



Kanton Zürich
Baudirektion



ChloroNet Projektgruppe Immissionspumpversuche

Ergebnisse

Bettina Flury
AWEL Amt für Abfall,
Wasser, Energie und Luft

24. November 2016

9. Fachtagung ChloroNet



Inhalt

1. Wichtigste Ergebnisse des Projekts

Bettina Flury

- Aufgabenstellung und Ziele
- Anwendungshilfen

2. Sensitivitätsanalyse

Daniel Hunkeler

- Einfluss von hydrogeologischen Parametern

3. Ausführung von IPV anhand von zwei Pilotprojekten im Kt. Bern

Jürgen Abrecht

- Versuchsdurchführung
- Auswertung und Beurteilung

4. Fazit

Bettina Flury

24. November 2016

9. Fachtagung ChloroNet

2



Was sind Immissionspumpversuche (IPV)?

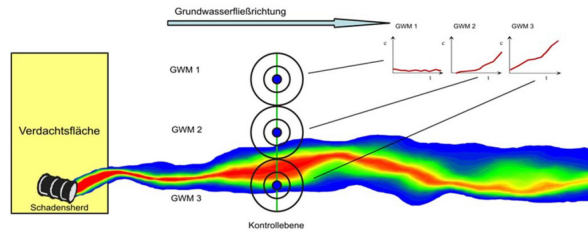


Abb. 2.2: Prinzip der instationären Immissionsmessung (nach Teutsch et al., 2000)

IPV ist ein hydrogeologischer Feldversuch zur Bestimmung der Schadstofffracht über eine Kontrollebene in einem Aquifer

- Quantitative Bestimmung der Konzentrationsverteilung entlang Kontrollebene
- Rückschlüsse auf Schadstoffahnen und Schadstoffherde

24. November 2016

9. Fachtagung ChloroNet

3



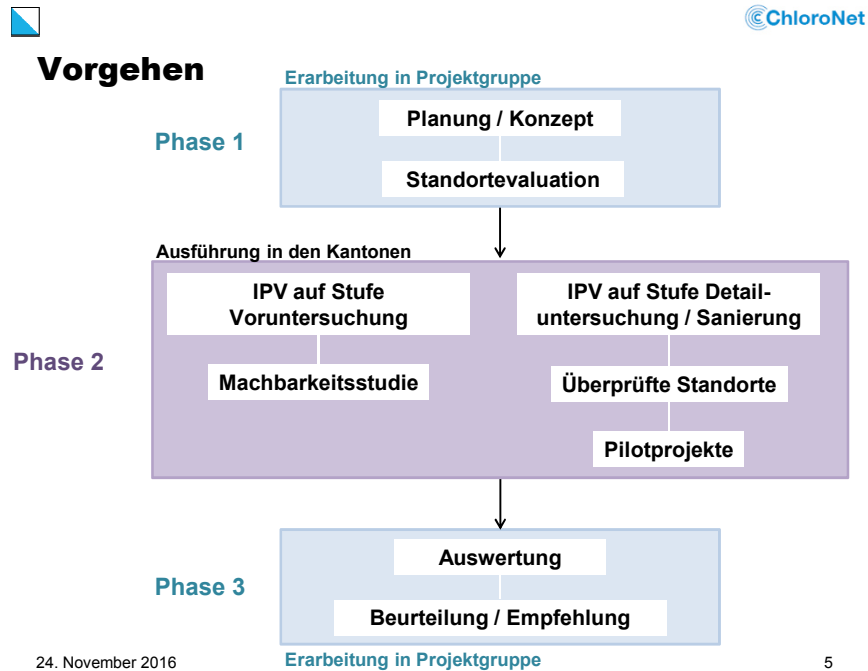
Ziel der Projektgruppe

- Prüfen der Anwendbarkeit in der CH in Bezug auf alle alllastenrechtlichen Stufen
- Definieren von Rahmenbedingungen
 - hydrogeologische Verhältnisse
 - Standorttyp
 - Ausführung
- Durchführen von Pilotprojekten und Evaluation
- Verfassen eines Expertenberichts

24. November 2016

9. Fachtagung ChloroNet

4

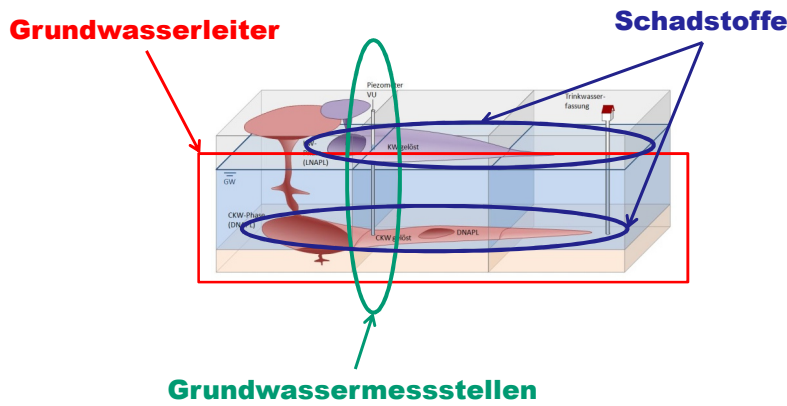


- Anwendungshilfen**
- Anforderungen an den Standort (Kriterien)
 - welche Kriterien sind zwingendermassen zu erfüllen
 - welche Kriterien sind kostenrelevant
 - Was ist sonst noch zu berücksichtigen
 - Entscheidungshilfe zur Planung (Entscheidungsbaum)
 - Sensitivitätsanalyse
 - «Kochbuch» für Planung, Durchführung und Auswertung
24. November 2016 6



Anforderungen an den Standort

Anwendungskriterien

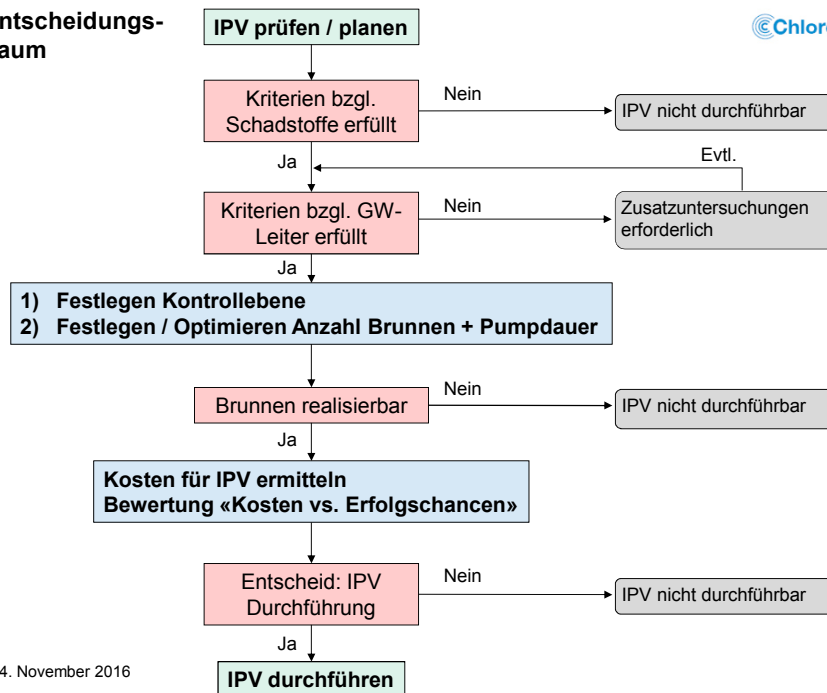


24. November 2016

9. Fachtagung ChloroNet

7

Entscheidungsbaum



24. November 2016

8



«Kochbuch» (Anhang B)

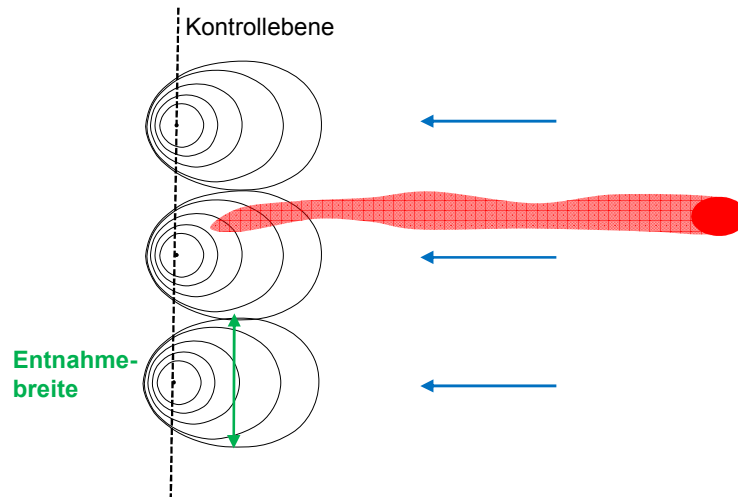
- Werkzeuge
 - IPV-Tool (stark vereinfachend, nur bei geringer GW-Strömung)
 - C-SET (Werkzeug der Pilotversuche, bei nicht vernachlässigbarer GW-Strömung)
- Planung
 - Pumprate und Versuchsdauer
 - Probenanzahl
 - Anzahl Versuche
- Durchführung
 - Technische Ausführung
 - Begleitende Versuche (Tracerversuch)
- Auswertung
 - Fahnenlage
 - Schadstoffkonzentration und Schadstofffracht

Sensitivitätsanalyse

Einfluss von hydrogeologischen Parametern

Daniel Hunkeler
Université de Neuchâtel
CHYN

IPV: Bedeutung der Entnahmebreite



24. November 2016

9. Fachtagung ChloroNet

11

Entnahmebreite: Berechnungsmethode

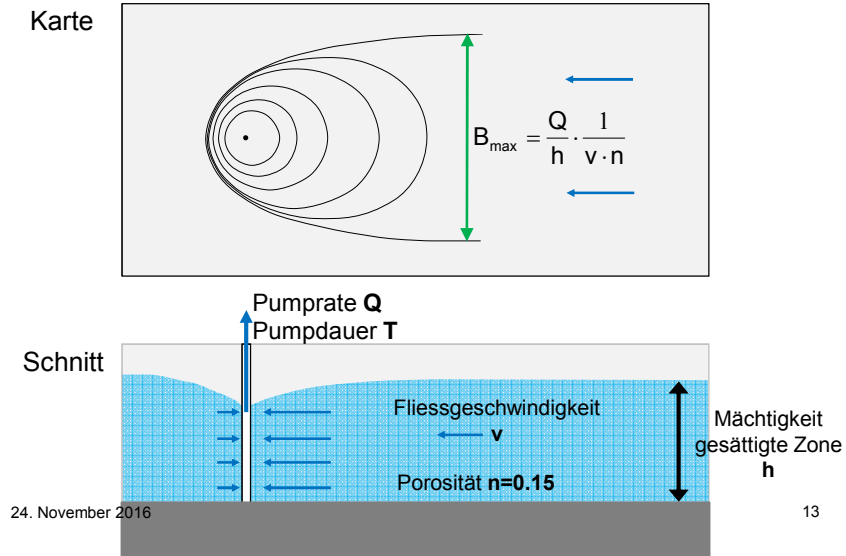
- **Analytische Lösung der Strömungsgleichung für Fließfeld um einen Pumpbrunnen**
- **Erlaubt sehr rasch den Einfluss von verschiedenen hydrogeologischen Parametern auf Entnahmebreite abzuklären**
- **Vereinfachende Annahmen**
 - Homogener Untergrund auf Skala des IPVs
 - Versuchsbrunnen erschliesst gesamte Aquifermächtigkeit
 - Keine gegenseitige Beeinflussung von mehreren IPVs

24. November 2016

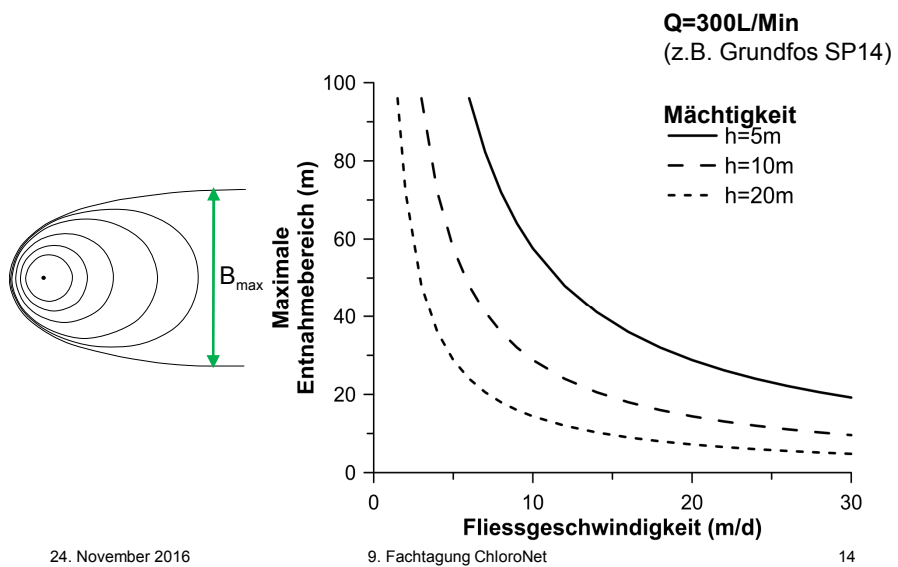
9. Fachtagung ChloroNet

12

Faktoren die Entnahmbreite beeinflussen

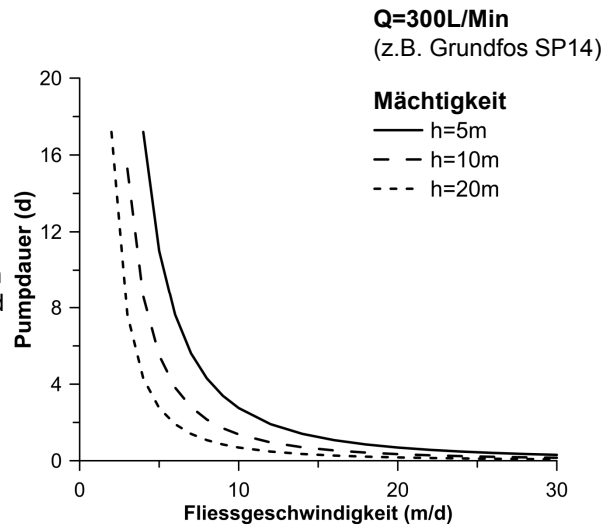
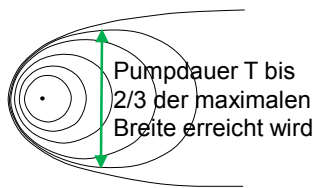


Welche maximale Entnahmbreite kann erreicht werden?





Wie rasch nimmt die Entnahmebreite zu?



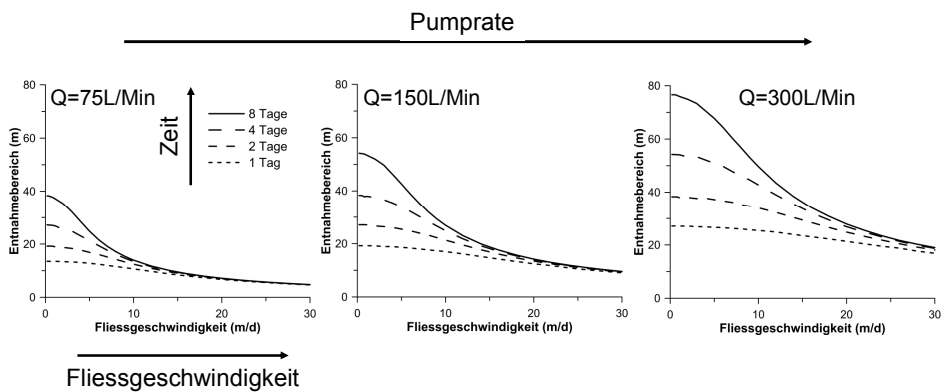
24. November 2016

9. Fachtagung ChloroNet

15



Welche Entnahmebreite kann erreicht werden?
Beispiel Aquifer-Mächtigkeit h=5m



24. November 2016

9. Fachtagung ChloroNet

16

Schlussfolgerungen - Allgemein

- **Fliessgeschwindigkeit hat einen starken Einfluss auf die maximale Entnahmebreite und wie rasch diese erreicht wird**
-> sollte für Planung von IPV bekannt sein
- **Bei hoher Fliessgeschwindigkeit (>10m/d) und grosser Mächtigkeit (>15m) kann mit üblichen Pumpen nur eine geringe Entnahmebreite erreicht werden (<10m)**
-> IPV nur bedingt sinnvoll

24. November 2016

9. Fachtagung ChloroNet

17

Schlussfolgerungen – Dimensionierung von IPVs

- **Bei hoher Fliessgeschwindigkeit (>10m/d)**
 - Entnahmebreite ist proportional zur Pumprate
-> starke Pumpe verwenden
 - Maximale Breite wird rasch erreicht
-> längere Pumpdauer bringt keinen Gewinn
- **Bei geringerer Fliessgeschwindigkeit (<10m/d)**
 - Entnahmebreite kann durch längeres Pumpen weiter erhöht werden
 - Diese nimmt aber nur in etwa mit der Quadratwurzel der Pumpdauer zu

24. November 2016

9. Fachtagung ChloroNet

18

Pilotstandorte IPV auf Stufe DU/SP/S (Kt. Bern)

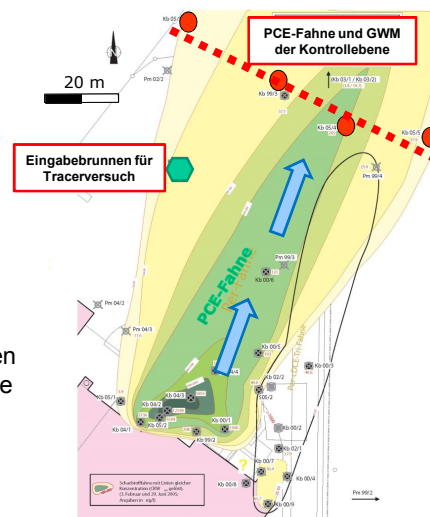
Ergebnisse

Jürgen Abrecht, GEOTEST AG

9. Fachtagung ChloroNet / 24. November 2016

Standort 1: Kontrollebene

- Kontrollebene: 4 GWM als vollkommene Brunnen 4.5"
- Seit 2011: Multilevel-Messungen für Frachtberechnungen. Ermöglichen Vergleich der mittels unterschiedlicher Methoden abgeschätzten Frachten.
- Fahnenlage aufgrund der mehrjährigen Messungen in der Kontrollebene sowie zusätzlichen GWM bekannt.



9. Fachtagung ChloroNet / 24. November 2016

20

GEOTEST BOLOGNESA • NUTZNETZ /
BODENPROBEN • VERFAHREN •
BEREITUNG • AUSWERTUNG

ChloroNet

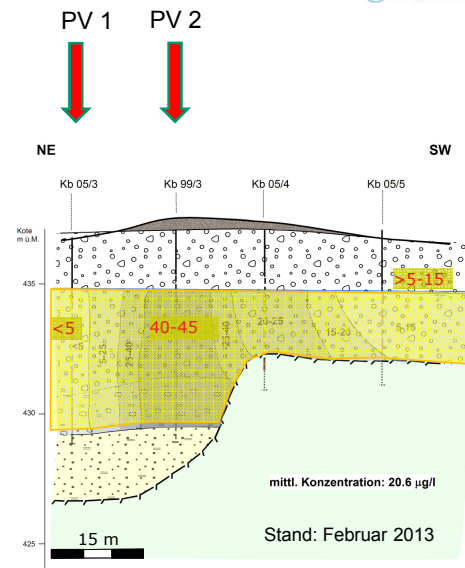
Standort 1: Methodenvergleich

20 m

1. Bestehende Frachtaberschätzung
Aus inter-/extrapolierten
Multilevel-Messungen im
Durchflussquerschnitt
(= Kontrollebene)

2. Fahnenbegrenzung – und lage

Ergeben beide Methoden konsistente
Resultate und welche Folgerungen
lassen sich daraus ziehen?



9. Fachtagung ChloroNet / 24. November 2016

21

GEOTEST BOLOGNESA • NUTZNETZ /
BODENPROBEN • VERFAHREN •
BEREITUNG • AUSWERTUNG

ChloroNet

Standort 1: Technische Daten zum IPV

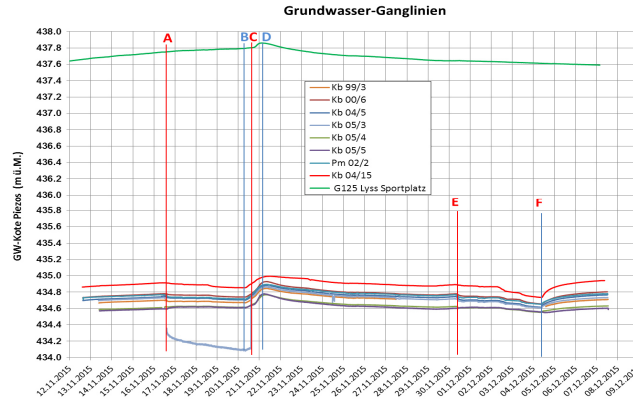
	1. IPV: Kb 05/3	2. IPV: Kb 99/3
Pumprate Q (m³/h)	15.45	15.48
Pumprate Q (ℓ/min)	257	258
Gesamtfördermenge (m³)	1'483	1'486
Pumpzeit (h)	96	96

Zeitraum zwischen beiden PV: 10 Tage

9. Fachtagung ChloroNet / 24. November 2016

22

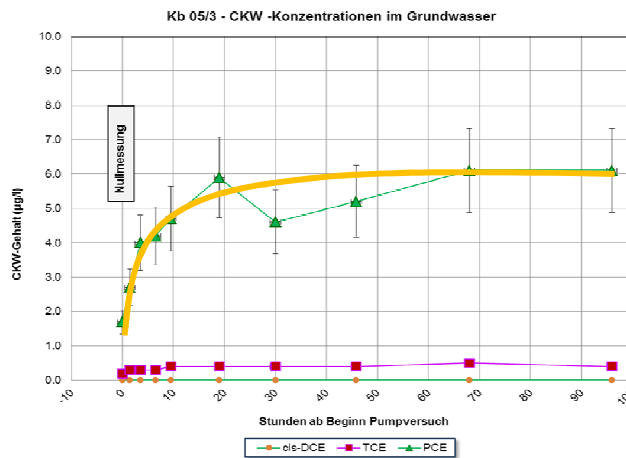
Standort 1: GW-Ganglinien beim IPV
 Natürliche Schwankungen werden bei Auswertung korrigiert



9. Fachtagung ChloroNet / 24. November 2016

23

Standort 1: CKW-Gehalte
 1. PV in Kb 05/3: 10 Proben innerhalb 96 Stunden.

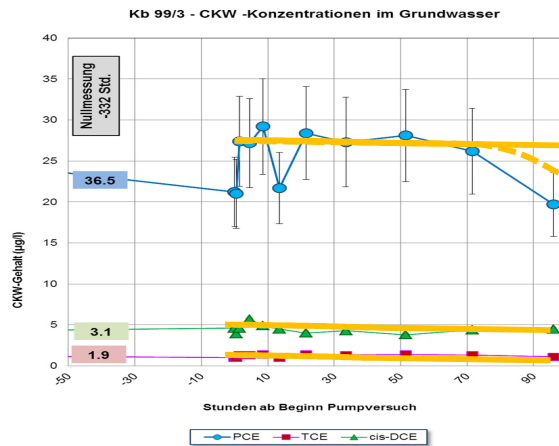


9. Fachtagung ChloroNet / 24. November 2016

24

Standort 1: CKW-Gehalte

2. PV in Kb 99/3: 11 Proben innerhalb 96 Stunden.



9. Fachtagung ChloroNet / 24. November 2016

25

Standort 1: Hydraulische Auswertung der PV

Die errechneten **Durchlässigkeitsbeiwerte** sind :

1. Pumpversuch:

Aus Kb 05/3: $k_f = 5.2 \times 10^{-3} \text{ m/s}$

Aus Kb 99/3: $k_f = 3.7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$

Aus Kb 04/5: $k_f = 3.7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$

Aus Pm 02/2: $k_f = 3.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$

2. Pumpversuch:

Aus Kb 99/3: $k_f = 4 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ (aus Wiederanstieg)



Repräsentativer Durchlässigkeitsbeiwert
 $k_f = 5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$

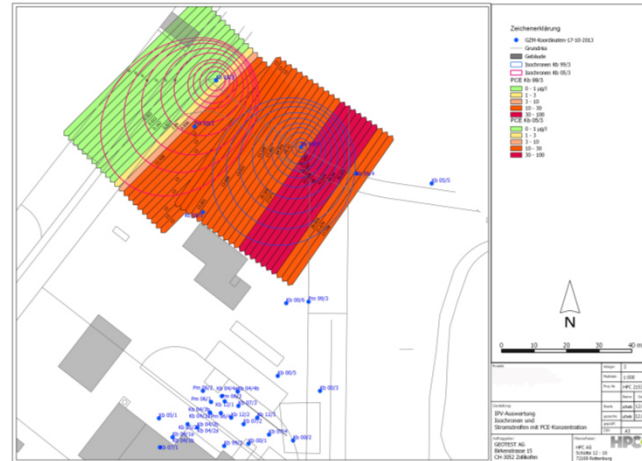
Effekt. Porosität:

$n_0 = 0.18$

9. Fachtagung ChloroNet / 24. November 2016

26

Standort 1: Fahnenlage und Schadstoff-Frachten



9. Fachtagung ChloroNet / 24. November 2016

27

Standort 1: Fahnenlage und Schadstoff-Frachten

Aus dem 2. PV errechnete Maximalkonzentration:
48 µg/l im Fahnenzentrum unmittelbar östlich von
Kb 99/3.

Sehr gute Übereinstimmung mit den bisherigen
Daten (Multilevel: 40- 45 µg/l) .

Standort 1: Schadstoff-Frachten

Unter Berücksichtigung der Überlappung der Isochronen aus beiden IPV berechnete durchströmende Fracht beträgt
 $M_{\text{PCE}} \approx 4.5 \text{ g/d}$

Entspricht einer **jährlichen Fracht von 1.6 kg PCE.**

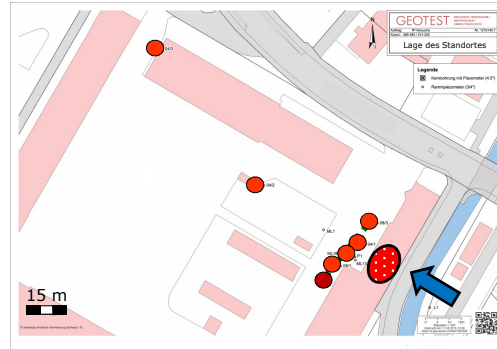
Standort 1: Schadstoff-Frachten - Methodenvergleich

	Fracht aus IPV	Fracht aus Multilevel	
	1.6 kg	3-4 kg	1.4 kg
k_f	$5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$	$6 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$	$5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$
i	0.002	0.004	0.002

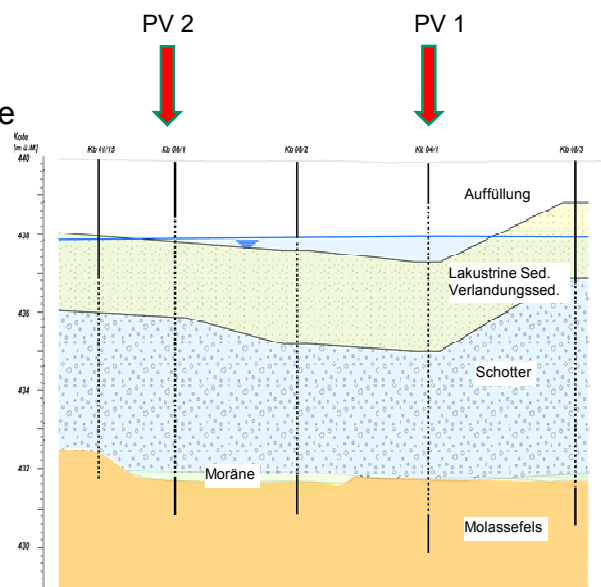
Standort 2: Die Lage

- Genutzter Standort
- Keine DNAPL
- Flurabstand 2.0 m
- Stauer 8 - 12 m u.T.
- GW-Mächtigkeit: 5 – 6 m
- $k_f \sim 7 \times 10^{-4}$ m/s

- 7 Kleinfiterbrunnen im Abstrom
(GWM à 4.5")
- Kontrollebene mit 5 GWM ca. 10 m
vom Herd



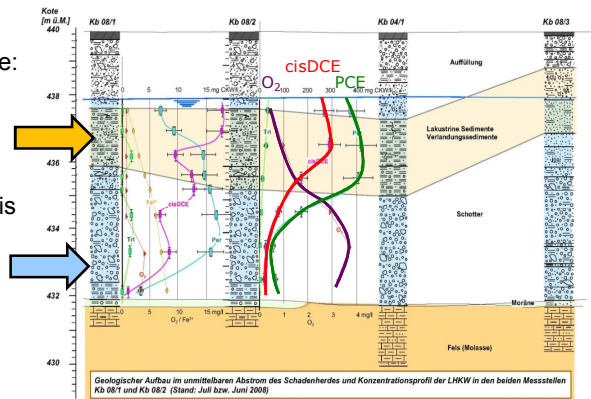
Standort 2: Kontrollebene



Standort 2: Kontrollebene

GW-Leiter:

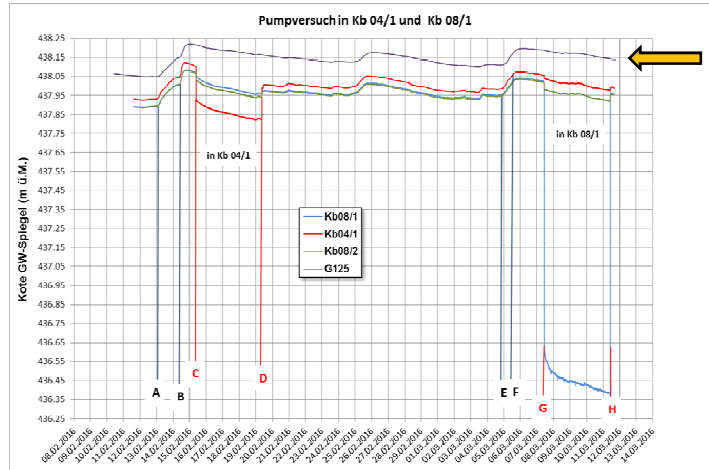
- geringdurchlässige Sedimente: sehr hohe Belastung (bis >3'000 µg/l), Anaerob.
- unten gut durchlässige Schotter: tiefere Belastung (bis 200 µg/l), Aerob.



Standort 2: Technische Daten zum IPV

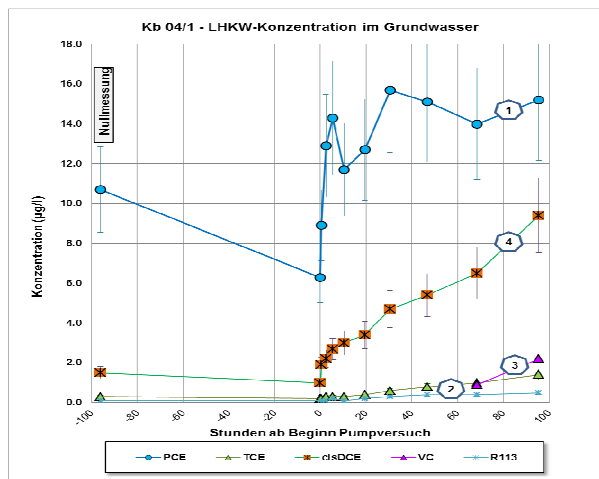
	1. IPV: Kb 04/1	2. IPV: Kb 08/1
Pumprate Q (m³/h)	7.75	6.72
Pumprate Q (ℓ/min)	129	112
Gesamtfördermenge (m³)	744	646
Pumpzeit (h)	96	96

Standort 2: GW-Ganglinien beim IPV
 Natürliche Schwankungen werden bei Auswertung korrigiert



9. Fachtagung ChloroNet / 24. November 2016

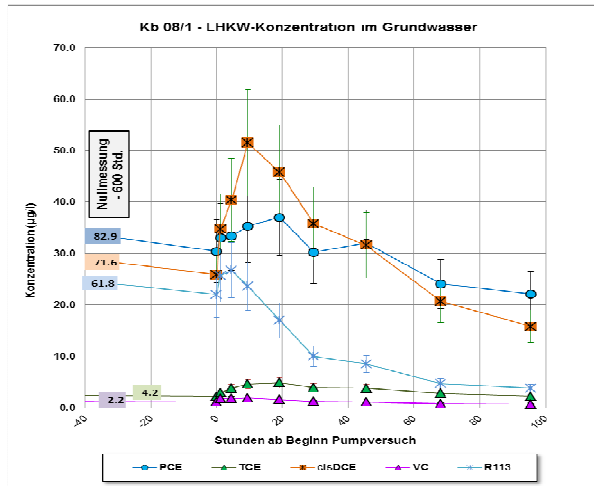
Standort 2: CKW-Gehalte
 1. PV in Kb 04/1: 10 Proben innerhalb 96 Stunden.



9. Fachtagung ChloroNet / 24. November 2016

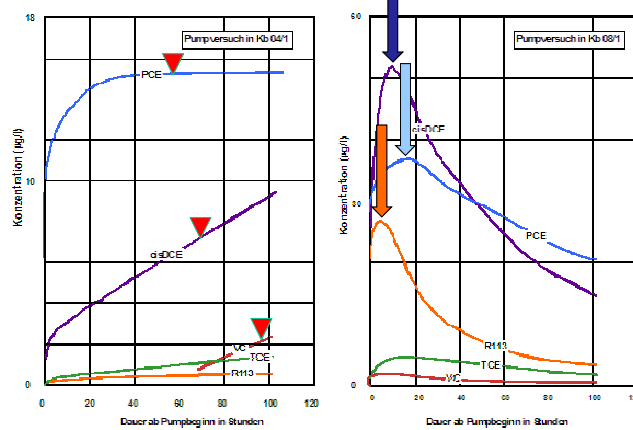
Standort 2: CKW-Gehalte

2. PV in Kb 08/1: 9 Proben innerhalb 96 Stunden.



9. Fachtagung ChloroNet / 24. November 2016

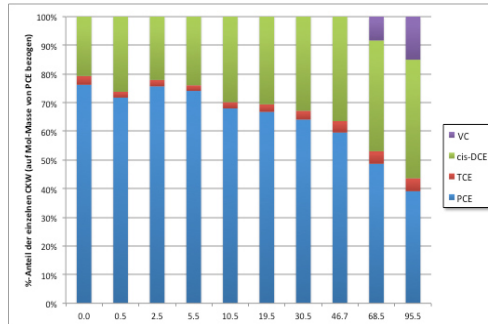
Standort 2: CKW-Gehalte – geglättete Ganglinien



- Kb 04/1: Brunnen liegt praktisch schon ausserhalb der Fahne.
- Unterschiedliches Verhalten der einzelnen Schadstoffe (z.B. Zeitpunkt Maxima).
- Kb 08/1: Pumpbrunnen liegt randlich einer schmalen Schadstoffahne.

9. Fachtagung ChloroNet / 24. November 2016

Standort 2: unterschiedliches Verhalten der Schadstoffe



1. PV: Kb 04/1

- Zwei Schichten! Oben gering durchlässig – hohe Gehalte und Abbau
- Unten gut durchlässig, kein Abbau, Verdünnung
- Mögliche Erklärung: Beim PV strömen sukzessiv Abbauprodukte aus oberer Schicht zu durch Drainageeffekt infolge Absenkung.
- **IPV-Ergebnisse repräsentieren weitgehend untere gut durchlässige Schicht.**
- **Vertikale Unterschiede in den Konzentrationen können mittels IPV nicht aufgelöst werden.**

9. Fachtagung ChloroNet / 24. November 2016

39

Standort 2: Hydraulische Auswertung der PV

Die errechneten **Durchlässigkeitsbeiwerte** sind :

- | | | |
|-----------------|--------------|--|
| 1. Pumpversuch: | Aus Kb 04/1: | $k_f = 2.7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ |
| | Aus Kb 08/1: | $k_f = 3.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ |
| | Aus Kb 08/2: | $k_f = 3.3 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ |
| 2. Pumpversuch: | Aus Kb 08/1: | $k_f = 1.6 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ |
| | Aus Kb 04/1: | $k_f = 3.6 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ |
| | Aus Kb 08/2: | $k_f = 4.5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ |

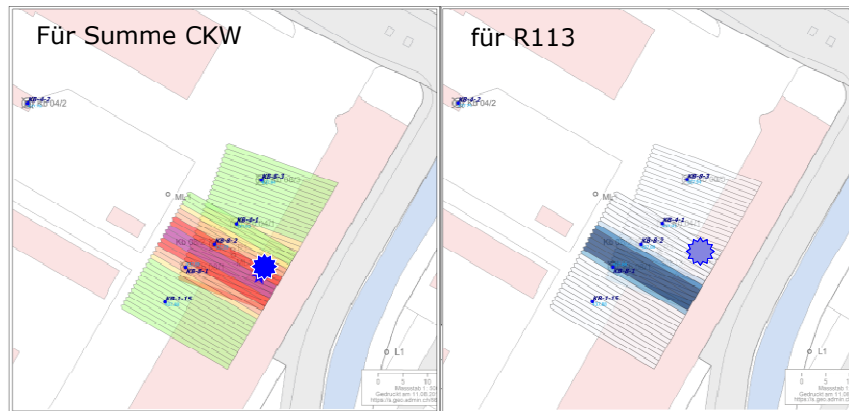


Mittlerer Durchlässigkeitsbeiwert
 $k_f = 3 \times 10^{-3} \text{ m/s}$

Effekt. Porosität:
 $n_0 = 0.20$

9. Fachtagung ChloroNet / 24. November 2016

40

Standort 2: Fahnenlage Berechnete Stromstreifenkonzentrationen


9. Fachtagung ChloroNet / 24. November 2016

41

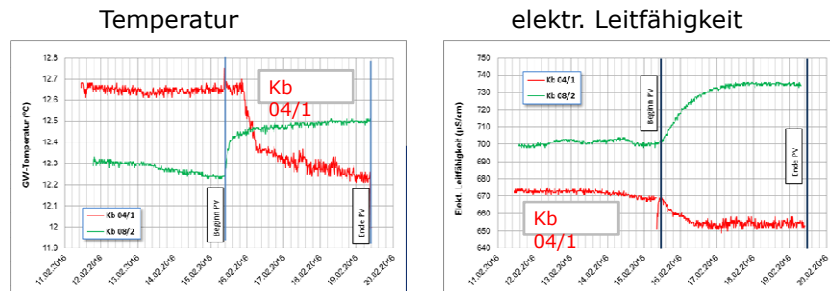
Standort 2: Schadstoff-Frachten - Methodenvergleich

	Fracht aus 1. PV	Fracht aus 2. PV	Frühere Schätzung
Σ(LHKW)	1.6 kg	2.5 kg	1.7 – 3.5 kg
R113	0.04 kg	0.4 kg	0.1 – 0.5 kg

9. Fachtagung ChloroNet / 24. November 2016

42

Standort 2: Verhalten von Temperatur und elektr. Leitfähigkeit im 1. PV im Pumpbrunnen Kb 04/1 und Messpegel Kb 08/2

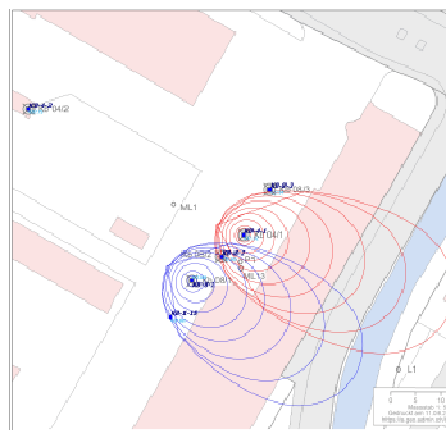


- Links: T nimmt im Pumpbrunnen ab, in Kb 08/2 zu.
- Rechts: Leitf. nimmt im Pumpbrunnen auf konstanten Wert ab, in Kb 08/2 gegenläufiges Verhalten.
- Beobachtungen nur mit GW-Sonden möglich → **ergeben Zusatzinformationen über lokale GW-Verhältnisse**

9. Fachtagung ChloroNet / 24. November 2016

43

Standort 2: unterschiedliches Verhalten von Temperatur und elektr. Leitfähigkeit im 1. PV in Kb 04/1 und Kb 08/2 aufgrund zunehmenden bzw. fehlenden Einflusses des Uferinfiltrats des Oberflächengewässers.



T (GW): 12.3. – 12.7 °C
 T (Bach): 4.5°C

Lf (GW): 670 – 700 µS/cm
 Lf (Bach): 570 µS/cm

9. Fachtagung ChloroNet / 24. November 2016

44

Kosten

Total Fr. 80'000.—

1. Standort 45'000.—
2. Standort 35'000.— (inkl. 1 Bohrung)

Meinen Dank an



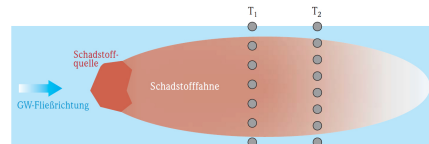
**... Uwe Hekel für Beratung und
Auswertung des IPV mit C-Set**



**... Irina Przybylski für die
Feldarbeiten – auch 2 Uhr
morgens.**



Fazit 1: Methode



IPV-Methode erlaubt:

- Lückenlose Erfassung des Schadstoffmassenflusses
- Bestimmung der Fracht mittels einer direkten Methode

Für die erfolgreiche Anwendung

- sind weitgehende Standortkenntnisse notwendig
- müssen die Anwendungskriterien erfüllt sein, insbesondere:
 - Genügend hohe Schadstoffkonzentrationen
 - Günstige hydrogeologische Bedingungen



Fazit 2: Anwendbarkeit in der Schweiz

- Hydrogeologie in der Schweiz ist anders...
 - ...als in Baden-Württemberg
 - Mittelländische Lockergesteine weisen häufig steile Fließgradienten und hohe Durchlässigkeiten auf
 - Zu grosse oder zu geringe Aquifermächtigkeiten
 - Kluft- oder Karstgrundwasserleiter scheiden à priori aus
 - **Anwendungskriterien häufig nicht erfüllt**
- Relativiert wurde
 - die Wichtigkeit eines homogenen Grundwasserleiters (ist in Lockergesteinsvorkommen selten ideal)
 - die Bedeutung von Grundwasserspiegelschwankungen



Fazit 3: lessons learned

- Anwendung von IPV wird primär auf Stufe DU empfohlen
 - Kenntnisstand auf Stufe VU häufig nicht ausreichend
 - Kosten-Nutzen-Verhältnis schlecht
- Ideale Standorte gibt's fast nicht, mögliche Standorte für die Pilotprojekte waren teils schwierig zu finden
- Durchführung an zwei Pilotstandorten erfolgreich, plausible Resultate erhalten
- Anwendung von IPV zwar eher komplex, Resultate sind aber robust und belastbar
- Wichtig: vorgängige Kosten / Nutzen Abwägung



Zu guter Letzt

- Sensitivitätsanalyse zeigt die Bedeutung gewisser hydraulischer Parameter → bei Versuchsplanung berücksichtigen
 - wichtig, dass der Durchlässigkeitsbeiwert K_f richtig bestimmt wird (häufig: unzureichende Messverfahren / Auswerteverfahren)

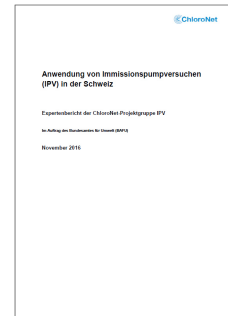


Dies führt zu:

- **fehlerhaften Grundlagen**
- **falscher Versuchsplanung und Ergebnissen**
- **falscher Beurteilung**



Vielen Dank!



Mitglieder der Arbeitsgruppe:

- Jürgen Abrecht GEOTEST AG
- Gabriele Büring PL ChloroNet
- Bettina Flury AWEL Zürich (Leitung)
- Daniel Hunkeler CHYN, Université de Neuchâtel
- Walter Labhart Dr. Heinrich Jäckli AG
- Monika Schwab-Wyssner BAFU, Boden und Biotechnologie /
 PL ChloroNet
- Uwe Hekel HPC AG (Externer Experte und
 Schlussredaktion)

24. November 2016

9. Fachtagung ChloroNet

51