

Der Einsatz von Tracermethoden in komplexen Molasseaquiferen

The Application of Tracer Methods to Complex Molasse Aquifers

H. R. WERNLI¹⁾ & Ch. LEIBUNDGUT²⁾

Inhalt

	Seite
1. Einleitung und Zielsetzung	174
2. Besondere Merkmale der Tracermethodik in Molassegebieten.....	174
2.1. Einspeisung von Tracern in die ungesättigte Zone.....	174
2.2. Zur Auswertung von Tracerversuchen	175
2.3. Die Eignung künstlicher Tracer für Versuche in der Molasse	176
2.4. Die Wasserbeschaffenheit als natürlicher Tracer	177
3. Fallbeispiel Luterbachtal.....	180
3.1. Vorerkundung mit natürlichen Tracern	180
3.2. Markierversuche	184
3.3. Vergleich der Markierversuchsergebnisse mit Pumpversuchen.....	187
3.4. Die Wasserzirkulation in der Molasse von Luterbach.....	188
4. Schlußfolgerungen.....	189
Zusammenfassung	190
Literatur.....	190
Summary	191

¹⁾ Dr. H. R. WERNLI, Geographisches Institut, Universität Bern, Hallerstraße 12, CH-3012 Bern.

²⁾ Prof. Dr. Ch. LEIBUNDGUT, Lehrstuhl für Hydrologie der Universität Freiburg i. Br., Werdering 4, D-79098 Freiburg.

1. Einleitung und Zielsetzung

Die schweizerische Molassehügelzone zwischen dem tieferen Mittelland und den Voralpen liegt im Mittel auf einer Höhe zwischen rund 600 und 1400 m ü.M.. Dieser Teil der Molasse hat keine tektonische Aufschiebung erfahren und gehört deshalb noch zur sogenannten flachliegenden mittelländischen Molasse. Im Raum Bern liegt die Hügelzone mehrheitlich in der oberen Meeresmolasse. Diese besteht aus tertiären Sandsteinen, durchsetzt mit Nagelfluh und Mergelbändern. Darüber folgt, im Mittel ab etwa 700–800 m, die obere Süßwassermolasse. Gegen NE zu treten die einzelnen Stufen in zunehmend tieferen Lagen auf.

Hydrogeologisch wird die Molassehügelzone in der Regel dem Kluftgrundwasserbereich zugerechnet. Als klassische Vorstellung, nicht nur für die schweizerische Molasse, gilt das im Sandstein versickernde Niederschlagswasser, welches durch kleinste tektonisch angelegte Klüfte langsam in die Tiefe sickert, auf einer stauenden Schicht eine gesättigte Zone bildet und schließlich als Quellwasser horizontal wieder aussickert. Die Gletscher der letzten Eiszeit haben aber auch in Molassegebieten Lockermaterial in Form von Moränen und glaziofluvialen Talfüllungen hinterlassen, was die hydrogeologische Realität wesentlich komplexer gestaltet. Es hat sich außerdem gezeigt, daß am Aquifersystem der eigentlichen Molasse weite, nicht tektonisch angelegte Klüfte maßgeblich beteiligt sind. Es handelt sich um Großklüfte im Dezimeterbereich, entstanden durch das hangparallele Abbrechen oberflächennaher Felskompartimente.

Die Untersuchung eines solchen kleinräumigen Verbundes aus unterschiedlichen Aquiferen erfordert eine breite Methodenpalette. In einem noch unbekanntem Gebiet müssen vorerst Einzugsgebiete und hydrologische Verbindungen nachgewiesen sowie hydrogeologische Grundgrößen bestimmt werden. Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel, die Eignung von natürlichen und künstlichen Tracern zur Entschlüsselung der Grundwasserzirkulation in einem Molassegebiet zu prüfen und gleichzeitig an einem Fallbeispiel den Anteil des nicht in klassischen Kluftaquiferen gespeicherten Wassers zu ermitteln.

2. Besondere Merkmale der Tracermethodik in Molassegebieten

2.1. Einspeisung von Tracern in die ungesättigte Zone

Tracerversuche im Molassehügelgebiet sind im Vergleich zu Versuchen in Poren-aquiferen mit einem Mehraufwand verbunden. Zum Beispiel läßt sich im Kluftbereich die Forderung nach einer Einspeisung in die gesättigte Zone nur selten erfüllen. Mitunter hängt es vom Zufall ab, ob von der Einspeisestelle direkte Verbindungswege zu einer nahe gelegenen Wasserader führen. Über Fels wird man häufig den Tracer in ausgehobene Gräben oder Baggerschlitze eingeben müssen. Lange und möglichst tiefe Gräben sind oft günstiger als die zu punktuellen Bohrlöcher, es sei denn, die Bohrlöcher könnten sehr gezielt über einer wasserführenden Kluft niedergebracht werden. Vor einer Einspeisung ist die Sickerleistung der Einspeisestelle zu prüfen und das Versuchskonzept danach auszurichten. Um einem Steckenbleiben des Tracers entgegenzuwirken, muß **nach der Einspeisung kräftig nachgespült** werden. Dabei ist das Aufschwemmen des Tracers in höhere Bodenzonen zu vermeiden. Einspei-

sungen in die ungesättigte Zone verlangen bis zu zehnmal höhere Tracermassen als in gesättigten Porenaquiferen. Wegen der oft geringen Rückgewinnungsraten von wenigen Prozenten der Einspeisemasse besteht bei zu geringer Tracermasse die Gefahr, daß an der Beprobungsstelle die ersten auftretenden Tracerspuren unter die Nachweisgrenze fallen. Diese ersten Spuren bilden gelegentlich sogar einen quantitativ auswertbaren Tracerteildurchgang, welcher die direkteste Verbindung zur Quelle repräsentiert. Mit hohen Einspeisemassen riskiert man andererseits im Falle eines unerwartet raschen Tracerdurchganges sichtbar markiertes Quellwasser. Im Bereich von Trinkwasserfassungen müssen deshalb Vorkehrungen für das Abkoppeln einzelner Quellen vom Wasserleitungsnetz getroffen werden.

2.2. Zur Auswertung von Tracerversuchen

Für die Auswertung benötigt man ein **Stofftransportmodell**, im einfachsten Fall das Dispersionsmodell. Es beschreibt den nur durch hydromechanische Dispersion beeinflussten Transport eines idealen Tracers. Mit der Vereinfachung für eine Ausbreitung der Tracerwolke nur in der Längsachse (eindimensionales Fließen) lautet die Lösung der Transportgleichung in ihrer normierten Form (P. MALOSZEWSKI, 1985):

$$C_i = C_m \cdot \sqrt{\left(\frac{t_m}{t_i}\right)^3} \cdot \exp \left[\frac{1 - t_m/t_i}{4 \cdot D/(vx) \cdot t_m} \cdot \left(t_0 - \frac{t_m \cdot t_i}{t_0}\right) \right]$$

C_i Konzentration zum Zeitpunkt t_i [ML⁻³],
 C_m Konzentration zum Zeitpunkt t_m [ML⁻³],
 $D/(vx)$ Dispersionsparameter [L²T⁻¹L⁻¹TL⁻¹], mit $v = x/t_0$.

Für die Normierung wird aus der gemessenen Kurve ein beliebiger Zeitpunkt t_m und die zugehörige Konzentration C_m gewählt. Die Normierung macht das Ergebnis unabhängig von der Einspeisemasse. Die Gleichung gilt für ein kanalisiertes Fließsystem, bei dem der Wasserfluß gegen einen Punkt zu konvergiert. Die Auswertung einer Tracerdurchgangskurve erfolgt durch iterative Anpassung der nach obiger Gleichung berechneten Modellkurvenform an die gemessene Kurve, z. B. mit dem **Best Fit Verfahren**.

Anpassungsvariablen sind die mittlere Verweilzeit t_0 und der Dispersionsparameter $D/(vx)$ als Formparameter. D ist der von der Aquiferstruktur und der Fließgeschwindigkeit abhängige longitudinale Dispersionskoeffizient, v die mittlere Fließgeschwindigkeit x/t_0 und x der Abstand. Die beste Anpassung ist dann erreicht, wenn die Summe der Quadrate der Unterschiede zwischen Modellkurve und gemessener Kurve am kleinsten ist.

Zusätzlich zur korngerüstbedingten Dispersion kann der Tracertransport wegen diffusiver Wechselwirkung mit dem kluftbegrenzenden Sandstein verzögert werden. Zur Berechnung müßten die Kluftweiten bekannt sein. In der Praxis lassen sich aber in einem Molassegebiet diese Kluftweiten kaum je für längere Strecken beziffern. Auch Sorptionseffekte können auftreten. Die damit verbundenen Probleme bei der Auswertung können vermindert werden, indem man nur den Hauptteil einer Tracerkurve auswertet und den langen Kurvenauslauf ignoriert. Treten mehrere Teilkurven auf, so wird der erste zusammenhängende Tracerdurchgang ausgewertet.

Bei einer natürlichen Versuchsanlage lassen sich die geforderten Modellbedingungen häufig nicht realisieren. Man muß sich bei der Auswertung dieser Ein-

schränkungen bewußt werden. Eine Einspeisung in die ungesättigte Zone führt in der Regel zu mehrgipfligen Tracerkurven. Bei den in der Molasse häufigen langen Markierversuchen kann die Ursache von Verzerrungen im Tracerdurchgang auch in schwankenden Quellschüttungen liegen. Sie führen in kleinen Aquiferen zu einer Beschleunigung oder Verzögerung des Tracerdurchganges. Die Maximalkonzentration, die Dispersivität α ($= D/v$) und die Tracerrückgewinnung bleiben zwar unverändert, hingegen kann die Anpassung einer einfachen Modellkurve an die verzerrte Meßkurve problematisch werden.

Neben dem Best Fit Verfahren zur Auswertung von Tracerdurchgangskurven sind auch Näherungsverfahren im Gebrauch. Besonders die Näherungslösung über Normalverteilung, das sogenannte Summenlinienverfahren, sowie die Momentenmethode mit Bestimmung des Kurvenschwerpunktes haben sich aber für die Mehrheit der Feldversuche als ungeeignet erwiesen. Ein PC-taugliches Best Fit Programm ist deshalb vorzuziehen.

2.3. Die Eignung künstlicher Tracer für Versuche in der Molasse

Künstliche Tracer sind dem Wasser beigegebene Stoffe, welche im Idealfall die Bewegung des Wassers repräsentieren. Maßgebend für den Erfolg eines Tracerversuches ist eine sorgfältige Vorerkundung des Gebietes sowie die Berücksichtigung der Eigenschaften von Tracern. Wegen ihrer tiefen Nachweisgrenzen und der weitgehenden Absenz in natürlichen Wässern gelangen heute vorwiegend Fluoreszenztracer zum Einsatz. Das früher oft eingesetzte Kochsalz verlangt eine im Vergleich zu Fluoreszenztracern rund 10 000mal höhere Einspeisemasse und ist für Markierungen in der Molasse generell ungeeignet. In Molassegebieten ist die Sorptionsresistenz eines Tracers maßgebendes Kriterium. Dies, weil Sandsteine, Moränen und lockere Kluftverfüllungen in der Regel auch mehr oder weniger große Mergelanteile führen, welche ungeeignete Tracer sorbieren.

Das anionische **Uranin** (Natrium-Fluoreszein) ist wegen seiner allgemein geringen Sorptionsneigung und seiner tiefen Nachweisgrenze auch in der Molasse erste Wahl unter den Tracern. In optisch reinen Molassequellwässern konnten Nachweisgrenzen von 0,5 Nanogramm pro Liter erreicht werden.

Trotz etwas schlechteren Sorptionseigenschaften ist auch das **Eosin** noch geeignet. Bei gleichzeitigem Auftreten zusammen mit Uranin in der gleichen Wasserprobe sind wegen Überlappung der fluoreszenzanalytischen Spektralkurven Trennverfahren nötig. Am einfachsten ist die rechnerische Trennung durch Ausmessen der Spektralkurven (W. KÄSS, 1982). Ist die Eosinkonzentration mehr als etwa 250mal höher als die Uraninkonzentration, so ist die rechnerische Trennung der Tracer nicht mehr möglich. In diesem Falle wird das Eosin durch Belichten der Probe zerstört, durch Ansäuern auf pH 4 wird die sonst hohe Lichtempfindlichkeit des Uranins stark vermindert (H. BEHRENS, 1982). Bei der üblichen großen Probenzahl bringt dieses Trennverfahren trotz seiner Einfachheit in der Routineanalytik einen erheblichen Mehraufwand. Gegenüber der Direktmessung einer Probe mit nur einem Tracer haben alle bei Tracergemischen nötigen Trennverfahren den Nachteil eines größeren Analysenfehlers. Man versuche deshalb, das gleichzeitige Auftreten der beiden Tracer durch eine entsprechende Versuchsplanung zu vermeiden. Beim Eosin wurde bei zwei Markierversuchen in der Molasse eine Fluoreszenzverschiebung gegen tiefere Wellenlängen zu beobachtet. Das neue Fluoreszenzmaximum lag bei

530–533 statt bei 537 Nanometern. Traceranalysen mit Fluoreszenzspektrometern sollen deshalb mit dem Doppelscanningverfahren durchgeführt werden. Messungen mit fest eingestellten Anregungs- und Fluoreszenzemissions-Wellenlängen sind ungeeignet.

Das **Naphthionat** (Naphthionsäure Natriumsalz, 1-Naphthylamin-4-sulfonsäure Na-Salz) ist erst 1986 als hydrologischer Tracer vorgeschlagen worden, hat aber seitdem in der hydrogeologischen Praxis eine rasche Verbreitung gefunden (H. R. WERNLI, 1986). Leider werden die Eigenschaften des Naphthionates oft zu wenig beachtet, was unnötig zu unsicheren Ergebnissen führt. Naphthionat fluoresziert im Blaubereich, hier ist je nach optischer Reinheit des Wassers mit einem mehr oder weniger hohen analytischen Meßuntergrund zu rechnen. Aus diesem Grunde besitzt Naphthionat eine hohe Nachweisgrenze von 0,2–1 mg/m³ und es müssen im Vergleich zu Uranin etwa 10–20mal höhere Massen eingespeist werden. Naphthionat eignet sich hauptsächlich für fassungsnahe Markierungen. Bis etwa 300 m kommt man noch mit 25 kg aus. Uranin und Eosin können dann für die größeren Distanzen reserviert werden. Nur bei sehr gut durchlässigen Aquiferen mit Durchlässigkeiten ab etwa 10⁻² m/s eignet sich das Naphthionat auch für größere Distanzen. Für Einspeisungen in die ungesättigte Zone über schlecht durchlässigen Aquiferen muß vom Naphthionat abgeraten werden. Die bisherigen Erfahrungen haben gezeigt, daß Naphthionat im Feldeinsatz vermutlich einer irreversiblen Sorption oder einem chemischen Abbau unterliegt (Ch. LEIBUNDGUT & H. R. WERNLI, 1986). Dies verfälscht eine normierte Tracerdurchgangskurve nicht, vermindert aber die in der Molasse ohnehin geringe Rückgewinnung. Batchversuche mit mergeligem Molassesand zeigten für das Naphthionat eine fast so gute Sorptionsresistenz wie für das Uranin.

Mit **Pyranin** liegen wenig Felderfahrungen vor. Batchversuche in Molassesand ergaben konzentrationsabhängige Sorptionseigenschaften. Zudem ist der Nachweis kleiner Pyraninkonzentrationen in Gegenwart von Uranin nicht unproblematisch. Gegen den Einsatz des relativ teuren Pyranins in der Molasse bestehen deshalb Vorbehalte.

Stoffe aus der Gruppe der kationischen **Rhodamine** werden gelegentlich immer noch für Markierversuche im Grundwasser verwendet. Besonders das Rhodamin B ist jedoch wegen seiner schlechten Sorptionseigenschaften für diesen Zweck völlig ungeeignet. Eine Ausnahme bilden die offenen Wasserwege des Karstes. Beim Amidorhodamin und beim Sulphorhodamin B (Duasynsäure Rhodamin B 01) dürfen einzelne positive Anwendungsbeispiele nicht darüber hinwegtäuschen, daß auch diese Tracer wegen ihrer Sorptionsneigung für quantitative Versuche kaum geeignet sind. Für das schwierige Gebiet der Molasse und besonders für die ungesättigte Zone wird deshalb von den Rhodaminen grundsätzlich abgeraten.

2.4. Die Wasserbeschaffenheit als natürlicher Tracer

Im Gegensatz zu künstlichen Tracern, mit denen konkrete einzelne hydrologische Verbindungen nachgewiesen und untersucht werden, geben natürliche Tracer allgemeinere Hinweise auf die Art und Lage eines Einzugsgebietes. Natürliche Tracer vermitteln verschlüsselte Botschaften über den Lebenslauf des Wassers. Besonders bei Mischwässern mit Wasseranteilen unterschiedlicher Herkunft lassen sich die

aussagekräftigen Parameter nicht immer zum Voraus festlegen. Man darf deshalb das Untersuchungsprogramm nicht schon zu Beginn zu stark einschränken, selbst auf das Risiko hin, daß einige Parameter später nur Datenfriedhöfe füllen. Zumindest die wichtigsten Parameter der Wasserbeschaffenheit sollten regelmäßig erfaßt werden. Es sind dies Schüttung oder Pumpleistung, Temperatur, elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert, Calcium, Magnesium, Hydrogenkarbonat, Chlorid, Nitrat, Sulfat sowie Verschmutzungsindikatoren. Über die Aussagekraft weiterer Parameter muß anhand von Stichproben entschieden werden. Tabelle 1 gibt einige Beispiele erfolgreicher Anwendung natürlicher Tracer in der bernischen Molassehügelzone.

Der **Temperaturverlauf** eines Quellwassers oder Bodens läßt sich mit einer Temperaturfunktion beschreiben (E. G. GRÖBER, 1955). Die Amplitude der Temperatur nimmt mit zunehmender Tiefe exponentiell ab, hingegen nimmt die Phasenverschiebung gegenüber dem erdoberflächennahen Temperaturverlauf linear zu. Da sich ab etwa 10 m Tiefe wegen der zunehmend flacheren Temperaturganglinie die Phasenverschiebung nicht mehr genügend genau bestimmen läßt, wird im Folgenden nur auf die **Amplitude** eingegangen. Für die Amplitude reduziert sich die Temperaturgleichung auf:

$$A(z_2) = A(z_1) \cdot \exp(-z\sqrt{\omega/2a})$$

$A(z_2)$ Amplitude in der Tiefe z_2 [°C],

$A(z_1)$ gemessene Amplitude in einer Bezugs Tiefe z_1 [°C],

a Temperaturleitzahl [m²/d],

ω Eigenkreisfrequenz der Jahresschwingung, = $2\pi/365$ [d].

Im Luterbachtal erwies sich eine Temperaturleitfähigkeit von 0,18 m²/d (= 0,0208 cm²/s) als optimal für die Anpassung der berechneten an die gemessene Temperaturamplitude von Quellwässern bekannter Tiefe. Da bei kleinen Molassequellen ein Grundwasserkörper von geringer Mächtigkeit angenommen werden darf, entspricht die angegebene Temperaturleitzahl jener der Überwasserzone.

Tab. 1: Natürliche Tracer zur hydrogeologischen Untersuchung von Molassegebieten.

Parameter	Hinweis auf	Anwendung
Nitrat und Chlorid	Wald oder landwirtschaftliche Einflüsse	Lage von Quelleinzugsgebieten
Calciumanteil an der Gesamthärte	Porengrundwasser oder Molassegrundwasser	Aquifertyp
Jahresmittel der Temperatur	Wald oder Freiland	Lage von Quelleinzugsgebieten
Temperaturamplitude	Tiefenlage des Aquifers, besonders quellnah	Speicherlokalisierung, Deckschichtmächtigkeit
Quellschüttungsverhalten	Speichergröße, Verknüpfung einzelner Speicherelemente	Speichercharakterisierung, Abflußmodellierung
Tritium ³ H	Mittleres Alter des Wassers, Speichergröße	Speichercharakterisierung
Sauerstoffisotop ¹⁸ O	Mittlere Höhenlage des Einzugsgebietes	Lage von Quelleinzugsgebieten

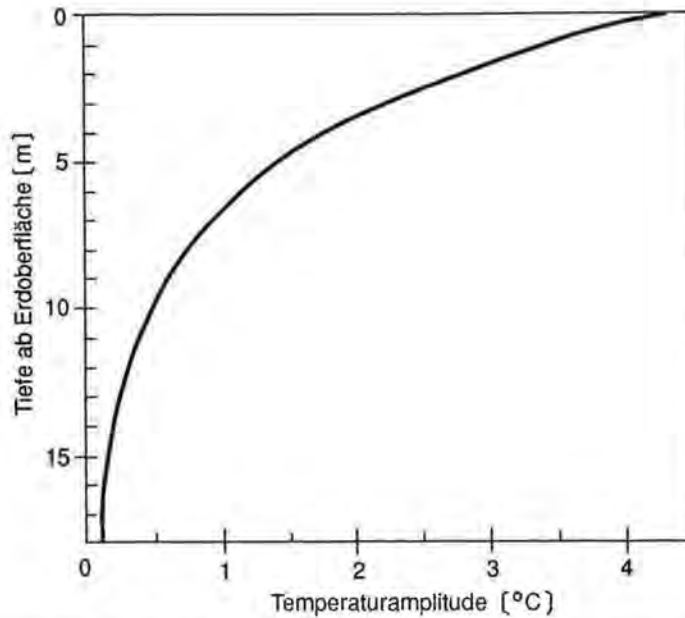


Fig. 1: Zusammenhang zwischen Tiefenlage und Amplitude bei Molassequellen im Luterbachtal für 1984–1986. Temperaturleitfähigkeit = $0,18 \text{ m}^2/\text{d}$ ($= 0,0208 \text{ cm}^2/\text{s}$).

Figur 1 zeigt den Zusammenhang zwischen Tiefe und Amplitude aus dem Luterbachtal. Das Quellwasser stammt aus hangparallel verlaufenden und mit Lockermaterial verfüllten Rinnen und Klüften unterschiedlicher Tiefe in einem unbewaldeten Molassehang. Das Wasser tritt dann in einem Trinkwasserstollen in Form nahe beieinanderliegender Quellen zutage (Kap. 2.).

Die Temperaturleitfähigkeit ist eine unkritische Größe: Ab 4,5 m Tiefe unterscheiden sich die berechneten Temperaturamplituden im Bereich von Temperaturleitfähigkeiten zwischen $0,1$ und $0,3 \text{ m}^2/\text{d}$ nur um maximal $0,26^\circ \text{C}$. Größeren Einfluß auf das Temperaturregime haben hingegen die örtlichen Gegebenheiten wie etwa die Exposition und Unterschiede zwischen Wald und Freiland. Für die Bezugstiefe z_1 wurde eine Quelle mit bekannter Tiefenlage gewählt, Bodentemperaturen haben sich als ungeeignet erwiesen. Die Schätzung der Tiefenlagen von Wässern ermöglicht mehrere Anwendungen. So wurde z. B. an einem Hang mit mehreren Wasseraustritten eine Zunahme der Amplituden von oben nach unten festgestellt. Damit konnte dann der Hauptquellhorizont mit Wasseraustritt direkt aus der Molasse oben am Hang lokalisiert werden. Bei kleinen Quellen kann sich das Wasser in quellenahen Untiefen erwärmen. Geht hier eine große Temperaturamplitude mit großen Schüttungsschwankungen einher, so belegt dies eine geringe quellenahen Deckschichtmächtigkeit und kann somit auf eine erhöhte Empfindlichkeit des Wassers gegenüber Verunreinigungen hinweisen.

Neben der Temperaturamplitude ergibt die mittlere Jahrestemperatur eine weitere Möglichkeit zur Differenzierung der Quelleinzugsgebiete. Wässer aus bewaldeten und schattigen Gebieten haben eine um einige Zehntelgrad niedrigere Mitteltemperatur als Wässer aus dem benachbarten sonnenexponierten Freiland. Im Freiland lagen auch die mittleren Bodentemperaturen verschiedener Tiefen um $1,3^\circ \text{C}$

höher als die Lufttemperatur, demgegenüber lagen im Walde die Bodentemperaturen nur um $0,2^{\circ}$ C über der Lufttemperatur.

Der Calciumanteil an der Gesamthärte sowie die Nitratkonzentrationen als natürliche Tracer werden im nachstehenden Fallbeispiel besprochen.

3. Fallbeispiel Luterbachtal

3.1. Vorerkundung mit natürlichen Tracern

Das Luterbachtal ist ein nach N ins Emmental entwässerndes Kerbtal 12 km nordöstlich von Bern (vgl. Kap. 1.). Die nur 40–100 m breite Talsohle ist beidseits von Steilhängen flankiert, welche etwa 100 m höher in die Plateaus der Hügel übergehen (Fig. 2). Die Talsohle wird landwirtschaftlich genutzt, Teile der Hänge sowie der Hügelkuppen und Plateaus sind bewaldet. Das engere Testgebiet von 2 km² Fläche umfaßt einen 1,5 km langen Abschnitt der Talsohle im oberen Luterbachtal sowie die angrenzenden bewaldeten Hügel. Der höchste Punkt des Testgebietes liegt auf 869 m, der tiefste Punkt auf 734 m ü.M.. Zu Beginn der Untersuchungen lagen keine brauchbaren geologischen Unterlagen vor, erst eine Kartierung und geophysikalische Sondierungen zeigten die grundlegenden Strukturen (H. HÖTZL & D. KLAIBER, 1986; U. SCHÖTTERER & I. MÜLLER, 1986). Der Westhang im Testgebiet besteht aus einem Sockel aus Sandsteinen der tertiären oberen Meeresmolasse. Der Sandstein ist dicht mit Mergellagen durchsetzt. Darüber folgt eine bis zu 30 m mächtige Schicht aus tiefgründig verwittertem und wenig verfestigtem Sandstein und Konglomeraten, die sogenannte Luterbachnagelfluh. Die anhand von oberflächennah gewonnenen Bohrkernen bestimmten Durchlässigkeiten liegen zwischen 10^{-5} und 10^{-8} m/s (H. HÖTZL & D. KLAIBER, 1986). Auch die Gebirgsdurchlässigkeit wird in diesem Bereich liegen. Das anschließende Hügelplateau ist mit 10–20 m Grundmoräne der Rißeiszeit bedeckt. Deren Durchlässigkeit liegt je nach Sandanteil zwischen 10^{-6} und 10^{-9} m/s. In der letzten Vergletscherungsperiode (Würm) blieb das Gebiet vermutlich eisfrei.

In der Talsohle wurden mittels Refraktionsseismik mindestens 20 m tiefe Lockermaterialverfüllungen geortet (B. KRUMMENACHER, 1990). Im erwähnten Westhang gewährt ein vor 90 Jahren 30 m tief in den Sandstein gehauener **Trinkwasserstollen** Einblicke in die Art von Zuflüssen zu Molassequellen. Der Stollen bildet einen **hydrologischen Aufschluß**. Das Wasser der 12 einzelnen Wasseraustritte entstammt aus bis 20 cm weiten Sackungsklüften (Fig. 3). Die Gesamtergiebigkeit dieser Kluftquellen betrug im Mittel der Jahre 1984–1986 105 Minutenliter. Der gesamte Quellwasserabfluß im Testgebiet betrug 390 mm bei 1200 mm Niederschlag.

Trotz der mit der Zeit gewonnenen Übersicht über die einzelnen hydrogeologischen Elemente blieben die konkreten Fließrichtungen des Grundwassers vorerst unklar. Als Einzugsgebiet war das über den Stollen liegende Hügelplateau nahe liegend. Bereits die Wasserbeschaffenheit führte jedoch zu einem differenzierteren Bild. Die Nitratkonzentrationen der vorderen Stollenwässer lagen über 20 mg/l, die Chloridkonzentrationen über 7 mg/l (Fig. 4). Die entsprechenden Gehalte der hinteren Stollenquellen lagen demgegenüber deutlich tiefer. Vergleiche mit anderen Quellen führten zum Schluß, daß das Wasser der **vorderen Stollenquellen** aus dem landwirtschaftlich genutzten Freiland stammt, und nur das Wasser der **hinteren**

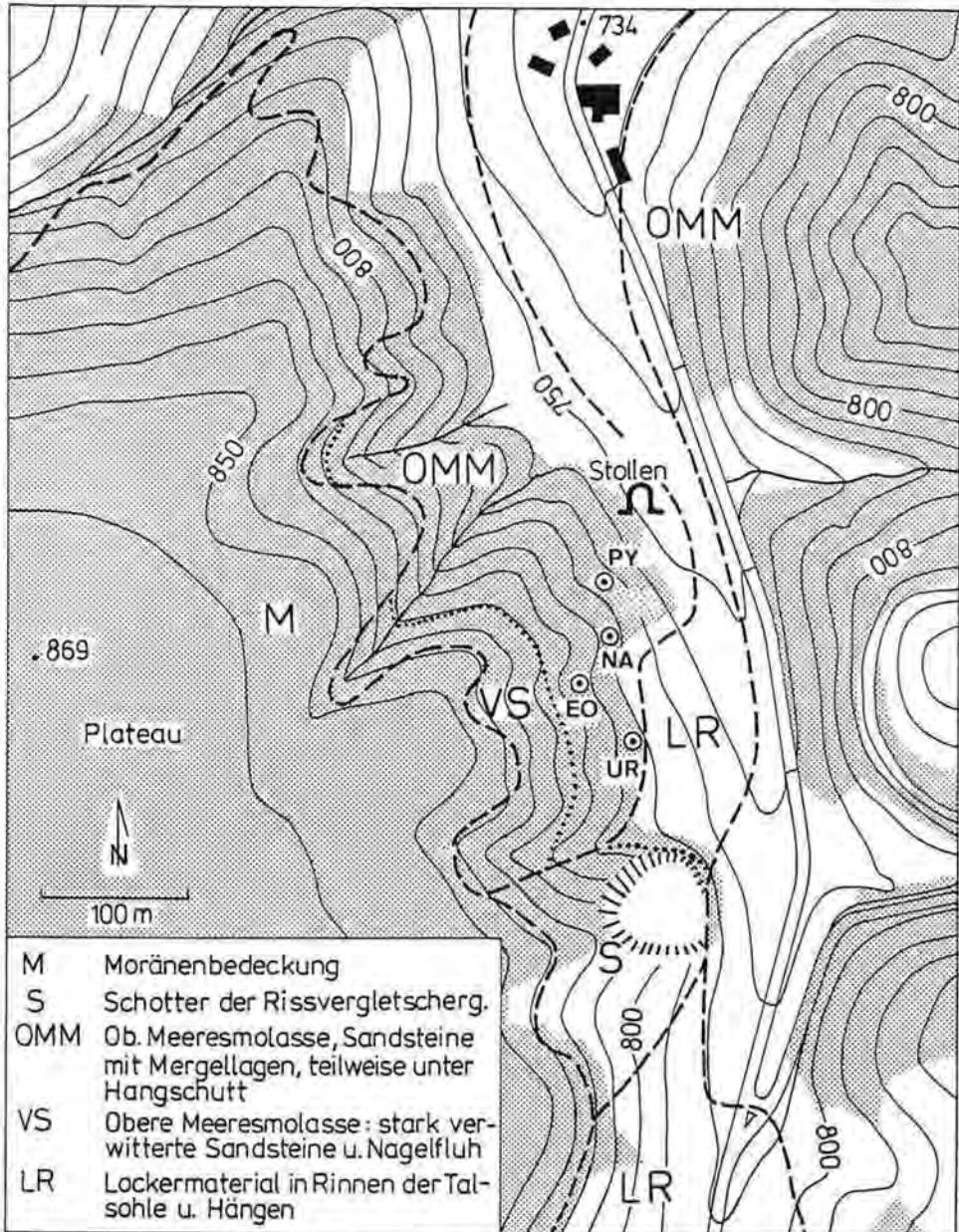


Fig. 2: Geologische und topographische Situation des Testgebietes Luterbach mit den Einspeisestellen für die Markierversuche. UR = Uranin-Einspeisestelle, EO = Eosin-Einspeisestelle, NA = Naphthionat-Einspeisestelle, PY = Pyranin-Einspeisestelle.

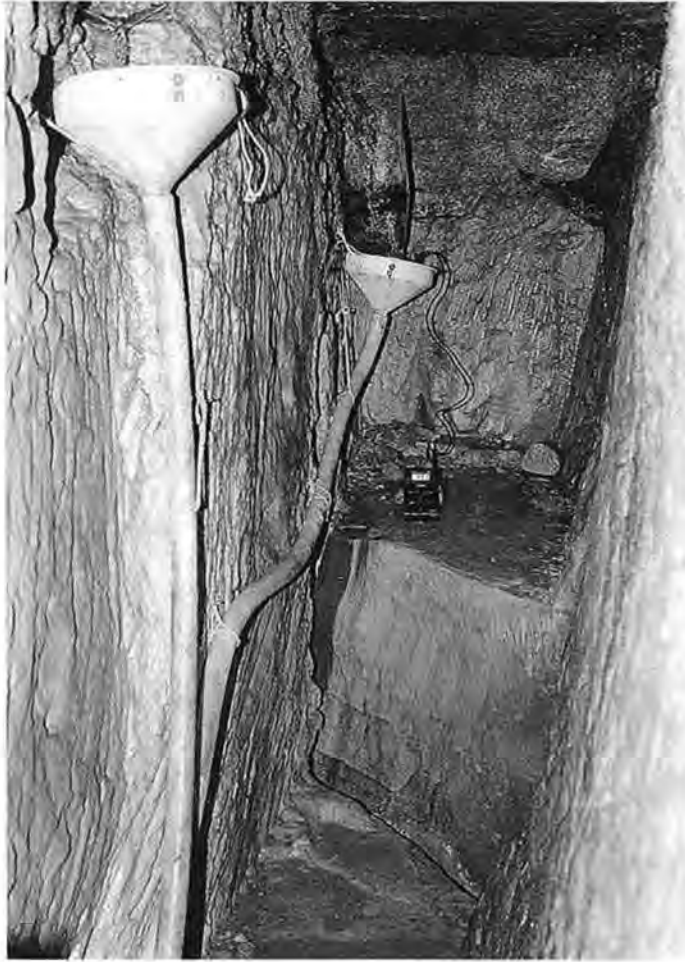


Fig. 3: Kluftwasseraustritte im Molassestollen.

Stollenquellen aus dem bewaldeten Hügelpateau. Der Vergleich der mittleren Jahrestemperaturen der Quellwässer unter Einbezug der Bodentemperaturen bestätigte diese Zuordnung. Die Waldböden und die hinteren Stollenwässer sind kälter als die Freilandböden und die vorderen Stollenwässer (vgl. Kap. 2.4.). Die Amplituden der Wassertemperaturen nehmen gegen die vorderen Stollenquellen hin zu. Das bedeutet, daß die Wege der vorderen Stollenwässer in vergleichsweise geringer Tiefe liegen, aus Gründen des Gefälles und der Morphologie kam nur eine talparallele Fließrichtung in Frage. Somit mußte der die vorderen Stollenwässer alimentierende Grundwasserträger in der oberen Talsohle und nicht auf dem Hügelpateau gesucht werden.

Eine besondere Bedeutung als natürlicher Tracer erlangte der **Calciumanteil an der Gesamthärte**. Untersucht wurden in den Jahren 1986–1987 sowie 1989–1990 rund 100 Quellen, auch im an das Testgebiet angrenzenden Talabschnitt. Bei 26 Quellen stammte das Wasser direkt aus der Molasse, ihre Calciumanteile lagen unter

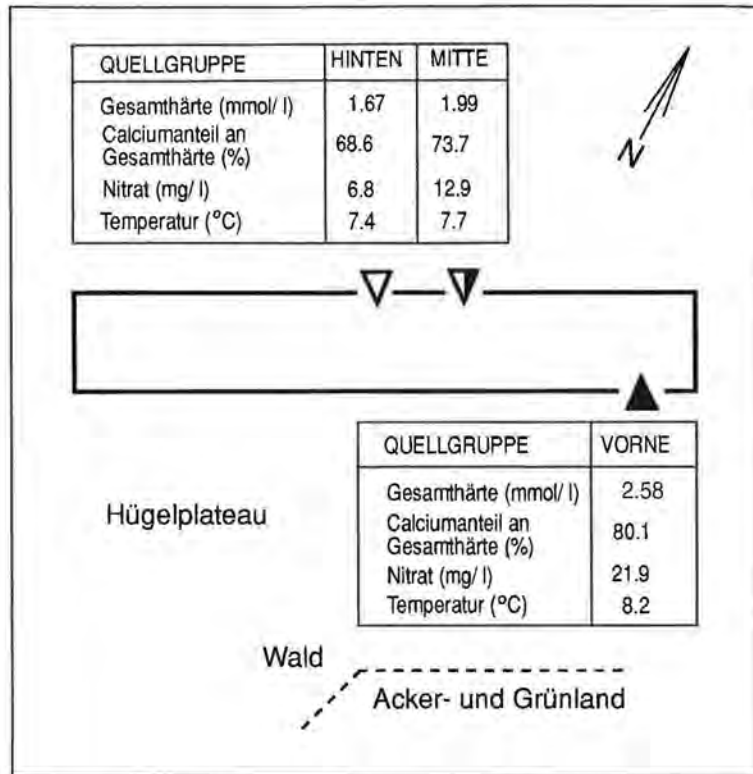


Fig. 4: Zur Wasserbeschaffenheit der Stollenquellen.

75%. Bei 29 Quellen mit quellnahem Porenspeicher betrug der Calciumanteil über 75%, mehrheitlich sogar über 80%. Die Daten der restlichen 45 Quellen konnten mangels genügender Kenntnis des Aquifertyps nicht mitverglichen werden. Bei sieben Quellen mit ausschließlichem Porenwasser betrug der Calciumanteil über 90%, und zwar unabhängig von den übrigen Parametern und dem Gesamtionen-gehalt. Bei der Mehrheit der Quellen mit Calciumanteilen zwischen 75 und 90% ließen zwar die geologischen Verhältnisse auf einen Porenaquifer als letzter Speicher vor der Quelle schließen, aufgrund der berechneten Einzugsgebietsgrößen mußte jedoch eine Speisung dieser Aquifere aus entfernteren und nicht genau bekannten Bereichen gefolgert werden. Löseversuche mit Kohlensäure und mergeligem Molassesand im Labor ergaben eine mit steigendem Verhältnis Sand/Wasser abnehmenden Calciumanteil an der Gesamthärte (H. R. WERNLI, 1988). Zuerst überwiegt das Auflösen des leichter löslichen, aber begrenzten Angebotes an Magnesiumkarbonat. Mit zunehmendem Aufbrauch des Magnesiumkarbonates beginnt die Lösung von Calciumkarbonat zu dominieren. Im Laborversuch führt bei hoher Sandmasse im Vergleich zum Wasser das genügende Magnesiumangebot somit zu einem relativ höheren Magnesiumanteil beziehungsweise zu einem niedrigeren Calciumanteil an der Gesamthärte. Auf natürliche Verhältnisse übertragen: Die schlecht durchlässige mergelige Molasse mit dem im Vergleich zur benetzten Substratmasse geringen Wasserdurchsatz bewirkt einen geringeren

Calciumanteil an der Gesamthärte als ein gut durchlässiger Porenaquifer. Im Bereich der für schweizerische Mittellandwässer typischen Gesamthärten von etwa 1,5–3 mmol/l ist bisher keine Beeinflussung der beschriebenen Lösevorgänge durch unterschiedliche Gesamtmineralisierungen festgestellt worden. Als vorläufige Erkenntnis ergibt sich, daß Wässer mit **Calciumanteilen unter 75% aus einem Molasseaquifer** stammen, Calciumanteile **über 90% hingegen aus einem reinen Porenaquifer**. Für die Anteile zwischen 75 und 90% ist eine Abfolge verschiedener Aquifere wahrscheinlich. Stichproben außerhalb des Testgebietes haben diese Methode zur Charakterisierung des Aquifertyps inzwischen bestätigt.

Bei den vorderen Stollenquellen liegt der Calciumanteil an der Gesamthärte bei 80%, beim Porengrundwasser der oberen Talsohle bei 82%. Bei den hinteren Stollenquellen liegt der Calciumanteil zwischen 61 und 74%, bei den über dem Stollen gelegenen Quellen in der Molasse zwischen 69 und 73%.

Insgesamt ergaben sich also bereits aus der Wasserbeschaffenheit konkrete Anhaltspunkte über die Herkunft des Wassers. Die im Jahresverlauf nur wenig schwankenden Ergebnisse erleichterten die Interpretation. Auch ließ sich mit der Wasserbeschaffenheit mit Hilfe von Mischrechnungen zeigen, daß die mittleren Stollenquellen ein Mischwasser aus den beiden anderen Quellgruppen führen, wobei der Anteil des hinteren Quellwassers mit 61% überwiegt. Zur Verifikation wurden zwei Markierversuche durchgeführt.

3.2. Markierversuche

Ein erster Markierversuch mit vier Einspeisungen in Gräben in Abständen zwischen 150 und 40 m südlich des Stollens begann im Mai 1984. Eingesetzt wurden 10 kg Uranin, 10 kg Eosin, 25 kg Naphthionat und 5 kg Pyranin (vgl. Fig. 2). Nachgespült wurde mit insgesamt 47 m³ Wasser. In der Folge konnten in den Stollenquellen und der Stollenumgebung zu keiner Zeit Naphthionat oder Pyranin nachgewiesen werden. Diese Tracer waren im Molassefels steckengeblieben. Eosin trat nur bei den hinteren und mittleren Stollenquellen auf. Das Eosin war direkt in die oberflächennah zerblokte Molasse eingespeist worden, offenbar wurde eine in der Nähe zum Stollen vorbeiführende Kluft „getroffen“. Bei den vorderen Stollenquellen trat nur Uranin auf. Spätere seismische Sondierungen zeigten im Hang unterhalb der Uranin-Einspeisestelle eine hangparallele Lockergesteinsrinne, welche kurz vor dem Stollen in die weiten Klüfte der Molasse mündet (vgl. Fig. 6).

Ein zweiter Markierversuch von 1986 mit einer Einspeisung von 20 kg Eosin direkt ins Grundwasser der oberen Talsohle bestätigte alle vorherigen Annahmen über die verschiedene Herkunft der Stollenwässer. Das Eosin von 1986 trat nur bei den vorderen Stollenquellen auf und überlagerte die Uraninausbringung von 1984. Der Eosinaustrag der Einspeisung von 1984 bei den hinteren Quellen wurde nicht gestört.

Methodisch aufschlußreich ist der **Eosinversuch von 1984**, hier erläutert am Beispiel der hintersten Stollenquelle. Diese Quelle zeigte von 1983–1990 mit 13,6–20,8 l/min eine nur geringe Schüttungsvariabilität. Störungen des Tracerdurchganges infolge wechselndem Abfluß blieben hier vergleichsweise gering. In einer ersten Phase traten in mehreren Schüben nur geringe Konzentrationen auf (Fig. 5). Für den ersten Schub ergab die Auswertung mit dem Best Fit Verfahren eine mittlere Abstandsgeschwindigkeit von 29,7 m/d. Die relativ niedrige Dispersivität von 1,54 spricht für einen direkten, unverzweigten Kluftweg, welcher mit wahrscheinlich homogenem Lockermaterial verfüllt ist.

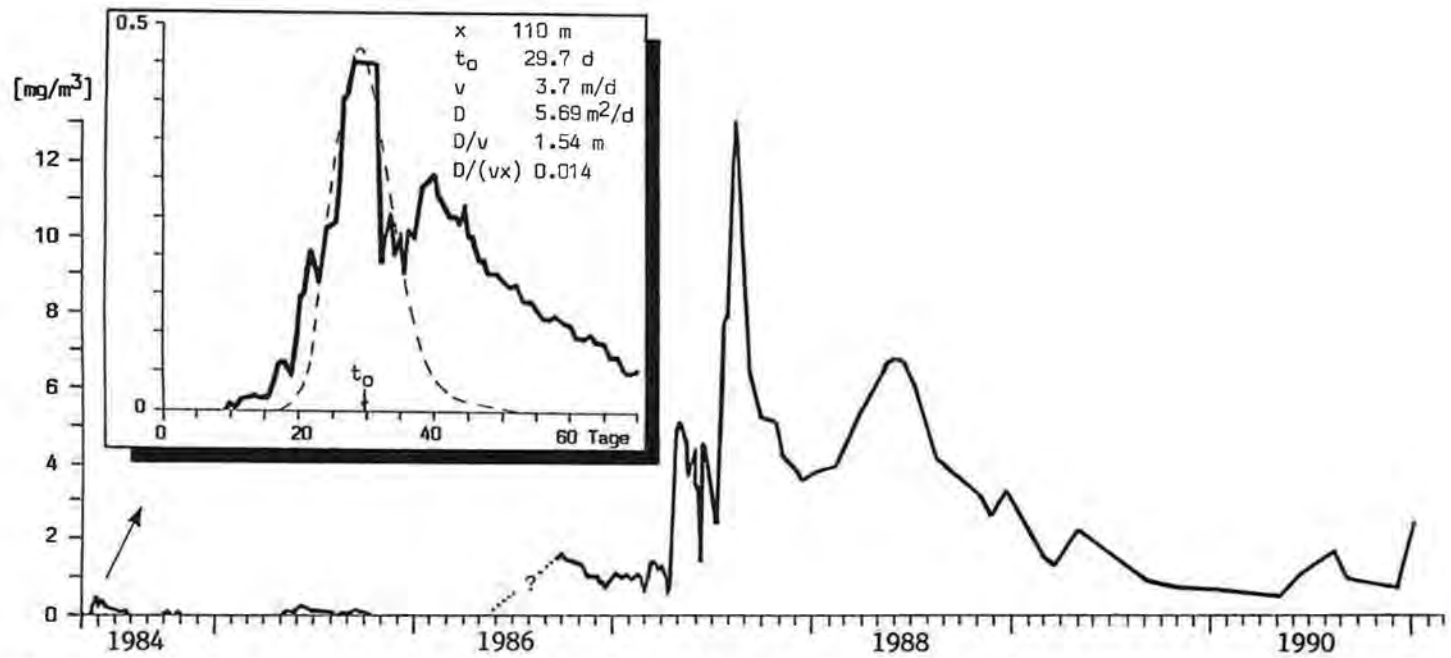


Fig. 5: Tracer-Langzeitversuch 1984–1991 mit Einspeisung von 10 kg Eosin in die ungesättigte Zone.

Für den Konzentrationseinbruch zwischen dem 30. und 38. Tag nach der Einspeisung ist keine äußere Ursache auszumachen. Es wird daher vermutet, daß der erste Tracerschub durch den ersten Spülwasserstoß durch relativ offene vertikale Klüfte ausgelöst wurde, und daß der anschließende breitere Kurvenabschnitt mit dem einsetzenden Nachtropfen aus Strukturen mit geringerer Wasserwegsamkeit zusammenhängt.

Die Hauptphase der Tracerausbringung setzte erst im Sommer 1986 ein, mehr als zwei Jahre nach der Einspeisung. Ursache waren Remobilisierungen von Tracer aus der ungesättigten Zone im Anschluß an den Mai und Juni 1986 mit 370 mm Gesamtniederschlag, wobei sieben Starkniederschläge zwischen 31 und 49 mm fielen. Nach einem Starkniederschlag von 50 mm am 1. Juli 1987 wurde dann die Maximalkonzentration von $13,0 \text{ mg/m}^3$ erreicht (vgl. Fig. 5). Trotz der nun über sieben Jahre dauernden Tracerausbringung betrug die Rückgewinnung des Eosins bei allen Quellen mit Eosin der Einspeisung vom 3. Mai 1984 bis zum 8. Januar 1991 nur 9,2%.

Sofern man die Modellierung des vollständigen Stofftransportes ausklammert, so repräsentiert bei Einspeisung in die ungesättigte Zone der **Erstschub** das reine Dispersionsfließen relativ am besten. In diesem Zusammenhang stellt sich auch die Frage nach dem Einfluß der Einspeisung in die **ungesättigte Zone** auf die Berechnung der Aquiferparameter. Im vorliegenden Falle wird von der realistischen Annahme ausgegangen, daß die Verweildauer des Tracers über dem Aquifer wegen der temporären Sättigung mit Spülwasser maximal zwei Tage beträgt. Nach spätestens dieser Zeit führt das beginnende Abtropfen aus der ungesättigten Zone in den Aquifer zu einer ersten wahren Einspeisung in Form einer Momentaneinspeisung beziehungsweise eines „DIRAC'schen Tropfens“. In der Modellrechnung muß in diesem Falle ein um zwei Tage verschobener Einspeisezeitpunkt eingesetzt werden. Ausgenommen bei sehr schnellen Tracerdurchgängen bleiben die Auswirkungen erstaunlich gering. Im vorliegenden Versuch mit $t_0 = 29,7 \text{ d}$ und $\alpha = 1,54$ ändern sich die Werte wegen zwei Tage verschobenem Einspeisezeitpunkt auf $t_0 = 27,8 \text{ d}$ und $\alpha = 1,76$. Die Abnahme der mittleren Verweilzeit t_0 kann maximal zwei Tage betragen, nämlich bei einem in der Realität nicht möglichen $D/(vx) = 0$. Bei größeren $D/(vx)$ -Werten und kleineren t_0 werden die Abweichungen höher. Zum Beispiel würde mit $D/(vx) = 0,1$ und $t_0 = 20 \text{ d}$ das neue $D/(vx) = 0,13$. In Anbetracht der übrigen Unsicherheiten bei einem Feldversuch bleibt aber auch eine solche Abweichung noch tolerierbar. Bei höherem t_0 werden die Abweichungen wesentlich geringer, so daß bei geringmächtigen ungesättigten Bodenzonen bis etwa 20 m die Versuchsergebnisse erstaunlich wenig verfälscht werden. Gleichzeitig muß aber nochmals die unbedingte Notwendigkeit einer **kräftigen Nachspülung** betont werden. Mit dem Gesagten sollen selbstverständlich **nicht etwa Einspeisungen in die ungesättigte Zone propagiert** werden! Man vergesse nicht die langjährige Kontamination eines Gebietes mit Tracern.

Aus dem bisherigen Verlauf des Langzeitversuches ergeben sich vorerst einige allgemeine Folgerungen: Uranin und Eosin sind langlebig. Sie können unterhalb der biologisch aktiven Bodenzone **über Jahre in der ungesättigten Zone gespeichert** bleiben. Vergleiche mit der Nitratverlagerung unterhalb der Wurzelzone sind nahelegend. Der Verlauf des beschriebenen Eosinversuches erinnert spontan an den langen „Bremsweg“ bei den Nitratkonzentrationen im Grundwasser im Anschluß an eine Extensivierung der landwirtschaftlichen Bodennutzung.

3.3. Vergleich der Markierversuchsergebnisse mit Pumpversuchen

In den mit Lockermaterial verfüllten Rinnen der Talsohle wurden mehrere Kleinpumpversuche durchgeführt. Die Auswertung erfolgte nach der Gleichung von DUPUIT-THIEM mit einer nach SICHARDT geschätzten Absenkungsreichweite. Zusätzlich standen die Ergebnisse zweier früherer Großpumpversuche zur Verfügung.

Obwohl Kleinpumpversuche allgemein mit Unzulänglichkeiten behaftet sind (R. V. BLAU et al., 1984), ergibt sich unter zusätzlichem Einbezug der früheren Großpumpversuche für die mittlere Gebietsdurchlässigkeit in der Talsohle und dem angrenzenden Kluftbereich eine realistische Größenordnung von $1-1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s. Mit diesem Wertebereich müssen die Ergebnisse aus den Markierversuchen verglichen werden. Dabei fällt auf, daß die mit Markierversuchen berechneten Durchlässigkeiten durchwegs geringer ausfallen als jene aus den Pumpversuchen. Beim letzten Markierversuch in Tab. 2, mit Eosin und einem Abstand von 205 m, liegt die Erklärung in der schlecht durchlässigen Einspeisestelle. Drei Monate nach der Einspeisung betrug die Restkonzentration im Einspeisepiezometer immer noch 30 mg/m^3 . Eine der Ursachen der Abweichungen der Markierversuchsergebnisse kann in der nur schätzbaren effektiven Porosität n_{eff} in der Gleichung von DARCY ($k_f = v_a \cdot n_{\text{eff}} / i$, i = hydraulischer Gradient, $v_a = x/t_0$ = mittlere Abstandsgeschwindigkeit) liegen. Weiter ist, zumindest für die Versuche mit Eosin, auch eine Retardation

Tab. 2: Vergleiche zwischen Markierversuchen und Pumpversuchen in der Talsohle von Luterbach. Die Pumpversuche in den Piezometerrohren sind Kleinpumpversuche, die Pumpversuche in den Fassungen sind Großpumpversuche. Die mit den Markierversuchen berechneten Durchlässigkeiten basieren auf einer effektiven Porosität von $n_{\text{eff}} = 0,1$.

PUMPVERSUCHE		MARKIERVERSUCHE			
Ort	Permeabilität k_f [10^{-4} m/s]	Einspeisestelle – Beprobungsstelle	Tracer	Abstand [m]	Permeabilität k_f [10^{-4} m/s]
Piezo 550 m südlich Stollen	0,84	Hang über Talsohle – Stollen (Einspeisung in ungesättigte Zone)	Eosin	110	0,90
			Uranin	150	0,94
Piezo 105 m südlich Stollen	1,1	Piezo – Stollen Piezo – Nebenfassung	Eosin	550	0,76
			Eosin	160	0,57
Piezo 870 m nordwestlich Stollen	1,0	–	–	–	–
Fassung 990 m nordwestlich Stollen	2,5	Piezo – Fassung	Uranin	120	0,9
Fassung 1300 m nordwestlich Stollen	1,1	Piezo – Fassung	Eosin	205	0,4

nicht auszuschließen. Ein Säulenversuch mit Molassesand ergab einen Retardationsfaktor von 1,9, das heißt, die mittlere Abstandsgeschwindigkeit des Eosins verminderte sich um den Faktor 1,9. Allerdings können dicht gepackte kurze Laborsäulen nicht direkt mit Feldverhältnissen verglichen werden. Für Feldverhältnisse ist deshalb eine etwas geringere Retardation wahrscheinlich. Eine weitere Ursache ist das Fließen in nicht geradlinig verlaufenden Rinnen. Wegen dem dann unterschätzten Abstand resultieren zu geringe Abstandsgeschwindigkeiten und somit zu geringe Durchlässigkeiten. Der Hauptgrund für die Unterschiede der Durchlässigkeiten dürfte aber darin liegen, daß die Markierversuche von einzelnen Zonen schlechter Durchlässigkeit beeinflusst werden.

3.4. Die Wasserzirkulation in der Molasse von Luterbach

Die Markierversuchsergebnisse sprachen für eine Wasserzirkulation in mit Sand und Kies verfüllten Klüften und Rinnen. Spätere seismische Sondierungen und hier nicht erläuterte hydraulische Berechnungen bestätigten diesen Sachverhalt. Entscheidend für das Verständnis der Molassehydrologie waren aber die qualitativen Ergebnisse über die hydrologischen Verbindungen.

Grundsätzlich handelt es sich bei den Lockergesteinsaquiferen der Talsohle von Luterbach um langgezogene Talfüllungen. Im engeren Testgebiet geht der 100 m

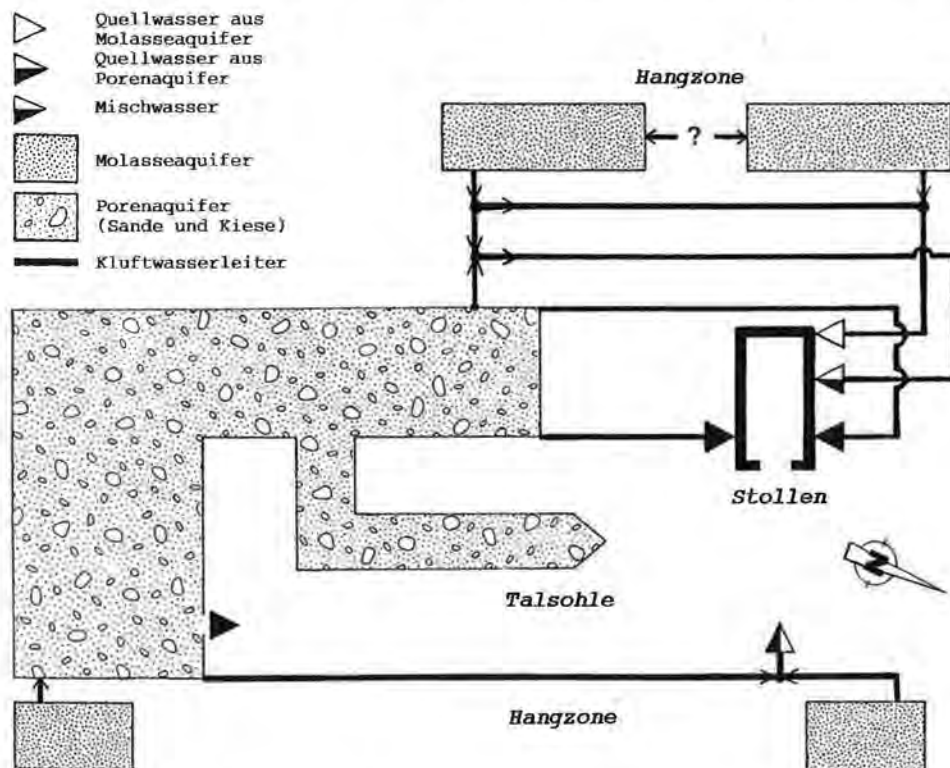


Fig. 6: Die Wasserzirkulation im Molassetestgebiet Luterbach. Die Verknüpfung von Poren- und Molasseaquiferen ist typisch für das Molassegebiet.

breite Porenaquifer der oberen Talsohle talabwärts, das heißt in Richtung Quellstollen, in eine knapp 30 m breite Rinne über. Diese Rinne mündet 80 m vor dem Quellstollen in die bis 20 cm weiten Klüfte im Sandstein, welche das Porenwasser direkt zu einzelnen Kluftquellen im Stollen leiten. Etwas höher am Hang vor dem Stollen liegt hingegen ein reines Kluftsystem mit ausschließlichem Molassewasser vor.

Im Stollen beträgt der Anteil an Porenwasser der Talsohle rund 60%. Somit täuschen also die im Stollen sichtbaren Sandsteinklüfte mehrheitlich eine falsche Herkunft des Quellwassers vor. Figur 6 zeigt schematisch das Netzwerk aus Porenaquiferen und Kluftleitern. Für das ganze obere Luterbachtal beträgt der Anteil an **Porenwasser** an der oberflächennahen Wasserzirkulation 50%. Von 390 mm Quellwasserabfluß (1984–1986) sind 195 mm dem Porenwasser zuzuordnen, weitere 195 mm versickern in Molassespeichern, welche direkt Molassequellen speisen. Das zusätzliche, in den 390 mm nicht enthaltene und in größerer Tiefe in Form von Schichtwasser zirkulierende Grundwasser, eigentlich der klassische Fall in der Molassehydrogeologie, wird auf höchstens 100 mm geschätzt. Wichtig ist außerdem die Tatsache, daß zwischen der oberflächennahen Fließrichtung des Grundwassers und dem generellen Schichtfallen der Molasse in südöstlicher Richtung im Testgebiet kein Zusammenhang besteht.

Die vorliegenden Untersuchungen lassen keine Schlüsse zu über den Anteil der Tiefensickerung in anderen Molassegebieten. Bezüglich des Vorkommens von Porenwasser in Molassequellen in der niederen Molassehügelzone hat aber bereits R. F. RUTSCH (1952) Beispiele beschrieben, das Luterbachtal stellt somit keinen Spezialfall dar. Besonders auch im tieferen und vom Quartär geprägten Mittelland finden sich an Hängen eine Vielzahl kleiner Quellen mit Wasser aus der anstehenden oder verborgenen Molasse. Hier ist die Kombination aus Porenaquifer und Molasseleiter schon durch die natürliche geologische Anlage gegeben, wobei hier ein eher vertikaler Speicherverbund vorliegt (Ch. LEIBUNDGUT, 1991). Erst in der höheren Molassezone mit fehlender Quartärbedeckung liegen andere Verhältnisse vor, hier beschränken sich die Porenwasservorkommen auf die kleinen Hangschuttmassen am Fuße der Steilhänge und sind gegenüber dem Kluftwasseranteil unbedeutend.

4. **Schlußfolgerungen**

Tracerversuche zum direkten Nachweis hydrologischer Verbindungen in der Molasse haben keine methodische Alternative. Geophysikalische Sondierungen wie Seismik und Geoelektrik können wohl hydrogeologische Grundstrukturen aufdecken, nicht aber den Verlauf und die Verknüpfungen der tatsächlichen, schmalen Wasserstränge. Die für die Fließrichtung kleiner Wassermassen entscheidenden Feinheiten im Gefälle entziehen sich dem Auflösungsvermögen der Geophysik. Voraussetzung für das Gelingen von Tracerversuchen ist eine gründliche Vorerkundung unter Einsatz einer breiten Methodenpalette, welche auch natürliche Tracer umfaßt. Andernfalls ist das Risiko eines Mißlingens der Tracerversuche hoch und eine Wiederholung eines negativen Versuches ist oft über Jahre nicht mehr möglich. Der überwiegende Teil der Grundwasserzirkulation im Molassehügelgebiet spielt sich in der oberflächennahen Zone bis höchstens 20 m Tiefe ab, auch entgegen dem allgemeinen Schichtfallen. Die Grundwasserwege können trotz dem kleinräumig strukturierten Hügelgebiet sogar mehrere Kilometer lang sein. Molassequellen

sammeln somit nicht nur Wasser aus der nächsten Quellumgebung. Die langen Filterstrecken, besonders im bewaldeten Molassegebiet, wirken sich günstig auf die Wasserqualität aus. Angesichts der im dicht besiedelten tieferen Mittelland zunehmenden Gefahren für die Wasserressourcen ist der Erhalt und der Schutz der Quellen im Molassehügelgebiet eine vordringliche Aufgabe.

Zusammenfassung

Dort, wo sich die Grundwasserzirkulation nicht mit den bekannten Gesetzmäßigkeiten beschreiben läßt, haben empirische und experimentelle Verfahren einen hohen Stellenwert. Zur Charakterisierung der Wasserbewegung eignen sich in besonderem Maße natürliche und künstliche Tracer. In einem komplexen Aquiferverbund in der Molassehügelzone des nördlichen schweizerischen Alpenvorlandes konnte mit dem Nitratgehalt, dem Calciumanteil an der Gesamthärte, der Temperatur sowie Markierversuchen die Grundwasserzirkulation entschlüsselt werden. Die Markierversuche ergaben, daß im Testgebiet die Mehrheit der Molassekluftwässer aus Porenaquiferen stammt. Wegen Einspeisung in die ungesättigte Zone dauern die Markierversuche bereits mehr als sieben Jahre.

Literatur

- BEHRENS, H. (1982): Verfahren zum qualitativen und quantitativen Nachweis von nebeneinander vorliegenden Fluoreszenztracern. – In: Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie Nr. 28/I, Tracermethoden in der Hydrologie, 39–50, Bern.
- BLAU, R. V., F. MUCHENBERGER, E. TRÜB & M. WÜRSTEN (1984): Quantitative Erkundung von Lockergesteins-Grundwasserleitern am Beispiel Emmental – Handbuch. – Sonderdruck Nr. 1056 aus Gas – Wasser – Abwasser, 5 (1984), Zürich.
- GROBER, E. G. (1955): Grundgesetze der Wärmeübertragung. – Berlin (Springer).
- HÖTZL, H. & D. KLAIBER: (1986) Hydrogeologic introduction into the Molasse sandstone test site, Switzerland. – Proc. of the 5th Internat. Symp. on Underground Water Tracing, Athens 1986, 391–401, Institute of Geology and Mineral Exploration, Athens.
- KASS, W. (1982): Routinemäßige Bestimmung von zwei Farbstoffen nebeneinander. – In: Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie Nr. 28/I, Tracermethoden in der Hydrologie, 51–62, Bern.
- KRUMMENACHER, B. (1990): Untersuchungen an Lockergesteinsmassen mit Hilfe der Hammerschlagseismik. – Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern.
- LEIBUNDGUT, Ch. (1991): Brunnenstollen in Oberaargau. – Jahrbuch des Oberaargaus, Langenthal.
- LEIBUNDGUT, Ch. & H. R. WERNLI (1986): Naphthionate – another fluorescent dye. – Proc. of the 5th Internat. Symp. on Underground Water Tracing, Athens 1986, 167–177, Institute of Geology and Mineral Exploration, Athens.
- MALOSZEWSKI, P. (1985): Development and Application of Mathematical Flow Models for Interpreting Tracer Experiments in Porous Groundwater Systems. – Weiterbildungskurs in Tracerhydrologie am Geographischen Institut der Universität Bern.
- RUTSCH, R. F. (1952): Geologische Probleme der Erschließung unterirdischer Wasservorkommen. – Sonderdruck aus dem Monatsbulletin des schweiz. Vereins von Gas- und Wasserfachmännern Nr. 5 (1952), Zürich.
- SCHÖTTERER, U. & I. MÜLLER (1986): Investigation of groundwater flow systems in a quaternary sandstone complex near Bern by means of indirect methods of environmental isotopes and geophysics. – Proc. of the 5th Internat. Symp. on Underground Water Tracing, Athens 1986, Institute of Geology and Mineral Exploration, Athens.

- WERNLI, H. R. (1986): Naphthionat – ein neuer Fluoreszenztracer zur Wassermarkierung. – Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, DGM 30 (1986), Heft 1, 16–19.
- WERNLI, H. R. (1988): Zur Anwendung von Tracermethoden in einem quartärbedeckten Molassegebiet. – Bern (Geographica Bernensia).

Summary

There exist no methodical alternatives for tracer experiments for direct detection of hydrological connections in the molasse. Geophysical probing such as seismology or geoelectricity can inform us on hydrogeological ground structures, but is not able to describe the course and the combinations of actual narrow water arteries. The fineness of the slope, which is decisive for the flow direction of small amounts of water, cannot be detected by geophysical methods. A prerequisite for the success of tracer experiments is thorough reconnaissance with different methods including also natural tracers. Otherwise the risk of a failure of tracer experiments is high and the repetition of a negative experiment often not possible for years. The predominant part of the groundwater circulation in the hilly parts of the molasse is found close to the surface down to approx. 20 m depth, and is occasionally even contrary to the general inclination. Despite the small scaled structured hilly area the flow path may be several kilometers long. This means that the springs of the molasse gather not only water from their nearest surrounding but also from further distances. These long filtering distances – especially in forested molasse area – have a favourable effect on the water quality. Considering the increasing dangers for the water resources in the densely populated lower midlands the preservation and protection of the sources in the hilly molasse areas is an urgent task.