

Anwendung von Immissionspumpversuchen (IPV) in der Schweiz

**Expertenbericht der ChloroNet-Projektgruppe IPV
Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)**

November 2016

Verfasser:

Arbeitsgruppe IPV (2015-2016)

Jürgen Abrecht	GEOTEST AG
Gabriele Büring	PL ChloroNet
Bettina Flury	AWEL Zürich (Leitung)
Uwe Hekel	HPC AG (externer Experte und Schlussredaktion)
Daniel Hunkeler	CHYN, Université de Neuchâtel
Walter Labhart	Dr. Heinrich Jäckli AG

Begleitung Bundesamt für Umwelt (BAFU):

Reto Tietz	BAFU, Boden und Biotechnologie
Monika Schwab-Wyssner	BAFU, Boden und Biotechnologie / PL ChloroNet

Dieser Expertenbericht wurde im Auftrag des BAFU von der Expertengruppe IPV im Rahmen des Forschungsprojekts IPV, eingebettet im Projekt ChloroNet, erarbeitet. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich. Der Bericht widerspiegelt die Meinung der Expertengruppe IPV.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	8
1. Einleitung und Aufgabenstellung	10
2. Vorgehen.....	11
3. Definition von Immissionspumpversuchen.....	13
3.1 Grundlage	13
3.2 Verfahrensprinzip	14
3.3 Bisherige Anwendung von IPV in der Schweiz	16
4. Anforderungen an den Standort.....	17
4.1 Anwendungskriterien	17
4.2 Entscheidungshilfe zur Planung von IPV	20
4.3 Sensitivitätsanalyse – Einfluss von verschiedenen hydrogeologischen Faktoren auf die erfasste Entnahmebreite	21
4.4 Standortevaluation für Pilotprojekte	24
5. Priorisierung von untersuchungsbedürftigen Standorten mithilfe von IPV	26
5.1 Ausgangslage und Zielsetzungen.....	26
5.2 Voraussetzungen für Pilotversuche	27
5.3 Standortsuche mithilfe von GIS-Auswertungen.....	27
5.4 Entscheidungshilfe für IPV zur Priorisierung von CKW-Standorten.....	30
6. Anwendung von IPV auf Stufe Detailuntersuchung.....	33
6.1 Auswahl der Pilotprojekte	33
6.2 Standort A	33
6.2.1 Standortsituation	33
6.2.2 Versuchsplanung	35
6.2.3 Versuchsdurchführung	35
6.2.4 Auswertung und Ergebnisse	36
6.2.5 Diskussion und Beurteilung.....	40
6.3 Standort B	42
6.3.1 Standortsituation	42
6.3.2 Versuchsplanung	43
6.3.3 Versuchsdurchführung	44
6.3.4 Auswertung und Ergebnisse	44
6.3.5 Diskussion und Beurteilung.....	50

6.4	Standort C	51
6.4.1	Standortsituation	51
6.4.2	Auswertung und Ergebnisse	51
6.4.3	Diskussion und Beurteilung	54
6.5	Standort D	55
6.5.1	Standortsituation	55
6.5.2	Auswertung und Ergebnisse	55
6.5.3	Diskussion und Beurteilung	58
7.	Fazit und Empfehlungen	59
7.1	Anwendungsbedingungen in der Schweiz	59
7.2	Anwendungsempfehlungen für IPV in der Altlastenbearbeitung	60
7.3	Defizite und Handlungsbedarf	61
8.	Literaturverzeichnis	63
Anhang A: Evaluierung der Standorte, die nicht als Pilotprojekt aufgenommen wurden		65
Anhang B: Handlungsempfehlung zur Planung, Durchführung und Auswertung von IPV		69
Anhang C: Hinweise zur Bestimmung der Durchlässigkeit		72

Tabellen:

Tabelle 4-1:	Kriterien im Bereich Schadstoffsituation (Auflistung und Bewertung)	18
Tabelle 4-2:	Kriterien hinsichtlich hydrogeologischer Situation (Auflistung und Bewertung)	19
Tabelle 4-3:	Kriterien im Bereich Standortsituation (Auflistung und Bewertung)	19
Tabelle 4-4:	Evaluation der möglichen Standorte bezüglich der wichtigsten Anwendungskriterien für IPV (grün: Mindestanforderungen für IPV erfüllt; gelb: IPV durchführbar, jedoch mit Einschränkungen; rot: Mindestanforderungen für IPV nicht erfüllt)	25
Tabelle 6-1:	Versuchsdaten der IPV am Standort A	35
Tabelle 6-2:	Transmissivitätswerte der IPV am Standort A	37
Tabelle 6-3:	Versuchsdaten der IPV am Standort B	44
Tabelle 6-4:	Transmissivitätswerte der IPV am Standort B	46

Abbildungen:

Abbildung 2-1:	Projektphasen	11
Abbildung 3-1:	Schadstofffahne im Grundwasserabstrom (heterogener Aquifer) eines Standortes mit nicht exakt bekannter Position des Schadensherdes (nach Teutsch et al., 2000).....	13
Abbildung 3-2:	Prinzip eines Immissionspumpversuches mit drei Grundwassermessstellen entlang einer Kontrollebene (nach Teutsch et al., 2000)	14
Abbildung 3-3:	Charakteristische Konzentrationslinientypen und zugehörige Schadstofffahnen (nach Teutsch et al., 2000)	15
Abbildung 4-1:	Bereiche, für welche verschiedene Anwendungsbedingungen formuliert wurden (Quelle: BAFU, leicht modifiziert)	17
Abbildung 4-2:	Entscheidungsbaum für Planung von IPV	20
Abbildung 4-3:	Zeitliche Entwicklung des Entnahmebereichs in Funktion der Pumpdauer gemäss einer analytischen Lösung der Grundwasserströmungsgleichung für einen Pumpbrunnen.....	21
Abbildung 4-4:	(a) Entwicklung des maximalen Entnahmebereichs als Funktion der Fliessgeschwindigkeit und der spezifischen Pumprate (Pumprate pro Länge Filterstrecke). (b) Pumpdauer bis 2/3 des maximalen Entnahmebereichs erreicht ist.....	22
Abbildung 4-5:	Entnahmebreite als Funktion der Fliessgeschwindigkeit und der Pumpdauer für drei spezifische Pumpraten, 0.25 l/m/s (a), 0.5 l/m/s (b) und 1 l/m/s (c).....	23
Abbildung 5-1:	Regionaler Ansatz für die Anwendung von IPV	26
Abbildung 5-2:	Projektperimeter für die IPV-Machbarkeitsstudie Kanton Zürich.....	28
Abbildung 5-3:	Ergebnis der GIS-Auswertung hinsichtlich Erfüllung der hydrogeologischen Kriterien.....	28
Abbildung 5-4:	GIS-Auswertung mit 100 m-Pufferbereichen um untersuchungsbedürftige CKW-Standorte; gelb: Standortdichte günstig (2 oder mehr Standorte < 100 m)	29
Abbildung 5-5:	Ergebnis der GIS-Auswertung hinsichtlich Standortdichte in Gebieten mit einer Grundwassermächtigkeit von 2 - 10 m (Prozentualer Anteil von 0, 1 resp. 2 weiteren CKW-Standorten im 100 m-Puffer)	30
Abbildung 5-6:	Entscheidungsbaum für die Anwendung von IPV zur Priorisierung von VU-Standorten.....	31
Abbildung 6-1:	GWM und ungefähre Ausdehnung des Herdes (rot), Kontrollebene, GW-Fliessrichtung (blauer Pfeil) und verwendete Messstellen	34
Abbildung 6-2:	Geologisches Profil durch die Kontrollebene mit GW-Messstellen	34

Abbildung 6-3:	GW-Ganglinien in den Pumpbrunnen und GWM während der IPV am Standort A	36
Abbildung 6-4:	Verlauf der Absenkung im Pumpbrunnen Kb 05/3 (links) und diagnostischer Plot (rechts) mit Absenkung (blau) und deren Ableitung (rot)	37
Abbildung 6-5:	Uraninkonzentrationen in Kb 99/3 während Pumpversuch (links) und modellierte Durchbruchskurve (rechts).....	38
Abbildung 6-6:	CKW-Konzentrationen in Kb 05/3 und Kb 99/3 während der Pumpversuche	38
Abbildung 6-7:	Isochronen und Stromstreifen aus den beiden IPV am Standort A	39
Abbildung 6-8:	Situation Standort B mit Grundwassermessstellen, mutmasslicher Herd (Stern), Kontrollebene (rote gestrichelte Linie durch GWM) und GW-Fliessrichtung (blauer Pfeil).....	42
Abbildung 6-9:	Geologisches Profil durch die Kontrollebene mit GW-Messstellen	43
Abbildung 6-10:	GW-Ganglinien in den Pumpbrunnen und GWM während der IPV am Standort B	45
Abbildung 6-11:	Verlauf der Absenkung im Pumpbrunnen Kb 04/1 (links) und diagnostischer Plot (rechts) mit Absenkung (blau) und deren Ableitung (rot)	45
Abbildung 6-12:	Verlauf von elektr. Leitfähigkeit und Temperatur beim IPV in Kb 04/1	46
Abbildung 6-13:	CKW-Konzentrationen in Kb 04/1 und Kb 08/1 während der Pumpversuche	47
Abbildung 6-14:	Isochronen und Stromstreifen für CKW (Summe) am Standort B	49
Abbildung 6-15:	Isochronen und Stromstreifen für R113 (unten) am Standort B	49
Abbildung 6-16:	Absenkung (links) und hydraulische Auswertung (rechts) für den IPV in 12.P.33 vom Dezember 2010	51
Abbildung 6-17:	PCE-Konzentrationen der IPV vom Dezember 2010	52
Abbildung 6-18:	PCE-Konzentrationen der IPV vom Dezember 2013	52
Abbildung 6-19:	Erfassungsbereiche der IPV vom Dezember 2010 (links) und vom Dezember 2013 (rechts). Die Isochronen markieren den jeweiligen Erfassungsbereich zu den Probenahmezeitpunkten.....	53
Abbildung 6-20:	Konzentrationsverteilung errechnet mit C-SET für die IPV im Dezember 2010 (links) und Dezember 2013 (rechts)	54
Abbildung 6-21:	Absenkung (links) und hydraulische Auswertung (rechts) für den IPV in Pt 2 vom März 2016	56
Abbildung 6-22:	PCE-Konzentrationen des IPV in Pt 2 vom März 2016.....	56

Abbildung 6-23: Erfassungsbereich des IPV in Pt 2. Die Isochronen (Bild links) markieren den jeweiligen Erfassungsbereich zu den Probenahmezeitpunkten nach 0.6 h, 2.5 h, 6 h, 11 h, 21 h, 31 h und 47 h Pumpdauer. Das Bild rechts zeigt die mit C-SET berechnete Konzentrationsverteilung.....	57
Abbildung A-1: Abschätzung der Isochronen für 3- bis 4-tägige IPV.....	65
Abbildung A-2: Abschätzung der Isochronen für einen 7-tägigen IPV.....	67
Abbildung A-3: Abschätzung der Erfassungsbereiche mittels C-SET für 1, 2 und 3 Tage.....	68
Abbildung C-1: Beispiel für eine stationäre Bestimmung der Durchlässigkeit	72
Abbildung C-2: Beispiel für eine instationäre Auswertung mit dem Geradlinienverfahren.....	73
Abbildung C-3: Beispiel für eine Auswertung mit dem diagnostischen Plot.....	74

Zusammenfassung

Immissionspumpversuche (IPV) sind eine Methode zur direkten Bestimmung der Schadstofffracht im Grundwasser. Ihr Vorteil gegenüber herkömmlichen punktuellen Messungen liegt darin, dass der Schadstoffmassenfluss im Fahnenquerschnitt „lückenlos“ erfasst wird. Die Auswertung eines IPV liefert ausserdem die Konzentrationsverteilung im Erfassungsbereich eines oder ggf. mehrerer Pumpversuche und ermöglicht Rückschlüsse auf die Lage von Schadstofffahnen und Belastungsherden.

Ziele des ChloroNet-Projekts „IPV“ waren die Konkretisierung der Anwendungskriterien für IPV in der Schweiz und eine Auswahl geeigneter Pilotstandorte (Phase 1), das Durchführen von Pilotprojekten in den Kantonen (Phase 2) sowie die Beurteilung der Ergebnisse und Erarbeitung von Anwendungsempfehlungen (Phase 3). Der vorliegende Expertenbericht soll Gutachtern und Behörden als Entscheidungshilfe bzw. Diskussionsgrundlage für die Durchführung von IPV auf unterschiedlichen altlastenrechtlichen Stufen dienen.

Grundlegende Voraussetzung für die Prüfung der Anwendungskriterien und Planung von IPV ist, dass die hydrogeologische Situation und die hydraulischen Kennwerte des Untersuchungsbereiches ausreichend bekannt sind. Folgende Anwendungsbedingungen sollten am Standort erfüllt sein:

- ein vermuteter oder bekannter Grundwasserschaden mit wasserlöslichen Stoffen in einer Konzentration mind. eine Grössenordnung über der Bestimmungsgrenze
- eine ausreichende Ergiebigkeit für Pumpversuche; die erzielbare Rate sollte zwischen ca. 1 und 5 l/s liegen
- eine ausreichende Homogenität des Grundwasserleiters
- eine mittlere Aquifermächtigkeit von ca. 2 - 10 m
- eine nicht zu hohe Grundwasserfliessgeschwindigkeit

Die Effizienz der IPV-Methode hängt von der Durchlässigkeit und der beim Pumpen erzielbaren Entnahmebreite ab. Die in einer Sensitivitätsanalyse entwickelten Diagramme zeigen, dass sich die Entnahmebreite mit der Pumprate und – solange der Effekt der Fliessgeschwindigkeit nicht überwiegt - auch mit der Pumpdauer erhöht. Mit steigender Aquifermächtigkeit und Grundwasserfliessgeschwindigkeit vermindert sich die erzielbare Entnahmebreite.

Anhand von 270 mit chlorierten Kohlenwasserstoffen (CKW) belasteten Standorten im Kanton Zürich wurde untersucht, ob IPV zur Priorisierung von untersuchungsbedürftigen CKW-Standorten auf der Stufe Voruntersuchungen (VU) eingesetzt werden können. Voraussetzungen für einen wirtschaftlichen Einsatz sind im Wesentlichen weiträumig passende hydrogeologische Voraussetzungen sowie eine ausreichend hohe Standortdichte. Für einen Pilotversuch zur Priorisierung von VU-Standorten wurde insbesondere die Standortdichte und damit das Kosten-/Nutzen-Verhältnis als unzureichend eingeschätzt.

Auf der Stufe Detailuntersuchung (DU) wurden sieben Standorte evaluiert. Von diesen erfüllten zwei die Anwendungskriterien für IPV und konnten als Pilotprojekte finanziert werden. An zwei weiteren Standorten waren bei früheren Untersuchungen bereits IPV durchgeführt worden, die ebenfalls als Pilotprojekte zur Überprüfung der Anwendungsbedingungen und Ergebnisse herangezogen werden konnten.

Die Pilotversuche haben gezeigt, dass die Anwendung von IPV zwar relativ hohe fachliche Anforderungen stellt, dafür aber robuste und belastbare Ergebnisse liefert. Mit den IPV konnten trotz allfälliger Einschränkungen im Hinblick auf die Homogenität des Grundwasserleiters plausible Fahnenlagen, Konzentrationsverteilungen und Frachten berechnet werden, die mit den Ergebnissen früherer Untersuchungen gut im Einklang stehen.

Ein Handlungsbedarf wurde bei der Bestimmung der hydraulischen Parameter festgestellt. Da sie wesentlichen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse, insbesondere die Schadstofffracht haben, kommt der Bestimmungsqualität eine grosse Bedeutung zu. Es wird empfohlen, die Wasserspiegelabsenkung während der Pumpversuche kontinuierlich mittels Drucksonden zu messen. Für die Auswertung der Messdaten sollten möglichst sensitive Verfahren (z. B. diagnostischer Plot) eingesetzt werden, mit denen Abweichungen von den homogen-infiniten Verfahrensvoraussetzungen (z. B. Brunneneinflüsse, Leckagen oder Aquiferränder) erkannt und eliminiert werden können.

Nach den Erfahrungen der Pilotstandorte kann die Anwendung von IPV auf Stufe DU empfohlen werden, wobei vorgängig die Anwendungsbedingungen und das Kosten-/Nutzen-Verhältnis zu prüfen sind.

In der Schweiz sind die Anwendungsbedingungen für IPV in Porengrundwasserleitern wie den mittelländischen Lockergesteinsvorkommen am ehesten erfüllt, wobei sich gebietsweise steilere Fliessgradienten und hohe Durchlässigkeiten ungünstig auf den erzielbaren Erfassungsbereich auswirken. Kluft- oder Karstgrundwasserleiter erfüllen die Anwendungsbedingungen a priori nicht.

Auf Grundlage von Erfahrungen aus den Pilotprojekten gibt der Bericht letztlich eine Handlungsempfehlung zur Planung, Durchführung und Auswertung von IPV.

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Der vorliegende Expertenbericht enthält die Diskussionsergebnisse und Schlussfolgerungen der ChloroNet-Projektgruppe Immissionspumpversuche (IPV) inklusive der Resultate der im Feld ausgeführten Pilotprojekte.

Anlass des Projekts war ein Beitrag an der ChloroNet Tagung 2014, bei welchem das Funktionsprinzip sowie die Anwendungsmöglichkeiten von IPV im Rahmen einer integralen Altlastenuntersuchung in Deutschland aufgezeigt wurden [1]. Der Beitrag stiess in der schweizerischen Altlastenszene auf reges Interesse. In einigen Kantonen und im BAFU wurde die Frage aufgeworfen, ob IPV auch in der Schweiz als eine geeignete Untersuchungsmethode, primär für mit chlorierten Kohlenwasserstoffen (CKW) belastete Standorte, angewendet werden könnten. Da im ChloroNet gezielt nach neuen Methoden und Techniken zur Untersuchung und Sanierung von CKW-Standorten gesucht wird, fiel der Entscheid zur Bildung einer eigenen Projektgruppe.

Ziele der Projektgruppe IPV waren:

- Analyse der aktuellen Situation in der Schweiz bzgl. Erfahrung mit IPV,
- Definieren von Rahmenbedingungen im Hinblick auf die Anwendung von IPV,
- Aufzeigen von Möglichkeiten und Grenzen,
- Prüfen der Anwendbarkeit von IPV in Bezug auf unterschiedliche altlastenrechtliche Stufen,
- Prüfen des Nutzens / Erkenntnisgewinns durch IPV bei komplexen CKW-Standorten,
- Durchführen von Pilotprojekten in den Kantonen und
- Auswerten der Ergebnisse mit Empfehlungen für die Anwendung von IPV

Die Resultate des Projekts wurden im Rahmen der ChloroNet-Fachtagungen 2015 und 2016 vorgestellt. Alle Referate sind auf der ChloroNet-Website publiziert:

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/altlasten/fachinformationen/chloro-net.html>

Der vorliegende Expertenbericht soll Gutachtern und Behörden als Entscheidungshilfe bzw. Diskussionsgrundlage für die Anwendung von IPV dienen. Der Bericht ist jedoch keine Praxishilfe oder vollzugsrechtliche Vorgabe. Die Ergebnisse werden in die weiteren Arbeiten des ChloroNet einfliessen.

2. Vorgehen

Das Projekt IPV umfasst drei Phasen. Die Erarbeitung der Phasen 1 und 3 erfolgte innerhalb der Projektgruppe, die Ausführung der Phase 2 individuell in den Kantonen (vgl. Abbildung 2-1). Die Projektgruppe wurde durch einen externen Experten unterstützt.

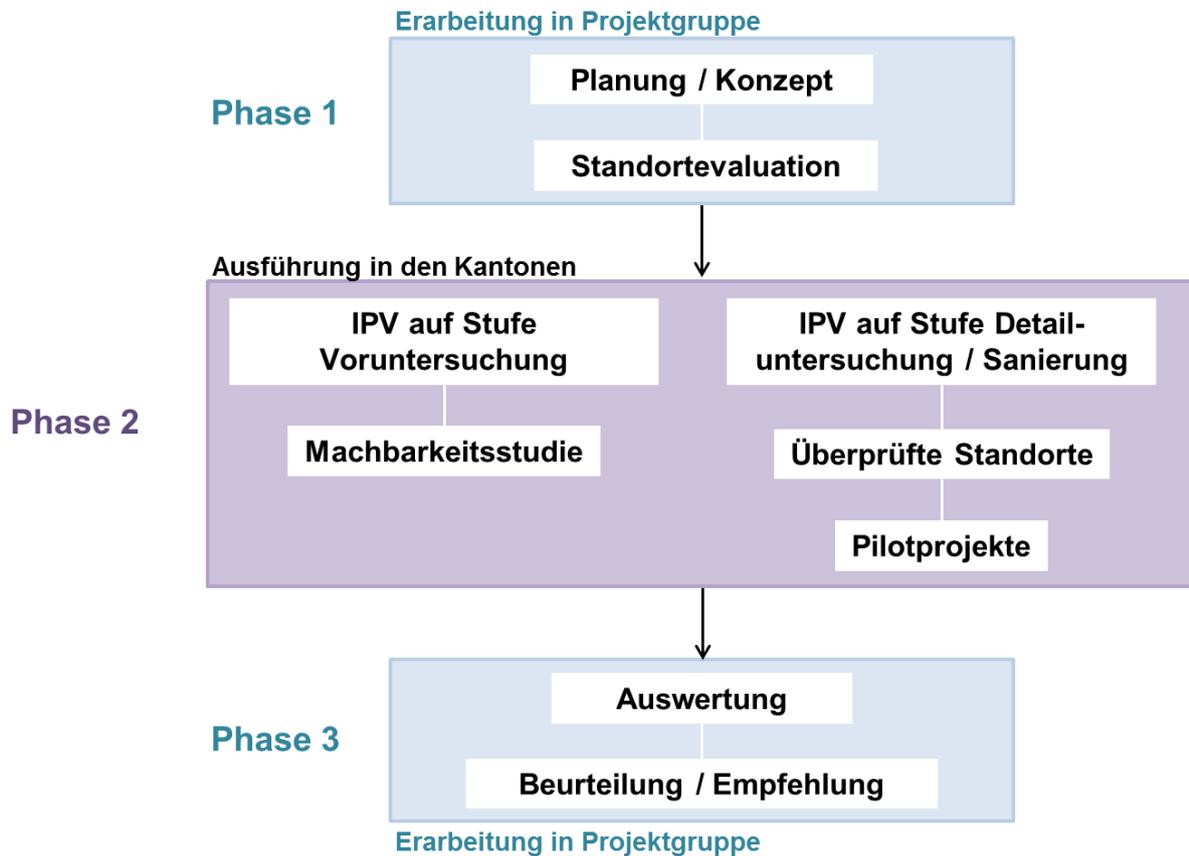


Abbildung 2-1: Projektphasen

Phase 1: Planung / Konzept / Standortevaluation

Die erste Phase diente dazu, die aktuelle Situation in der Schweiz zu analysieren, spezifische Rahmenbedingungen für die Pilotprojekte festzulegen und Kriterien für geeignete Standorte zu definieren. Dazu wurde von der Projektgruppe in Anlehnung an die Arbeiten der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg LUBW [2] Anwendungskriterien für die Ausführung von IPV in der Schweiz entwickelt. Diese Kriterien geben Auskunft, welche Standorteigenschaften erfüllt sein sollten, damit IPV aussagekräftige Resultate liefern können.

Basierend auf den Anwendungskriterien erfolgte anschliessend die Auswahl der Standorte für die Pilotprojekte (Evaluation). Dazu wurden in einzelnen Kantonen mögliche Gebiete und Standorte auf ihre Eignung überprüft und durch die Projektgruppe ausgewertet. Daraus entstanden zusätzliche Entscheidungshilfen bezüglich Anwendung von IPV bei belasteten Standorten.

Das BAFU informierte vorgängig alle Kantone über die Möglichkeit mit geeigneten Standorten am Projekt teilzunehmen. In diesem Bericht sind Daten aus den Kantonen Aargau, Basel Land, Basel Stadt, Bern, Neuenburg und Zürich berücksichtigt.

Phase 2: Ausführung

Die Planung und Ausführung sowie das Festlegen der konkreten Ziele erfolgten individuell in den Kantonen. Der Kanton Zürich überprüfte die Anwendung von IPV zur Erstbeurteilung von belasteten Standorten, d. h. auf Stufe Voruntersuchung. Diese Überprüfung erfolgte anhand einer Machbarkeitsstudie. Geeignete Voraussetzungen für die Durchführung eines Pilotprojektes konnten nicht gefunden werden. Die Kantone Basel Land und Neuenburg stellten Daten von durchgeführten Pumpversuchen zur rechnerischen Überprüfung mit C-SET zur Verfügung. Der Kanton Bern führte Pilotprojekte an zwei verschiedenen belasteten Standorten auf Stufe Detailuntersuchung durch.

Phase 3: Auswertung und Beurteilung / Empfehlung

Im Rahmen der dritten Phase wurden die Ergebnisse durch die Projektgruppe ausgewertet und die Anwendbarkeit von IPV hinsichtlich der spezifischen Verhältnisse in der Schweiz beurteilt. D. h. diskutiert wurde, unter welchen Voraussetzungen IPV auch in der Schweiz eine geeignete Untersuchungsmethode zur Lokalisierung von Schadstoffherden und -fahnen sowie zur Quantifizierung von Frachten darstellen.

3. Definition von Immissionspumpversuchen

3.1 Grundlage

Gemäss Art. 14 der Altlasten-Verordnung (AltIV) zur Detailuntersuchung (DU) werden zur Beurteilung der Ziele und der Dringlichkeit einer Sanierung unter anderem Art, Fracht und zeitlicher Verlauf der tatsächlichen und möglichen Einwirkungen auf die Umwelt ermittelt und bewertet. Die Fracht kann zudem auch im Rahmen der Erfolgskontrolle einer Sanierung eine bedeutende Rolle spielen (z. B. wie stark nimmt die Fracht nach der Sanierung ab).

Die Bestimmung der Schadstofffracht stellt im Vergleich zu der seit Langem erprobten Erfassung der Schadstoffkonzentrationen im Abstrom eines belasteten Standortes eine komplexe Aufgabe der Altlastenbearbeitung dar. Sie erfolgt primär über Grundwasseranalysen aus Messstellen im Grundwasserleiter. Die Herausforderung liegt darin, die aus einzelnen Proben ermittelten Schadstoffkonzentrationen zu regionalisieren, d. h. die aus meist wenigen Messpunkten gewonnenen Daten auf die gesamthaft aus dem Standort freigesetzte Schadstoffmenge hochzurechnen (vgl. Abbildung 3-1).

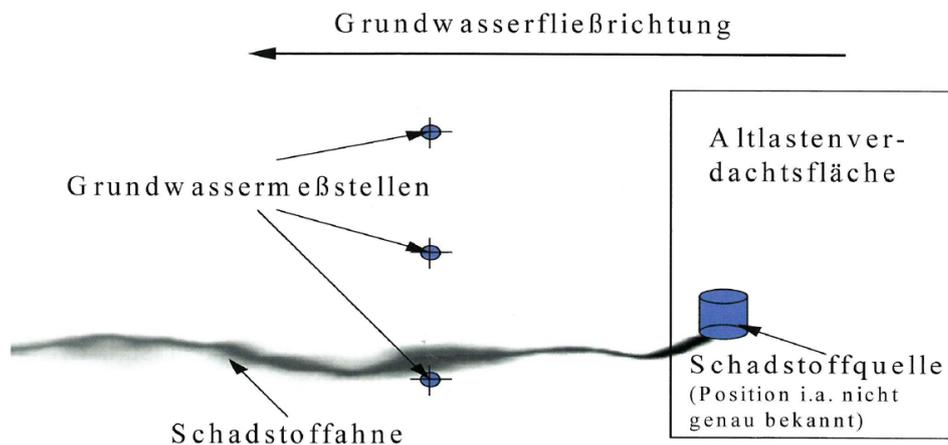


Abbildung 3-1: Schadstofffahne im Grundwasserabstrom (heterogener Aquifer) eines Standortes mit nicht exakt bekannter Position des Schadensherdes (nach Teutsch et al., 2000 [3])

Demgegenüber ermöglicht das Verfahren des IPV eine räumlich integrierende Bestimmung des Schadstoffmassenflusses im Erfassungsbereich des Pumpversuchs. Damit dienen IPV der direkten Bestimmung der Schadstofffracht und ermöglichen darüber hinaus die Lokalisierung von Schadstofffahnen und Schadstoffherden. Dies kann bereits bei der Erstbeurteilung eines belasteten Standortes wie auch in der fortschreitenden Altlastenbearbeitung einen wichtigen Beitrag leisten.

Definition:

Ein Immissionspumpversuch ist ein hydrogeologischer Feldversuch zur Bestimmung der Schadstofffracht über eine Kontrollebene in einem Aquifer.

Neben der Erfassung der Schadstofffracht ermöglichen IPV auch eine quantitative Bestimmung der Konzentrationsverteilung (Immission) entlang der Kontrollebene und damit Rückschlüsse auf Schadstofffahnen und Schadstoffherde.

3.2 Verfahrensprinzip

Das Verfahrensprinzip von IPV ist in diversen Publikationen beschrieben. Nachfolgende Ausführungen sind ein Zusammenschritt der Erläuterungen von Ptak et al., 2013 [4] sowie aus der LUBW-Publikation zum Integralen Altlastenmanagement [2]. Für weitere Details wird auf diese zwei Publikationen verwiesen.

Bei einem IPV wird das geförderte Grundwasser während des Pumpversuchs mehrfach beprobt und die Konzentration der zu untersuchenden Schadstoffe bestimmt. Der zeitliche Konzentrationsverlauf enthält Informationen zur räumlichen Konzentrationsverteilung im Erfassungsbereich des Pumpversuchs. Der mit fortschreitender Pumpdauer wachsende Erfassungsbereich wird für jeden Probenahmezeitpunkt durch eine Isochrone (Linie mit gleicher Fließzeit zum Brunnen) beschrieben, deren Geometrie abhängig ist von den Parametern Pumpzeit, Pumprate, Aquifermächtigkeit, Porosität, Durchlässigkeitsbeiwert und Grundwassergefälle.

Im einfachsten Fall wird die gesamte Schadstofffahne durch einen einzigen, im Abstrom der Schadstoffquelle positionierten Brunnen erfasst.

Relativ breite Schadstofffahnen können durch eine Reihe mit mehreren Brunnen erfasst werden, die entlang einer sogenannten Kontrollebene senkrecht zur Fließrichtung im Abstrom des Schadstoffherdes angeordnet sind (Abbildung 3-2). Die Position der Brunnen, die Pumpzeit und die Pumpraten sind dabei so zu wählen, dass auf Höhe der Kontrollebene der gesamte Abstrom eines Standortes erfasst wird. Die Anzahl der dafür erforderlichen Pumpbrunnen hängt im Wesentlichen von der Breite der zu untersuchenden Kontrollebene und von der erzielbaren Entnahmebreite der Brunnen ab.

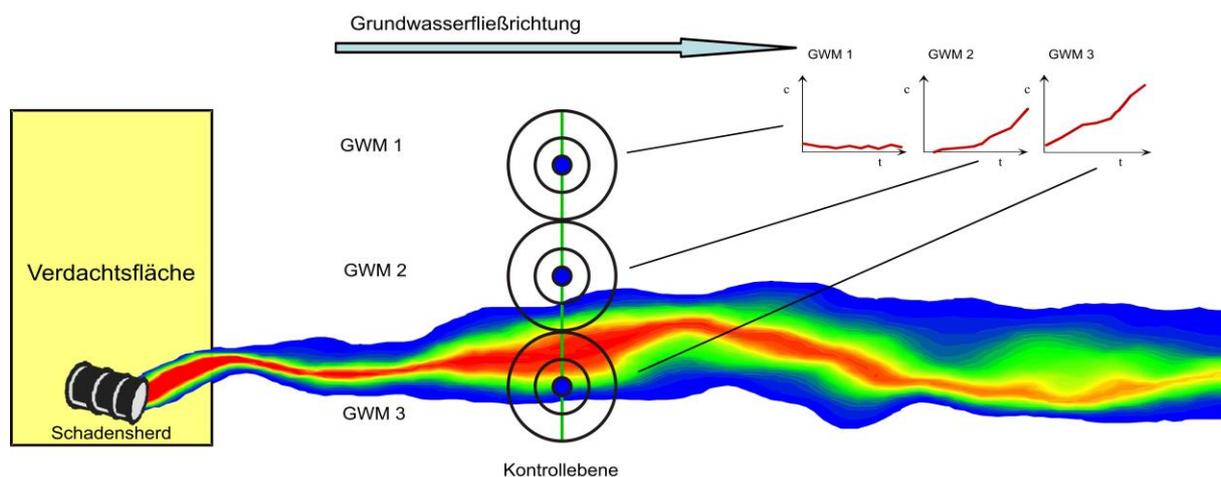


Abbildung 3-2: Prinzip eines Immissionspumpversuchs mit drei Grundwassermessstellen entlang einer Kontrollebene (nach Teutsch et al., 2000 [3])

Je nach Lage der Schadstofffahne zum Brunnen können anhand des Konzentrationsverlaufs im Kontrollbrunnen verschiedene Szenarien unterschieden werden (vgl. Abbildung 3-3):

Fall 1: Kontrollbrunnen liegt ausserhalb der Fahne, der Erfassungsbereich des IPV reicht über die Fahne hinaus (Konzentrationsmaximum, nachfolgende Verdünnung).

Fall 2: Kontrollbrunnen liegt innerhalb der Fahne, der Erfassungsbereich des IPV reicht über die Fahne hinaus.

Fall 3: Kontrollbrunnen liegt ausserhalb der Fahne, der IPV erfasst den äusseren Fahnenrand nicht.

Fall 4: Kontrollbrunnen liegt innerhalb der Fahne, der IPV erfasst die Fahnenränder nicht.

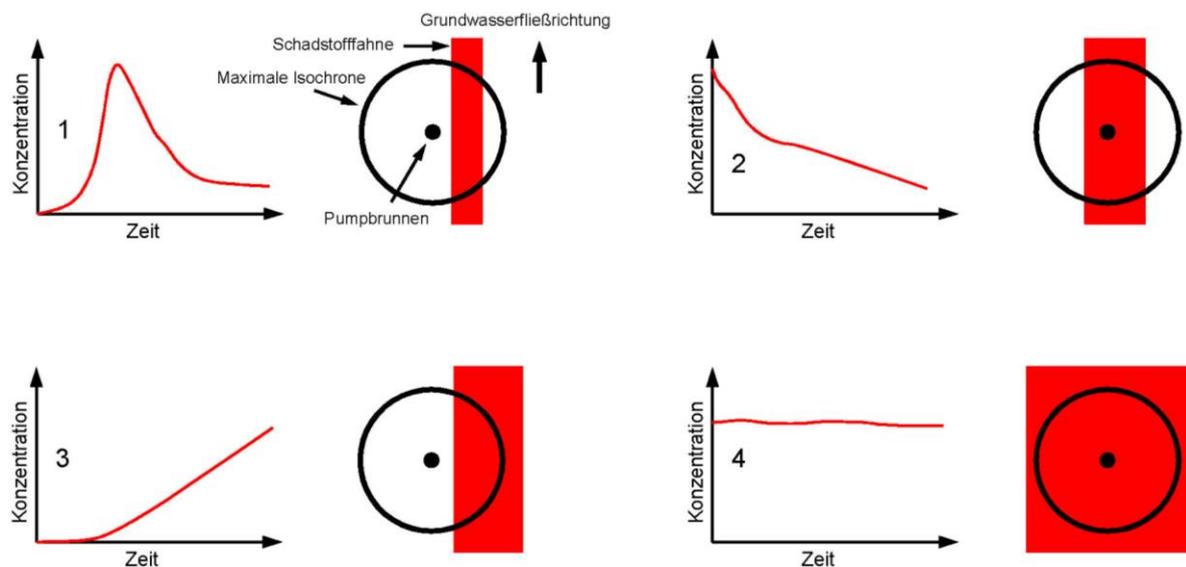


Abbildung 3-3: Charakteristische Konzentrationslinientypen und zugehörige Schadstofffahnen (nach Teutsch et al, 2000 [3])

Aufgabe der IPV-Auswertung ist es, aus den gemessenen Konzentrationsganglinien die mögliche Schadstoffverteilung im Einzugsgebiet der Brunnen zurückzurechnen. Aus der mittleren Schadstoffkonzentration im Kontrollquerschnitt und der natürlichen Grundwasserströmung errechnet sich die Schadstofffracht über den Kontrollquerschnitt.

Für die Auswertung stehen verschiedene Auswertetools zur Verfügung. In [4] sind die einzelnen Auswerteverfahren aufgelistet und bewertet. Auch im Beitrag von Uwe Hekel an der ChloroNet Tagung 2014 wurden gebräuchliche Tools vorgestellt [1].

3.3 Bisherige Anwendung von IPV in der Schweiz

In der Schweiz wurden IPV als Hilfsmittel zur Altlastenuntersuchung erst an wenigen Standorten angewendet. An zahlreichen Standorten wurden jedoch Pumpversuche durchgeführt und der Verlauf der Schadstoffkonzentration durch mehrere Probenahmen untersucht. Dabei handelt es sich aber meist nicht um ein systematisches Vorgehen in dem Sinne, dass aus dem Konzentrationsverlauf Schadstoffverteilungen und Frachten rückgerechnet wurden.

In Baden-Württemberg (D) wird das IPV-Verfahren in der Altlastenbearbeitung seit über 10 Jahren als Standardwerkzeug zur Ermittlung von Schadstoffimmissionen und -frachten im Grundwasser angewendet. Dabei werden sowohl Einzelstandorte untersucht als auch komplexe Grundwasserverunreinigungen in urbanen Räumen (integraler Ansatz), wobei häufig auch die Eruierung der Schadstoffquellen im Vordergrund steht.

4. Anforderungen an den Standort

4.1 Anwendungskriterien

Von der LUBW wurde auf der Grundlage bisheriger Projekterfahrungen wesentliche zu prüfende Kriterien für die Anwendung von IPV zusammengestellt [2]. Diese Kriterien wurden von der Projektgruppe an die hydrogeologische Situation in der Schweiz angepasst.

Dabei werden drei Themenbereiche unterschieden, für welche Prüfkriterien aufgestellt und hinsichtlich der Anwendung von IPV in der Schweiz bewertet wurden (Abbildung 4-1):

- Schadstoffsituation
- Hydrogeologische Situation (Grundwasserleiter)
- Standortsituation (Infrastruktur: Grundwassermessstellen)

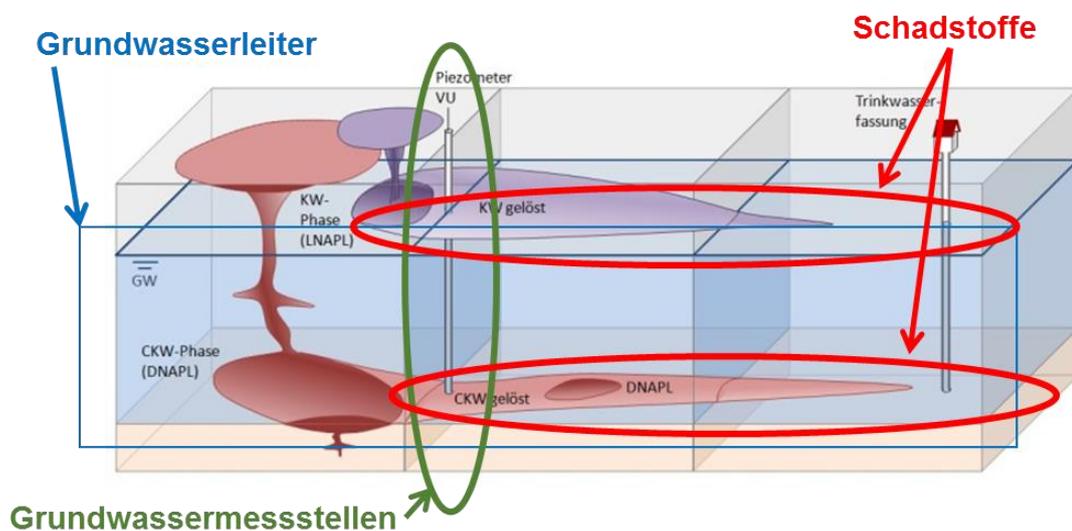


Abbildung 4-1: Bereiche, für welche verschiedene Anwendungsbedingungen formuliert wurden (Quelle: BAFU, leicht modifiziert)

Die Prüfkriterien und Anforderungen sind nachfolgend in Tabelle 4-1, Tabelle 4-2 und Tabelle 4-3 zusammengestellt. Als Ausschlusskriterium sind Bedingungen bezeichnet, die aus Sicht der Projektgruppe für die Planung bzw. Ausführung eines IPV zwingend erfüllt sein müssen.

Grundlegende Voraussetzung für die Planung sind Kenntnisse der hydraulischen Situation und der Kennwerte des Untersuchungsbereichs.

Ausschlussgründe ergeben sich wenn z.B.

- im Entnahmbereich die Schadstoffe in Phase oder in zu geringen Konzentrationen vorliegen,
- der Standort für einen Pumpversuch grundsätzlich nicht geeignet ist (z.B. Untergrund aus feinkörnigem Sand/Silt),
- die vorhandenen Informationen (z.B. zum Grundwasserleiter und zur Fließrichtung) für die Planung eines IPV (noch) nicht ausreichen.

Kriterium	Anforderungen	Beurteilungsgrundlage	Ausschlusskriterium	Erläuterung
Konzentrationen	Genügend hoch auch im Abstrom (mind. 1 Grössenordnung über den Bestimmungsgrenzen)	Grundwasseranalysen am Standort	ja	Bei zu tiefen Konzentrationen kann keine aussagekräftige Durchgangskurve aufgezeichnet werden
Vorliegen der Schadstoffe	Keine CKW in Phase im Entnahmebereich	Feststoffanalysen am Standort	ja	CKW-Phase im Entnahmebereich führt zu falschen Resultaten (Immission und Emission)
Schadstoffverteilung	Möglichst konstante Schadstoffverteilung über die betrachtete Aquifermächtigkeit	Kenntnisse aus tiefenorientierten Grundwasseranalysen (z. B. Multilevel Beprobung)	nein	Unsicherheit durch Mittelung bei der Auswertung
Abbau	Möglichst kein Konzentrationsgradient in Fliessrichtung innerhalb des Erfassungsbereichs	Grundwasseranalysen am Standort	nein	Abbau innerhalb des Erfassungsbereichs wird bei der Auswertung nicht berücksichtigt und führt zu Fehlern

Tabelle 4-1: Kriterien im Bereich Schadstoffsituation (Auflistung und Bewertung)

Kriterium	Anforderung	Beurteilungsgrundlage	Ausschlusskriterium	Erläuterung
Grundwasserleiter (Aquifer)	Porengrundwasserleiter	Hydrogeologische Karte/Grundwasserkarte	ja	kein Kluftgrundwasserleiter/Karst
Zusammensetzung und Durchlässigkeit des Grundwasserleiters	Mindestanforderungen an Durchlässigkeit: Schotter oder grob-/mittelkörniger Sand	Kenntnisse der hydraulischen Eigenschaften (k_f -Wert, Porosität). Ermittlung durch repräsentative Pumpversuche.	ja	zu geringe Durchlässigkeit: Erfassungsbereich klein zu grosse Durchlässigkeit: sehr hohe Wassermengen, kostenrelevant
Aquifermächtigkeit	Mächtigkeit idealerweise im Bereich 2 - 10 m	Bohrprofile am Standort		geringe Wassersäule: Absenkung und Pumprate limitiert, geringere Reichweite grosse Mächtigkeit: geringere Reichweite pro Zeit
Homogenität Grundwasserleiter	Idealerweise \pm homogener Grundwasserleiter	Aufnahme Bohrgut aus Sondierung		homogen: ohne makroskopisch gut unterscheidbare lithologische Unterschiede (z.B. feinkörnige Linsen in einer grobkörnigen Schicht im Erfassungsbereich)

Kriterium	Anforderung	Beurteilungsgrundlage	Ausschlusskriterium	Erläuterung
Grundwasserströmung	Fließrichtung und hydraulischer Gradient müssen bekannt sein	Stichtagemessungen, ggf. Markierversuche		sehr hohe Fließgeschwindigkeit führt zu engem Entnahmebereich
Grundwasserspiegel	Idealerweise nicht zu tief		nein	tiefer Grundwasserspiegel führt zu höheren Kosten (z.B. tiefere Bohrungen notwendig)

Tabelle 4-2: Kriterien hinsichtlich hydrogeologischer Situation (Auflistung und Bewertung)

Kriterium	Anforderung	Beurteilungsgrundlage	Ausschlusskriterium	Erläuterung
Vollkommene Brunnen	Verfilterung bis auf Stauer, Verfilterung über gesamten GW-Leiter	Bohrprofile am Standort	nein	bei unvollkommenen Brunnen beschränkt sich die Aussage auf den verfilterten Bereich
Anzahl / Anordnung	Erfassen des gesamten erwarteten Abstrombereichs; Kontrollebene \perp zur Fließrichtung	Kenntnisse über ungefähre Lage der Schadstofffahne aufgrund Grundwasseranalysen	ja	erforderliche Anzahl der Messstellen ist abhängig von der Breite der Schadstofffahne und des möglichen Entnahmebereichs
Durchmesser	Muss ausreichend hohe Pumprate ermöglichen (idealerweise mind. 4.5"-Filterrohre)		nein	bei kleineren Messstellendurchmesser ist die Pumprate limitiert, geringere Reichweite
Zugänglichkeit	Muss für gesamten Pumpversuch gegeben sein (mehrere Tage)	Vorabklärung bez. Nutzung am Standort und erforderlichen Bewilligungen	ja	kein Unterbruch des Pumpbetriebs, ansonsten Schwierigkeiten bei der Auswertung
Ausbau Messstellen	Hydraulisch funktionsfähige Messstellen Keine Beeinflussung der Schadstoffe durch Ausbaumaterial		ja	keine Schadstoffsorption am Ausbaumaterial/keine Ablagerungen im Brunnen
Wassersäule	Ausreichend grosse absenkbare Wassersäule wird vorausgesetzt		ja	siehe Aquifermächtigkeit

Tabelle 4-3: Kriterien im Bereich Standortsituation (Auflistung und Bewertung)

4.2 Entscheidungshilfe zur Planung von IPV

Auf Grundlage der in Kap. 4.1 dargestellten Voraussetzungen und Prüfkriterien wurde ein Entscheidungsbaum für die Planung von IPV entwickelt (Abbildung 4-2). Dieser stellt den Ablauf für die Auswahl der Pilotstandorte dar, kann aber auch allgemein als Entscheidungshilfe zur Planung von IPV herangezogen werden.

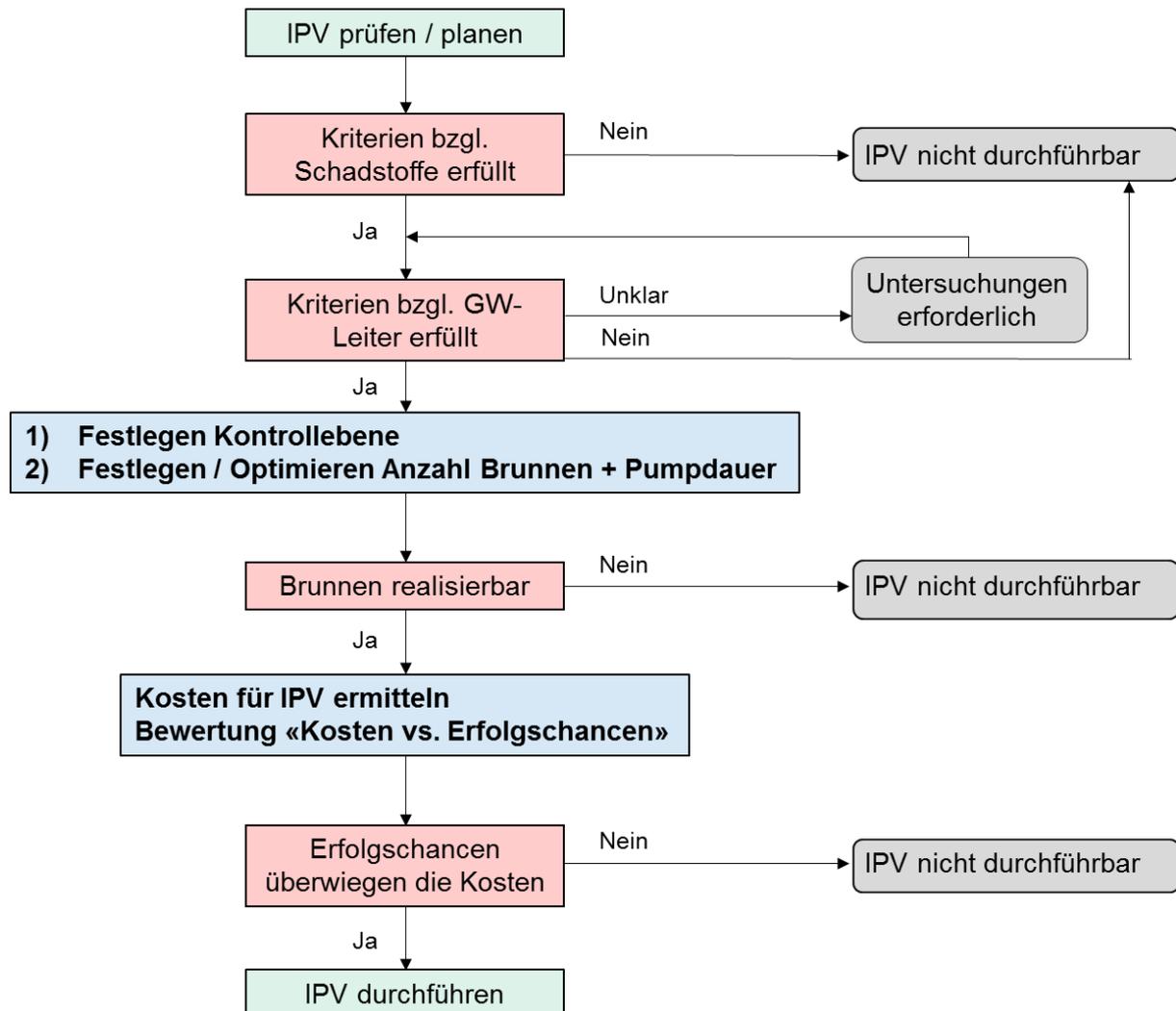


Abbildung 4-2: Entscheidungsbaum für Planung von IPV

Einige Prüfschritte des Entscheidungsbaums erfordern eine quantitative Abschätzung der durch die IPV erzielbaren Erfassungsbereiche. Dies betrifft die Prüfung der hydrogeologischen Voraussetzungen, die Ermittlung der erforderlichen Brunnenzahl und Pumpdauer sowie letztendlich die Kostenbewertung. Eine erste Einschätzung kann anhand der in Kap. 4.3 entwickelten Diagramme vorgenommen werden, die den Einfluss der hydrogeologischen Faktoren auf die erfasste Entnahmebreite eines IPV aufzeigen.

4.3 Sensitivitätsanalyse – Einfluss von verschiedenen hydrogeologischen Faktoren auf die erfasste Entnahmbreite

Für einen effizienten Einsatz der IPV-Methode sollte jeder IPV eine möglichst grosse Entnahmbreite abdecken. In diesem Abschnitt wird diskutiert, wie verschiedene hydrogeologische Faktoren die Entnahmbreite beeinflussen. Die Diskussion beruht auf Berechnungen mit einer analytischen Lösung der Grundwasser-Strömungsgleichung für einen Pumpbrunnen. Analytische Lösungen haben den Vorteil, dass der Zusammenhang zwischen verschiedenen Einflussfaktoren direkt aufgezeigt werden kann. Die Resultate gelten aber nur annäherungsweise, da die Berechnung auf der Annahme von homogenen Verhältnissen beruht. Die Berechnungen ermöglichen mit wenig Aufwand abzuschätzen, ob unter gegebenen hydrogeologischen Bedingungen mit einem IPV eine genügend grosse Entnahmbreite erreicht wird und wie die Entnahmbreite bei der Durchführung eines IPV beeinflusst werden kann.

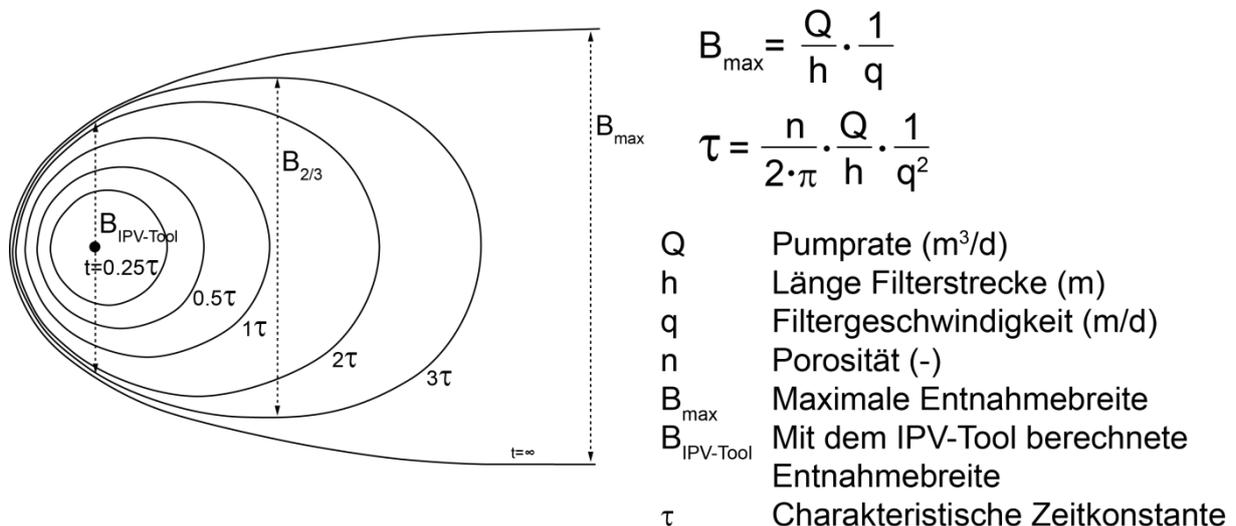


Abbildung 4-3: Zeitliche Entwicklung des Entnahmbereichs in Funktion der Pumpdauer gemäss einer analytischen Lösung der Grundwasser-Strömungsgleichung für einen Pumpbrunnen. Formeln für die maximale Entnahmbreite B_{\max} und die nötige Zeitperiode bis der Entnahmbereich eine bestimmte Grösse erreicht hat, z.B. 2/3 der maximalen Ausdehnung ($B_{2/3}$). Die Zeitperiode ist dabei als Funktion einer charakteristischen Zeitkonstante ausgedrückt, die von verschiedenen Faktoren abhängt

Abbildung 4-3 zeigt, wie sich der Entnahmbereich als Funktion der Zeit ausdehnt, bis ein stationärer Zuströmbereich erreicht wird. Um die Möglichkeiten und Grenzen eines IPV zu verstehen, ist es instruktiv zu betrachten, welche maximale Entnahmbreite theoretisch erreicht werden kann und wie rasch man sich dieser maximalen Breite annähert. Die maximale Entnahmbreite entspricht dem Produkt der Pumprate pro Länge der Filterstrecke (Q/h) - hier spezifische Pumprate genannt - und dem Inversen der Filtergeschwindigkeit ($1/q$). Eine hohe Pumprate ist also nicht nur wichtig, um die Dauer eines IPV zu reduzieren, sondern auch prinzipiell, um eine grosse Entnahmbreite zu erreichen. Dies ist besonders dann der Fall, wenn die Filtergeschwindigkeit hoch ist, d. h. $1/q$ klein und – mathematisch gesehen – ein hohes Q/h nötig ist, um den kleinen Wert von $1/q$ zu kompensieren.

Abbildung 4-4a zeigt, wie sich der maximale Entnahmbereich als Funktion der spezifischen Pumprate und Strömungsverhältnisse verhält, wobei einfachheitshalber die Fließgeschwindigkeit $v (=q/n)$ als x-Achse gewählt wurde. Die verwendeten spezifischen Pumpraten entsprechen beispielsweise einer Pumprate von 5 l/s in voll verfilterten Brunnen mit 5 m (bei 1 l/m/s), 10 m (bei 0.5 l/m/s) und 20 m (bei 0.25 l/m/s) Filterstrecke. Bei geringen Fließgeschwindigkeiten ergeben sich grosse maximale Entnahmbreiten, während sich diese bei hohen Fließgeschwindigkeiten auf 5 bis 20 m reduzieren, je nach spezifischer Pumprate. Wie rasch die maximal mögliche Entnahmbreite erreicht wird, hängt stark von der Filtergeschwindigkeit ab, die mit einem Exponenten von 2 im Nenner der Gleichung für die Pumpdauer erscheint (Abbildung 4-3). Bei geringeren Filtergeschwindigkeiten sind >10 Tage nötig bis 2/3 der maximalen Entnahmbreite erreicht wird (Abbildung 4-4b), während bei hohen Filtergeschwindigkeiten der Entnahmbreitenzuwachs bereits nach weniger als 2 Tagen limitiert ist.

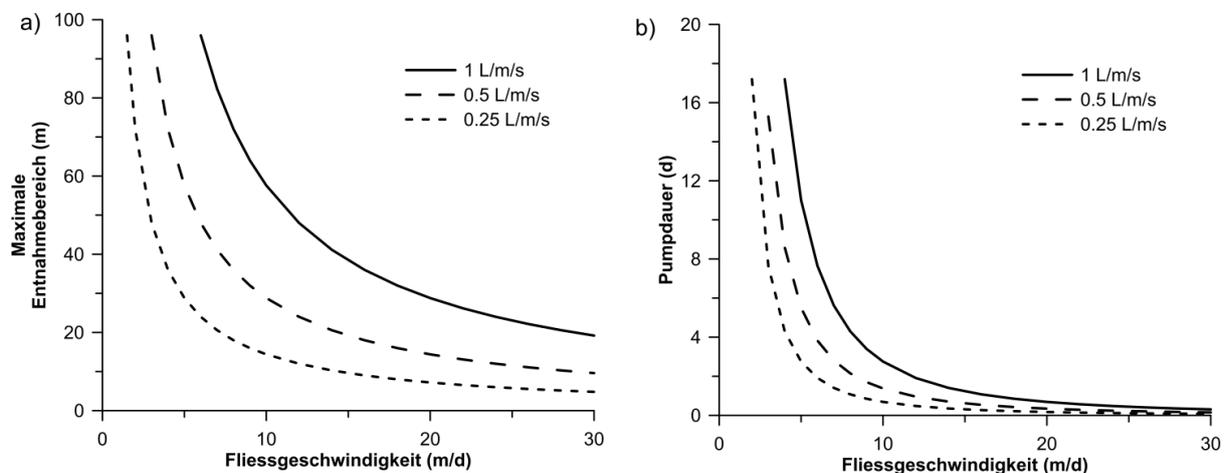


Abbildung 4-4: (a) Entwicklung des maximalen Entnahmbereichs als Funktion der Fließgeschwindigkeit und der spezifischen Pumprate (Pumprate pro Länge Filterstrecke). (b) Pumpdauer bis 2/3 des maximalen Entnahmbereichs erreicht ist

In Abbildung 4-5 ist die Entnahmbreite für verschiedene Pumpdauern als Funktion der Fließgeschwindigkeit dargestellt¹. Für hohe Fließgeschwindigkeiten wird die maximale Entnahmbreite rasch erreicht. Eine längere Pumpdauer bringt entsprechend keinen weiteren Informationsgewinn und erhöht damit lediglich die Kosten. Eine höhere Entnahmbreite kann nur durch eine höhere Pumprate erreicht werden, wie z.B. der Vergleich von Abbildung 4-5a (0.25 l/m/s) und Abbildung 4-5c (1 l/m/s) illustriert. Für geringere Fließgeschwindigkeiten nimmt die Entnahmbreite kontinuierlich zu. Aufgrund der radial-elliptischen Form wächst aber die Breite nur etwa mit der Quadratwurzel der Zeit.

¹ Die Entnahmbreite entspricht dabei der grössten Breite einer Isochrone (entsprechend $B_{2/3}$ in Abbildung 4-3). In den Berechnungstools, die von der Internetseite der LUBW heruntergeladen werden können, wird die Entnahmbreite jedoch unterschiedlich definiert. Das Programm C-SET verwendet die Entnahmbreite in richtiger Weise nach der obigen Definition. Im Gegensatz dazu verwendet das „IPV-Tool“ die Entnahmbreite auf der Höhe des Pumpbrunnens, womit bei nicht konzentrischen Isochronen (höhere Grundströmung) die berechnete Fracht deutlich unterschätzt wird.

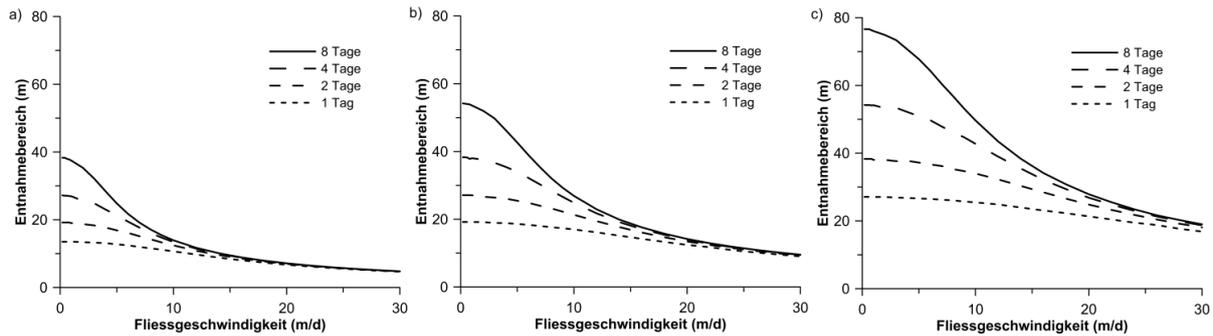


Abbildung 4-5: Entnahmbreite als Funktion der Fließgeschwindigkeit und der Pumpdauer für drei spezifische Pumpraten, 0.25 l/m/s (a), 0.5 l/m/s (b) und 1 l/m/s (c)

Effizienz der IPV-Methode

Die Effizienz von IPV hängt von der beim Pumpen erzielbaren Entnahmbreite ab:

- Für Fließgeschwindigkeiten von >10 m/d kann nur eine begrenzte Entnahmbreite erreicht werden, die im Wesentlichen von der spezifischen Pumprate abhängt. Für eine gegebene Pumprate ist die Entnahmbreite dabei invers proportional zur Länge der Filterstrecke. Das heisst, insbesondere eine Kombination von hoher Fließgeschwindigkeit und langer Filterstrecke führt zu einem kleinen Entnahmbereich, der relativ rasch erreicht wird.
- Für Fließgeschwindigkeiten von <10 m/d können grössere Entnahmbreiten erreicht und diese durch eine zusätzliche Pumpdauer weiter ausgedehnt werden. Dabei wächst die Entnahmbreite aber nur mit der Quadratwurzel des Produktes von spezifischer Pumprate und Pumpdauer.

4.4 Standortevaluation für Pilotprojekte

Die Standortauswahl für die Pilotprojekte erfolgte nach dem in Abbildung 4-2 entwickelten Entscheidungsbaum. Für die Pilotprojekte wurden idealerweise Standorte gesucht, welche die Kriterien betreffend Grundwasserleiter, Schadstoffe und Grundwassermessstellen erfüllen. In der Praxis sind solche Standorte jedoch vielfach nicht vorhanden. Bei der Auswahl der Standorte für die Pilotprojekte mussten daher Abstriche gemacht werden. Für den Entscheid, ob die Durchführung von IPV bei einem Standort sinnvoll bzw. zielführend ist, waren v.a. die Ausschlusskriterien massgeblich (vgl. Tabelle 4-1 bis Tabelle 4-3). Aufwand (Kosten) vs. Aussagekraft des Versuches sind abzuwägen.

Das Ergebnis der Standortevaluation ist in Tabelle 4-4 dargestellt. Die Darstellung beschränkt sich auf die wichtigsten Kriterien der Schadstoffsituation, der hydrogeologischen Situation sowie der Standortsituation:

- Die **Standorte A und B** erfüllten die Anwendungskriterien für IPV und wurden daher als Pilotprojekte ausgewählt (Kap. 6.2 und 6.3)
- Die **Standorte C und D** erfüllten die Anwendungskriterien teilweise. Hier waren IPV bereits bei früheren Untersuchungen durchgeführt worden. Daher bot sich an, für diese Standorte die Anwendungskriterien sowie die Ergebnisse der früheren IPV zu überprüfen und zu bewerten (Kap. 6.4 und 6.5).
- Die **Standorte E, F und G** wurden im Evaluierungsverfahren aus unterschiedlichen Gründen ausgeschieden (Anhang A).

Häufigste Kriterien, die bei vielen Standorten nicht erfüllt sind, waren:

- geringe Aquifermächtigkeit / geringe Durchlässigkeit
- grosse Inhomogenitäten
- Erfassung der Fahne nicht möglich bzw. nicht wirtschaftlich
- ungenaue Kenntnis der Grundwasserströmung/Fliessrichtung
- ungenaue Kenntnis der Durchlässigkeit

des Weiteren

- ungünstiges Verhältnis von Kosten / Nutzen resp. sehr hohe Kosten bzw. fehlende Finanzierung
- rechtliche Probleme (z. B. fehlendes Einverständnis des Standortinhabers)

Kriterium		StaO A	StaO B	StaO C	StaO D	StaO E		StaO F	StaO G
						herdnah	weiterer Abstrom		
Schadstoffsituation	Genügend hohe Schadstoffkonzentrationen	PCE 1,7 - 30 µg/l	∑ CKW 7,5 - 93 µg/l R113 0 - 27 µg/l	PCE 0,4 - 37 µg/l	PCE 17 - 26 µg/l	PCE 500 - > 1000 µg/l	PCE < 10 - 100 µg/l	PCE 0,1 - 640 µg/l	CKW bis > 1000 µg/l
	Keine DNAPL's im Entnahmbereich	keine, da Kontrollebene im weiteren Abstrom	im Bereich der Kontrollebene nicht relevant	im Fahnenbereich nicht anzunehmen	im Fahnenbereich nicht anzunehmen	auf FelsOK abfließende Phase nicht auszuschliessen	im weiteren Abstrombereich nicht anzunehmen	nicht im Bereich der Schadstoffquelle, keine Hinweise auf PER-Phase	im Bereich der Kontrollebene nicht anzunehmen
hydrogeologische Situation	Mindestanforderungen an GW-Leiter	Grobkies stark durchlässig k=3·10 ⁻³ m/s	sandiger Kies stark durchl. k=3·10 ⁻³ m/s	siltig-sandiger Kies stark durchl. k=1·10 ⁻³ m/s	steiniger Kies sehr stark durchlässig k=1·10 ⁻² m/s	lehmgiger Kies	sandiger Kies	sandiger Kies stark durchl. k=1·10 ⁻³ m/s	sandiger Kies vermutl. gut durchlässig
	Aquifermächtigkeit 2-10 m	4,6 - 5,3 m	3,3 - 3,5 m	ca. 2 m im Fahnenbereich	ca. 3 m	0 - 2 m Aquifersohle stark reliefiert	4 - 5 m	8,7 m	3 - 4 m
	± homogener GW-Leiter	entlang Kontrollebene ± homogen, seitliche Stufe der Aquiferbasis zu beachten	entlang Kontrollebene ± homogen	± homogen; nach Bohrprofilen gleichförmige Ablagerungen	eingeschränkt, benachbarte Bohrungen weisen höhere Siltanteile aus	inhomogener Gehängeschutt	± homogene Schotter; Fließrichtung aufgrund Relief der Aquifersohle und Rhein-infiltration unsicher	± homogen: fluviatile Schotter mit unterschiedlichem Sandanteil, kaum tonig-siltiger Feinanteil	entlang Kontrollebene ± homogen
Standortsituation	Vollkommene Brunnen	ja	ja	ja	ja	(vermutl.) ja	(vermutl.) ja	ja	ja, teilw. neu zu errichten
	Erfassen des gesamten erwarteten Abstrombereichs	ja, durch 2 Brunnen und überschneid. Erfassungsbereiche	ja, durch 2 Brunnen und überschneid. Erfassungsbereiche	ja, durch 2-3 Brunnen und überschneid. Erfassungsbereiche	nein, einzelner IPV in Fahne, die Ränder werden nicht erreicht	nicht möglich, da allenfalls sehr kleine IPV Erfassungsbereiche	nicht möglich mit bestehenden Brunnen, da keine geschlossene Kontrollebene	vermutl. ja, gem. Planung würde ein einzelner Brunnen einen 60 m breiten Kontrollquerschnitt erfassen	ja, durch 3 Brunnen mit überschneid. Erfassungsbereichen
	Zugänglichkeit gewährleistet	ja	ja	ja	ja	vermutl. ja	vermutl. ja	Anliefer- und Umschlagsbereich	fraglich
	Pilotversuche finanzierbar	ja	ja	IPV bereits vorhanden	IPV bereits vorhanden	nein	nein	nein	nein

Tabelle 4-4: Evaluation der möglichen Standorte bezüglich der wichtigsten Anwendungskriterien für IPV (grün: Mindestanforderungen für IPV erfüllt; gelb: IPV durchführbar, jedoch mit Einschränkungen; rot: Mindestanforderungen für IPV nicht erfüllt)

5. Priorisierung von untersuchungsbedürftigen Standorten mithilfe von IPV

5.1 Ausgangslage und Zielsetzungen

Im Kanton Zürich sind aktuell noch ca. 400 CKW-Standorte als untersuchungsbedürftig eingestuft. In Anbetracht der grossen Zahl noch zu untersuchender Standorte drängte sich die Frage auf, ob mithilfe von IPV die von mehreren Standorten ausgehenden Immissionen im Vorfeld abgeklärt werden können und basierend auf die Resultate der IPV eine Priorisierung im Hinblick auf die Dringlichkeit von Altlasten-Voruntersuchungen (VU) vorgenommen werden kann.

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie sollte die Anwendbarkeit von IPV bzw. Kontrollebenen mit mehreren IPV zur Beantwortung obiger Fragestellung geprüft werden können (Abbildung 5-1). Hierfür waren in einer ersten Phase die Evaluation möglicher Standortgebiete und in einer zweiten Phase Pilotversuche mit Durchführung und Auswertung von IPV anhand konkreter Fallbeispiele geplant.

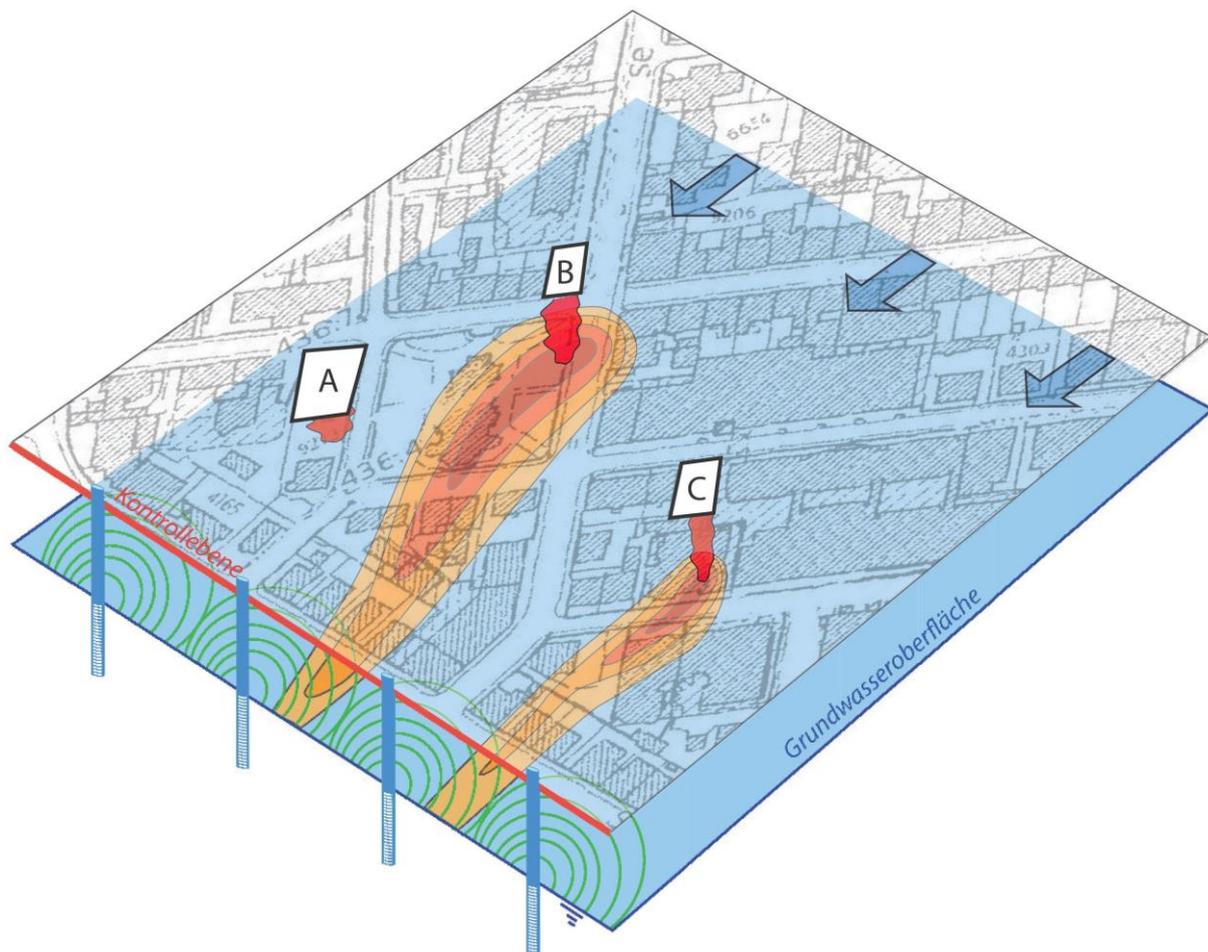


Abbildung 5-1: Regionaler Ansatz für die Anwendung von IPV

5.2 Voraussetzungen für Pilotversuche

Wie in Kap. 4.1 aufgezeigt, müssen zur erfolgreichen Durchführung von IPV verschiedene Kriterien kumulativ erfüllt sein. Auf Stufe VU sind naturgemäss weder die Schadstoffsituation, noch die hydrogeologische Situation ausreichend geklärt. Ausserdem stehen meist noch keine Messstellen oder Brunnen zur Verfügung, was die Kosteneffizienz negativ beeinflusst.

Aus diesen Gründen standen für einen Pilotversuch Gebiete im Vordergrund, bei denen neben mehreren, räumlich nicht allzu weit voneinander entfernten untersuchungsbedürftigen CKW-Standorten zusätzlich auch mindestens ein bereits gut untersuchter Standort mit einer im Grundwasser gut nachweisbaren CKW-Belastung vorhanden ist. Ziel war, mit IPV in einer Kontrollebene im Grundwasserabstrom der Standorte die von dem bekannten Standort ausgehende Schadstofffahne erfassen zu können (Abbildung 5-1).

Die Suche nach möglichen Standortgebieten für die Durchführung von IPV erfolgte in einem ersten Schritt gestützt auf GIS-basierte Auswertungen. Gebiete, die sich als potenziell geeignet erwiesen, wurden anschliessend einer näheren Prüfung unterzogen. Dabei wurden sowohl die vorhandenen Unterlagen zu den belasteten Standorten selbst, als auch die Angaben zu den hydrogeologischen Verhältnissen und zur Messstellensituation ausgewertet.

5.3 Standortsuche mithilfe von GIS-Auswertungen

Als Grundlage für die GIS-basierten Auswertungen diente neben dem Kataster der belasteten Standorte die Grundwasserkarte des Kantons Zürich (maps.zh.ch). Der Betrachtungs- resp. Projektperimeter umfasste die Bezirke Dietikon, Zürich, Winterthur, Pfäffikon und Hinwil, da dort vergleichsweise viele untersuchungsbedürftige CKW-Standorte über nutzbaren Grundwasservorkommen liegen (Abbildung 5-2).

Die Auswertungen bezüglich des Kriteriums „Aquifermächtigkeit“ ergaben, dass von den rund 270 CKW-Standorten nur 73 Standorte resp. 27 % über einem Grundwasserleiter mit einer nutzbaren Mächtigkeit von 2 - 10 m (bei Mittelwasser) liegen. Die Klassierung entspricht der im GIS erfassten Mächtigkeitsabstufung. Eine detailliertere Unterscheidung war im Rahmen der Machbarkeitsstudie nicht möglich. Grundsätzlich kann aber davon ausgegangen werden, dass bei Vorliegen der genannten Grundwassermächtigkeit die Voraussetzungen für die erfolgreiche Durchführung von IPV zumeist erfüllt sind.

Von den 73 Standorten mit der genannten Aquifermächtigkeit wiesen 57 einen Flurabstand von maximal 10 m auf. Zwar sind IPV auch bei grösserem Flurabstand grundsätzlich möglich, doch nehmen die Kosten deutlich zu, weshalb Standortgebiete mit einem Flurabstand > 10 m im Rahmen der Machbarkeitsstudie aus Kosten-Nutzen-Überlegungen nicht weiter in Betracht gezogen wurden.

Gesamthaft waren die hydrogeologischen Voraussetzungen für die erfolgreiche Durchführung von IPV innerhalb des Betrachtungsperimeters demzufolge in 21 % der Fälle resp. bei 57 untersuchungsbedürftigen CKW-Standorten erfüllt (Abbildung 5-3).

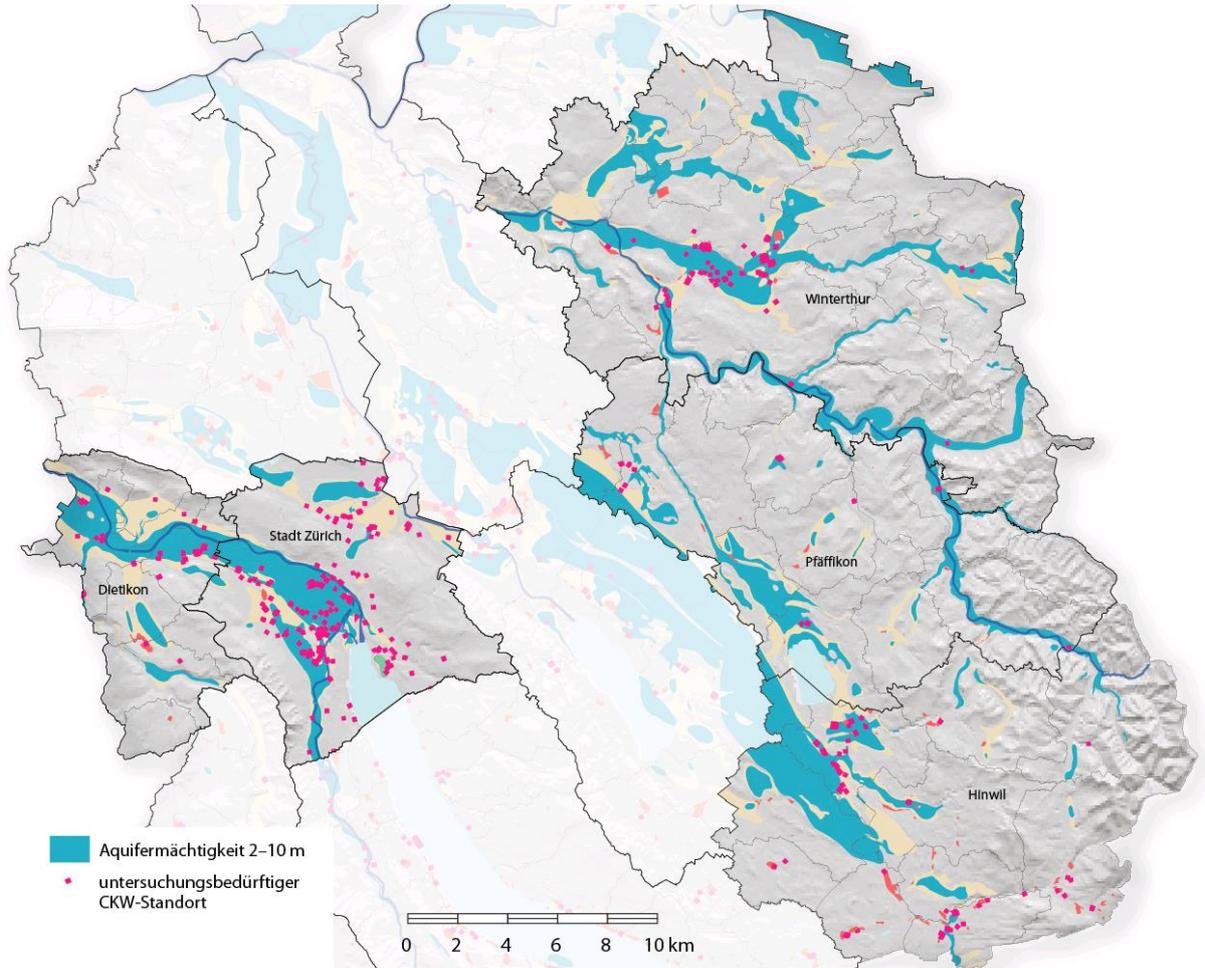
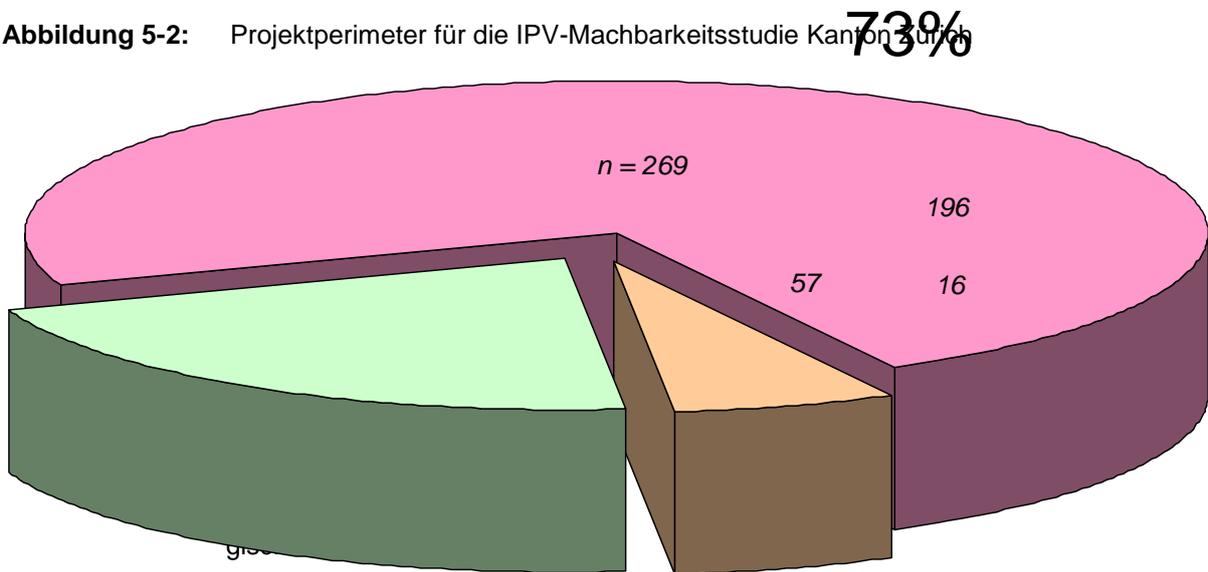


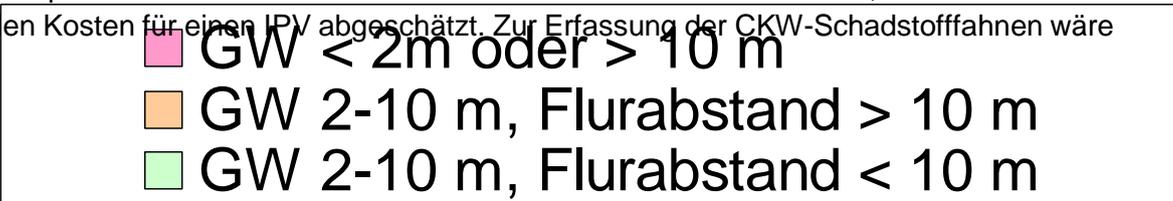
Abbildung 5-2: Projektperimeter für die IPV-Machbarkeitsstudie Kanton Zürich



21%

6%

Ebenfalls aus Kostenüberlegungen ergibt sich als weitere wichtige Anforderung an die Durchführung von IPV, dass die zu untersuchenden Standorte nicht allzu weit voneinander entfernt liegen sollten. An einem Fallbeispiel im zürcherischen Limmattal, bei welchem die CKW-Schadstoffquellen einen Abstand von mehreren hundert Metern aufweisen, wurden die zu erwartenden Kosten für einen IPV abgeschätzt. Zur Erfassung der CKW-Schadstofffahnen wäre



in diesem Fall eine Kontrollebene von 600 m Länge mit insgesamt 10 - 12 Filterbrunnen erforderlich. Für die Pumpversuche wurde rechnerisch eine Dauer von 7 Tagen je Brunnen ermittelt. Insgesamt resultieren zur Abklärung von lediglich 3 CKW-Standorten Kosten für die Durchführung von IPV in der Grössenordnung von CHF 250'000 und damit ein ungünstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis.

Aus obigen Betrachtungen ergibt sich, dass für die Anwendung von IPV zur Erstbeurteilung untersuchungsbedürftiger CKW-Standorte eine minimale Standortdichte sowie eine optimale räumliche Anordnung bezüglich der Schadstofffahnen gegeben sein müssen. Für das Pilotprojekt wurden daher zusätzlich folgende Kriterien festgelegt:

- Abstand zwischen CKW-Standorten maximal 50 - 100 m (Abbildung 5-4)
- Anordnung der CKW-Standorte möglichst quer zum Fliessfeld

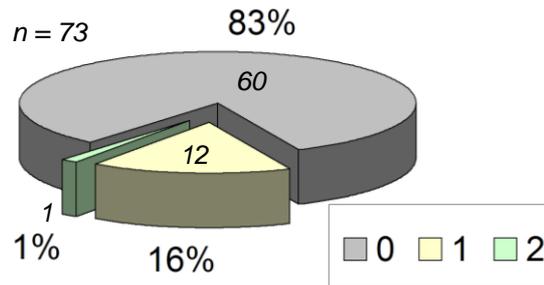


Abbildung 5-4: GIS-Auswertung mit 100 m-Pufferbereichen um untersuchungsbedürftige CKW-Standorte; gelb: Standortdichte günstig (2 oder mehr Standorte < 100 m)

Die Auswertung für sämtliche CKW-Standorte mit einer Aquifermächtigkeit von 2 - 10 m (ohne Berücksichtigung des Flurabstandes) ergab, dass bei 83% der 73 zur Diskussion stehenden Standorte der Abstand zum nächstgelegenen CKW-Standort mehr als 100 m beträgt. Lediglich in 16 % der Fälle weisen jeweils 2 Standorte eine Entfernung von weniger als 100 m auf und nur gerade in einem Fall liegen gleichzeitig 3 CKW-Standorte in einem Abstand von 50 - 100 m voneinander entfernt (Abbildung 5-5).

Vorgabe für einen Pilotversuch war zudem, dass ein hierfür infrage kommender Standort eine durch frühere Untersuchungen gut bekannte CKW-Belastung des Grundwassers und entsprechende Messstellen aufweisen sollte. Bei weiterer Prüfung der in Betracht kommenden untersuchungsbedürftigen CKW-Standorte zeigte sich, dass dies bei keinem Standort der Fall ist.

Abbildung 5-5: Ergebnis der GIS-Auswertung hinsichtlich Standortdichte in Gebieten mit einer Grundwassermächtigkeit von 2 - 10 m (Prozentualer Anteil von 0, 1 resp. 2 weiteren CKW-Standorten im 100 m-Puffer)



Da im gewählten Betrachtungsperimeter trotz vergleichsweise günstigen Voraussetzungen (hohe Anzahl untersuchungsbedürftiger CKW-Standorte über nutzbaren Grundwasservorkommen) kein IPV möglich war, ist die Wahrscheinlichkeit, im übrigen Gebiet des Kantons Zürich VU-Standorte anzutreffen, welche sich für die Durchführung von IPV nach dem regionalen Ansatz eignen würden, als gering einzuschätzen.

Einsatz von IPV zur Priorisierung:

Die Machbarkeitsprüfung für IPV zur Priorisierung von untersuchungsbedürftigen CKW-Standorten im Kanton Zürich hat ergeben, dass an keinem der rund 270 Standorte ein erfolgversprechender Pilotversuch für die Durchführung von IPV möglich ist.

Die wesentlichen Gründe waren:

- Die hydrogeologischen Voraussetzungen (ideale Grundwassermächtigkeit und -durchlässigkeit, Flurabstand < 10 m) sind nicht erfüllt.
- Die Standortdichte ist zu gering (der Abstand zwischen benachbarten CKW-Standorten beträgt mehr als 100 m).

5.4 Entscheidungshilfe für IPV zur Priorisierung von CKW-Standorten

Auch wenn die Kriterien für die Durchführung von IPV zur gleichzeitigen Beurteilung von mehreren untersuchungsbedürftigen CKW-Standorten im Rahmen des Pilotprojekts nirgends erfüllt waren, so kann die in diesem Zusammenhang erarbeitete Methodik dazu dienen, die Anwendbarkeit von IPV in anderen Fällen zu prüfen. Ob eine regionale Erstbeurteilung von CKW-Standorten mittels IPV grundsätzlich möglich ist, kann anhand des in Abbildung 5-6 dargestellten Entscheidungsbaumes geprüft werden.

Es empfiehlt sich, in einem ersten Schritt die vorhandene *Standortdichte* zu prüfen. Als „Faustregel“ gilt, dass auf einer Kontrollebene von maximal ca. 200 - 250 m Länge die Schadstofffahnen von mindestens 3 untersuchungsbedürftigen CKW-Standorten erfasst werden sollten. Dies setzt voraus, dass die Standorte jeweils nicht mehr als rund 100 m voneinander entfernt liegen. Zudem dürfen die Standorte im Fliessfeld nicht hintereinander angeordnet sein, damit sich allfällige Schadstofffahnen nicht direkt überlagern. Werden die genannten Kriterien nicht

erfüllt, so stellen IPV aus Kosten-Nutzen-Überlegungen in der Regel keine geeignete Methode dar und es lohnt sich kaum, diese weiter zu verfolgen.

Falls die Standortdichte ausreichend ist und mehrere beieinanderliegende, untersuchungsbedürftige CKW-Standorte anzutreffen sind, so sind in einem zweiten Schritt die *hydrogeologischen Voraussetzungen* abzuklären. Gestützt auf vorhandene Grundlagen (Bohrungen, Pumpversuche, Wasserspiegelmessungen etc.) muss beurteilt werden, ob der Grundwasserleiter \pm homogen aufgebaut ist, dieser eine Mächtigkeit von idealerweise ca. 5 - 10 m aufweist sowie zusätzlich auch, ob das Grundwasser in nicht allzu grosser Tiefe anzutreffen ist (vgl. Tabelle 4-1 bis Tabelle 4-3). Werden im zu untersuchenden IPV-Betrachtungssperimeter diese Vorgaben nicht oder nur unzureichend erfüllt oder aber fehlen die für eine Beurteilung erforderlichen Grundlagedaten noch, so sollte auf den Einsatz von IPV verzichtet werden.

Ist die Durchführung von IPV aufgrund der Standortdichte und der hydrogeologischen Randbedingungen grundsätzlich möglich, bleibt schliesslich noch zu prüfen, ob im Abströmbereich der CKW-Standorte bereits geeignete Messstellen vorhanden sind. Insbesondere im städtischen resp. dicht bebauten Gebiet sind der Bau neuer Brunnen sowie auch die Durchführung von IPV in der Regel mit Erschwernissen und deutlich höheren Kosten verbunden. Das Fehlen von Messstellen hat in diesen Fällen fast zwangsläufig zur Folge, dass auf IPV zur Erstbeurteilung von VU-Standorten aus Kostengründen verzichtet werden muss.

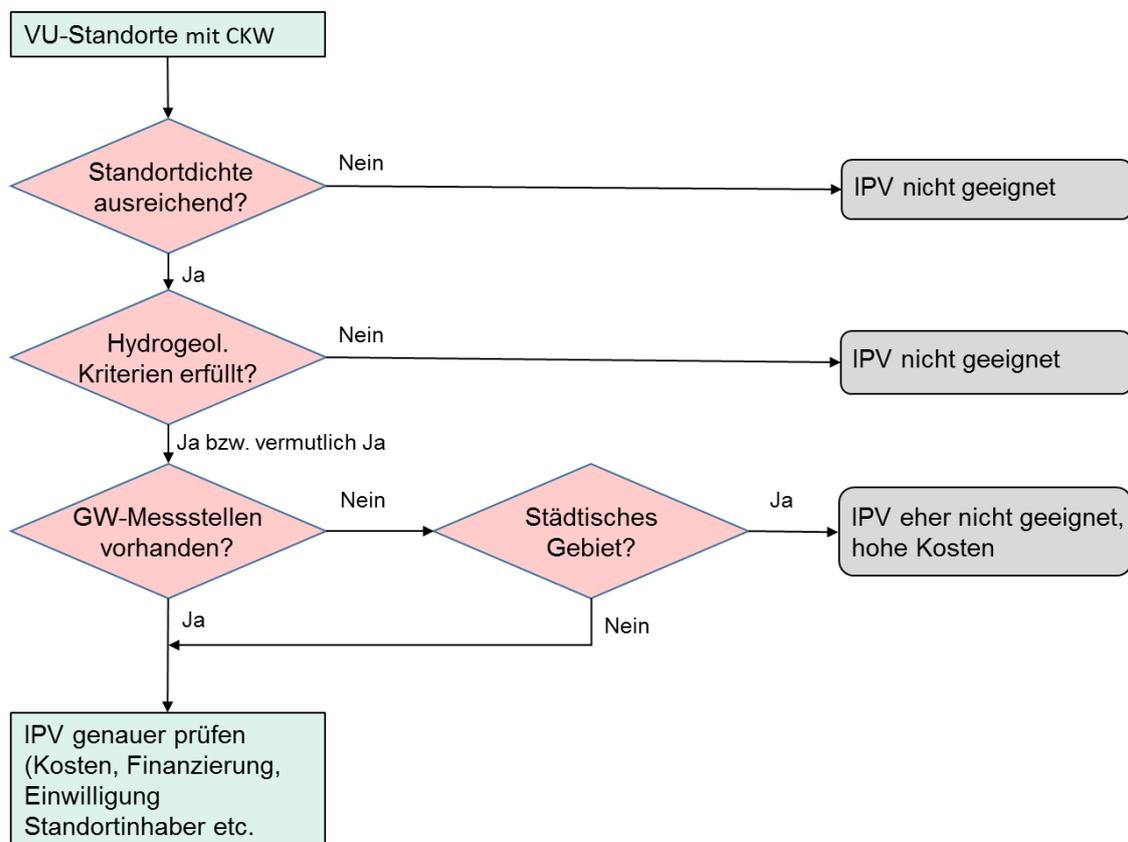


Abbildung 5-6: Entscheidungsbaum für die Anwendung von IPV zur Priorisierung von VU-Standorten

Falls geeignete Messstellen vorhanden sind oder aber der Bau von neuen Messstellen mit vertretbarem finanziellen Aufwand möglich ist, so kann die Anwendung von IPV weiterverfolgt werden. Im Zuge der konkreten Planung gilt es, die Anzahl Brunnen, die erforderliche Pumpdauer je IPV und damit die Kosten für die Durchführung der IPV zu ermitteln. Erst gestützt auf das detaillierte Versuchskonzept und eine zuverlässige Kostenschätzung kann abschliessend über den Einsatz von IPV zur Priorisierung der zur Diskussion stehenden VU-Standorte entschieden werden.

Dabei darf nicht ganz ausser Acht gelassen werden, dass aufgrund der bestehenden Unsicherheiten hinsichtlich der vorhandenen Schadstoffbelastung und der Grundwasserströmungssituation das Risiko von Negativ-Ergebnissen von IPV verhältnismässig gross ist. Ausserdem ist abzuwägen, ob die Chance besteht, bei Positiv-Ergebnissen der IPV die gefundenen Belastungen auch tatsächlich einem einzelnen Standort zuweisen zu können.

6. Anwendung von IPV auf Stufe Detailuntersuchung (DU)

6.1 Auswahl der Pilotprojekte

Nach der Standortevaluation erfüllten die Standorte A und B die Anwendungsbedingungen für IPV und boten die Möglichkeit, die Ergebnisse der IPV-Methode mit den Ergebnissen aus früheren Untersuchungen mit anderen Methoden zu vergleichen und zu bewerten. Daher wurden diese Standorte als Pilotprojekte ausgewählt und eigens IPV durchgeführt.

Bei den Standorten C und D waren bereits im Rahmen früherer Untersuchungen IPV durchgeführt worden. Auf dieser Grundlage konnten auch für diese Standorte die Anwendungsbedingungen sowie die Ergebnisse der IPV überprüft und bewertet werden.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Untersuchungen und Ergebnisse der Pilotprojekte dargelegt.

6.2 Standort A

6.2.1 Standortsituation

Am Standort A wurden zwischen 1964 und 1983 jährlich durchschnittlich rund 250 Tonnen Tetrachlorethen (PCE) eingesetzt. Zwecks Rückgewinnung des PCE wurde dieses zusammen mit Prozesswasser und Abfällen in Abscheiderbecken geleitet. Durch die Betonwandung dieser Becken und über Abwasserleitungen gelangte PCE in erheblichen Mengen direkt ins Grundwasser.

Seit 2007 läuft am Standort eine Grundwassersanierung mittels einer „in-situ chemical oxidation“ (ISCO). Zur Erfassung der abströmenden Schadstofffahne und zur Kontrolle des Sanierungserfolges wurde ca. 80 m abstromwärts vom Schadensherd eine aus 4 Grundwassermessstellen (GWM) bestehende Kontrollebene eingerichtet (Abbildung 6-1). Die GWM sind als 4½“-KleinfILTERbrunnen ausgebaut, die als vollkommene Brunnen mit ihren Filterstrecken die ganze Aquifermächtigkeit erfassen.

In dieser Kontrollebene wurden mithilfe von Scheibenpackersystemen aus verschiedenen Tiefenlagen des GW-Leiters Wasserproben entnommen und auf CKW analysiert. Diese Daten ermöglichten dann in Kombination mit am Standort erhobenen hydraulischen Daten Abschätzungen der durch die Kontrollebene abströmenden CKW-Fracht.

Ziel war somit auch, die Ergebnisse der Pilotversuche mit den nach einer vollkommen anderen Methode ermittelten Frachten zu vergleichen.

Der Grundwasserleiter am Standort A besteht aus einem gut durchlässigen Grobkies, welcher dem Molassefels in 5 - 6 m Tiefe aufliegt (Abbildung 6-2). Im mittelbaren Abstrom liegt dem Fels auch eine Schicht von geringer durchlässigen lakustrinen Sedimenten auf. Der Flurabstand liegt im Mittel bei etwa 2.2 m u. T. mit einer Schwankung von weniger als 1 m seit 1999.

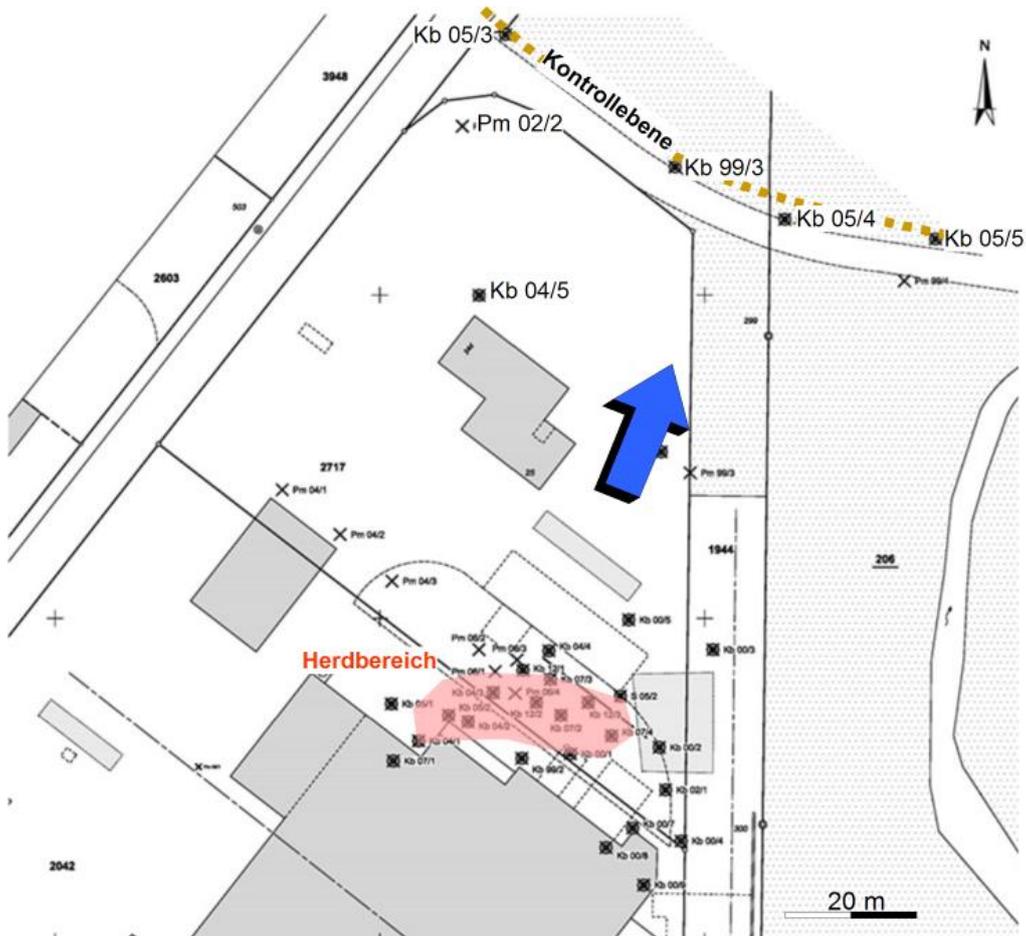


Abbildung 6-1: GWM und ungefähre Ausdehnung des Herdes (rot), Kontrollebene, GW-Fließrichtung (blauer Pfeil) und verwendete Messstellen (gross angeschrieben)

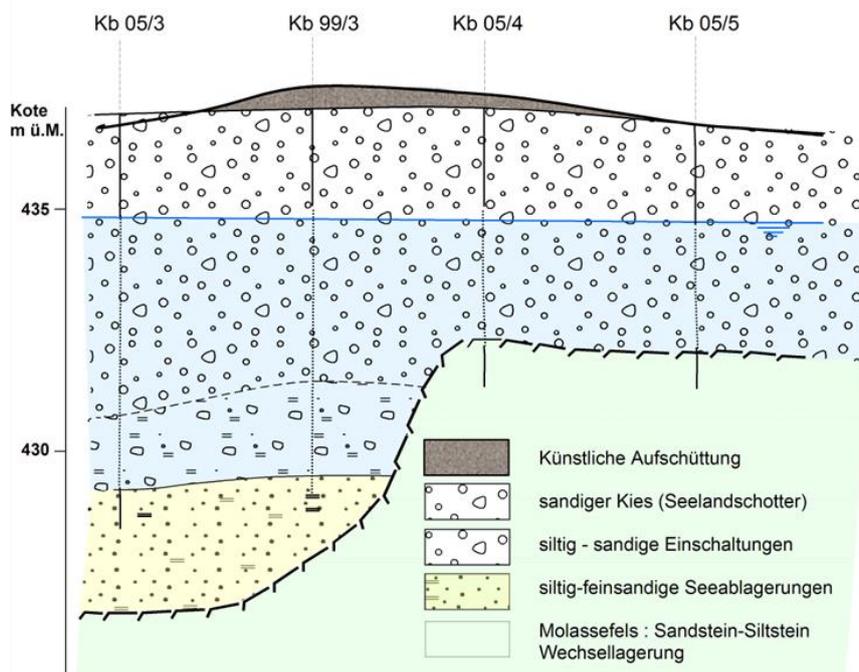


Abbildung 6-2: Geologisches Profil durch die Kontrollebene mit GW-Messstellen

6.2.2 Versuchsplanung

Mit dem zur Verfügung stehenden Budget konnten als Pilotprojekt in 2 Messstellen der Kontrollebene IPV durchgeführt werden. Die Auswahl fiel auf die nordwestlichen Messstellen Kb 05/3 und Kb 99/3, die aufgrund der grösseren Aquifermächtigkeit die besten Voraussetzungen für IPV boten. Ausserdem zeigte Kb 99/3 bei den Beprobungen in den Jahren 2012 und 2013 die höchsten CKW-Konzentrationen.

Die Versuchsplanung umfasste die in Anhang B aufgeführten Arbeiten. Die Vorausberechnung der Einzugsgebiete ergab, dass sich mit 4-tägigen Pumpversuchen ca. 2/3 des Grundwasserabstroms über die Kontrollebene erfassen lassen. Zur Bestimmung der durchflusswirksamen (effektiven) Porosität wurde begleitend zum ersten IPV ein Tracerversuch geplant. Dabei sollte im Rahmen des 1. IPV über die Messstelle Pm 02/2 30 kg NaCl gelöst in 500 - 1'000 l Wasser eingegeben werden, was letztendlich wegen des kleinkalibrigen Ausbaus nicht realisiert werden konnte. Alternativ wurde als Eingabestelle GWM Kb 04/5 und Uranin als Tracer verwendet.

6.2.3 Versuchsdurchführung

Die beiden IPV wurden nacheinander, beginnend am 16.11.2015 in Kb 05/3 und am 06.12.2015 in Kb 99/3 über jeweils 4 Tage durchgeführt. Vorgängig wurden in sämtlichen verfügbaren Piezometern Wasserspiegelmessungen durchgeführt. Diese dienten als Grundlage für die Bestimmung der Richtung und des Gradienten der Grundwasserströmung.

Bei beiden IPV konnten Pumpraten von 4.3 l/s realisiert werden (Tabelle 6-1).

	1. IPV: Kb 05/3	2. IPV: Kb 99/3
Pumprate Q (l/s)	4.3	4.3
Pumprate Q (m³/h)	15.45	15.48
Pumpzeit (h)	96	96
Gesamtfördermenge (m³)	1'483	1'486

Tabelle 6-1: Versuchsdaten der IPV am Standort A

Das gepumpte Wasser wurde über eine Schlauchleitung von 100 m Länge vom Versuchsstandort weggeleitet und wieder versickert.

Die Wasserspiegelabsenkung wurde mittels Grundwassersonden im Pumpbrunnen Kb 05/3 und in den GWM Kb 99/3, Kb 05/4, Kb 04/5 und Pm 02/2 in Zeitabständen von 1 min kontinuierlich gemessen und aufgezeichnet. Eine weitere Sonde wurde in einer weiter entfernt liegenden Referenzmessstelle installiert, um GW-Spiegelschwankungen ausserhalb des Wirkungsbereiches der Pumpe zu erfassen.

An den Pumpbrunnen wurden zur Erfassung der zeitabhängigen Schadstoffkonzentration innerhalb der Pumpdauer jeweils 10 Proben entnommen und auf die Schadstoffparameter PCE, TCE, cis-DCE und R113 untersucht. Die Probenahmetermine waren auf einen äquidistanten Entnahmebreitenzuwachs der IPV ausgelegt.

Kurz nach Beginn des Versuchs in Kb 05/3 wurde in der 36 m entfernt zum Brunnen liegenden Grundwassermessstelle Kb 04/5 Uranin eingegeben. Die eingespeiste Menge Uranin betrug 50 g, gelöst in 0.5 l Wasser (10 %ige Lösung). Die Erfassung des Tracerdurchgangs im Pumpbrunnen erfolgte im Rahmen der IPV-Proben. Da sich in Kb 05/3 kein Tracerdurchgang nachweisen liess, wurden auch die Proben des zweiten IPV in Kb 99/3 auf Uranin analysiert.

6.2.4 Auswertung und Ergebnisse

Hydraulische Parameter:

Die mithilfe von Drucksonden im Pumpbrunnen und in benachbarten Messstellen kontinuierlich aufgezeichneten Wasserspiegelabsenkungen bilden eine sehr gute Grundlage für die Bestimmung der hydraulischen Kennwerte. Die Grundwasserkoten der Piezometer sind in Abbildung 6-3 dokumentiert, wobei die Referenz-GWM mit einem Höhenversatz von 3 m dargestellt ist.

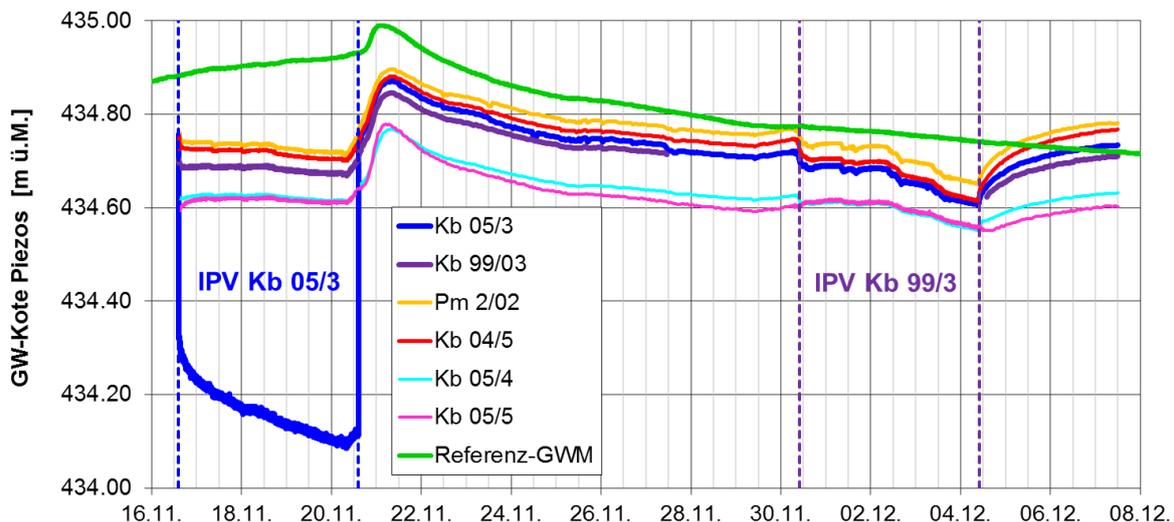


Abbildung 6-3: GW-Ganglinien in den Pumpbrunnen und GWM während der IPV am Standort A

Beim 1. IPV in Kb 05/3 betrug die maximale Absenkung im Pumpbrunnen 0.68 m. Signifikante Wasserspiegelreaktionen im Bereich von wenigen cm zeigten die Messstellen Kb 99/3, Kb 04/5 und Pm 02/2. Die Referenzmessstelle zeigte einen regionalen Anstieg des GW-Spiegels während des Pumpversuchs von ca. +1 cm/Tag. Dieser Trend wurde bei der Auswertung der Messdaten berücksichtigt.

Der 2. IPV in Kb 99/3 ist schlechter dokumentiert, weil die Messsonde im Pumpbrunnen aus unbekanntem Grund vor dem Versuch ausfiel, dann vermutlich wegen der hier starken Absenkung trockenfiel und erst beim Wiederanstieg nach Versuchsende wieder Daten lieferte, die für die Ermittlung der hydraulischen Kennwerte verwendet werden konnten. In den benachbarten Messpegeln Kb 05/3, Kb 04/5, Pm 02/2 sowie Kb 05/4 konnten versuchsbedingte Absenkbeträge von einigen cm gemessen werden. Der regionale Trend während des 2. Pumpversuchs betrug ca. -1 cm/Tag und wurde bei der Auswertung eliminiert.

Zur Bestimmung der hydraulischen Kennwerte wurde die Methode des diagnostischen Plots eingesetzt (vgl. Anhang C). Beispielhaft wird dies für die Wasserspiegelabsenkung im Brunnen Kb 05/3 dargestellt (Abbildung 6-4). Im diagnostischen Plot können anhand des horizontalen Verlaufs der 1. Ableitung der Druckabsenkkurve zwischen ca. 100 und 4'000 Sekunden homogen-infinite Aquiferbedingungen ohne weitere Störeinflüsse identifiziert werden. Für diese Phase treffen die Anwendungsbedingungen des Auswerteverfahrens zu, der Ordinatenwert der Ableitung $\frac{\partial s}{\partial t} \cdot t$ liegt bei 0.014 m. Mit der Pumprate von 0.0043 m³/s erhält man für die Transmissivität einen Wert von $2.4 \cdot 10^{-2}$ m²/s.

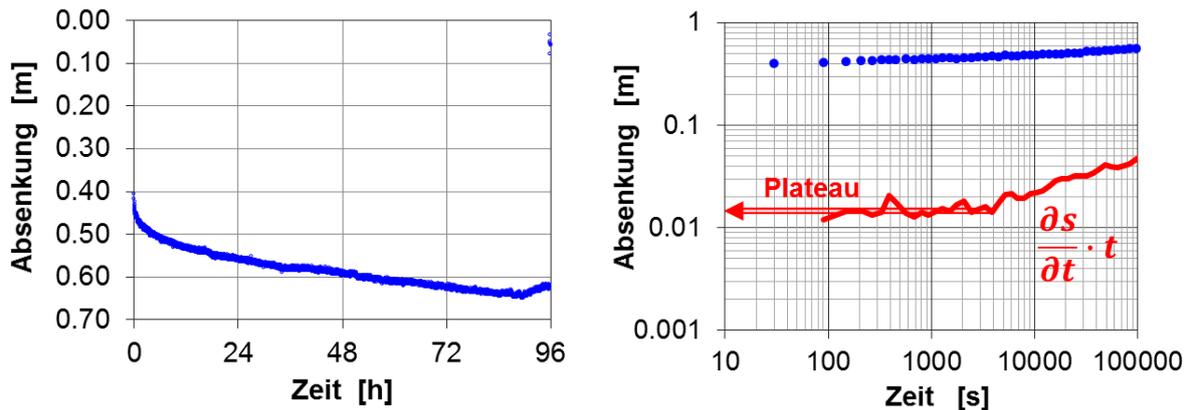


Abbildung 6-4: Verlauf der Absenkung im Pumpbrunnen Kb 05/3 (links) und diagnostischer Plot (rechts) mit Absenkung (blau) und deren Ableitung (rot)

Die nach derselben Methode für die Beobachtungsmessstellen sowie den IPV im Brunnen Kb 99/3 ermittelten Transmissivitätswerte sind in Tabelle 6-2 aufgeführt:

Pumpbrunnen	Messstelle	Transmissivität
Kb 05/3	Pumpbrunnen	$2.4 \cdot 10^{-2}$ m ² /s
	Kb 04/5	$1.7 \cdot 10^{-2}$ m ² /s
	Kb 08/2	$1.7 \cdot 10^{-2}$ m ² /s
	Pm 02/2	$1.4 \cdot 10^{-2}$ m ² /s
Kb 99/3	Pumpbrunnen	$1.5 \cdot 10^{-2}$ m ² /s (aus Wiederanstieg)

Tabelle 6-2: Transmissivitätswerte der IPV am Standort A

Daraus ergibt sich für den hier zwischen 4.6 m bzw. 5.0 m mächtigen Aquifer ein mittlerer Durchlässigkeitsbeiwert von

$$k_f = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s.}$$

Transportparameter:

Beim Tracerversuch konnte mit den Proben des 2. IPV in Kb 99/3 nur noch der abnehmende Ast des Uranin-Durchgangs beobachtet werden (Abbildung 6-5). An diesen wurde eine rechnerisch ermittelte Durchbruchkurve für eindimensionalen Stofftransport angepasst. Die beste

Übereinstimmung zwischen Modellkurve und Messwerten ergab sich mit einer effektiven Porosität von $n_e = 0.18$ (18 %). Mit diesem Wert ist auch gut in Einklang zu bringen, dass der Tracer beim 1. IPV in Kb 05/3 noch nicht ankam, bei geringerer Porosität hätte der Tracer nachweisbar sein müssen.

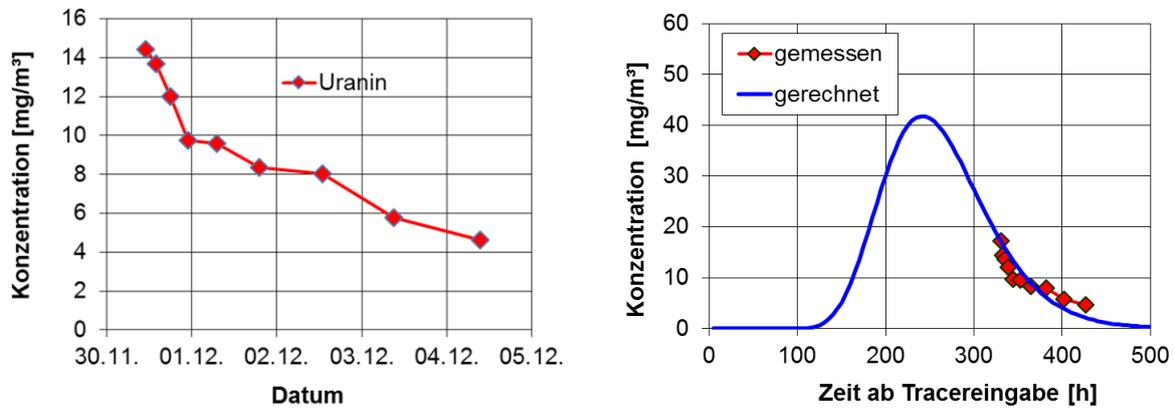


Abbildung 6-5: Uraninkonzentrationen in Kb 99/3 während Pumpversuch (links) und modellierte Durchbruchskurve (rechts)

Hydraulischer Gradient:

Aus den Stichtagsmessungen vor Beginn der IPV wurden die Isohypsen der Grundwasseroberfläche konstruiert. Hieraus ergab sich für das Einzugsgebiet von Brunnen Kb 05/3 ein hydraulischer Gradient des natürlichen Fließfelds von 0.0025 und für den 2. IPV im Zustrom von Kb 99/3 ein Gradient von 0.0016.

Schadstoffverlauf:

Beim IPV in Kb 05/3 wurden 10 Proben analysiert (Abbildung 6-6). Die PCE-Konzentration lag vor Pumpbeginn am 16.11.2015 bei 1.7 $\mu\text{g/l}$ und stieg dann bis zum Versuchsende auf 6.1 $\mu\text{g/l}$. Der ansteigende Konzentrationsverlauf ist typisch für Brunnen, die im Randbereich einer Schadstofffahne liegen und deren Erfassungsbereich sich mit der Zeit in die Fahne hinein ausdehnt (vgl. Abbildung 3-3, Fall 2).

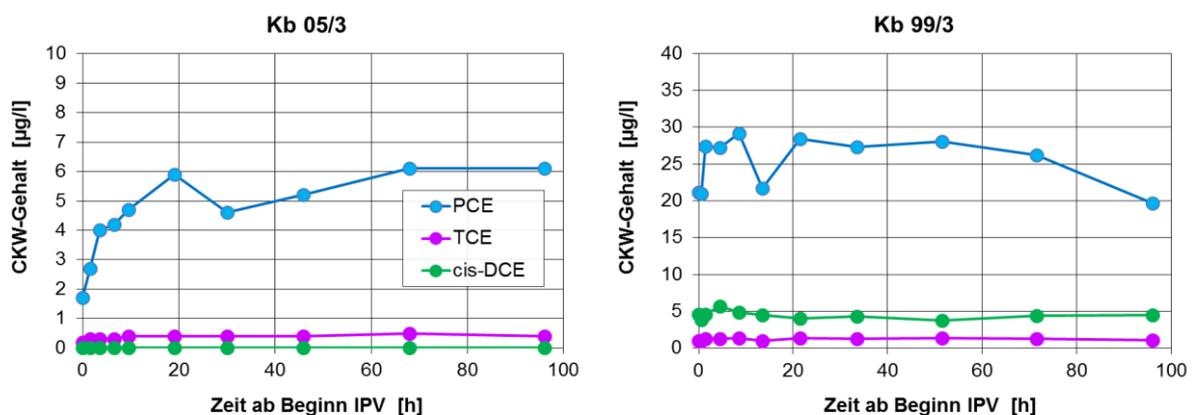


Abbildung 6-6: CKW-Konzentrationen in Kb 05/3 und Kb 99/3 während der Pumpversuche

Beim IPV in Kb 99/3 wurden 11 Proben analysiert (Abbildung 6-6). Im Vergleich zum ersten IPV lagen die PCE-Konzentrationen von vorneherein mit Werten über 25 µg/l deutlich höher. Gegen Versuchsende zeigte sich eine Konzentrationsabnahme auf unter 20 µg/l. Die anfangs relativ hohe und gegen Ende abnehmende Konzentration ist typisch für Brunnen, die innerhalb einer Schadstofffahne liegen und deren Erfassungsbereich sich im Versuchsverlauf dem Fahnenrand nähert.

Isochronen, Fahnenlage und Schadstoff-Frachten:

Unter Zugrundelegung der hydraulischen Kenndaten wurden mit C-SET zunächst die Erfassungsbereiche der IPV in Form von Isochronen für die Probenahmezeitpunkte berechnet (Abbildung 6-7).

Im nächsten Schritt wurde die Konzentrationsverteilung ermittelt. Hierbei passt C-SET iterativ Konzentrationsverteilungen an, bis deren theoretische Durchgangskurve bestmöglich mit der tatsächlich gemessenen Konzentrationsganglinie übereinstimmt. Um aus beiden IPV eine möglichst widerspruchsfreie Fahnenlage zu erhalten, ist das Fahnenzentrum südöstlich von Brunnen Kb 99/3 anzunehmen (Abbildung 6-7). Als maximale Fahnenkonzentration wurden 48 µg/l berechnet.

Für den relevanten Schadstoffparameter PCE wurde eine Fracht von $M_{PCE} \approx 4.5 \text{ g/d}$ über die Kontrollebene im erfassten Bereich berechnet. Dies entspricht einer jährlichen Fracht von 1.6 kg für PCE.

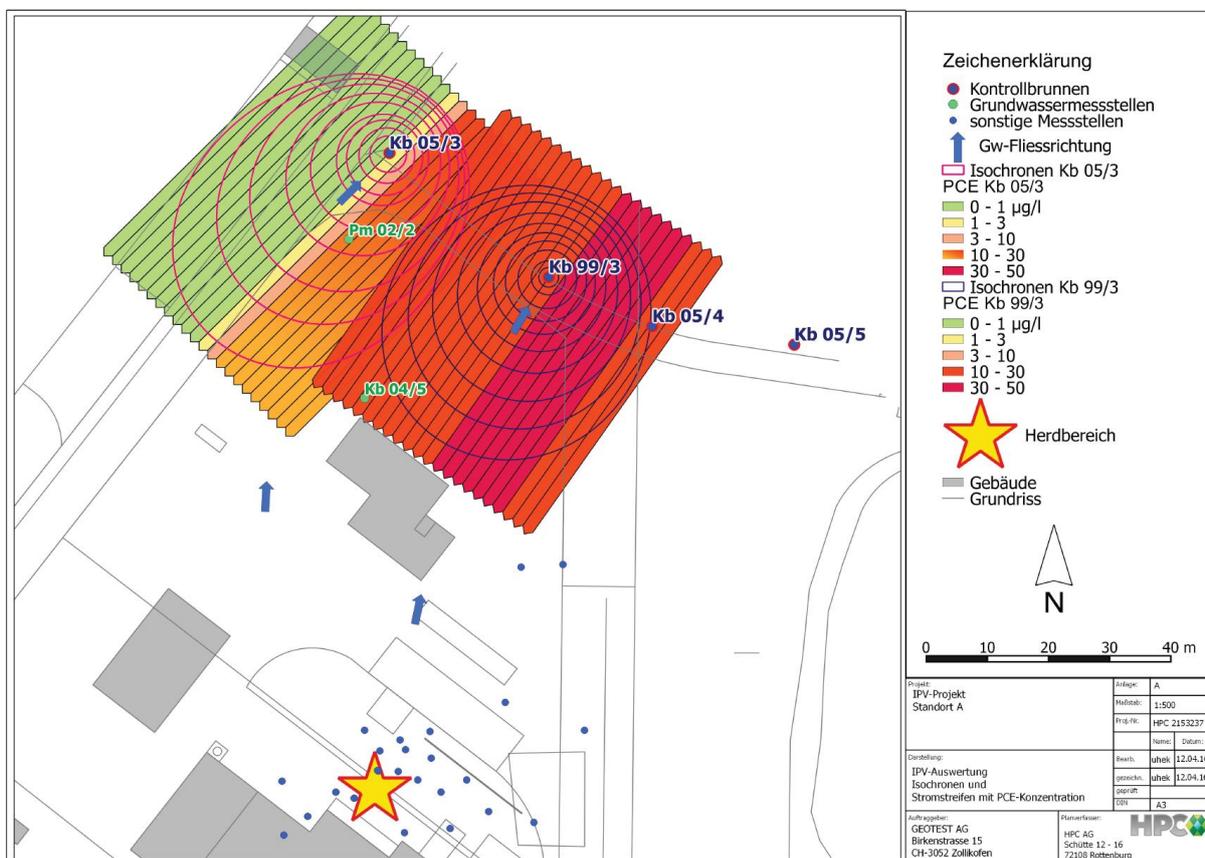


Abbildung 6-7: Isochronen und Stromstreifen aus den beiden IPV am Standort A

6.2.5 Diskussion und Beurteilung

Die Durchführung und insbesondere die Auswertung der beiden IPV bestätigten die in der Evaluation als günstig beurteilten Rahmenbedingungen. Die Zielsetzungen hinsichtlich der Frachtermittlung konnten weitestgehend erreicht werden.

Entgegen ersten Befürchtungen hatten die natürlichen Grundwasserspiegel-Schwankungen keine negativen Auswirkungen auf die Auswertung der IPV. Es sei trotzdem darauf hingewiesen, dass bei starken kurzfristigen natürlichen Schwankungen Schwierigkeiten auftreten könnten. Die Messung des natürlichen, durch den IPV nicht beeinflussten Verhaltens des GW-Spiegels in einer geeigneten Messstelle hat sich als nützlich erwiesen.

Die kontinuierlichen Messreihen der Absenkung in den Brunnen sowie in benachbarten Messstellen bildeten eine gute Grundlage zur Ermittlung der hydraulischen Daten. Als Auswerteverfahren wurden diagnostische Plots eingesetzt, mit denen für die gemessenen Druckabsenkkurven jeweils die Phase mit homogen-infiniten Versuchsbedingungen identifiziert werden konnten. Mit den so abgegrenzten Datenabschnitten war eine verfahrenskonforme Kennwertbestimmung möglich.

Die berechneten Transmissivitätswerte führten zu einem mittleren Durchlässigkeitsbeiwert von $5 \cdot 10^{-3}$ m/s, der nahezu dem früher aus einem Kurzpumpversuch im Herdbereich ermittelten Wert von $6 \cdot 10^{-3}$ m/s entspricht.

Was die mit C-SET ermittelte Fahnenlage anbelangt, deckt sich diese auf der Höhe der Kontrollebene mit den bisherigen Erkenntnissen. Während sich das Fahnenzentrum in der Rückwärtsextrapolation noch relativ gut mit dem bekannten Schadensherd zur Deckung bringen lässt, scheitert dieser Versuch für den westlichen Fahnenrand. Die Rückwärtsextrapolation der westlichen Fahnenbegrenzung (Grenze orange/gelb in Abbildung 6-7) führt weit am Schadensherd vorbei. Grund für diese Diskrepanz ist, dass in C-SET vereinfachend ein für den Erfassungsbereich des IPV repräsentativer, konstanter hydraulischer Gradient von Südwest nach Nordost angenommen wird, während die tatsächlichen lokalen Strömungsverhältnisse südlich der Erfassungsbereiche der IPV hiervon abweichen.

Auf der Ostseite wurde der Fahnenrand mit den beiden IPV nicht erfasst, hier wäre ein 3. IPV in Kb 05/4 erforderlich gewesen.

Die berechnete maximale Fahnenkonzentration von rund $48 \mu\text{g/l}$ im Fahnenzentrum stimmt ebenfalls sehr gut mit den bisherigen Daten überein.

Eine gute Übereinstimmung ergab sich auch bei der Schadstofffracht. Der ermittelte Wert von 1.6 kg PCE im Jahr liegt tiefer als der bei der Untersuchung 2013 abgeschätzte Wert von 3 - 4 kg für die Gesamtfracht aufgrund von tiefenzonierten Proben innerhalb der Kontrollebene. Diese Schätzung (berechnet aus 13 Multilevel-Analysen in der Kontrollebene und gemäss $Q = F \cdot i \cdot k_f$) beruhte auf einem k_f -Wert von 0.006 m/s und einem Gefälle von 0.004. Werden aber die im IPV verwendeten bzw. ermittelten Werte für das mittlere Gefälle ($i = 0.002$) und den Durchlässigkeitsbeiwert ($k_f = 5 \cdot 10^{-3}$ m/s) verwendet, ergibt sich eine Fracht von noch 1.4 kg pro Jahr (entsprechend 3.8 g/d), also nur geringfügig weniger als die mittels IPV ermittelte Fracht.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Ergebnisse des IPV plausibel sind, keine nicht erklärbaren Widersprüche oder Diskrepanzen aufgetreten sind und die früher – mit anderen Methoden – erhaltenen Resultate und Erkenntnisse bestätigen.

Erfahrungen aus Standort A:

- Durch zwei IPV konnten die Lage der Schadstofffahne, die maximale Konzentration und die Fracht in guter Übereinstimmung mit früheren Untersuchungsergebnissen bestimmt werden.
- Die kontinuierliche Messung der Wasserspiegelabsenkung mittels Grundwassersonden lieferte qualitativ hochwertige Datensätze für die Bestimmung der hydraulischen Kennwerte.
- Die Qualität von Rückwärtsprojektionen der Fahnen von der Kontrollebene zum Herdbereich hängt vom Kenntnisstand der lokalen Grundwasserströmung ab, was bei heterogenen Verhältnissen (keine parallele Strömung) mit entsprechend grossen Unsicherheiten verbunden ist.

6.3 Standort B

6.3.1 Standortsituation

Am Standort B wurde zwischen 1958 und 1997 eine chemische Reinigung betrieben, in welcher in erster Linie Tetrachlorethen (PCE), ab 1986 in einer zweiten Maschine auch das Freon R113 eingesetzt wurden. Die TU und die DU zeigten, dass beide Stoffe in den Untergrund versickert sind und dort zu einer erheblichen Grundwasserverschmutzung geführt haben, die sich auch durch die Bildung einer Schadstofffahne von einigen hundert Metern Länge manifestiert.

Im unmittelbaren Abstrom der mutmasslichen Schadstoffquelle wurden in mehreren Schritten 5 Grundwassermessstellen (GWM) eingerichtet, die eine Kontrollebene bilden (Abbildung 6-8). Zusätzlich wurden auch kleinkalibrige Multilevel-Messpegel eingerichtet, die eine Probenahme aus unterschiedlichen Tiefen ermöglichen. Die 5 GWM sind als 4½“-Grundwassermessstellen ausgebaut (Kb 01/15, Kb 08/1, Kb 08/2, Kb 04/1 und Kb 08/3), die über die ganze Aquifermächtigkeit verfiltert sind und somit vollkommene Brunnen darstellen.

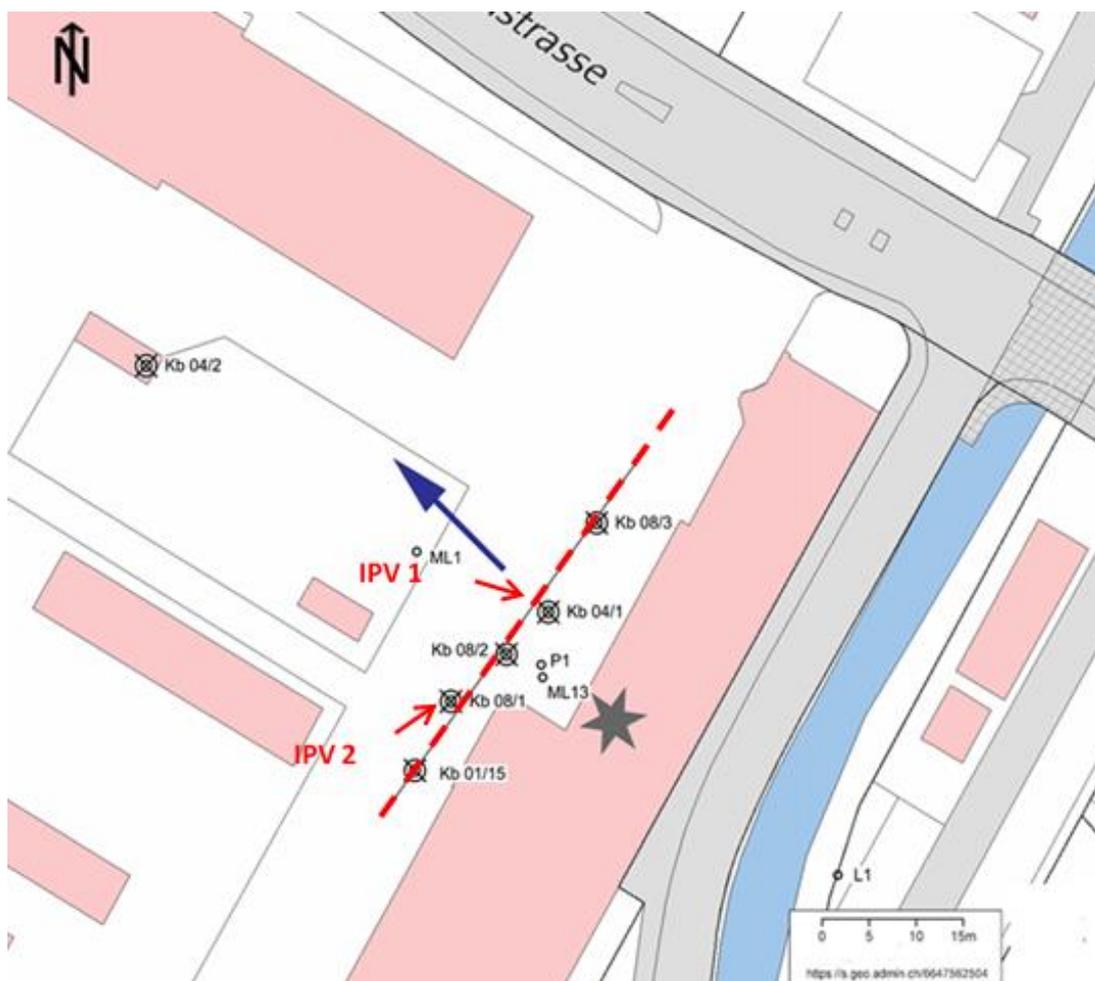


Abbildung 6-8: Situation Standort B mit Grundwassermessstellen, mutmasslicher Herd (Stern), Kontrollebene (rote gestrichelte Linie durch GWM) und GW-Fließrichtung (blauer Pfeil)

Der grundwasserführende Untergrund ist charakterisiert durch vorwiegend siltig-sandige See- oder Verlandungssedimente von 1.5 bis 2.2 m Mächtigkeit und geringer Durchlässigkeit, die einen gut durchlässigen, kiesigen Schotter überlagern (Abbildung 6-9). Der Stauer (Grundmoräne oder Molassefels) liegt in rund 7.5 m Tiefe. Die Grundwassermächtigkeit beträgt im Mittel etwa 5.5 m, der Flurabstand liegt bei 2.3 m.

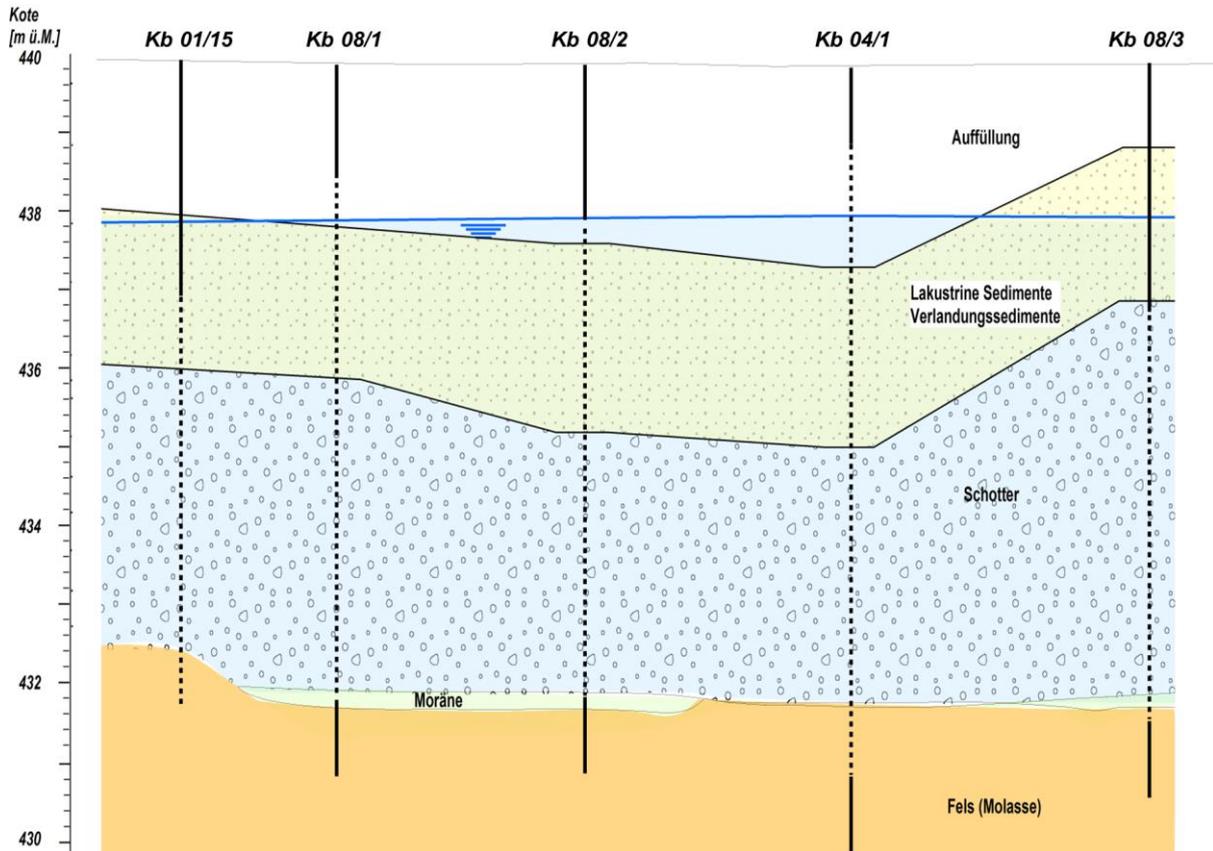


Abbildung 6-9: Geologisches Profil durch die Kontrollebene mit GW-Messstellen

Beim Standort B war neben der Schadstofffracht insbesondere die Lage der Schadstofffahne resp. des Herdbereichs zu ermitteln. Ziel war auch hier, die Ergebnisse der IPV mit den umfangreichen Informationen aus früheren Untersuchungen zu vergleichen.

6.3.2 Versuchsplannung

Für das Pilotprojekt wurden 2 Kontrollbrunnen der aus 5 GWM bestehenden Kontrollebene ausgewählt, die nach vorliegenden Informationen am ehesten abstromig des vermuteten Schadensherds liegen.

Die Versuchsplanung ergab, dass sich mit IPV in den ausgewählten Kontrollbrunnen Kb 04/1 und Kb 08/1 nach 4-tägiger Pumpzeit mit maximal möglichen Pumpraten von ca. 2 l/s eine ausreichende Überlappung der Erfassungsbereiche einstellen würde. Der Beprobungsplan wurde so ausgelegt, dass die grösser werdenden Probenahmeintervalle einem äquidistanten

Entnahmebreitenzuwachs entsprechen (vgl. Anhang B: Handlungsempfehlung zur Planung, Durchführung und Auswertung von IPV).

Am Standort B wurde kein Tracerversuch eingeplant, da angesichts der sehr ähnlichen hydrogeologischen Situation wie am Standort A von zumindest annähernd gleichen Aquifereigenschaften ausgegangen werden konnte.

6.3.3 Versuchsdurchführung

Die beiden IPV wurden nacheinander, beginnend am 15.02.2016 in GWM Kb 04/1 und am 07.03.2016 in Kb 08/1, über jeweils 4 Tage durchgeführt. Vorgängig erfolgte jeweils eine Stichtagsmessung der Grundwasserspiegel als Grundlage für die Bestimmung des natürlichen hydraulischen Gradienten.

Bei den IPV konnte eine Pumprate von 2.2 bzw. 1.9 l/s realisiert werden (Tabelle 6-3).

	1. IPV: Kb 04/1	2. IPV: Kb 08/1
Pumprate Q (l/s)	2.2	1.9
Pumprate Q (m³/h)	7.75	6.72
Pumpzeit (h)	96	96
Gesamtfördermenge (m³)	744	646

Tabelle 6-3: Versuchsdaten der IPV am Standort B

Beim IPV in Kb 04/1 wurden im Pumpbrunnen sowie in den Messstellen Kb 08/1 und Kb 08/2 Grundwassersonden eingebaut, die jeweils den Druck (GW-Spiegel), die Temperatur und die elektrische Leitfähigkeit erfassten. Während der Absenk- und Wiederanstiegsphase betrug das Messintervall 1 Minute. Nach dem festgelegten Beprobungsplan wurden 10 GW-Proben entnommen und auf die Gehalte an PCE, TCE, cis-DCE und R113 sowie weiteren LHKW analysiert, um die zeitabhängige Schadstoffkonzentration im Pumpbrunnen zu erfassen.

Für den 2. IPV in Kb 08/1 waren GW-Sonden im Pumpbrunnen sowie in den GWM Kb 04/1 und Kb 08/2 installiert. Während der Pumpzeit wurden nach o.a. Schema 9 Proben entnommen.

6.3.4 Auswertung und Ergebnisse

Hydraulische Parameter:

Die mithilfe von Drucksonden kontinuierlich aufgezeichneten Wasserspiegelabsenkungen im Pumpbrunnen und in benachbarten Messstellen bilden die Grundlage für die Bestimmung der hydraulischen Kennwerte. Die Grundwasserkoten der Piezometer sind in Abbildung 6-10 dokumentiert.

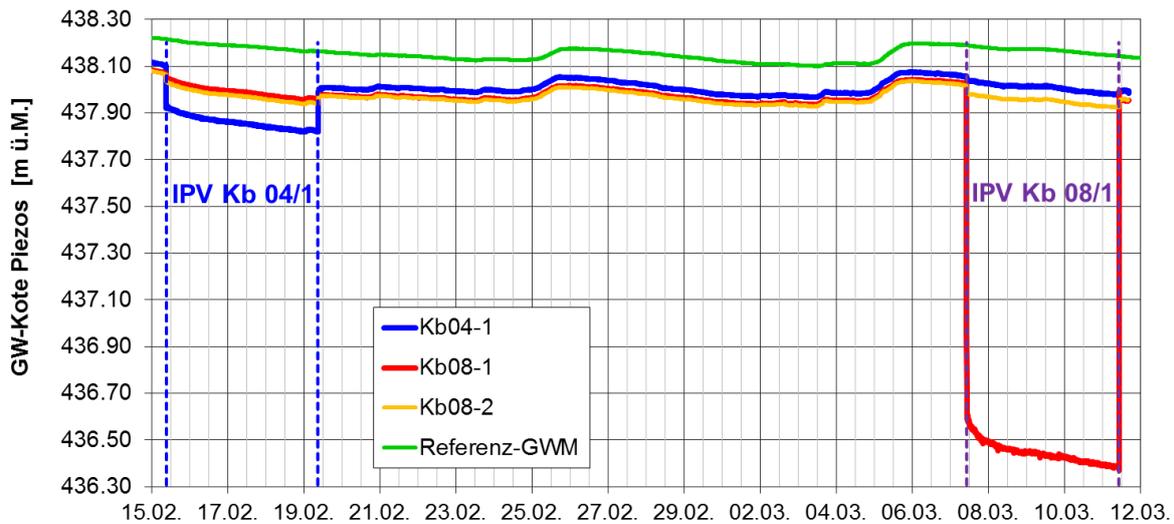


Abbildung 6-10: GW-Ganglinien in den Pumpbrunnen und GWM während der IPV am Standort B

Die Grundwassersituation zum Zeitpunkt der beiden Pumpversuche entsprach einem relativ hohen Wasserstand. Zur Beurteilung der natürlichen Grundwasserspiegelschwankungen stand die Ganglinie einer von den Pumpversuchen unbeeinflussten Referenzmessstelle zur Verfügung. Beide IPV sind durch einen abfallenden natürlichen Trend überlagert, der für die hydraulische Auswertung eliminiert wurde (Abbildung 6-11).

Die gemessenen Absenkkurven der Pumpbrunnen und Beobachter wurden mithilfe des diagnostischen Plots ausgewertet. Exemplarisch ist dies in Abbildung 6-11 anhand der Absenkung des Pumpbrunnens Kb 04/1 dargestellt. Die Ableitung der Druckabsenkung bildet von ca. 30'000 Sekunden bis Versuchsende ein Plateau. In dieser Versuchsphase sind homogen-infinite Bedingungen erfüllt. Mit dem Wert des Ableitungsplateaus von 0.019 m und der Pumprate von $0.0022 \text{ m}^3/\text{s}$ erhält man für die Transmissivität $9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

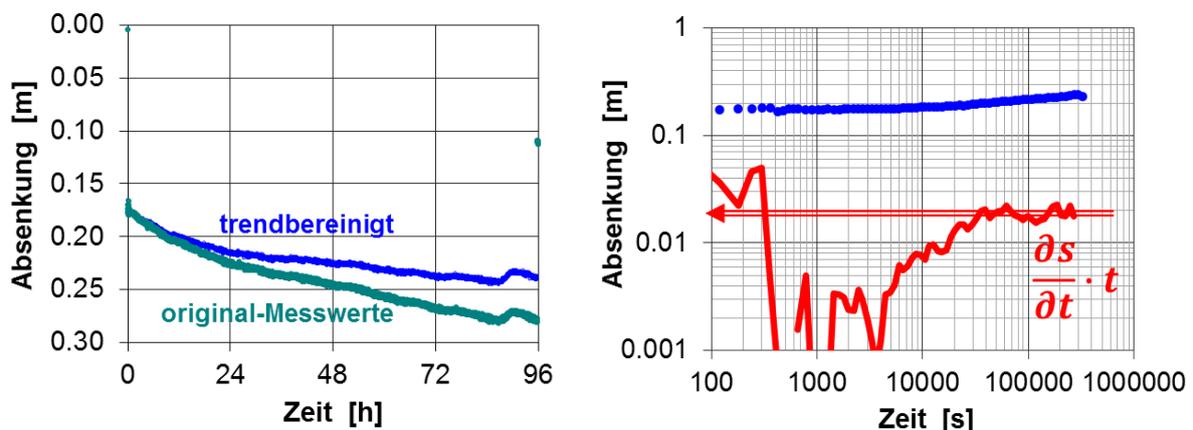


Abbildung 6-11: Verlauf der Absenkung im Pumpbrunnen Kb 04/1 (links) und diagnostischer Plot (rechts) mit Absenkung (blau) und deren Ableitung (rot)

Die errechneten Transmissivitätswerte sind in Tabelle 6-4 aufgeführt:

Pumpbrunnen	Messstelle	Transmissivität
Kb 04/1	Pumpbrunnen	$9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
	aus Kb 08/1	$1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
	aus Kb 08/2	$1.1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
Kb 08/1	Pumpbrunnen	$5.3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
	aus Kb 04/1	$1.2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
	aus Kb 08/2	$1.5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$

Tabelle 6-4: Transmissivitätswerte der IPV am Standort B

Daraus ergibt sich für die 3.3 m bzw. 3.5 m mächtigen Seelandschotter ein mittlerer Durchlässigkeitsbeiwert von

$$k_f = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s.}$$

Die durchflusswirksame (effektive) Porosität der Schotter wurde mit 20 % ($n_e = 0.2$) abgeschätzt. Das aus den Grundwasserisohypsen abgeleitete Gefälle i beträgt 0.005 (Kb 08/1) bzw. 0.006 (Kb 04/1).

Temperatur und elektr. Leitfähigkeit:

Ein auffälliger Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit und Temperatur konnte beim IPV in Kb 04/1 beobachtet werden (Abbildung 6-12).

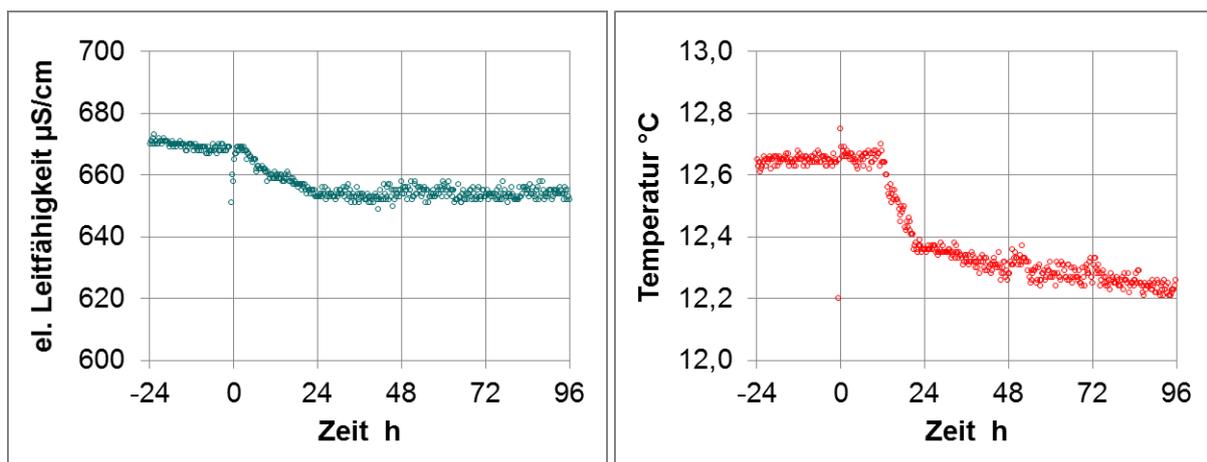


Abbildung 6-12: Verlauf von elektr. Leitfähigkeit und Temperatur beim IPV in Kb 04/1

Während des IPV fiel die elektr. Leitfähigkeit im Pumpbrunnen innert 24 Stunden von ca. 670 auf 655 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und verblieb dann bis Pumpende auf diesem Wert. Zeitgleich konnte ein Temperaturabfall von ca. 0.5 $^{\circ}\text{C}$ beobachtet werden. Dies kann ein Hinweis darauf sein, dass im Zuge des IPV Uferfiltrat des östlich vom Standort verlaufenden Bachs angezogen wird. Dieser

wies zum Untersuchungszeitpunkt eine Leitfähigkeit von 570 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und eine Temperatur von 4.5 °C auf.

Schadstoffverlauf:

Während des **IPV in Kb 04/1** ist ein deutlicher Anstieg der CKW(Summen)-Konzentration von 7.5 auf 28.2 $\mu\text{g}/\text{l}$ zu verzeichnen (Abbildung 6-13). Aus dem stetigen Anstieg kann geschlossen werden, dass der Brunnen neben, allenfalls im Randbereich einer Fahne liegt, die im Zuge des IPV immer weiter erfasst wird (vgl. Abbildung 3-3, Fall 3).

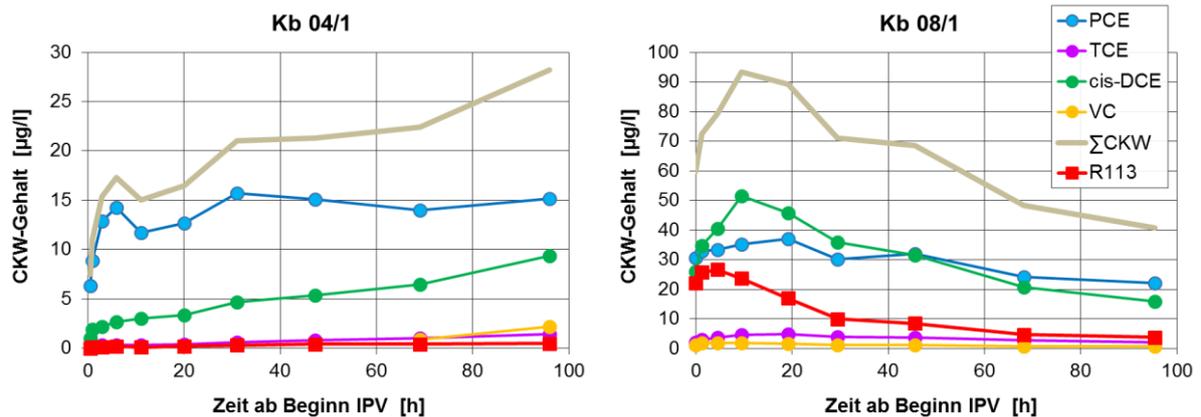


Abbildung 6-13: CKW-Konzentrationen in Kb 04/1 und Kb 08/1 während der Pumpversuche

Die Einzelparameter zeigen dabei ein recht unterschiedliches Verhalten: Die PCE-Konzentration steigt über die ersten 30 Stunden relativ stark an und verbleibt dann auf einem relativ konstanten Niveau von ca. 15 $\mu\text{g}/\text{l}$. Demgegenüber zeigen die Abbauprodukte cis-DCE und VC eine langsamere Zunahme.

Beim **IPV in Kb 08/1** ist in den ersten 10 Stunden ein Anstieg der CKW(Summen)-Konzentration von 60 auf 93 $\mu\text{g}/\text{l}$, danach bis 96 Stunden eine stetige Abnahme auf 40.8 $\mu\text{g}/\text{l}$ zu verzeichnen (Abbildung 6-13). Dies deutet darauf hin, dass der Brunnen unmittelbar neben einer Schadstofffahne liegt und der IPV im Laufe der Pumpzeit die Fahne vollständig erfasst (vgl. Abbildung 3-3, Fall 1).

Die Konzentrationsganglinien der Einzelstoffe weisen Konzentrationsmaxima zu unterschiedlichen Zeitpunkten auf. Beim R113 wird der höchste Wert bereits nach 4.5 Stunden erreicht. Die CKW-Einzelstoffe erreichen die maximale Konzentration in der 4. Probe nach 9.5 Stunden (cis-DCE und VC) bzw. in der 5. Probe nach 19 Stunden (PCE und TCE). Dies könnte als ein Hinweis auf unterschiedliche Lagen der CKW- bzw. R113-Fahne gedeutet werden.

Isochronen, Fahnenlage und Schadstofffrachten:

Mittels des Auswertungscodes C-SET wurden für die beiden Pumpversuche die Erfassungsbereiche als Isochronen der Probenahmezeitpunkte sowie die räumlichen Konzentrationsverteilungen und die durchströmenden Frachten ermittelt. Die Auswertung wurde für die Parameter CKW (Summe) sowie R113 separat durchgeführt. Anhand der Isochronen ist ersichtlich, dass sich die Erfassungsbereiche der IPV gut überlappen (Abbildung 6-14 und Abbildung 6-15).

Die aus dem **IPV in Kb 04/1** berechnete Konzentrationsverteilung ergab eine maximale Konzentration von 170 $\mu\text{g}/\ell$ (Σ CKW) bzw. 3.5 $\mu\text{g}/\ell$ (R113) am Rand des Erfassungsbereichs. Die über den erfassten Querschnitt durchströmende Fracht wurde mit $M_{\text{LHKW}} = 4.3$ g/d (Σ CKW) bzw. 0.1 g/d (R113) berechnet. Bei diesem IPV ist zu berücksichtigen, dass die ermittelten Konzentrationen und Frachten durch die Erfassung von Uferfiltrat etwas zu gering ausfallen könnte.

Für den Erfassungsbereich des **IPV in Kb 08/1** liess sich eine maximale Fahnenkonzentration von rund 200 $\mu\text{g}/\ell$ (Σ CKW) bzw. 54 $\mu\text{g}/\ell$ (R113) bestimmen. Das Fahnenzentrum für R113 liegt dabei ca. 2 m südwestlich der CKW-Fahne. Die zugehörigen Frachten betragen 6.9 g/d (Σ CKW) bzw. 1.2 g/d (R113).

Bei der Interpretation der Lage der Schadstofffahnen (Σ CKW und R113) wurden die Befunde der beiden IPV bestmöglich zur Deckung gebracht. Dies ist der Fall, wenn man annimmt, dass der IPV in Kb 08/1 die Fahne von Süden her, der IPV in Kb 04/1 von Norden her erfasst. Somit liegen die Schadstofffahnen mit grösserer Wahrscheinlichkeit also zwischen den Kontrollbrunnen, gestützt durch die Messstelle Kb 1/15, die keine auffälligen Schadstoffkonzentrationen aufweist (Abbildung 6-14 und Abbildung 6-15).

Nach den Befunden der IPV sind die Herdbereiche am oder im zustromig liegenden Gebäude anzunehmen.

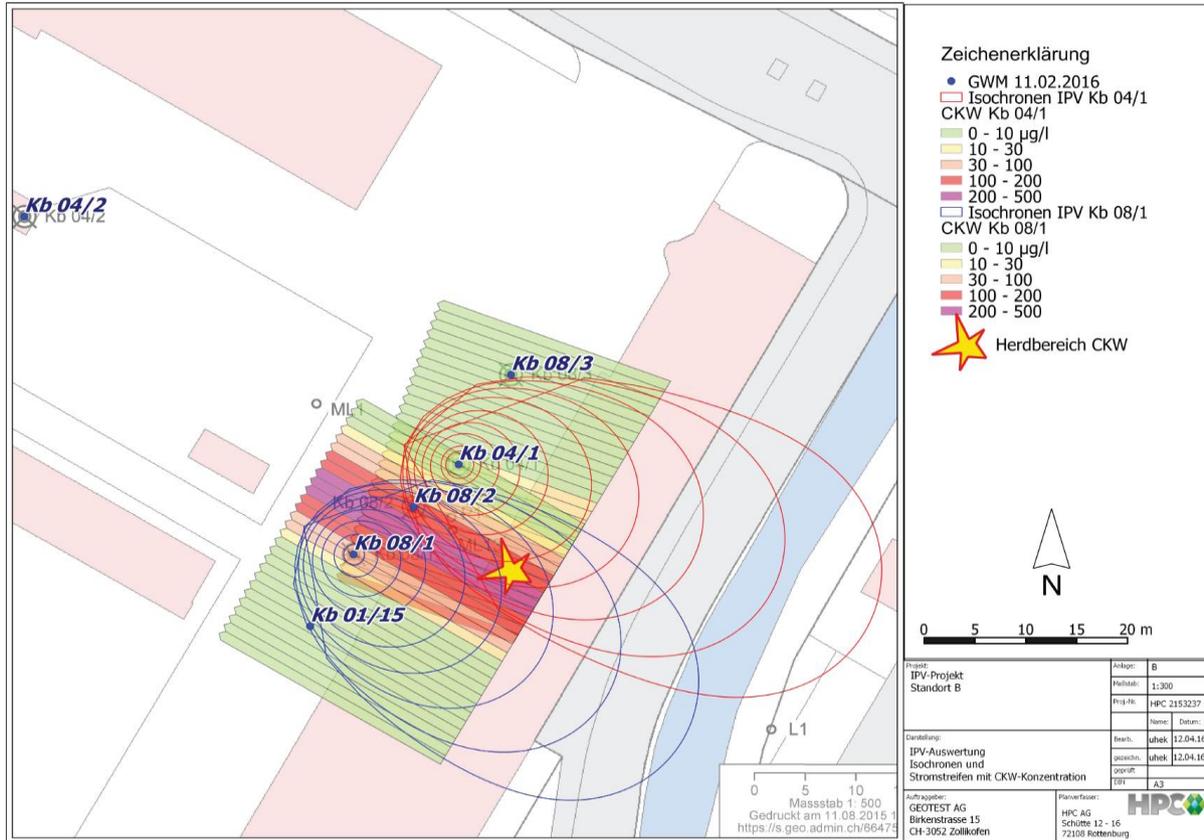


Abbildung 6-14: Isochronen und Stromstreifen für CKW (Summe) am Standort B

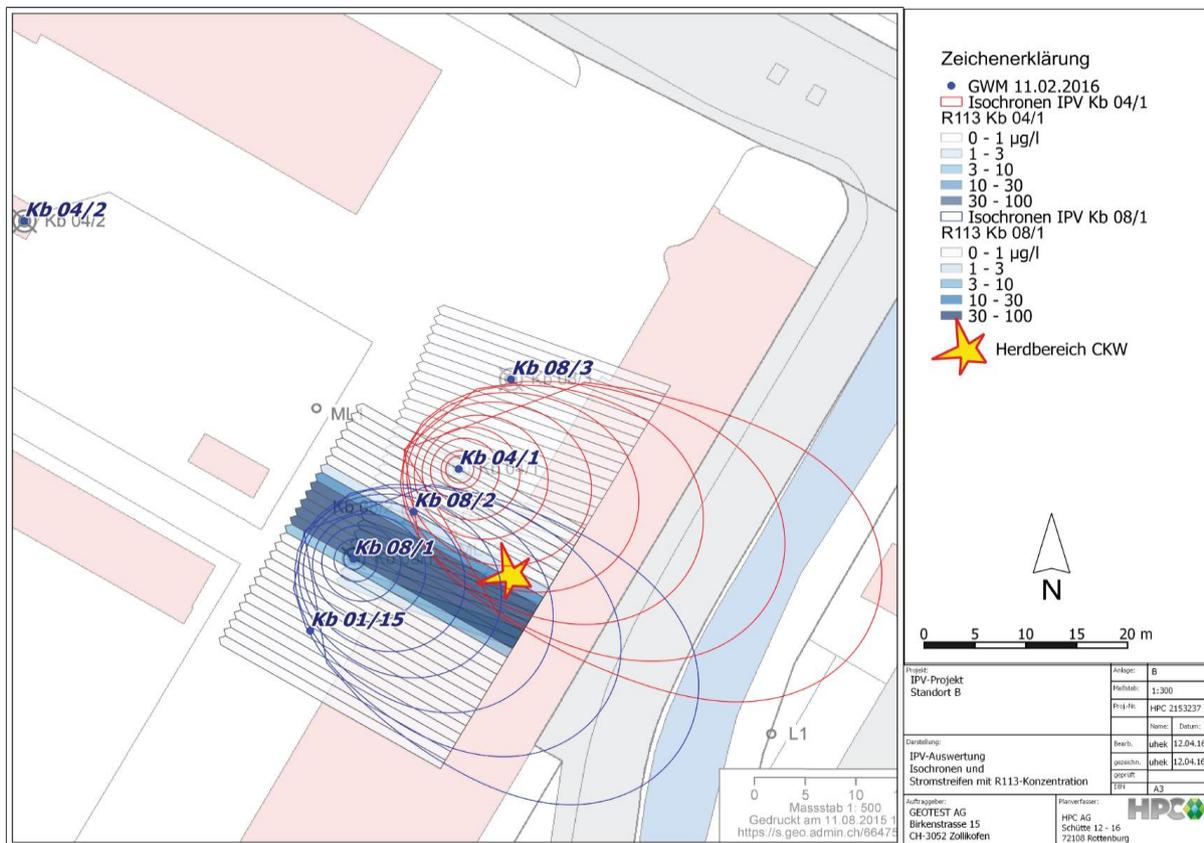


Abbildung 6-15: Isochronen und Stromstreifen für R113 (unten) am Standort B

6.3.5 Diskussion und Beurteilung

Der bei der Standortevaluation als eher ungünstig beurteilte heterogene Aufbau des Aquifers (hochdurchlässiger Schotter unter geringdurchlässigen lakustrinen Sedimenten) erwies sich bei der Auswertung als unproblematisch.

Der berechnete Durchlässigkeitsbeiwert von $3 \cdot 10^{-3}$ m/s ist signifikant höher als der aus einem früheren Kurzpumpversuch in einer ca. 200 m entfernten GWM, wo $7 \cdot 10^{-4}$ m/s bestimmt wurden.

Was die mit C-SET ermittelte Fahnenlage anbelangt, deckt sich diese auf der Höhe der Kontrollebene weitgehend mit den bisherigen Erkenntnissen. Die früher geäußerte Vermutung, dass der R113-Herd möglicherweise etwas weiter südwestlich gelegen sein könnte, wurde durch die IPV-Resultate eher gestützt.

Eine recht gute Übereinstimmung ergab sich auch bei den Schadstofffrachten. Der Wert von 2.5 kg pro Jahr liegt im gleichen Bereich wie die aufgrund früherer Untersuchungen (u.a. „low flow“-Multilevel-Messungen) abgeschätzten Werte, die je nach Annahmen zwischen 1.7 und 3.5 kg pro Jahr für die CKW und zwischen 0.1 und 0.5 kg pro Jahr für R113 lagen. In Anbetracht der solchen Schätzungen inne liegenden Unsicherheiten ist die Übereinstimmung der verschiedenen Methoden als sehr gut zu bewerten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Ergebnisse des IPV plausibel sind, keine nicht erklärbaren Widersprüche oder Diskrepanzen aufgetreten sind und die früher - mit anderen Methoden - erhaltenen Resultate und Erkenntnisse bestätigen.

Einschränkend ist festzuhalten, dass die Ergebnisse der IPV im Wesentlichen die Verhältnisse des gut durchlässigen, unteren Teils des GW-Leiters (Seelandschotter) widerspiegeln. Die durch frühere Multilevel-Messungen belegten Unterschiede in den Schadstoff-Konzentrationen, welche am Standort B im oberen, nur gering durchlässigen Teil des Aquifers bis um zwei Größenordnungen höher sein können, werden durch die IPV-Auswertung nicht aufgelöst. Ebenso wenig lassen sich Aussagen zu vertikal unterschiedlichen Konzentrationsverhältnissen der Einzelstoffe und somit Informationen zu Abbaubedingungen verschiedener Horizonte treffen.

Erfahrungen aus Standort B:

- Trotz der vertikalen Heterogenität des Aquifers konnten durch 2 IPV die Lage der Schadstofffahne, die maximale Konzentration und die Fracht in guter Übereinstimmung mit früheren Untersuchungsergebnissen bestimmt werden.
- Die räumliche Eingrenzung des Schadensherds ist bei bekannter Grundwasserströmungsrichtung möglich.
- Eine Auflösung vertikaler Unterschiede in der Konzentrationsverteilung ist nicht möglich.
- Eine Differenzierung der Abbaubedingungen in unterschiedlich ausgeprägten Horizonten eines Grundwasserleiters mithilfe von IPV ist nicht möglich.

6.4 Standort C

6.4.1 Standortsituation

Am Standort C wurden im Zuge einer technischen Untersuchung (TU) gemäss AltIV im Dezember 2010 sowie bei der Detailuntersuchung (DU) im Dezember 2013 im Abstrombereich eines PCE-Schadens bereits mehrere IPV durchgeführt. Im Rahmen des Pilotprojekts wurden die IPV in zwei Messstellen ausgewählt, mit denen in den genannten Voruntersuchungen eine PCE-Fahne abgegrenzt werden konnte (vgl. Lageplan, Abbildung 6-19):

- Im Dezember 2010 wurden 24-stündige IPV mit jeweils 4 Probenahmen (10 min, 1 h, 6 h, 24 h) durchgeführt. Dabei wurden aus der Messstelle 12.P.31 eine Rate von 1.3 l/s und aus der Messstelle 12.P.33 eine Rate von 1.6 l/s gefördert.
- Bei der Wiederholungsserie im Dezember 2013 wurden 72-stündige IPV durchgeführt, Proben wurden jeweils zu Beginn, nach 24 h, nach 48 h sowie nach 72 h entnommen. Die Pumpraten betragen 1.5 l/s in 12.P.31 und 2.2 l/s in 12.P.33.

Als Datengrundlage für die Beurteilung des Standortes und die Auswertung mit C-SET standen die jeweiligen Untersuchungsberichte zur Verfügung.

Der Grundwasserleiter besteht aus einem ca. 2 m mächtigen siltig-sandigen Kies. Nach den Bohrprofilen handelt es sich um gleichförmige Ablagerungen im Bereich der IPV-Brunnen. Die mittels einer stationären Schätzformel ermittelte Durchlässigkeit war wenig plausibel und erforderte eine erneute hydraulische Versuchsauswertung.

6.4.2 Auswertung und Ergebnisse

Hydraulische Parameter

Mit den wenigen vorliegenden Messwerten der Absenkung zu den Probenahmeterminen konnte keine Auswertung mittels diagnostischem Plot durchgeführt werden. Ersatzweise wurde auf das weniger sensitive Geradlinienverfahren (Cooper & Jacob, Anhang C) zurückgegriffen. Für die Absenkung im Pumpbrunnen 12.P.33 berechnet sich mit der Pumprate von 1.58 l/s ein Transmissivitätswert $T = 0.183 \cdot Q / \Delta s$ von $2.3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (Abbildung 6-16).

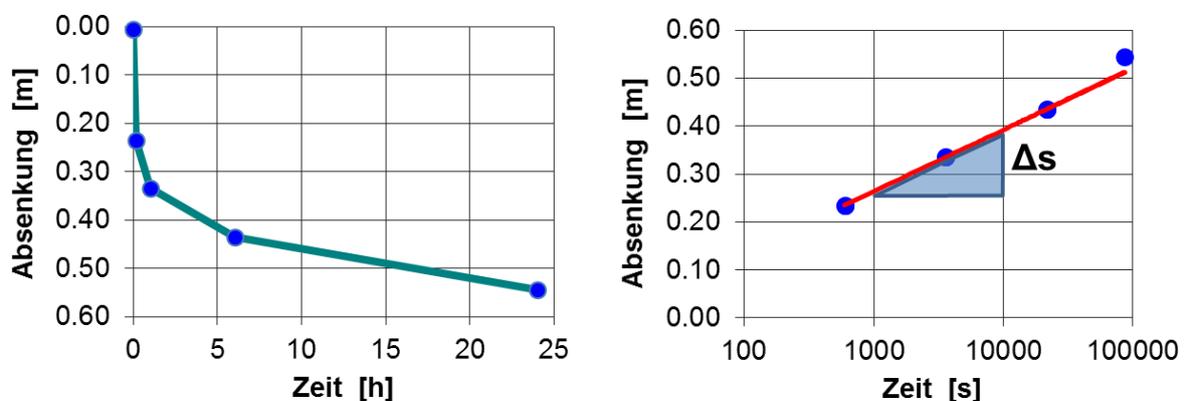


Abbildung 6-16: Absenkung (links) und hydraulische Auswertung (rechts) für den IPV in 12.P.33 vom Dezember 2010

Bei einer Aquifermächtigkeit von 2.1 m ergibt dies einen k_f -Wert von $1.1 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Als durchflusswirksame (effektive) Porosität n_e wurde der Schätzwert von 18 % (0.18) aus der TU übernommen.

Zur Ermittlung des hydraulischen Gradienten i wurden vor den IPV-Serien am 15.12.2010 sowie am 9.12.2013 Stichtagsmessungen der Grundwasserspiegel durchgeführt und die Isohypsen konstruiert. Hieraus ergeben sich im Bereich der Kontrollebene für den Zeitraum der Versuche im Dezember 2010 natürliche hydraulische Gradienten um 0.0056 in NNW-Richtung und für die Versuche im Dezember 2013 von 0.0083 bis 0.01 in NNW- bis N-Richtung.

Schadstoffverlauf

Bei den 24-stündigen IPV im Dezember 2010 zeigten sich bei 12.P.31 zunächst geringe, zum Versuchsende hin deutlich ansteigende PCE-Konzentrationen (Abbildung 6-17). Bei 12.P.33 wurden anfangs die höchsten PCE-Konzentrationen festgestellt.

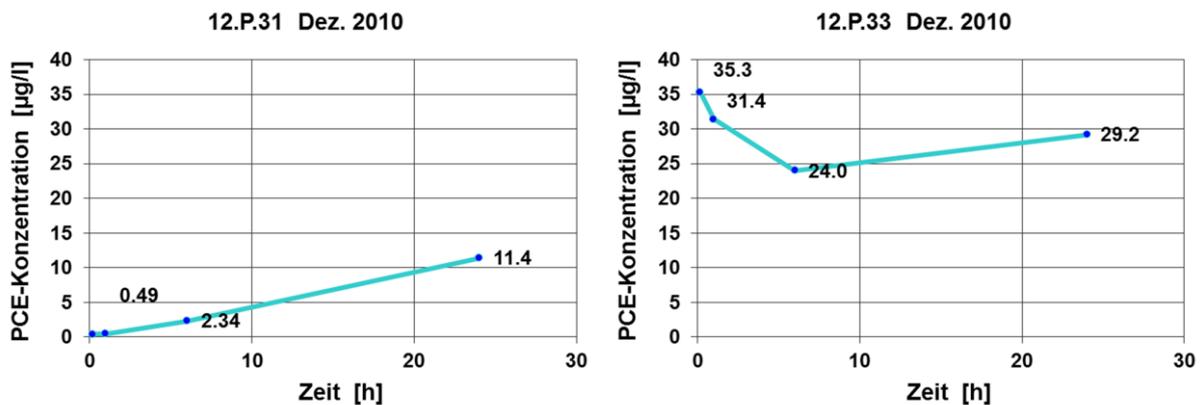


Abbildung 6-17: PCE-Konzentrationen der IPV vom Dezember 2010

Auch bei den 72-stündigen IPV im Dezember 2013 zeigten sich bei 12.P.31 im Versuchsverlauf ansteigende PCE-Konzentrationen. Bei 12.P.33 wurden anfangs hohe PCE-Konzentrationen, im Laufe des Pumpversuchs abnehmende Konzentrationen festgestellt (Abbildung 6-18).

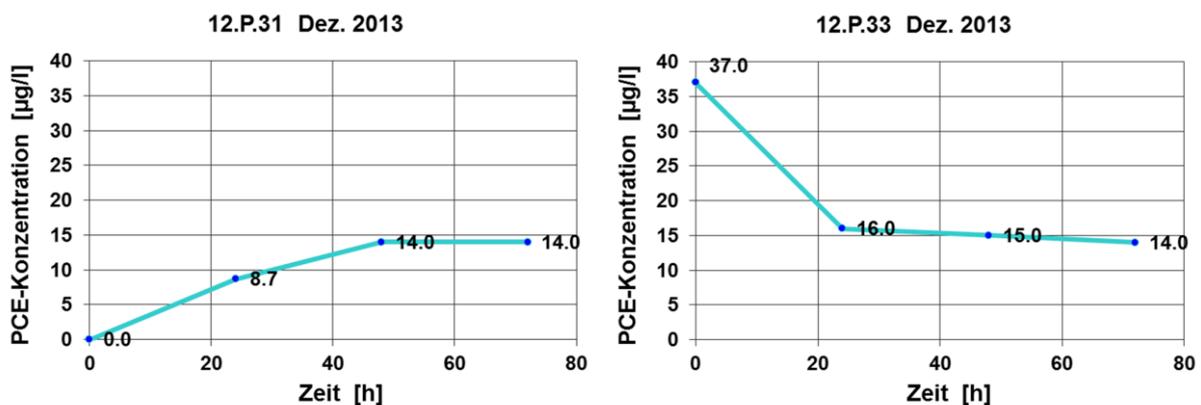


Abbildung 6-18: PCE-Konzentrationen der IPV vom Dezember 2013

Aus den Konzentrationsverläufen kann bereits qualitativ geschlossen werden, dass die Messstelle 12.P.31 im Randbereich einer Fahne liegt und der IPV im Verlauf der Pumpzeit höher belastete Fahnenbereiche erfasst. Für die Messstelle 12.P.33 kann gefolgert werden, dass sie im höher belasteten Fahnenbereich liegt und der IPV mit zunehmender Pumpzeit Grundwasser aus dem geringer belasteten Randbereich erfasst.

Isochronen

Mit dem Programm C-SET wurden zunächst auf Grundlage der hydraulischen Parameter und Pumpraten die Isochronen berechnet, d. h. die erreichten Erfassungsbereiche zu den jeweiligen Probenahmeterminen.

Bei der Serie der 24-stündigen IPV im Dezember 2010 erfolgten die IPV unmittelbar aufeinander. Der (ohne Schadstoffbefund) vorausgehende IPV in 12.P.32 führte zu einer leichten Verschiebung der Erfassungsbereiche der nachfolgenden IPV in 12.P.31 und 12.P.33, was bei der Auswertung mit C-SET berücksichtigt wurde (Abbildung 6-19).

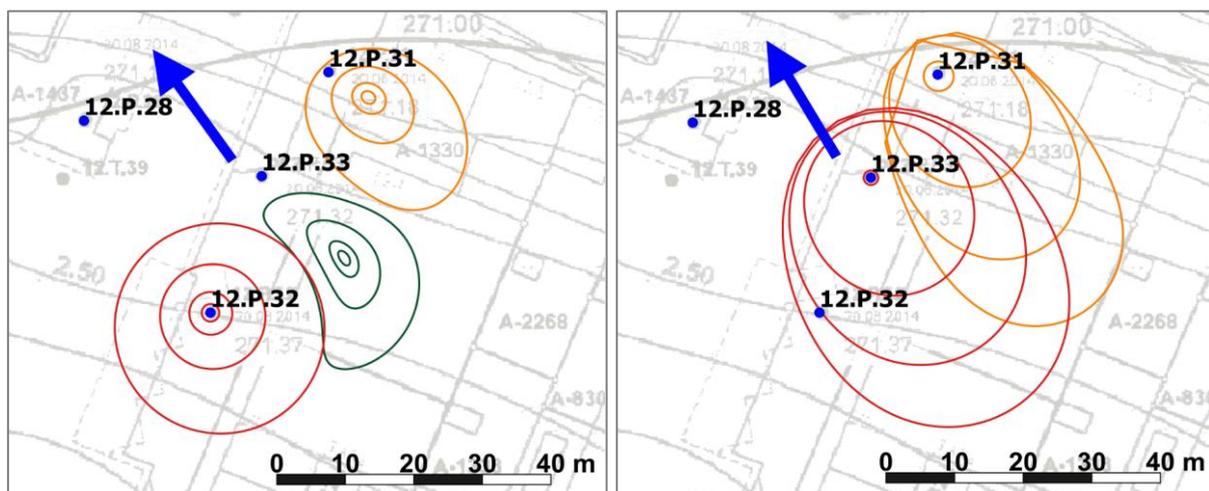


Abbildung 6-19: Erfassungsbereiche der IPV vom Dezember 2010 (links) und vom Dezember 2013 (rechts). Die Isochronen markieren den jeweiligen Erfassungsbereich zu den Probenahmezeitpunkten

Bei den 72-stündigen IPV im Dezember 2013 lag zwischen den Versuchen in den Messstellen 12.P.31 und 12.P.33 eine Pause von ca. 100 Stunden, sodass eine gegenseitige hydraulische Beeinflussung nicht mehr berücksichtigt werden musste.

Fahnenlage und Schadstofffrachten

Aus dem gemessenen zeitlichen Stoffdurchgang im gepumpten Grundwasser wurden mit C-SET mögliche räumliche Verteilungen der Schadstoffkonzentration im Erfassungsbereich berechnet. Dabei wurde angestrebt, dass aus den beiden betrachteten IPV im Überlappungsbereich der Isochronen eine deckungsgleiche Fahnenlage ermittelt werden kann.

Als wahrscheinlichstes Ergebnis für die 2010 durchgeführten IPV ergibt sich eine ca. 15 m breite PCE-Fahne zwischen den Messstellen 12.P.31 und 12.P.33 (Abbildung 6-20). Die maximale Fahnenkonzentration liegt bei 40 - 50 µg/l PCE, die Fracht berechnet sich mit 0.75 g/d.

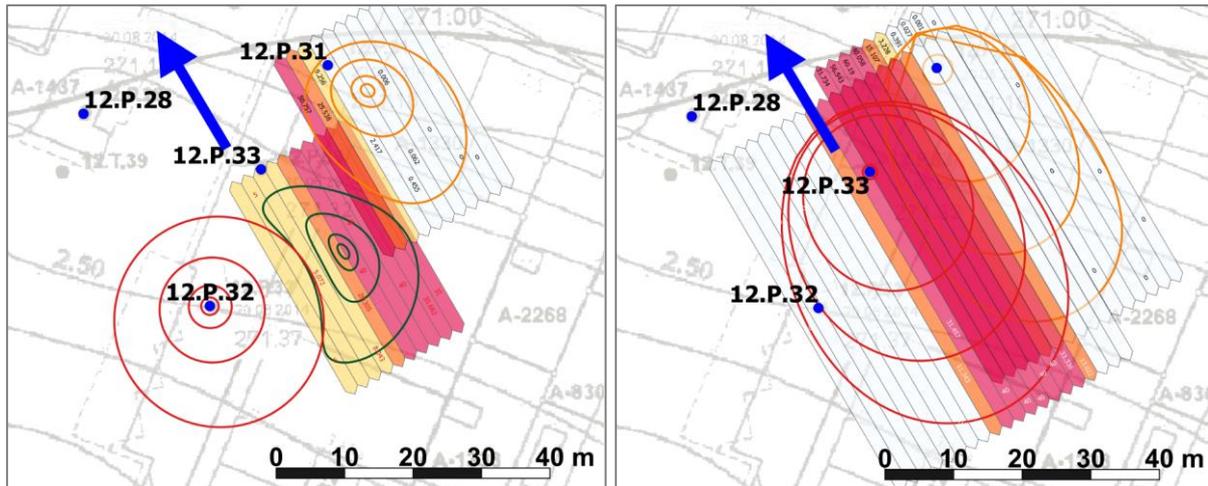


Abbildung 6-20: Konzentrationsverteilung errechnet mit C-SET für die IPV im Dezember 2010 (links) und Dezember 2013 (rechts)

Die Auswertung für die im Dezember 2013 durchgeführten IPV bestätigt die PCE-Fahne in einer Breite von ca. 15 m zwischen den Messstellen 12.P.31 und 12.P.33 (Abbildung 6-20). Die maximale Fahnenkonzentration liegt bei 50 - 60 µg/l PCE, für die Fracht berechnet sich damit ein Wert von 1.8 g/d.

6.4.3 Diskussion und Beurteilung

Die Anwendungskriterien für IPV am Standort C waren erfüllt, mit den durchgeführten IPV konnten Informationen zur Lage und Konzentrationsverteilung einer PCE-Fahne sowie zur abströmenden Schadstofffracht gewonnen werden.

In der TU wurde zur Planung und Auswertung der Versuche das IPV-Tool eingesetzt. Mit überlappenden Erfassungsbereichen der einzelnen IPV wurden ideale Ausgangsbedingungen für die Bestimmung der Fahnenlage geschaffen. Die in der TU ermittelte Fahnenlage und Fahnenkonzentration konnte durch die Auswertung mit C-SET grundsätzlich bestätigt werden, die in der TU bestimmte Schadstofffracht lag u.a. wegen der falschen Annahme des Durchlässigkeitsbeiwerts mit 0.11 g/d (PCE) um ca. den Faktor 10 zu niedrig.

Die in der DU wiederholte IPV-Serie zeigte eine gute Reproduzierbarkeit der Schadstoffganglinien. Die im Vergleich zur TU von 24 auf 72 Stunden verlängerten Pumpzeiten erbrachten keinen relevanten Erkenntnisgewinn, da nach 24 Stunden der Entnahmebreitenzuwachs nur noch gering war.

Erfahrungen aus Standort C:

- Durch passende Voraussetzungen wurden mit 2 IPV belastbare Informationen zur Lage und Konzentration einer Schadstofffahne sowie zur abströmenden Fracht erzielt.
- Die Ergebnisse konnten unabhängig vom durchführenden Büro reproduziert werden.
- Längere IPV liefern keinen Erkenntniszugewinn, wenn der Erfassungsbereich nicht mehr wächst.
- Stationäre Formeln zur Bestimmung der Durchlässigkeit sind zu fehleranfällig und sollten durch sensitive Bestimmungsverfahren ersetzt werden, um insbesondere die Sicherheit der berechneten Schadstofffracht zu verbessern.

6.5 Standort D

6.5.1 Standortsituation

Am Standort D liegt im Abstrom einer ehemaligen Deponie eine PCE-Belastung des Grundwassers vor. Als Datengrundlage für das Pilotprojekt lag ein IPV aus einer Abstrommessstelle vor. Ziel war die Evaluation der Eignungskriterien und Ergebnisse des IPV.

Der IPV wurde vom 2. bis 9. März 2016 in der Messstelle Pt 2 über 172 Stunden mit einer Pumprate von 5 l/s durchgeführt. Zu Versuchsbeginn und während der Pumpzeit wurden insgesamt 11 Proben entnommen.

Der Grundwasserleiter besteht nach dem Bohrprofil des IPV-Brunnens aus einem ca. 3 m mächtigen, schwach sandigen Kies mit Steinen, für den bei der Voruntersuchung ein Durchlässigkeitsbeiwert von $1.6 \cdot 10^{-3}$ m/s angegeben wurde. Die Bohrprofile benachbarter Messstellen weisen dagegen siltige Kiese aus.

Als Datengrundlage für die Beurteilung des Standorts und die Auswertung mit C-SET standen ein Lageplan, Bohrprofile, die Daten des Pumpversuchs sowie die Analyseergebnisse der während des IPV gezogenen Proben zur Verfügung. Die Unsicherheit der vorliegenden stationären Durchlässigkeitsbestimmung erforderte eine erneute hydraulische Auswertung der Wasserspiegelabsenkung.

6.5.2 Auswertung und Ergebnisse

Hydraulische Parameter

Der für die IPV-Auswertung erforderliche Durchlässigkeitsbeiwert wurde aus der zu den Probenahmeterminen gemessenen Wasserspiegelabsenkung mit einem Geradenlinienverfahren (Cooper & Jacob) ermittelt. Die Auswertung beschränkt sich auf die Daten aus den ersten 6 Stunden Versuchszeit, für die eine konstante Pumprate von 5 l/s und ein kontinuierlicher Absenkverlauf dokumentiert sind. Damit ergibt sich eine Dekadensteigung Δs von 0.0219 und damit ein Transmissivitätswert $T = 0.183 \cdot Q / \Delta s$ von $4.2 \cdot 10^{-2}$ m²/s (Abbildung 6-21). Bei einer Aquifermächtigkeit von 3.1 m resultiert ein k_f -Wert von $1.4 \cdot 10^{-2}$ m/s.

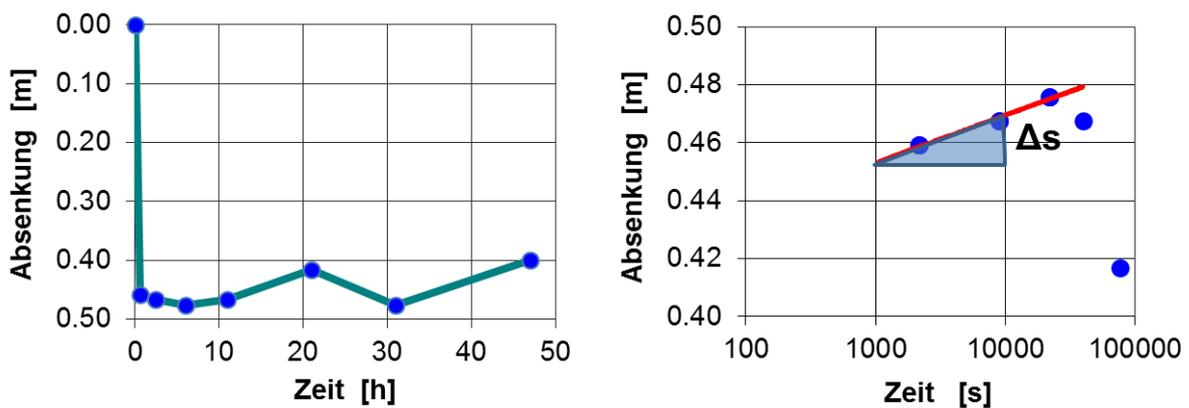


Abbildung 6-21: Absenkung (links) und hydraulische Auswertung (rechts) für den IPV in Pt 2 vom März 2016

Der Durchlässigkeitswert ist wegen der wenigen verwertbaren Messwerte als unsicher einzustufen. Gegenüber der stationären Abschätzung, die auf Grundlage eines einzelnen (beliebigen) Q/s-Quotienten einen Wert von $1.6 \cdot 10^{-3}$ m/s liefert, ist dem instationär ermittelten Wert jedoch der Vorzug zu geben.

Als durchflusswirksame (effektive) Porosität n_e wird ein geschätzter Wert von 18 % (0.18) angenommen.

Zur Ermittlung des hydraulischen Gradienten lag eine Stichtagsmessung vom 28.10.2014 vor, nach der sich für den Bereich des IPV-Brunnens ein Gefälle von ca. 0.0027 in nordöstliche Richtung ergibt.

Schadstoffverlauf

Bei dem 172-stündigen IPV in Pt 2 schwanken die PCE-Konzentrationen der ersten Proben zwischen 17 und 26 $\mu\text{g}/\ell$, nach ca. 6 Stunden stagniert der Konzentrationsverlauf um 20 $\mu\text{g}/\ell$ (Abbildung 6-22).

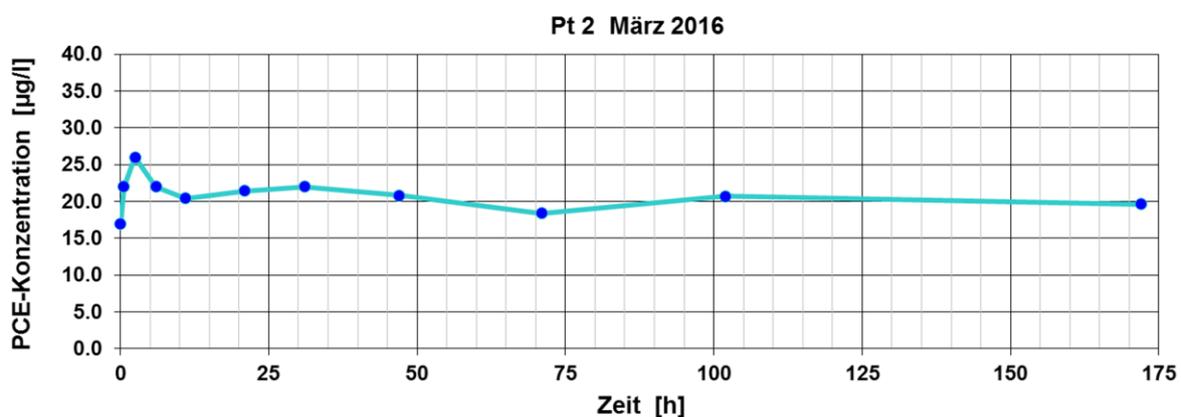


Abbildung 6-22: PCE-Konzentrationen des IPV in Pt 2 vom März 2016

Anhand des Konzentrationsverlaufs lässt sich bereits vermuten, dass die Messstelle Pt 2 im Bereich einer Fahne liegt und der Erfassungsbereich während des IPV nicht die seitlichen Fahnenränder erreicht.

Isochronen

Die zu den Probenahmeterminen erreichten Erfassungsbereiche wurden wiederum mit dem Programm C-SET auf Grundlage der hydraulischen Daten und der (mittleren) Pumprate von 5.0 l/s als Isochronen berechnet. Da der erfasste Kontrollquerschnitt nach ca. 2 Tagen Pumpdauer kaum noch an Breite zunimmt, werden spätere Proben bei der Berechnung der Isochronen nicht berücksichtigt (Abbildung 6-23).

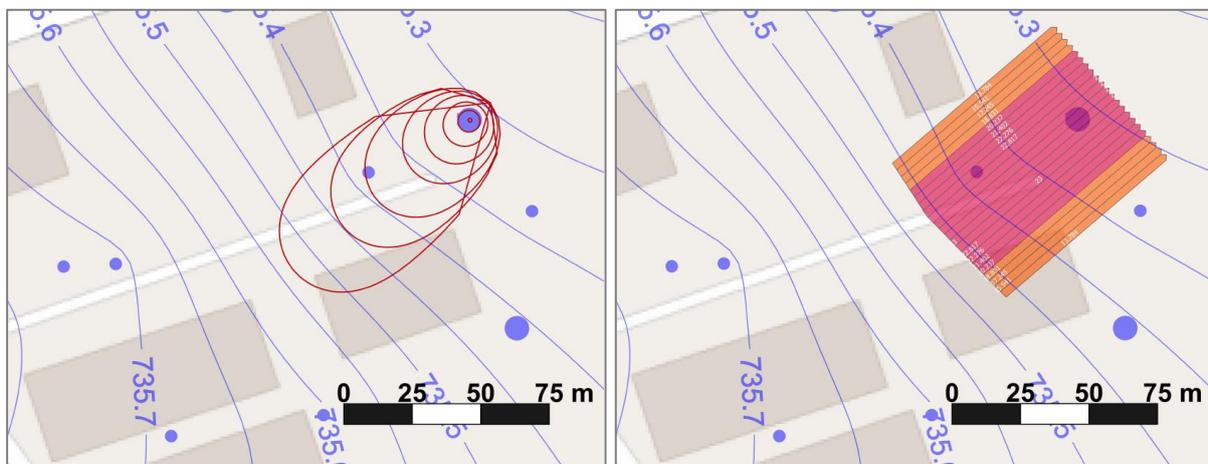


Abbildung 6-23: Erfassungsbereich des IPV in Pt 2. Die Isochronen (Bild links) markieren den jeweiligen Erfassungsbereich zu den Probenahmezeitpunkten nach 0.6 h, 2.5 h, 6 h, 11 h, 21 h, 31 h und 47 h Pumpdauer. Das Bild rechts zeigt die mit C-SET berechnete Konzentrationsverteilung

Fahnenlage und Schadstofffrachten

Aus dem zeitlichen Stoffdurchgang im gepumpten Grundwasser wurde mit C-SET eine korrespondierende räumliche Verteilung der Schadstoffkonzentration im Erfassungsbereich berechnet.

Demnach ergibt sich eine PCE-Fahne mit einem Konzentrationsmaximum von ca. 23 - 25 µg/l um Pt 2, die durchschnittliche Konzentration über den ca. 44 m breiten erfassten Kontrollquerschnitt beträgt ca. 20 µg/l (Abbildung 6-23).

Die Schadstofffracht über den mit dem IPV erfassten Kontrollquerschnitt berechnet sich mit 9 g/d. Die Fahnenränder wurden durch den IPV jedoch nicht erreicht, so dass die tatsächliche Fracht wahrscheinlich höher liegt.

6.5.3 Diskussion und Beurteilung

Grundsätzlich waren die Anwendungskriterien am Standort D erfüllt und es konnten mit dem durchgeführten IPV Informationen zur Schadstoffkonzentration und -fracht über einen mindestens 44 m breiten Abstromquerschnitt gewonnen werden.

Häufig ist mit einem einzelnen IPV nicht zu entscheiden, ob eine Fahne rechts oder links vom Brunnen liegt. Die Konstanz der Schadstoffkonzentration über den gesamten IPV führt jedoch zu einer symmetrischen Schadstoffverteilung im erfassten Abstromquerschnitt als wahrscheinlichste Lösung.

Obwohl bei der Bestimmung der Durchlässigkeit das instationäre Geradlinienverfahren eine höhere Sensitivität aufweist als die ursprüngliche stationäre Abschätzung, ist das Ergebnis aufgrund der wenigen zur Verfügung stehenden Messwerte unsicher. Eine Beurteilung der Aquiferbedingungen kann auf dieser Grundlage nicht vorgenommen werden. Die ermittelte Fahnenbreite und die Schadstofffracht sind mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet.

Eine höhere Sicherheit wäre zu erreichen, wenn der Durchlässigkeitsbeiwert genauer bestimmt würde. Hierfür eignen sich eine kontinuierliche Messwernerfassung der Wasserspiegelabsenkung beim IPV und darauf basierende sensitivere Auswerteverfahren wie diagnostische Plots, mit denen sich auch Aussagen zum Aquiferaufbau sowie zu möglichen hydraulischen Rändern des Aquifers treffen lassen (vgl. Anhang C).

Erfahrungen aus Standort D:

- Eine ausreichende Kenntnis des Grundwasserleiters sowie der Kennwerte für Grundwassergefälle und Durchlässigkeit ist eine wesentliche Voraussetzung für die Planung und Auswertung von IPV.
- In der Planung sollten eine sinnvolle Pumpdauer und geeignete Probenahmetermine festgelegt werden.
- Beim IPV sollten kontinuierliche Messungen von Pumprate und Absenkung (möglichst auch in Beobachtungsmessstellen) vorgenommen werden, um damit eine belastbare Grundlage zur Bestimmung der hydraulischen Kennwerte zu schaffen.

7. Fazit und Empfehlungen

7.1 Anwendungsbedingungen in der Schweiz

Der vorliegende Bericht zeigt, dass Immissionspumpversuche zur Untersuchung von CKW-Fahnen in der Schweiz grundsätzlich anwendbar sind. Ihre Stärke gegenüber (zufällig oder entsprechend der Zugänglichkeit verteilten) punktuellen Bestimmungen der Schadstoffkonzentration im Grundwasser ist, dass sie den Schadstoffmassenfluss räumlich integrierend und damit die Schadstofffracht über einen Untersuchungsquerschnitt „lückenlos“ erfassen können. Gleichzeitig mit einer räumlichen Auflösung der Konzentrationsverteilung sind IPV Grundlage für eine repräsentative Bestimmung der hydraulischen Kennwerte und damit für die belastbare Berechnung der Schadstofffracht.

Auf den Pilotstandorten ermöglichte die IPV-Methode

- die lückenlose Erfassung des Schadstoffmassenflusses,
- die räumlich-integrierende, direkte Bestimmung der Fracht,
- die Lagebestimmung der Schadstofffahne auf der Kontrollebene.

Als wesentlich für den erfolgreichen Einsatz von IPV hat sich herausgestellt, dass die Standortbedingungen ausreichend bekannt und die Anwendungsbedingungen für IPV am Standort erfüllt sind. Zu den wichtigsten zu prüfenden Anwendungsbedingungen gehören

- eine vermutete oder bekannte Grundwasserbelastung mit wasserlöslichen Stoffen in einer Konzentration mind. eine Grössenordnung über Bestimmungsgrenze; eine Schadstoffphase sollte im Erfassungsbereich des IPV nicht auftreten,
- eine ausreichende Homogenität des Grundwasserleiters, d.h., dass im Erfassungsbereich eines IPV insbesondere die Aquifermächtigkeit und die Durchlässigkeitseigenschaften nicht so stark variieren sollten, dass die analytische Berechnung des Erfassungsbereichs unzuverlässig wird,
- eine ausreichende Ergiebigkeit für Pumpversuche, die erzielbare Rate sollte zwischen ca. 1 und 5 l/s liegen. IPV mit kleineren Raten haben meist ein schlechtes Kosten-/Nutzen-Verhältnis, da sie nur verhältnismässig kleine Kontrollquerschnitte erfassen. Höheren Pumpraten sind oft technische Grenzen gesetzt, sei es durch den Brunnendurchmesser oder die Abwasserableitung,
- eine mittlere Aquifermächtigkeit von ca. 2 - 10 m,
- nicht zu hohe Fliessgeschwindigkeit, sodass sich beim IPV eine relativ grosse Entnahmebreite entwickeln kann.

Die erzielbare Entnahmebreite ist massgebend für die Kosteneffizienz eines IPV. Die in einer Sensitivitätsanalyse (vgl. Kap. 4.3) entwickelten Diagramme zeigen, dass sich die Entnahmebreite mit der Pumprate und – solange der Effekt der Fliessgeschwindigkeit nicht überwiegt – auch mit der Pumpdauer erhöht. Mit steigender Aquifermächtigkeit und Grundwasserfliessgeschwindigkeit vermindert sich die erzielbare Entnahmebreite.

Es hat sich gezeigt, dass sich die Anwendungsbedingungen in der **Schweiz** von denen in Baden-Württemberg (D) unterscheiden. So weisen die mittelländischen Lockergesteinsvorkommen häufig steile Fließgradienten und hohe Durchlässigkeiten auf. Die daraus resultierende hohe natürliche Grundwasserfließgeschwindigkeit wirkt sich ungünstig auf die Grösse des erzielbaren Erfassungsbereiches aus. Auch mussten Standorte ausgeschieden werden, bei denen das Grundwasser in geringer Mächtigkeit über einer relativ steil einfallenden Aquifersohle abfließt. Kluft- oder Karstgrundwasserleiter erfüllen die Anwendungsbedingungen a priori nicht.

Bei der Bearbeitung der Pilotstandorte bestanden Bedenken im Hinblick auf das Kriterium der Homogenität des Grundwasserleiters, da diese auch in Lockergesteinsvorkommen selten ideal ist. Vom Prinzip her sind IPV jedoch ein Verfahren, durch das auch über Heterogenitäten hinweg der Schadstoffmassenfluss und die Durchlässigkeit integral erfasst werden. Somit widerspiegelt der ermittelte Frachtwert auch grundsätzlich die realen Abstromverhältnisse. Weitere, aus dem Konzentrationsverlauf beim IPV abgeleitete Berechnungsergebnisse, wie die Lage der Schadstofffahne und die Konzentrationsverteilung enthalten allerdings mit zunehmender Heterogenität entsprechende Unsicherheiten.

Weiterhin konnten Bedenken relativiert werden, dass allfällige natürliche Grundwasserspiegelschwankungen das Ergebnis des IPV negativ beeinflussen. Diese Wasserspiegelschwankungen haben jedoch keinen relevanten Einfluss auf den Entnahmebereich. Bei der Bestimmung der hydraulischen Parameter können sie als Trend eliminiert werden, vorausgesetzt dieser kann aus dem Datensatz selbst oder anhand der Ganglinie einer vom IPV unbeeinflussten Messstelle im gleichen Grundwasserleiter ermittelt werden.

7.2 Anwendungsempfehlungen für IPV in der Altlastenbearbeitung

Unter bestimmten günstigen Voraussetzungen ist es denkbar, mithilfe von IPV eine Übersicht der Immissionslage zu erhalten und anhand der festgestellten Grundwasserbelastungen im Hinblick auf die **Altlasten-Voruntersuchungen (VU)** eine Priorisierung von untersuchungsbedürftigen Standorten vorzunehmen.

Zur Planung von IPV für die Erstbeurteilung von VU-Standorten wurde eine Entscheidungshilfe erarbeitet, nach der ein sinnvoller Einsatz von IPV anhand der Kriterien Standortdichte, hydrogeologische Voraussetzungen und vorhandene Messstellen geprüft werden kann. Ein Pilotprojekt auf dieser Stufe wurde nicht verwirklicht, weil der Kenntnisstand für die Planung i.d.R. nicht ausreichend war und das Kosten-/Nutzen-Verhältnis als eher ungünstig eingeschätzt wurde. Pilotprojekte in Baden-Württemberg zeigen, dass bei hoher Standortdichte und erfüllten hydrogeologischen Kriterien IPV auch „flächendeckend“ erfolgreich zur Auffindung von CKW-Fahnen und damit zur Priorisierung von untersuchungsbedürftigen Standorten eingesetzt werden können [2], [5].

Auf **Stufe Detailuntersuchung (DU)** konnten IPV an zwei Pilotstandorten erfolgreich durchgeführt werden. An zwei weiteren Standorten konnten IPV früherer Untersuchungen ausgewertet werden.

Die Pilotversuche haben gezeigt, dass die Anwendung von IPV zwar relativ hohe fachliche Anforderungen stellen, dafür aber robuste und belastbare Ergebnisse liefern können. Mit den

IPV konnten trotz gewisser Einschränkungen im Hinblick auf die Homogenität des Grundwasserleiters plausible Fahnenlagen, Konzentrationsverteilungen und Frachten berechnet werden, die mit unabhängig ermittelten Ergebnissen aus früheren Untersuchungen gut im Einklang stehen.

Fazit:

- Die Anwendung von IPV ist zwar komplex, Resultate sind aber robust und belastbar.
- Anhand der Vorinformationen zum Standort sind vorgängig die Anwendungsbedingungen zu überprüfen und das Kosten-Nutzenverhältnis abzuwägen.
- Die Anwendung von IPV wird primär auf Stufe Detailuntersuchung (DU) empfohlen.
- Die Anwendung von IPV zur Priorisierung von Voruntersuchung-Standorten ist durch unzureichende Vorinformationen und ein ungünstiges Kosten-/Nutzen-Verhältnis limitiert.

Wesentliche Erfahrungen aus den Pilotprojekten sind in eine Handlungsempfehlung zur Planung, Durchführung und Auswertung von IPV eingeflossen (Anhang B). Als Anhaltspunkt für eine vorgängige Kosten-/Nutzenabwägung können die Kosten für die Planung, Durchführung und Auswertung der Pilotversuche auf den Standorten A und B herangezogen werden. Diese lagen bei CHF 20'000 - 25'000 bei günstiger Infrastruktur (Strom, Wasserentsorgung) bzw. CHF 30'000 - 35'000 bei etwas ungünstigeren Standortbedingungen.

7.3 Defizite und Handlungsbedarf

Aus der Sensitivitätsanalyse (Kap. 4.3) wird deutlich, dass die hydraulischen Parameter wesentlichen Einfluss auf die Planung und Auswertung von IPV haben. Der richtigen Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes kommt dabei eine grosse Bedeutung zu, da er die massgebliche Grösse zur Bestimmung der Erfassungsbreite wie auch zur Berechnung der Schadstofffracht ist.

Bei den Pilotprojekten B, C, und D hat sich gezeigt, dass vorliegende Durchlässigkeitsbeiwerte aus früheren Untersuchungen signifikant (z. T. um eine Grössenordnung oder mehr) von den Werten abwichen, die anhand der IPV wesentlich genauer ermittelt werden konnten. Die qualitätsbestimmenden Faktoren für die grössere Genauigkeit sind:

- kontinuierliche Messdaten. Dies wird erreicht, wenn die Wasserspiegelabsenkung im Brunnen und ggf. in benachbarten GWM mittels Drucksonden gemessen und aufgezeichnet wird.
- sensitive Auswerteverfahren. Idealerweise können mit dem Auswerteverfahren Störeinflüsse durch nicht verfahrenskonforme Aquifer- und Randbedingungen erkannt und berücksichtigt werden.

Fehlerhafte hydraulische Parameter führen entsprechend zu einer mangelhaften Versuchsplanung bzw. zu falschen Versuchsergebnissen und somit zu einer falschen Beurteilung. Bei Verwendung von Ergebnissen früherer Versuche sind diese daher kritisch zu prüfen. Spätestens

die Durchführung und Auswertung des IPV selbst sollten dem Stand der Technik entsprechen (vgl. Handlungsempfehlung, Anhang B und Hinweise, Anhang C).

8. Literaturverzeichnis

- [1] Hekel, U. (2014); Bestimmung von Schadstoffemissionen und Frachten aus Pumpversuchen mit C-SET. Präsentation an der ChloroNet Fachtagung vom 20. November 2104. *online-Publikation*: <http://www.bafu.admin.ch/chloro-net/05751/14023/index.html?lang=de>
- [2] LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2014); Integrales Altlastenmanagement. Leitfaden und Handlungshilfe zur integralen Untersuchung und Sanierung von Altlasten; Karlsruhe. *online-Publikation*: <http://www4.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/245503/>
- [3] Teutsch, G., Ptak, T., Schwarz, R., Holder, T. (2000); Ein neues integrales Verfahren zur Quantifizierung der Grundwasserimmission, Teil 1: Beschreibung der Grundlagen. Grundwasser- Zeitschrift der Fachsektion Hydrologie, Band 5, Heft 4, S. 170-175.
- [4] Ptak, T., Kirchholtes, H., Hiesl, E., Holder, T., Rothschink, P., Hekel, U., Beer, H.-P., Ertel, T., Herold, M., Koschitzky, H.-P. (2013): Grundwasserabstromerkundung mittels Immissionspumpversuchen. – Aktualisierung Stand der Technik, Planung, Implementierung, Anwendungsstrategien. altlastenforum Baden-Württemberg e.V., Schriftenreihe, Heft 16; Stuttgart (Schweizerbart)
- [5] Hekel, U., Eichelmann, C., Sonntag, P. (2014): Integrale Altlastenuntersuchung Ravensburg - Strategie und Methoden einer integralen Untersuchung flacher Porengrundwasserleiter im urbanen Raum. Stadt Ravensburg (Hrsg.). *online-Publikation*: <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/>
- [6] Leven, C., Ptak, T., Guthke, A., Hekel, U., Karch, G., Morlok, U., Halla, P. Koschitzky, H.-P. (2016): Hydraulische Charakterisierung von Grundwasserleitern - Moderne Anwendungs- und Auswertungsansätze. – Schriftenreihe altlastenforum Baden-Württemberg e.V., Heft 17, Stuttgart
- [7] Hekel, U., Huss, A. (2013): C-SET Benutzerhandbuch. - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe. *online-Publikation*: <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/229895/>
- Über diesen Link kann auch das Programm C-SET kostenlos heruntergeladen werden

Anhang

Mit B54 und B58 liegen 2 zu prüfende Brunnen im Bereich des Gehängeschutts mit sehr geringer Aquifermächtigkeit und starkem Einfluss des Reliefs der Aquifersohle. Für die Anwendung von IPV sind die Anforderungen an die Aquifermächtigkeit, Homogenität sowie vermutlich Phasenfreiheit im Entnahmebereich nicht erfüllt. Unter den gegebenen Bedingungen können durch IPV allenfalls sehr kleine Erfassungsbereiche erreicht werden.

Mit B5/84 und B6/84 liegen 2 zu prüfende Brunnen im vermuteten Abstrom der PCE-Fahne innerhalb des Schottergrundwasserleiters. Aufgrund der verschiedenen Grundwasserkomponenten - Hangabstrom von S her und Uferfiltrat von N her - ist der hydraulische Gradient im Bereich dieser Brunnen jedoch unsicher. Dies führt zu einer entsprechend wenig belastbaren Aussagesicherheit der IPV im Hinblick auf die Herkunft festgestellter Immissionen. Auch im weiteren Abstrom ist es mit den vorhandenen Brunnen nicht möglich, die gesamte Fahne zu erfassen.

Grundsätzlich könnten die IPV im weiteren Abstrom durchgeführt werden und Informationen zur PCE-Immission liefern. Wegen der genannten Einschränkungen wurde der Standort jedoch nicht für das Pilotprojekt vorgeschlagen.

Standort F

Für den Industriestandort F sollte geprüft werden, ob durch einen IPV im vorhandenen Brunnen 2975 Informationen zur Abgrenzung und Herkunft einer PCE-Fahne gewonnen werden könnten.

Die anstehenden stark durchlässigen sandigen Niederterrassenschotter erfüllen mit einer Aquifermächtigkeit von 8.7 m die Anforderungen an den Grundwasserleiter. Der zu prüfende Brunnen erschliesst den Aquifer vollkommen und lässt mit einem Ausbaudurchmesser von 4.5“ bei einer Durchlässigkeit von $k_f = 1 \cdot 10^{-3}$ m/s vermutlich eine Pumprate von 4 - 5 l/s zu. Voruntersuchungen erbrachten mit Werten zwischen 0.1 und 640 µg/l schwankende PCE-Konzentrationen, ergaben jedoch keine Hinweise auf Phase. Mit einer Pumpdauer von 7 Tagen könnten für einen 50 - 60 m breiten Kontrollquerschnitt Aussagen zur Lage, Konzentration und Fracht der vermuteten CKW-Fahne gemacht werden (vgl. Berechnung der Isochronen, Abbildung A-2).

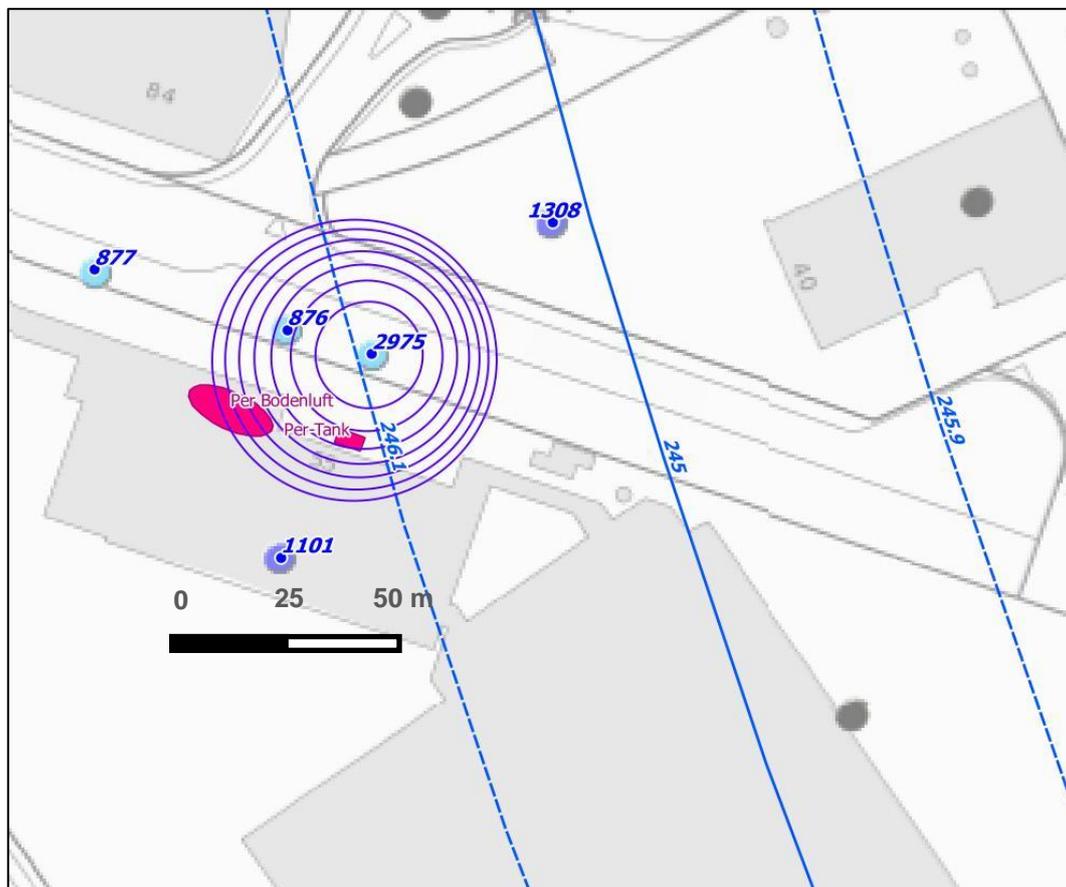


Abbildung A-2: Abschätzung der Isochronen für einen 7-tägigen IPV

Der Standort erfüllte die fachlichen Kriterien gut, die Bearbeitung als Pilotprojekt scheiterte jedoch an der Zugänglichkeit sowie den Finanzen.

Standort G

Für den Standort G liegt eine Grundwasserbelastung durch CKW vor. Die Konzentrationen im Abstrombereich betragen $> 1000 \mu\text{g}/\text{l}$. Der sandig-kiesige Grundwasserleiter ist 3 - 4 m mächtig. In der Standortevaluierung sollte geklärt werden, ob mittels IPV Schadstoffimmission und -fracht über einen ca. 70 m breiten Abstromquerschnitt untersucht werden können. Auf dem favorisierten Transekt sind bereits zwei Messstellen (4½"-Rohre) vorhanden, welche genutzt werden könnten.

Unter Annahme einer mittleren Durchlässigkeit von $1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$, eines nicht zu steilen hydraulischen Gradienten von ≤ 0.003 sowie einer Pumprate von 2.5 l/s berechnen sich mit C-SET für 3-tägige IPV ca. 30 - 35 m breite Erfassungsbereiche (vgl. Abbildung A-3). Somit könnte mit IPV in den zwei bestehenden sowie in einer neuen Messstelle die vermutete Fahnenbreite untersucht werden.

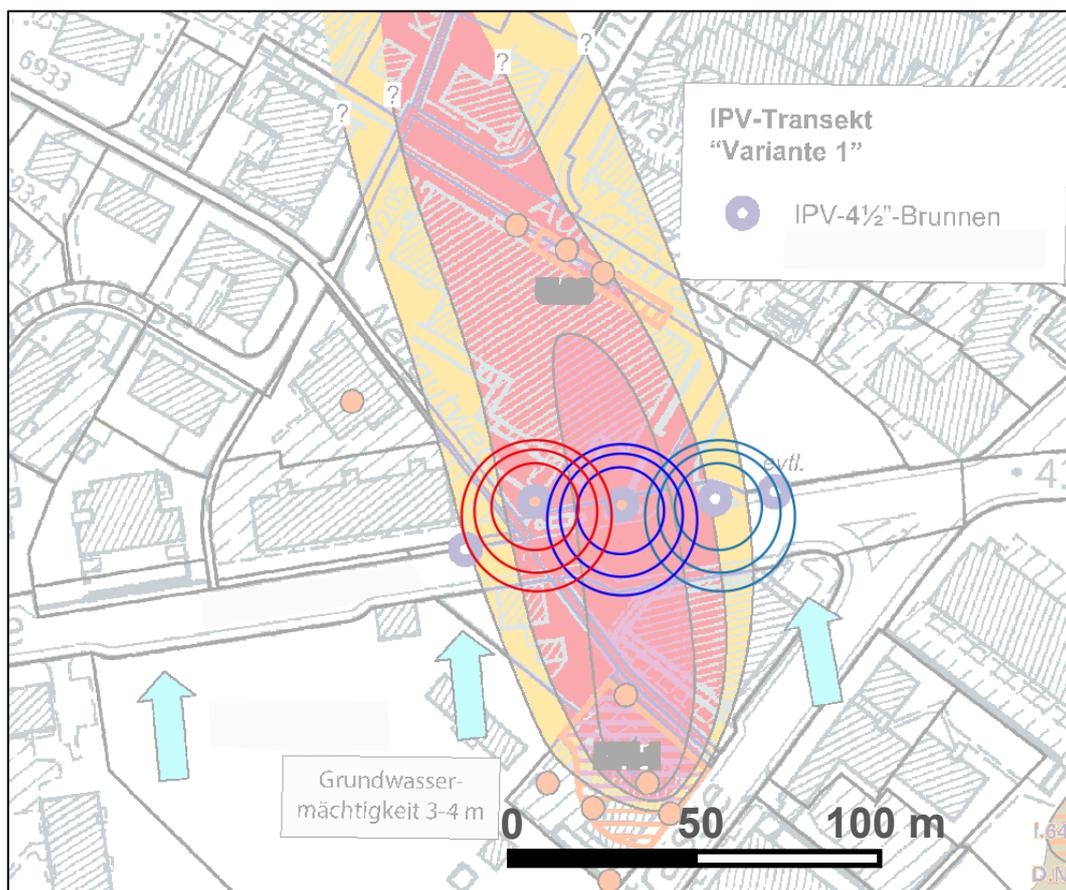


Abbildung A-3: Abschätzung der Erfassungsbereiche mittels C-SET für 1, 2 und 3 Tage

Der Standort würde die fachlichen Anwendungskriterien für IPV erfüllen, musste jedoch aus rechtlichen Gründen als Pilotprojekt zurückgestellt werden.

Anhang B: Handlungsempfehlung zur Planung, Durchführung und Auswertung von IPV

Werkzeuge zur Planung und Auswertung

Bei der Planung und Auswertung eines IPV muss der Erfassungsbereich des Pumpversuchs berechnet werden. Neben aufwändigeren und modellgestützten Verfahren gibt es hierzu für +/- homogene Aquiferbedingungen einfache Werkzeuge wie das IPV-Tool oder C-SET. Beide Tools stehen als kostenloser Download auf der Internetseite der LU Baden-Württemberg zur Verfügung, für C-SET existiert ein ausführliches Handbuch [7].

Das **IPV-Tool** ist ein Excel-Sheet für stark vereinfachte Aquifer- und Versuchsbedingungen mit vernachlässigbarer natürlicher Grundwasserströmung. Es berechnet den Zuwachs der Entnahmebreite mit der Zeit sowie für vorliegende Probenkonzentrationen mehrere idealisierte Konzentrationsverteilungen und die Schadstofffracht über die Kontrollebene.

C-SET ist ein Windowsprogramm, mit dem sich der wachsende Erfassungsbereich für die Probenahmezeitpunkte in Form von **Isochronen** berechnen und darstellen lässt. Neben einer höheren Grundströmung können auch Praxisbedingungen wie variierende Pumpraten und Versuche in Nachbarbrunnen berücksichtigt werden. Bei der Auswertung von IPV wird (automatisch) eine **Fahnenlage** berechnet, die sich mit den gemessenen Probenkonzentrationen bestmöglich zur Deckung bringen lässt. Für die auf diese Weise iterativ bestimmte Konzentrationsverteilung im Erfassungsbereich wird unter Berücksichtigung der Grundströmung die resultierende **Schadstofffracht** berechnet.

Für Anwendungen, bei denen wie bei sämtlichen in diesem Bericht evaluierten Standorten die Grundströmung nicht zu vernachlässigen ist, wird empfohlen, für die Auswertung das Programm C-SET einzusetzen.

Die Qualität der Berechnungsergebnisse hängt entscheidend davon ab, ob die zugrunde gelegten Werte für die Aquiferparameter zutreffend sind. Diese sind:

- hydraulischer Gradient
- Aquifermächtigkeit
- Durchlässigkeitsbeiwert
- (durchflusswirksame) Porosität

Planung

Bei der Planung wird ermittelt, in welcher Breite ein Kontrollquerschnitt quer zur Grundwasserströmung mit dem IPV erfasst werden kann. Hierzu müssen der Aquifer sowie o.a. Aquiferparameter hinreichend bekannt sein oder ggf. noch erkundet werden. Darüber hinaus hängt der realisierbare Erfassungsbereich entscheidend von der möglichen Pumprate und der Versuchsdauer ab:

Für einen maximalen Erfassungsbereich sollte die **Pumprate** möglichst hoch gewählt werden, jedoch so, dass sie sich über die Versuchsdauer konstant durchhalten lässt. Sie wird aus hydraulischen Kenndaten des Brunnens abgeschätzt, besser jedoch aus Vorversuchen abgeleitet.

I.d.R. werden IPV bei Pumpraten zwischen ca. 1 und 5 l/s eingesetzt [4]. IPV mit kleineren Raten haben meist ein schlechtes Kosten-/Nutzen-Verhältnis, da sie nur verhältnismässig kleine Kontrollquerschnitte erfassen. Höheren Pumpraten sind oft technische Grenzen gesetzt, sei es durch den Brunnendurchmesser oder die Abwasserableitung.

Die **Versuchsdauer** bestimmt die Breite des Entnahmebereichs, jedoch wird der Entnahmebreitenzuwachs mit der Zeit geringer bzw. stagniert, sobald der Effekt der Grundströmung den der radialen Strömung überwiegt. Hier ist unter Beachtung der Wirtschaftlichkeit ein günstiges Verhältnis zwischen erzielter Breite des Kontrollquerschnitts und zeitlichem Aufwand zu suchen. Die Versuchsdauer bei IPV beträgt häufig zwischen 1 und 4 Tagen, bei den Pilotstandorten rangierte die Versuchsdauer zwischen 24 und 172 Stunden, wobei mit dem 172-stündigen IPV bereits nach 48 Stunden kein Erkenntniszugewinn mehr erzielt werden konnte.

Bei den IPV der Pilotstandorte wurden zwischen 4 und 11 Proben gezogen, wobei eine sinnvolle **Probenanzahl** in der Regel zwischen 5 und 8 Proben je Versuch liegt. Anzahl und Zeitpunkte der Proben sind so zu planen, dass eine gute räumliche Auflösung der Konzentrationsverteilung respektive der Schadstofffahne möglichst in äquidistanten Stromstreifen erzielt wird. Wird der Versuchsstart auf die Morgenstunden gelegt, so ist es i. d. R. ohne Qualitätsverlust möglich, rechnerisch in Nachtstunden fallende Probenahmeterminale auf den späten Vorabend oder darauffolgenden frühen Morgen zu verschieben.

Wenn der Abstrom eines Standortes mit einem IPV nicht oder nicht wirtschaftlich erfasst werden kann, sind ggf. entlang des Kontrollquerschnitts **weitere IPV** zu planen, die im Idealfall überlappende Erfassungsbereiche entwickeln. Die gegenseitige hydraulische Beeinflussung gleichzeitig oder nacheinander durchgeführter IPV ist dabei zu beachten.

Die Planung muss berücksichtigen, dass für die IPV-Auswertung Richtung und Gefälle der Grundwasserströmung möglichst genau bekannt sein müssen. Hierzu ist vorgängig eine Stichtagsmessung der Grundwasserspiegel durchzuführen.

Durchführung

IPV dienen neben der Ermittlung aussagekräftiger Konzentrationsganglinien relevanter Schadstoffe auch der Bestimmung verlässlicher hydraulischer Kennwerte.

Grundlage einer belastbaren hydraulischen Auswertung ist eine **kontinuierliche Messung und Aufzeichnung der wesentlichen Versuchsparameter** wie Pumprate und Grundwasserspiegelabsenkung im Brunnen und ggf. in Beobachtungsmessstellen. Nach Möglichkeit sollte während des IPV eine **konstante Pumprate** eingehalten werden. Für die Messung sollten magnetisch-induktive Durchflussmesser bzw. Drucksonden für die Wasserspiegelabsenkung eingesetzt werden. Zur Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit sollte zusätzlich auch der **Wiederanstieg** nach dem IPV aufgezeichnet werden.

Darüber hinaus ist es begleitend zur Schadstoffanalytik sinnvoll, physiko-chemische Parameter des gepumpten Wassers wie elektrische Leitfähigkeit, Temperatur, pH-Wert, Sauerstoffgehalt und Redoxpotenzial aufzuzeichnen.

Zur Absicherung von Schätzwerten kann im Zuge eines IPV mit einem **Tracerversuch** auch die durchflusswirksame Porosität ermittelt werden. Hierzu wird über eine Messstelle im (radialstromigen) Erfassungsbereich des IPV ein Salztracer oder Farbstoff eingegeben. Gemessen und ausgewertet wird der Tracerdurchgang im gepumpten Wasser.

Die **Baustelleneinrichtung** sowie die Auslegung des Pumpsystems müssen einen sicheren Pumpbetrieb mit der geplanten Pumprate und eine fachgerechte Entnahme von Grundwasserproben ermöglichen.

Auswertung

Grundlage der Auswertung des IPV in Bezug auf Fahnenlage und Schadstofffracht ist eine möglichst genaue **hydraulische Auswertung** der Messwerte:

- Die hydraulischen Parameter **Transmissivität** und **Durchlässigkeitsbeiwert** werden aus den Messwerten des Absenkverlaufs (und Wiederanstiegs) ermittelt. Hierbei sollten möglichst sensitive Verfahren eingesetzt werden wie z.B. diagnostische Plots, mit denen Störeinflüsse durch nicht verfahrenskonforme Aquifer- und Randbedingungen erkannt und bei der Auswertung berücksichtigt werden können (vgl. Anhang C).
- Der **hydraulische Gradient** wird i. d. R. aus Grundwassergleichen gewonnen, die aus den durchgeführten Stichtagsmessungen der Grundwasserstände für den Aussagebereich konstruiert werden.
- Die **durchflusswirksame Porosität** kann aus dem Tracerdurchgang nach der Transportgleichung für radiale Strömung berechnet werden, wenn während des IPV im Nahbereich des Brunnens eine Tracereingabe erfolgte [4].

Isochronen, Fahnenlage und **Schadstoffverteilung** sowie die **Schadstofffracht** im Erfassungsbereich des IPV werden mit einem der o. a. Tools berechnet. Für die Pilotstandorte wurde hierzu das Programm C-SET verwendet.

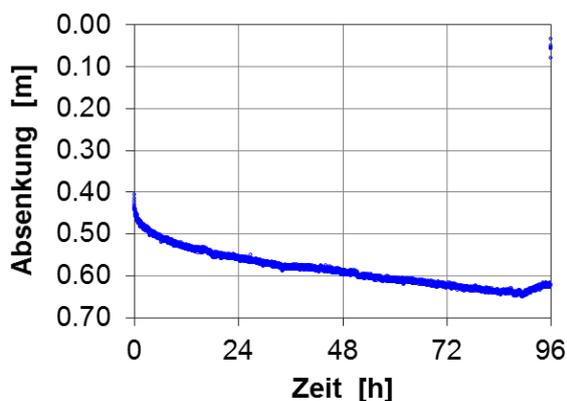
- Zunächst wird der wachsende Erfassungsbereich des IPV zu den Probenahmezeitpunkten als **Isochronen** berechnet.
- Im nächsten Schritt wird eine **Fahnenlage** ermittelt, deren in Stromstreifen aufgelöste Konzentrationsverteilung sich mit dem gemessenen Schadstoffdurchgang zur Deckung bringen lässt. Bei der Bestimmung von Fahnenlagen müssen die hinsichtlich ihrer Symmetrie häufig mehrdeutigen Konzentrationsverteilungen (links oder rechts vom Brunnen) möglichst widerspruchsfrei zu den Ergebnissen von benachbarten IPV und Vorinformationen über Schadstoffverteilungen im Grundwasser bzw. wahrscheinliche und unwahrscheinliche Emittenten kombiniert werden.
- Bei der Ermittlung der Schadstofffracht über den Kontrollquerschnitt werden die einzelnen Stromstreifenkonzentrationen multipliziert mit der Stromstreifenbreite, der Transmissivität sowie dem hydraulischen Gefälle aufsummiert. Bei überlappenden Erfassungsbereichen mehrerer IPV muss darauf geachtet werden, dass die Einzelfrachten überlappender Stromstreifen nicht doppelt berücksichtigt werden.

Anhang C: Hinweise zur Bestimmung der Durchlässigkeit

Die Durchlässigkeit als Quotient aus Transmissivität und Aquifermächtigkeit ist für die Bestimmung der Schadstofffracht neben der Schadstoffkonzentration die massgebende Grösse. Auch die Qualität der Planung und Auswertung von IPV hängt wesentlich davon ab, ob der Durchlässigkeitswert korrekt ermittelt wurde. Dies rückt Methoden in den Fokus, mit denen gleichzeitig überprüft werden kann, ob die Annahmen des Auswerteverfahrens – i. d. R. homogener infiniten Aquifer – mit den tatsächlichen Versuchsbedingungen übereinstimmen. Die Einbeziehung von Daten aus Versuchsphasen, in denen die Versuchsbedingungen mit den Verfahrensannahmen nicht übereinstimmen oder in denen Störeinflüsse auftreten (z. B. durch den Brunnenausbau, Klüfte, Leckagen, Aquiferränder), führt unweigerlich zu Fehlern.

Die gebräuchlichen Auswerteverfahren besitzen eine sehr unterschiedliche Sensitivität zur Identifizierung der Versuchsbedingungen. In der Reihenfolge der zunehmenden Sensitivität wird im Folgenden auf stationäre Gleichungen, instationäre Geradenverfahren sowie diagnostische Plots eingegangen. Mit steigender Sensitivität erhöhen sich jedoch auch die Anforderungen an die Qualität der Messdaten.

Stationäre Gleichungen (wie z. B. Brunnenformel nach Dupuit-Thiem) gehen davon aus, dass sich mit fortschreitender Pumpzeit eine Beharrung der Absenkung einstellt und die Transmissivität ausschliesslich vom Verhältnis Pumprate Q zu Absenkung s (im Beharrungszustand) abhängig ist. Das Verfahren setzt voraus, dass der Aquifer homogen ist und die Absenkung bis zu einem allenfalls näherungsweise bestimmbar Abstand R vom Brunnen (mit Brunnenradius r) reicht. Die Anwendung einer stationären Auswertung zeigt Abbildung C-1 am Beispiel der Absenkung beim IPV in Kb 05/3 (Standort A, Kap. 6.2.4):



Bestimmung der Transmissivität mithilfe einer stationären Brunnenformel am Beispiel des IPV in Kb 05/3

$$Q = 0.0043 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$s = 0.64 \text{ m (Absenkung n. 90 h)}$$

$$R/r = 2000 \text{ (übliche Näherung)}$$

$$T = \frac{Q}{2\pi \cdot s} \ln\left(\frac{R}{r}\right) = 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

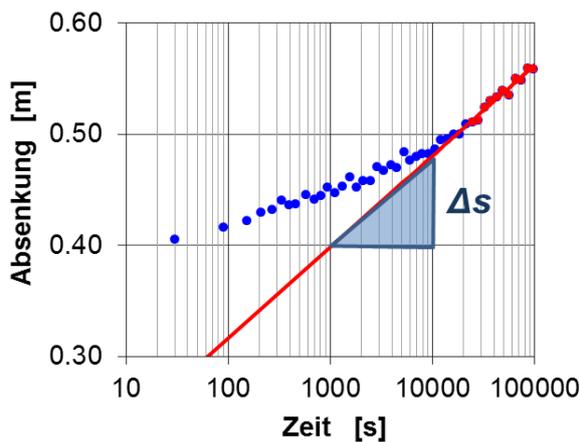
Abbildung C-1: Beispiel für eine stationäre Bestimmung der Durchlässigkeit

Besonders gravierende Fehler von einer Grössenordnung oder mehr können sich einschleichen, wenn – wie häufig üblich – die Absenkung im Brunnen zur Auswertung verwendet wird und diese grösser ausfällt, als sie aufgrund der Aquiferdurchlässigkeit zu erwarten wäre. Dies ist der Fall, wenn der Brunnen einen erhöhten Eintrittswiderstand aufweist, z. B. bei verockerten Filterrohren.

Schlussendlich bieten **stationäre Verfahren keine Sensitivität** für die tatsächlichen Versuchsbedingungen und damit keine Möglichkeit, die Verfahrensannahmen zu kontrollieren.

Instationäre Verfahren gehen davon aus, dass mit fortschreitender Pumpdauer der Grundwasserspiegel durch die Entnahme des im Aquifer gespeicherten Wasservorrats abgesenkt wird. Die Ausbreitung des Absenktrichters in homogen-infiniten Aquiferen wird durch die Theis-Gleichung beschrieben. Die Theis-Gleichung ist das Integral einer e-Funktion, die zur besseren Handhabung bei der Auswertung als Theis-Typkurve im Doppellog-Massstab dargestellt wird. Die Typkurvenauswertung basiert darauf, dass die Versuchsdaten im gleichen Massstab als Logarithmus der Absenkung gegen den Logarithmus der Zeit dargestellt und mit der Theis-Typkurve verglichen werden. Abweichungen der Versuchsdaten von der Theis-Typkurve sind jedoch im Doppellog-Massstab nur schwer zu erkennen.

Gebräuchlich für die Pumpversuchsauswertung ist eine Vereinfachung der Theis-Gleichung, die als **Geradlinienverfahren nach Cooper & Jacob** bekannt ist. Unter homogen-infiniten Bedingungen verläuft im Halbplot die Absenkung gegen den Logarithmus der Zeit geradlinig, wobei sich der Zusammenhang mit der Transmissivität aus der Geradensteigung Δs über eine logarithmische Dekade ergibt. Abbildung C-2 zeigt die Anwendung des Geradlinienverfahrens, wiederum für den Datensatz des IPV in Kb 05/3 (Standort A, Kap. 6.2.4):



Bestimmung der Transmissivität mit dem Geradlinienverfahren nach Cooper & Jacob am Beispiel des IPV in Kb 05/3

$$Q = 0.0043 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta s = 0.082 \text{ m (Geradensteigung)}$$

$$T = 0.183 \frac{Q}{\Delta s} = 9.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

Abbildung C-2: Beispiel für eine instationäre Auswertung mit dem Geradlinienverfahren

Durch den geradlinigen Absenkverlauf unter homogen-infiniten Bedingungen können die Versuchsdaten im Prinzip hinsichtlich zutreffender Annahmen überprüft werden. Leider bilden im Halbplot auch andere Aquifer- und Randbedingungen längere oder kürzere geradlinige Datenabschnitte aus. Bei der Auswertung von Brunnendaten können diese in der anfänglichen Phase der Entleerung des Brunnenspeichers zusätzlich einen geradlinigen Abschnitt ausbilden. In der Folge können mehrere geradlinige Abschnitte mit sehr unterschiedlichen Steigungen auftreten. Somit können mit dem Geradlinienverfahren Datenabschnitte, die die homogen-infiniten Verfahrensvoraussetzungen erfüllen, nicht immer eindeutig identifiziert werden.

Das **instationäre Geradlinienverfahren** weist somit allenfalls eine **mittlere Sensitivität** für die Identifizierung von Versuchsbedingungen auf, insbesondere wenn es zur Auswertung von Brunnendaten verwendet wird.

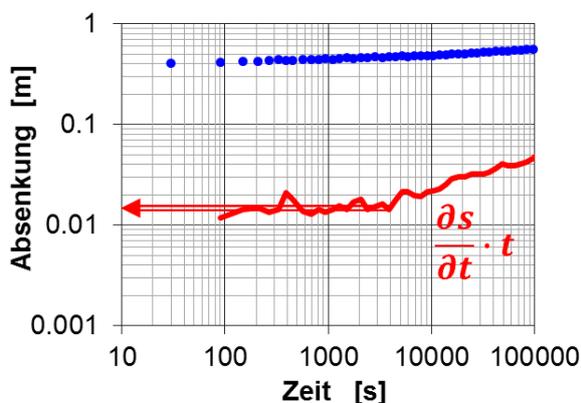
Der **diagnostische Plot** ist analog zum Theis-Verfahren ein instationäres Verfahren, bei dem die Messdaten der Absenkung s im Doppellog-Diagramm gegen die Zeit t dargestellt werden.

Als „mathematische Lupe“, die Verlaufsänderungen der Absenkkurve verstärkt darstellt, wird zusätzlich die 1. Ableitung der Absenkkurve $\frac{\partial s}{\partial t} \cdot t$ gegen die Zeit t aufgetragen.

Für Theis-Bedingungen bildet die Ableitung ein Plateau (Steigung = 0). Mit der Ableitung der Daten können somit Versuchsphasen identifiziert werden, für die die Verfahrensannahmen homogen-infinit zutreffen. Anhand spezifischer Steigungen und typischer Verläufe der Ableitung können eine Vielzahl von Versuchsbedingungen identifiziert werden, die von homogen-infiniten Aquiferbedingungen abweichen. Zur Bestimmung von Brunnenkennwerten und Kennwerten inhomogener Aquifertypen und Randbedingungen stehen Typkurvenverfahren zur Verfügung [6]. Für die Bestimmung der Transmissivität ist jedoch lediglich der im diagnostischen Plot ablesbare Ordinatenwert des Ableitungsplateaus erforderlich.

Zur Auswertung mit dem diagnostischen Plot stehen kommerzielle Programme zur Verfügung. Für die Pilotversuche wurden die diagnostischen Plots jedoch mit einem einfachen Excel-sheet erzeugt. Die Arbeitsschritte bei der Auswertung mit dem diagnostischen Plot werden am Beispiel des IPV in Kb 05/3 erläutert (Abbildung C-3):

- Auftragung der Absenkkurve (blau)
- Glättung der Absenkkurve (z. B. mithilfe dem gleitenden Mittelwert)
- Bildung der Ableitungswerte aus der Steigung zwischen zwei benachbarten Punkten (rot)
- Identifizierung der Plateauphase (Gültigkeit der homogen-infiniten Verfahrensannahme)
- Berechnung der Transmissivität aus dem Ordinatenwert des Plateaus



Bestimmung der Transmissivität mit dem diagnostischen Plot am Beispiel des IPV in Kb 05/3 (Standort A, Kap. 6.2.4)

$$Q = 0.0043 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} \cdot t = 0.014$$

$$T = \frac{Q}{4\pi} \cdot \frac{1}{\frac{\partial s}{\partial t} \cdot t} = 2.4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

Abbildung C-3: Beispiel für eine Auswertung mit dem diagnostischen Plot

Das Verfahren des **diagnostischen Plots** bietet durch die **hohe Sensitivität** für die vorliegenden Versuchsbedingungen die grösste Sicherheit bei der Ermittlung der Transmissivität und der daraus abgeleiteten Durchlässigkeit.

Fazit:

- Das Ergebnis der Durchlässigkeitsbestimmung ist vom Auswerteverfahren abhängig!
- Die Qualität des Ergebnisses steigt mit der Sensitivität des Auswerteverfahrens für die vorliegenden Aquifer- und Versuchsbedingungen, weil auf diese Weise ausschliesslich verfahrenskonforme Datenabschnitte in die Bestimmung der Durchlässigkeit eingehen.