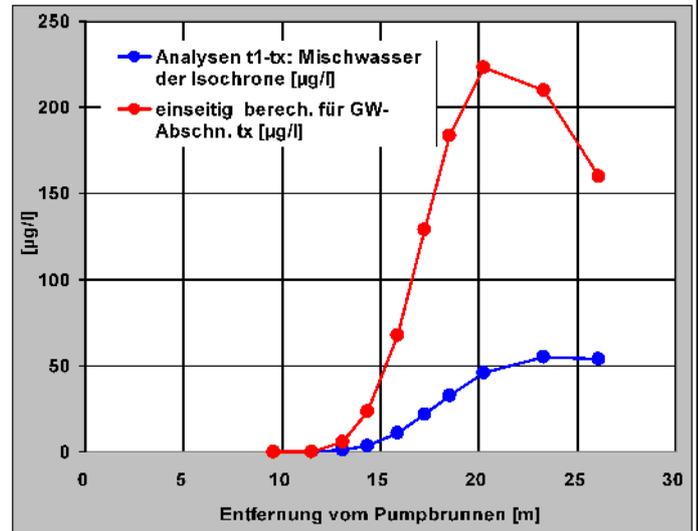
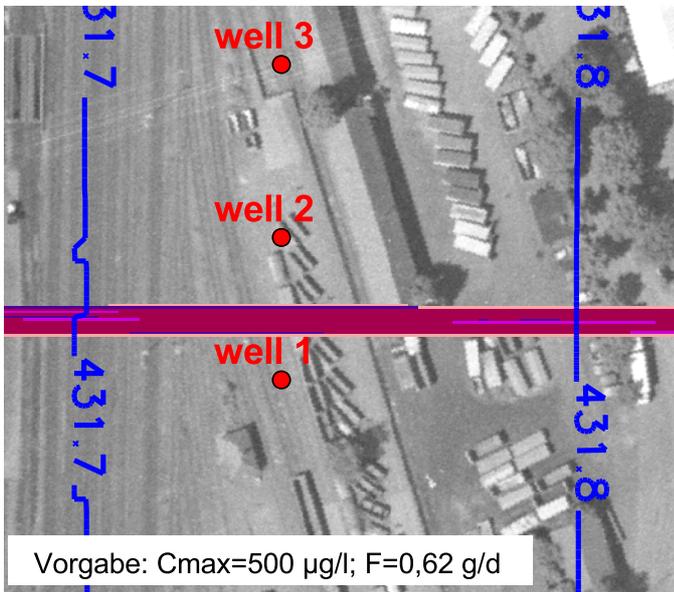
### Anlage 2.6 - Fallstudie 6

(homogener Aquifer, starke Grundströmung ohne hydraulische Beeinflussungen)

**Ergebnisse für Erfassungsbereich (Isochronen), Konzentration und Fracht**

Schadstoffkonzentration



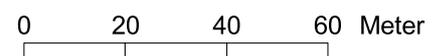
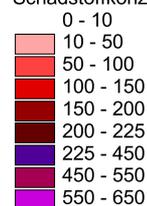


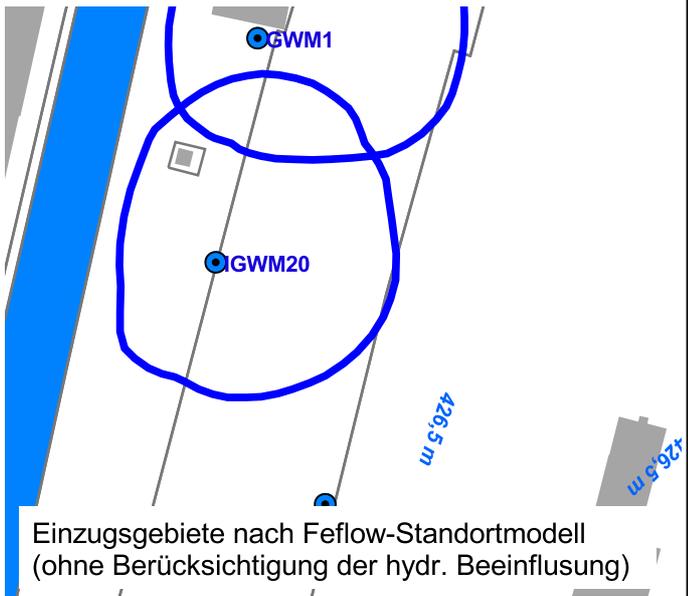
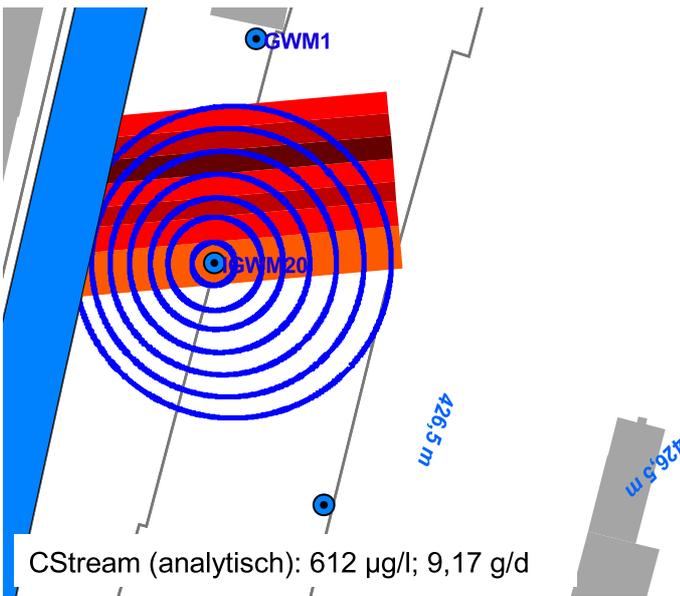
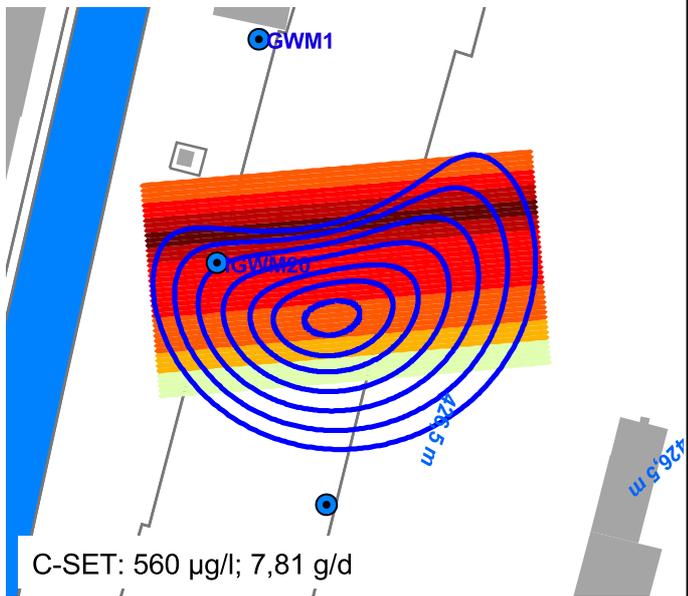
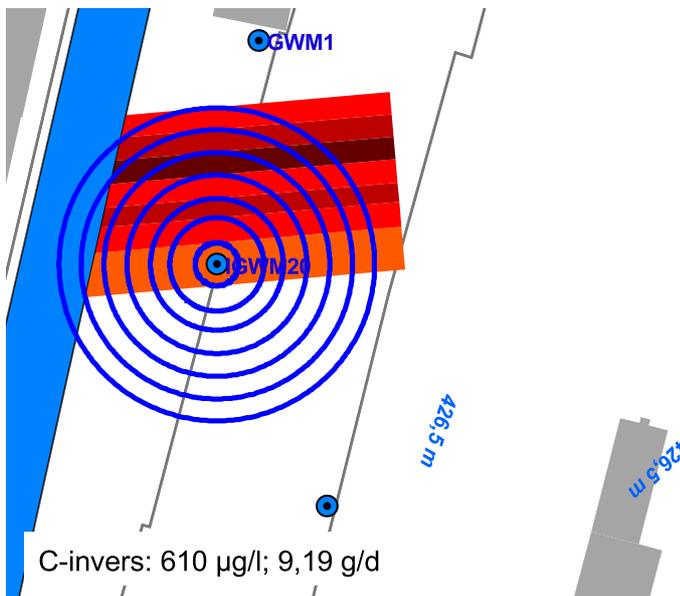
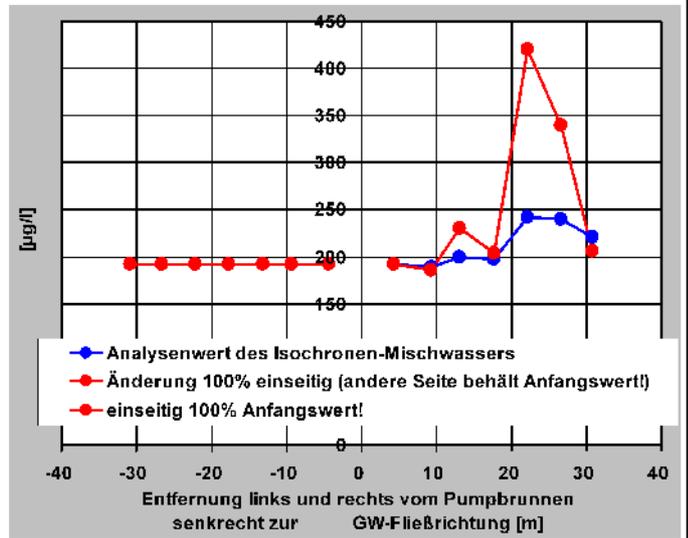
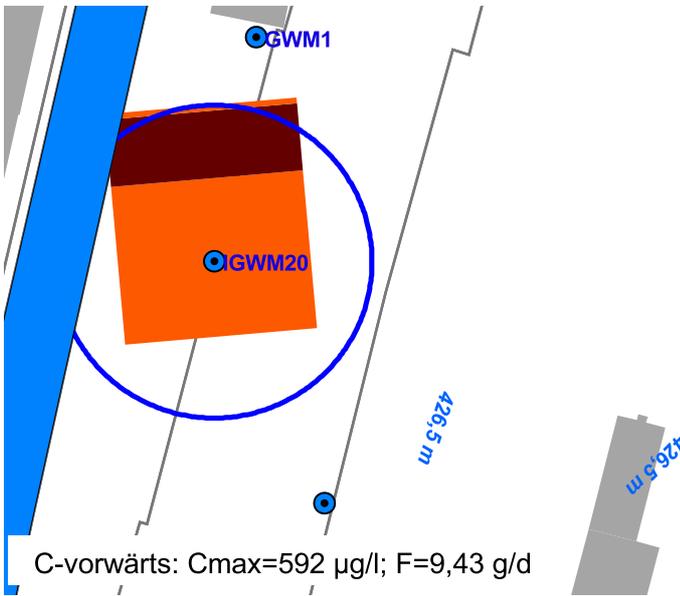
### Anlage 2.7 - Fallstudie 8

(homogener Aquifer, geringe Grundströmung mit hydraulischer Vorbeeinflussung)

### Ergebnisse für Erfassungsbereich (Isochronen), Konzentration und Fracht

Schadstoffkonzentration



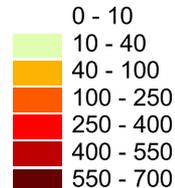


### Anlage 2.8 - Fallstudie 9

(homogener Aquifer, geringe Grundströmung mit hydraulischer Vorbeeinflussung)

### Ergebnisse für Erfassungsbereich (Isochronen), Konzentration und Fracht

Schadstoffkonzentration



## **ANLAGE 3**

### Einzelergebnisse der Aufwands- und Qualitätsauswertung

- 3.1 Fallstudien der Fallgruppe 1 „homogener Aquifer, geringe Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen“
- 3.2 Fallstudien der Fallgruppe 2 „homogener Aquifer, starke Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen“
- 3.3 Fallstudien der Fallgruppe 3 „homogener Aquifer, geringe Grundströmung, mit hydraulischer Vorbeeinflussung“
- 3.4 Fallstudien der Fallgruppe 4 „inhomogener Aquifer, mit Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen“

Fallstudien der Fallgruppe 1 „homogener Aquifer, geringe Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen“

Anlage 3.1

Verfahren	Proband, Fallstudie	Aufwand Programme, Tools und Lehrgang		Aufwand Berarbeitung [Minuten]							Aufwand		
		Aufwand [Tage]	Software +Kursgeb.	Einarbeitung	Datenaufbereitung	GW-Modell	Berechnung	Darstellung				h	€ (70,- €/h)
								T	D	P	G		
C-vorwärts Schwarz	Proband 1, Fall 1	nicht auswertbar, da als Standard verwendet											
	Proband 1, Fall 2	nicht auswertbar, da als Standard verwendet											
	Proband 1, Fall 4	1.0	0.0	0	5	-	15	1	4	-	15	1.7	116.67 €
	Proband 2, Fall 1	1.0	0.0	15	10	-	3	2	5	-	15	1.8	128.33 €
	Proband 2, Fall 2	1.0	0.0	10	5	-	20	1	1	-	15	1.9	130.67 €
	Proband 2, Fall 4	1.0	0.0	15	3	-	10	1	1	-	15	1.8	122.50 €
	Proband 3, Fall 1	1.0	0.0	20	15	-	45	2	2	-	15	2.7	185.50 €
	Proband 3, Fall 2	1.0	0.0	5	5	-	40	1	1	-	15	2.1	148.17 €
	Proband 3, Fall 4	1.0	0.0	5	3	-	15	1	2	-	15	1.7	117.83 €
													<b>Mittel 135.67 €</b>

Ergebnisse				
R <sub>links</sub>	R <sub>rechts</sub>	R <sub>Cmax</sub>	C <sub>max</sub>	Fracht
m	m	m	µg/l	g/d
-27.9	27.9		35.8	1.710
4.0	6.0	5.0	125.0	0.249
-12.0	26.0	20.0	300.0	5.184
-2.0	27.9		55.0	1.730
4.0	6.0	5.0	124.0	0.247
-10.2	29.4	19.7	266.0	5.229
-27.0	27.9		54.0	1.740

Fehler					
R <sub>links</sub>	R <sub>rechts</sub>	R <sub>Cmax</sub>	Lage	C <sub>max</sub>	Fracht
%	%	%	%	%	%
3%	3%		3%	-2%	-12%
0%	0%	0%	0%	0%	0%
20%	-13%	5%	13%	0%	0%
-93%	3%		-48%	51%	-11%
0%	0%	0%	0%	-1%	-1%
2%	-2%	4%	3%	-11%	1%
-1%	3%		2%	48%	-10%

C-invers Teutsch et al.	Proband 1, Fall 1	2.0	0.0	15	10	-	10	5	5	5	15	3.1	215.83 €
	Proband 1, Fall 2	2.0	0.0	5	10	-	5	5	5	5	20	2.9	204.17 €
	Proband 1, Fall 4	2.0	0.0	15	10	-	10	5	5	5	20	3.2	221.67 €
	Proband 2, Fall 1	2.0	0.0	10	10	-	5	2	5	10	15	3.0	206.50 €
	Proband 2, Fall 2	2.0	0.0	10	7	-	5	1	5	5	15	2.8	196.00 €
	Proband 2, Fall 4	2.0	0.0	15	5	-	5	1	4	4	10	2.7	191.33 €
	Proband 3, Fall 1	2.0	0.0	5	10	-	30	2	5	5	15	3.2	224.00 €
	Proband 3, Fall 2	2.0	0.0	5	10	-	15	2	5	5	20	3.0	212.33 €
	Proband 3, Fall 4	2.0	0.0	5	3	-	5	1	2	2	15	2.6	178.50 €
													<b>Mittel 205.59 €</b>

3.9	6.0	5.0	124.7	0.249
-5.9	30.3	19.1	296.2	5.101
-27.9	27.9		35.8	1.694
3.9	6.0	5.0	124.7	0.249
-5.9	30.3	19.1	296.2	5.101
-27.9	27.9		35.8	1.694
3.9	6.0	5.0	124.7	0.249
-5.9	30.3	19.1	296.2	5.101
-27.9	27.9		35.8	1.694

-2%	1%	0%	-1%	0%	0%
-41%	1%	1%	-14%	-1%	-2%
3%	3%		3%	-2%	-13%
-2%	1%	0%	-1%	0%	0%
-41%	1%	1%	-14%	-1%	-2%
3%	3%		3%	-2%	-13%
-2%	1%	0%	-1%	0%	0%
-41%	1%	1%	-14%	-1%	-2%
3%	3%		3%	-2%	-13%

IPV-Tool Rotschink	Proband 1, Fall 1	1.0	250.0	15	10	-	10	5	5	-	30	2.3	182.50 €
	Proband 1, Fall 2	1.0	250.0	5	10	-	5	5	5	-	30	2.0	165.00 €
	Proband 1, Fall 4	1.0	250.0	15	10	-	10	5	5	-	30	2.3	182.50 €
	Proband 2, Fall 1	1.0	250.0	15	6	-	9	1	1	-	30	2.0	167.33 €
	Proband 2, Fall 2	1.0	250.0	10	4	-	10	1	5	-	30	2.0	165.00 €
	Proband 2, Fall 4	1.0	250.0	15	5	-	5	2	8	-	30	2.1	170.83 €
	Proband 3, Fall 1	1.0	250.0	15	10	-	10	2	2	-	30	2.2	175.50 €
	Proband 3, Fall 2	1.0	250.0	5	5	-	10	2	2	-	30	1.9	158.00 €
	Proband 3, Fall 4	1.0	250.0	3	5	-	15	1	5	-	30	2.0	163.83 €
													<b>Mittel 170.06 €</b>

3.7	6.5	5.4	120.3	0.290
-11.1	32.0	20.2	296.1	4.919
-25.8	25.8		35.8	1.580
3.9	6.5	5.2	120.0	0.290
-8.3	26.8	20.7	295.5	4.890
-25.8	25.8		35.8	1.570
3.5	7.4	5.4	120.2	0.290
-12.6	26.8	20.2	296.6	4.900
-25.8	25.8		35.8	1.570

-8%	8%	8%	8%	-4%	17%
11%	7%	6%	8%	-1%	-5%
-5%	-5%		-5%	-2%	-19%
-4%	8%	4%	5%	-4%	17%
-17%	-11%	9%	-12%	-2%	-6%
-5%	-5%		-5%	-2%	-19%
-13%	23%	8%	15%	-4%	17%
26%	-11%	6%	14%	-1%	-5%
-5%	-5%		-5%	-2%	-19%

C-SET Huss	Proband 1, Fall 1	2.0	0.0	5	3	-	10	2	2	2	5	2.5	173.83 €
	Proband 1, Fall 2	2.0	0.0	5	5	-	10	2	2	2	5	2.5	176.17 €
	Proband 1, Fall 4	2.0	0.0	5	5	-	25	2	2	2	5	2.8	193.67 €
	Proband 3, Fall 1	2.0	0.0	10	10	-	20	2	2	2	5	2.9	199.50 €
	Proband 3, Fall 2	2.0	0.0	5	5	-	25	2	2	2	5	2.8	193.67 €
	Proband 3, Fall 4	2.0	0.0	5	10	-	20	2	2	2	15	2.9	205.33 €
													<b>Mittel 190.36 €</b>

3.9	6.1	5.0	125.0	0.250
-10.1	30.1	19.0	300.0	5.220
-27.2	27.2		39.0	1.690
4.0	6.0	5.0	125.8	0.280
-10.3	29.8	18.7	302.0	5.150
-24.0	27.2		43.0	1.680

-3%	2%	0%	-1%	0%	1%
1%	0%	0%	0%	0%	1%
0%	0%		0%	7%	-13%
0%	0%	0%	0%	1%	13%
3%	-1%	-2%	2%	1%	-1%
-12%	0%		-6%	18%	-13%

CStream analytische Lös. Bayer-Raich	Proband 1, Fall 1	2.0	150.0	15	10	-	10	10	5	5	20	3.3	242.50 €
	Proband 1, Fall 2	2.0	150.0	5	10	-	10	10	5	5	20	3.1	230.83 €
	Proband 1, Fall 4	2.0	150.0	15	10	-	10	10	5	5	20	3.3	242.50 €
	Proband 2, Fall 1	2.0	150.0	15	10	-	10	2	5	3	15	3.0	225.00 €
	Proband 2, Fall 2	2.0	150.0	10	6	-	8	2	7	8	15	2.9	220.33 €
	Proband 2, Fall 4	2.0	150.0	15	5	-	7	5	3	6	10	2.9	214.50 €
	Proband 3, Fall 1	2.0	150.0	15	10	-	15	2	2	2	20	3.1	232.00 €
	Proband 3, Fall 2	2.0	150.0	5	5	-	15	5	5	5	20	3.0	225.00 €
	Proband 3, Fall 4	2.0	150.0	2	3	-	20	2	5	5	20	3.0	221.50 €
													<b>Mittel 228.24 €</b>

3.9	6.0	5.0	125.6	0.248
-5.9	30.3	19.1	297.2	5.100
-27.2	27.2		35.8	1.652
3.9	6.0	5.0	125.6	0.249
-5.9	30.3	19.1	297.1	5.081
-27.2	27.2		35.8	1.652
3.9	6.0	5.0	125.6	0.249
-5.9	30.3	19.1	297.2	5.081
-27.2	27.2		35.8	1.652

-2%	0%	-1%	-1%	0%	0%
-41%	1%	1%	-14%	-1%	-2%
0%	0%		0%	-2%	-15%
-2%	0%	1%	-1%	0%	0%
-41%	1%	1%	-14%	-1%	-2%
0%	0%		0%	-2%	-15%
-2%	0%	1%	-1%	0%	0%
-41%	1%	1%	-14%	-1%	-2%
0%	0%		0%	-2%	-15%

CStream numerische Lös. Bayer-Raich	Proband 1, Fall 1	7.0	850.0	120	15	80	10	10	5	15	60	12.3	942.50 €
	Proband 1, Fall 2	7.0	850.0	60	10	60	30	10	5	15	60	11.2	866.67 €
	Proband 1, Fall 4	nicht auswertbar, da als Standard verwendet											

3.9	6.0	4.8	133.1	0.249
-5.9	30.3	19.1	309.7	5.107

-2%	1%	-4%	-2%	7%	0%
-41%	1%	1%	-14%	3%	-1%

Fallstudien der Fallgruppe 2 „homogener Aquifer, starke Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen“

Anlage 3.2

Verfahren	Proband, Fallstudie	Aufwand Programme, Tools und Lehrgang		Aufwand Berarbeitung [Minuten]							Aufwand		
		Aufwand [Tage]	Software +Kursgeb.	Einarbeitung	Datenaufbereitung	GW-Modell	Berechnung	Darstellung				h	€ (70,- €/h)
								T	D	P	G		
C-vorwärts Schwarz	Proband 1, Fall 6	1.0	0.0	10	10	-	5	2	5	-	15	1.8	124.83 €
	Proband 3, Fall 6	1.0	0.0	10	5	-	15	2	2	-	20	1.9	133.00 €
	Proband 2, Fall 6	1.0	0.0	10	10	-	15	1	2	-	20	2.0	137.67 €
<b>Mittel</b>												<b>131.83 €</b>	

Ergebnisse				
R <sub>links</sub>	R <sub>rechts</sub>	R <sub>Cmax</sub>	C <sub>max</sub>	Fracht
m	m	m	µg/l	g/d
8.00	25.50	13.00	400.0	11.24
8.00	18.00	13.00	310.0	10.89
6.78	26.22	12.75	275.0	10.63

Fehler					
R <sub>links</sub>	R <sub>rechts</sub>	R <sub>Cmax</sub>	Lage	C <sub>max</sub>	Fracht
%	%	%	%	%	%
-9%	73%	11%	25%	-20%	45%
-9%	22%	11%	8%	-38%	40%
-23%	78%	9%	21%	-45%	37%

C-invers Teutsch et al.	Proband 1, Fall 6	2.0	0.0	10	10	-	5	2	5	5	15	2.9	200.67 €
	Proband 3, Fall 6	2.0	0.0	5	3	-	5	2	5	2	15	2.6	183.17 €
	Proband 2, Fall 6	2.0	0.0	10	10	-	5	1	3	10	15	2.9	203.00 €
<b>Mittel</b>												<b>195.61 €</b>	

6.80	20.31	12.25	360.0	10.10
6.80	26.20	12.30	359.0	10.14
6.77	26.22	12.29	359.0	10.08

-22%	38%	4%	7%	-28%	30%
-22%	78%	5%	20%	-28%	31%
-23%	78%	5%	20%	-28%	30%

IPV-Tool Rothschild	Proband 1, Fall 6	1.0	250.0	15	10	-	10	5	5	-	30	2.3	182.50 €
	Proband 3, Fall 6	1.0	250.0	5	10	-	5	2	2	-	30	1.9	158.00 €
	Proband 2, Fall 6	1.0	250.0	10	15	-	2	1	2	-	30	2.0	165.00 €
<b>Mittel</b>												<b>168.50 €</b>	

7.50	11.90	10.30	438.8	7.42
7.50	12.00	10.80	417.2	4.80
7.50	12.00	10.30	431.0	6.95

-14%	-19%	-12%	-15%	-12%	-4%
-14%	-19%	-8%	-14%	-17%	-38%
-14%	-19%	-12%	-15%	-14%	-10%

C-SET Huss	Proband 1, Fall 6	2.0	0.0	10	10	-	20	5	5	5	10	3.1	215.83 €
	Proband 4, Fall 6	2.0	0.0	10	10	-	10	5	5	5	10	2.9	204.17 €
	Proband 3, Fall 6	2.0	0.0	5	7	-	10	2	2	2	8	2.6	182.00 €
<b>Mittel</b>												<b>200.67 €</b>	

6.90	16.30	11.40	450.0	7.67
6.00	17.00	11.50	464.0	7.58
8.00	15.00	11.50	413.0	7.42

-21%	11%	-3%	-5%	-10%	-1%
-31%	15%	-2%	-6%	-7%	-2%
-9%	2%	-2%	-3%	-17%	-4%

CStream analytische Lös. Bayer-Raich	Proband 1, Fall 6	2.0	150.0	15	10	-	10	5	5	5	20	3.2	236.67 €
	Proband 3, Fall 6	2.0	150.0	5	5	-	35	2	5	2	20	3.2	241.33 €
	Proband 2, Fall 6	2.0	150.0	10	10	-	5	2	5	10	15	3.0	221.50 €
<b>Mittel</b>												<b>233.17 €</b>	

6.62	16.81	11.46	426.0	7.71
8.02	18.23	12.09	426.4	7.71
6.62	16.81	11.45	426.0	7.70

-24%	14%	-2%	-4%	-15%	-1%
-8%	24%	3%	6%	-15%	-1%
-24%	14%	-3%	-4%	-15%	-1%

CStream numerische Lös. Bayer-Raich	Proband 1, Fall 6	7.0	850.0	60	15	180	30	1	1	15	60	13.0	997.33 €
	Proband 1, Fall 1	7.0	850.0	120	15	80	10	10	5	15	60	12.3	942.50 €
	Proband 1, Fall 2	7.0	850.0	60	10	60	30	10	5	15	60	11.2	866.67 €
<b>Mittel</b>												<b>935.50 €</b>	

6.77	17.00	11.55	422.1	7.67
3.9	6.0	4.8	133.1	0.249
-5.9	30.3	19.1	309.7	5.107

-23%	15%	-2%	-3%	-16%	-1%
-2%	1%	-4%	-2%	7%	0%
-41%	1%	1%	-13%	3%	-1%

Fallstudien der Fallgruppe 3 „homogener Aquifer, geringe Grundströmung, mit hydraulischer Vorbeeinflussung“

Anlage 3.3

Verfahren	Proband, Fallstudie	Aufwand Programme, Tools und Lehrgang		Aufwand Berarbeitung [Minuten]								Aufwand	
		Aufwand [Tage]	Software +Kursgeb.	Einarbeitung	Datenaufbereitung	GW-Modell	Berechnung	Darstellung				h	€ (70,- €/h)
C-vorwärts Schwarz	Proband 1, Fall 8	1.0	0.0	10	10	-	10	2	5	-	15	1.9	130.67 €
	Proband 1, Fall 9	1.0	0.0	5	5	-	5	5	5	-	15	1.7	116.67 €
	Proband 2, Fall 8	1.0	0.0	10	10	-	20	1	2	-	15	2.0	137.67 €
	Proband 3, Fall 8	1.0	0.0	5	5	-	15	3	3	-	15	1.8	123.67 €
		1.0	0.0										
	1.0	0.0											
<b>Mittel</b>												<b>127.17 €</b>	

Ergebnisse				
R <sub>links</sub>	R <sub>rechts</sub>	R <sub>Cmax</sub>	C <sub>max</sub>	Fracht
m	m	m	µg/l	g/d
14.25	26.10	21.70	210.0	0.53
-15.00	31.15	16.60	592.0	9.43
13.00	26.22	19.61	210.0	0.53
14.00	26.00	20.00	265.0	0.48

Fehler					
R <sub>links</sub>	R <sub>rechts</sub>	R <sub>Cmax</sub>	Lage	C <sub>max</sub>	Fracht
%	%	%	%	%	%
185%	24%	85%	98%	-21%	-15%
-23%	56%	210%	81%	6%	21%
160%	25%	67%	84%	-21%	-15%
180%	24%	70%	91%	0%	-23%

C-invers Teutsch et al.	Proband 1, Fall 8	2.0	0.0	10	10	-	5	2	5	5	15	2.9	200.67 €
	Proband 1, Fall 9	2.0	0.0	5	5	-	2	2	2	10	15	2.7	187.83 €
	Proband 2, Fall 8	2.0	0.0	10	10	-	5	1	5	10	15	2.9	205.33 €
	Proband 3, Fall 8	2.0	0.0	5	5	-	3	5	5	2	15	2.7	186.67 €
		2.0	0.0										
	2.0	0.0											
<b>Mittel</b>												<b>195.13 €</b>	

13.11	26.22	19.43	222.4	0.51
-4.28	31.15	17.76	610.5	9.19
13.11	26.11	19.43	222.2	0.52
11.50	26.22	20.00	222.2	0.50

162%	25%	65%	84%	-16%	-18%
-78%	56%	231%	70%	9%	18%
162%	24%	65%	84%	-16%	-17%
130%	25%	70%	75%	-16%	-20%

IPV-Tool Rotschink	Proband 1, Fall 8	1.0	250.0	15	10	-	10	5	5	-	30	2.3	182.50 €
	Proband 1, Fall 9	1.0	250.0	5	5	-	10	5	10	-	30	2.1	170.83 €
	Proband 2, Fall 8	1.0	250.0	10	15	-	5	1	2	-	30	2.1	168.50 €
	Proband 3, Fall 8	1.0	250.0	5	5	-	3	2	2	-	30	1.8	149.83 €
		1.0	250.0										
	1.0	250.0											
<b>Mittel</b>												<b>167.92 €</b>	

13.50	26.06	20.24	223.0	0.65
-5.00	30.79	20.00	419.8	9.10
14.00	26.10	20.20	222.8	0.66
13.00	26.22	20.20	222.8	0.63

170%	24%	72%	89%	-16%	4%
-74%	54%	273%	84%	-25%	17%
180%	24%	72%	92%	-16%	6%
160%	25%	72%	86%	-16%	2%

C-SET Huss	Proband 1, Fall 8	2.0	0.0	20	20	-	20	1	1	1	5	3.1	219.33 €
	Proband 1, Fall 9	2.0	0.0	20	20	-	20	1	1	1	5	3.1	219.33 €
	Proband 4, Fall 8	2.0	0.0	10	10	-	10	1	1	1	5	2.6	184.33 €
	Proband 4, Fall 9	2.0	0.0	10	15	-	10	1	1	1	5	2.7	190.17 €
	Proband 3, Fall 8	2.0	0.0	10	15	-	15	1	1	1	5	2.8	196.00 €
	Proband 3, Fall 9	2.0	0.0	10	10	-	25	1	1	1	8	2.9	205.33 €
<b>Mittel</b>												<b>202.42 €</b>	

5.00	19.00	11.47	268.3	0.59
-19.50	17.16	5.36	560.0	7.81
5.00	19.00	12.40	224.0	0.59
-31.50	17.16	4.06	589.0	8.00
2.50	17.00	9.50	223.0	0.70
-21.50	17.16	4.25	690.0	7.92

0%	-10%	-2%	-4%	1%	-5%
0%	-14%	0%	-5%	0%	0%
0%	-10%	6%	-1%	-15%	-5%
62%	-14%	-24%	8%	5%	2%
-50%	-19%	-19%	-29%	-16%	13%
10%	-14%	-21%	-8%	23%	1%

CStream analytische Lös. Bayer-Raich	Proband 1, Fall 8	2.0	150.0	15	10	-	10	5	5	5	20	3.2	236.67 €
	Proband 1, Fall 9	2.0	150.0	10	5	-	5	2	5	5	15	2.8	209.83 €
	Proband 2, Fall 8	2.0	150.0	10	10	-	12	2	7	10	15	3.1	232.00 €
	Proband 3, Fall 8	2.0	150.0	5	10	-	30	5	5	2	15	3.2	239.00 €
		2.0	150.0										
	2.0	150.0											
<b>Mittel</b>												<b>229.38 €</b>	

13.10	26.17	19.41	222.9	0.51
-4.28	31.03	17.74	612.1	9.17
13.10	26.17	19.40	222.9	0.52
13.10	26.22	19.50	223.1	0.49

162%	25%	65%	84%	-16%	-18%
-78%	55%	231%	69%	9%	17%
162%	25%	65%	84%	-16%	-17%
162%	25%	66%	84%	-16%	-20%

Fallstudien der Fallgruppe 4 „inhomogener Aquifer, mit Grundströmung, ohne hydraulische Beeinflussungen“

Anlage 3.4

Verfahren	Proband, Fallstudie	Aufwand Programme, Tools und Lehrgang		Aufwand Berarbeitung [Minuten]							Aufwand		
		Aufwand [Tage]	Software +Kursgeb.	Einarbeitung	Datenaufbereitung	GW-Modell	Berechnung	Darstellung				h	€ (70,- €/h)
								T	D	P	G		
<b>C-vorwärts</b> Schwarz	Proband 1, Fall 3	1.0	0.0	5	10	-	10	1	1	-	30	2.0	136.50 €
	Proband 1, Fall 5	1.0	0.0	5	5	-	10	1	1	-	30	1.9	130.67 €
	Proband 2, Fall 3	1.0	0.0	10	3	-	5	1	2	-	30	1.9	129.50 €
	Proband 2, Fall 5	1.0	0.0	10	12	-	15	2	3	-	30	2.2	154.00 €
	Proband 3, Fall 3	1.0	0.0	5	5	-	10	2	2	-	30	1.9	133.00 €
	Proband 3, Fall 5	1.0	0.0	10	10	-	25	2	2	-	31	2.3	163.33 €
<b>Mittel</b>												<b>141.17 €</b>	

Ergebnisse				
R <sub>links</sub>	R <sub>rechts</sub>	R <sub>Cmax</sub>	C <sub>max</sub>	Fracht
m	m	m	µg/l	g/d
9.00	22.48	22.48	115.0	0.53
14.00	43.50	26.00	490.0	44.38
7.00	22.48	22.48	70.0	0.49
9.50	52.00	25.75	500.0	21.90
9.60	22.48	22.48	80.0	0.47
13.00	43.50	26.00	480.0	52.30

Fehler					
R <sub>links</sub>	R <sub>rechts</sub>	R <sub>Cmax</sub>	Lage	C <sub>max</sub>	Fracht
%	%	%	%	%	%
45%	32%	32%	37%	-15%	3%
75%	24%	18%	39%	-45%	102%
13%	32%	32%	26%	-48%	-4%
19%	49%	17%	28%	-44%	0%
55%	32%	32%	40%	-41%	-9%
63%	24%	18%	35%	-46%	138%

<b>C-invers</b> Teutsch et al.	Proband 1, Fall 3	2.0	0.0	5	5	-	2	1	1	1	15	2.5	175.00 €
	Proband 1, Fall 5	2.0	0.0	5	5	-	5	1	1	1	15	2.6	178.50 €
	Proband 2, Fall 3	2.0	0.0	10	3	-	5	1	2	7	12	2.7	186.67 €
	Proband 2, Fall 5	2.0	0.0	10	15	-	5	2	5	10	15	3.0	212.33 €
	Proband 3, Fall 3	2.0	0.0	2	2	-	5	2	2	2	15	2.5	175.00 €
	Proband 3, Fall 5	2.0	0.0	5	5	-	5	2	5	3	15	2.7	186.67 €
<b>Mittel</b>												<b>185.69 €</b>	

6.46	22.48	22.48	117.0	0.54
9.55	44.29	25.63	502.5	44.68
6.20	22.48	22.48	117.0	0.54
4.50	52.30	25.62	502.8	21.70
6.46	22.48	22.48	117.0	0.54
9.55	52.30	25.62	502.7	53.65

4%	32%	32%	23%	-13%	6%
19%	27%	16%	21%	-43%	103%
0%	32%	32%	21%	-13%	6%
-44%	49%	16%	37%	-43%	-1%
4%	32%	32%	23%	-13%	6%
19%	49%	16%	28%	-43%	144%

<b>IPV-Tool</b> Rothschink	Proband 1, Fall 3	1.0	250.0	5	5	-	2	1	1	-	60	2.2	181.33 €
	Proband 1, Fall 5	1.0	250.0	5	5	-	5	1	1	-	60	2.3	184.83 €
	Proband 2, Fall 3	1.0	250.0	10	5	-	3	1	2	-	60	2.4	189.50 €
	Proband 2, Fall 5	1.0	250.0	10	15	-	5	1	1	-	60	2.5	202.33 €
	Proband 3, Fall 3	1.0	250.0	5	5	-	10	1	2	-	60	2.4	191.83 €
	Proband 3, Fall 5	1.0	250.0	5	5	-	5	2	2	-	60	2.3	187.17 €
<b>Mittel</b>												<b>189.50 €</b>	

7.00	14.52	14.52	169.3	0.45
10.50	42.10	26.20	519.6	37.28
7.00	14.52	14.52	169.3	0.45
10.00	50.00	27.50	505.3	21.70
6.20	14.52	14.52	169.3	0.32
10.00	38.00	25.50	528.8	40.56

13%	-15%	-15%	-14%	26%	-12%
31%	20%	19%	24%	-41%	69%
13%	-15%	-15%	-14%	26%	-12%
25%	43%	25%	31%	-43%	-1%
0%	-15%	-15%	-10%	26%	-38%
25%	9%	16%	16%	-40%	84%

<b>C-SET</b> Huss	Proband 1, Fall 3	2.0	0.0	5	5	-	15	1	1	2	5	2.6	179.67 €
	Proband 1, Fall 5	2.0	0.0	5	5	-	20	1	1	2	5	2.7	185.50 €
	Proband 3, Fall 3	2.0	0.0	5	8	-	25	2	2	2	5	2.8	197.17 €
	Proband 3, Fall 5	2.0	0.0	5	5	-	15	1	1	2	5	2.6	179.67 €
<b>Mittel</b>												<b>185.50 €</b>	

7.00	19.40	19.40	160.0	0.53
10.00	42.00	26.50	578.4	41.10
8.00	19.40	19.40	116.0	0.48
11.00	39.00	25.90	526.0	48.46

13%	14%	14%	14%	19%	3%
25%	20%	20%	22%	-35%	87%
29%	14%	14%	19%	-14%	-7%
38%	11%	18%	22%	-41%	120%

<b>CStream</b> analytische Lös. Bayer-Raich	Proband 1, Fall 3	2.0	150.0	10	10	-	20	1	5	5	15	3.1	232.00 €
	Proband 1, Fall 5	2.0	150.0	5	10	-	10	1	1	5	15	2.8	209.83 €
	Proband 2, Fall 3	2.0	150.0	10	5	-	3	5	7	12	10	2.9	215.67 €
	Proband 2, Fall 5	2.0	150.0	10	15	-	5	2	5	10	15	3.0	227.33 €
	Proband 3, Fall 3	2.0	150.0	5	2	-	5	1	2	10	15	2.7	201.67 €
	Proband 3, Fall 5	2.0	150.0	5	5	-	25	5	10	5	15	3.2	236.67 €
<b>Mittel</b>												<b>220.53 €</b>	

6.38	19.33	19.33	154.2	0.50
9.52	42.07	25.18	520.4	41.55
6.38	19.33	19.33	153.8	0.50
4.77	51.44	25.51	507.3	21.35
6.50	19.50	19.50	153.8	0.50
4.77	41.14	24.98	529.6	48.18

3%	14%	14%	10%	15%	-4%
19%	20%	14%	18%	-41%	89%
3%	14%	14%	10%	14%	-3%
-40%	47%	16%	34%	-43%	-3%
5%	15%	15%	11%	14%	-3%
-40%	18%	14%	-24%	-40%	119%

<b>CStream</b> numerische Lös. Bayer-Raich	Proband 1, Fall 1	7.0	850.0	120	15	80	10	10	5	15	60	12.3	942.50 €
	Proband 1, Fall 2	7.0	850.0	60	10	60	30	10	5	15	60	11.2	866.67 €
	Proband 1, Fall 5	7.0	850.0	60	15	180	30	1	1	15	60	13.0	997.33 €
	Proband 1, Fall 3	7.0	850.0	60	15	300	30	1	1	15	90	15.5	1,172.33 €
<b>Mittel</b>												<b>994.71 €</b>	

3.9	6.0	4.8	133.1	0.25
-5.9	30.3	19.1	309.7	5.11
8.60	36.80	21.45	790.0	21.70
nicht bewertet da Bewertungsgrundlage				

-2%	1%	-4%	-2%	7%	0%
-41%	1%	1%	-14%	3%	-1%
8%	5%	-3%	5%	-11%	-1%