Fachsektion Hydrogeologie e.V.

in der DGGV e.V.

Fortbildungsveranstaltung

Tracermethoden in der Hydrogeologie

Grundlagen und Innovationen

Referenten

Prof. Dr. Nico Goldscheider, Dr. Nadine Göppert

15. Oktober 2020

Online-Kurs

FH-DGGV

FH-DGGV-Fortbildung: Online-Kurs

Tracermethoden in der Hydrogeologie: Grundlagen und Innovationen

15. Oktober 2020

Nico Goldscheider & Nadine Göppert

Institut für Angewandte Geowissenschaften – Abteilung Hydrogeologie – Prof. Dr. Nico Goldscheider

KIT – Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

www.kit.edu

Programm

09:00 – 10:00	1. Einführung, Grundbegriffe, Markierungsstoffe und Analysenmethoden *Nico Goldscheider*
10:00 – 10:15	Pause
10:15 – 11:15	2. Praktische Durchführung von Markierungsversuchen *Nico Goldscheider*
11:15 – 12:00	3. Labor- und Feldgeräte *Nadine Göppert*
12:00 – 13:00	Mittagspause
13:00 – 14:30	4. Auswertung und Interpretation von Markierungsversuchen *Nico Goldscheider*
14:30 – 14:45	Pause

2

Programm

14:45 – 15:30	5. Bohrloch-Methoden *Nadine Göppert*
15:30 – 16:00	Pause
16:00 – 17:30	6. Rechnerübungen mit CXTFIT (s. Hinweis unten) *Nico Goldscheider & Nadine Göppert*
17:30	Kurze Abschlussdiskussion, Hinweise zur Evaluierung, Verabschiedung, Ende des Online-Kurse

Für Rechnerübungen bitte vorher die benötigte Software installieren (siehe Hinweise und Links auf der Kurs-Website)

3

Ausgewählte Literatur (1)

Auckenthaler A, Raso G, Huggenberger P (2002) Particle transport in a karst aquifer: natural and artificial tracer experiments with bacteria, bacteriophages and microspheres. Water Science and Technology 46(3): 131-138.

Behrens H et al. (2001) Toxicological and ecotoxicological assessment of water tracers. Hydrogeology Journal (2001) 9: 321–325.

Benischke R, Goldscheider N, Smart C (2007) Tracer techniques. In: Goldscheider N & Drew D (Eds.) Methods in Karst Hydrogeology. London: Taylor & Francis: 147-170.

Ender A, Goeppert N, Goldscheider N (2018) Spatial resolution of transport parameters in a subtropical karst conduit system during dry and wet seasons. Hydrogeology Journal, 26(7): 2241–2255

Fahrmeier N, Goeppert N, Goldscheider N (2021) Comparative application and optimization of different single borehole dilution test techniques. Hydrogeology Journal, accepted.

Field MS (2003) A review of some tracer-test design equations for tracer-mass estimation and sample-collection frequency. Environmental Geology, 43(8): 867-881.

Field SM & Pinsky PF (2000) A two-region nonequilibrium model for solute transport in solution conduits in karstic aquifers. Journal of Contaminant Hydrology, 44: 329-351.

Goeppert N & Goldscheider N (2008) Solute and colloid transport in karst conduits under low and high flow conditions. Ground Water, 46(1): 61-68.

Goeppert N, Goldscheider N (2019) Improved understanding of particle transport in karst groundwater using natural sediments as tracers. Water Research 166, 115045

Ausgewählte Papers befinden sich im Download-Bereich der Kurs-Website.

4

Ausgewählte Literatur (2)

Goeppert N, Goldscheider N, Berkowitz B (2020) Experimental and modeling evidence of kilometer-scale anomalous tracer transport in an alpine karst aquifer. Water Research 178 (2020) 115755

Goeppert N, Hoetzl H (2010) Precise method for continuous measurement of fluorescent microspheres during flow. Hydrogeology Journal, 18(2): 317-324.

Goldscheider N (2005) Fold structure and underground drainage pattern in the alpine karst system Hochifen-Gottesacker. Eclogae Geologicae Helvetiae 98 (2005): 1-17.

Goldscheider N, Drew D (Eds.) (2007) Methods in Karst Hydrogeology. International Contributions to Hydrogeology, 26. London, Taylor & Francis, 264 pp.

Goldscheider N, Hötzl H, Käss W & Ufrecht W (2003) Combined Tracer Tests in the Karst Aquifer of the Artesian Mineral Springs of Stuttgart, Germany. Env. Geol., 43: 922-929.

Goldscheider N, Meiman J, Pronk M, Smart C (2008) Tracer tests in karst hydrogeology and speleology. International Journal of Speleology, 37(1): 27-40.

Goldscheider N, Poté J, Haller L, Wildi W & Zopfi J (2007) Characterizing water circulation and contaminant transport in Lake Geneva using bacteriophage tracer experiments and limnological methods. Environmental Science & Technology, 41: 5252-5258.

Gremaud V, Goldscheider N, Savoy L, Favre G, Masson H (2009) Geological structure, recharge processes and underground drainage of a glacierised karst aquifer system, Tsanfleuron-Sanetsch, Swiss Alps. Hydrogeology Journal, 17(8): 1833-1848.

Harvey RW (1997) Microorganisms as tracers in groundwater injection and recovery experiments: a review. FEMS Microbiology Reviews, 20 (3-4): 461-472.

Ausgewählte Papers befinden sich im Download-Bereich der Kurs-Website.

5

Ausgewählte Literatur (3)

Hauns M, Jeannin PY, Atteia O (2001) Dispersion, retardation and scale effect in tracer breakthrough curves in karst conduits J. Hydrol. 241: 177-193.

Käss W (1998) Tracing Technique in Geohydrology, Balkema, Rotterdam. (D/E)

Lauber U, Goldscheider N (2014) Use of artificial and natural tracers to assess groundwater transit-time distribution and flow systems in a high-alpine karst system (Wetterstein Mountains, Germany). Hydrogeology Journal, 22(8): 1807-1824.

Lauber U, Ufrecht W, Goldscheider N (2014) Spatially resolved information on karst conduit flow from in-cave dye-tracing. Hydrology and Earth System Sciences, 18(2): 435-445.

Leibundgut C, Maloszewski P, Külls C (2009) Tracers in Hydrology. Wiley, 415 pp.

Rossi P, Doerfliger N, Kennedy K, Müller I, Aragno M (1998) Bacteriophages as surface and ground water tracers. Hydrology and Earth System Sciences, 2 (1): 101-110.

SHG (Arbeitsgruppe Tracer der Schweizerischen Gesellschaft für Hydrogeologie) (2002) Einsatz künstlicher Tracer in der Hydrogeologie, Praxishilfe. BAFU, Bern

Smart CC (1988) Artificial tracer techniques for the determination of the structure of conduit aquifers. Ground Water 26: 445-453.

Vincenzi V, Gargini A, Goldscheider N (2009) Using tracer tests and hydrological observations to evaluate effects of tunnel drainage on groundwater and surface waters in the Northern Apennines (Italy). Hydrogeology Journal, 17(1): 135-150.

Working Group Tracers of the SHG (2003) Application of artificial tracers in hydrogeology - Guideline. Bulletin d'Hydrogéologie, 20: 1-88. (D/E/F)

Ausgewählte Papers befinden sich im Download-Bereich der Kurs-Website.

6

1. Einführung, Grundbegriffe, Markierungsstoffe und Analysenmethoden

Eingabe von 200 g des Fluoreszenztracers Uranin in eine Bachschwinde (bzw. Estavelle) im alpinen Karstsystem Hochifen-Gottesacker

1

Fotos und Abbildungen ohne anderweitige Referenz: Nico Goldscheider

Was sind und wozu brauchen wir Tracer?

In der Hydrogeologie ist ein Tracer jede Art von natürlicher oder künstlicher Substanz im Grundwasser, oder Eigenschaft des Grundwassers, die verwendet werden kann, um Information zu erhalten über:

- Herkunft des Wassers, unterirdische Verbindungen, Fließrichtungen, Einzugsgebiete, Verweilzeiten, Mischungsprozesse;
- Prozesse des Schadstofftransports.

Erst durch die wissenschaftliche Verwendung wird ein Stoff oder eine Eigenschaft zum Tracer.

z.B. Temperatur ist ein Tracer, wenn wir sie verwenden, um Informationen über Fließwege zu erhalten.

2

Natürliche und künstliche Tracer

- **Natürliche Tracer**: Substanz die „natürlicherweise“ im Grundwasser vorkommt (kann auch Schadstoffe beinhalten).
- **Künstliche Tracer**: Substanz die „absichtlich“ eingegeben wird, um die unterirdischen Fließwege des Grundwassers zu verfolgen.

Thema dieser Fortbildungsveranstaltung

“There is no such truth as tracer truth”
(Ralph Ewers)

Künstlicher Tracer = Markierungsstoff = Markierungsmittel

3

Konservative and reaktive Tracer

- **Konservativer Tracer**: Stabil, kein nennenswerter Abbau oder Rückhalt im Aquifer, verhält sich wie das Wassermolekül.
- **Idealer Tracer**: perfekt konservatives Verhalten.
- **Reaktiver Tracer**: Zeigt Wechselwirkung mit dem Aquifer (z.B. Adsorption) und/oder ist chemisch-mikrobiologisch instabil.

Reaktiver Tracer bedeutet nicht „schlechter Tracer“.

Reaktive Tracer können gezielt eingesetzt werden, um Auskünfte über reaktiven Stofftransport bzw. spezifische Schadstofftypen zu erhalten.

Beispiel: Partikeltracer zur Simulation des Bakterientransports.

4

Der ideale Tracer (nach Käss 1998)

- Natürlicherweise nicht im Wasser vorhanden (Hintergrund = 0)
- Extrem niedrige Nachweisgrenze, leicht und eindeutig zu analysieren, keine analytischen Interferenzen mit anderen Wasserinhaltsstoffen
- Leicht löslich in Wasser
- Kein chemischer, physikalischer oder mikrobiologischer Abbau
- Keine Wechselwirkung mit dem Aquifer
- Human- und ökotoxikologisch unbedenklich
- Unsichtbar und geschmacksfrei
- Preiswert, leicht zu handhaben

➔ Existiert nicht, aber manche Tracer sind nahezu ideal, z.B. Uranin

5

Anwendungsfelder

Tracer können in vielen verschiedenen Systemen angewandt werden:

- **Karstgrundwasserleiter** (Ursprung der Markierungstechnik)
- Kluft- und Porengrundwasserleiter
- Boden und ungesättigte Zone
- Flüsse, Bäche, Kanäle, Seen, Schnee, Gletscher
- Versuchseinrichtungen und Laborstudien (z.B. Säulenversuche)

Tracerversuche können viele praktische Fragen *beweiskräftig* klären:

- Fließrichtungen, Fließgeschwindigkeiten, Abflussmengen
- Abgrenzung von Einzugsgebieten und Schutzzonen
- Schadstofftransport (wohin, woher, wie viel, wie schnell?)
- Ingenieurtechnische Fragen (z.B. Kanalleckagen)

6

Wichtige Typen und Hauptziele von Tracerversuchen

Einfacher Markierungsversuch:

- 1 Eingabestelle, 1 Tracer, 1 oder mehrere Probenahmestellen.
- Ziele: Fließwege hinsichtlich Strömung und Transport charakterisieren.

Kombinierter Markierungsversuch (multi-tracer test):

- Verschiedene Tracer in verschiedene Eingabestellen (+/- gleichzeitig).
- Ziele: Effiziente Abgrenzung von Einzugsgebieten und Schutzzonen.

Vergleichender Markierungsversuch (comparative tracer test):

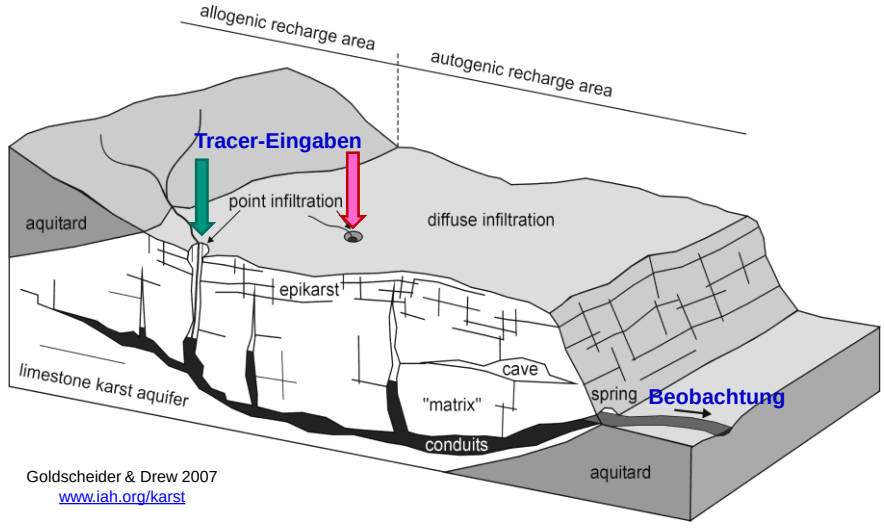
- Verschiedene Tracer gleichzeitig in eine Eingabestelle.
- Ziel: Vergleich verschiedener Tracer bzw. Schadstoffe.

Wiederholter Markierungsversuch (repeated tracer test):

- Wiederholung der selben Versuchsanordnung bei unterschiedlichen Abflussbedingungen (Niedrig-, Mittel- und Hochwasser)
- Ziel: Auskunft über Variabilität von Strömung und Transport.

7

Kombinierter Markierungsversuch in einem Karstaquifer



Goldscheider & Drew 2007
www.iah.org/karst

Markierungsversuch = Tracerversuch

8

Typen von Markierungsstoffen und Analysenmethoden

- Wasserlösliche Tracer
- Partikeltracer (partikuläre und kolloidale Tracer)

Eingabe des Fluoreszenztracers Amidorhodamin G in einen versickernden Bach, Karstgebiet Tsanfleuron-Sanetsch, Schweiz

9

Wasserlösliche Tracer

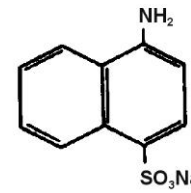
- **Fluoreszenzfarbstoffe**, z.B. Uranin
- **Salze** (Anionen und Kationen)
- Stabile, radioaktive und aktivierbare Tracer
- Gase (SF_6) und diverse andere Substanzen

Eingabe von Uranin in eine Bachschwinde im Schweizer Jura

10

Überblick der Fluoreszenzfarbstoffe

- Synthetische organische Substanzen, die aromatische Gruppen enthalten und die optische Eigenschaft der Fluoreszenz zeigen.
- Die wichtigsten Wassertracer, z.B. Uranin, Eosin, Sulforhodamin B, Amidorhodamin G, Natrium-Naphthionat, Tinopal
- Extrem niedrige NWG, z.B. Uranin 5 ng/L = 0,005 µg/L = 5 µg/m³
- Daher nur geringe Eingabemengen erforderlich (g bis kg)
- Die üblichen Fluoreszenztracer sind nicht toxisch.
- Mehr oder weniger lichtempfindlich (photolytischer Abbau)
- 3-5 verschiedene Tracer können gleichzeitig in einer Wasserprobe nachgewiesen werden.

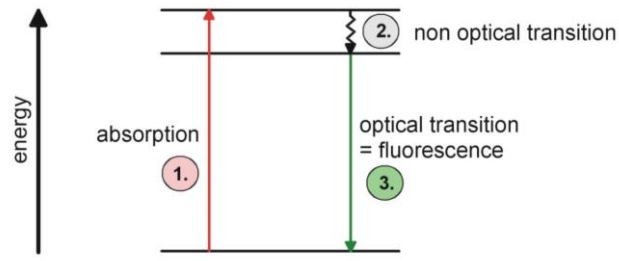


Chemische Struktur von Naphthionat (Käss 1998)

11

Was ist Fluoreszenz?

- Eigenschaft vieler organischer Moleküle mit aromatischen Gruppen
- Absorption von Licht einer bestimmten Wellenlänge
- Emission von Licht einer höheren Wellenlänge: Fluoreszenzlicht



12

Spektren und Wellenlängen

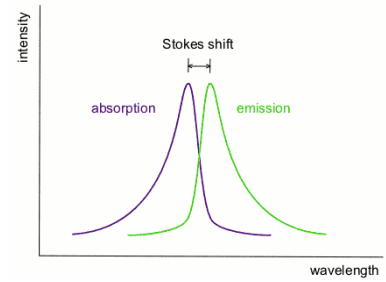
Zwei Arten von Wellenlängen-Spektren:

- Absorptions- (Excitations-, Extinktions-) Spektrum
- Fluoreszenz- (Emissions-) Spektrum

Jeder Fluoreszenztracer hat zwei charakteristische Wellenlängen:

- Absorptions- (Excitations-) Maximum, λa
- Fluoreszenz- (Emissions-) Maximum, λf
- Differenz: *Stokes Shift*, Δλ

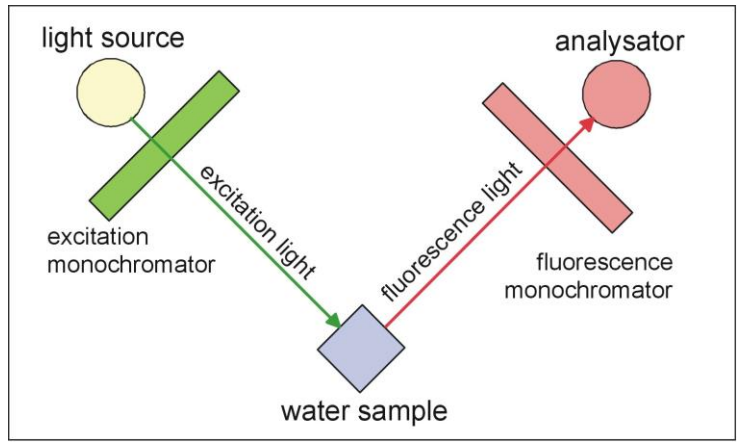
$$\lambda f - \lambda a = \Delta\lambda$$



Graphics: Wikipedia

13

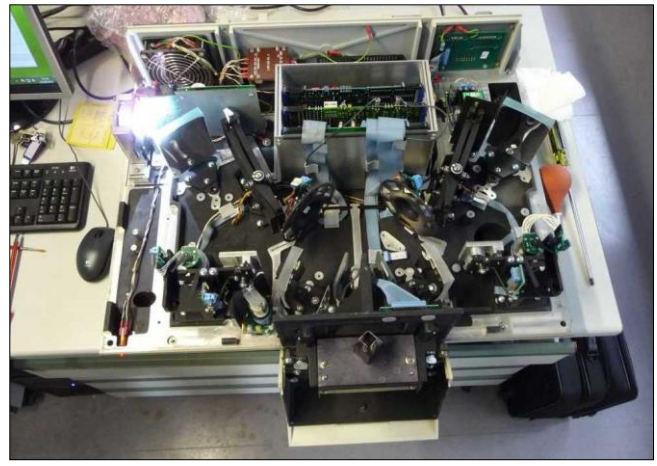
Prinzip eines Spektralfluorimeters



Extrem niedrige Nachweisgrenze (Uranin ~ 0,005 µg/L)

14

Spektralfluorimeter in unserem Labor (geöffnet)

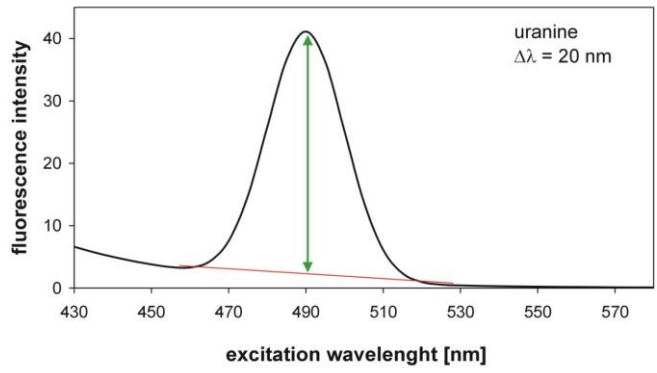


Perkin Elmer, LS 50 B / LS 55 B

Foto: Nadine Göppert

15

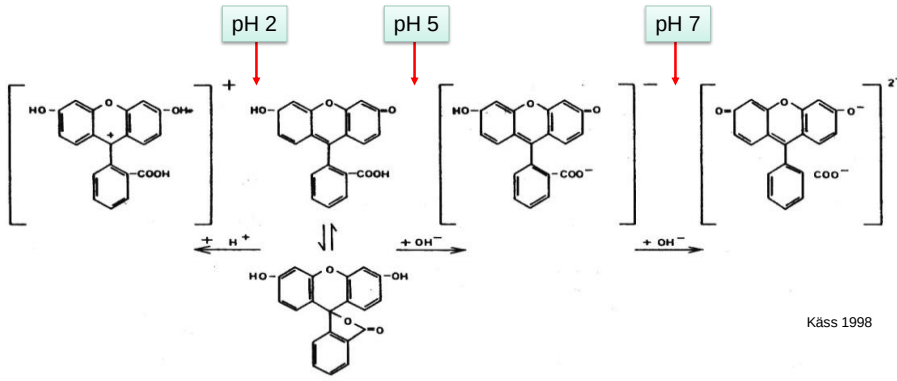
Fluoreszenzanalytik – Beispiel Uranin



- Synchroscan-Verfahren: Konstanter Wellenlängenabstand Δλ zwischen Excitations und Emissionswellenlänge.
- Ergebnis: klarer, symmetrischer Fluoreszenzpeak.
- Fluoreszenzintensität (Peak-Höhe) ~ Konzentration.

16

Einfluss des pH-Werts auf das Fluoreszein-Molekül



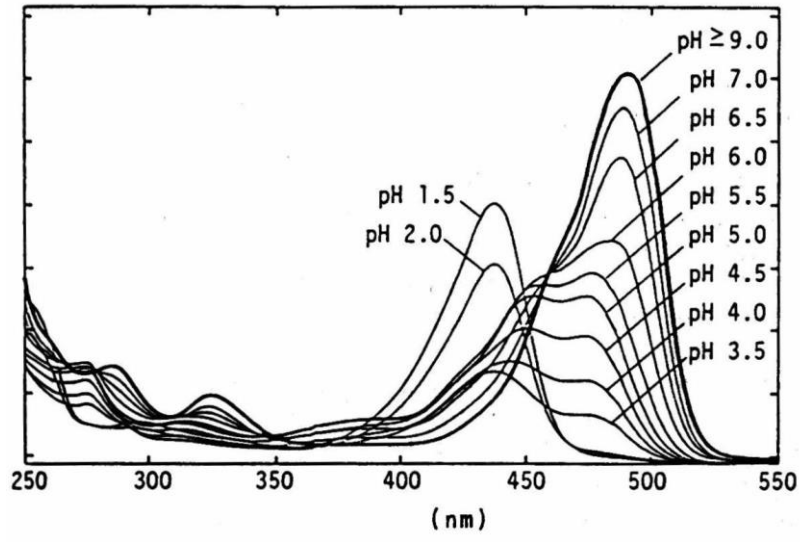
Zunehmende Fluoreszenz

Zunehmende Adsorption

Uranin = Na-Fluoreszein

17

Einfluss des pH-Werts aufs Uranin-Spektrum



Käss (1998)

18

Fluoreszenzeigenschaften wichtiger Tracer

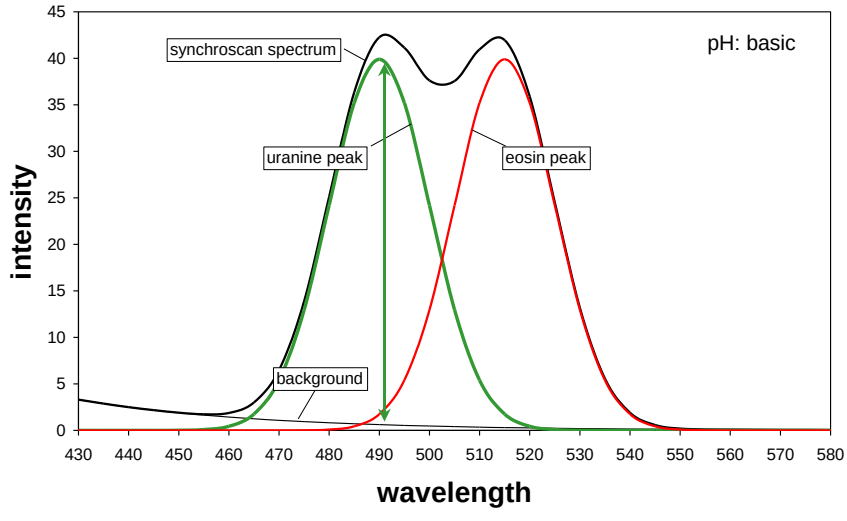
Tracer	pH value	Absorption [nm]	Fluorescence [nm]	Δλ [nm]	Fl. intenisty (Uranine = 100)
Naphthionate	neutral	320	430	110	8
Tinopal	neutral	346	435	89	60
Pyranine	acid	405	445	40	6
Pyranine	basic	455	512	57	18
Uranine	basic	491	512	21	100
Eosin	acid	516	538	22	18
Amidorhodamine G	neutral	530	551	21	14
Sulforhodamine B	neutral	564	583	19	30

- Naphthionat, Uranin und ein Rhodamin-Farbstoff können nebeneinander in einer Wasserprobe nachgewiesen werden.
- Naphthionat und Tinopal, Pyranin und Uranin, sowie AmidoG und SulfoB sind ungeeignete Kombinationen.
- Uranin neben Eosin: Schwierig, aber möglich.

19

Benischke, Goldscheider & Smart (2007)

Nachweis von Uranin neben Eosin



20

Na-Naphthionat: ein unsichtbarer Fluoreszenztracer

Eingabe von 6 kg Naphthionat in einen Bach bei Bezau, Vorarlberg

- Fragestellung: Infiltriert das Bachwasser in den angrenzenden Aquifer und erreicht die nahegelegene Trinkwasserfassung?
- Ergebnis: Sehr hohe Konzentrationen von Naphthionat in der Trinkwasserfasssung, wenige Stunden nach der Eingabe.

21

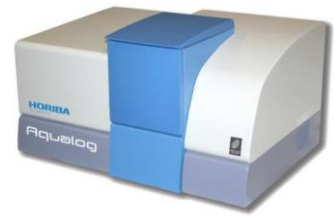
Goldscheider & Neukum 2010

EEM-Spektralfluorimeter

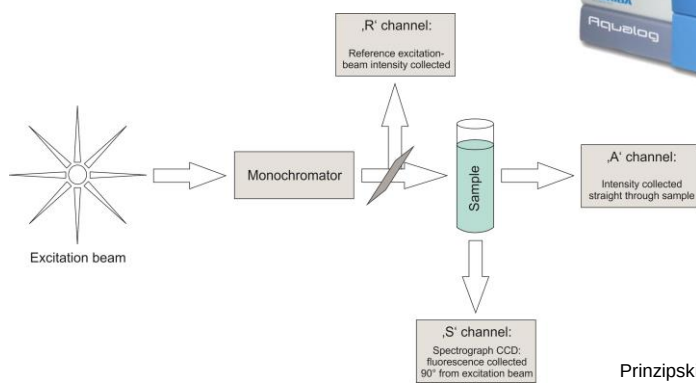
- Simultane Messung von Absorption und Fluoreszenz:

➔ Excitations-Emissions-Matrix (EEM)

- Identifizierung organischer Komponenten
- Multi-Traceranalytik



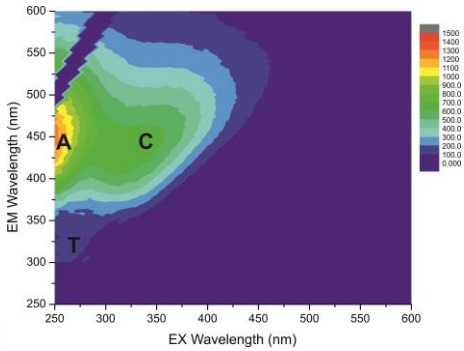
HORIBA Aqualog®



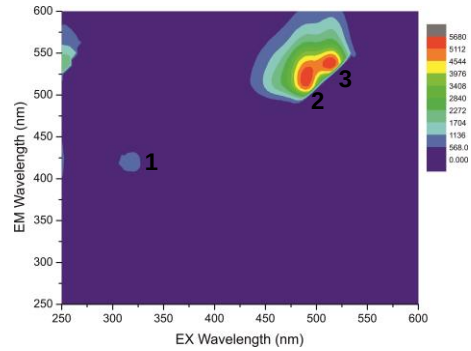
Prinzipskizze der Messanordnung

22

Excitations-Emissions-Matrizen (EEM)



a) Organische Komponenten
Peak A: Huminstoffe
Peak C: Huminstoffe
Peak T: Tryptophan



b) Fluoreszenztracer
1: Na-Naphthionat
2: Uranin
3: Eosin

23

Salze als Tracer

Drei Möglichkeiten des Salz-Nachweises:

- Anionen analysieren (konservative Tracer)
- Kationen analysieren (reaktive Tracer: Adsorption)
- Messung der elektrischen Leitfähigkeit (eLF): sehr einfach aber nicht sehr sensitiv, kontinuierliche Messung möglich.

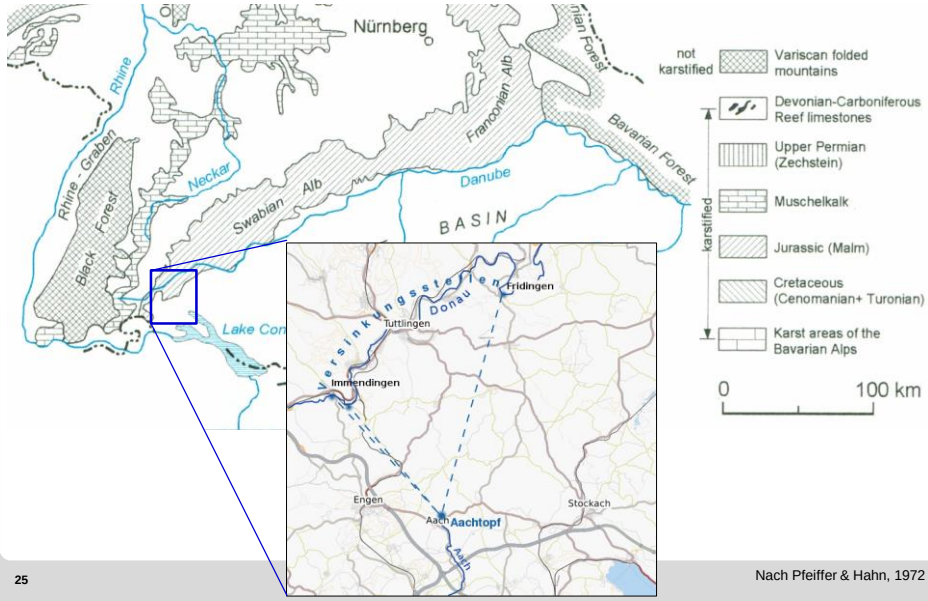
Die wichtigsten Salztracer:

- Anionen: Cl^-, I^-, Br^-
- Kationen: Na^+, K^+, Li^+
- Für eLF-Messung: NaCl

Der erste systematische Grundwasser-Markierungsversuch wurde mit Kochsalz durchgeführt.

24

Historisches Fallbeispiel: Donau-Aach-System



25

Nach Pfeiffer & Hahn, 1972

Versinkungsstelle bei Immendingen

26

Fotos: verschiedene Quellen

Die Aachquelle: Deutschlands größte Quelle

- Minimale Schüttung: 1,1 m³/s
- Mittlere Schüttung: 8,3 m³/s
- Maximale Schüttung: 28,0 m³/s
- Höhe: 476 m
- 12,5 km südöstlich der Versickerungsstelle Immendingen

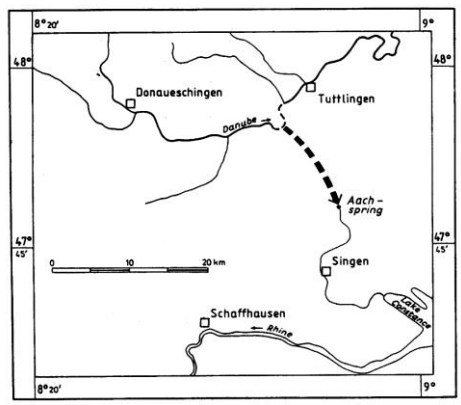
27

Foto: Goldscheider

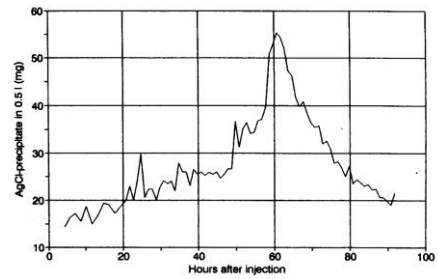
Erster systematischer Tracerversuch (1877)

Prof. Adolph Knop, Geologe, Karlsruhe

1. Eingabe von **10.000 kg NaCl** in die Donau-Versickerung Immendingen



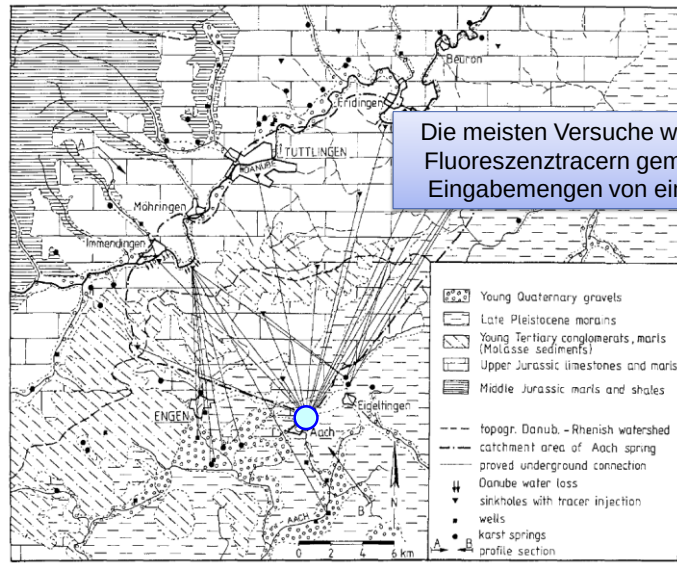
2. Chlorid-Durchgangskurve an der Aachquelle



28

Käss (1998)

Tracerversuche Donau-Aach (1960er und 1970er Jahre)

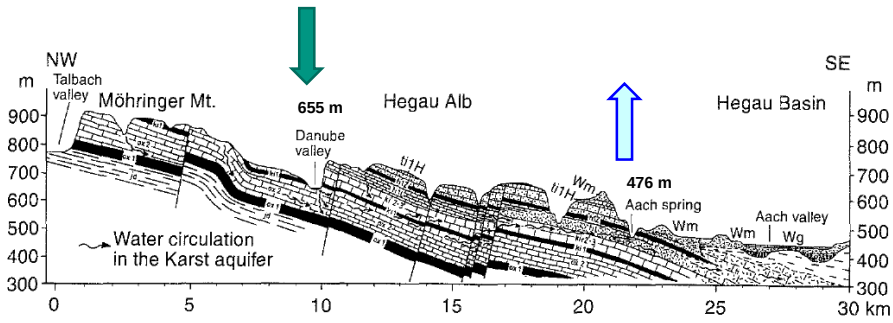


Die meisten Versuche wurden mit Fluoreszenztracern gemacht, mit Eingabemengen von einigen kg.

29

Hötzl (1996)

Profil Donau-Aach



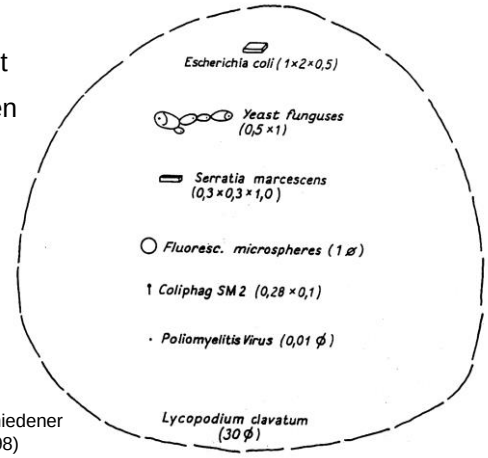
- Stratigraphischer Aufstieg des Donauwassers: Versickerung in den Wohlgeschichteten Kalken, Austritt in den Liegenden Bankkalken.
- Aber natürlich topographischer Abstieg, von 655 auf 476 m.

30

Hötzl (1996)

Partikeltracer

- Gefärbte Bärlappsporen (*Lycopodium clavatum*): veraltet
- Fluoreszierende Mikrokügelchen (Microspheres)
- Mikrobiologische Tracer: Bakterien und Bakteriophagen



Größenvergleich verschiedener Partikeltracer (Käss 1998)

➔ Experimentelle Simulation des Bakterien- und Virentransports

31

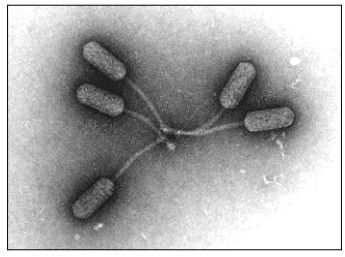
Bakteriophagen als Tracer

- Bakteriophagen (Phagen) sind Viren, die spezifische Bakterien infizieren und die Bakterienzellen verwenden, um sich zu vermehren.
- Größe: 20-350 nm (Bio-Kolloide)
- Natürliches Süßwasser enthält bis zu 10^9 Phagen / mL

➔ Können als „natürliche Tracer“ verwendet werden (z.B. Coliphagen)

- Marine Bakteriophagen kommen in Süßwasser nicht vor (c = 0).

➔ Können im Labor produziert und als „künstliche Tracer“ verwendet werden, v.a. zur experimentellen Simulation des Virentransports.



In 10 L Wasser können im Labor unter optimalen Bedingungen bis etwa 10^{15} Phagen produziert werden.

EM-Foto von Bakteriophagen, Länge ca. 110 nm (Pierre Rossi)

32

Anwendungsbeispiel Genfer See: Goldscheider et al. 2007

Fluoreszierende Mikrokügelchen als Tracer

- Erhältlich in verschiedenen Durchmessern (0,05–90 µm), also in kolloidaler Größe (< 1 µm) und als Partikel (> 1 µm)
- Verschiedene physikalisch-chemische Eigenschaften, z.B. hinsichtlich Dichte und elektrischer Oberflächenladung (positiv, neutral, negativ)
- Verschiedene Fluoreszenzeigenschaften (Excitation / Emission)
- Am häufigsten Verwendet: Ungeladene, gelb-grüne (458 nm / 540 nm) Polystyrol Mikrokügelchen mit 1 µm Durchmesser, Dichte ca. 1 g/cm³
- Nachweis:
  - Auszählen unter dem Fluoreszenzmikroskop
  - Fluoreszenz-Partikelzähler
  - Durchflusszytometer
  - Spektralfluorimeter (automatisiert, mit Durchflusszelle)
- Bis heute keine universell und leicht anwendbare Methode

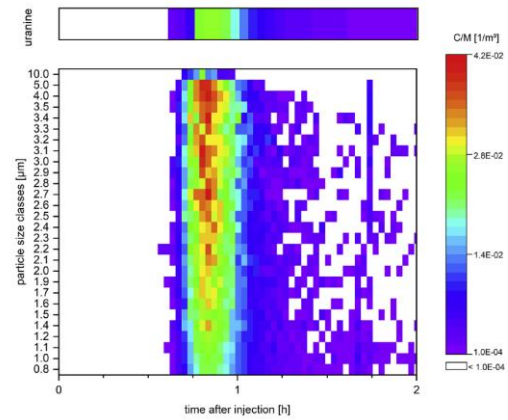
33

Dissertation & Publikationen Nadine Göppert

Natürliche Sedimente als Tracer

- Natürliche Sedimente werden in einem Behälter in Wasser suspendiert und in den Aquifer eingegeben.
- Quellen werden mit Hilfe von modernen Partikelzählern beobachtet.

Photo: M. Klotz GmbH

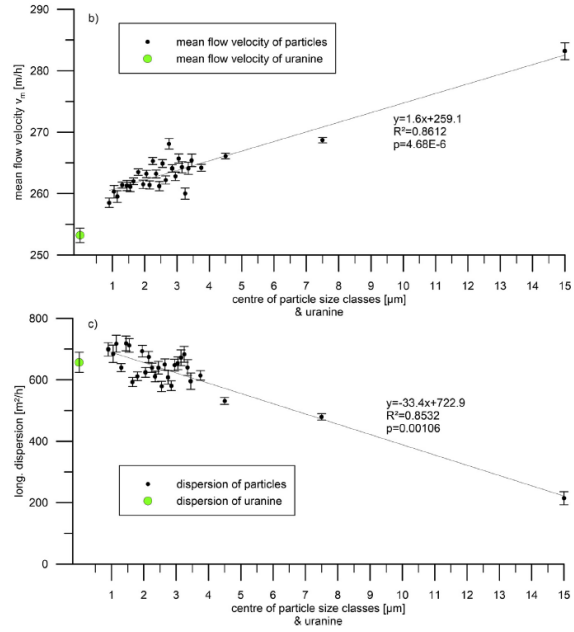


34

Goeppert & Goldscheider (2019) Water Research

Wichtige Befunde

- Die mittlere Geschwindigkeit nimmt mit der Partikelgröße zu.
- Die Dispersion nimmt mit der Partikelgröße ab.



35

Goeppert & Goldscheider (2019) Water Research

Überblick der künstlichen Tracer und ihrer Eigenschaften

	No.	Tracer	Detection limit (µg/L)	Natural background	Toxicology	Analytical interference with	Other specific problems
fluorescent dyes	1	Uranine	10^{-3}	absent	safe	2, 6	strong sorption at low pH
	2	Eosin	10^{-2}	absent	safe	1, 4	very sensitive to light
	3	Sulforhodamine B	10^{-2}	absent	ecotox. unsafe	4, 6	
	4	Amidorhodamine G	10^{-2}	absent	safe	2, 3, 5	
	5	Rhodamine WT	10^{-2}	absent	genotoxic	3, 4	
	6	Pyranine	10^{-2}	absent	safe	1, 2	not reliable (degradation)
	7	Naphthionate	10^{-1}	absent	safe	8, DOC	
	8	Tinopal	10^{-1}	absent	safe	7, DOC	strong sorption
salts	9	Sodium		high	safe	-	
	10	Potassium	*dependent*	moderate	safe	-	
	11	Lithium	*on method:*	very low	safe with restr.	-	
	12	Strontium	*0.1 µg/L*	moderate	safe with restr.	-	strong sorption
	13	Chloride	*to 1 mg/L*	high	safe with restr.	-	
	14	Bromide		low	safe with restr.	-	
	15	Iodide		very low	(not evaluated)	-	chemically unstable
particles	16	Dyed spores	*detection*	absent	safe	natural particles	not quantitative
	17	Microspheres	*of single*	absent	safe	natural particles	time-consuming analysis
	18	Specific bacteria	*particles*	absent	(not evaluated)	(other bacteria)	time-consuming analysis
	19	Bacteriophages		absent	(not evaluated)	-	time-consuming analysis

36

Benischke, Goldscheider & Smart (2007)

2. Praktische Durchführung von Tracerversuchen

Die beiden aktuellen Editoren der Zeitschrift Grundwasser bei der Vorbereitung von 155 kg Natrium-Naphthionat für die Eingabe, Stuttgart 1999

1

Voruntersuchungen und Genehmigung

Markierungsversuche sind eine aussagekräftige Methode, aber relativ teuer und zeitaufwendig. Daher sollten sie sorgfältig geplant werden. Relevante Voruntersuchungen beinhalten u.a.:

- Auswertung geologischer und hydrogeologischer Literatur, Karten und Profile; Erarbeitung eine hydrogeologischen Modellvorstellung.
- Hydraulische und hydrologische Messungen (Pumpversuche, Quellschüttungen, etc.)
- Einsatz natürlicher Tracer zur Identifikation unterschiedlicher Wassertypen und von Mischungsprozessen.

Tracerversuche sind in Deutschland und Österreich genehmigungspflichtig. In der Schweiz reicht es, die zuständige Stelle am BAFU zu informieren. Betroffene Parteien (Wasserversorger, Gemeinde, Fischereiverband, Polizei, etc.) müssen informiert werden.

2

Auswahl der Tracer

- Nur toxikologisch unbedenkliche Tracer (Behrens et al. 2001)
- Konservative Tracer zur Untersuchung der Grundwasserströmung und des nicht-reaktiven Stofftransports.
- Reaktive Tracer für reaktiven Stofftransport (z.B. Bakteriophagen für Virentransport).
- Uranin ist generell der beste Tracer und daher meist die erste Wahl.
- Für kombinierte Markierungsversuche:
  - Uranin für die längste Strecke bzw. für die wichtigste Fragestellung.
  - Nur Tracer, die nebeneinander nachgewiesen werden können.
- Unsichtbare Tracer (Salze, Naphthionat, Tinopal, Partikeltracer), wenn sichtbare Verfärbung unbedingt vermieden werden muss.
- Die meisten Fluoreszenztracer sind lichtempfindlich und können daher nur eingeschränkt im Oberflächenwasser verwendet werden.

3

Bestimmung der erforderlichen Eingabemenge

Empirische Formel nach Käss (1992, 1998, 2004):

$$M = L \times k \times B$$

M = Eingabemenge [kg] (bzw. Partikelzahl)
L = Entfernung [km]
k = Koeffizient für Tracer
B = Koeffizient für hydrogeologische Bedingungen

Tracer	k
Uranine	1
Eosine	5
Naphthionate	15
NaCl	20000
Phages	1.00E+13

Conditions	B
karst conduits	0.1-1
river bank infiltration pore groundwater fractured aquifer	2-4
injection through loamy soil	5-10

- Formel führt tendenziell recht hohen Eingabemengen.
- Klare Ergebnisse, aber oftmals sichtbare Verfärbung.
- Ähnlicher Ansatz in der Schweizerischen „Praxishilfe“ verwendet.
- Field (2003): 33 verschiedene Verfahren zur Mengenbestimmung.
- Alternativer Ansatz: Verwendung von Transportgleichungen (s.u.)

4

Übung: Abschätzung erforderlicher Eingabemengen

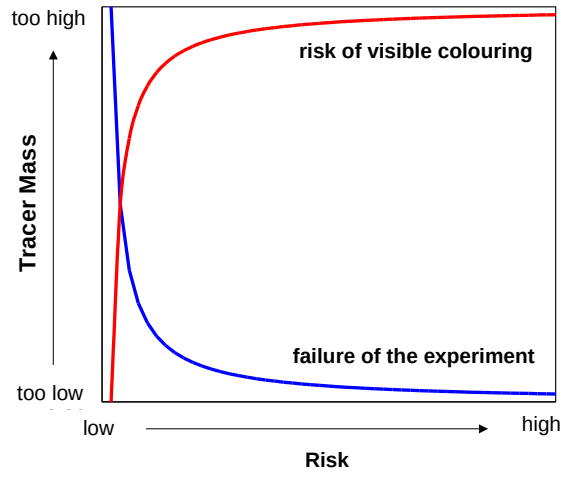
Wie hoch wäre nach der Formel von Käss (1992, 1998, 2004) die Eingabemenge für den historischen Donau-Aach-Markierungsversuch von A. Knop (1877) für folgende Markierungsstoffe:

- Kochsalz (NaCl)
- Uranin
- Natrium Naphthionat
- Bakteriophagen

Diskutieren und bewerten Sie das Ergebnis!

5

Risiko der Verfärbung vs. Risiko des Scheiterns



6

Auswahl der Eingabe- und Probenahmestellen

Eingabestellen: möglichst gute Anbindung an den Aquifer

- In Karstgebieten: bevorzugt aktive Bachschwinden oder Höhlenbäche, ansonsten Baggerschürfe oder GwMessstellen
- In Kluft- und Porenaquiferen: GwMessstellen, Baggerschürfe

Probenahmestellen: möglichst vollständige Erfassung

- Quellen, GwMessstellen, Brunnen, Höhlenbäche, etc.
- Alle möglichen Austrittspunkte sollten beobachtet werden (je nach Wichtigkeit mit unterschiedlicher Intensität und Methode, s.u.).
- Beobachtung des „negativen Rahmens“, also relevanter Punkte, wo vermutlich nichts ankommt, aber der negative Befund wichtig ist.

7

Eingabe in einen Höhlenbach

Eingabe von 200 g Amidorhodamin G durch N. Goldscheider in den Höhlenbach der Blauhöhle, Blaubeuren, Deutschland (21. April 2012)

Photo: Andreas Kücha, ARGE Blautopf

8

Eingabe in eine Bachschwinde

Eingabe von 200 g Uranine in eine Bachschwinde, Schweizer Alpen

Fast alle (ca. 95 %) Eingaben in natürlich fließende Gewässer sind erfolgreich

9

Eingabe mit Spülwasser

Eingabe von 5 kg eines Salztracers (KI) und ca. 4 m^3 Spülwasser,
Karstgebiet Tsanfleuron-Sanetsch, Schweiz

Wenn kein natürlich fließendes Wasser vorhanden ist, muss Spülwasser verwendet werden, aber nur etwa 60-70 % solcher Eingaben sind erfolgreich.

10

Risiko der Kreuzkontamination

- Strikte Trennung von Personal, Geräten, Räumen & Fahrzeugen für die Eingabe und für die Probenahme und Analytik.
- Größtes Risiko geht von Pulver aus.
- Gelöste Tracer sind leichter zu handhaben.

➔ Tracer möglichst einige Tage vor dem Versuch in Eingabekanister abfüllen.

Historisches Foto: Heinz Hötzl bei einer Tracereingabe 1996

11

Eingabe ins Grundwasser über einen Baggerschurf

- Eingabe von Amidorhodamin G
- Fluvioglazialer Sand- und Kiesaquifer
- Zustrombereich eines Pumpbrunnens, zur Überprüfung der 50-Tage-Linie
- Erfolgreicher Markierungsversuch.

Photo: Nadine Göppert

12

Markierungsversuch im Wettersteingebirge, 2011

Eingabe von 2 kg Uranin in ein Schmelzwasser-Rinnsal unter einem Schneefeld (Foto: Ute Lauber)

- Tracer-Pulver wurde vor dem Versuch in einen Plastikkanister abgefüllt, der anschließend sorgfältig von außen gereinigt wurde.
- Im Gelände: Zugabe von Wasser, Auflösen des Tracers.
- Sehr saubere, leichte, mobile und effiziente Eingabetechnik.

13

Tracerversuch in der ungesättigten Zone

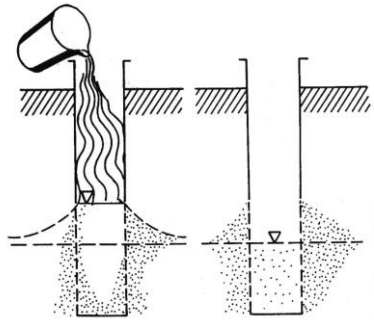
Verteilen des Tracers auf der Geländeoberfläche (oberhalb der Drainageleitung einer Trinkwasserfassung)

Beregnung (30 mm)

14

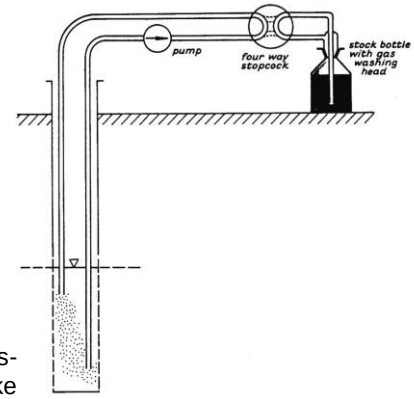
Photos: Goldscheider

Eingabe in Brunnen / Grundwassermessstellen



Käss 1998

Falsch: Teil des Tracers bleibt in der ungesättigten Zone hängen



Richtig: Eingabe über Zirkulations-Pumpsystem direkt in die Filterstrecke

15

Eingabe durch Zirkulations-Pumpsystem

Nadine Göppert & Werner Käss bei der Eingabe von zwei Fluoreszenztracern ins Testgebiet von Merdingen

Foto: N. Goldscheider

16

Probenahme- und Monitoring-Methoden

- Kumulativ / qualitativ: Aktivkohlesäckchen
- Sequentiell: Entnahme von Wasserproben zu diskreten Zeitpunkten, manuell oder mit automatischem Probenehmer.
- Kontinuierlich: Feld-Fluorimeter

Automatischer Probenehmer für die sequentielle Probenahme (24 Flaschen), in isolierter und beheizter Box (Sägebachquelle, Kleinwalsertal, Winter 2015, bei -20°C)

17

Göppert & Goldscheider 2008

Kontinuierliche Messung mit Feld-Fluorimeter

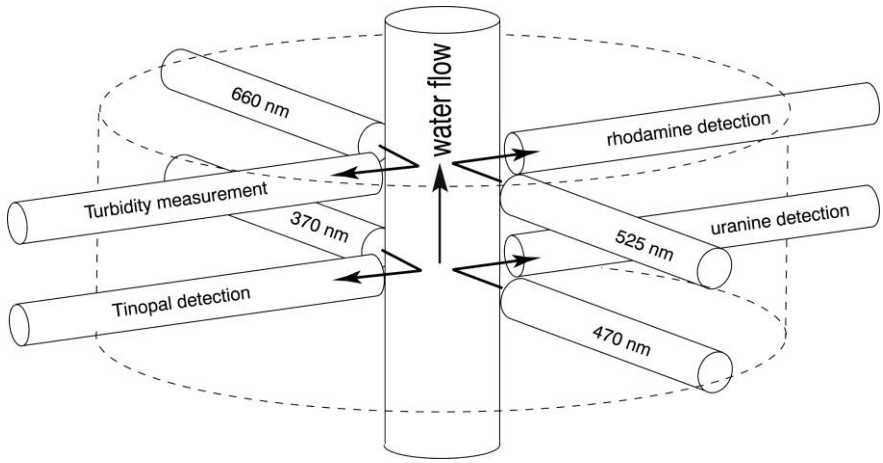
Durchfluss-Fluorimeter

Bohrloch-Fluorimeter

18

Fotos: Pierre-André Schnegg

Prinzip des Durchfluss-Fluorimeters



19

Verändert nach Pierre-André Schnegg (CHYN)

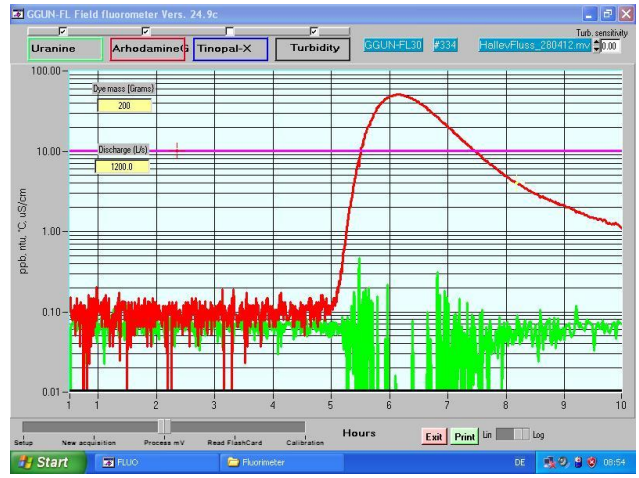
Bohrloch-Fluorimeter in der Blauhöhle

Installation eines Bohrloch-Fluorimeters in der Halle des verlorenen Flusses, Blauhöhle, April 2012

20

Fotos: Andreas Kücha, ARGE Blautopf

Rohdaten des Fluorimeters aus der Blauhöhle



Amidorhodamin G Durchgangskurven des Fluorimeters aus der Halle des verlorenen Flusses, 21.-22, April 2012

Lauber et al. 2014

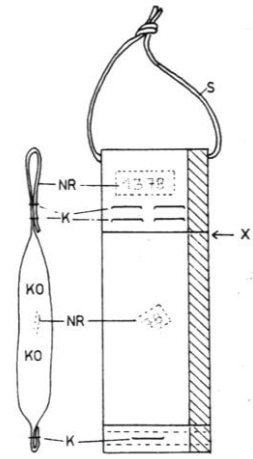
21

Kumulative, integrative oder qualitative Probenahme

Verfahren mit Aktivkohlesäckchen

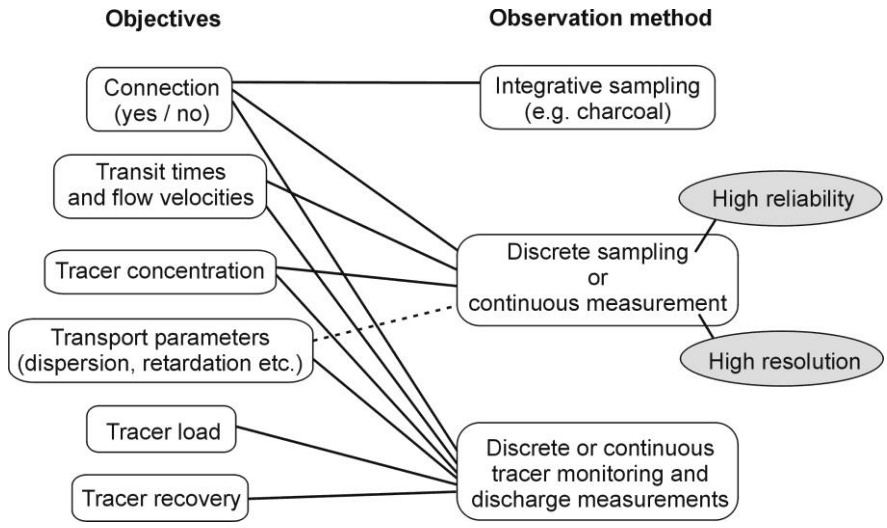
- Adsorption des Tracers
- Desorption durch Elutionsmittel
- Fluoreszenzanalyse

- Vorteil: Billig, zeitsparend im Gelände
- Nachteil: Nur qualitative Ergebnisse (Ja/Nein)



22

Auswahl der Probenahmetechnik

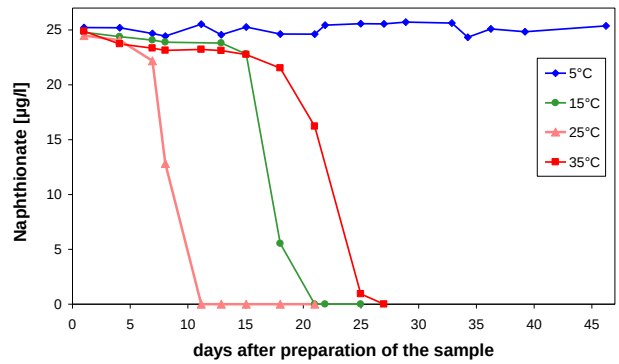


23 Benischke, Goldscheider & Smart (2007)

Lagerung und Abbau

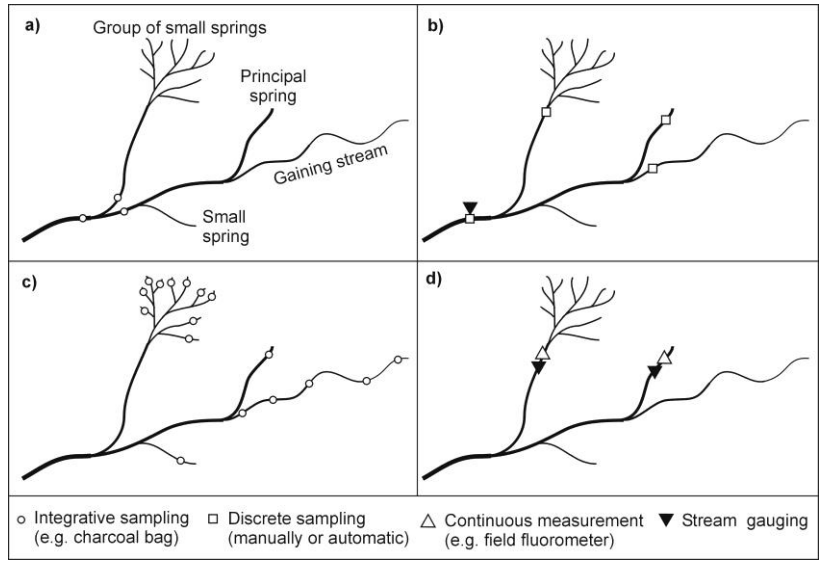
- Alle Fluoreszenztracer sind mehr oder weniger lichtempfindlich
  ➔ Braunglasflaschen (o.ä.), dunkel lagern
- Risiko des mikrobiellen Abbaus (selten aber möglich)
  ➔ Kühl lagern und so rasch wie möglich analysieren

Beispiel: Mikrobieller Abbau von Naphthionat in speziellen Wasserproben



24 Goldscheider et al. 2001

Anpassung der Probenahmestrategie



25

Benischke, Goldscheider & Smart (2007)

Karlsruher Institut für Technologie

FH-DGGV

3. Praxisteil
Vorführung von Labor- und Feldgeräten

Dr. Nadine Göppert

Institut für Angewandte Geowissenschaften – Abteilung Hydrogeologie – Prof. Dr. Nico Goldscheider

Karlsruher Institut für Technologie

Programm

FH-DGGV

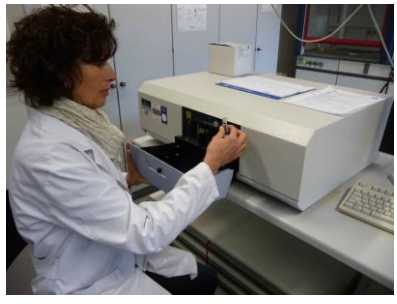
11:15 - 12:00 Labor- und Feldgeräte

Analysenmethoden:

- Spektralfluorimeter
- Aktivkohleanalytik
- Filterfluorimeter
- Durchfluss- und Bohrlochfluorimeter
- EEM-Spektralfluorimeter (Aqualog)

Spektralfluorimeter

- Lumineszenzspektrometer zur Messung von Fluoreszenz, Phosphoreszenz, Chemilumineszenz und Biolumineszenz
- Xenonlampe als Anregungslampe
- Monochromatoren: Anregung zw. 200-800 nm
  Emission zw. 200-900 nm
- Genauigkeit: ±1nm
- Spektraler Bandpass: 2.5-15 nm (Anregung) und 2.5-20 nm (Emission)
- Scangeschwindigkeit: 10-1500 nm/min
- Sensitivität: Signal zu Rauschen > 500:1



Vorteil:

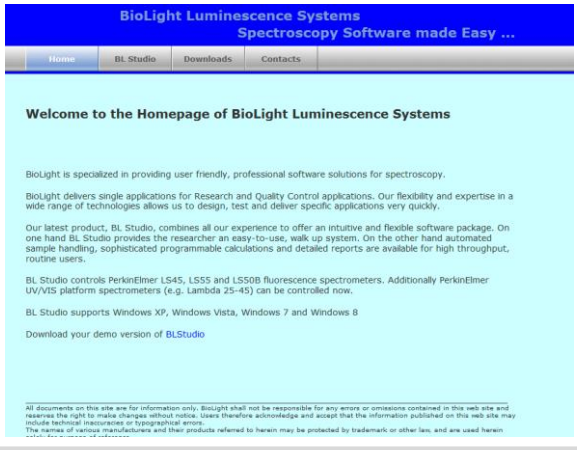
- Niedrige Nachweisgrenzen
  (z.B. 0.005 µg/L für Uranin)
- Abtrennung der einzelnen Fluoreszenz-farbstoffe

3

Software von BioLight Luminescence Systems

BioLight Studio FL

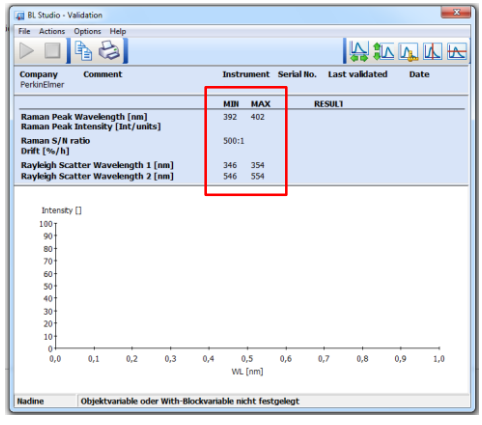
- Frei erhältlich über http://www.biolight.com/html/bl_studio_fl.html



4

Validierung vor Beginn des Messzyklus

- Einsetzen einer Küvette mit blasenfreiem Leitungswasser

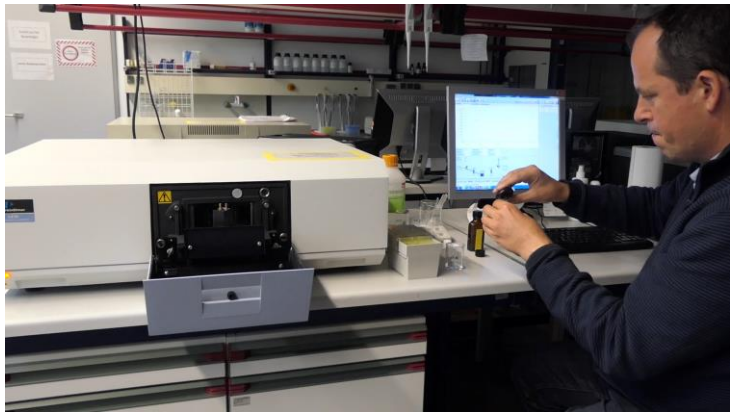


5

Messen am Fluorimeter

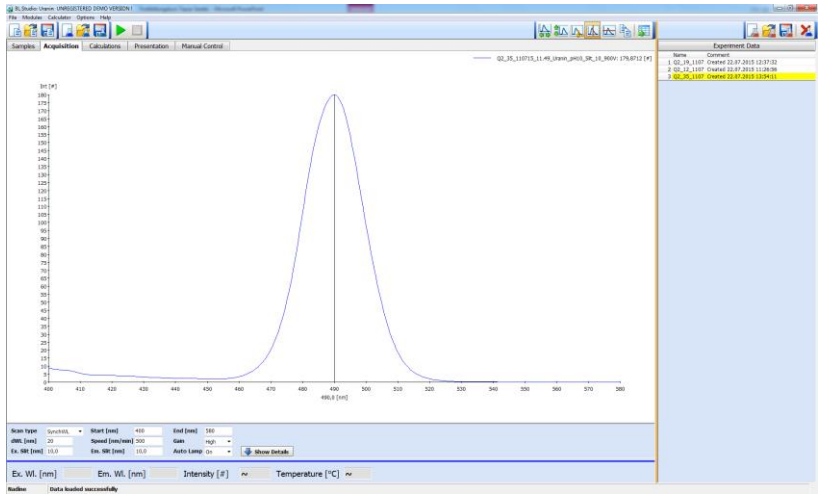
6

Messen am Fluorimeter



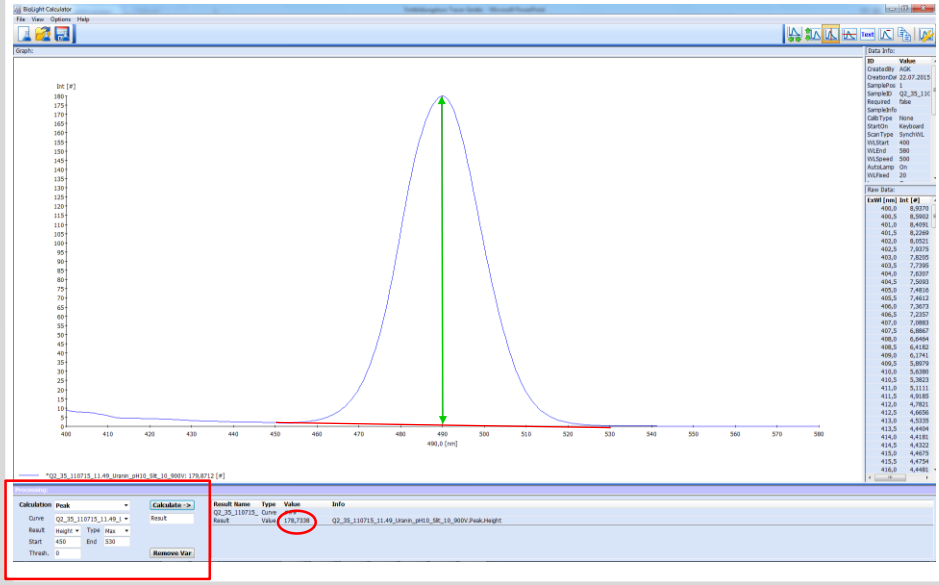
7

Messung der Fluoreszenzfarbstoffe mit dem Synchronous Scan-Verfahren



8

Bestimmen der Intensität einer Wasserprobe



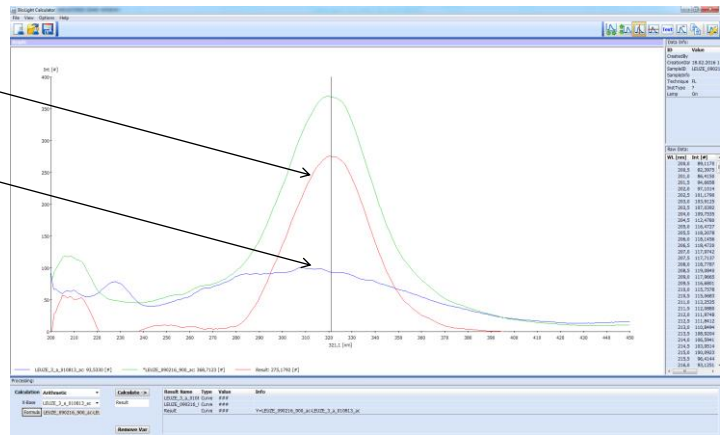
9

Entfernen des Hintergrunds

- Vor allem bei Messungen mit Natrium-Naphthionat empfehlenswert

Natrium-Naphtionat (berechnet)

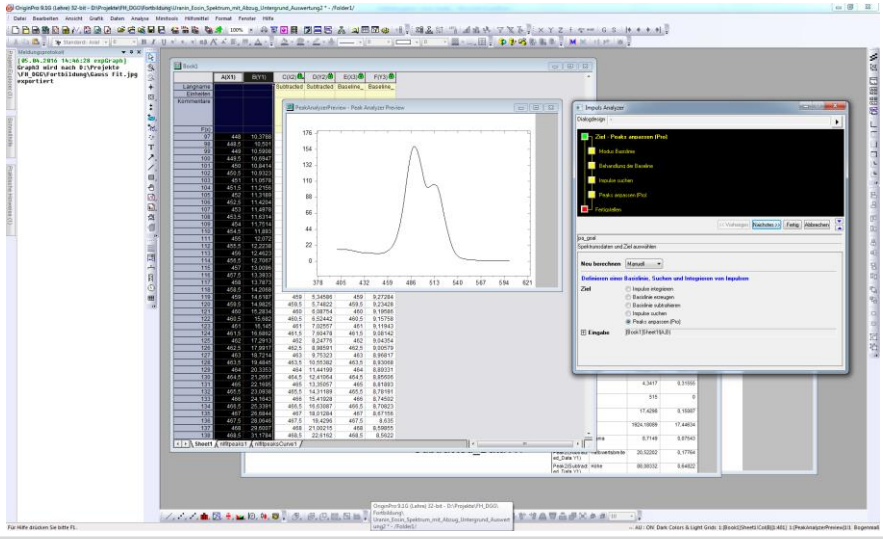
Hintergrund



10

Separieren überlagerter Signale

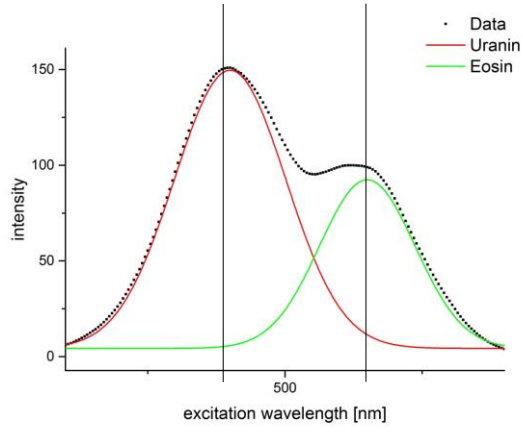
- Auswertung nur über alternative Software möglich, z.B. Origin



11

Separieren überlagerter Signale

- Auswertung einzelner Signale leicht möglich, in diesem Fall von Uranin und Eosin



12

Analysieren von Tracern in Aktivkohle (AK)

- Allgemein
  AK wird für mehrere Tage bis wenige Wochen im Gewässer angebracht
  - Tracer adsorbiert an der Oberfläche der AK und akkumuliert sich über die Zeit
  - für die Analytik muss Tracer mit einem Elutionsmittel desorbiert werden
  - qualitativer Tracer-Nachweis
- Vorteile
  - geringer Beprobungsaufwand
  - Nachweis von sehr geringen Tracerkonzentrationen möglich aufgrund der Akkumulation
  - Nachweis von mehreren Tracern in einem AK-Adapter möglich
- Nachteile
  - Adsorption von anderen Stoffen möglich, vor allem organische Substanzen
  → evtl. hoher Messhintergrund
  - höherer Analyseaufwand

13

Vorbereitung der AK-Proben

- ca. 5 Tage an einem dunklen Ort mit geringer Luftfeuchtigkeit trocknen
- trockenes AK-Granulat in entsprechend beschriftete Papiertüten umfüllen
- Uranin, Eosin:
  - 0,5 g des AK-Granulats in Einmalreagenzröhrchen einwiegen
  - mit 5 ml Elutionsmittel auffüllen
- Amidorhodamin G:
  - 1,0 g des AK-Granulat in Einmalreagenzröhrchen einwiegen
  - mit 5 ml Elutionsmittel auffüllen
- 4 Stunden auf dem Schütteltisch bei 60 RPM eluieren
- unmittelbar danach kann die überstehende Lösung analysiert werden

14

Messung des AK-Eluats

- Messung erfolgt am Laborfluorimeter (LS55) analog zu den Wasserproben
- je nach Tracer ändert sich der Stoke´s Shift

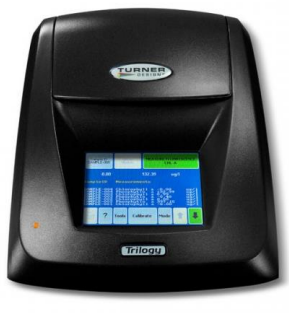
Fluoreszenzfarbstoff	Nachweisgrenze im Eluat [µg/l]	Absorptionswellen-länge [nm]	Stoke´s Shift [nm]
Uranin	0,1	490	25
Eosin	0,1	515	25
Amidorhodamin G	0,1	530	25

- Ergebnisse werden in Fluoreszenzintensitäten angegeben und i.d.R. nicht in Konzentrationen umgerechnet

15

Filterfluorimeter

- z.B. Trilogy von Turner Designs
- kann Fluoreszenz, Absorption und Trübung messen
- auswechselbare Module für verschiedene Anwendungen



Auswechselbare Module
mit Küvettensteckplatz

16

Trilogy

- Verfügbare Module
  - Trübe
  - Absorption
    - Phosphat
    - Nitrat
    - Silikat
  - Fluoreszenz
    - **Uranin**
    - **Amidorhodamin G**
    - Ammonium
    - **CDOM** (colored dissolved organic matter)
    - Histamin
    - Öle
    - Optische Aufheller

17

Trilogy – Uraninmodul

Spezifikationen

- Lichtquelle: LED
- Detektor: Photodiode
- Absorptionswellenlänge: 485 nm
- Emissionswellenlänge: 540 nm
- Nachweisgrenze: 0,01 µg/l
- Linearer Bereich: 0 – 500 µg/l
- Kalibrierungen können im Gerät gespeichert werden

18

Vor- und Nachteile

- Vorteile
  - Hohe Flexibilität durch verschiedene Module
  - Einfache Handhabung
  - Sehr leicht und kompakt, daher auch im Untersuchungsgebiet einsetzbar (z.B. Betrieb im Hotelzimmer)
  - Gut geeignet zur Voranalyse, z.B. um Probennahmeintervall anzupassen
  - Schnell einsatzbereit, schnelle Analytik
- Nachteile
  - Schlechtere Nachweisgrenze
  - gibt nur eine Intensität (in RFU) einer bestimmten Wellenlänge aus, kein Spektrum
  - Ausgabe in Konzentration durch hinterlegte Kalibrierung möglich, dabei aber keine Angabe der Intensitäten
  - Beim kombinierten Einsatz von Tracern schlechte Separation → positiver Uranin-Nachweis, obwohl nur Amido G in der Probe vorhanden ist
  - Nachanalyse mit Laborfluorimeter erforderlich
  - Messergebnisse werden nicht im Gerät gespeichert

19

Online Messung mit Feld-Fluorimetern

- Durchfluss-Fluorimeter bzw. Bohrlochfluorimeter der Firma Albillia GmbH, Neuchâtel, Schweiz
- 4 Lampen mit entsprechenden optischen Filtern ermöglichen die simultane Messung von maximal drei Fluoreszenztracern (z.B. Uranin, Amidorhodamin G und Naphthionat) und der Trübung
- Zusätzlich kann sowohl die Temperatur als auch die Leitfähigkeit gemessen werden
- Feld-Fluorimeter eignen sich auch zu Messungen des gelösten organischen Kohlenstoffs, entweder über den Tinopal-Filter oder über speziell eingebaute Filter wie z.B. für Tryptophan
- Algorithmus zur Trübe- und Temperaturkorrektur implementiert

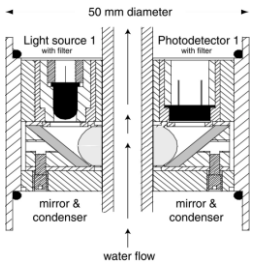
20

Funktionsweise

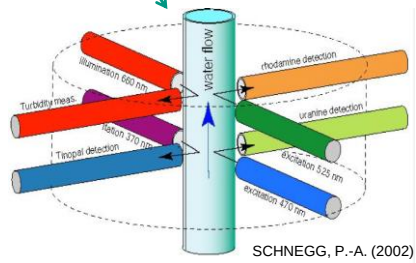
Bohrlochfluorimeter

SCHNEGG, P.-A.

Durchflussfluorimeter



SCHNEGG, P.-A., BOSSY F. (2001)



SCHNEGG, P.-A. (2002)

21

Eigenschaften von Bohrlochfluorimetern

- Nachweisbare Tracer:
  jeweils einen aus Klasse I / II / III, optional IV oder V:
  - Klasse I: Uranin, Pyranin, Eosin, Chlorophyll A
  - Klasse II: Amidorhodami G, Sulforhodamin B, Rhodamin WT, Resorufin
  - Klasse III: Tinopal CBS-X, CBS-CL, Amino-G-acid, Photine CU (optischer Aufheller)
  - Klasse IV: Duasyn brilliant yellow T
  - Klasse V: Naphthionat
- Nachweisgrenzen ohne Trübe:
  - Uranin: 0,02 µg/l
  - Rhodamin B, G, WT: 0,2 µg/l
  - Tinopal: 0,2 µg/l
- Trübe: < 200 NTU
- Messintervall: verschiedene Intervalle (2 Sekunden bis 15 Minuten)
- Akkulaufzeit: ca. 14 – 28 Tage (abhängig von der Umgebungstemperatur)

SCHNEGG, P.-A., BOSSY F. (2001)

22

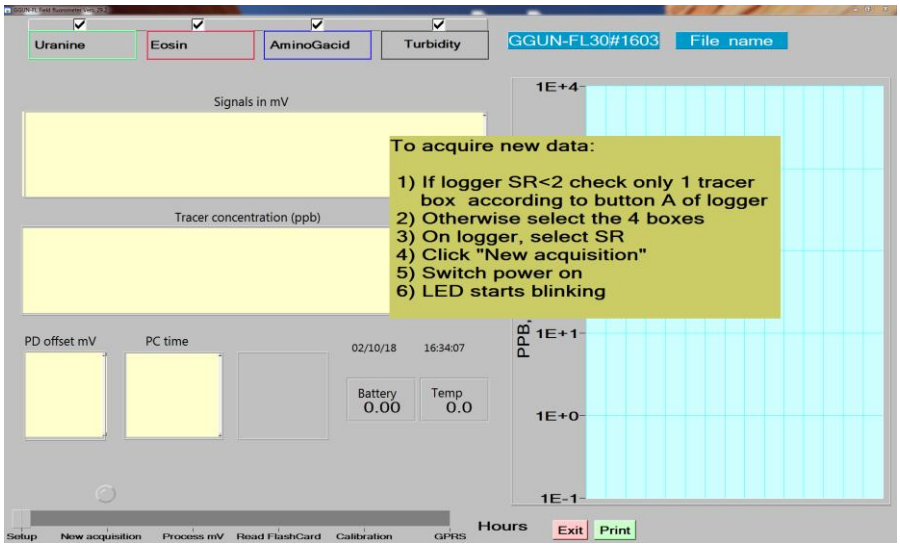
Eigenschaften von Durchflussfluorimetern

- Nachweisbare Tracer:
  jeweils einen aus Klasse I / II / III, optional IV oder V:
  - Klasse I: Uranin, Pyranin, Eosin, Chlorophyll A
  - Klasse II: Amidorhodami G, Sulforhodamin B, Rhodamin WT, Resorufin
  - Klasse III: Tinopal CBS-X, CBS-CL, Amino-G-acid, Photine CU (optischer Aufheller)
  - Klasse IV: Duasyn brilliant yellow T
  - Klasse V: Naphthionat
- Nachweisgrenze: < 2 x 10^{-11} g/ml (0,02 µg/l) für Uranin
- Trübe 0,02 – 100 NTU (FL30: 400)
- Temperatur: > 2 ± 0,01 °C
- Messintervall: 2 Sekunden (1 Lampe) bis 15 Minuten
- Batterien: 6V – 12 V

Albillia, Handbuch GGUN-FL

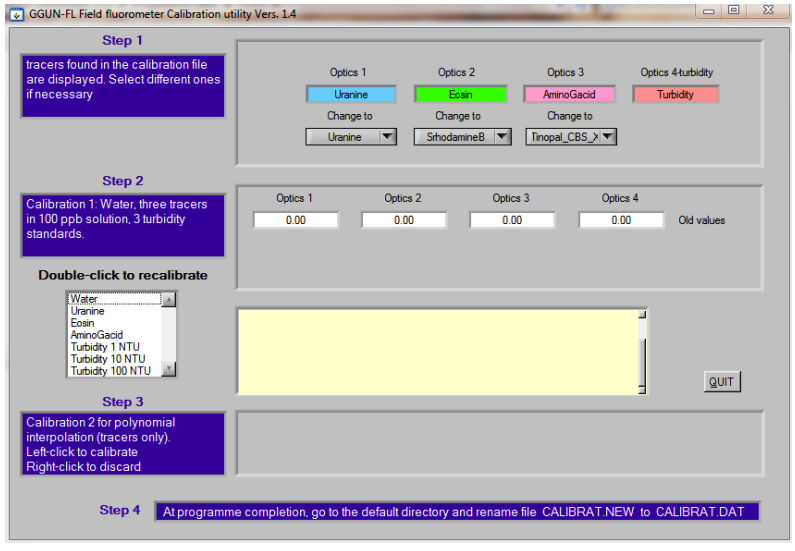
23

Screenshot der FLUO Software



24

Screenshot der Software zur Kalibrierung



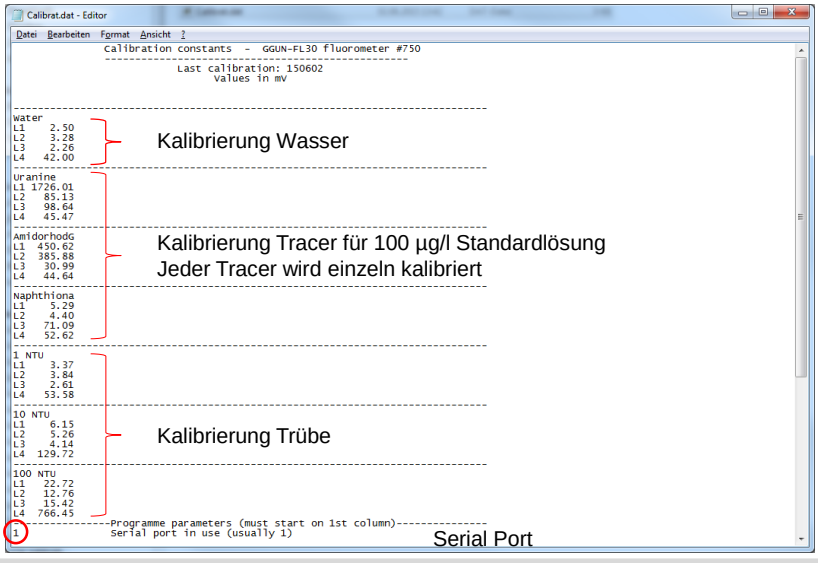
25

Kalibrierung

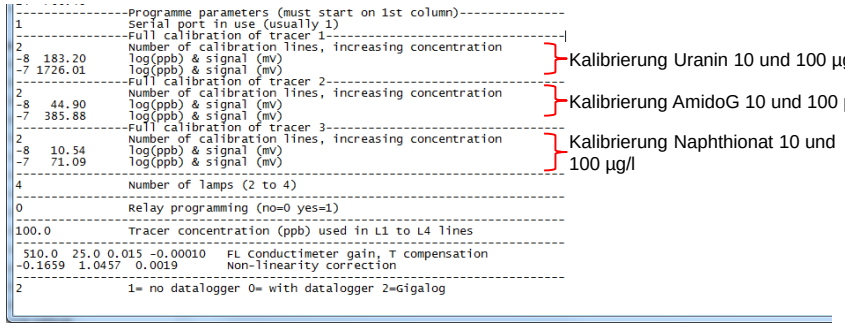
- Erfolgt über die Software oder direkt in der Kalibrierdatei
- Für jedes Gerät gibt es eine eigene originale Kalibrierdatei (Calibrat.dat) ACHTUNG: nicht überschreiben
- Serial Port muss mit dem in der Kalibrierdatei übereinstimmen, um eine Verbindung mit dem Gerät herstellen zu können
- Jede Kalibrierung beginnt mit tracerfreiem Wasser (0-Punkt), im besten Fall mit entsprechendem Beprobungswasser
- Anschließend erfolgt die Kalibrierung mit 10 µg/l und 100 µg/l Standardlösungen
- Bis zu fünf unterschiedliche Konzentrationen sind möglich
- Werte werden über den Button „Save to File“ in die bestehende, zu Beginn ausgewählte Calibrat-Datei gespeichert, aber mit der Endung .new gekennzeichnet. Sie muss anschließend in eine dat-Datei umbenannt werden
- Fehlermeldung tritt auf, falls ein Wert der Tracer niedriger ist, als die Werte der reinen Wasserprobe

26

Beispiel einer Kalibrierdatei



Beispiel einer Kalibrierdatei - Fortsetzung



Vorteile der online Messung

- Analyse fluoreszierender Stoffe direkt vor Ort
- Höhere zeitliche Auflösung
- Direkt verfügbare Ergebnisse
- Keine Schwierigkeiten durch die Probennahme, z.B. durch Querkontaminationen oder Abbauprozesse in der Wasserprobe
- Geringer Aufwand
- Möglichkeit der Datenfernübertragung per GPRS
- Daten werden als Rohdaten (mV) gespeichert, nachträgliche Kalibrierung möglich
- Deutlich geringere Anschaffungskosten als Laborfluorimeter
- Robuste Geräte

29

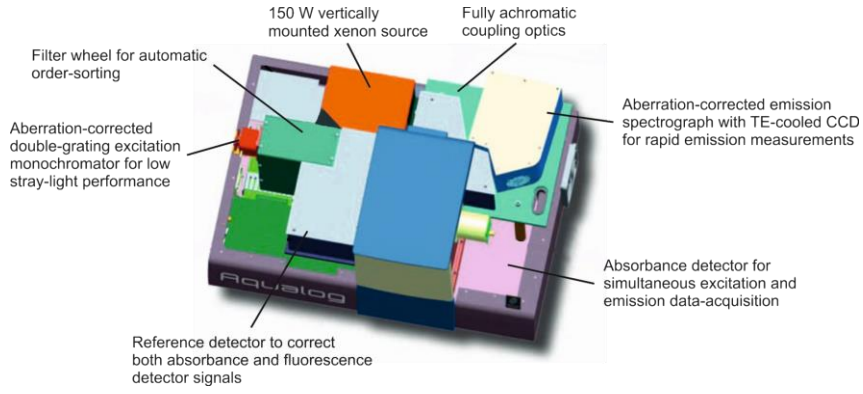
Nachteile der online Messung

- Schlechtere Nachweisgrenze als Laborfluorimeter
- Störung durch Hintergrundfluoreszenz oder Störstoffe, beispielsweise bei hohen Konzentrationen von DOM (z.B. nach Niederschlagsereignissen) kann es zu scheinbaren positiven Naphthionatnachweisen kommen
- Kalibrierung mit jeweiligem Beprobungswasser notwendig
- Eine Validierung der Messergebnisse durch Wiederholungsmessungen von Wasserproben an einem Spektralfluorimeter ist sinnvoll
- Eignet sich nicht um Aktivkohleeluat zu analysieren

30

Excitations-Emissions-Spektroskopie (3D Messung, EEM)

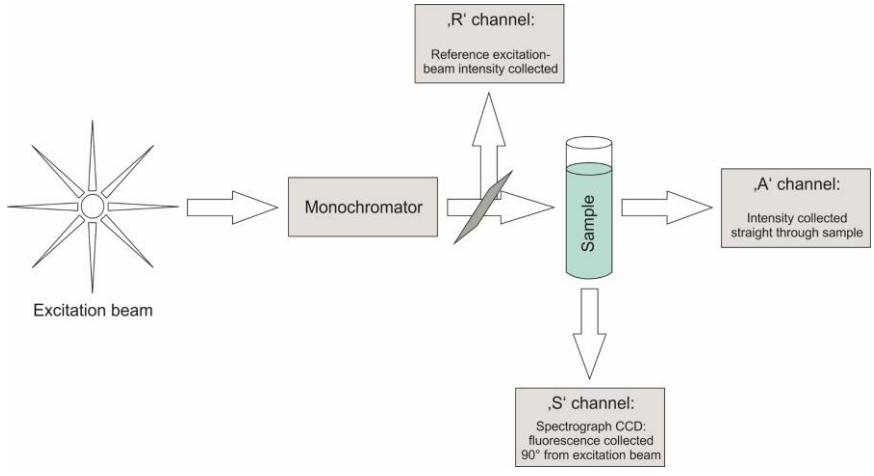
- Aufbau des Fluorimeters HORIBA Aqualog®



verändert nach: HORIBA Aqualog® Produktbrochüre

31

Funktionsweise des Fluorimeters



verändert nach: HORIBA Aqualog® user manual

32

Merkmale der Hardware

- Simultane Messung von Absorption und Fluoreszenz
- Thermoelement (TE) gekühlter CCD (charge-coupled device) Emissionsdetektor ermöglicht bis zu 100 mal schnellere Datenerfassung als herkömmliche Laborfluorimeter
- Korrigierte UV-VIS Absorptionsaufnahme für verbesserte Stabilität und Genauigkeit
- Doppelmonochromator in der Anregung für Streulichtunterdrückung
- Angepasster Bandpass für Absorption und Fluoreszenzspektren
- Optionaler Probenwechsler und Durchflusszellen möglich

33

Hardware - Spezifikationen

Lichtquelle	150 W Xenon-Lichtbogenlampe
Excitation	200 nm bis oberes Limit des Emissionsdetektors
Emission	200 - 600 nm
Excitationsbandpass	5 nm
Emissionsbandpass	5 nm
Excitationswellenlängengenauigkeit	± 1 nm
Emissionsdetektor	TE gekühlter CCD
Emissionsintegrationszeit	min. 5 ms

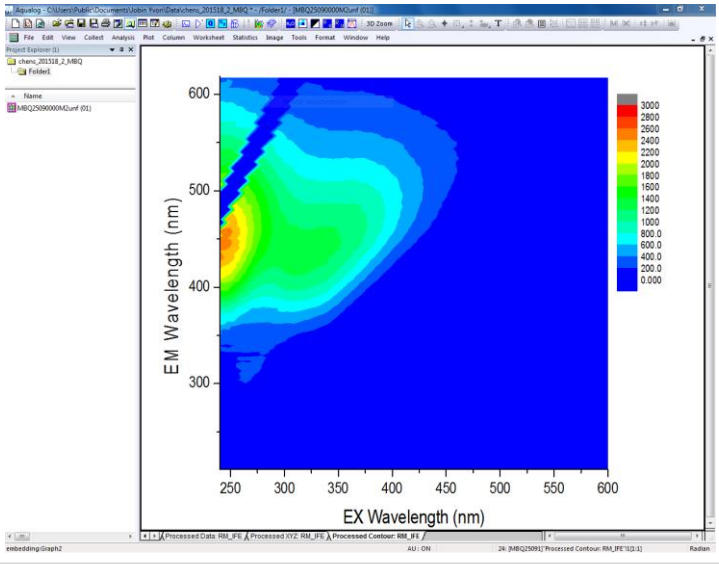
34

Merkmale der Software

- Basierend auf Origin
- Vollständige und automatische Korrektur der Fluoreszenzspektren nach NIST-Standards (National Institute of Standards and Technology) möglich, z.B. Inner-filter effects und Rayleigh-masking
- Möglichkeit der Normalisierung auf Quinine Sulfat Units (QSU) oder Raman Units (R.U.)
- Spektrale und Kinetische Analysetools für Absorptions- und Fluoreszenzdaten
- Möglichkeit die EEMs zu exportieren, z.B. für PARAFAC (parallel factor analysis) mit Matlab
- Methoden und Batchprotokolle für automatische mehrfache Probenmessung

35

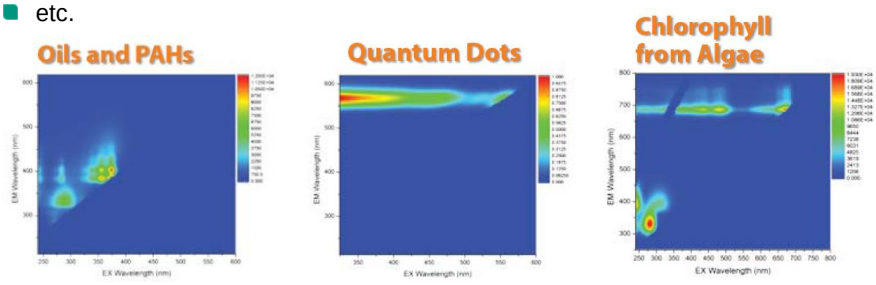
Screenshot der Software



36

Typische Anwendungen

- Messungen von CDOM (chromophoric dissolved organic matter), z.B. Bestimmung der mikrobiologischen Aktivität, Membranverschmutzungen (Mikrofiltration) und Kohlenstoffabbau
- Quantitative hydrologische Studien mit Tracerstoffen (z.B. Uranin, Eosin, Rhodamine, Pyranine)
- etc.

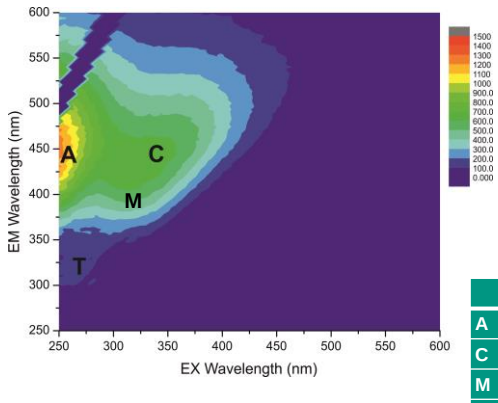


HORIBA Scientific (2015)

37

Beispiele

- CDOM



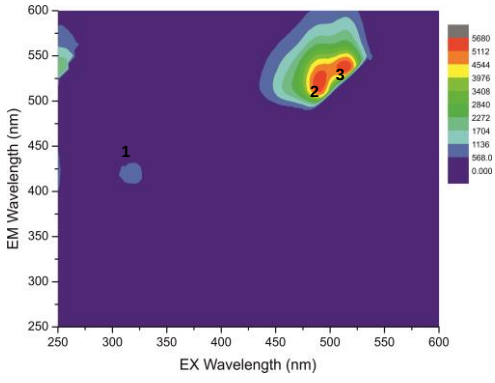
	Component	Ex [nm]	Em [nm]
A	Humic-like	250-260	380-480
C	Humic-like	330-350	420-480
M	Marine humic-like	310-320	380-420
T	Tryptophan-like	270-280	320-350

nach Coble (1996)

38

Beispiele

- Fluoreszenztracer

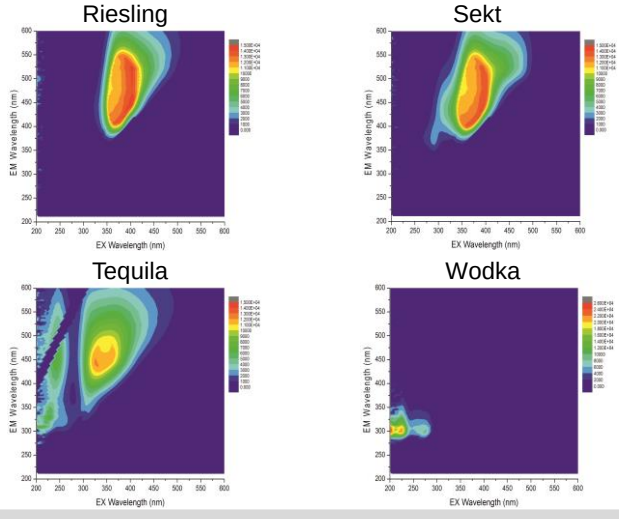


	Tracer
1	Natriumnaphthionat
2	Uranin
3	Eosin

39

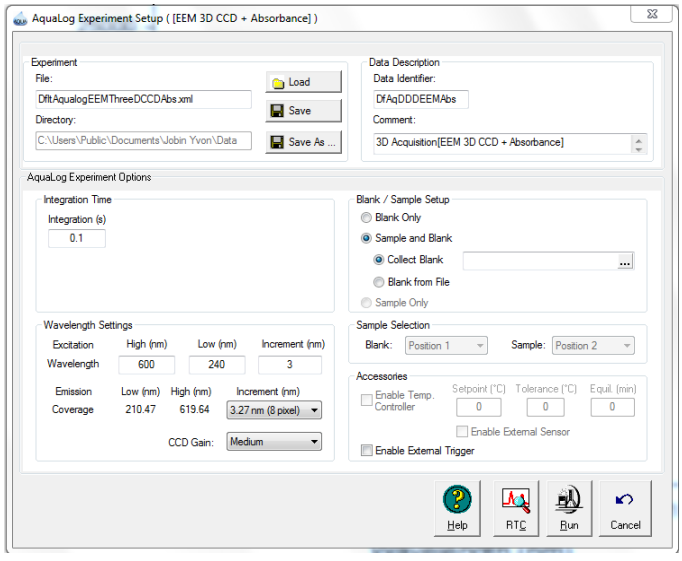
Beispiele

- Inhaltsstoffe



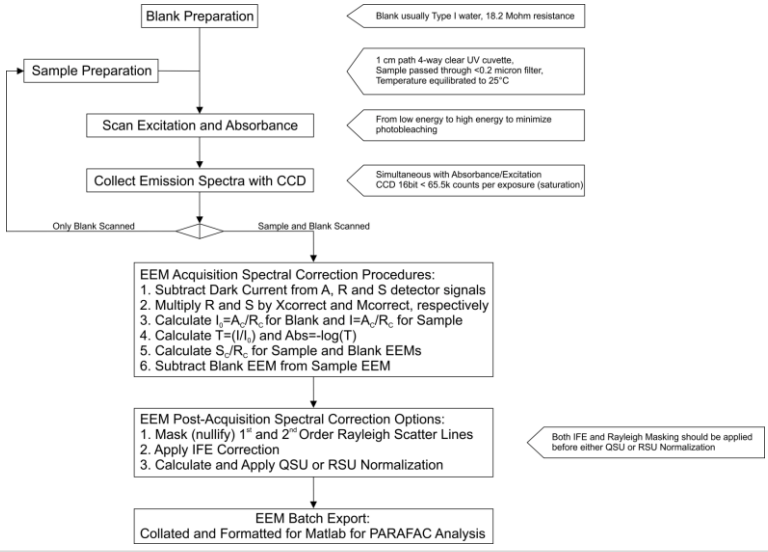
40

Durchführung einer Messung



41

Flow Chart zur Durchführung einer Messung

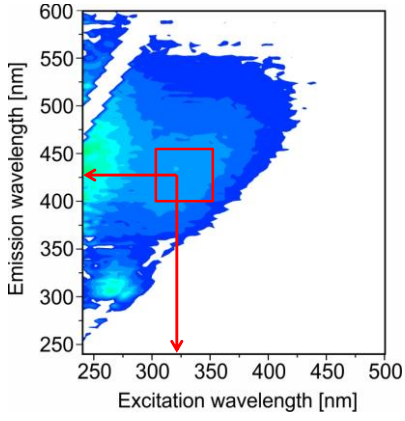


42

Auswertung der Fluoreszenzspektren

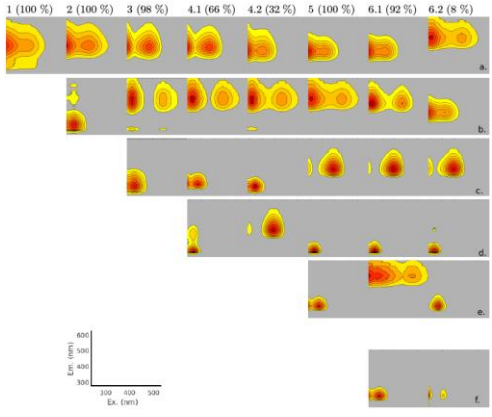
- peak-picking

einfache Datenextraktion: maximale Intensität (z) in vorgegebener Region (x,y)



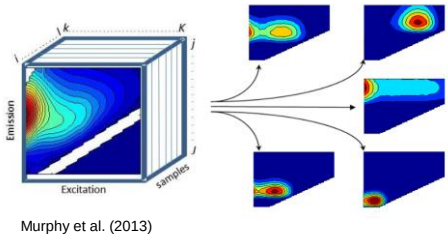
- parafac (**para**llel **fac**tor analysis)

chemometrische Dekomposition um die Struktur eines multivariaten Datensatzes zu analysieren

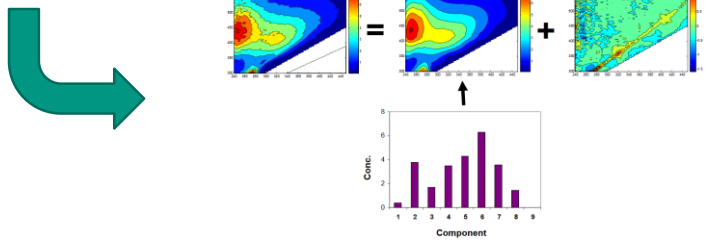


43

PARAFAC (parallel factor analysis)



Murphy et al. (2013)

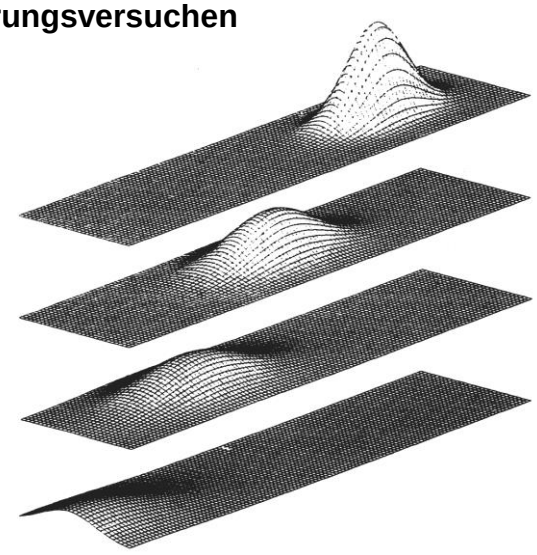


44

Literatur

- Albilia (2015): GGUN-FL Fluorometer Users Manual, Neuchâtel, Switzerland.
- Coble, P.G. (1996):Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy, Marine Chemistry 5, 325-346.
- Coble, P.; Lead, J.; Baker, A.; Reynolds, D.; Spencer, R.G.M (2014): Aquatic Organic Matter Fluorescence, Cambridge University Press.
- HORIBA Scientific (2015): Aqualog Produktbrochüre.
- HORIBA Scientific (2014): Aqualog user manual.
- Murphy, K. R., Stedmon, C. A., Graeber, D., Bro, R. (2013): Fluorescence spectroscopy and multi-way techniques. PARAFAC, Analytical Methods, 23
- Schnegg, P.-A., Bossy F. (2001): Sonde for Downhole Measurement of Water Turbidity and Dye Tracer Concentration. – New Approaches Characterizing Groundwater Flow: 795-798; University of Neuchatel, Switzerland.
- Schnegg, P.-A. (2002): An inexpensive fluorometer for hydrogeological tracer tests with three tracers and turbidity measurement. – Groundwater and Human Development: 1484 -1488; University of Neuchâtel, Switzerland.
- Schnegg, P.-A. (2003): A new field fluorometer for multi-tracer tests and turbidity measurement applied to hydrogeological problems. – Eighth International Congress of The Brazilian Geophysical Society; Rio de Janeiro, Brazil.
- Turner Designs (2017): Trilogy Laboratory Fluorometer User's Manual.

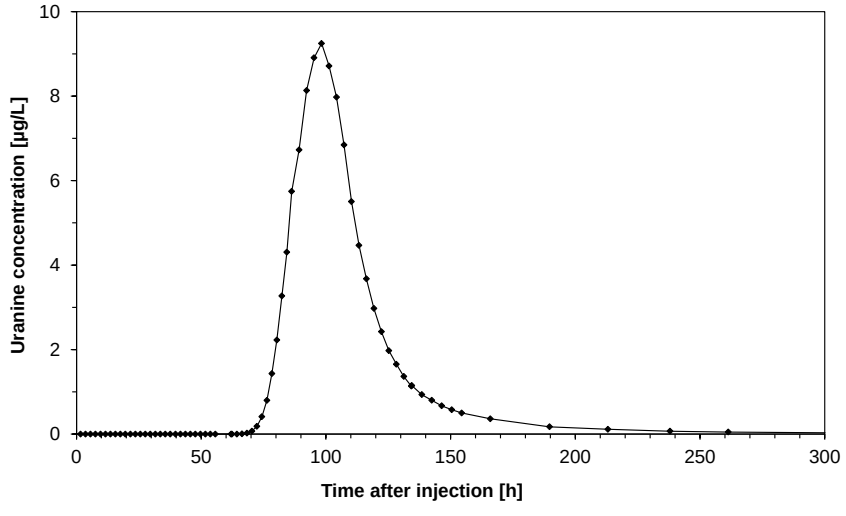
4. Auswertung und Interpretation von Markierungsversuchen



1

Käss 1998

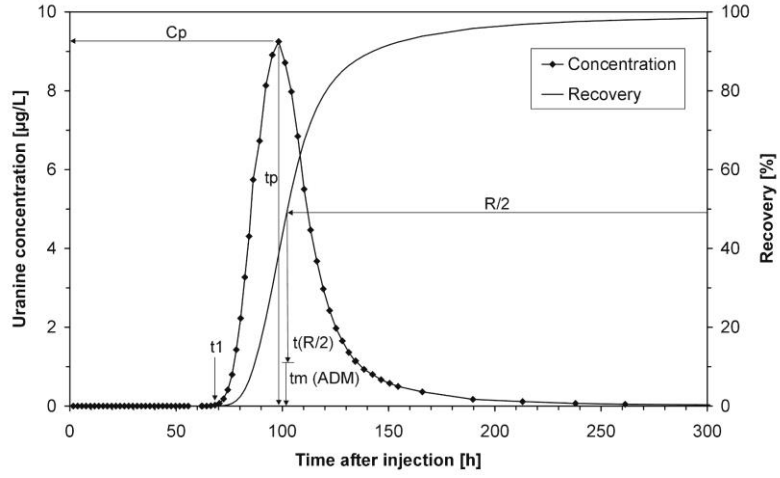
Primäres Ergebnis: Durchgangskurve



2

Goldscheider & Göppert (2008)

Auswertung einer Durchgangskurve



t1 = Zeit des ersten Nachweises
tp = Peak-Zeit, Cp = Peak-Konzentration
t(R/2) = Zeitpunkt des halben Wiedererhalts
tm (ADM) = Mittlere Verweilzeit aus Advektions-Dispersions-Modell

Goldscheider et al. (2008)

3

Berechnung des Wiedererhalts

Konstanter Durchfluss

$$R_M = Q \int_{t=0}^{\infty} c \, dt$$

Variabler Durchfluss

$$R_M = \int_{0}^{\infty} cQ \, dt$$

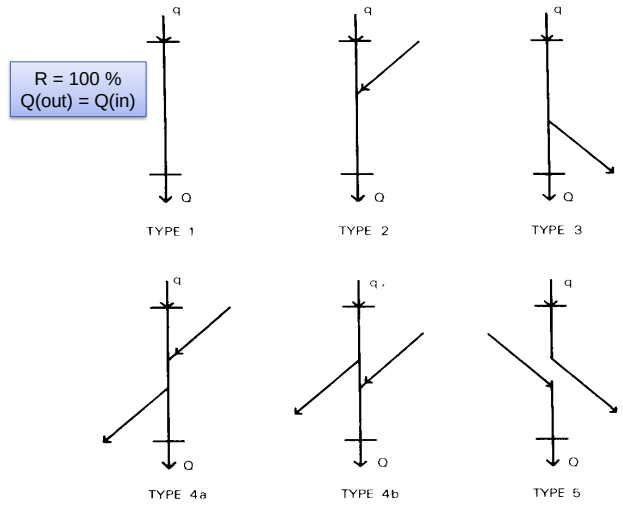
R_M : Wiedererhaltene Tracer-Masse
Q : Durchfluss, Quellschüttung, Pumprate
c : Tracer-Konzentration

Ergebnisse können als absolute Menge (g, kg) oder relativer Anteil (%) ausgedrückt werden.

4

Übung: Auflösung der Konfiguration des Röhrensystems mithilfe von Tracerversuchen

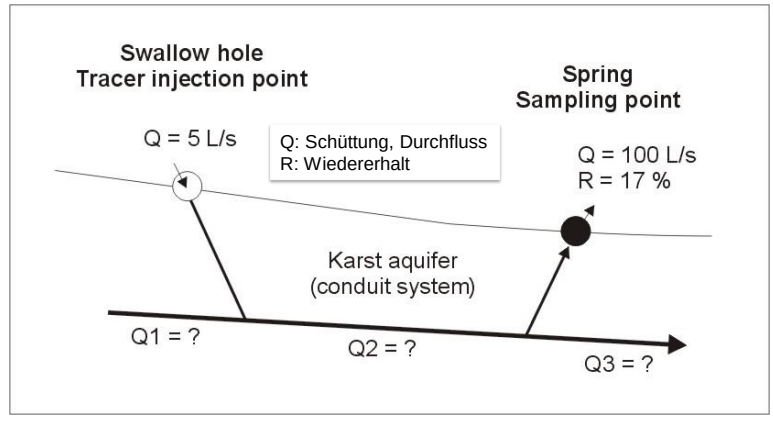
R = 100 %
Q(out) = Q(in)



Q: Durchfluss
R: Wiedererhalt

5

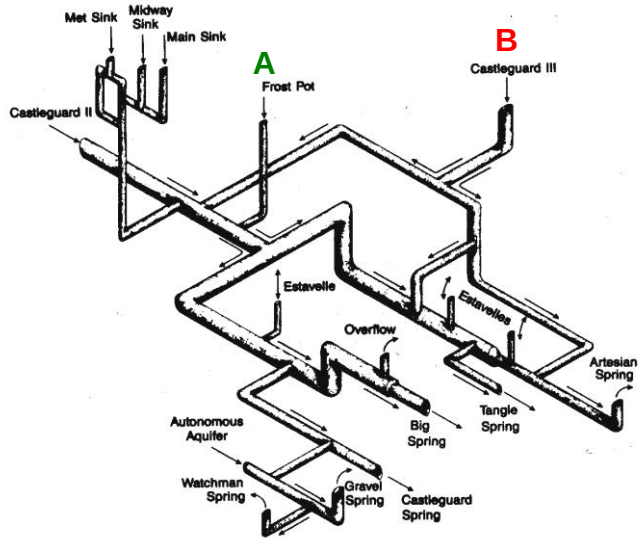
Übung: Berechnung unterirdischer Durchflüsse



Berechne die unterirdischen Durchflüsse Q1, Q2 und Q3!
Annahme: ideale Versuchsbedingungen.

6

Tracer tests in a complex conduit network



Christopher Smart, in Ford & Williams 1989

7

Normierte Konzentrationen

Normiert durch Eingabemenge

$$c_M = \frac{c}{M}$$

Für kombinierte und vergleichende Tracerversuche, bei denen Tracer mit unterschiedlichen Eingabemengen miteinander verglichen werden.

Normiert durch Maximalkonzentration

$$c_{n,\max} = \frac{c}{c_{\max}}$$

Normiert durch Eingabekonzentration

$$c_{n,input} = \frac{c}{c_{input}}$$

Nur für spezielle Anwendungen bzw. Auswerteverfahren relevant.

8

Übung – normierte Konzentrationen

Tracer	Mass	C(max)
NaCl	100 kg	3.2 mg(Cl)/L
Uranine	200 g	7 µg/L
Naphthionate	5 kg	195 µg/L
Phages	5E+13	1215 p/mL

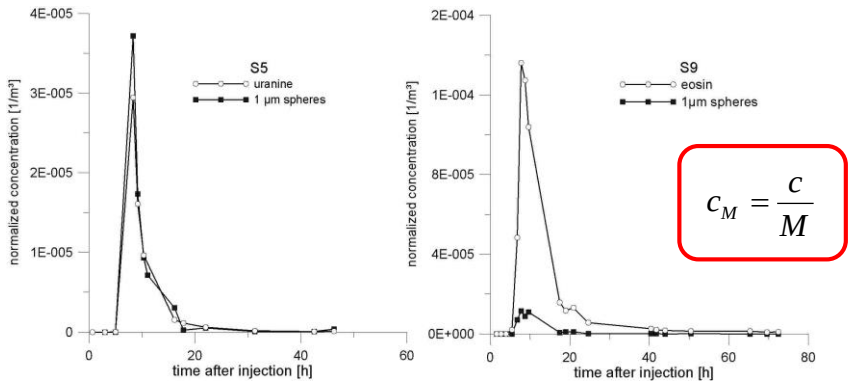
- Bei einem Markierungsversuch wurden vier verschiedene Tracer eingesetzt. Die Tabelle zeigt die jeweiligen Eingabemengen und die gemessenen Maximalkonzentrationen.
- Berechnen Sie die normierten Konzentrationen der vier Tracer.

p/mL = phages/mL, M(Na) = 22.99 g/mol, M(Cl) = 35.45 g/mol

9

Anwendung: Simulation des Bakterientransports

- Alpiner Kluft- bzw. Karstaquifer (karbonatische Konglomerate)
- Zwei Markierungsversuche, Eingabe in 2 Bachschwinden, Probenahme an 2 Quellen, jeweils ca. 1 km Abstand, bei hohen Abflussbedingungen.
- Jeweils Vergleich zwischen löslichem Tracer (Uranin bzw. Eosin) und fluoreszierenden Mikrokügelchen in der Größe von Bakterien (1 µm)

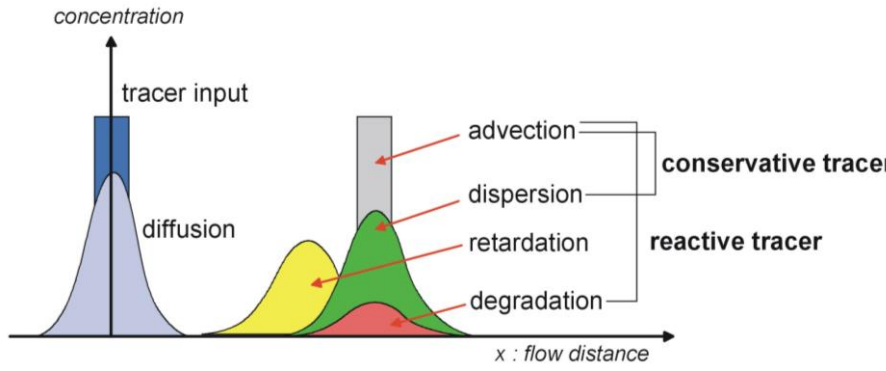


$$c_M = \frac{c}{M}$$

10

Göppert & Goldscheider (2011)

Prozesse des Schadstoff- bzw. Tracer-Transports



11

Advektion: Transport mit der mittleren linearen Fließgeschwindigkeit / Abstandsgeschwindigkeit

$$v_e = \frac{v}{n_e} = \frac{x}{t_m}$$

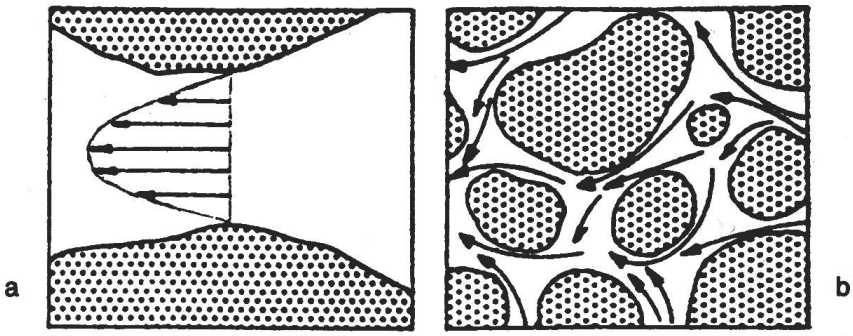
v_e : Abstandsgeschwindigkeit [m/s]
v : Filtergeschwindigkeit [m/s]
n_e : Effektive Porosität [-]
x : Abstand [m]
t_m : **mittlere Verweilzeit** [s]

- Die Filtergeschwindigkeit v ergibt sich aus dem Gesetz von Darcy und kann durch hydraulisches Experimente bestimmt werden.
- Mittlere Verweilzeit t_m (bzw. Abstandsgeschwindigkeit v_e) kann durch Tracerversuche bestimmt werden.

➔ Bestimmung der effektiven Porosität n_e.

12

Dispersion: Varianz der Fließgeschwindigkeiten

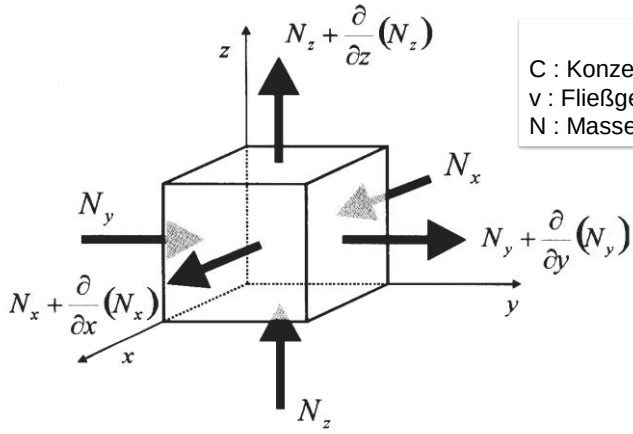


Hydrodynamische Dispersion auf zwei verschiedenen mikroskopischen Maßstäben – es gibt Dispersion auf allen Maßstäben

Käss 1998

13

Mathematische Beschreibung des 3D Stofftransports



N = v · C
C : Konzentration [g/L]
v : Fließgeschwindigkeit [m/s]
N : Massenfluss [g/s/m²]

Input = Output

14

3-D Advektions-Dispersions-Gleichung

3-D Transport eines idealen Tracers im Grundwasser,
Strömung entlang der X-Achse

$$\frac{\delta C}{\delta t} = \underbrace{D_x \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} + D_y \frac{\delta^2 C}{\delta y^2} + D_z \frac{\delta^2 C}{\delta z^2}}_{\text{Dispersion}} - \underbrace{v \frac{\delta C}{\delta x}}_{\text{Advektion}}$$

C	: Konzentration [g/L]
D	: Dispersionskoeffizienten (longitudinal, transversal, vertikal) [m^2/s]
t	: Zeit [s]
x, y, z	: Raumkoordinaten; Strömung in X-Richtung [m]

15

2-D Advektions-Dispersions-Gleichung

2-D Transport eines idealen Tracers im Grundwasser,
Strömung entlang der X-Achse

$$\frac{\delta C}{\delta t} = \underbrace{D_l \cdot \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} + D_t \cdot \frac{\delta^2 C}{\delta y^2}}_{\text{Dispersion}} - \underbrace{v \frac{\delta C}{\delta x}}_{\text{Advektion}}$$

C	: Konzentration [g/L]
D	: Dispersionskoeffizienten (longitudinal, transversal) [m^2/s]
t	: Zeit [s]
x, y	: Raumkoordinaten; Strömung in X-Richtung [m]

16

1-D Advektions-Dispersions-Gleichung

1-D Transport eines idealen Tracers im Grundwasser

$$\frac{\delta C}{\delta t} = D \cdot \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} - v \frac{\delta C}{\delta x}$$

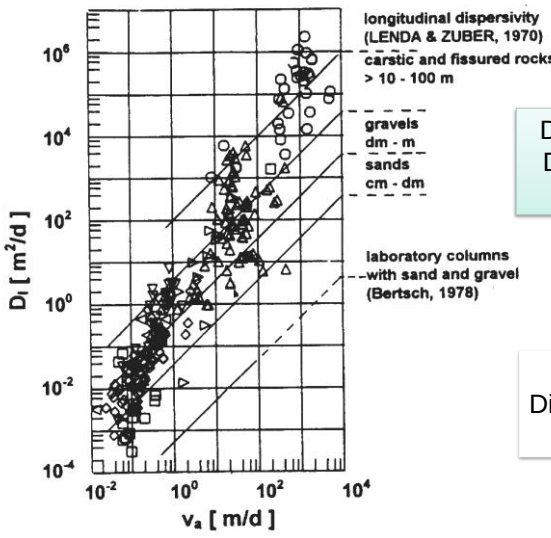
Dispersion | Advektion

C	: Konzentration [g/L]
D	: (longitudinaler) Dispersionskoeffizient [m^2/s]
t	: Zeit [s]
x	: Strecke in Fließrichtung [m]

Advection-Dispersion Model / Equation (ADM/ADE)
= Convection-Dispersion Model / Equation (CDM/CDE)

17

Dispersion und Dispersivität



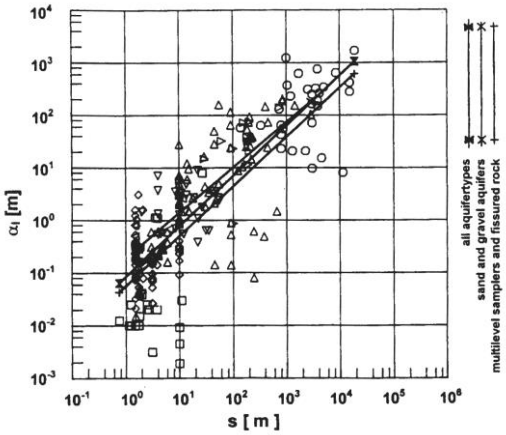
Der Dispersionskoeffizient D korreliert positiv mit der Fließgeschwindigkeit v

Dispersivität $\alpha = \frac{D}{v}$ [m]

18 Käss 1998

Dispersivität, Dispersions-Parameter, PECLET-Zahl

Die Dispersivität α korreliert positiv mit der Fließstrecke x



Käss 1998

Dispersions-Parameter

$$P_D = \frac{\alpha}{x} = \frac{D}{x \cdot v}$$

Peclet-Zahl

$$Pe = \frac{1}{P_D} = \frac{x}{\alpha}$$

(dimensionslos)

19

Lösung der 1-D Differentialgleichung

Anfangs- und Randbedingungen:
1-D Transport eines ideal konservativen Tracers in einem porösen Medium, momentane Tracereingabe (DIRAC-Puls)

$$c(x,t) = \frac{M}{Q \cdot t_0 \cdot \sqrt{4 \cdot \pi \cdot P_D \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^3}} \exp\left[-\frac{\left(1 - \frac{t}{t_0}\right)^2}{4 \cdot P_D \cdot \frac{t}{t_0}} \right]$$

t : Zeit [s]
x: Fließstrecke [m]
M : Tracer-Masse [mg]
Q: Fließrate [m^3/s]
t_0 : Mittlere Verweilzeit [s]
c : Konzentration [mg/m^3]

Dispersions-Parameter P_D

$$P_D = \frac{D_L}{v \cdot x}$$

D_L : Longitudinaler Dispersionskoeffizient [m^2/s]
v : Abstandsgeschwindigkeit [m/s]

20

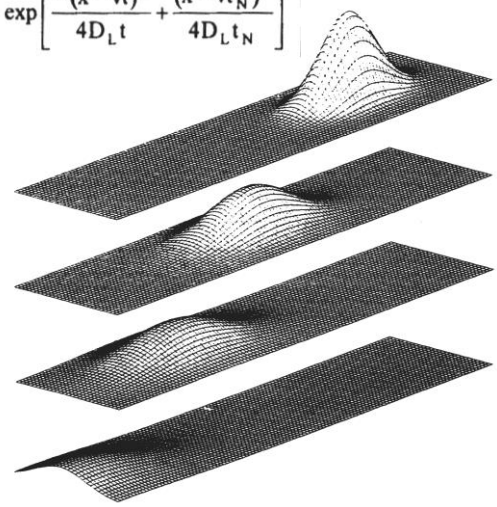
Ausgewählte analytische Lösungen der AD-Gleichung

Dimension	Initial-/Border-Conditions	Analytical Solution	Fit parameters	Application	References
1-D ①	$C_f(0,t)=\frac{M}{Q}\delta(t)$ $C_f(\infty,t)=0$ $C_f(x,0)=0$	$C_f(x,t)=\frac{M}{Q\cdot t_0\cdot\sqrt{4\pi P_D\left(\frac{t}{t_0}\right)^3}}\exp\left[-\frac{\left(1-\frac{t}{t_0}\right)^2}{4P_D\frac{t}{t_0}}\right]$	t_0 P_D	Field experiments with measured discharge Q	BEAR 1972 KREFT & ZUBER 1978
1-D normalised ②	$C_{fN}(0,t)=\frac{M}{Q}\delta(t)$ $C_{fN}(\infty,t)=0$ $C_{fN}(x,0)=0$	$C_{fN}(x,t)=\frac{C_f(x,t)}{C_N(x,t_N)}=\sqrt{\left(\frac{t_N}{t}\right)^3}\exp\left[\frac{1-\frac{t_N}{t}}{4t_N t_0}\left(P_D-\frac{t_N t}{P_D}\right)\right]$	t_0 P_D	Field experiments with unknown discharge Q	KREFT & ZUBER 1978
2-D ③	$C_{2D}(0,0,t)=\frac{M}{Q}\delta(t)$ $C_{2D}(\infty,\infty,t)=0$ $C_{2D}(x,y,0)=0$	$C_{2D}(x,y,t)=\frac{M}{nh}\frac{x}{4\pi v t^2\sqrt{D_L D_T}}\exp\left[\frac{-(x-vt)^2}{4D_L t}-\frac{y^2}{4D_T t}\right]$	t_0 D_L D_T	Field experiments	LENDA & ZUBER 1970 KINZELBACH 1986
2-D normalised ④	$C_{2N}(0,0,t)=\frac{M}{Q}\delta(t)$ $C_{2N}(\infty,\infty,t)=0$ $C_{2N}(x,y,0)=0$	$C_{2N}(x,y,t)=\frac{C_{2D}(x,y=0,t)}{C_N(x,y=0,t_N)}=\left(\frac{t_N}{t}\right)^2\exp\left[\frac{-(x-vt)^2}{4D_L t}+\frac{(x-vt_N)^2}{4D_L t_N}\right]$	t_0 D_L	Field experiments with observation point on the main stream line	ATH 1992
1-D ⑤	$C_p(0,t)=\frac{M}{Q}\delta(t)$ $C_p(\infty,t)=0$ $C_p(r,0)=0$	$C_p(r,t)=\frac{M}{Qt_r\sqrt{4\pi P_D\left(\frac{t}{t_R}\right)^3}}\exp\left[\frac{-\left(1-\frac{t}{t_R}\right)^2}{4P_D\frac{t}{t_R}}\right]$	t_R P_D	Pump-tracer-tests	

21

2D-Visualisierung des Tracer-Transports im Aquifer

$$C_{2N}(x,y,t)=\frac{C_{2D}(x,y=0,t)}{C_N(x,y=0,t_N)}=\left(\frac{t_N}{t}\right)^2\exp\left[\frac{-(x-vt)^2}{4D_L t}+\frac{(x-vt_N)^2}{4D_L t_N}\right]$$



Tracer-Wolke zu vier verschiedenen Zeitpunkten

Käss 1998

22

Direkte Probleme (Vorwärtsberechnung)

Gegeben: Transportparameter (v, D) und Versuchsbedingungen

Gesucht: Durchgangskurve

Prognose der theoretischen Durchgangskurve für bekannte oder geschätzte Transportparameter.

Anwendung:

- Theoretisches Verständnis und Visualisierung des Stofftransports.
- Quantitativ fundierte Planung von Markierungsversuchen (Eingabemengen, Probenahmestrategien).
- Bei Schadstoffen: Prognose der Schadstoffverteilung.

23

Inverse Probleme

Gegeben: Durchgangskurve (Messreihe von CT-Daten)

Gesucht: Transportparameter

Die Durchgangskurve als Ergebnis eines Tracerversuchs liegt vor; daraus sollen invers die Transportparameter berechnet werden.

Anwendung:

- Bestimmung der Transportparameter durch Anpassung („Best-Fit") einer theoretischen Durchgangskurve an die gemessenen Daten.

Direkte und inverse Problemen können entweder „manuell" (mit EXCEL) oder durch entsprechende Software (z.B. CXTFIT) gelöst werden.

24

Erstellung einer theoretischen Durchgangskurve

Analytische 1D-ADM-Formel im EXCEL-Format:

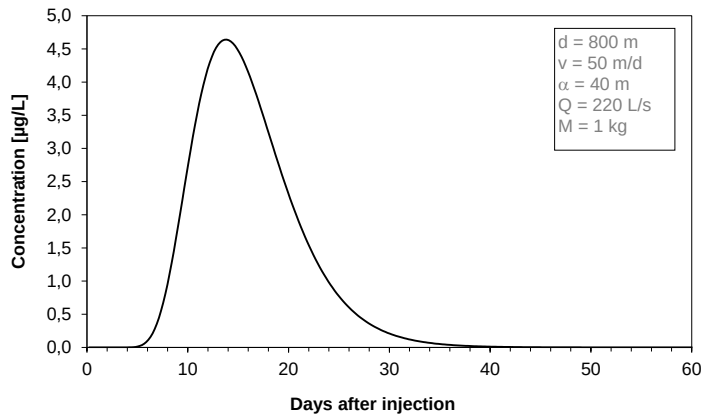
```
=($C$3/($C$4*$C$5*SQRT(4*3.1415926*$C$6*(D3/$C$5)^3)))*EXP(-((1-(D3/$C$5))^2)/(4*$C$6*D3/$C$5))
```

1D Advection-Dispersion Equation

Injetced Mass	M [mg]	190000
Discharge	Q [m³/s]	0.500
mean transit time	t0 [s]	180000
Dispersion Parameter	PD [-]	0.0050
Dispersion Coefficient	DL [m²/s]	0.0278
Dispersivity	αL [m]	5.00
Distance	x [m]	1000
mean velocity	v [m/s]	0.01
Yellow = input values		
Injected mass	M [g]	190.00
Discharge	Q [l/s]	500
mean transit time	t0 [h]	50.00
Dispersivity	αL [m]	5.00
Distance	x [m]	1000
mean velovity	v [m/h]	20.00
	t max [h]	100
	t max [s]	360000
	t 1 [s]	360.00

t [s]	t [h]	c [mg/m³]
360	0.10	0.00E+00
720	0.20	0.00E+00
1080	0.30	0.00E+00
1440	0.40	0.00E+00
1800	0.50	0.00E+00
2160	0.60	0.00E+00
2520	0.70	0.00E+00
2880	0.80	0.00E+00
3240	0.90	0.00E+00
3600	1.00	0.00E+00
3960	1.10	0.00E+00
4320	1.20	0.00E+00
4680	1.30	0.00E+00
5040	1.40	0.00E+00
5400	1.50	0.00E+00
5760	1.60	0.00E+00
6120	1.70	0.00E+00
6480	1.80	0.00E+00
6840	1.90	0.00E+00
7200	2.00	0.00E+00
7560	2.10	0.00E+00
7920	2.20	0.00E+00
8280	2.30	0.00E+00
8640	2.40	0.00E+00
9000	2.50	0.00E+00
9360	2.60	0.00E+00
9720	2.70	0.00E+00

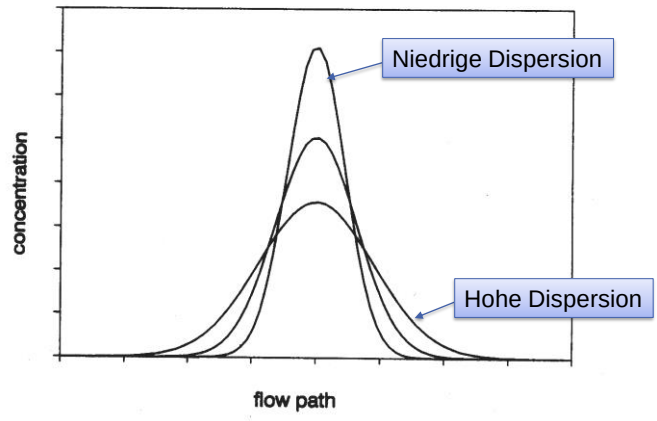
Theoretische Durchgangskurve, 1D-ADM



Hilft bei der Planung von Tracerversuchen: Bestimmung der Eingabemenge, die zur gewünschten Zielkonzentration führt; Optimierung der Probenahmepläne

26

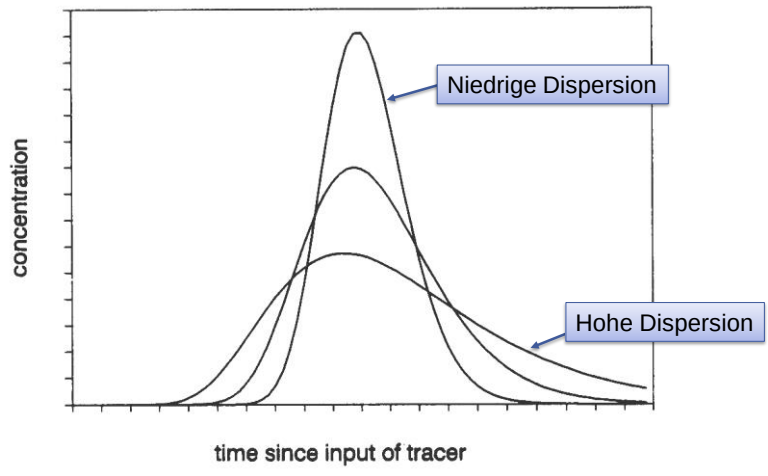
Direkte Probleme: Einfluss der Dispersion (CX-Diagramm)



Momentane Tracer-Eingabe, T = konstant, 3 verschiedene Dispersionen

27

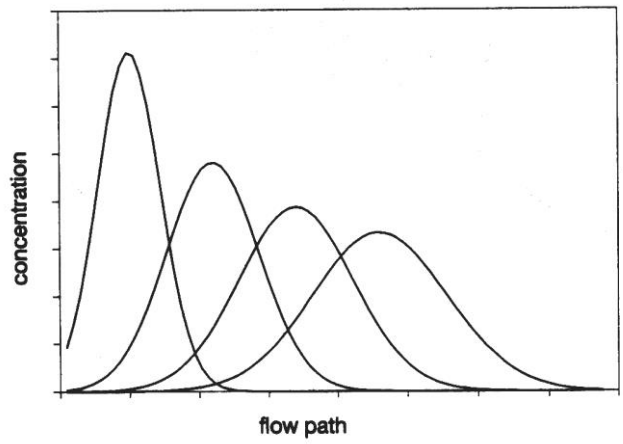
Einfluss der Dispersion (CT-Diagramm)



Momentane Eingabe, X = konstant, 3 verschiedene Dispersionen

28

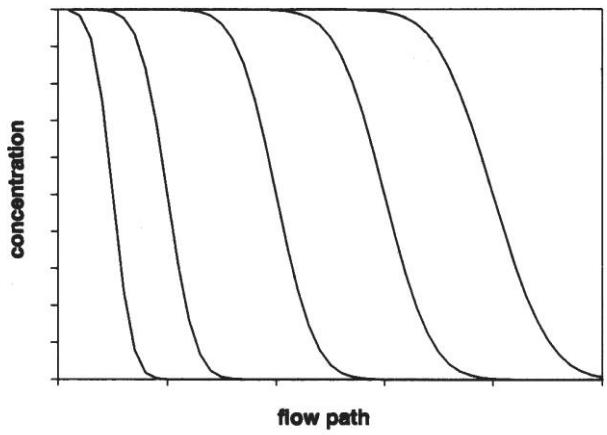
1-D Tracer-Transport – momentane Eingabe



Momentane Eingabe, 4 verschiedene Zeitpunkte, v und D = konstant

29

1-D Tracer-Transport – kontinuierliche Eingabe



Kontinuierliche Eingabe, 5 verschiedene Zeitpunkte, v und D = konstant

30

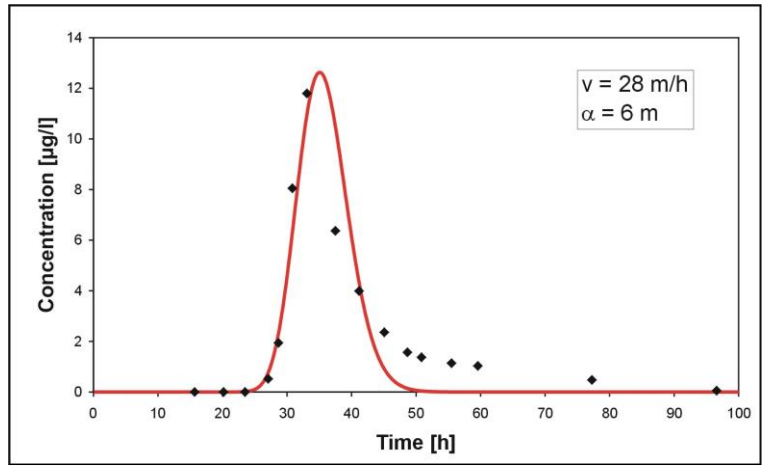
Inverse Probleme: Prinzip des Best-Fit-Ansatzes

1. CT-Daten (Durchgangskurve) eines realen Tracerversuchs.
2. Theoretische Durchgangskurve (z.B. ADM) mit abgeschätzten Transportparametern.
3. Transportparameter solange variieren, bis die theoretische Durchgangskurve die gemessenen Daten optimal reproduziert.
4. Dabei werden mindestens ein Advektions- und eine Dispersionsparameter für die Anpassung benötigt.

Kann „manuell“ mit EXCEL oder mit entsprechender Software (CXTFIT) gemacht werden.

31

Beispiel für Best-Fit-Ansatz mit EXCEL



Die rote Linie ist eine theoretische Durchgangskurve, die durch Variation von v und α an die gemessenen Werte (schwarze Punkte) angepasst wurde.

32

Erklärung für Tailing bzw. Plateau der Durchgangskurven

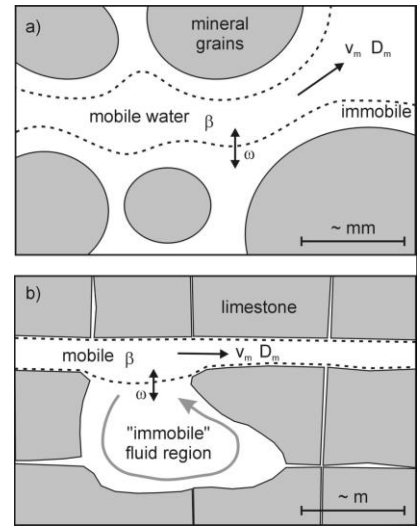
Mobile und immobile Fluidbereiche

a) In einem Porengrundwasserleiter
b) Im Karstaquifer von Stuttgart

Erklärung für Tailing:

- Rascher Tracer-Transport in mobilen Bereichen
- Zwischenspeicherung in immobilen Bereichen
- Langsame Wiederfreisetzung des Tracers aus diesen Bereichen.

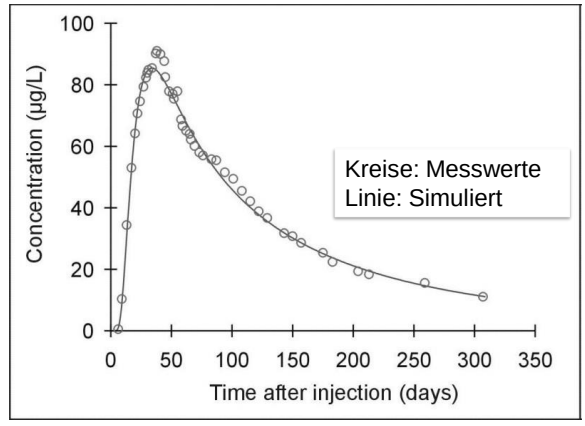
Two-Region Non-Equilibrium Model (2 RNE)



33

Goldscheider (2008)

Beispiel für Best-Fit-Ansatz mit CXTFIT



Die theoretische Kurve wurde mit CXTFIT automatisch an die Messwerte angepasst. Das extrem lange Tailing konnte nicht mit einem konventionellen Advektions-Dispersions-Modell (ADM) nachgebildet werden.

34

Goldscheider 2008

Karlsruher Institut für Technologie

FH-DGGV

5. Bohrlochmethoden

Dr. Nadine Göppert

Institut für Angewandte Geowissenschaften – Abteilung Hydrogeologie – Prof. Dr. Nico Goldscheider

Karlsruher Institut für Technologie

Programm

FH-DGGV

14:45 - 15:30 Bohrlochmethoden

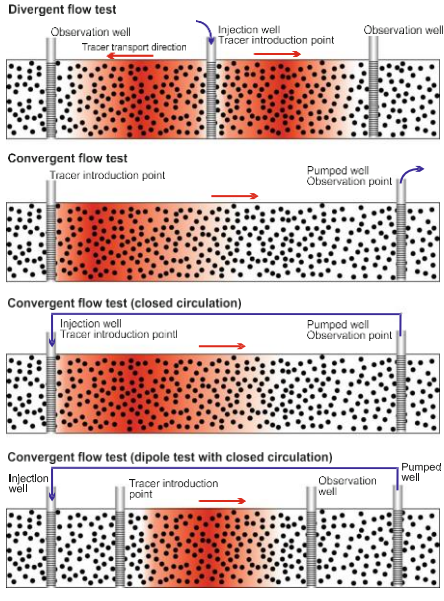
- Methodenüberblick
- Theoretische Grundlagen
- Praxisbeispiele

Methodenüberblick – Bohrlochmethoden

- Mehrbohrlochmethoden:
  - natural-gradient
  - forced-gradient
- Einbohrlochmethoden:
  - Einbohrlochverdünnungsversuche (Single borehole dilution tests - SBDTs)
  - Push-pull-Versuche

3

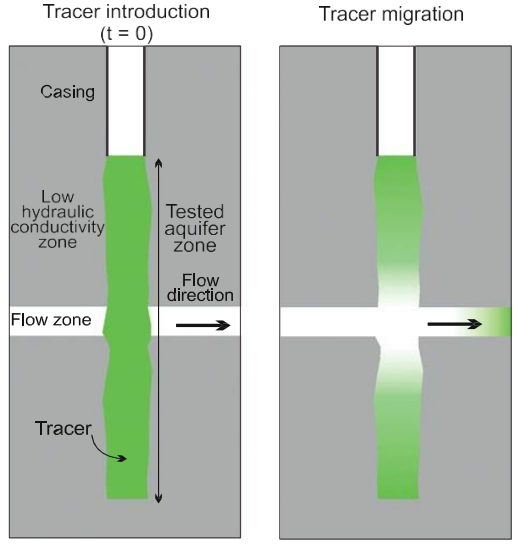
- Mehrbohrlochmethoden:
- natural-gradient
- forced-gradient:
  - divergent flow
  - convergent flow (Pumptracerversuch)
  - two well
  - dipole



4 Fig. 13.3 Conceptual diagram of basic multiple-well forced-gradient test types, aus Maliva, R.G. (2016) Aquifer Characterization Techniques. Schlumberger Methods in Water Resources Evaluation series No. 4. Springer, 632 p.

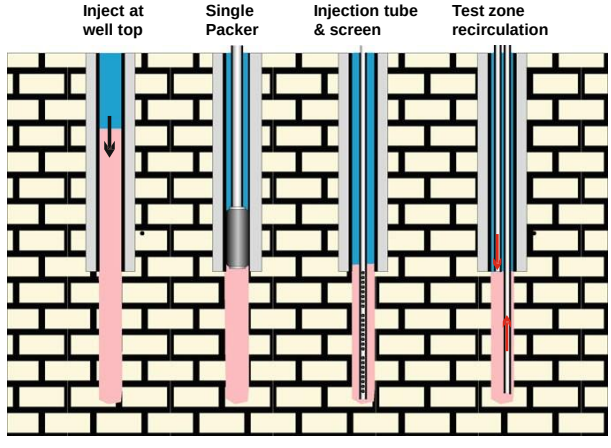
Methodenüberblick – Bohrlochmethoden

- Einbohrlochmethoden:
- Einzelbohrlochverdünnungs-versuche (Single borehole dilution tests - SBDTs)
- Tracer wird in ein Bohrloch eingegeben, Monitoring der Konzentration über die Zeit
- Vorteil: es wird nur ein Bohrloch benötigt
- Annahmen: stationäre Bedingungen, gleichmäßige Verteilung des Tracers, horizontaler Grundwasserfluß



5 Maliva, R.G. (2016) Aquifer Characterization Techniques. Schlumberger Methods in Water Resources Evaluation series No. 4. Springer, 632 p.

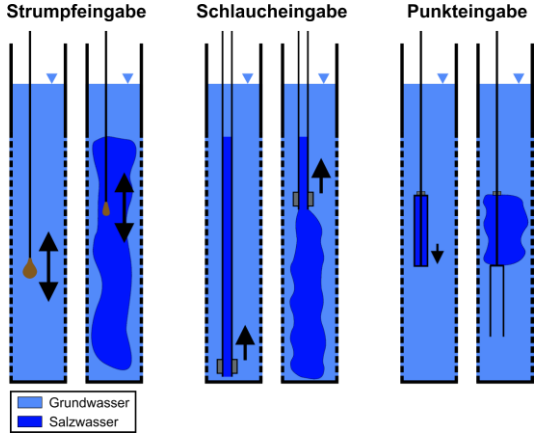
Methodenüberblick – Injektionsmethoden



6 Maliva, R.G. (2016) Aquifer Characterization Techniques. Schlumberger Methods in Water Resources Evaluation series No. 4. Springer, 632 p.

Methodenüberblick – Injektionsmethoden

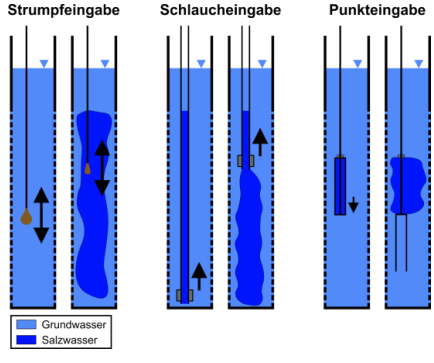
- Dissertation Nikolai Fahrmeier
- Literatur: Fahrmeier, N., Goeppert, N., Goldscheider, N. (2020) Comparative application and optimization of different single borehole dilution test techniques. Hydrogeology Journal.



7 Fahrmeier, Nikolai (2020) Abschlussbericht Durchführung und Auswertung des kombinierten Markierungsversuchs (West) im Wasserschutzgebiet Donauried-Hürbe

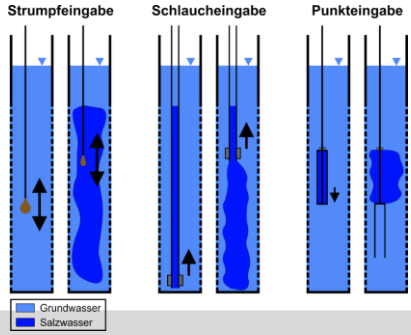
Methodenüberblick – Injektionsmethoden

- Einbringen eines Tracers in eine Messstelle
  - Salz erhöht die elektrische Leitfähigkeit, einfache Messbarkeit mittels Leitfähigkeits-Lichtlot oder CTD-Diver
  - Anhebung der natürlichen Leitfähigkeit auf das 3- oder 4-fache
  - Verschiedene Eingabemethoden können genutzt werden um verschiedene Prozesse zu identifizieren
- Gleichförmige Eingabe (Strumpf/Schlauch):
  - Identifizierung von Bereichen mit schnellerem/langsamerem Abstrom
  - Quantifizierung von horizontalen Filtergeschwindigkeiten
- Punkteingabe:
  - Identifizierung von Vertikalbewegungen
  - Detailuntersuchungen einzelner Tiefen



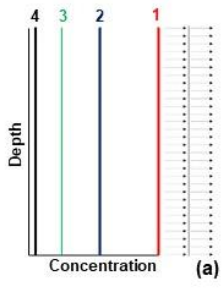
8

Methodenüberblick – Injektionsmethoden

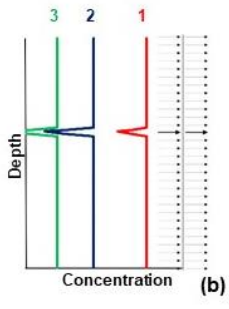


9

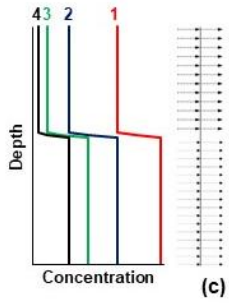
Methodenüberblick – Konzentrations-Zeit-Profile



Uniform horizontal flow



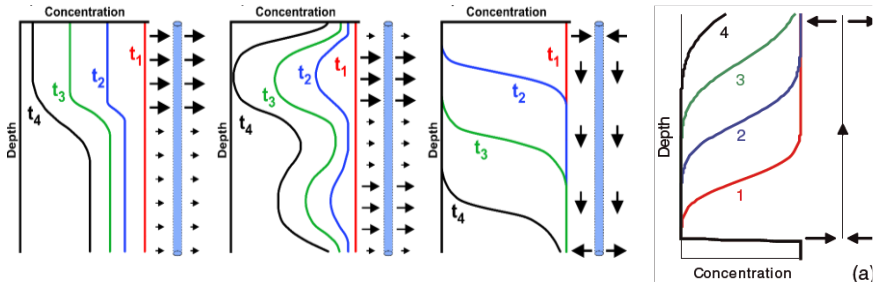
Uniform horizontal flow - with zone of stronger horizontal flow creating a *nick point*



Uniform horizontal flow – with *boundary* between levels of higher and lower flow rates

10 Maurice, L., Barker, J.A., Atkinson, T.C., Williams, A.T., and Smart, P.L. 2011. A tracer methodology for identifying flow in and across boreholes. *Ground Water* 49 (2), 227-238

Methodenüberblick – Konzentrations-Zeit-Profile



Higher flow in the upper part, lower flow in the lower part

Two flow horizons, one near the top, one near the bottom

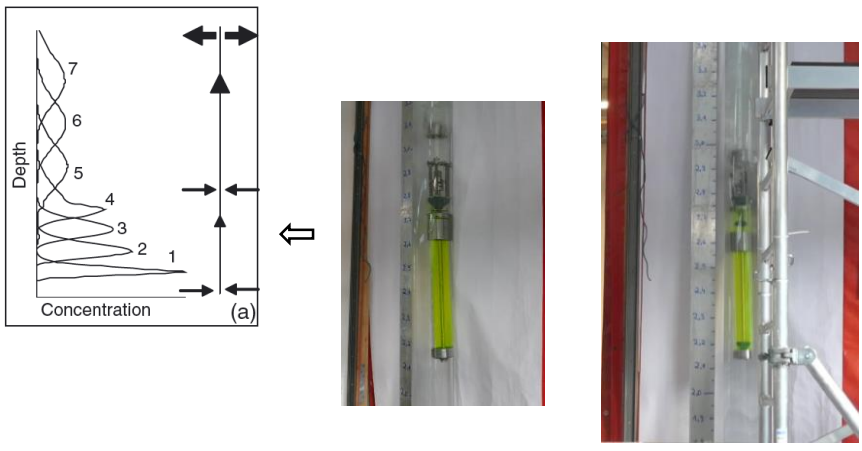
Downwards vertical flow

Upwards vertical flow

Fahrmeier, N., Goeppert, N., Goldscheider, N. (2020) Comparative application and optimization of different single borehole dilution test techniques. Hydrogeology Journal.

11 Maurice, L., Barker, J.A., Atkinson, T.C., Williams, A.T., and Smart, P.L. 2011. A tracer methodology for identifying flow in and across boreholes. *Ground Water* 49 (2), 227-238

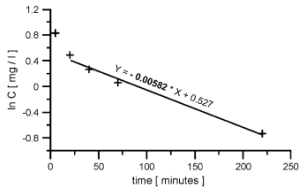
Methodenüberblick – Point dilution test

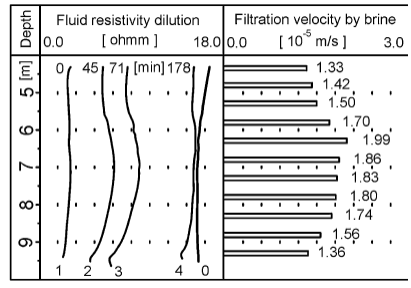


12 Maurice, L., Barker, J.A., Atkinson, T.C., Williams, A.T., and Smart, P.L. 2011. A tracer methodology for identifying flow in and across boreholes. *Ground Water* 49 (2), 227-238

Single borehole dilution tests - Auswertemethoden

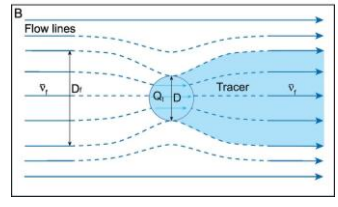
Filtergeschwindigkeit





$$\ln(C_i) = -\left(\frac{2v_a}{\pi r}\right) t_i + \ln(C_1) \qquad m = -\left(\frac{2v_a}{\pi r}\right)$$

$$v_a = \frac{m \times \pi \times r}{2} \qquad v_d = \frac{v_a}{2}$$

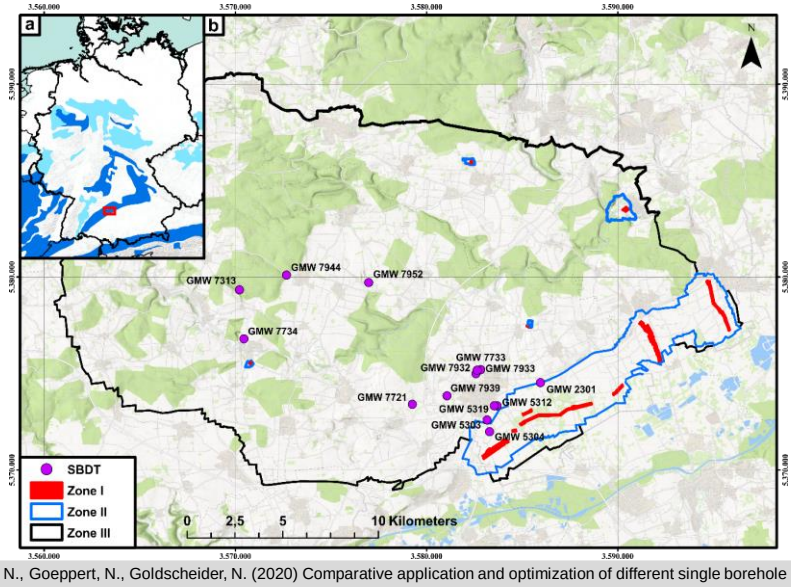


C_i: Konzentration zur Zeit t_i — C_1: Konzentration nach der Eingabe
r: Radius der Messstelle — v_a: Scheinbare Filtergeschwindigkeit (apparent velocity)
m: Geradensteigung — v_d: Filtergeschwindigkeit

alpha (hier 2) entspricht dem drainage coefficient

13 Pitrak, M., Mares, S., Kobr, M. (2007) A simple borehole dilution technique in measuring horizontal ground water flow. Groundwater 45 (1), 89-92.
Carlos H. Maldaner, Patrick M. Quinn, John A. Cherry, Beth L. Parker (2018) Improving estimates of groundwater velocity in a fractured rock borehole using hydraulic and tracer dilution methods. J. Contam. Hydrol. doi:10.1016/j.jconhyd.2018.05.003

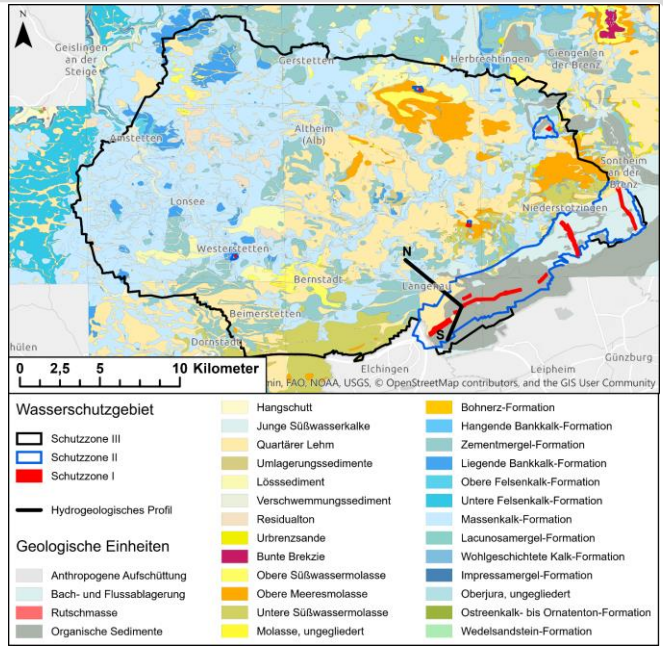
Single borehole dilution tests (SBDTs) – Praxisbeispiel Donauried - Hürbe



14 Fahrmeier, N., Goeppert, N., Goldscheider, N. (2020) Comparative application and optimization of different single borehole dilution test techniques. Hydrogeology Journal.

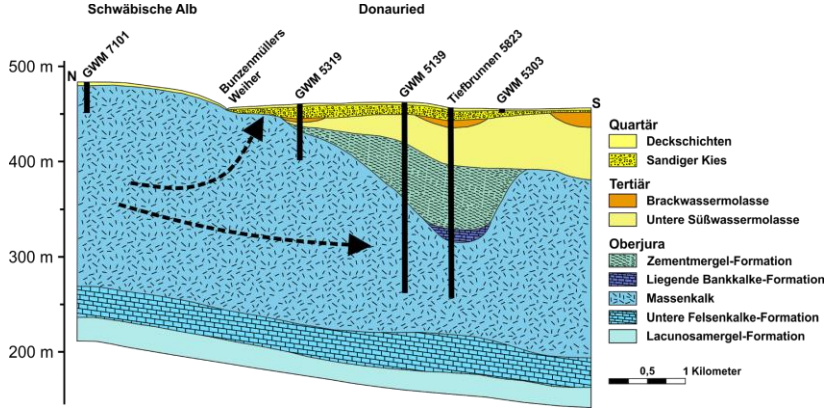
Single borehole dilution tests (SBDTs)

Praxisbeispiel Donauried – Hürbe, Vorbereitung zum Markierungs-versuch



15 Fahrmeier, Nikolai (2020) Abschlussbericht Durchführung und Auswertung des kombinierten Markierungsversuchs (West) im Wasserschutzgebiet Donauried-Hürbe

Single borehole dilution tests (SBDTs) – Praxisbeispiel Donauried – Hürbe, Vorbereitung zum Markierungsversuch

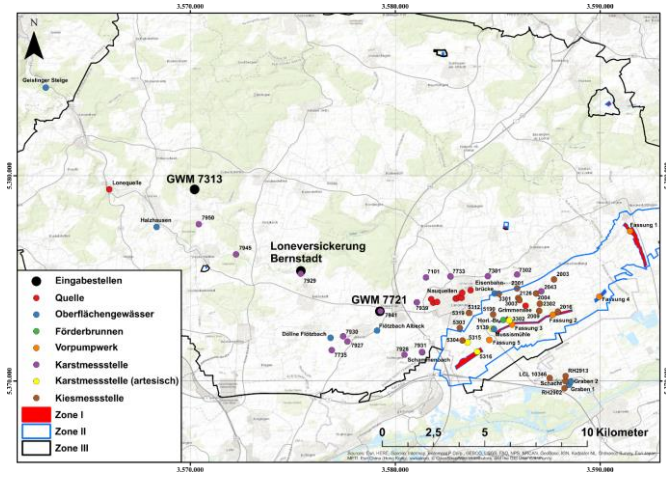


16 Verändert nach Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, 2007; Anlage 8.5

Single borehole dilution tests (SBDTs) – Praxisbeispiel Donauried – Hürbe, Vorbereitung zum Markierungsversuch

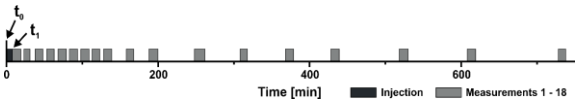
72 Probenahmestellen:

- Karstmessstellen: 21 (4 Arteser)
- Kiesmessstellen: 17
- Quellen: 11
- Oberflächengewässer: 9
- Fassungen: 14 (inkl. Horizontalbrunnen und Karstbrunnen)



17 Fahrmeier, N., Goeppert, N., Goldscheider, N. (2020) Comparative application and optimization of different single borehole dilution test techniques. Hydrogeology Journal.

Single borehole dilution tests (SBDTs) – Praxisbeispiel Donauried – Hürbe, Vorbereitung zum Markierungsversuch

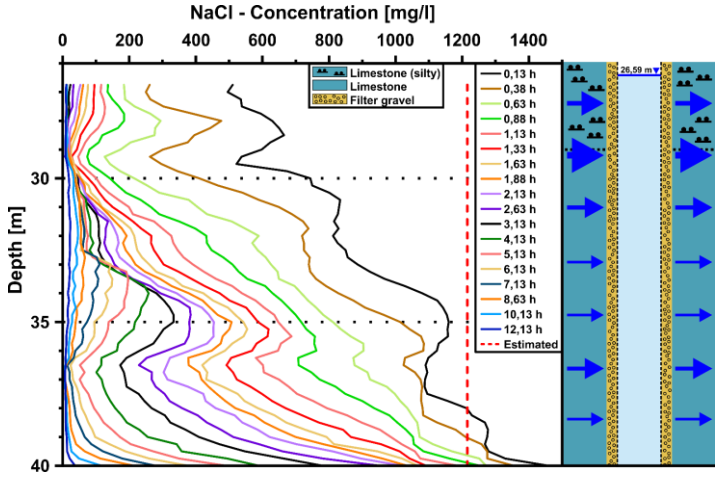


Zeitlicher Ablauf der Messungen eines Bohrlochverdünnungsversuchs

Foto: Sina Hale

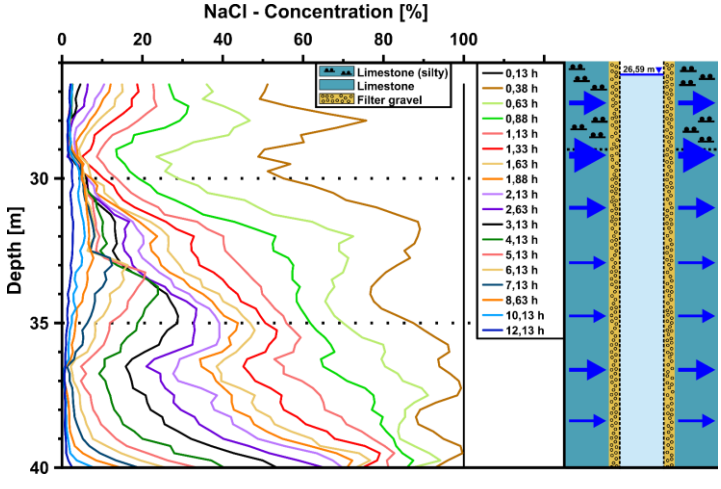
18 Fahrmeier, N., Goeppert, N., Goldscheider, N. (2020) Comparative application and optimization of different single borehole dilution test techniques. Hydrogeology Journal.

Single borehole dilution tests (SBDTs) – Praxisbeispiel Donauried – Hürbe, Vorbereitung zum Markierungsversuch Karst-Messstelle 7733



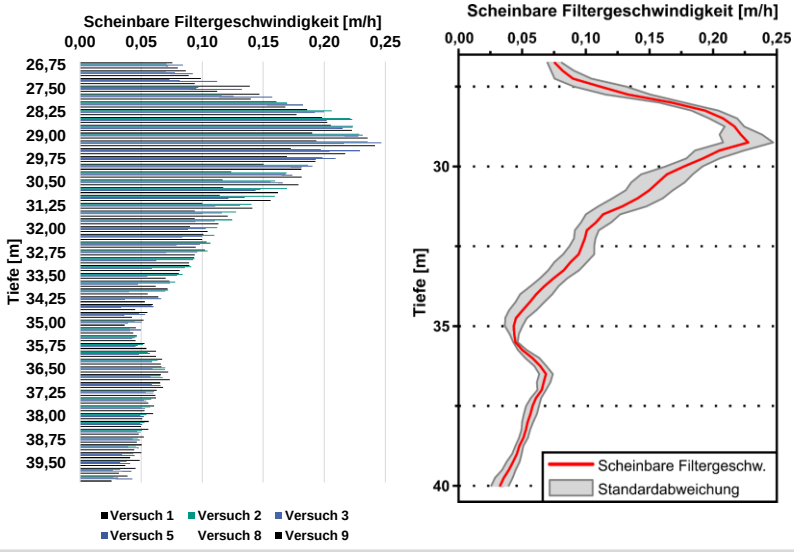
19 Fahrmeier, N., Goeppert, N., Goldscheider, N. (2020) Comparative application and optimization of different single borehole dilution test techniques. Hydrogeology Journal.

Single borehole dilution tests (SBDTs) – Praxisbeispiel Donauried – Hürbe, Vorbereitung zum Markierungsversuch Karst-Messstelle 7733



20 Fahrmeier, N., Goeppert, N., Goldscheider, N. (2020) Comparative application and optimization of different single borehole dilution test techniques. Hydrogeology Journal.

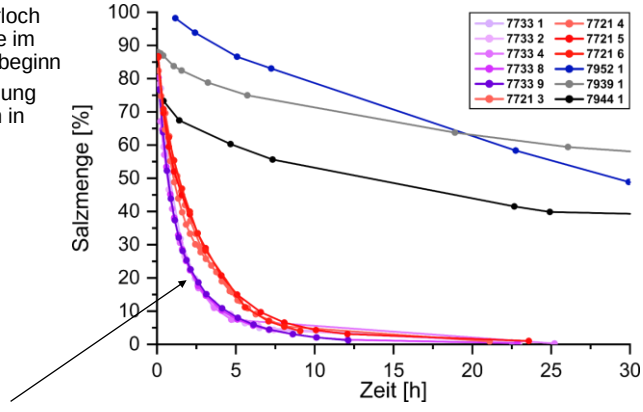
Single borehole dilution tests (SBDTs) – Praxisbeispiel Donauried – Hürbe, Vorbereitung zum Markierungsversuch Karst-Messstelle 7733



21 Fahrmeier, Nikolai (2020) Abschlussbericht Durchführung und Auswertung des kombinierten Markierungsversuchs (West) im Wasserschutzgebiet Donauried-Hürbe

Single borehole dilution tests (SBDTs) – Praxisbeispiel Donauried – Hürbe, Vorbereitung zum Markierungsversuch

- Berechnung der im Bohrloch vorhandenen Salzmenge im Vergleich zum Versuchsbeginn
- Sehr gute Übereinstimmung bei mehreren Versuchen in der selben Messstelle

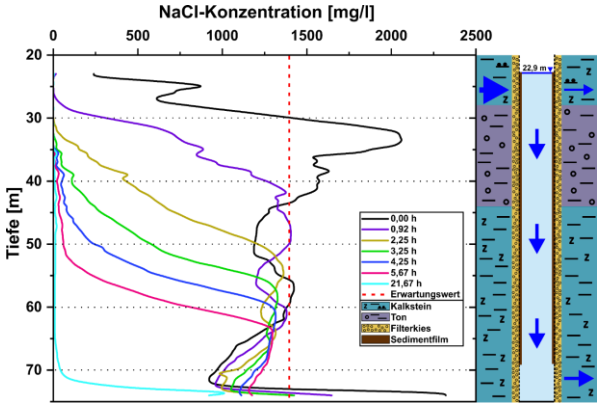


Karst-Messstelle 7733

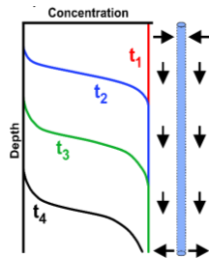
22

Single borehole dilution tests (SBDTs) – Praxisbeispiel Donauried – Hürbe, Vorbereitung zum Markierungsversuch

Messstelle 7721:



Schematisch:



Vertikale Geschwindigkeit ~ 5,40 m/h

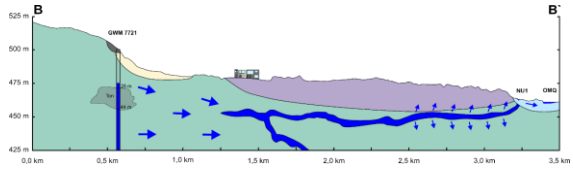
23 Fahrmeier, N., Goeppert, N., Goldscheider, N. (2020) Comparative application and optimization of different single borehole dilution test techniques. Hydrogeology Journal.

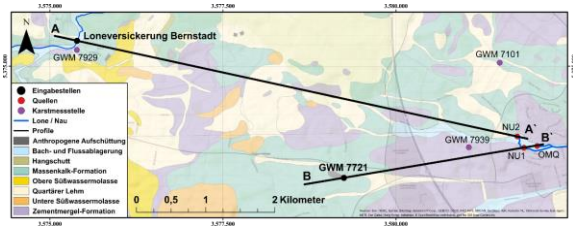
Single borehole dilution tests (SBDTs) – Praxisbeispiel Donauried – Hürbe, Markierungsversuch

Eingabe von 14 kg Eosin in GWM 7721

24

Single borehole dilution tests (SBDTs) – Praxisbeispiel Donauried – Hürbe, Ergebnisse des Markierungsversuchs an Messstelle 7721



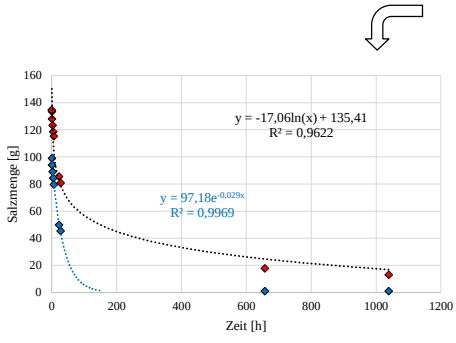


- Sicherer Nachweis einer Verbindung zwischen GWM 7721 und Nauursprung bzw. Öchslesmühlenquelle
- Niedrige Geschwindigkeit (max. 0,44 m/h)
- Durch die langsame Geschwindigkeit tritt Tracer in die Matrix über
- Potentielle Schadstoffe der Deponie etc. werden nur langsam abtransportiert, langfristige Kontaminationen möglich
- Erwarteter Fließweg in Richtung Südosten bzw. Fassung 5, stattdessen Ostnordost, Verlauf der Karströhre nahe GWM 7939

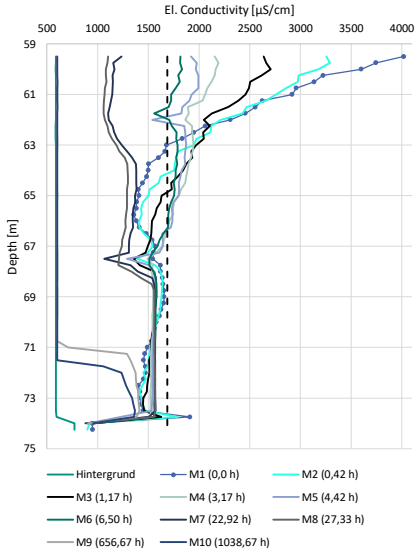
25 Fahrmeier, Nikolai (2020) Abschlussbericht Durchführung und Auswertung des kombinierten Markierungsversuchs (West) im Wasserschutzgebiet Donauried-Hürbe

Single borehole dilution tests (SBDTs) – Praxisbeispiel Donauried – Hürbe, Vorbereitung zum Markierungsversuch

Karst-Messstelle 7313:

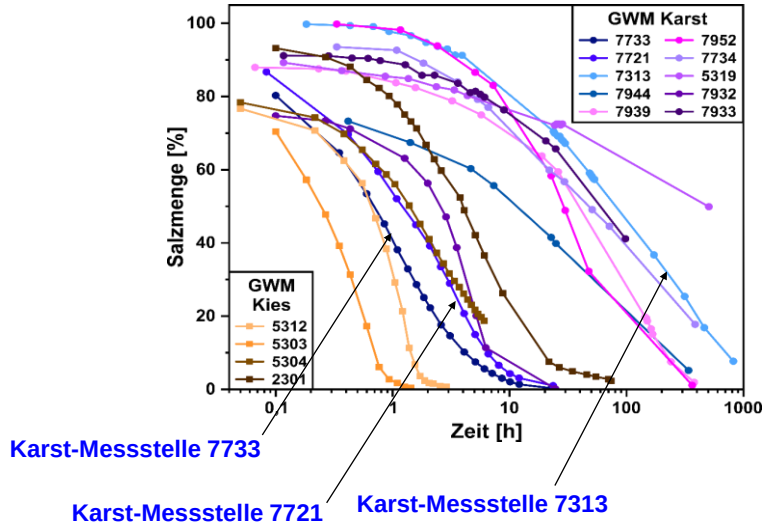


→ Verwendung eines Packers ab 70.5 m.



26 Fahrmeier, Nikolai (2017) Hydrogeologische Charakterisierung des Karstgrundwasserleiters im Einzugsgebiet der Landeswasserversorgung. Masterarbeit KIT.

Single borehole dilution tests (SBDTs) – Praxisbeispiel Donauried – Hürbe, Vorbereitung zum Markierungsversuch

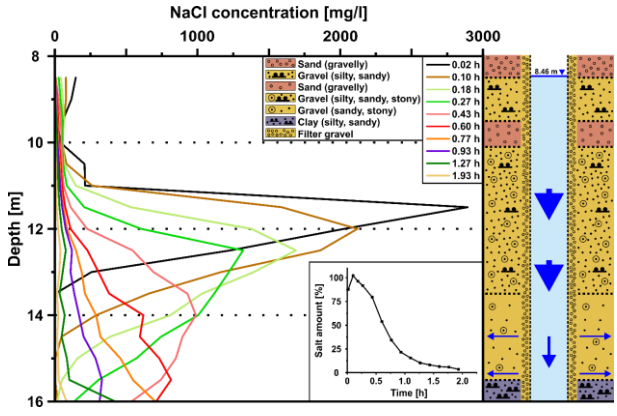


27 Fahrmeier, Nikolai (2020) Abschlussbericht Durchführung und Auswertung des kombinierten Markierungsversuchs (West) im Wasserschutzgebiet Donauried-Hürbe

Single borehole dilution tests – Point injection & Outlook

PorenGWL-Messstelle 5303

Point injection of tracer



→ vertikale Fließbewegung von 6 m/h

28 Fahrmeier, N., Goeppert, N., Goldscheider, N. (in prep.) Application of point dilution tests for verifying vertical flow in boreholes.

Single borehole dilution tests – Point injection & Outlook

29 Fahrmeier, N., Goeppert, N., Goldscheider, N. (in prep.) Application of point dilution tests for verifying vertical flow in boreholes.

Bohrlochmethoden, insbesondere SBDTs

- Anwendungsgebiete:

- Überprüfen der Anbindung von Grundwassermessstellen an den Grundwasserleiter, z.B. für Markierungsversuche
- Abschätzen der Fließgeschwindigkeiten
- Erkennen von Horizonten mit erhöhtem oder erniedrigtem Durchfluss

  → Abschätzen der Variabilität der Fließgeschwindigkeiten über die Tiefe

  → Optimierung von Mess- oder Probennahmekampagnen (z.B. Hydrochemie)

30

31

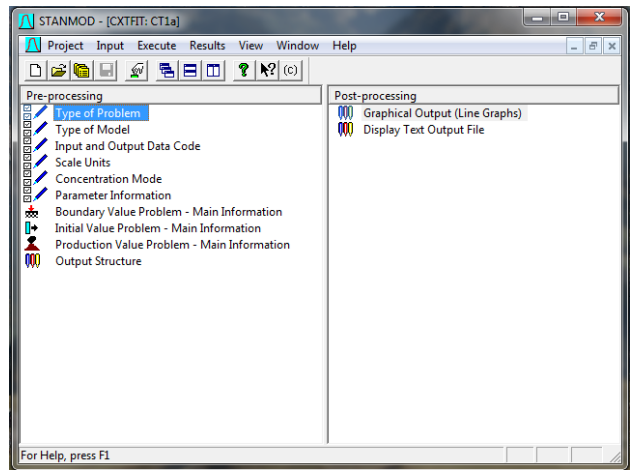
6. Rechnerübungen mit CXTFIT

- **CXTFIT**: Freie Software zur Simulation des 1D-Stofftransports
- **C** = Konzentration, **X** = Fließstrecke, **T** = Zeit
- Direkte und inverse Probleme (Best-**FIT**-Ansatz)
- Für konservativen und reaktiven Stofftransport.
- Deterministische und stochastische Modelle
- Gleichgewichtsmodell: Advektions-Dispersions-Modell (ADM)
- Ungleichgewichts-Modell: Two-Region Non-Equilibrium Model (2RNE)
- Für Labor- und Feldversuche geeignet.

Download: http://www.pc-progress.com/en/default.aspx?stanmod

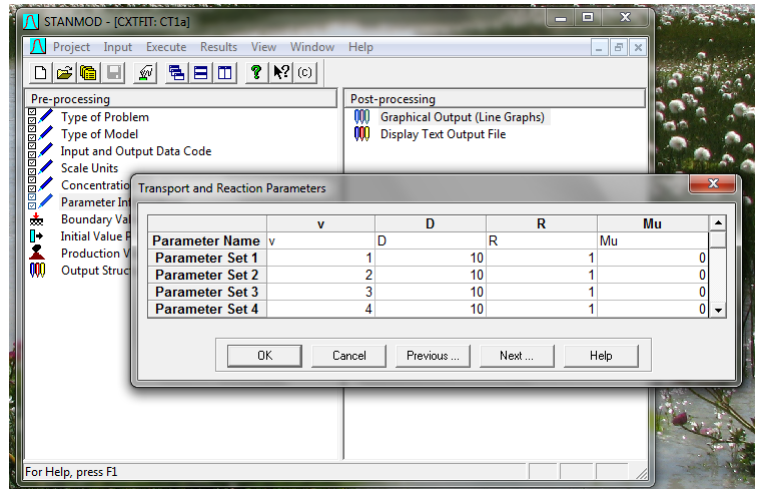
1

CXTFIT Benutzeroberfläche



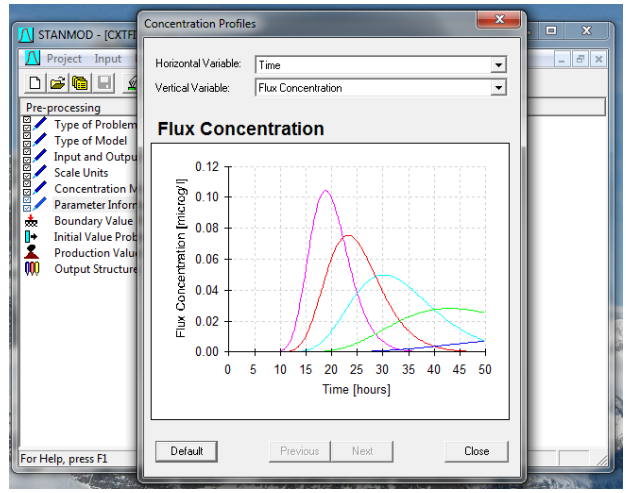
2

CXTFIT: Eingabe von Parametern (für direkte Probleme)



3

CXTFIT: Simulierte Durchgangskurven (direkte Simulation)



Hier: Vorwärtsberechnung (Durchgangskurven für gegebene Transportparameter)

4

Direkte Probleme, C(T)

Simulieren Sie die Durchgangskurven (C als Funktion von T) für die folgenden unveränderlichen Bedingungen und Parameter:

- Momentane Eingabe (Dirac Delta Input, Masse = 1)
- Units m, h, µg/L
- Distance 100 m

Variieren Sie dabei die Transportparameter wie folgt:

a) D = const. = 10 m^2/h, V = 1, 2, 3, 4, 5 m/h
b) V = const. = 5 m/h, D = 2, 4, 8, 16, 32 m^2/h
c) V = 5 m/h, D = 10 m^2/h, R = 1, 1.2, 1.5, 2, 3
d) V = 5 m/h, D = 10 m^2/h, µ = 0, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1

5

Direkte Probleme, C(X)

Simulieren Sie die räumliche Verteilung eines Tracers (C als Funktion von X) für folgende Bedingungen und Parameter:

- Units m, h, µg/L
- V = 5 m/h, D = 10 m^2/h

a) Momentane Eingabe (M = 1). Simulieren Sie C(X) für T = 2 bis 20 h
b) Wie (a), aber mit mikrobiellem Abbau, µ = 0.1
c) Wie a), aber mit kontinuierlicher Eingabe (= Step Input)
d) Wie c), aber mit Abbau, µ = 0.1

6

Inverse Probleme

Modellieren Sie mit CXTFIT Durchgangskurven, die die in der Tabelle gegebenen Messwerte optimal wiedergeben (Best-Fit-Ansatz).

Verwenden Sie dazu a) ein Gleichgewichtsmodell (ADM) und b) ein Ungleichgewichtsmodell (2RNE).

Bestimmen Sie auf diese Weise die relevanten Transportparameter, also V, D (für beide Modelle), sowie β und ω (nur für 2RNE)

Entfernung = 100 m

T days	C µg/L
1	0,0
2	0,0
3	0,1
4	6,1
5	10,4
6	9,4
7	6,2
8	3,9
9	2,5
10	1,4
12	0,8
14	0,6
16	0,4
18	0,4
20	0,3

7

FH-DGGV-Fortbildungsveranstaltung

Veranstalter:
Fachsektion Hydrogeologie e.V.
in der DGGV e.V.

FH-DGGV