

Staatliches Amt

ISSN 0138-2551

**für Atomsicherheit
und Strahlenschutz**

SAAS - 365

SAAS - 365

Report des Staatlichen Amtes für Atomsicherheit und Strahlenschutz der DDR

Das Staatliche Amt für Atomsicherheit und Strahlenschutz der DDR ist

- Organ des Ministerrates für die Kontrolle der friedlichen Nutzung der Kernenergie
 - zum Schutz des Lebens und der Gesundheit des Menschen vor der schädigenden Einwirkung ionisierender Strahlung.
 - zum Schutz der Umwelt vor radioaktiver Verunreinigung, insbesondere durch verantwortungsbewußte Handhabung radioaktiver Stoffe und sichere Verwahrung radioaktiver Abfälle,
 - zum Schutz der Werktätigen in Kernanlagen und von anderen Bürgern in der Umgebung sowie von Sachwerten durch strikte Befolgung der Bestimmungen der nuklearen Sicherheit und des Strahlenschutzes,
 - zum Schutz von Kernmaterial und Kernanlagen gegen kriminelle Angriffe und unbefugte Einwirkungen,
 - zur Erfüllung des zwischen der Regierung der Deutschen Demokratischen Republik und der Internationalen Atomenergieorganisation abgeschlossenen Sicherheitskontrollabkommens durch Nachweis des Einsatzes von Kernmaterial für ausschließlich friedliche Zwecke.
- Nationales Weiterbildungszentrum für das Gebiet Atomsicherheit und Strahlenschutz.
- Leit- und Koordinierungsorgan für
 - die internationale Zusammenarbeit auf dem Gebiet Atomsicherheit und Strahlenschutz und
 - die Wahrnehmung der Mitgliedschaft der DDR in der Internationalen Atomenergieorganisation.

Herausgeber:

Präsident des Staatlichen Amtes für Atomsicherheit und Strahlenschutz
der Deutschen Demokratischen Republik
DDR – 1157 Berlin-Karlshorst, Waldowallee 117

Christoph Adam,
Norbert Victor

Empfehlungen zur Ermittlung von
Migrationsparametern durch Feld-
versuche (Tracerversuche)

Anschrift der Autoren:

C. Adam

VEB Hydrogeologie Nordhausen
Betrieb des VEB Kombinat Geologische Forschung
und Erkundung Halle
Arbeitsstelle Dresden
Karcherallee 17
Dresden
8020

N. Victor

VEB Hydrogeologie Nordhausen
Betrieb des VEB Kombinat Geologische Forschung
und Erkundung Halle
Rothenburgstraße 12
Nordhausen
5500

Zusammenfassung

Zur hydrogeologischen Begutachtung möglicher Standorte von Kernanlagen gehören auch Aussagen über die potentielle Migration von Radionukliden im Untergrund bei Störfällen. Dazu ist die Kenntnis repräsentativer Migrationsparameter erforderlich. Es werden detaillierte Empfehlungen zur Ermittlung solcher Parameter durch Tracerfeldversuche, zur Verwendung einer einheitlichen Terminologie bei ihrer Durchführung sowie zur Interpretation der erhaltenen Daten gegeben. Ferner wird auf aktuelle Arbeiten anderer Autoren zu dieser Problematik verwiesen.

Abstract

RECOMMENDATIONS FOR THE DETERMINATION OF MIGRATION PARAMETERS BY FIELD EXPERIMENTS (TRACER TESTS). - The hydrogeologic review and assessment of candidate sites for nuclear power plants includes expertises on the potential subsurface migration of radionuclides in the event of accident conditions. To this end, knowledge of representative migration parameters is required. Detailed recommendations are given for determining such parameters by tracer field tests, for using standardized terminology in their practical conduct as well as for interpreting the data obtained. Also, mention has been made of recent work reported by other authors on this topic.

Резюме

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ МИГРАЦИИ ПРИ ПОМОЩИ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ (ИССЛЕДОВАНИЯ С ИНДИКАТОРОМ). - Гидрогеологическая экспертиза возможных мест размещения ядерных установок содержит тоже информацию о потенциальной миграции радионуклидов в грунте в случае аварий. Для этой цели необходимо знание о репрезентативных параметрах миграции. Представлены подробные рекомендации по определению таких параметров при помощи полевых исследований с индикатором, по использованию единой терминологии при их проведении, а также по интерпретации полученных данных. Кроме того, дается ссылка на актуальные работы других авторов по этой проблематике.

INHALT

	Seite
Bild- und Tabellenverzeichnis	5
1. Begriffe und Erklärungen	6
2. Zielstellung von Tracerversuchen (TV)	17
3. Tracerversuchsprojektierung	18
3.1. Grundsätze	18
3.2. Tracerversuchskonzeption	18
3.3. Materialbedarf und Aufwand	23
4. Tracerversuchsvorbereitung	23
4.1. Abstimmungen	23
4.2. Vorbereitung einer Tracerversuchsanlage	23
4.3. O-Test	25
4.4. Primärparameter (vorausgehender Bohrungen und Tests)	26
4.5. Präzisierung des TV-Modells (TV-Vorabberechnung)	26
4.5.1. Pump- bzw. Infiltrationsbedingungen	27
4.5.2. Tracerfließzeiten und Meßturnus bei Impulsmarkierung	28
4.5.3. Tracermenge zur Impulsmarkierung	31
4.5.4. Tracermenge zur kontinuierlichen Markierung	33
4.6. Vorbereitung der Tracermarkierung	34
5. TV-Durchführung	38
5.1. TV-Protokoll	38
5.2. Tracermarkierung	40
5.3. In-situ-Messung	41
5.4. Probenahme, Probenvorbereitung, visuelle Bemusterung	41
5.5. Probeaufbewahrung/-transport	43
6. Laborative Tracermessungen	44
7. Auswertung von Tracerversuchen (Beispiele)	44
7.1. Bestimmung der Grundwassergeschwindigkeit	44
7.1.1. Arten der Grundwassergeschwindigkeit	44
7.1.2. Verfahren zur Bestimmung der Grundwassergeschwindigkeit	45
7.2. Bestimmung von Migrationsparametern	47
7.2.1. Graphisch-analytische Verfahren	47
7.2.1.1. Auswertung von eindimensionalen Migrationsströmungen	48
7.2.1.2. Auswertung von Pumptracerversuchen	52
7.2.2. Digitale Auswertung von Tracerversuchen	54
7.2.2.1. Digitale Auswertung von Pumptracerversuchen	54
7.2.2.2. Digitale Auswertung von eindimensionalen Migrationsströmungen	56
8. Literatur	57

Bild- und Tabellenverzeichnis

	Seite	
Abb. 1	Nomogramm für den NaCl-Einsatz bei Salz-Tracer- versuchen (zur Herstellung gesättigter Lösungen je m Brunnen-/GWBR-Wassersäule bei 10 °C)	16
Abb. 2	Tracer-Durchgangskurven für Konzentration (a) und Stoffmenge (b)	29
Abb. 3	Tracer-Durchgangskurve an einer T-Meßstelle	46
Abb. 4	Parameterbestimmung mittels Wahrscheinlichkeitsnetz	50
Abb. 5	Darstellung der Funktion $\text{erfc}(z)$	51
Abb. 6	Graphische Auswertung mittels inversiver Fehler- funktion	51
Abb. 7	Graphische Auswertung eines Pump-TV (räumlich)	53
Abb. 8	Graphische Auswertung eines Pump-TV (zeitlich)	54
Abb. 9	Lösungsprinzip der Parameterbestimmung	55
Tabelle 1	Übersicht über die Grundbegriffe zur Tracer- anwendung	7
Tabelle 2	Terminologie zur Traceranwendung	8
Tabelle 3	Empfehlungen zur Tracerauswahl und TV-Methode	22
Tabelle 4	Abstimmungen zur TV-Durchführung und -Auswertung	24
Tabelle 5	Information über ausgewählte Tracer (T)	35
Tabelle 6	Parameter zur TV-Vorabberechnung	37
Tabelle 7	Muster eines TV-Protokolls	39

1. BEGRIFFE UND ERKLÄRUNGEN

Zur Verfolgung von Austauschprozessen stofflicher und energetischer Art werden in verschiedenen Bereichen der Naturwissenschaft mit Hilfe von sog. Tracern Markierungen vorgenommen. Für diesbezügliche Belange der Hydrogeologie kommen spezielle "hydrogeologische Tracer" zum Einsatz, und zwar vorzugsweise im Grundwasser (GW). Sie werden im folgenden nur *Tracer* (T) genannt. Sofern mit Hilfe von Tracern Migrationsprobleme untersucht werden, spricht man von Tracertechnik. Für die Traceranwendung in der hydrogeologischen Praxis ist der standardisierte Begriff *Tracerversuch* (TV) zu verwenden.

Zur Charakterisierung dynamischer Prozesse in der Lithosphäre mittels TV kann ein Stromröhrenmodell dienen, d.h. ein Kanal, in dem ein linearer Stofftransport anzunehmen ist. Durch *Tracermarkierung* erfolgt am Eingang (E mit Migrationsweg $x = 0$) der Stromröhre, d.h. an der *Tracerquelle* (TQ), ein definiertes Signal mit einer definierten Konzentration C_0 (oder einer physikalischen Größe, die dieser Konzentration proportional ist). Am Ausgang (A mit Migrationsweg $x = L$) der Stromröhre, an der *Tracermeßstelle* (TM), werden dann über eine definierte Zeitdauer in definierter Form *Tracermeßwerte* erfaßt.

Unter *TV-Auswertung* ist die Ermittlung von konkreten *Migrationsparametern* zu verstehen sowie die Interpretation von Migrationsprozessen und die Klärung der verschiedenen Ursachen für die Änderung von Stoffkonzentrationen auf Migrationswegen.

Tabelle 1 bringt eine schematische Übersicht über Grundbegriffe zur Traceranwendung in der Hydrogeologie. Die mit einem Pfeil "†" gekennzeichneten Begriffe sind außerdem in Tabelle 2 in alphabetischer Ordnung aufgelistet und definiert.

Tabelle 1 Übersicht über die Grundbegriffe zur Traceranwendung⁺⁾

T = + Tracer (hydrogeologischer)

TV = + Tracerversuch

TV-Zielstellungen	T-Einsatz	TV	TV-Etappen	TV-Kennwerte
Ermittlung der: - + Migrationsparameter (siehe Lit. / 5 /) - Gesteinsbeschaffenheit - Wasserbeschaffenheit - Sorption - Hydrodynamik - Thermodynamik	T-Art: - Organischer T - Farb-T - Isotopen-T (+ Umweltisotope) - Salz-T (Elektrolyt-T) - Temperatur-T	TV-Methoden: - + Elektro-TV - + Havarie-T-Beobachtung - + Infiltrations-TV - + Infiltrations-Pump-TV - + Natur-TV - + Pump-TV (Gütepumpversuch) - + Single-well-TV - + Verdünnungs-TV (T-Verdünnungsmessung)	+ TV-Vorbereitung: - Modellschätzung - TV-Vorabberechnung - Einrichtung der TV-Anlage - T-Substanzanalyse - + O-Test - + T-Markierung	+ T-Konzentration (C) - + O-Effekt - + T-Quellstärke - + T-Meßwert (Brutto-, Netto-) - T-Durchgangsmenge (C · V)
			+ TV-Meßprogramm: (T-Messung) - Probenahme/-analyse - Sondenmessung (in situ) - Visuelle Bemusterung	+ T-Ausbreitung (x,y,z) - T-Fließrichtung - T-Fließweg - T-Wolkenform
	T-Anzahl: - Einzel-TV - + Multi-TV	TV-Geometrie: - + TV-Anlage - + TV-Gruppe - + T-Meßstelle (TM) - + T-Quelle (TQ) - + T-Senke (TS) - + T-Wolke (TW)	+ TV-Auswertung: - graphisch - numerisch - verbal	+ T-Fließzeit (t) - T-Durchgang - T-Geschwindigkeit (T-Migrations-G) v_m - T-Verweildauer

^{+) Für die durch einen vorgesetzten Pfeil "+" gekennzeichneten Begriffe sind in Tabelle 2 Definitionen angegeben.}

Tabelle 2 Terminologie zur Traceranwendung

T = † Tracer, (hydrogeologischer)

TV = † Tracerversuch

Werden bei der Definition eines Begriffs andere, in der Tabelle ebenfalls definierte, Begriffe verwendet, so sind letztere durch einen vorangestellten Pfeil "†" gekennzeichnet.

Elektro-Tracerversuch

TV mit einem Elektrolyt (Salz-T in hoher Konzentration), dessen Fließweg im Untergrund durch ein elektrisches Strömungsfeld markiert und von der Erdoberfläche durch Widerstandssondierung vermessen wird.

Havarie-Tracerbeobachtung (Hav-TV)

Beobachtung der Migration ausgewählter Stoffe (T) einer havariebedingten Kontamination der Hydro- bzw. Lithosphäre (ggf. mit Überschreitung gesetzlicher Grenzwerte) zur Ermittlung von † Migrationsparametern, insbesondere zur Ableitung von Antihavariemaßnahmen.

Infiltrations-Tracerversuch (Inf-TV)

TV an einer † Tracerversuchsgruppe mit impulsförmiger oder kontinuierlicher † Tracermarkierung an einer Stelle (z.B. Brunnen, Schurf, Ponor, Becken), an der während der gesamten TV-Dauer eine kontinuierliche Wasserinfiltration erfolgen sollte, allgemein mit T-Messung bzw. T-Rückgewinnung an anderer Stelle (z.B. an GWBR).
(GWBR = Grundwasser-Beobachtungsrohr)

Infiltrations-/Pump-Tracerversuch

TV an einem Brunnen, in dem in der ersten Phase bei kontinuierlicher Wasserinfiltration eine impulsförmige † Tracermarkierung erfolgt, nach einer definierten Zeitdauer die Infiltration beendet wird und sich dann eine T-Rückgewinnung durch GW-Förderung anschließt.

Anmerkung:

Nur bedingt auswertbar, u.a. durch instationäre Strömungsphase beim Übergang von Infiltration zur Förderung.

Migrationsparameter

Parameter zur Erfassung bzw. Charakterisierung von Migrationsprozessen in der Hydro- und Lithosphäre.

Anmerkung:

Gliederung insbesondere nach

- Gesteinsbeschaffenheit (ρ ; n_o , n_e , n_f ; Stoffanteil),
- Sorption (α , K_D , IAK, spezif. Oberfläche),
- Wasserbeschaffenheit (ρ , T, Wasserinhaltsstoffe),
- Hydrodynamik (D , δ , I, k_f , v_a , v_f , v_m , R_D , Stofffracht),
- Thermodynamik.

Multi-Tracerversuch

TV mit gleichzeitiger Verwendung mehrerer \uparrow Tracer, wobei ein \uparrow idealer Tracer als Bezugsbasis dient.

Natur-Tracerversuch

TV an einer \uparrow Tracerversuchsgruppe (im GW und/oder Oberflächenwasser) bei natürlicher hydraulischer Strömung, mit impulsförmiger \uparrow Tracermarkierung an einer Stelle (ggf. auch naturbedingt).

Anmerkung:

Hierzu gehören auch Untersuchungen der natürlichen Isotopen-Verteilung, z.B. zur Erforschung von Problemen des Wasserkreislaufes.

0-Effekt (Nulleffekt) C_o

Meßgrößen des Untergrundes bzw. der Umgebung vor Beginn eines TV, insbesondere hinsichtlich der primären \uparrow Tracerkonzentration (gleicher T-Substanz) bzw. des Auftretens von Störeffekten, die bei der \uparrow Tracerversuchsauswertung berücksichtigt werden müssen.

Anmerkung:

Sofern keine Radionuklid-T betrachtet werden, ist $C_o = C_{min}$.

0-Test (Null-Test)

Ermittlung von Kennwerten über Beschaffenheit und Eigenschaften von Gewässern sowie ggf. auch von Gesteinen und Atmosphäre im potentiellen Einflußbereich eines geplanten TV, die dessen Durchführung und die \uparrow Tracerversuchsauswertung beeinflussen können (\uparrow 0-Effekt).

Pump-Tracerversuch (Gütepumpversuch)

TV an einer † Tracerversuchsgruppe, mit impulsförmiger † Tracermarkierung an einer Stelle (z.B. GWBR, Schurf, Vorfluter), nach Schaffung eines stationären Depressionsrichters, durch kontinuierliche GW-Förderung an einem Brunnen, und T-Messung an diesem Brunnen und ggf. anderen Stellen im Depressionsrichter.

Single-well-Tracerversuch (single-well-Test)

Durchführung eines TV an einem Brunnen, in der ersten Phase mit impulsförmiger † Tracermarkierung bei natürlichen (bestehenden) Strömungsverhältnissen, in der zweiten Phase mit GW-Förderung († Pump-Tracerversuch).

Tracer, (hydrogeologischer) (T)

Indikator zur Verfolgung von Migrationsprozessen im ober- und unterirdischen Wasser und zur Identifikation von Migrationsparametern, ohne für die † Tracerversuchsauswertung nachteilige Rückwirkung auf die Strömungsparameter.

Anmerkung:

T muß gleiche wesentliche Eigenschaften wie das konkrete Wasser besitzen, dessen Weg verfolgt werden soll, darf keine maßgebliche Änderung dessen chemisch-physikalischer Eigenschaften bewirken.

Gliederung nach Tracerarten in

- Isotopen-Tracer (stabile Isotope, † Umweltisotope, Radionuklide),
- Farb-Tracer (Anilin, Eosin, Pyranin, Rhodamin, Uranin),
- Salz-Tracer (Elektrolyt-Tracer),
- Organische Tracer (organische Komplexe wie Citrate, EDTA, NTA, Picolinate, Oxalate; organische Wasserschadstoffe; Pollen, Sporen),
- Temperatur-Tracer (Wasser maßgeblicher Temperaturdifferenz zum GW).

Tracer, idealer (= inerte, = konservativer)

T, der durch Testbedingungen keine für die Parameterermittlung nachteilige Veränderung (z.B. durch Austausch- und Umwandlungsprozesse) erfährt, das zu beurteilende System nicht maßgeblich stört und noch in sehr geringer Konzentration nachweisbar ist (z.B. ^{82}Br , ^3H).

Tracerausbreitung

Prozeß der Verteilung eines konkreten T von einer \uparrow Tracerquelle durch Strömung im Raum unter Abnahme der \uparrow Tracerkonzentration.

Tracerdurchgang(zeit) t_d

Zeitdauer, die eine \uparrow Tracerwolke bei einem TV zum Passieren einer konkreten \uparrow Tracermeßstelle benötigt ($t_d = t_{\max} - t_{\min}$; \uparrow Tracerfließzeit).

Anmerkung:

Auswertung meist graphisch, unter Berücksichtigung der \uparrow Tracerkonzentration (C) bzw. T-Stoffmenge (m), ggf. mit Extrapolation, in Form von T-Durchgangskurven (s. Abb. 2).

Tracerfließzeit t

Zeitintervall, das ein T als konkretes Teilchen oder als Masse bei einem TV zwischen zwei Punkten (\uparrow Tracerquelle und \uparrow Tracermeßstelle oder zwischen zwei Meßstellen) benötigt.

Anmerkung:

- t_{\min} - kürzeste Fließzeit (1. Meßwert $> C_0$ bzw. C_{\min})
- t_M - Fließzeit für Konzentrationsmaximum (C_{\max})
- t_{50} - Fließzeit für 50 % Stoffdurchgang
- \bar{t} - mittlere Fließzeit (zwischen t_{\min} und t_{\max})
- t_{\max} - längste Fließzeit (letzter Meßwert $> C_0$ bzw. C_{\min})

Tracerkonzentration C (momentane Konzentration)

Menge an Festsubstanz eines \uparrow Tracers zu einem definierten Zeitpunkt in einem definierten Volumen (V) an Flüssigkeit (\uparrow Tracermeßwert)

Anmerkung:

Zur Spezifizierung gelten folgende Zeichen:

- C_0 - \uparrow O-Effekt (vor TV-Beginn)
- C_Q - \uparrow Tracerquellstärke (für \uparrow Tracermarkierung bei TV-Beginn)
- C_x - \uparrow Tracermeßwert (C_{\min} , \bar{C} , C_{\max})
- C_n - Normierte Konzentration = $(C_x - C_{x,\min}) / (C_{x,\max} - C_{x,\min})$
- C_v - Konzentrationsverlust (zwischen \uparrow Tracermeßstellen)
- C_w - Wirksame Konzentration für Meßapparatur (Nachweisgrenze)

Tracermarkierung

Kennzeichnung eines Volumen- oder Massenelements des zu untersuchenden Stoffstroms in der Hydro- bzw. Lithosphäre mit einem fließfähigen T definierter \uparrow Tracerkonzentration (C_Q) in einem definierten Volumen (V_Q).

Anmerkung:

Markierung generell aperiodisch nach 3 Methoden:

- impulsförmig (Einheitsstoßfunktion), als extrem kurzes Ereignis,
- rechteck-impulsförmig, über kurze Zeitdauer,
- kontinuierlich (Einheitssprungfunktion) als gleichmäßiger Prozeß über längere Zeitdauer (ggf. auch periodisch als Einheits-sinusfunktion)

Tracermeßstelle (TM)

Stelle, an der die \uparrow Tracerkonzentration (mit einem \uparrow Tracerversuch-Meßprogramm) erfaßt werden kann.

Tracermeßwert $C_{(x,t)}$

Meßgröße der \uparrow Tracerkonzentration für einen konkreten Zeitpunkt an einer \uparrow Tracermeßstelle (Maß des zeitlichen Konzentrationsverlaufs mit endlichem Wert)

Anmerkung:

- Nach Art der Messung bzw. \uparrow Tracerversuchsauswertung ist zwischen Brutto-Meßwert (einschl. \uparrow O-Effekt) und Netto-Meßwert (mit Eliminierung des O-Effektes) zu unterscheiden.
- Meßgrößen sind beliebig wählbar, z.B. als
 - absolute Konzentration (kg/m^3),
 - normierte Konzentration ($C_n = 1$),
 - Brutto-Zählrate (Aktivität in Bq).

Tracerquelle (TQ) (Tracermarkierungsstelle, "Stoffquelle")

Stelle, von der ein Stoffeintrag durch \uparrow Tracermarkierung bzw. Havarie ausgeht.

Tracerquellstärke C_Q

\uparrow Tracerkonzentration zum Zeitpunkt bzw. zur Zeitdauer der \uparrow Tracermarkierung.

Tracersenke (TS) ("Stoffsenke")

Stelle mit einer minimierten \uparrow Tracerkonzentration ($C_Q - C_V$, d.h. mit Konzentrationsverlusten im Vergleich zur Umgebung, insbesondere zur \uparrow Tracerquelle) durch Stoffentnahme bzw. -abfluß, Sorption, Verdünnung und/oder Stoffumwandlung (z.B. durch radioaktiven Zerfall).

Tracerversuch (TV)

Markierung der Hydro- bzw. Lithosphäre an konkreter Stelle und definierter Zeit mit einem T (oder mehreren T) definierter Art und \uparrow Tracerkonzentration sowie Beobachtung der \uparrow Tracerausbreitung (bzw. teilweise T-Rückgewinnung) und T-Analyse zur Ermittlung von \uparrow Migrationsparametern.

Anmerkung:

Gliederung nach verschiedenen Merkmalen wie

- T-Art (z.B. Farb-TV),
- T-Anzahl (z.B. Einzel-, \uparrow Multi-TV),
- TV-Methode (z.B. Infiltrations-, \uparrow Natur-, \uparrow Pump-, \uparrow Elektro-TV),
- Meßstellenart (z.B. Brunnen-/Bohrloch-TV, Bauwerks-TV),
- Meßstellenanzahl (z.B. Einbohrloch-, Multibohrloch-TV),
- Untersuchungsobjekt (z.B. Bauwerks-, GW-Leiter-, Vorfluter-TV).

Tracerversuchsanlage

Einrichtungen zur Durchführung eines konkreten TV, insbesondere \uparrow Tracermessstellen und Geräte zur \uparrow Tracermarkierung sowie zur Realisierung eines \uparrow Tracerversuch-Meßprogramms (erforderlichenfalls auch mit Wassergewinnung, -zuleitung, -ableitung).

Tracerversuchsauswertung

Ermittlung von \uparrow Migrationsparametern aus Daten eines konkreten \uparrow Tracerversuch-Meßprogramms, Prozeßanalyse mit Korrelation und Interpretation des Migrationsprozesses.

Anmerkung:

Graphische Auswertung vorzugsweise in Form von Meßwert-Ganglinien (z.B. Konzentration-Zeitkurve, s. Abb. 2 auf Seite 29).

Tracerversuchsgruppe

† Tracerquelle und zugehörige † Tracermeßstellen (eines TV)

Anmerkung:

Gestaltung abhängig von geplanter TV-Methode.

Tracerversuch-Kennwerte

Merkmale (Parameter) zur Vorbereitung, Durchführung und Auswertung eines TV:

- † O-Effekt (Nulleffekt) C_0
 - T-Quellstärke (Markierungs-Konzentration; Impuls, Impulsrate) C_0
 - T-Markierungsvolumen V_0
- † Tracermeßwert (Konzentration $C_{x,t}$)
 - T-Fließrichtung (Hauptrichtung) rad
 - T-Fließweg (pathway) s
 - T-Geschwindigkeit (T-Migrationsgeschwindigkeit) v_m
- † Tracerfließzeit (nach T-Durchgangskurve) t; t_{50}
 - T-Wolkenform
 - mittlere Höhe W_h
 - mittlere Breite (quer zur T-Fließrichtung) W_b
 - mittlere Länge (in T-Fließrichtung) W_l
- † Tracerdurchgang t_d

Tracerversuch-Meßprogramm

Systematische Meßwerterfassung eines konkreten TV vom Zeitpunkt der † Tracermarkierung an; Gliederung nach Art der Datenerfassung:

- Probenahme/-analyse,
- Sondenmessung (in situ),
- Visuelle Bemusterung (qualitativ).

Tracerversuchsvorbereitung

Erste Etappe eines konkreten TV, umfaßt die Modellschätzung (Abschätzung von Modellparametern), die TV-Vorabberechnung, die Einrichtung von † Tracermeßstellen, die Auswahl und Analyse der einzusetzenden T (T-Substanzanalyse), die Festlegung der Meßtechnik, die Analyse der Hydro- und Lithosphäre im voraussichtlichen TV-Bereich vor der † Tracermarkierung († O-Test) sowie die T-Markierung und deren Dokumentation.

Tracerverweildauer

Zeitdauer, die sich die T-Masse eines TV zwischen † Tracerquelle und † Tracermeßstelle (in einem konkreten Abschnitt der Hydro- und/oder Lithosphäre) befindet.

Anmerkung:

Komplexe Zufallsgröße, die durch Verteilungsfunktion bzw. entsprechende Zahlenwerte (wie Mittelwert, Streumaß) beschreibbar ist.

Tracerwolke (TW) (plume)

Raumform der Ausbreitung eines T für einen konkreten Zeitpunkt oder ein Zeitintervall († Tracerdurchgang), gekennzeichnet durch Volumen (V_W) und mittlere Konzentration ($\overline{C_W}$).

Umweltisotope

Isotope, die aus ihrer natürlichen räumlich-zeitlichen Verteilung im Wasser Aussagen über Migrations-, Mischungs- und Austauschprozesse im Wasserkreislauf gestatten.

Beispiele:

- 1) Durch kosmische Strahlung erzeugte Nuklide: ^3H , ^{14}C , ^{32}Si , ^{39}Ar
- 2) Zerfallsprodukte von U + Th
- 3) Stabile Isotope des Wassers: ^2H , ^{18}O
- 4) Durch Kernwaffentests erzeugte Nuklide (Schlüssel-Radionuklide)

Verdünnungs-Tracerversuch (T-Verdünnungsmessung)

Markierung der GW-Zone in einem Bohrloch bzw. im Filterbereich eines Brunnens mit einem T (meist NaCl oder Radionuklid) und Messung der Konzentrationsabnahme mittels Sonde zur Lokalisierung hydrodynamisch aktiver Bereiche.

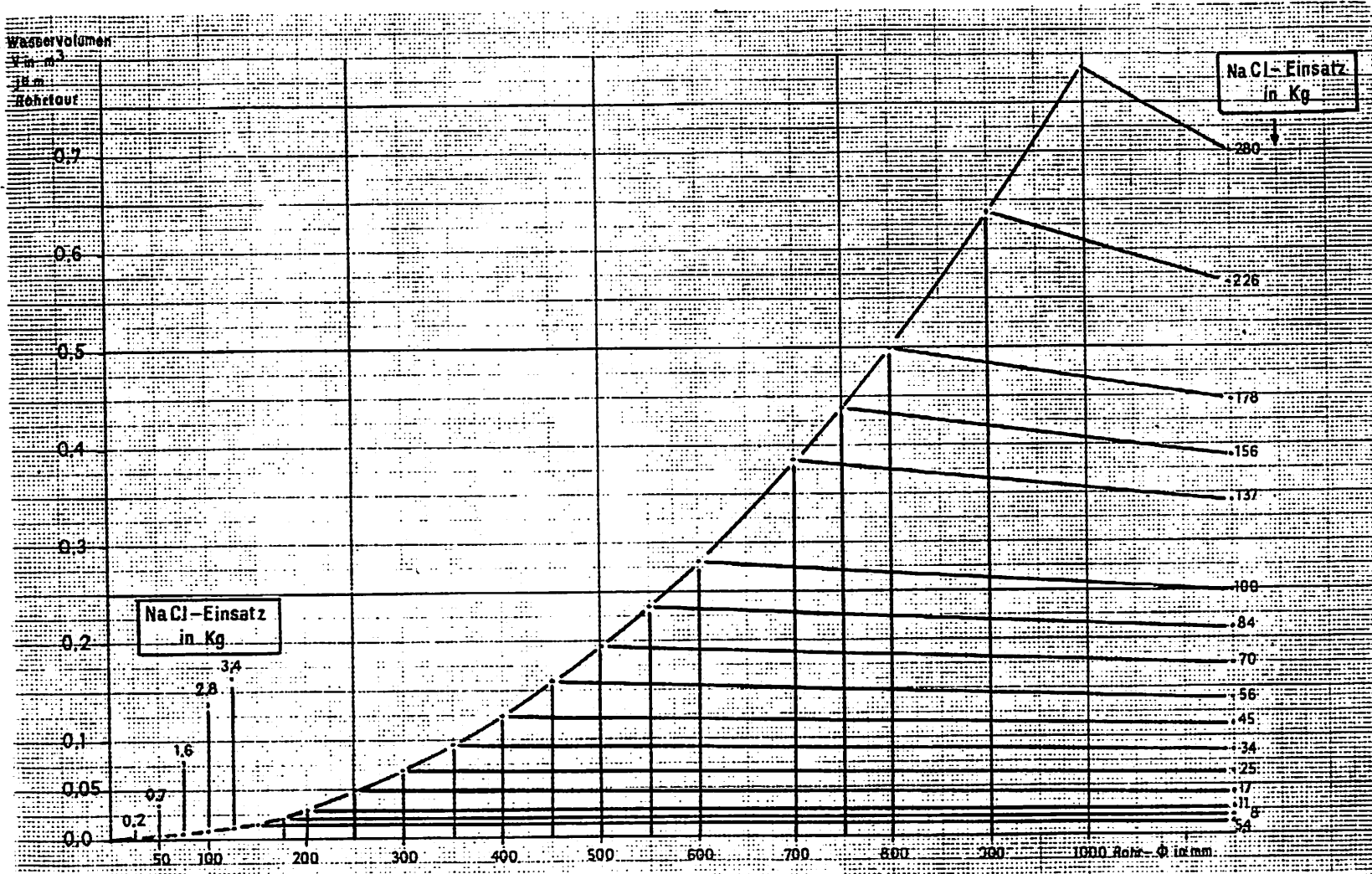


Abb. 1 Nomogramm für den NaCl-Einsatz bei Salz-Tracerversuchen (zur Herstellung gesättigter Lösungen je m Brunnen-/GWBR-Wassersäule bei 10 °C)

2. ZIELSTELLUNG VON TRACERVERSUCHEN (TV)

Mit Hilfe von TV lassen sich hydrogeologische Parameter mit großer Genauigkeit ermitteln und Probleme zur Migration konkreter Stoffe in der Hydro- und Lithosphäre eindeutig klären. Die spezielle Durchführung von TV im Untergrund ist allerdings meist sehr aufwendig und deshalb ökonomisch nur vertretbar unter besonderen Voraussetzungen, wie z.B.

- dem Vorhandensein von GW-Aufschlüssen,
 - dem bestehenden Betrieb von Wasserfassungen,
 - der möglichen Kombination mit Pumpversuchen,
- bzw. bei begründeten Aufgabenstellungen, wie z.B.
- exakte Verfolgung kritischer Kontaminanten (Wasserschadstoffe) einer Havarie, zur Einleitung wirksamer Antihavarie-maßnahmen,
 - Präzisierung von Kennwerten für repräsentative Migrationsmodelle von Wasserschutzgebieten,
 - Untersuchungen zur GW-Anreicherung bzw. Uferfiltration bezüglich der Abbaufunktion von GW-Leitern (Bodenpassage) für spezifische Wasserinhaltsstoffe,
 - Verfolgung von Migrationswegen in hydrogeologisch komplizierten Gebieten (wie Karst).

Vor der Projektierung von TV ist unbedingt eine kritische Analyse des Kenntnisstandes vom jeweiligen Untersuchungsgebiet erforderlich. Dabei sind die auf der Grundlage von Laboranalysen, Feldtests, visueller Bemusterung und Schätzung vorliegenden bzw. gewinnbaren Migrationsparameter, deren Wertegrößen, Genauigkeit und potentielle Streubereiche hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit zur eindeutigen Lösung der konkreten Aufgabenstellung zu beurteilen. So können TV unerlässlich sein, wenn für kritische Migranten das Sorptions- bzw. Retardationsvermögen in einem Trinkwassereinzugsgebiet von Interesse ist, um daraus sichere Schutzmaßnahmen mit volkswirtschaftlich vertretbarem Aufwand ableiten zu können. Sofern jedoch nur die GW-Geschwindigkeit in einem unkomplizierten GW-Leiter bestimmt werden soll, sind TV ökonomisch nicht empfehlenswert. Nur bedingt aussagekräftig sind TV zur speziellen Ermittlung maßstababhängiger Migrationsparameter wie Dispersionskoeffizient und Dispersivität.

3. TRACERVERSUCHSPROJEKTIERUNG

3.1. GRUNDSÄTZE

TV sind als Bestandteil hydrogeologischer Untersuchungen grundsätzlich nach TGL 25011/01 zu projektieren. Ausgehend von der volkswirtschaftlichen Zielstellung ist die Notwendigkeit jedes TV nach aktualisiertem Kenntnisstand, unter Berücksichtigung potentieller Parameterbestimmungen nach anderen Methoden, der zu erwartenden Schwankung der Wertegrößen sowie den Anforderungen an die Genauigkeit abzuleiten.

Im Projekt ist mindestens folgendes auszuweisen:

- Analyse der Zielstellung,
- TV-Konzeption (s. Abschnitt 3.2.),
- Geräte- und Materialbedarf,
- Aufwandskalkulation.

Zur Durchführung von TV sind vorzugsweise bereits vorhandene bzw. für andere Zwecke geplante GW-Aufschlüsse (Wirtschafts-, Versuchsbrunnen, GWBR) zu nutzen. An diese GW-Aufschlüsse werden folgende Anforderungen gestellt:

- Erstellung einer repräsentativen Dokumentation vom geologischen Profil und Ausbau (nach TGL 24408/05 und 23864/02).
- GW-Leiter möglichst vollständig aufgeschlossen und mit großer Filterfläche (ohne Tresse, kein Mico-Filter, keine Kolmation, damit Tracer in gleicher Konzentration über die gesamte GW-Mächtigkeit unbehindert und ohne Vertikalkomponente zu- bzw. abfließen kann).
- Zwischen GW-Stockwerken exakte Abdichtung (bzw. Möglichkeit zur Abpackerung) unter Berücksichtigung der potentiellen Druckdifferenzen beim TV (zur Vermeidung von hydraulischem Grundbruch!).
- Möglichst gut zugänglich.

Eine operative TV-Durchführung ist nur bei geringem Aufwand bzw. mit Projektnachtrag zulässig.

3.2. TRACERVERSUCHSKONZEPTION

TV haben im Rahmen hydrogeologischer Arbeiten praktisch nur zur

Untersuchung des Untergrundes Bedeutung. Die Art ihrer Durchführung wird insbesondere von technischen und gebietsspezifischen Voraussetzungen bestimmt, wie

- Art und Anzahl für TV nutzbarer GW-Aufschlüsse (vorhanden bzw. bereits für andere Untersuchungszwecke geplant),
- Lithologie und Wasserbeschaffenheit,
- GW-Dynamik (natürlich, beeinflußt), GW-Kommunikation mit Oberflächenwasser.

Die spezielle Niederbringung von Bohrungen und deren Ausbau als Brunnen bzw. GWBR nur für TV ist als Ausnahme zu betrachten. Stattdessen sollten geplante Aufschlußarbeiten für Erkundungs- und Erschließungsmaßnahmen im Bedarfsfall für eine zusätzliche TV-Durchführung hinsichtlich geometrischer Anordnung, Ausbau und Betrieb koordiniert werden.

Im Lockergestein sollte der Abstand zwischen T-Quelle und zugehöriger T-Meßstelle vorzugsweise zwischen 10 und 15 m betragen. Bei kleineren Abständen ist mit unvermeidbaren Fehlern durch Störeffekte zu rechnen, die sich durch Bohrtechnik und Ausbau ergeben. Größere Abstände wirken sich hinsichtlich der TV-Dauer ökonomisch ungünstig aus.

In Abhängigkeit von der konkreten Zielstellung sowie unter Beachtung der genannten Fakten, erforderlicher Sicherheitsvorkehrungen zum Umweltschutz und eines möglichst geringen Aufwandes sind TV detailliert zu konzipieren. Danach sind im Projekt folgende Festlegungen zu fixieren:

- a) Problemstellung (interessierende Parameter, erforderliche Genauigkeit),
- b) Migrationsparameter nach Kenntnisstand,
- c) Tracerart(en),
- d) TV-Methode,
- e) TV-Geometrie,
- f) Bedingungen zur TV-Durchführung,
- g) Bemusterung (Probenahme, Analysen).

Im allgemeinen ist die TV-Dauer so zu planen, daß 7 Tage nicht überschritten werden. Bei Kluffgesteinen sind TV-Gruppen vorzugsweise parallel zur Kluftrichtung und mit größeren Abständen (25 bis 100 m) anzuordnen.

Zur Erarbeitung dieser Festlegungen werden nachstehende Erläuterungen und Spezifizierungen gegeben.

Zu a): Ableitung aus dem jeweiligen Auftrag.

Zu b): Abschätzung der Wertegrößen nach Kenntnisstand für die laut Problemstellung interessierenden Parameter des Untersuchungsgebietes (einschließlich solcher für die formelmäßige Berechnung), s. auch Lit. / 5 /.

Zu c): Die Tracerauswahl ist in erster Linie von der Untersuchungsaufgabe, von der Wasserbeschaffenheit und von der Wassernutzung abhängig. Empfehlungen können aus den Tabellen 3 und 5 abgeleitet werden.

- Stehen nur Einzelbrunnen zur Verfügung, sind als Tracer Radionuklide, Farbe oder Salz einzusetzen.
- Zur Ermittlung spezifischer Migrationsprobleme kann der gleichzeitige Einsatz mehrerer Tracer erforderlich sein (Multi-TV).
- Es sind solche Tracer auszuwählen, die von der lokalen Wasserbeschaffenheit mit Sicherheit nicht nachteilig beeinflusst werden und die keine unzulässige Auswirkung auf die Umwelt haben.
- Verunsicherungen der Bevölkerung durch geschmackliche oder visuelle Veränderung von Trink- und Betriebswasser durch T-Markierung ist unbedingt zu vermeiden, ggf. durch Maßnahmen nach dem TV.

Zu d): Die Festlegung der TV-Methode ist insbesondere von technischen Voraussetzungen (wie GW-Aufschlüsse, -Förderung), Vorflutsituation sowie Zeitfonds abhängig. Empfehlungen: siehe Tabelle 3.

Sofern nur Einzel-Brunnen zur Verfügung stehen, sind vorzugsweise Verdünnungs-TV bzw. kombinierte Verfahren (Infiltrations-/Pump-TV, Single-well-TV) durchzuführen. Das Verfahren nach KRÄTZSCHMAR / 22 / stellt differenzierte Forderungen an den Brunnenausbau und sollte nur unter Vorbehalt Verwendung finden.

Zu e): Zur Dokumentation der TV-Geometrie gehören mindestens:

- Lage der TV-Gruppe (T-Quelle und T-Meßstellen),
- Hydrogeologischer Schnitt (mit T-Quelle, T-Meßstellen, deren Filterausbau und Abdichtungen).

Zu f): Für die TV-Durchführung sind folgende Bedingungen zu klären:

- Modellschätzung, d.h. überschlägliche Ermittlung von Wertegrößen für sämtliche Migrationsparameter, die mit dem geplanten TV präzisiert werden sollen, durch Schätzung (an Hand von Analogiebetrachtungen) bzw. durch Berechnung (mit Parametern nach Kenntnisstandsanalyse).
- TV-Vorabberechnung mindestens für T-Fließzeit (zwischen T-Quelle und T-Meßstellen), sowie T-Durchgang, t-50-Wert und zugehörige T-Konzentration an T-Meßstellen, mit Parametern nach Modellschätzung, ggf. für verschiedene Varianten.
- Vor Infiltrations-TV und Pump-TV wird die Durchführung von Pumpversuchen zur Ermittlung repräsentativer Permeabilitäts- und Speicherparameter empfohlen, mit denen dann zulässige Infiltrations- und Förderraten sowie Konzentrationsverläufe für die Versuchsbedingungen berechnet werden können. BEIMS und NILLERT / 6 / haben hierfür auch Graphiken entwickelt.
- Materialbedarf (für TV-Anlage, Tracer, Meßgeräte, Geräte zur Probenahme, Probenbehältnisse).
- Methode der Tracermarkierung (T-Quelle; Art, Konzentration und Zeitdauer der Markierung; Geräte, Material und Durchführung).
- Methode der Traceruntersuchung (T-Meßstellen; Art, Intervall und Zeitdauer von Bemusterungen durch in-situ-Messung bzw. Probenahme/-analyse).
- Falls erforderlich, die Art der Probenbehandlung (z.B. zum Schutz gegen Einwirkung von Licht und Temperatur sowie Aktivierung vor der Analyse).
- Falls erforderlich, die Erfordernisse zum Umweltschutz (z.B. befristete Sperrung von Brunnen nach TV mit Radionukliden, Chlorierung von Trinkwasser nach TV mit Uranin, Information staatlicher Organe im Havariefall).
- Ablaufplanung (unter Berücksichtigung von materialtechnischen Abhängigkeiten und Zeitbedarf).
- Aufwandskalkulation (für Technik, Material und Bearbeitung, s. Abschnitt 3.3.).

Tabelle 3 Empfehlungen zur Tracerauswahl und TV-Methode

Tracerart (Beispiel)	Einsatzgebiet	TV-Methode
Isotopen-T - Stabile Isotope - Umweltisotope - Radionuklide • kurzlebige (82-Br, 129-I) • Schlüssel- radionuklide	Forschung " " Begutachtung, Erkundung Havarie- Untersuchung	Natur-TV " " vorwiegend Pump-TV Verdünnungs-TV Havarie-T- Beobachtung
Farb-T (Uranin, Eosin, Anilin-Farbe)	Begutachtung, Erkundung • Infiltration • Karst	Pump-TV, " Infiltrations-TV Natur-TV
Salz-T Elektrolyt: NaCl	Begutachtung, Erkundung	Pump-TV Infiltrations-/ Pump-TV Elektro-TV
Organische T - Organische Komplexe (Citrat, EDTA mit 51-Cr) - Organische Wasser- schadstoffe (Phenol) - Pollen, Sporen	Begutachtung, Erkundung • Infiltration Havarie- Untersuchung Forschung • Karst	Pump-TV Havarie-T- Beobachtung Natur-TV
Temperatur-T - Wasser erhöhter Temperatur (Heizspirale, Vor- fluter)	Erkundung • Infiltration	Pump-TV, Infiltrations-TV

3.3. MATERIALBEDARF UND AUFWAND

Bei der Projektierung eines Tracerversuches ist eine Auflistung der Materialien der TV-Anlage erforderlich, die insgesamt oder bei Nachnutzung bestehender Einrichtungen zusätzlich benötigt werden. Zum Materialbedarf gehören z.B.: Brunnen; GWBR (mit Ausbau); Fördereinrichtungen, Leitungen; Behälter, Mischapparatur für Tracer; Probenahmegeräte, Meßapparaturen; Tracer.

Weiterhin ist der Aufwand für sämtliche Aktivitäten, die zur Vorbereitung, Durchführung und Auswertung eines Tracerversuches erforderlich sind, detailliert auszuweisen und kostenmäßig zu kalkulieren. Bestandteile der Aufwandskalkulation sind z.B.:

- Kosten für Bohrungen,
- Materialkosten,
- Kosten für TV-Durchführung (GW-Förderung, technische und hydrogeologische Betreuung),
- Kosten für Probentransport und Laborarbeiten,
- Kosten für EDV-Auswertung.

Der Gesamtaufwand muß in vertretbarer Relation zur Zielstellung stehen.

4. TRACERVERSUCHSVORBEREITUNG

4.1. ABSTIMMUNGEN

Auf der Grundlage der Projektierung und einer Ortsbesichtigung sind rechtzeitig (mindestens 14 Tage vor TV-Beginn) Abstimmungen zur TV-Durchführung und -Auswertung entsprechend Tabelle 4 einzuleiten.

4.2. VORBEREITUNG EINER TRACERVERSUCHSANLAGE

Auf der Grundlage des TV-Projektes und eventuell operativer Präzisionen hat der Objektbearbeiter den Leiter für den Bau und die technische Ausrüstung der TV-Anlage über alle Erfordernisse aktenkundig einzuweisen. Konzeptionsänderungen bedürfen einer rechtzeitigen Abstimmung.

Tabelle 4 Abstimmungen zur TV-Durchführung und -Auswertung

Kriterium, Grund der Abstimmung	Zuständiger Partner
TV-Programm, allgemeine Information	Auftraggeber
Tracer-Einleitung in Gewässer (GW und OW), allgemeine Information (zwecks Genehmigung)	WWD, Oberflußmeisterei (SGA) (für Einzugsgebiet)
Umgang mit Radionuklid-Tracern, allgemeine Information	Staatliches Amt für Atom-sicherheit und Strahlen-schutz
TV-Durchführung in Praxis - mit physiologisch unbedenklichen Tracern - - für Probenuntersuchung - mit Radionuklid-Tracern	Nicht erforderlich - ggf. Labor autorisierter Betrieb (wie VEB Geophysik Leipzig oder WWD-Radioaktivitäts-labor Cottbus)
Potentielle Umwelt-Beeinflussung - durch Wasserschadstoff-Tracer bei Havarie (zwecks Sperrung der Wasser-nutzung, Einleitung von Antihavarie-maßnahmen) - durch physiologisch unbedenkliche Farb-Tracer, allgemeine Information - - im Trinkwasser	Für Havarie-Prophylaxe (und im Havariefall!): WWD, Oberflußmeisterei; Örtliche Organe (Rat der Gemeinde, Rat des Kreises) Örtliche Organe (Rat der Gemeinde, Rat des Kreises) VEB Wasserversorgung und Abwasserbehandlung
Probenahme, Probenuntersuchung - Art der Probenbehältnisse, Proben-menge, Analysenverfahren	Labor
TV-Auswertung - mit EDV-Programm	Nicht erforderlich - Ggf. Rechenzentrum

GW = Grundwasser

OW = Oberflächenwasser

WWD = Wasserwirtschaftsdirektion

SGA = Staatliche Gewässeraufsicht

Zur Vorbereitung der Nutzung von Brunnen und GWBR als TV-Meßstellen bezüglich Ausbau und Funktionskontrolle sowie Wasserstands- und Wassermengenmessung gelten TGL 23864/02 und TGL 35818/05. Besondere Bedeutung haben die ordnungsgemäße Abdichtung verschiedener GW-Leiter sowie Vorkehrungen gegen hydraulischen Grundbruch.

Sind TV in Verbindung mit Pump- bzw. Infiltrationsversuchen geplant, ist rechtzeitig die Wasserab- bzw. Wasserzuleitung zu klären, und zwar ohne hydraulischen Kurzschluß und ohne nachteilige Beeinträchtigung der Umwelt. Bei Ableitung in einen Vorfluter sollte mindestens ein Pegel (zur Wasserstandsmessung) eingerichtet werden. Bei Wasserzuleitung ist nachzuweisen, daß keine nachteilige Beeinträchtigung des vorgesehenen Tracers erfolgt.

Weiterhin sind seitens der für die technische Durchführung des TV verantwortlichen Leiter folgende Geräte und Materialien bereitzustellen:

- Tracer-Konzentrat (in Originalverpackung),
- Behältnisse zur Aufbewahrung von Tracer-Konzentrat,
- ggf. Behälter und Apparatur zur Herstellung homogener Tracer-Wasser-Gemische zur Markierung,
- Apparatur zur Tracer-Markierung,
- ggf. Tracer-Meßapparatur zur in-situ-Messung (mit Ersatz-Sonde),
- Apparatur zur horizontierten Entnahme von Wasser-Proben aus GW und OW (mit Ersatz-Probenehmer),
- Geräte zur Messung von Wasserstand und Volumenstrom (mit Ersatz),
- Behältnisse zur Aufbewahrung von Tracer-Proben (Flaschen, Sammelbehältnisse für Versand an Labor, ggf. Kühlschranks bzw. Kiste mit Isolation gegen Wärme- und Kälte-Einwirkung),
- Chemikalien zur Spezialbehandlung der Tracer (z.B. Chlorgas zur Entfärbung von markiertem Trinkwasser).

Für eine Auswahl häufig eingesetzter Tracersubstanzen sind in Tabelle 5 einige Angaben über Bezugsmöglichkeit, Eigenschaften und zweckmäßige Aufbewahrung zu entnehmen.

4.3. O-TEST

Voraussetzung für die zweckmäßige Durchführung und repräsentative Auswertung eines TV ist ein O-Test entsprechend der jeweiligen

Testkonzeption. Damit sollen im potentiellen TV-Einflußbereich primäre Kennwerte über die Beschaffenheit und Eigenschaften aller Stoffe ermittelt werden, die sich nachteilig auf die TV-Durchführung auswirken können bzw. die zur TV-Auswertung erforderlich sind.

Bei Anwendung idealer Tracer oder, wenn nur Fließrichtungsmessungen vorgesehen sind, kann auf den O-Test verzichtet werden. Vor TV mit Farb-, Salz- und organischen Tracern ist jedoch zumindest die Wasserbeschaffenheit zu analysieren und daraus die Konzentration der Tracermarkierung abzuleiten. Soll mittels TV die Migration von organischen Komplexen oder von Radionukliden untersucht werden, um daraus Rückschlüsse über die Sorption bzw. Retardation zu ziehen, sind zusätzlich Gesteinsuntersuchungen und gegebenenfalls sogar Analysen der Bodenluft erforderlich. Zur Lösung spezieller Aufgaben können weiterhin vergleichende Laboruntersuchungen zur Ermittlung von Wechselwirkungen zwischen den vorgesehenen Tracern und objekttypischen Wässern und Gesteinen mit column- bzw. batch-Technik notwendig sein.

4.4. PRIMÄRPARAMETER (vorausgehender Bohrungen und Tests)

Werden als Vorlauf von TV Bohrungen, Untersuchungen von Gesteins- und Wasserproben sowie andere Tests (wie Infiltrations- oder Pumpversuche) durchgeführt, dann sind die damit bestimmbaren Migrationsparameter zu ermitteln. Insbesondere ist eine Präzisierung solcher Wertegrößen erforderlich, die der TV-Konzipierung nur als "Schätzwerte nach erstem Kenntnisstand" zugrundeliegen. Hierfür sind gegebenenfalls auch spezielle Laborarbeiten (wie batch- und column-Tests), hydrogeologische Kartierungen (insbesondere Durchfluß- und Wasserstandsmessungen), Modellierungen und EDV-Berechnungen durchzuführen.

Die präzisierten Migrationsparameter sollen als Grundlage zur Präzisierung des TV-Modells dienen.

4.5. PRÄZISIERUNG DES TV-MODELLS (TV-VORABBERECHNUNG)

Unmittelbar vor TV-Beginn sind auf der Grundlage aktualisierter Parameter Vorabrechnungen zur geplanten TV-Durchführung anzu-

stellen, um die TV-Anordnung und -Bedingungen möglichst optimal zu klären und eindeutig zu fixieren. Hierfür sind insbesondere die im Rahmen der Vorbereitung der TV-Gruppe gewinnbaren Aufschluß- und Analysendaten zu nutzen. Sollen TV in Kombination mit GW-Förderung bzw. -Aufhöhung durchgeführt werden, sind außerdem die Meßdaten bis zur stationären Strömung zu berücksichtigen. Weiterhin können zur Präzisierung des TV-Modells aus bekannten Parametern abgeleitete bzw. geschätzte Wertegrößen nach Tabelle 6 Verwendung finden.

TV werden vorzugsweise mit Pump- bzw. Infiltrationsversuchen kombiniert. Diesbezügliche Vorabberechnungen sind deshalb generell nach TGL 23864 bzw. WAPRO 1.42. vorzunehmen, wofür auch EDV-Programme nutzbar sind. Zur Orientierung über die Behandlung von typischen Problemstellungen sollen nachfolgende Beispiele dienen.

4.5.1. PUMP- BZW. INFILTRATIONSBEDINGUNGEN

Soll ein TV, kombiniert mit Förderung bzw. Infiltration, in einem unendlich ausgedehnten GW-Leiter zur Durchführung kommen, gilt folgende Gleichung:

$$/\Delta s_{Br}/ = \frac{Q}{4 \pi T} W(\sigma)$$

- s_{Br} - Wasserstandsänderung im Brunnen (m)
- Q - Förder-/Infiltrationsrate (m^3/s)
- T - Transmissivität (m^2/s)
- $W(\sigma)$ - Brunnenfunktion (s. TGL 23864)

$$\sigma = (r_{Br}^2 \cdot S) / (4t \cdot T)$$

- r_{Br} - Brunnenradius (m)
- S - Speicherkoeffizient (-)
- t - Zeit (s)

Beispiel 1:

Gesucht wird die Förderrate Q für $\Delta s_{Br} = 3$ m
nach $t = 28$ h ($= 10^5$ s)

Bekannt sind $r_{Br} = 0,2$ m

$$S = 0,3$$

$$T = 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

Lösung: $\sigma = (0,04 \cdot 0,3) / (4 \cdot 10^5 \cdot 10^{-3}) = 3 \cdot 10^{-5}$

Nach WAPRO 1.42./02, Tabelle 2 ergibt sich

$$W(\sigma) = 9,84$$

$$Q = 3 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-3} / 9,84 = \underline{3,84 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}$$

4.5.2. TRACERFLIESSZEITEN UND MESSTURNUS BEI IMPULSMARKIERUNG

Die Ausbreitung konkreter Tracerteilchen im Wasserstrom erfolgt differenziert in Form einer Tracerwolke, die sich ständig vergrößert. Bei der TV-Durchführung wird die Tracerwolke an den Tracermeßstellen durch die zeitlich entsprechend variierende Konzentration registriert. Wird die Tracermarkierung als einmaliger Impuls vorgenommen, so resultiert eine zeitliche Verteilung der Konzentration, die in graphischer Darstellung eine linksschiefe Glockenkurve ergibt (Abb. 2a). Des weiteren ist der Durchgang der Stoffmenge an Tracermeßstellen auch als Summenkurve darstellbar (Abb. 2b).

Zur Vorbereitung eines TV ist generell folgendes zu klären:

a) Tracerfließzeiten (zwischen Tracerquelle und -meßstelle)

t_{\min} - Kürzeste Fließzeit = Zeitpunkt, zu dem erstmalig eine Erfassung der Tracerkonzentration $> C_0$ möglich ist,

t_M - Zeitpunkt, zu dem das Konzentrationsmaximum die Meßstelle passiert,

t_{50} - Zeitpunkt, zu dem 50 % der registrierten Tracerstoffmenge die Tracermeßstelle passiert hat,

t_{\max} - Längste Fließzeit = Zeitpunkt, bei dem letztmalig eine Erfassung der Tracerkonzentration $> C_0$ möglich ist.

b) Tracerdurchgang $t_d = (t_{\max} - t_{\min})$ = Zeitintervall, den die Tracerwolke zum Passieren der Tracermeßstelle benötigt.c) Tracermeßprogramm, d.h. Beginn, Intervall und Ende der Meßwert-erfassung.

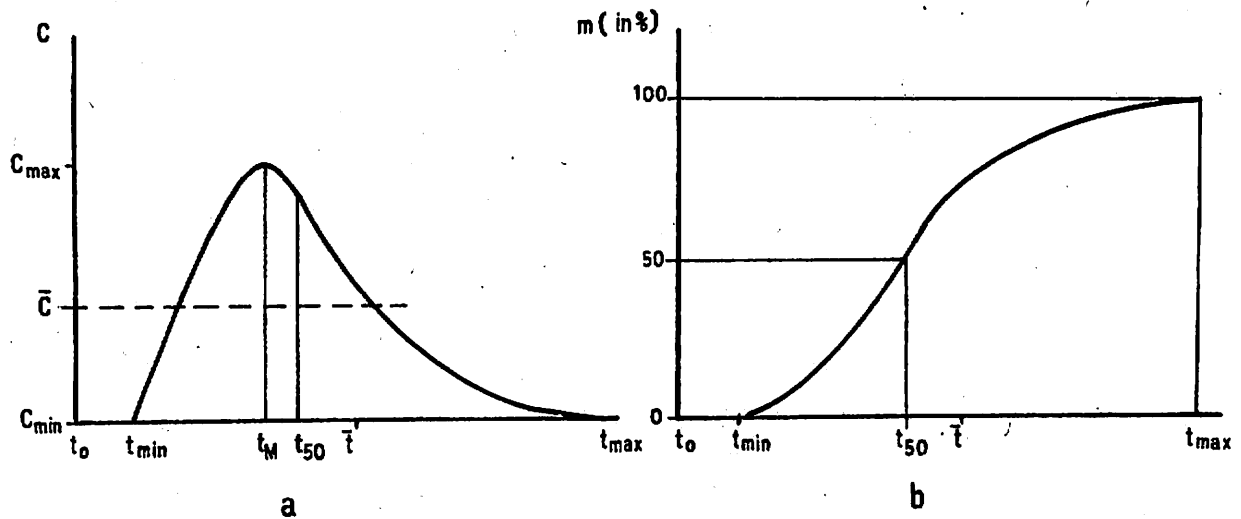


Abb. 2 Tracer-Durchgangskurven für
Konzentration (a) und Stoffmenge (b)
C - Tracer-Konzentration, siehe Tabelle 2
t - Tracer-Fließzeit, " " "
m - Tracer-Stoffmenge

Grundsätzlich soll die Meßwerterfassung für die gesamte Meßdauer (t_{MD}) in gleichen Meßintervallen (t_{MT}) ≤ 6 Stunden erfolgen.

Meßbeginn (t_{MB}): mindestens 1 bis 2 t_{MI} vor t_{min} .

Meßende (t_{ME}): mindestens 2 bis 3 t_{MI} nach t_{50} bzw. 3 bis 5 t_{MI} nach t_M , gegebenenfalls bis t_{max} .

Zur repräsentativen TV-Auswertung werden mindestens 15 T-Meßwerte (von Sonden-Messungen in situ, Proben-Untersuchungen und/oder visuellen Bemusterungen gefordert, was einer Versuchsdauer von 14 t_{MI} entspricht.

Die t -Werte können überschlägig wie folgt abgeschätzt werden:

$$t_{50} = l/\bar{v}_a = l \cdot n_o/\bar{v}_f = l \cdot n_o(k_f \cdot I)$$

$$t_{min} \approx 0,3 \cdot t_{50}, \quad (0,1 \text{ bis } 0,5 \cdot t_{50})$$

$$t_{max} \approx 3 \cdot t_{50}, \quad (2 \text{ bis } 10 \cdot t_{50})$$

l - Fließweg (m)

k_f - Filtrationskoeffizient (m/s)

n_o - durchströmbarer Hohlraumanteil (m^3/m^3)

v_a - GW-Fließgeschwindigkeit (m/s)

v_f - Filtrationsgeschwindigkeit (m/s)

Beispiel.2

Zur Vorbereitung eines Pump-TV mit impulsförmiger T-Markierung sind die T-Fließzeiten abzuschätzen und daraus Meßintervall, Meßbeginn sowie Meßende festzulegen.

Vom vorausgehenden Pumpversuch sind folgende Daten bekannt:

- l - 10,0 m (Abstand GWBR - Brunnen)
 k_f - 10^{-4} m/s
 n_o - 0,28 (für gegebenen k_f -Wert nach Tabelle 6 ermittelt)
 I - 0,14 (für stationären GW-Stand, nach BEYER / 9 / durch graphische Differenzierung ermittelt, siehe auch WAPRO 1.42., Bl. 4, S. 19)

Lösung:

a) Fließzeiten

$$\begin{aligned}
 t_{50} &= l \cdot n_o / (k_f \cdot I) = 10,0 \cdot 0,28 / (10^{-4} \cdot 0,14) \\
 &= 2 \cdot 10^5 \text{ s} \\
 &= \underline{56 \text{ h}} \text{ (gerundet)}
 \end{aligned}$$

$$t_{\min} \approx 0,3 \cdot t_{50} = \underline{17 \text{ h}}$$

$$t_{\max} \approx 3 \cdot t_{50} = \underline{168 \text{ h}}$$

b) Meßwerterfassung

Ausgegangen wird von den Mindestforderungen:

Meßbeginn (t_{MB}) = 1 Meßintervall vor t_{\min}

Meßende (t_{ME}) = 2 Meßintervalle nach t_{50}

Daraus ergibt sich:

$$\begin{aligned}
 \text{Meßintervall } (t_{MI}) &= (t_{50} - t_{\min}) / (14 - 3) \\
 &= (56 - 17) / 11 = 3,5 \\
 &= \underline{4 \text{ h}} \text{ (gerundet)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Meßbeginn } (t_{MB}) &= t_{\min} - t_{MI} \\
 &= 17 - 4 = \underline{13 \text{ h}} \text{ (nach } t_o)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Meßende } (t_{ME}) &= t_{MB} + 14 t_{MI}; (\geq t_{50} + 2 t_{MI}) \\
 &= 13 + 14 \cdot 4 = \underline{69 \text{ h}} (> 56 + 8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Meßdauer } (t_{MD}) &= t_{ME} - t_{MB} \\
 &= 69 - 13 = 56 \text{ h} = \underline{2 \text{ d}, 8 \text{ h}}
 \end{aligned}$$

Besonders hingewiesen sei noch auf Probleme bei der TV-Durchführung in Karstgebieten zur Verfolgung oberirdischer Fließgewässer, die

teilweise oder vollständig in Ponoren (Flußschwinden) versinken. Infolge des Vorhandenseins großer kommunizierender Kavernen, die zum Teil luftgefüllt sind, kann der Aufenthalt des Wassers im Untergrund insbesondere bei Niedrigwasserführung um ein Vielfaches größer sein, als nach Vorabberechnung zu vermuten. TV zur Ermittlung von Fließwegen in Karstgebieten sollten deshalb vorzugsweise bei oder nach längerer Hochwasserführung erfolgen, wo mit einer weitgehenden Wasserfüllung der Kavernen und deshalb mit größerer Migrationsgeschwindigkeit zu rechnen ist.

Weiterhin ist bei Anwendung von T-Markierungen mit wesentlich höheren Dichten als das markierte Wasser (z.B. mit Sole) davon auszugehen, daß die Migration bevorzugt auf der Gewässersohle erfolgt.

4.5.3. TRACERMENGE ZUR IMPULSMARKIERUNG

Die Tracermenge zur Impulsmarkierung ist so zu bemessen, daß für den Tracerdurchgang nach TV-Vorabberechnung eine eindeutige Erfassung von Tracermeßwerten gewährleistet ist. Es ist überschlägig ein Nachweis darüber zu führen, daß an den Tracermeßstellen für die kürzeste (und gegebenenfalls längste) zu erwartende Tracerfließzeit die Tracerkonzentration mindestens um ca. eine Zehnerpotenz über der Nachweisgrenze liegt bzw. in dieser Größenordnung angereichert werden kann.

Beispiel 3

Für den in den Beispielen 1 und 2 betrachteten Pump-TV sind T-Volumen (V_Q) und -Konzentration (C_Q) zur Impulsmarkierung festzulegen. Folgende Daten sind bekannt:

$$\text{Förderrate } Q = 3,84 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Kürzeste Fließzeit } t_{\min} \approx 28 \text{ h} \approx 1 \cdot 10^5 \text{ s}$$

$$\text{T-Durchgang } t_d = 83 \text{ h} \approx 3 \cdot 10^5 \text{ s}$$

T-Konzentration für Nachweisgrenze

$$C_N = 0,1 \text{ mg/l} \hat{=} 10^{-7} \text{ g}$$

- a) Es wird angenommen, daß beim betrachteten Pump-TV
- kein Verlust an T-Substanz eintritt, d.h. im T-Durchgang die gesamte T-Wolke erfaßt wird,
 - in der T-Wolke die (bei kürzester und längster Fließzeit (t_{\min} , t_{\max}) vorhandene) minimale T-Konzentration (C_{\min}) um 2 Zehnerpotenzen unter der mittleren Konzentration (\bar{C}) liegt.

Die Lösung erfolgt unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors von 1 Zehnerpotenz durch folgende Gleichung:

$$V_Q \cdot C_Q = Q \cdot (t_{\min} + t_d) \cdot (10^{-7} \cdot C_N + 10^2 \cdot C_N + 10^1 \cdot C_N)$$

Legt man für die Markierung das Volumen V_Q mit 1 m^3 fest, so ergibt sich

$$C_Q = 3,84 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^5 \cdot 10^{-4} \\ = 0,15 \%$$

Bei Einsatz von Uranin entspricht das einer wässrigen Lösung von 1 m^3 mit einem Anteil von 1,5 kg Tracer-Feststoff.

- b) Für einen Isotopen-TV mit einem organischen Tracer (organischer Komplex mit Radionuklid) sind die Konzentrationsverluste zwischen der T-Markierung und dem Zeitpunkt der letzten T-Analyse (für t_{\max}) zu ermitteln, um daraus die minimale Aktivitätskonzentration der Markierung (C_Q) festzulegen. Diese muß so gewählt werden, daß die spezifische Aktivität zur letzten in-situ-Messung (an der T-Meßstelle) oder Probenanalyse (im Labor) über der minimal registrierbaren Aktivität (Nachweisgrenze) der verfügbaren Meßapparatur liegt.

Es sind folgende Verluste zu beachten:

- C_1 - Verlust durch Verdünnung, abhängig von Fließweg, Fließgeschwindigkeit, durchströmbarem Hohlraumanteil (analog a))
- C_2 - Verlust durch Sorption, abhängig von Art und Anteil von Sorbentien (insbesondere organische Substanzen, Tonminerale, Al- und Fe-Hydroxide) im GW-Leiter, von den Eigenschaften der Nuklid-Verbindung sowie von der Kontaktdauer

$$C_2 = C_Q \cdot e^{-f(C_S, t_k)}$$

C_S - Sorptionskapazität

t_k - Kontaktdauer

C_3 - Verlust durch radioaktiven Zerfall

$$C_3 = C_Q - C_Q \cdot e^{-0,693 t_A / \text{HWZ}}$$

HWZ - Halbwertszeit

t_A - Zeitdauer zwischen Markierung und Analyse

$$C_1 + C_2 + C_3 = C_V - \text{Konzentrationsverlust insgesamt}$$

Weiterhin ist die meßtechnisch erfaßbare wirksame Konzentration (C_W) zu berücksichtigen (= C für Nachweisgrenze, $C_W = C_N$).

C_W : für Gamma-Zähler $\approx 1,1 \cdot 10^3$ Bq/l ($3 \cdot 10^{-2}$ $\mu\text{Ci/l}$)

für Szintillations-Zähler $\approx 1,5 \cdot 10^2$ Bq/l ($4 \cdot 10^{-3}$ Ci/l)

Für die Markierung ergibt sich somit die minimale Aktivitätskonzentration als Summe von wirksamer Konzentration und Konzentrationsverlust

$$C_Q = C_W + C_V$$

Um den Konzentrationsverlust richtig einschätzen zu können, sind gegebenenfalls Vorversuche erforderlich; zusätzlich sind Energieabhängigkeit (E_γ , E_β) und Meßverfahren (z.B. in Lösung, eingedampfte Probe, Szintillatorcocktail) zu berücksichtigen und anzugeben.

Bei TV in Karstgebieten müssen zur T-Markierung allgemein größere Mengen an T-Substanz zum Einsatz kommen, da durch Mischung mit Kavernenwasser eine starke Verdünnung zu erwarten ist.

4.5.4. TRACERMENGE ZUR KONTINUIERLICHEN MARKIERUNG

Diesbezüglich interessieren Pump- und/oder Infiltrations-TV, zu deren Vorbereitung die von BEIMS / 6 /, HÄFNER et al. / 14 / sowie VOIGT und HÄFNER / 30 / enthaltenen mathematischen Lösungen und Nomogramme zu beachten sind.

Zur Festlegung des Meßprogramms von Infiltrations-TV lassen sich Nomogramme über den Verlauf der T-Konzentration nutzen, sofern von folgenden Bedingungen ausgegangen wird:

Radius Infiltrationsbrunnen (T-Quelle) r_0	= 0,1 bis 0,3 m
Abstand T-Quelle-T-Meßstelle l	= 5 bis 15 m
Dispersivität δ	= 0,5 bis 3 m
T-Markierungsdauer t_M	= 1 h; 5 h; bis TV-Ende
TV-Dauer t_{TV}	= maximal 10 d
Faktor $Q/(H \cdot n_f)$	FAK = 0,1 bis 0,05
Q - Infiltrationsrate (m^3/s)	
H - GW-Mächtigkeit (m)	
n_f - fiktiver Hohlraumanteil = n_0	

Die kontinuierliche Markierung erfordert größere T-Mengen, da sie bis zum T-Durchbruch an der T-Meßstelle durchzuführen ist. So sind z.B. zur Durchführung eines Infiltrations-TV mit einem Salz-Tracer unter den genannten Bedingungen (mit Abstand von 10 m zwischen T-Quelle und T-Meßstelle) folgende Mengen Festsubstanz bereitzustellen:

- für 1std. Markierung: ca. 150 kg NaCl,
- für 5std. Markierung: ca. 750 kg NaCl,
- für 20std. Markierung: ca. 3000 kg NaCl (bis zum vollständigen Durchbruch).

Außerdem ist ein sehr großer technischer Aufwand einzukalkulieren, zur Herstellung einer homogenen Salzlösung sowie deren Bevorratung und zur kontinuierlichen Infiltration. Deshalb kann die kontinuierliche T-Markierung nur auf Ausnahmefälle mit entsprechender Begründung beschränkt bleiben.

4.6. VORBEREITUNG DER TRACERMARKIERUNG

Auf der Grundlage der TV-Projektierung (Modellschätzung) sind rechtzeitig und unter Beachtung der Haltbarkeit die vorgesehenen Tracer zu bestellen (siehe Tabelle 5), oder die gesamte TV-Durchführung ist einem Nachauftragnehmer (wie VEB Geophysik, WWD-Radionuklidlabor Cottbus) in Auftrag zu geben. Vor Anwendung von Isotopen wird eine Konsultation des Zentralinstituts für Isotopentechnik Leipzig (Bereich Isotopenanwendung/-forschung) empfohlen. Bei T-Markierung mit Radionukliden sind Strahlenschutzaspekte zu berücksichtigen. Gegebenenfalls ist eine Erlaubnis zu beantragen.

Tabelle 5 Information über ausgewählte Tracer (T)

Tracerart (Chemische Formel, Bezeichnung)	Typische Eigenschaften; Anforderungen; E: Empfehlungen für C_{min} zur Markierung von 10000 m ³ Wasser N: Nachweisgrenze	Lieferer; Lieferform; A: Aufbewahrung
I S O T O P E N - T ⁺⁾		
Radionuklide Br-82 (NaBr, KBr, NH ₄ BR) J-131 (NaJ, KJ) H-3 (H ₂ O)	Radioaktiv; Halbwertszeit (HWZ) möglichst kurz HWZ 35,3 h; E: 10 ⁸ Bq N: < 10 Bq/l HWZ 8,04 d) N: Es ist die Abnahme der spezi- fischen Aktivität durch Zer- fall, Sorption und Verdünnung zu beachten HWZ 12,35.a)	ZfK Rossendorf; Ampullen; A: gemäß VOAS
Stabile Isotope N-15 (NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺ , NH ₄ NO ₃) H-2 (H ₂ O)	Inaktiv; natürliche Häufigkeit (C_n) sehr klein; Nachweis durch "Massenspektrometrische Präzi- sions-Isotopenanalyse" C_n 0,365 Atom-%; N: 1 ppm E: abhängig vom Nulleffekt (C_0) für N im Unter- suchungsobjekt; ist z.B. N im Grundwasser an Nitrat gebunden mit C_0 < 10 mg/l, genügt eine Markierung durch 2 g Nitrat-Tracer mit 10 Atom-% N-15-Anreicherung C_n 0,0147 Atom-%; N: 1,5 ppm E: 20 l Wasser-Tracer mit > 99 Atom-% H-2-An- reicherung (hohe Kosten !)	Isocommerz Leipzig; Substanzen mit an- gereicherten Iso- topen in Flaschen; A: nach Angaben des Lieferers
F A R B - T		
Uranin (Na-Fluoreszein, C ₂₀ H ₁₀ O ₅ Na ₂)	Grüne Fluoreszenz, Maximum bei 514 nm; Empfind- lichkeit gegen Licht, Oxydation (Belüftung), Bakterien, Chlor, Sorption (Humus, Tonminerale), H ⁺ , andere Farbstoffe; kaum gesundheitsschädlich E: 10 kg N: 10 ⁻⁷ bis 10 ⁻¹¹ %; abhängig von Aktivierung (mit UV-Licht), Anreicherung (mit Aktivkohle), pH-Wert (Fluoreszenzintensität 99 % bei pH 9, 80 % bei pH 7, 35 % bei pH 6)	VK Labor- und Fein- chemikalien Apolda; Festschubstanz in Dosen (keine analysenreine Substanz erforder- lich !); A: trocken, licht- geschützt, Lager- temperatur -30 bis + 50 °C, Lager- zeit: maximal 3 Jahre
Eosin A (Na-Tetrabrom- Fluoreszein, C ₂₀ H ₆ Br ₄ O ₅ Na ₂)	Gelbgrüne Fluoreszenz, Maximum bei 537 nm; Empfindlichkeit wie Uranin; Fluoreszenzintensi- tät: 20 %, verglichen mit Uranin; kaum gesund- heitsschädlich E: > 50 kg N: > 1 mg/l	
Rhodamin B (C ₂₈ H ₃₀ O ₂ Na ₂ Cl)	Rote Fluoreszenz, Maximum bei 576 nm; Empfind- lichkeit - gegen Licht (sehr gering), - gegen Oxydation (mittelmäßig), - gegen H ⁺ (gering); Fluoreszenzintensität: 30 %, verglichen mit Uranin; schwach giftig N: 1 Größenordnung < Uranin	

⁺⁾ Beratung durch AdW, Zentralinstitut für Isotopentechnik,
Bereiche Isotopenanwendung und Isotopenforschung,
Permoserstraße 15, Leipzig 7050
Siehe auch / 2 /, insbesondere Teil I, S. 107
(H. Jordan und K. Fröhlich: Isotope in der Hydrogeologie)

Tabelle 5 (Fortsetzung)

S A L Z - T		
<p>NaCl</p> <p>- als Feststoff</p> <p>- als Sole</p>	<p>Gute Wasserlöslichkeit, gering temperaturabhängig: 26 % bei 0 °C, 28,5 % bei 100 °C; hygroskopisch</p> <p>E: 40 bis 100 kg (in Form gesättigter Lösung, siehe Abb. 1)</p> <p>Konzentration ca. 300 g/l; gute elektrische Leitfähigkeit</p> <p>E: 135 bis 330 l</p> <p>N: ca. 1 Größenordnung über dem Nulleffekt (C_0) im Grundwasser (GW), bei geringer GW-Mineralisation < 100 μS/cm; Elektro-TV ist nur sinnvoll, wenn im Untersuchungsobjekt keine elektrischen Störquellen (z.B. Kabel) vorhanden sind</p>	<p>- für Salz:</p> <p>Salzbergbaubetriebe, Großhandelsgenossenschaften; Sackverpackung;</p> <p>A: trocken</p> <p>- für Sole:</p> <p>Salzbergbau- und verarbeitungsbetriebe, wie VEB Saline Oberilm, Stadtilm; Tankwagen;</p> <p>A: in korrosionsresistenten Behältern</p>
<p>KCl</p> <p>- als Feststoff</p> <p>- als Sole</p>	<p>Gute Wasserlöslichkeit, stark temperaturabhängig: 20,2 % bei 0 °C, 23,6 % bei 10 °C, 25,5 % bei 20 °C, 36 % bei 100 °C; Auf Lösungsgeschwindigkeit kleiner als bei NaCl</p> <p>E: 30 bis 80 kg (als ungesättigte Lösung, unter Beachtung von C_0 und Temperatur im Untersuchungsobjekt; bei Übersättigung sonst Ausfall !)</p> <p>E: abhängig von Konzentration</p> <p>N: abhängig vom Nachweisverfahren (chemischer Nachweis empfindlicher als für NaCl)</p>	
Organische T		
<p>Organische Komplexe (Citrate, Detergentien, EDTA, NTA, Oxalate, Picolinate)</p>	<p>Erhöhen die Mobilität (Migration) toxischer Elemente (siehe / 29 /)</p> <p>E: in geringer Konzentration</p> <p>N: Spuren, z.B. 10^{-10} % für Cr-51-EDTA, 10^{-6} % für Detergentien</p>	<p>VEB Chemiehandel; Spezialverpackung;</p> <p>A: nach Vorschrift des Lieferers</p>
<p>Pollen, Sporen (z.B. gefärbte Lycopodiumsporen)</p>	<p>Große Resistenz im Grundwasser auf extrem langen Migrationswegen (ca. 100 km) im Karst</p> <p>E: in relativ geringer Menge</p> <p>N: einzelne Pollen bzw. Sporen</p>	<p>Spezielle Institute; Spezialverpackung;</p> <p>A: trocken</p>

Tabelle 6 Parameter zur TV-Vorabberechnung

WB ⁺⁾	Beispiele	Hinweise zur Ermittlung																		
Hohlraumanteil - entwässerbarer (n_e) WB: 0 bis 0,32 - durchströmbarer (n_o) WB: 0 bis 0,35 - fiktiver (n_f) WB: 0 bis ∞	<table border="1"> <tr> <td>k_f (m/s)</td> <td>10^{-6}</td> <td>10^{-5}</td> <td>10^{-4}</td> <td>10^{-3}</td> </tr> <tr> <td>n_e</td> <td>0,02</td> <td>0,055</td> <td>0,11</td> <td>0,22</td> </tr> </table>	k_f (m/s)	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	n_e	0,02	0,055	0,11	0,22	Siehe: ADAM et al. (/ 5 /, Abb. 2 sowie Tabelle 2.2.) $n_f = n_o + \alpha$ α : Sorptionskoeffizient Ermittlung durch column-Test oder analog K_D / 5 /, Tabellen 4.1. und 4.2.)								
	k_f (m/s)	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}															
	n_e	0,02	0,055	0,11	0,22															
<table border="1"> <tr> <td>k_f (m/s)</td> <td>10^{-6}</td> <td>10^{-5}</td> <td>10^{-4}</td> <td>10^{-3}</td> </tr> <tr> <td>n_o</td> <td>0,06</td> <td>0,16</td> <td>0,28</td> <td>0,32</td> </tr> </table>	k_f (m/s)	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	n_o	0,06	0,16	0,28	0,32										
k_f (m/s)	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}																
n_o	0,06	0,16	0,28	0,32																
α für ideale Tracer: 0 α für Schwermetalle: 10 bis 20 α_{max} : > 100 bei GW-Stauern																				
Dispersivität (δ) WB: 0 bis 100	<table border="1"> <tr> <td>GW-Fließlänge (m)</td> <td>5</td> <td>10</td> <td>20</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">δ</td> <td>0,2</td> <td>0,4</td> <td>1</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>0,1</td> <td>0,2</td> <td>0,3</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>bis 1</td> <td>bis 4</td> <td>bis 5</td> <td>bis 20</td> </tr> </table>	GW-Fließlänge (m)	5	10	20	50	δ	0,2	0,4	1	2	0,1	0,2	0,3	1	bis 1	bis 4	bis 5	bis 20	Siehe: BEIMS (/ 6 /, Abb. 12) Abhängig von: Korngröße und -form, Porenanteil, Dichtedifferenz, Viskosität und Temperatur
GW-Fließlänge (m)	5	10	20	50																
δ	0,2	0,4	1	2																
	0,1	0,2	0,3	1																
	bis 1	bis 4	bis 5	bis 20																
Speicherkoeffizient (S) WB: 0 bis 1	Für ungespanntes GW: $S = n_o$ (Bei Poren-GW-Leitern guter Permeabilität: $S \approx 0,2$) Für ungespanntes GW: $S = S_o \cdot M$ (Bei Poren-GW-Leitern guter Permeabilität: $S \approx 10^{-4}$)	Siehe: TGL 23989 M : GW-Leitermächtigkeit S_o : Spezifischer Speicherkoeffizient																		

⁺⁾ WB: Streubereich der Wertegrößen für Poren-GW-Leiter (GW: Grundwasser)

Des Weiteren sind gegebenenfalls Mischwasser sowie Geräte und Behälter zur Herstellung, Aufbewahrung bzw. Injektion von T-Lösungen erforderlich.

Nach dem präzisierten TV-Modell ist ein konkretes T-Volumen definierter Konzentration zur T-Markierung vorzubereiten. Sofern eventuell eine flüssige T-Lösung hergestellt werden muß, sind zunächst Menge und Beschaffenheit des Konzentrats zu überprüfen.

Bei unbekannter Zusammensetzung des Konzentrats ist eine T-Substanzanalyse zu machen. Soll zur Herstellung der T-Lösung Fremdwasser Verwendung finden, ist gegebenenfalls auch dessen Analyse erforderlich.

Wichtig ist, daß zur T-Markierung eine homogene T-Lösung zum Einsatz kommt. Bei Impulsmarkierung kann die Homogenisierung gegebenenfalls auch im Eingabebrunnen erfolgen, z.B. durch mehrfaches Auf- und Abbewegen des perforierten Eingabehältnisses bzw. einer perforierten Scheibe. Es ist unbedingt darauf zu achten, daß dem Wasser nicht mehr T-Feststoff zugesetzt wird, als im vorgesehenen Temperaturbereich lösbar ist. Abbildung 1 zeigt ein Nomogram für den zulässigen NaCl-Einsatz im Brunnen je Meter Wassersäule in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers.

5. TV-DURCHFÜHRUNG

5.1. TV-PROTOKOLL

Über die Durchführung ist ein Protokoll analog Tabelle 7 anzufertigen. Das Protokoll besteht aus einem Deckblatt, das vor dem TV-Beginn vom Objektbearbeiter auszufüllen ist, und den T-Meßwerten, für deren exakte und vollständige Dokumentation der Leiter der TV-Anlage verantwortlich zeichnet. Das Deckblatt des TV-Protokolls soll die TV-Projektierung ergänzen bzw. präzisieren und gilt als Auftrag zur TV-Durchführung. Die T-Meßwerte sind jeweils sofort nach ihrer Gewinnung zu dokumentieren und mit Signum des Bearbeiters zu versehen.

TV kommen meist in Verbindung mit Pump- oder Infiltrationsversuchen zur Durchführung, wobei zunächst ein stationärer Wasserstand angestrebt und für die gesamte TV-Dauer beibehalten werden muß. Für

Tabelle 7 Muster eines TV-Protokolls

A Deckblatt

1. Objektbezeichnung:
2. TV-Projektierung: - Betrieb (Name, Sitz)
- Projektant/Datum
3. TV-Zielstellung: - Zu klärende Probleme (in Stichworten)
- Zu ermittelnde Parameter (Symbole)
4. TV-Vorbereitung: - Abstimmung (Partner, Auflagen)
- Aufschluß- und Ausbauarbeiten (Art, Dokumentation siehe Anlage ..)
- Infiltration/Förderung (Volumenstrom, Dokumentation siehe Anlage ..)
5. TV-Geometrie: - Situationsskizze (mit T-Quelle, T-Meßstellen)
- Profilskizze (zwischen T-Quelle und T-Meßstellen)
6. Festlegungen zur TV-Durchführung:
 - TV-Methode/T-Art(en)
 - T-Markierung (Art, T-Konzentration/T-Volumen)
 - T-Meßwerterfassung (Art, Beginn, Turnus, Ende)
 - Probenahme/-analyse (Anzahl, Methode)
7. TV-Durchführung: - Betrieb/Nachauftragnehmer (Name, Sitz)
- Leiter TV-Anlage/Verantwortlicher
- Zeitdauer (von ... bis)
8. Sonstige Hinweise: (z.B. über Probentransport in Labor)

.....
Objektbearbeiter/Datum

B T-Meßwerte

1. Objektbezeichnung:
 2. T-Meßstelle (Art, Filterbereich/-durchmesser)
 3. Meßturnus
- | | Datum
Uhrzeit | Proben-
Nr. | Wasser-
stand
m | Temperatur
°C | Sonstiges
(z.B. Nieder-
schlag) | Signum des
Bearbeiters |
|---------------|------------------|----------------|-----------------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| 1. Vormessung | ... | V 1, ... | | | | |
| 2. Vormessung | ... | V 2, ... | | | | |
| Markierung | ... | O, ... | | | | |
| 1. Messung | ... | 1, ... | | | | |
| 2. Messung | ... | 2, ... | | | | |
| 3. Messung | ... | 3, ... | | | | |

.....
Leiter der TV-Anlage/Datum

den Bau von Versuchsbrunnen und den Pumpbetrieb gelten dann zusätzlich sinngemäß die Regelungen nach TGL 23864/02. Die hierzu erforderlichen Protokolle sind als Anlagen zum TV-Protokoll zu behandeln.

Die Dokumentation der Meßwerte hat in regelmäßigen Intervallen (1 bis 6 h) bzw. kontinuierlich zu erfolgen. Sie soll bereits vor der T-Markierung beginnen und nicht eher enden, bis an der T-Meßstelle die maximale T-Konzentration sicher nachgewiesen wird.

5.2. TRACERMARKIERUNG

T-Markierungen sind bezüglich Zeit, Volumen und Konzentration nach TV-Konzeption vorzunehmen. Es wird zwischen sehr kurzer (schlagartiger) Impulsmarkierung und kontinuierlicher Markierung unterschieden. Sofern keine hygienischen Bedenken bestehen, kann die Dosierung etwas stärker gewählt werden, als nach Vorabberechnung erforderlich (Sicherheitsfaktor).

Zur Infiltration in definierte GW-Leiter-Bereiche sind Rohre mit entsprechender Perforation einzusetzen. Mit dem T-Material muß sehr sorgsam umgegangen werden, um falsche Meßergebnisse durch T-Ver-schleppung auszuschließen.

Die Markierung soll vorzugsweise in flüssiger Form erfolgen, wobei die T-Substanz homogen verteilt sein muß. Zur Verarbeitung größerer Mengen T-Feststoff sind entsprechende Misch- und Vorrats-Behältnisse (Faß, Meßkasten), Rührwerke, Dosierpumpen und Rohrleitungen erforderlich, wie sie BEIMS / 6 / beschreibt.

Soll zur Impulsmarkierung an der T-Quelle Feststoff Verwendung finden, ist dessen schnelle und vollständige Auflösung im Wasser (ohne Klumpenbildung) erforderlich. In Bohrlöchern bzw. Brunnen läßt sich die Homogenisierung durch mehrfache Auf- und Abbewegung eines Mischtellere (perforierte Scheibe am Gestänge oder Seil) erreichen. Zur Verbesserung der Benetzung von Pulvern lassen sich Netzmittel (wie Fit) beimischen.

Zur kontinuierlichen Markierung ist über die vorgesehene Dauer ein konstanter Volumenstrom mit konstanter T-Konzentration erforderlich, der regelmäßig kontrolliert werden muß.

5.3. IN-SITU-MESSUNG

Die Messungen können diskret (in geplanten Meßintervallen) oder kontinuierlich erfolgen, mit visueller oder automatischer Registrierung. Zur Ausführung sind Sonden zu verwenden, deren Nachweisgrenze nach Eichung unter Objektbedingungen eine eindeutige Erfassung der minimalen T-Konzentration (C_{\min}) garantiert, die an der T-Meßstelle für die kürzeste T-Fließzeit (t_{\min}) zu erwarten ist. Des weiteren muß über den gesamten Meßzeitraum Sondenkonstanz gewährleistet sein.

Bei Verdünnungs-TV (Einbohrloch-Methode) muß die Abnahme der T-Konzentration so genau erfaßt werden, daß eine eindeutige Auswertung möglich ist. Zur Durchführung diesbezüglicher Fließrichtungs- und Fließgeschwindigkeitsmessungen ist auf eine spezielle Technologie der WWD Obere Elbe-Neiße (Radionuklid-Labor Cottbus) hinzuweisen.

Bei Elektro-TV (Methode des elektrisch geladenen Körpers) ist die T-Migration durch rasterförmige Kartierung bzw. Sondierung im Meßturnus mit Hilfe von Elektroden zu verfolgen.

In-situ-Messungen können direkt im GW (Brunnen, GWBR), im Oberflächenwasser (Vorfluter), im Förderstrom (Rohrleitung, Überfallmeßkasten) oder an Wasserproben unmittelbar nach deren Gewinnung stattfinden. Bei Messungen im Förderstrom und an Proben sind gegebenenfalls spezielle Maßnahmen zu treffen, um gravierende Veränderungen der Wasserbeschaffenheit und damit falsche Meßergebnisse auszuschließen bzw. nachträgliche Korrekturen zu ermöglichen. So kann es z.B. bei Aktivitätsmessungen in der Nähe von Strahlungsquellen notwendig sein, daß die Behältnisse der zu vermessenden Proben bzw. die Rohrleitungen im Sondenbereich besonders abgeschirmt werden müssen.

5.4. PROBENAHME, PROBENVORBEREITUNG, VISUELLE BEMUSTERUNG

Die Probenahme zur Erfassung dynamischer Vorgänge muß methodisch, zeitlich und örtlich sehr exakt durchgeführt werden, da bereits kleine Unkorrektheiten das Untersuchungsergebnis gravierend beeinflussen können. Für die Probengewinnung von GW und Oberflächen-

wasser (OW) ist TGL 23979 verbindlich. Bei großem technischen Aufwand zur TV-Vorbereitung und -Durchführung sowie bei komplizierten Zielstellungen sind unbedingt mindestens zwei Probensortimente sicherzustellen, um kurzfristig und ohne TV-Wiederholung eventuell Duplikat- oder Kontrollanalysen durchführen zu können.

Die Art der Probengefäße ist abhängig von den Wasserinhaltsstoffen bzw. Eigenschaften der Probe. Vorzugsweise sind Glasflaschen mit Schraubverschluß (keine Gummistopfen) zu verwenden.

Das erforderliche Probenvolumen richtet sich nach der Anzahl der vorgesehenen Einzelbestimmungen sowie nach der speziellen Analysetechnik, es kann zwischen wenigen cm^3 und mehreren Litern betragen. Hierüber sind bereits bei der Projektierung Abstimmungen mit dem Labor zu treffen (siehe Tabelle 4).

In den Probenahmezyklus nach geplantem Meßturnus sind außer den Proben von T-Meßstellen grundsätzlich auch solche von mutmaßlich kommunizierenden Gewässern und Niederschlägen im Einzugsgebiet einzubeziehen, sofern davon eine Beeinflussung des zu untersuchenden Migrationsprozesses nicht ausgeschlossen werden kann. Die Probenahme hat, unter Berücksichtigung der GW- bzw. Infiltrationsgeschwindigkeit, rechtzeitig vor der T-Markierung zu beginnen. Bei Untersuchungen im GW-Bereich ist gegebenenfalls zusätzlich eine mit Sicherheit "unbeeinflusste Stelle" zu beproben.

Die Gewinnung von GW-Proben hat möglichst aus dem Förderstrom zu erfolgen. Gegebenenfalls ist bereits in situ eine Anreicherung der interessierenden Komponenten, z.B. mittels Aktivkohle, (bei möglichst geringer Turbulenz) vorzunehmen. GW-Schöpfproben dürfen nur aus dem Filterbereich entnommen werden. Hierbei sind Maßnahmen gegen unerwünschte Veränderungen der Wasserbeschaffenheit vorzusehen, z.B. durch Anwendung von Schutzgas.

OW-Proben aus fließenden Gewässern sind generell systematisch über den Durchflußquerschnitt verteilt zu entnehmen, und zwar möglichst in Bereichen gleichmäßiger Strömung.

Die einzelnen Probengefäße bzw. Sammelbehältnisse sind eindeutig zu beschriften (Objektbezeichnung, T-Meßstelle, Entnahmezeit bzw. Schlüssel-Nr.). Es ist zwischen Vorproben ($V_1 \dots V_n$) und Proben ab T-Markierung (0, 1, ... n) zu unterscheiden (siehe Tabelle 7).

Die Proben sind nach dem Probenahmeturnus ab O (O-Probe) fortlaufend zu numerieren. Im TV-Protokoll sind hierzu Datum, Uhrzeit und Witterungsbedingungen zu dokumentieren. Gleichzeitig muß bei Probenahme aus fließenden Gewässern deren Abfluß (bzw. Pegelwasserstand) registriert werden. Weiterhin ist eine Erfassung potentieller Sekundäreinflüsse anthropogener und terrigener Art erforderlich, die sich auf das TV-Ergebnis auswirken könnten.

Spezielle Maßnahmen zur Probenvorbereitung sind abhängig von der konkreten Wasserbeschaffenheit und den vorgesehenen Analyseverfahren. Erforderliche Konservierungen sind nach Abstimmung mit dem Labor bzw. nach / 1 / vorzunehmen. Gegebenenfalls läßt sich die T-Konzentration auch sekundär mit Aktivkohle oder anderen Sorbentien anreichern.

Bei Einsatz von Farb-Tracern, wo an Hand von Proben das Vorhandensein von T-Substanz erkennbar und sich die T-Konzentration vergleichend abstufen läßt, ist auch eine visuelle Bemusterung mit Hilfe von Eichlösungen durchzuführen. Wenn möglich, ist hierfür die visuelle Intensität zu erhöhen, z.B. durch Optimierung des pH-Wertes (für Uranin z.B. \geq pH 9), durch Verbesserung der Fluoreszenz mittels UV-Licht. Mit Hilfe der visuellen Bemusterung sind direkt annähernd die kürzeste (und gegebenenfalls längste) Fließzeit sowie recht zuverlässig die Fließzeit für das Konzentrationsmaximum bestimmbar. Durch graphische Auswertung läßt sich dann auch der t_{50} -Wert ermitteln.

5.5. PROBENAUFBEWAHRUNG/-TRANSPORT

Die Proben von TV sind so aufzubewahren, daß keine für die Auswertung nachteiligen Beschaffenheitsänderungen eintreten können. Allgemein ist ein Schutz gegen Hitze, Frost, pH-Änderung und Lichtwirkung erforderlich. Sofern es sich um kleine Probengefäße handelt, soll eine geordnete Aufbewahrung in Fächerkisten erfolgen.

Unmittelbar nach TV-Abschluß bzw. bereits vorher in mehreren Phasen, sind die Proben dem Labor zuzuführen. Im Probenbegleitschein sind die zu analysierenden Parameter und die erforderliche Analysegenauigkeit zu fixieren.

6. LABORATIVE TRACERMESSUNGEN

Laborative Wasseranalysen sind grundsätzlich nach / 1 / durchzuführen. Dabei ist von jeder Probe mindestens die T-Konzentration zu bestimmen. Weiterhin sollten von den Probenserien jedes TV auch einige Vollanalysen angefertigt werden, zumindest für die Zeitpunkte unmittelbar vor der T-Markierung (O-Effekt) und zur maximalen T-Konzentration.

Zur quantitativen Erfassung minimaler Konzentrationen sind Anreicherungen vorzunehmen, z.B. durch Eindampfen. Für den Einsatz von Aktivkohle im Rahmen von TV mit Uranin sind folgende Bedingungen zu empfehlen: Kohle in geringer Menge (ca. 10 g) in PVC-Gewebe in Volumenstrom ≥ 1 cm/s mindestens 12 h einhängen, anschließend 15 min Auslaugung mit 15%iger KOH + CH₃OH. Auf Grund schwankender Sorptionskapazität darf je TV nur Aktivkohle einer Charge Verwendung finden.

Die Laborergebnisse sind in tabellarischer Form zu dokumentieren, und zwar geordnet nach der Entnahmezeit der Proben. Für erfaßbare Änderungen der Beschaffenheit, z.B. durch radioaktiven Zerfall, ist neben dem Meßergebnis der jeweilige Umrechnungswert für den Bezugszeitpunkt der T-Markierung anzugeben. Außerdem sind im Laborprotokoll Ausbaudaten, die Analysen- und Berechnungsmethode sowie Angaben zur Genauigkeit auszuweisen und vom Verantwortlichen durch Unterschrift zu bestätigen.

7. AUSWERTUNG VON TRACERVERSUCHEN (BEISPIELE)

7.1. BESTIMMUNG DER GRUNDWASSERGESCHWINDIGKEIT

7.1.1. ARTEN DER GRUNDWASSERGESCHWINDIGKEIT

Die wirkliche Geschwindigkeit der einzelnen Wasserteilchen in den Porenkanälen, die sogenannte Bahngeschwindigkeit, kann im allgemeinen nicht erfaßt werden, da der wirkliche Fließweg und die durchströmte Querschnittsfläche der Porenkanäle unbekannt sind. Bei einer Vielzahl von Grundwasserbewegungsvorgängen ist die Fließzeit Δt von Bedeutung, die die Wasserteilchen in der Hauptfließrichtung

für die Strecke a (Abstand der Meßpunkte) benötigen. Der Abstand a ist dabei wesentlich kürzer als der tatsächliche Fließweg. Die fiktive Geschwindigkeit $v_a = a/\Delta t$ wird als Abstandsgeschwindigkeit bezeichnet. Sie besitzt vor allem für Grundwasserbeschaffenheitsprobleme Bedeutung. Unter der Abstandsgeschwindigkeit (Porengeschwindigkeit) versteht man auch eine fiktive mittlere Geschwindigkeit der Wasserteilchen, die sich nach folgender Beziehung ergibt:

$$v_a = v_f/n_o$$

v_f - Filtrationsgeschwindigkeit

n_o - durchströmbarer Hohlraumanteil

Für alle unterirdischen Strömungsvorgänge, bei welchen die Wassermenge Q im Vordergrund steht, wird die (fiktive) Filtrationsgeschwindigkeit v_f benutzt, die durch die Beziehung

$$v_f = Q/A \quad \text{bzw.} \quad v_f = -k_f \cdot \text{grad } h$$

Q - unterirdischer Durchfluß

A - unterirdischer Durchflußquerschnitt

k_f - Filtrationskoeffizient

grad h - Gradient der Standrohrspiegelhöhe

beschrieben wird.

7.1.2. VERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DER GRUNDWASSERGESCHWINDIGKEIT

Durch folgende Tracerverfahren können Grundwassergeschwindigkeiten bestimmt werden / 11 /:

- Tracerabstandsmethode

Man unterscheidet die maximale, die intensive und die mittlere Abstandsgeschwindigkeit (Abb. 3). Die mittlere Abstandsgeschwindigkeit ist dabei etwa gleich der "Porengeschwindigkeit".

Maximale Abstandsgeschwindigkeit: $v_{a1} = \frac{a}{t_1 - t_o} \approx 1,8 v_{a3}$

Intensive Abstandsgeschwindigkeit: $v_{a2} = \frac{a}{t_2 - t_o} \approx 1,2 v_{a3}$

Mittlere Abstandsgeschwindigkeit: $v_{a3} = \frac{a}{t_3 - t_o}$

Die genauesten Messungen wurden bisher mit Tritium als Tracer erzielt.

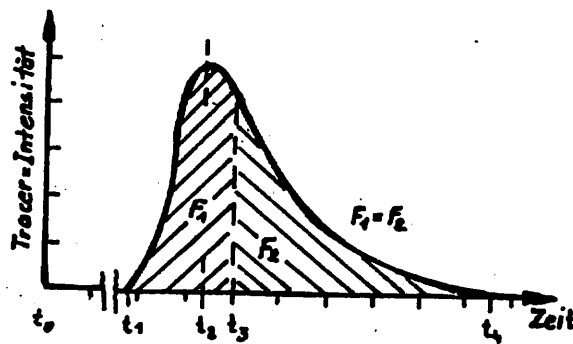


Abb. 3 Tracer-Durchgangskurve an einer T-Meßstelle

- Tracerverdünnungsmethode

Bei dieser Methode wird in einen Brunnen oder GWBR ein Tracer eingegeben und die Konzentrationsabnahme überwacht. Diese meßbare Konzentrationsabnahme ist dabei eine Funktion der natürlichen Grundwasserfließgeschwindigkeit (Filtrationsgeschwindigkeit). Vorwiegend werden radioaktive Nuklide als Tracer benutzt. Es ergibt sich folgende Grundgleichung:

$$v_f = \frac{V}{f \cdot F \cdot t} \ln \frac{A_0}{A}$$

v_f - Filtrationsgeschwindigkeit

V - Meßvolumen im durchströmten Filterrohr

F - Querschnitt des Meßvolumens senkrecht zur Strömung

f - Einflußfaktor

t - Zeit

A - Aktivität

A_0 - Anfangsaktivität

Die größte Schwierigkeit bereitet die Festlegung des Einflußfaktors f , der das Verhältnis der Strömungsgeschwindigkeit im GWBR zur natürlichen Grundwassergeschwindigkeit zum Ausdruck bringt. Die Vertikalströmung im Filterrohr und in der Kiesschüttung ist durch konstruktive Maßnahmen auszuschließen. Die Grenzen

der bestimmbaren Grundwassergeschwindigkeit liegen zwischen einigen mm/d und dem turbulenten Strömungsbereich. Die erzielbare Genauigkeit dürfte bei ± 20 bis 30% für Felduntersuchungen liegen.

- Einzelbrunnen-Impulsmethode

Bei dieser Methode wird ein Tracer mit einer gewissen Menge Wasser in einen Brunnen eingegeben. Der Tracer bewegt sich mit der Abstandsgeschwindigkeit in Fließrichtung des Grundwassers vom Brunnen weg und befindet sich nach der Zeit τ in einer Entfernung r vom Brunnen.

Vom Zeitpunkt τ an wird der Brunnen abgepumpt und das Eintreffen des Tracers im Brunnen beobachtet. Die Abstandsgeschwindigkeit ergibt sich zu

$$v_a = \frac{1}{\tau} \sqrt{\frac{Q \cdot t}{\pi \cdot H \cdot n_o}}$$

Q - Förderstrom

t - Pumpzeit

H - GW-Mächtigkeit

n_o - durchströmbarer Porenanteil

τ - Zeitspanne zwischen Tracereingabe und Pumpbeginn

v_a - Abstandsgeschwindigkeit

7.2. BESTIMMUNG VON MIGRATIONSPARAMETERN

7.2.1. GRAPHISCH-ANALYTISCHE VERFAHREN

Die graphisch-analytischen Verfahren gehen von analytischen Lösungen der Transportgleichung aus. Es wird die Tatsache ausgenutzt, daß die Kurven, die aus den gemessenen Werten gewonnen werden, mit Hilfe der analytischen Lösungen nachgerechnet werden können, wenn die Stofftransportparameter bekannt sind. Umgekehrt ist es möglich, mit charakteristischen C- und t-Werten aus der graphischen Darstellung von $C(x,t)$ die Parameter zu bestimmen. Günstig ist eine Darstellung von $C(x,t)$ in Form von Geraden, was durch geeignete mathematische Umformungen möglich ist. Eine solche Gerade ermöglicht

den Ausgleich der streuenden C-Werte am besten, und es können optimale Parameter ermittelt werden.

7.2.1.1. AUSWERTUNG VON EINDIMENSIONALEN MIGRATIONSSTRÖMUNGEN

Nachfolgende Verfahren ermöglichen die Identifikation des Dispersionskoeffizienten D und des fiktiven Porenanteils n_f . Sie sind besonders für die Auswertung von Laborversuchen geeignet. Das mathematische Modell für die eindimensionalen Migrationsströmungen lautet:

$$D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = n_o \cdot \frac{\partial C}{\partial t} + wc$$

- C - Konzentration
- v_x - Filtrationsgeschwindigkeit
- D - Dispersionskoeffizient
- n_o - durchströmbarer Porenanteil
- wc - innere Stoffquellen und -senken

Bildet man aus dem durchströmbaren Porenanteil und den inneren Stoffquellen und -senken den sogenannten fiktiven Porenanteil n_f , dann erhält man

$$D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = n_f \cdot \frac{\partial C}{\partial t}$$

Mit der normierten Konzentration C^*

$$C^* = \frac{C - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}}$$

und unter Voraussetzung einer kontinuierlichen konstanten Tracerinjektion lautet die Näherungslösung

$$C^* = 0,5 \cdot \operatorname{erfc}(z)$$

$$\text{mit } z = \frac{x - (v_x/n_f) \cdot t}{2 \sqrt{(D/n_f) \cdot t}}$$

Anwendung der Impulsantwortfunktion

Die dargestellte Näherungslösung kann als Sprungantwortfunktion des Systems erfaßt werden. Ihre Differentiation führt auf die Impulsantwortfunktion. Durch Faltung der Inputfunktion mit der Impulsantwortfunktion erhält man mit

$$V_0 = Q \cdot \Delta t, C(x, t_{0,5}) = C_{\max} \text{ und } v_x = Q/A$$

die Outputfunktion des Systems

$$D = \frac{V_0^2 \cdot C_0^2}{4 \pi \cdot A^2 \cdot C_{\max}^2 \cdot t_{0,5} \cdot n_f}$$

C_0 - Konzentration der injizierten Tracerlösung

V_0 - Volumen der injizierten Tracerlösung

A - durchströmte Querschnittsfläche (Durchflußquerschnitt)

Die Beziehung zur Ermittlung von n_f lautet:

$$n_f = \frac{v_x \cdot t_{0,5}}{x}$$

Parameterbestimmung mit dem Wahrscheinlichkeitsnetz

Das Verfahren der Parameterbestimmung mit dem Wahrscheinlichkeitsnetz enthält einen Geradenausgleich zur Mittlung der streuenden C-Werte. Ausgangspunkt ist auch hier die Näherungslösung. Der Grundgedanke des Verfahrens ist die Ausnutzung der Analogie des Komplements der GAUSS'schen Fehlerfunktion $\text{erfc}(z)$ und der standardisierten Normalverteilung $\phi(0,1)$. Weiterhin kann die Abhängigkeit von $\lg(z)$ von $\lg(t)$ als nahezu linear angenommen werden.

Die Analogie zwischen der Näherungslösung und der standardisierten Normalverteilung läßt sich folgendermaßen darstellen:

$$\begin{aligned} 0,5 \text{ erfc}(z) &= 1 - \phi(\tau) \\ &= 1 - \phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right) \end{aligned}$$

Daraus folgen die Parameter der Normalverteilung

$$\text{Erwartungswert: } \mu = (v_x/n_f) \cdot t$$

$$\text{Standardabweichung: } \sigma = 2 \sqrt{(D/n_f) \cdot t}$$

Die Wertepaare (C^* , $\lg t$) werden in einem Wahrscheinlichkeitsnetzdruck aufgetragen und durch eine Gerade ausgeglichen (Abb. 4).

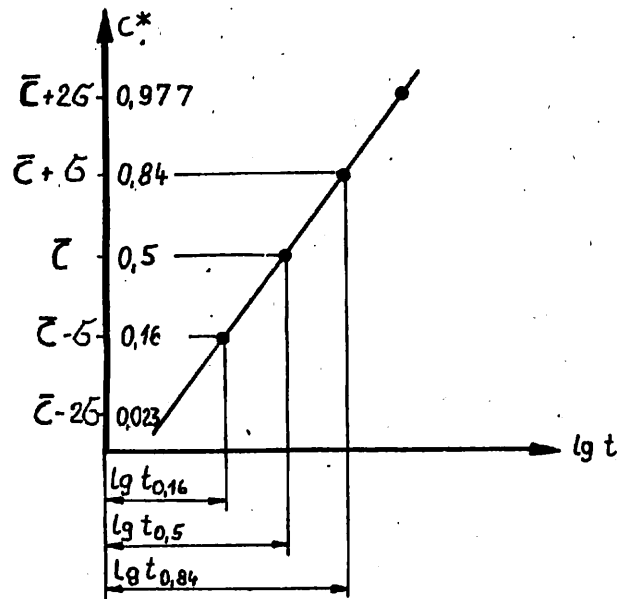


Abb. 4 Parameterbestimmung mittels Wahrscheinlichkeitsnetz

Der fiktive Porenanteil n_f ergibt sich für $\tau = 0$ zu:

$$n_f = v_x \cdot t_{0,50}/x$$

Für die Ermittlung von D benutzt man zwei beliebige Punkte der Ausgleichsgeraden (zweckmäßig $\tau = -1$ und $\tau = 1$, da diese auf dem Wahrscheinlichkeitsnetzdruck markiert sind).

Es ergibt sich nach Umstellung folgende Bestimmungsgleichung für D :

$$D = \frac{1}{16} \cdot n_f \cdot \left[\frac{x - (v_x / n_f) \cdot t_{0,16}}{\sqrt{t_{0,16}}} - \frac{x - (v_x / n_f) \cdot t_{0,84}}{\sqrt{t_{0,84}}} \right]^2$$

Parameterbestimmung mit der inversen Fehlerfunktion

Die Größe z wird durch Bildung der Umkehrfunktion $z = \inf \operatorname{erfc}(2 C^*)$ unter Benutzung der graphischen Darstellung der Funktion $2 C^* = \operatorname{erfc}(z)$ ermittelt (Abb. 5).

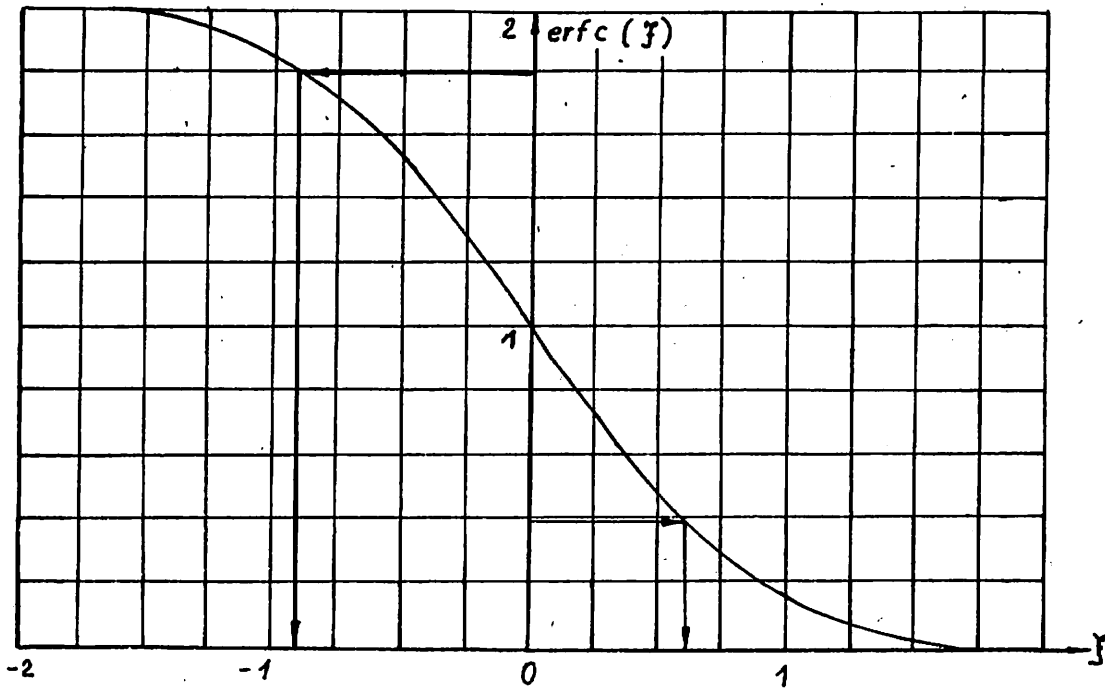


Abb. 5 Darstellung der Funktion $\text{erfc}(z)$

Nachfolgende Gleichung beschreibt die lineare Abhängigkeit von z und der Zeit t

$$z \sqrt{t} = 0,5 \sqrt{\frac{n_f}{D}} \left(x - \left(\frac{v_x}{n_f} \right) \cdot t \right)$$

Die aufgetragene Punkteschar $z \sqrt{t}$ als Funktion von t wird durch eine Gerade ausgeglichen (Abb. 6).

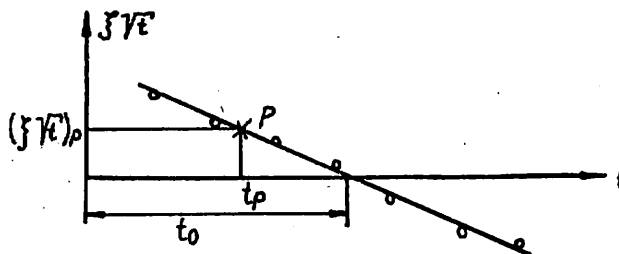


Abb. 6 Graphische Auswertung mittels inverser Fehlerfunktion

Mit dem Zeitwert t_0 lässt sich der fiktive Porenanteil bestimmen

$$n_f = (v_x \cdot t_0) / x$$

Die Bestimmung von D kann aus einem beliebigen Punkt der Geraden erfolgen

$$D = 0,25 \cdot n_f \left(\frac{x - (v_x/n_f) \cdot t_p}{(z \cdot \sqrt{t})_p} \right)^2$$

7.2.1.2. AUSWERTUNG VON PUMPTRACERVERSUCHEN

Die Auswerteverfahren gelten für einen Versuchsbrunnen mit ein oder mehreren GWBR und konstanten Tracereintrag über die gesamte Versuchsdauer. Es kann grundsätzlich zwischen einer räumlichen Auswertung, wo zu gleichen Meßzeiten t_M die Meßwerte an verschiedenen Orten r_i , und einer zeitlichen Auswertung, wo man die Meßwerte an einem Ort r_M zu verschiedenen Zeiten t_j betrachtet, unterschieden werden.

Alle existierenden analytischen Lösungen haben prinzipiell den gleichen Aufbau:

$$\bar{C} = 0,5 \cdot \operatorname{erfc} \frac{\frac{r^2}{2} - \frac{Q \cdot t}{2 \pi \cdot H \cdot n_f}}{\sqrt{\frac{4}{3} \delta \cdot r_F^3}}$$

$$r_F = \sqrt{\frac{Q \cdot t}{\pi \cdot H \cdot n_f}}$$

C - Stoffkonzentration

r - radiale Koordinate

t - Zeit

δ - Dispersivität

n_f - fiktiver Porenanteil

H - GW-Mächtigkeit

Q - Fördermenge

Räumliche Auswertung

In einem Wahrscheinlichkeitsnetz, bei dem die Abszisse linear und die Ordinate nach dem Gauss'schen Fehlerintegral geteilt sind, bilden die Meßwerte (\bar{C}_i, r_i^2) für einen Meßpunkt t_M eine Gerade.

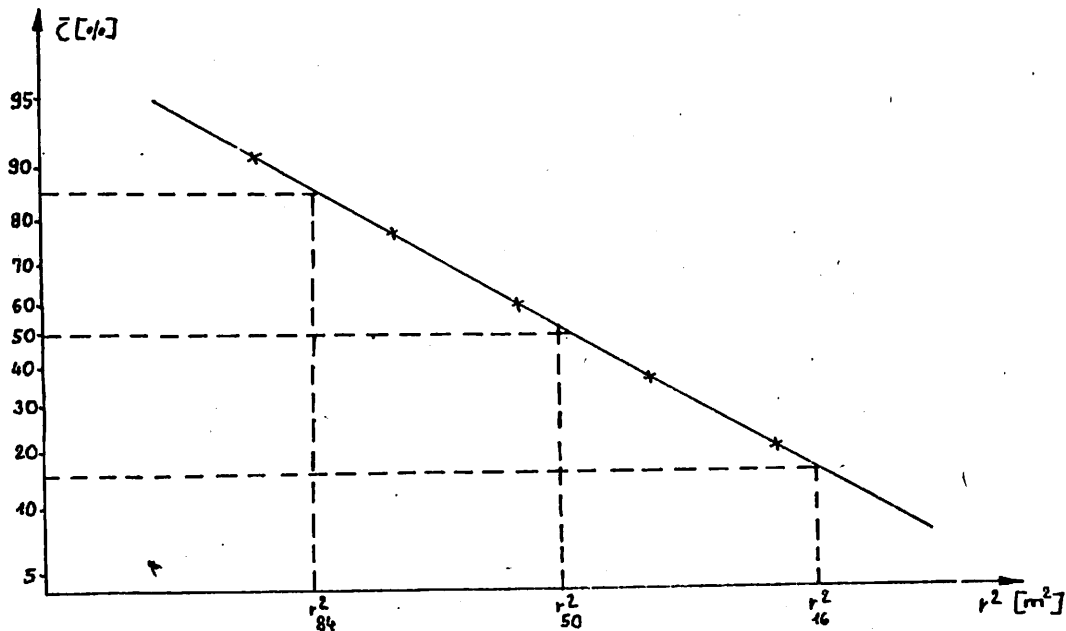


Abb. 7 Graphische Auswertung eines Pump-TV (räumlich)

Die gesuchten Parameter δ und n_f ergeben sich aus den Größen r_{84}^2 , r_{50}^2 und r_{16}^2 .

$$\delta = \frac{(r_{0,16}^2 - r_{0,84}^2)^2 \cdot 3}{\left(\frac{Q \cdot t_M}{\pi \cdot H \cdot n_f}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot 64} ; n_f = \frac{Q \cdot t_M}{\pi \cdot H \cdot r_{0,50}^2}$$

Zeitliche Auswertung

Dieser Fall hat für die Auswertung von Pumptracerversuchen deshalb eine große Bedeutung, da die Zahl der Grundwasserbeobachtungsrohre häufig für eine räumliche Auswertung nicht ausreicht. Die Wertepaare $(\bar{c}, \lg t)$ bilden in einem Wahrscheinlichkeitsnetzdruck meist eine Gerade, da der Logarithmus des Arguments der Funktion erfc im interessierenden Bereich praktisch linear von t abhängt.

Die gesuchten Parameter δ und n_f können mit den Größen t_{16} , t_{50} und t_{84} ermittelt werden.

$$\delta = \frac{\left(\frac{Q \cdot t_{0,84} - Q \cdot t_{0,16}}{2 \pi \cdot H \cdot n_f} \right)^2 \cdot 3}{\left(\frac{Q \cdot t_{0,5}}{\pi \cdot H \cdot n_f} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot 16}$$

$$n_f = \frac{Q \cdot t_{0,5}}{\pi \cdot H \cdot r^2}$$

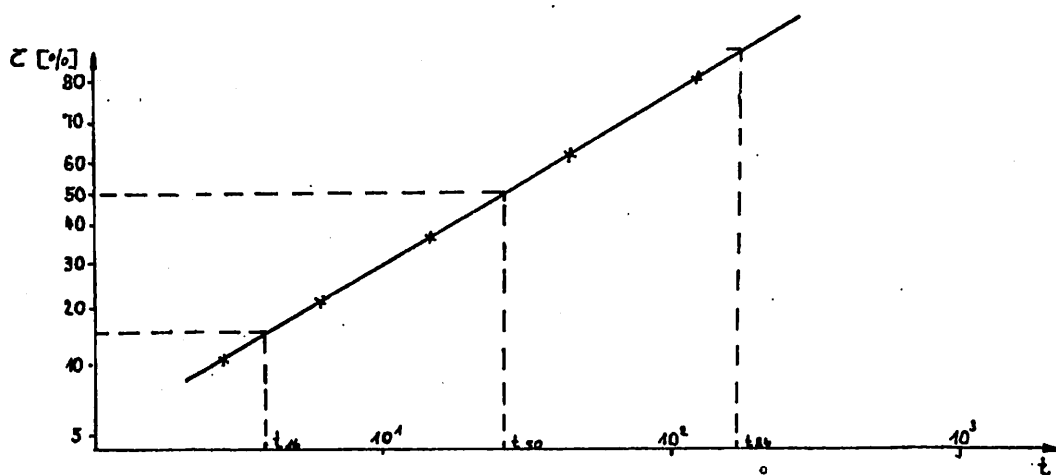


Abb. 8 Graphische Auswertung eines Pump-TV (zeitlich)

7.2.2. DIGITALE AUSWERTUNG VON TRACERVERSUCHEN

7.2.2.1. DIGITALE AUSWERTUNG VON PUMPTRACERVERSUCHEN

Auf Grund der guten Erfahrungen bei der Anwendung der digitalen Verfahren zur Ermittlung von geohydraulischen Parametern wird dieses Verfahren auch bei der Auswertung von Pumptracerversuchen eingesetzt. Als freie Parameter lassen sich die Dispersivität δ und der fiktive Porenanteil n_f suchen, die als unabhängige Größen gleichzeitig bestimmbar sind.

Das Lösungsprinzip ist Abb. 9 zu entnehmen. Die während des Optimierungprozesses benötigte Gütefunktion wird aus der Summe der quadratischen Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Konzentrationswerten zu beliebigen Zeiten an unterschiedlichen Stellen des Grundwasserleiters berechnet. Die Vorteile der digitalen Parameteridentifikation liegen in folgenden Punkten:

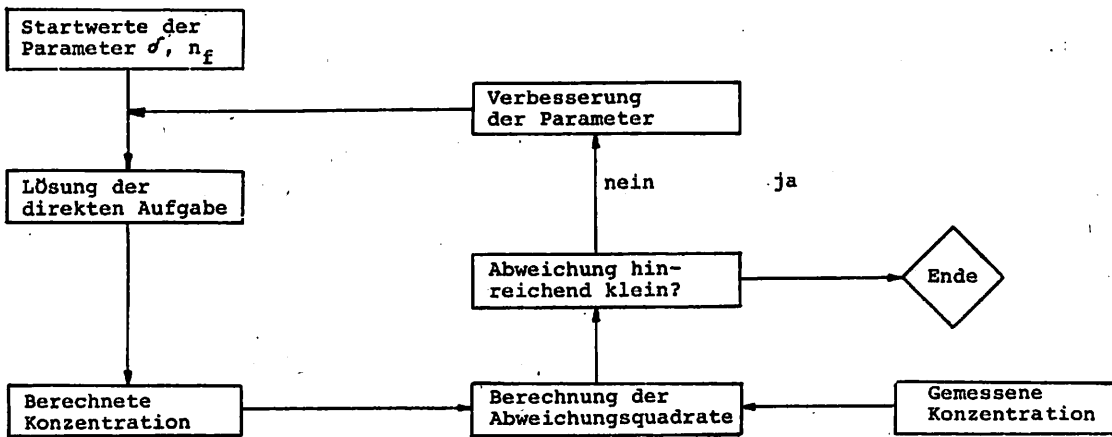


Abb. 9 Lösungsprinzip der Parameterbestimmung

- Ausnutzung der zeitlichen Superposition.
- Notwendigkeit der Erzeugung von Durchbruchkurven entfällt.
- Objektivierung der Auswertung.
- Ermittlung des repräsentativen Parametersatzes durch gleichzeitige Berücksichtigung aller Meßstellen, so daß eine räumlich-zeitliche Auswertung aller existierenden Meßwerte erfolgen kann.

Zur digitalen Parameteridentifikation von Pumptracerversuchen wurde das Rechenprogramm GVP1 geschaffen.

Als Eingangsdaten sind folgende Werte bereitzustellen:

- mittlere Grundwassermächtigkeit,
- Brunnenkoordinaten,
- Förderstrom der einzelnen Brunnen,
- Koordinaten der Tracer-Meßstellen,
- gemessene Konzentrationsverläufe an den Tracer-Meßstellen,
- Anfangsschätzwerte der gesuchten Parameter,
- obere und untere Grenzwerte für die Parameter.

7.2.2.2. DIGITALE AUSWERTUNG VON EINDIMENSIONALEN MIGRATIONS-STRÖMUNGEN

Das Programm TRIDE/BC dient zur Ermittlung von Stofftransportparametern sowohl aus Laborversuchen an durchströmten Erdstoffsäulen als auch anhand von im Feld gemessenen Daten durch Parameteridentifikation. Es können dabei zeitlich veränderliche Randbedingungen sowie örtlich veränderliche Parameter berücksichtigt werden. Die gemessenen Konzentrationen von maximal zwei Stoffkomponenten in maximal fünf diskreten Ortspunkten mit bis zu sieben Meßzeiten können zur Identifikation verwendet werden.

Das Programm wurde für den Rechner BC A5120 unter Nutzung des Betriebssystems UDOS erstellt.

Die Simulation der Grundaufgabe basiert auf einer analytischen Lösung der Strömungsdifferentialgleichung. Als Suchalgorithmus dient ein Gradientenverfahren 1. Ordnung.

Im Programm TRIDE/BC ist prinzipiell die Identifikation folgender Parameter möglich, wobei auf Eindeutigkeitskriterien Rücksicht genommen werden muß:

- Dispersivität (δ)
- Filtrationsgeschwindigkeit $t = 0, x = 0$ (v_0)
- Grundwasserneubildungsrate (v_N)
- Vertikale Abströmung (v_A)
- GW-Mächtigkeit (H)
- Durchströmbarer Porenanteil (n_0)
- Sickerzeit durch Deckschicht (DTS)
- Retardationsfaktor (R) (linearer Sorptionskoeffizient)
- Nichtlineare Sorptionskoeffizienten entsprechend der LANGMUIR-Isotherme (F_M, F_B)
- Nichtlineare Abbaukoeffizienten entsprechend der MICHAELIS-MENTEN-Kinetik (B_M, B_B)

Generell ist zur Verwendung des Programms TRIDE zu bemerken, daß die geringe Anzahl von zu berücksichtigenden zeitlichen Stützstellen eine ausreichend genaue Beschreibung von Konzentrationsverläufen bei komplizierten zeitlichen Verläufen der Randkonzentration nicht zuläßt, so daß in diesen Fällen keine optimalen Parameter identifizierbar sind. Es können nur solche Versuche ausgewertet werden,

deren Randkonzentrationsverläufe maximal zwei zeitliche Stützstellen aufweisen. Eine gemeinsame Identifikation ist nicht für alle Parameter möglich. Der durchströmte Porenanteil n_o hat auf die Lösung den gleichen Einfluß wie der lineare Sorptionskoeffizient R bzw. die nichtlinearen Sorptionskoeffizienten F_m und F_b . Es wird also immer das Produkt $n_o \cdot R$ bzw. ein Produkt von n_o und dem Term, der den Einfluß von F_m und F_b ausdrückt, identifiziert.

Es empfiehlt sich daher, den Porenanteil als abschätzbare Größe konstant zu halten und die Sorptionsgrößen zu identifizieren. Für den Fall, daß nach dem linearen Sorptionsansatz gerechnet wird, müssen F_m , F_b , B_b und B_m Null gesetzt werden, im Falle des nichtlinearen Sorptionsansatzes ist R der Wert Eins zuzuordnen. Die Dispersivität δ kann gemeinsam mit den jeweiligen Sorptionsgrößen ermittelt werden. Allerdings ist im allgemeinen der Einfluß der Dispersivität gering im Vergleich zu dem der Sorption, so daß die Dispersivität in gesonderten Programmläufen mit konstanten Sorptionsgrößen identifiziert werden sollte.

Folgende Voraussetzungen für den Einsatz des Programms TRIDE/BC bezüglich der durchzuführenden Messungen sind erforderlich:

- Ausgrenzung einer Strombahn anhand der Grundwasserdynamik (eindimensionaler Stofftransport),
- Anordnung von Meßstellen entlang dieser Strombahn (bei bekannter Randkonzentration mindestens eine Meßstelle, ansonsten zwei, da in diesem Fall die Konzentration an der Meßlokation eins als Inputkonzentration genutzt werden kann),
- Möglichst keine Brunnen als Meßstellen (fördernde Brunnen führen zu einer rotationssymmetrischen Anströmung und zu veränderten Strömungsgeschwindigkeiten),
- Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit aus der Grundwasserdynamik,
- Aufnahme von Meßreihen der Konzentration in Abhängigkeit von Ort und Zeit (eine größere Anzahl von zeitlichen Stützstellen erlaubt ein genaueres Nachvollziehen des Konzentrationsverlaufes).

8. LITERATUR

- / 1 / Ausgewählte Methoden der Wasseruntersuchung.
 Bd. I Chemische, physikalisch-chemische, physikalische
 und elektrochemische Methoden.
 Bd. II Biologische, mikrobiologische und toxikologische
 Methoden.
 VEB Gustav Fischer Verlag Jena, 2. Aufl., 1985 und 1982

- / 2 / Beiträge über hydrogeologische Tracermethoden und ihre Anwendungen.
Gesellsch. f. Strahlen- und Umweltforschung, München,
GSF-Ber. R 290, 4 (1982), 475 S. (ISSN 0721-1694)
- / 3 / Radioaktive und stabile Isotope und ihre Anwendung in den Geowissenschaften, in der Bergbausicherheit und im Umweltschutz. - (Vorträge des internat. Isotopenkolloquiums 1979 in Freiberg).
Teil I und II, Freiburger Forschungsh. C 355 und C 360 (1981)
- / 4 / Zur Tracertechnik mit dem stabilen Stickstoffisotop.
Prospekt: VEB Statron, Fürstenwalde, 1974
- / 5 / ADAM, C.; PETSCHER, M.; KÖRNER, W.
Empfehlungen zur hydrogeologischen Begutachtung der Standorte von Kernanlagen im Rahmen des Strahlenschutz-Genehmigungsverfahrens.
SAAS-328 (1985)
- / 6 / BEIMS, U.
Planung, Durchführung und Auswertung von Gütepumpversuchen.
Z. Angew. Geol. 29 (1983) 10, 482
- / 7 / BEIMS, U.; MANSEL, H.
Assessment of groundwater resources by computer-aided designed and operated pumping tests.
(International Symposium on Groundwater Monitoring and Management, 23 - 28 March 1987, Dresden).
Herausgeber: Inst. f. Wasserwirtschaft, Berlin 1987
- / 8 / BERTSCH, W.
Die Koeffizienten der longitudinalen und transversalen hydrodynamischen Dispersion - ein Literaturüberblick.
Dt. Gewässerkundl. Mitt. 22 (1978) 2, 36
- / 9 / BEYER, W.
Die Erfassung von GW-Fließvorgängen mittels Farbstoffen in Verbindung mit Pumpversuchen.
Z. Angew. Geol. 10 (1964) 6, 295
- / 10 / BUSCH, W.; JUNG, W.
Über die Anwendung von Markierungsstoffen zur Verfolgung unterirdischer Wässer. (Tagung in Graz vom 28.3. bis 1.4. 1966).
Z. Angew. Geol. 12 (1966) 9, 496
- / 11 / BUSCH, K.F.; LUCKNER, L.
Geohydraulik.
VEB Dt. Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1972
- / 12 / FRÖHLICH, K.; HEBERT, D.; HERRMANN, D.
Untersuchungen zur Hydraulik der Uferfiltration mit Hilfe von Tritiumanalysen.
WWT 29 (1979) 1, 30

- / 13 / FRÖHLICH, K.; JORDAN, H.; HEBERT, D.
Radioaktive Umweltisotope in der Hydrogeologie. - Ein
Beitrag zur Isotopenhydrogeologie.
Freiberger Forschungsh. C 330 (1977)
- / 14 / HÄFNER, F.; SCHOLZ, P.; SCHWAN, M.
Ermittlung von Stofftransporteigenschaften von GW-Leitern
durch Umweltnuklide.
Z. Angew. Geol. 29 (1983) 11, 532
- / 15 / HEBERT, D.; FRÖHLICH, K.; JORDAN, H. u.a.
Zur kombinierten Anwendung natürlicher und künstlicher
Radionuklide in der Hydrogeologie.
Neue Bergbautechnik, Leipzig 13 (1983) 1, 8
- / 16 / HEBERT, D.; JORDAN, H.; FRÖHLICH, K.
Kombinierte Tritium- und ¹⁴C-Untersuchungen an Wässern
eines klüftig-porösen GW-Leiters.
Z. Angew. Geol. 23 (1977) 11, 571
- / 17 / JORDAN, H.; FRÖHLICH, K.
Isotope in der Hydrogeologie.
Freiberger Forschungsh. C 355 (1981) 107
- / 18 / JORDAN, H.; FRÖHLICH, K.; HEBERT, D.
Zum Kontaminationsschutz von GW-Lagerstätten mit Hilfe
natürlicher Radionuklide.
Z. Angew. Geol. 25 (1979) 6, 252
- / 19 / KÄSS, W.
Die unmittelbare Bestimmung von Uranin-Spuren bei Färb-
versuchen.
Steir. Beitr. Hydrogeol. 1964, 37
- / 20 / KLOTZ, D.
Abhängigkeit der longitudinalen Dispersion von Parametern
des Grundwassers und des GW-Leiters (in: Beiträge über
hydrogeol. Tracermethoden und ihre Anwendung).
GSF-Ber. R 290, 4 (1982) 309
- / 21 / KLOTZ, D.; RAUERT, W.; SEILER, K.P. u.a.
Beiträge über hydrogeologische Tracermethoden und ihre
Anwendung.
GSF-Ber. R 290, 4 (1982)
- / 22 / KRÄTZSCHMAR, H.L.
Beitrag zur Bestimmung der GW-Fließgeschwindigkeit und
-richtung.
Nationalkomitee für Geodäsie und Geophysik der DDR,
AdW Berlin (1966)
- / 23 / KRÄTZSCHMAR, H.L.; RICHTER, W.
Eine neue Meßmethode zur Bestimmung der GW-Fließrichtung.
Wiss. Z., TU Dresden 12 (1963) 6, 1767
- / 24 / LIEBISCH, K.; REMUS, W.
Hydrogeologische Ergebnisse mit Färbversuchen im
Kupferschieferbergbau der Mansfelder Mulde.
Z. Angew. Geol. 12 (1966) 9, 486

- / 25 / LUCKNER, L.; SCHESTAKOW, W.M.
Migrationsprozesse im Boden- und Grundwasserbereich.
VEB Dt. Verlag f. Grundstoffindustrie, Leipzig 1987
- / 26 / MANSEL, H.
Beitrag zur mathematischen Modellbildung und digitalen
Simulation rotationssymmetrischer Migrationsprozesse
unter besonderer Berücksichtigung der Ermittlung von
Migrationsparametern durch Gütepumpversuche.
Diss. A, Techn. Universität Dresden 1987
- / 27 / MONEV, E.
Isotope als Tracer in der Hydrogeologie.
Freiberger Forschungsh. C 355 (1981) 117
- / 28 / SCHÜTZE, H.; FRÖHLICH, K.
Zu einigen Tendenzen der Entwicklung der Isotopenforschung
unter dem Aspekt ihrer geowissenschaftlichen Nutzung.
Freiberger Forschungsh. C 355 (1981) 159
- / 29 / SWANSSON, I.L.
Organic complexant - enhanced mobility of toxic elements
in low-level wastes.
INIS 16: 053934 (Kurzfassung INIS 16: 045568)
- / 30 / VOIGT, H.D.; HÄFNER, F.
Grundlagen des Stoff- und Wärmetransportes in porösen
Schichten.
Z. Angew. Geol. 29 (1983) 9, 419
- / 31 / WETZEL, A.
Technische Hydrobiologie.
Akadem. Verlagsges. Geest und Portig KG., Leipzig 1969

GBL. I 1984 Nr. 30, S. 341

Verordnung über die Gewährleistung von Atomsicherheit und Strahlen-
schutz (VOAS) vom 11. 10. 1984

- TGL 23864 Hydrogeologie; Pumpversuche;
/02 Vorbereitung und Durchführung
/03 bis 09 Geohydraulische Auswertung ...
/10 Demonstrativpumpversuch, quantitativ
- TGL 23979 Hydrogeologie; Probenahme von Grund- und Ober-
flächenwasser
- TGL 23989 Unterirdisches Wasser; Terminologie, Formel-
zeichen und Einheiten
- TGL 24408 Geologie; Aufschluß- und Analysendokumentation;
/04 Vorbereitung von Aufschlußarbeiten und Tests
/05 Schichtenverzeichnis Bohrungen
- TGL 25011/01 Hydrogeologie; Hydrogeologische Arbeiten;
Projekt, geologischer Teil
- TGL 35818/05 GW-Beobachtung; GW-Meßstelle und -Meßtechnik
- TGL 42316 Nutzung und Schutz des Bodens; Bodenverunrei-
nigung; Allgemeine Forderungen an die Entnahme
von Bodenproben
- WAPRO 1.42. (Werkstandard VEB PROWA Halle) Bemessungsgrund-
lagen für Brunnen von GW-Gewinnungsanlagen