

## Hydrogeologie der Oberen Süßwassermolasse im Einzugsgebiet des Aubaches (Schweiz)

VON W. BALDERER (Bern)  
(mit 1 Tafel)

### Inhalt

	Seite
1. Lithologie .....	17
2. Klüftung .....	19
3. Geologisch-hydrogeologische Bildungsbedingungen der Quellen .....	21
4. Hydrogeologische Deutung der beobachteten Bildungsbedingungen der Quellen .....	30
4.1. Definition der hydrogeologischen Einheiten .....	30
4.2. Qualitative Klassierung der lithologischen Einheiten bezüglich ihrer Durchlässigkeit .....	32
4.2.1. Durchlässigkeitsbeziehungen der verschiedenen lithologischen Einheiten in bezug auf die Nagelfluh .....	32
4.2.2. Durchlässigkeitsbeziehungen der verschiedenen lithologischen Einheiten in bezug auf die Sandsteinschichten .....	35
4.2.3. Durchlässigkeitsbeziehungen der weiteren lithologischen Einheiten (Süßwasserkalke, Mergel, Tone) zueinander .....	36
4.2.4. Durchlässigkeitsbeziehungen zwischen mehr als zwei lithologischen Einheiten .....	36
4.2.5. Zusammenhang zwischen der Durchlässigkeit der einzelnen Schichten und der Quellbildung .....	38
4.3. Quantitative Abschätzung der Durchlässigkeit mit Hilfe des Quellabflusses .....	39
4.3.1. Definition des Zustandes bei freiem Wasseraustritt .....	39
4.3.2. Theoretische hydrodynamische Überlegungen zur Berechnung der Durchlässigkeit von Speichergesteinen mit Hilfe des Quellabflusses .....	40
4.3.2.1. Situation bei vorwiegend interstitieller Porosität und Durchlässigkeit bei punktförmigem Quellaustritt .....	40
4.3.2.2. Situation bei vorwiegend interstitieller Porosität und Durchlässigkeit bei punktförmigem Quellaustritt, bewirkt durch eine einzelne Kluft senkrecht zur Schichtung (stratification) .....	42
4.3.2.3. Situation bei diffusem Wasseraustritt (bei interstitieller Porosität und Durchlässigkeit) entlang der Schichtgrenze, des Ausstreichens der Schichten, des subvertikalen Abrißrandes .....	44

4.3.2.4. Abschätzung des Grenzwertes der Durchlässigkeit von Schichten, welche das ganze Jahr an der Schichtoberfläche feucht bleiben .....	44
4.3.3. Auswertung der Quellergiebigkeit .....	47
4.3.4. Schlußfolgerungen .....	49
4.4. Abschätzung der Porositäten der einzelnen lithologischen Einheiten ..	50
4.5. Die Obere Süßwassermolasse als hydrogeologisches Gesamtsystem ..	50
Zusammenfassung .....	52
Literatur .....	53
Karten .....	54
Summary .....	54
Résumé .....	54

# 1. Lithologie

Die Lithologie der Ablagerungen der Oberen Süßwassermolasse ist in dem im nordöstlichen Teil des schweizerischen Mittellandes gelegenen Aubachgebiet<sup>1)</sup> bei horizontaler Lagerung durch vertikal alternierende Schichtung mit unvollständigen Sedimentationszyklen und häufig vorkommenden horizontalen Faziesübergängen charakterisiert (Fig. 1 und 2).

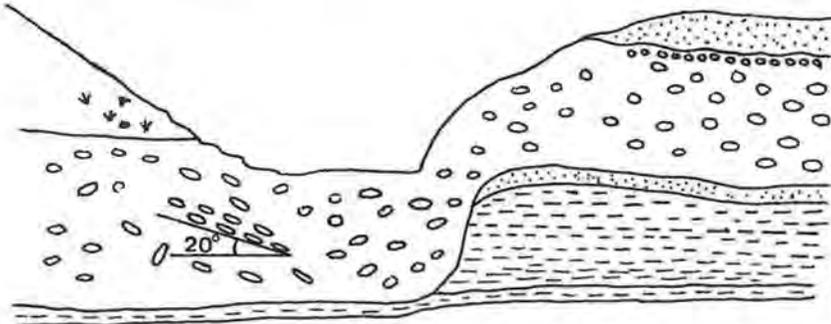


Fig. 1: Faziesübergänge (Detailskizze von Aufschluß, Koord. 715220/251900, auf 650 m ü. M., geol. Aufnahme vom 12. 9. 1973). Punktiert = Sandstein, kleine Ringe = Gerölle, große Ringe = Nagelfluh, strichliert = Mergel, grau-beige bis schwarz mit Kohlepigment.

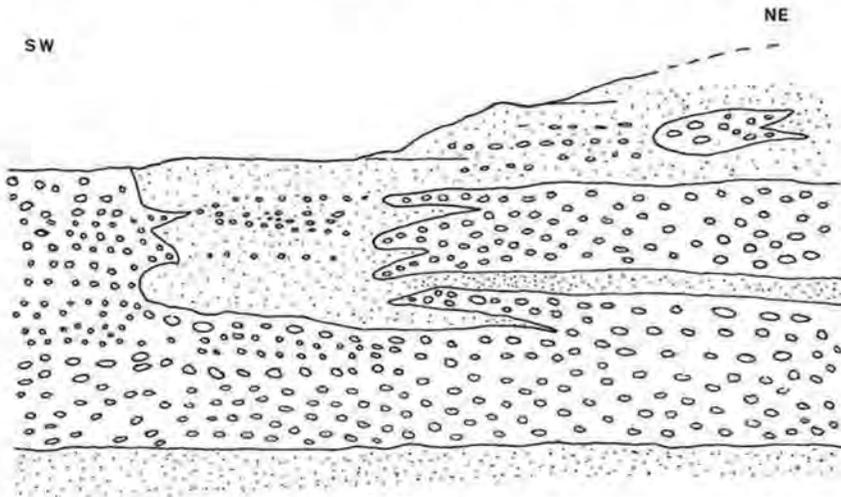


Fig. 2: Faziesübergänge: Stromrinne mit Fließrichtung NW-SE (Detailskizze von Aufschluß, Koord. 714730/251810, auf 675 m ü. M., geol. Aufnahme vom 21. 8. 1973). Signaturen s. Fig. 1.

Diese Ablagerungsform ist als eine Land-/Flußsedimentation zu deuten, mit Seen, Sümpfen, Stromrinnen und Landflächen, welche zeitweise überflutet wurden.

Die lithologischen Hauptglieder eines vollständigen Sedimentationszyklus sind dabei Nagelfluh (zu Beginn einer neuen Schüttung), Sandstein, Mergel und Süßwas-

<sup>1)</sup> Bezüglich der im Text vorkommenden Eigennamen sei auf die Landeskarte der Schweiz 1 : 25,000, Blatt 1093, Hörndli, verwiesen.

serkalk (am Ende eines vollständigen Zyklus, zum Teil noch von Süßwasserkohle überlagert).

Die einzelnen lithologischen Einheiten (Tafel I) können wie folgt charakterisiert werden (wobei aber häufig auch Übergangsformen vorkommen):

Die Nagelfluhhorizonte sind oberhalb 800 m ü. M. 10–20 m mächtig, grobkiesig, relativ stark verfestigt, mit subvertikalen Klüften und lokal weniger verfestigten Partien mit Lösungserscheinungen; unterhalb 800 m noch 2–5 m mächtig, relativ wenig verfestigt, mit Geröllen in Kies-, Sandfraktion und sandig-karbonatischem bis sandig-lehmigem Zement. Die horizontale Ausdehnung der Bänke beträgt einige 100 m.

Die Sandsteine sind in zwei Typen, als harte, mittel- bis grobkörnige, geklüftete, 0,2–1 m mächtige Bänke sowie als lockere, mittel- bis feinkörnige (siltige), einige cm bis 15 m mächtige Horizonte (vor allem im tieferen Teil des Einzugsgebietes) verbreitet.

Die Mergel sind einige cm bis 10 m mächtig, dünn geschichtet (0,5–2 cm) und sandig-siltig-tonig bis tonig-kreidig-kalkig ausgebildet.

Die Süßwasserkalke sind 0,5–5 m mächtig, entweder als harte, dichte, massige Bänke (ähnlich Malmkalken) oder in mergelig-sandiger Varietät ausgebildet. Sie sind als einzige in horizontaler Ausdehnung über einige km verfolgbar und stellen die besten Leithorizonte dar.

### Beobachtete stratigraphisch-sedimentologische Strukturelemente

*Lagerung der Schichtungsflächen (lithage, plan de stratification) der einzelnen Bänke:*

Die Schichtungsflächen, wie sie sich zum Beispiel an der Unterseite einer Schicht-einheit, einer Bank zeigen, sind in den meisten Fällen horizontal gelagert, jedenfalls mit einer nicht meßbaren Neigung zwischen  $0^\circ$  und  $5^\circ$  (höchstens  $10^\circ$ ), da die Schichtungsflächen oft leicht gewellt sind.

*Ebene der Geröllregelung:*

Bei den Nagelfluhbänken ist oft ein kleiner Winkel von  $5^\circ$  bis  $10^\circ$  (maximal  $15^\circ$ ) zwischen der fast horizontalen Schichtungsfläche und der Ebene der Geröllregelung (Neigung der Gerölle) vorhanden (Fig. 3).

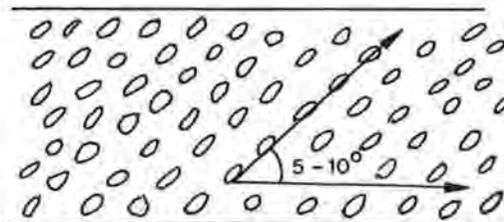


Fig. 3: Ebene der Geröllregelung.

In diesen Fällen wittert die Unterseite der Nagelfluhbank oft entlang dieser Geröllregelungsebene ab, was eine Schichtneigung vortäuschen kann, die aber nur sedimentologisch gedeutet werden kann.

Dieses Auswittern entlang der Ebene der Geröllregelung führt oft – vor allem in der Nähe von Wasserfällen – zur Bildung von kleinen, flachen Nischen bzw. kleinen

„Höhlen“, besonders ausgeprägt, wenn die unterliegende, tiefere Schicht aus weichem Mergel oder Ton besteht, der herausgespült werden kann (Fig. 4).

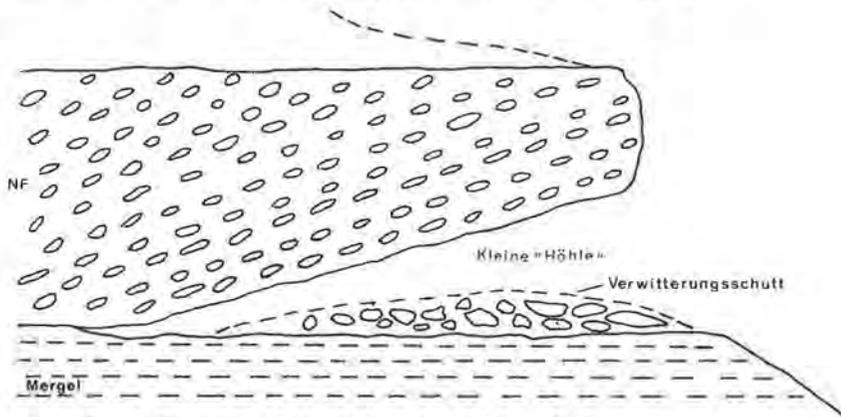


Fig. 4: Hohlräum- und Verwitterungsbildung. NF = Nagelfluh.

Die Neigung dieser Geröllregelungsebene beträgt im Aubachgebiet fast immer 10–15° mit Fallen gegen N, an einigen Stellen gegen S.

#### Gradierte Schichtung:

In den Nagelfluhbänken kann oft deutlich eine gradierte Schichtung beobachtet werden, beginnend an der Basis mit größeren Geröllen, größerer Matrix und endend an der Obergrenze mit kleineren Geröllen und feinerer Matrix.

Zum Teil ist auch undeutlich eine Kreuzschichtung in den Nagelfluhbänken und auch in den größeren Sandsteinbänken sichtbar. Dies wäre nach J. PERRIAUX (1969) ein Anzeichen für Stromrinnen.

#### Marken an der Unterseite (bzw. Oberfläche) der Schichtungs- oder Bankungsflächen:

Wellenförmige Ausbildungen an der Bankunterseite können je nach Form als Stromrinnen, Erosionsrinnen, Wellenbildungen, Rippeln oder „Flutes“ gedeutet werden. Diese Elemente wurden so weit wie möglich eingemessen durch Richtung (Längsrichtung) und Azimut des Fallens und auch auf der Strukturkarte dargestellt. Es ist festzustellen, daß fast alle diese Merkmale genau dieselbe Richtung, nämlich E–W, aufweisen. Eine genaue sedimentologische Deutung dazu ist jedoch auf Grund dieser ersten Auswertung noch nicht möglich.

## 2. Klüftung

Kleinere Klüfte sind an allen härteren Schichten zu beobachten.

Größere Klüfte können am häufigsten in den Nagelfluhbänken gefunden werden. Die vorliegenden Klüftmessungen erstrecken sich deshalb fast ausschließlich auf Nagelfluhbänke.

Die Ergebnisse dieser Messungen und der weiteren Feldbeobachtungen können wie folgt zusammengefaßt werden:

Die Klüfte sind fast immer subvertikal, d. h. zwischen 60° und 90° geneigt.

Die bevorzugten gemessenen Richtungen der Klüfte (Klüftscharen) liegen N–S, E–W,

NE–SW und NW–SE (Fig. 5). Bei genauerer Betrachtung können in Richtung NW–SE sogar zwei Kluftscharen unterschieden werden, welche sich in ihrer Streichrichtung um rund  $20^\circ$  unterscheiden (analog den Ergebnissen der Arbeiten von K. SCHERLER [1977] im Gebiet südlich des Hörnli im oberen Tösstal). Die Häufigkeit größerer wirklich durchgehender Klüfte, welche die ganze Bank oder eventuell sogar ein bis drei weitere Schichten durchqueren, ist relativ klein; zudem sind viele der in Kiesgruben sichtbaren Klüfte wohl auf lokale Einflüsse wie Erosion, Setzungen und

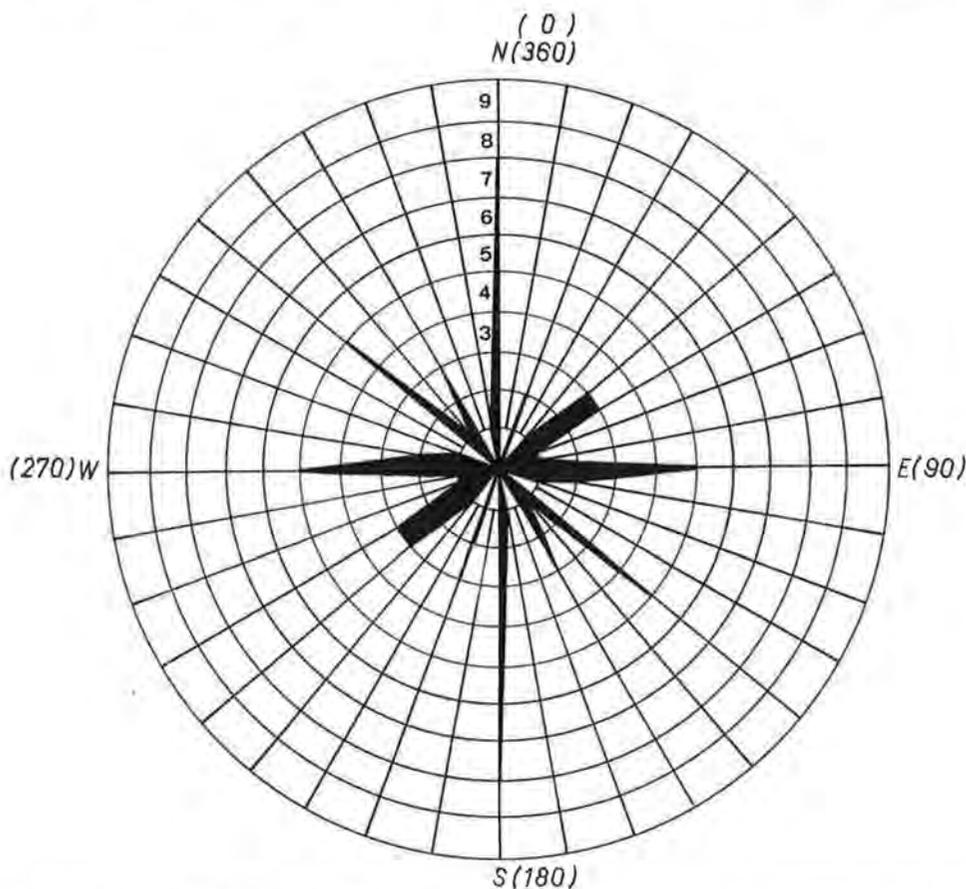


Fig. 5: Kluftrose (Aubachgebiet). Dargestellt sind 37 Kluftmessungen von 21 Aufschlüssen (mit je 1 bis 5 Messungen).

Sackungen zurückzuführen. Im wirklich anstehenden Gestein, in den ungestörten Nagelfluhbänken, ist die Häufigkeit der zu beobachtenden Klüfte um einiges kleiner und läßt sich wie folgt charakterisieren:

Kleinere Risse oder Klüfte, welche sich oft um die Gerölle herum bilden, aber nur auf einer Länge von 0,5–1 m (max. 2 m) sichtbar sind, sind am häufigsten anzutreffen, ihre Kluftfrequenz liegt bei ca. 2–3 Klüfte pro m.

Mittlere Klüfte mit einer sichtbaren Länge von 1–5 m haben eine Häufigkeit von

ungefähr 1–5 pro Aufschluß (wobei als mittlere Länge 20–30 m für einen mittelgroßen Aufschluß angenommen wird, also ca. 0,05–0,25 Klüfte pro m).

Größere Klüfte mit einer sichtbaren Länge von 5–20 m haben eine Häufigkeit von ungefähr 1–2 pro Aufschluß.

Ganz große, aber noch nicht als regional zu bezeichnende Klüfte mit einer Länge zwischen 20 und 100 m, mit kleineren Verschiebungen (Sprunghöhe 0,5 bis 2 m) — eigentlich schon als Brüche zu bezeichnen — konnten im gesamten Aubachgebiet nur an 2 Aufschlüssen beobachtet werden.

Brüche von regionaler Bedeutung, welche das ganze Gebiet durchstreichen, konnten nirgends sicher beobachtet werden.

Bei den Klüften in den Nagelfluhorizonten konnten folgende Beobachtungen zur Öffnung der Klüfte (*fissuration ouverte*) gemacht werden: Alle Klüfte sind leicht geöffnet, zum Teil mit lockerem Geröllmaterial gefüllt (an einzelnen Stellen bei oberflächlichen Aufschlüssen kommt es teilweise vor, daß die Klüfte von der Oberfläche her mit Erde aus der Verwitterungsschicht aufgefüllt wurden). An einigen Klüften — besonders gut bei größeren Klüften und Abbrüchen an Nagelfluhwänden zu beobachten — sind die Poren der Klüftwände vom Inneren des Gesteinskörpers her durch austretendes Wasser und der damit verbundenen Kalkausfällung an der Gesteinsoberfläche nach außen hin verschlossen worden. Dies läßt sich aus dem oft zu beobachtenden dünnen Wasserfilm an der Oberfläche der Nagelfluhwände, welche außerdem oft noch mit Moosen und einer dünnen Schicht von ausgefälltem Quelltuff oder Kalksinterbildungen bedeckt sind, schließen. Außerdem sind Quellaustritte häufiger an frischen Nagelfluhabdrücken zu beobachten.

### 3. Geologisch-hydrogeologische Bildungsbedingungen der Quellen

Bei der eingehenden Betrachtung der Quellerscheinungen innerhalb der Ablagerungen der Oberen Süßwassermolasse im gewählten Untersuchungsgebiet stellen sich folgende Fragen:

Warum existieren so viele, meist kleine Quellen, welche fast uniform über das ganze Gebiet verteilt sind, dies bei horizontaler Lagerung der Schichten, recht wechselnder Lithologie und morphologisch recht steilen Hängen? Wo liegen ihre Einzugsgebiete?

Um diese Erscheinungen näher abzuklären, wurde die Lithologie im Detail (Maßstab 1 : 5000) kartiert (Tafel I). Außerdem wurde versucht, durch Detailprofile die speziellen Quellbildungssituationen abzuklären. Einige der beobachteten Detailprofile sind zusammen mit kurzen Beschreibungen anschließend dargestellt (Fig. 6–10). Es wird bei diesen Beschreibungen nur die unmittelbare Situation rund um die Quelle geschildert, also die Verhältnisse zwischen stauendem Gestein und Speichergestein innerhalb eines Sedimentationszyklus bis zum nächsthöherliegenden Stauhorizont.

**Quelle Nr. 1:** an der Straße Au–Fischingen, Koord. 714780/251620, 662 m ü. M., ungefaßt.

*Profilbeschreibung* (Fig. 6):

1. 6–8 m Nagelfluh.
2. 3,5 m Mergel, beige-oliv, z. T. grau-bläulich, geschichtet: 0,5–1 cm.
3. 2 m geröllführender Sandstein.
4. 1 m Sandstein, übergend in Nagelfluh.

5. 1,5 m Wechsellagerung von Mergel und Sandsteinschichten.
6. 1,0–1,5 m Süßwasserkalk, dicht, feinkörnig, beige, an der Obergrenze in beigen, kreidigen Mergel übergehend (auf ca. 670 m).
7. 8–10 m Nagelfluhbank (Speichergestein).
8. 0,2 m Sandstein, an dessen Basis die Quelle entspringt (= Quellhorizont).  
Q = 1,2 (min) – 48,0 (max) l/min.
9. 0,6 m kreidiger Mergel, beige, mit Fossilresten (Gastropoden) als Stauhorizont.
10. 0,4 m Süßwasserkalk, zuunterst rötlich-beige, sandig-mergelig, darüber beige, dicht aber auch relativ grobkörnig.

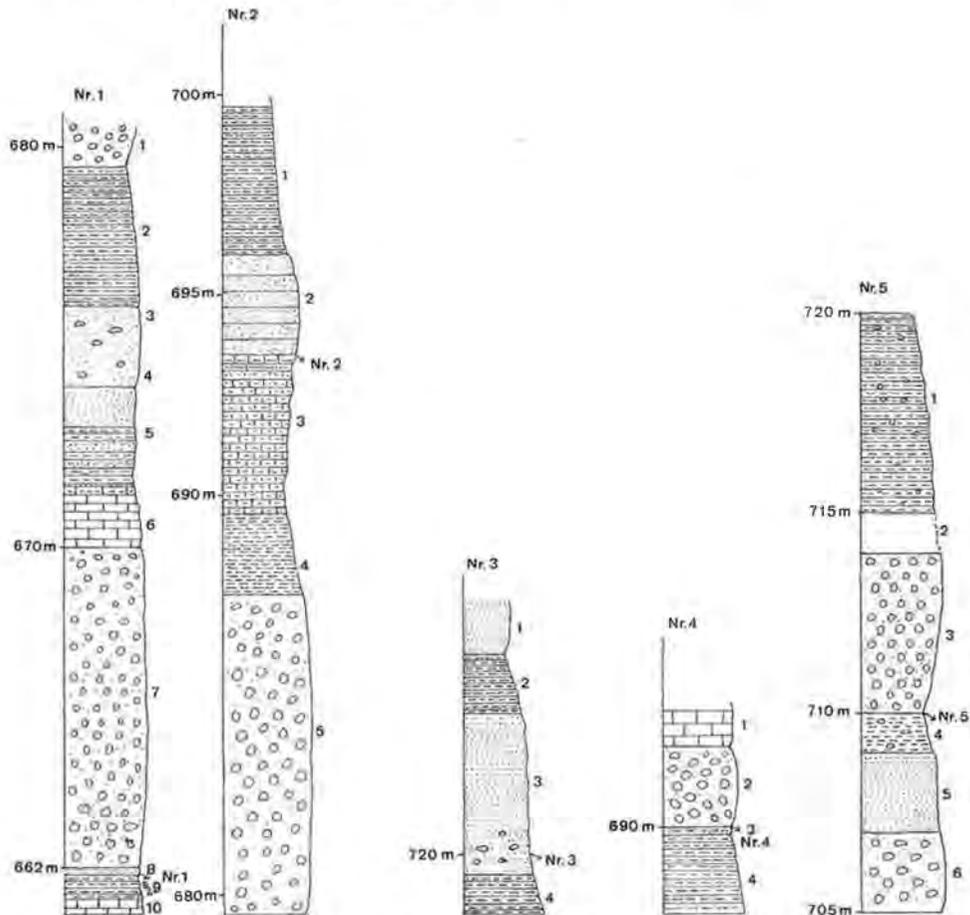


Fig. 6: Lithologische Profile der Quellaufschlüsse Nr. 1–5 (geologische Aufnahme August 1972 und Juni 1973; Profilbeschreibungen im Text; Lage s. Tafel I).

Quelle Nr. 2: bei „Größter Tanne des Kt. Thurgau“ (südlich des Bächleins), Koord. 714720/251630, 695 m ü. M., ungefaßt.

Profilbeschreibung (Fig. 6):

1. 6 m Mergel, etwas Bedeckung.
2. 0,5 m (sichtbar) – ca. 2,5 m Sandstein, grau-oliv, harte Bank, feinkörnig, mit fast

keinen dunklen Gemengteilen (auch kein Muskowit), etwas geklüftet (senkrecht zur Schichtung). Dieser Sandstein dient als Speichergestein und als Quellhorizont: Es entspringen 2 Quellen an der Basis der Bank (die Quelle südlich des Bächleins entspricht Nr. 2) mit je  $Q = 0,5-3,5$  l/min.

3. 2–4 m Mergel – mergeliger Kalk (unter Bedeckung), wirkt als Stauhorizont.
4. 2 m beige-gelber Lehm – lehmiger Mergel mit leichter Schichtung (0,5–1 cm), wirkt auch als Stauhorizont.
5. 8 m Nagelfluh (eventuell Speichergestein für tiefer liegende Quellen).

**Quelle Nr. 3:** südlich vom Klosterblick, unterhalb Sträßchen, Koord. 714525/251360, 720 m ü. M., ungefaßt.

*Profilbeschreibung (Fig. 6):*

1. – Sandstein, feinkörnig, unter Bedeckung, richtige Mächtigkeit nicht sichtbar.
2. 1,0–1,5 m Mergel, beige-gelb, Schichtung von 1 cm.
3. 4 m Sandstein, unterhalb und oberhalb des Sträßchens anstehend. Die Quelle tritt 0,5 m oberhalb der Untergrenze der Sandsteinbank aus (oberhalb der sichtbaren Mächtigkeit).  $Q = 5-60$  l/min. Dieser Sandstein ist feinkörnig, grau-oliv, locker, mit Muskowit und fast keinen dunklen Gemengteilen. In der Quellöffnung findet man runde Nagelfluhgerölle sowie auch lehmige Erde. Dieser Sandstein (eventuell mit Nagelfluh-Einschwemmungen) stellt also Speichergestein und Quellhorizont dar.
4. 0,6–1 m Mergel, beige-rötlich, kalkig, Schichtung 5–10 cm, kreidige Struktur mit Fossilienresten (Gastropoden) = Stauhorizont.

**Quelle Nr. 4:** am Bach nördlich Bleiken, Koord. 714950/251400, 690 m ü. M., ungefaßt.

*Profilbeschreibung (Fig. 6):*

Über dem Aufschluß folgt eine kleine Rutsch- oder Sackungszone (bis ca. 700 m), in welcher, direkt über dem Anstehenden, ein Horizont von

1. – Süßwasserkalk, ca. 1–2 m mächtig, vermutet wird.
2. 1–2 m Nagelfluhbank, stellt das Speichergestein und den Quellhorizont dar. An der Basis der Bank entspringt eine kleine, ungefaßte Quelle,  $Q = 0,3-2$  l/min.
3. 0,1–0,2 m Sandstein, feinkörnig-mergelig, braun-beige gefärbt, mit kohligem Pigment zwischen den Schichtfugen (Pflanzenreste). Dieser Sandstein liegt auf der Höhe des Waldweges, unterhalb findet man:
4. 2 m Mergel, siltig, grau-beige, Schichtung (lithage) horizontal mit Schichten von 1 bis 2 cm, mit Fossilresten (Gastropoden) und kohligem Pigment auf den Schicht- und Klüftungsflächen (schwach ausgeprägte Klüftung senkrecht zur Schichtung). Die dünne feinkörnige Sandsteinschicht und dieser darunterliegende Mergel wirken als Stauhorizont.

**Quelle Nr. 5:** am Bach nördlich Bleiken, Koord. 715020/251350, 710 m ü. M., ungefaßt.

*Profilbeschreibung (Fig. 6):*

1. Ca. 5 m Mergel, lehmig, grau-beige, mit faustgroßen sandreichen Zonen. An der Basis der Mergelbank finden sich Einschlüsse von 1 bis 2 cm großen, runden Knollen, aus Sandstein oder Kalk bestehend.
2. Ca. 1 m Lücke, nur Bedeckung sichtbar.

3. 4 m Nagelfluhbank mit Geröllen von 2 bis 5 cm und von 5 bis 20 cm Durchmesser, etwa im Verhältnis 3:2. Die Gerölle bestehen aus Kalk, Dolomit, Sandstein sowie Quarziten und Kristallingestein (granitisch mit grauem Feldspat). Diese Nagelfluh stellt wahrscheinlich das Speichergestein und den Quellhorizont der am Kontakt zur liegenden Mergelschicht entspringenden Quelle dar,  $Q = 0,8-8,5 \text{ l/min}$ . Unterhalb der Quelle befindet sich eine ausgedehnte Quelltuffbildung.
4. Ca. 1 m Mergel-Lehm, gelblich-grau, mit stellenweise ca. 1 cm großen Knöllchen darin, eine leichte Schichtung ist erkennbar (eventuell handelt es sich hier um einen sehr feinkörnigen, verwitterten und zersetzten Mergel). Diese Lehm-Mergelschicht bildet den StauhORIZONT.
5. 1–2 m Sandstein (nur kleiner Aufschluß im Bachbett).
6. 1–2 m Nagelfluh, mit groben Geröllen bis 15 cm Durchmesser, an anderer Stelle feinkiesige und grobe Gerölle, karbonatische, gelblich-sandige Matrix. Mit vielen Kalkgeröllen.

**Quelle Nr. 6:** am Bach nach Bleiken (Ast des Kappegg-Höllbächlis), Koord. 714730/250900, 711–712 m ü. M., ungefaßt.

*Profilbeschreibung (Fig. 7):*

1. Ca. 6 m Mergel, lehmig, hellbeige-gelb gefärbt, dünn geschichtet (0,5–1 cm). Dieser Mergel ist in 2 Aufschlüssen anstehend, dazwischen ca. 2 m Schutt (Bedeckung).
2. Ca. 2–3 m ohne Aufschluß, unter der Bedeckung wird aber Nagelfluh vermutet, welche als Speichergestein für die drei unterhalb dieser Zone entspringenden Quellen dienen könnte.  $Q = 0,6-2,5 \text{ l/min}$ . Der Quellhorizont über der anstehenden Nagelfluhbank wird wahrscheinlich aus einer durchlässigeren Zone in der Nagelfluh oder einer Sandsteinschicht mit höherer Durchlässigkeit gebildet.
3. 4,6–5 m Nagelfluhbank, Gerölle mit 2–5 cm Durchmesser ca. 45%, mit 5–10 cm ca. 40%, bis zum Verhältnis 1:1, mit einzelnen Kristallingeröllen (Diorite), massig, äußerlich gut verkittet.
4. 1–2 m Süßwasserkalk, beige-gelb, leicht mergelig.
5. 1 m Nagelfluh-Rippe, bildet einen kleinen Wasserfall, Gerölle mit 2–5 cm Durchmesser.
6. 1–2 m Schutt, Bedeckung.
7. 0,1–0,5 m Mergel, hellbeige, lehmig.

**Quelle Nr. 7:** beim Klosterblick, Koord. 714580/251770, 752 m ü. M., gefaßt, freier, ungenutzter Abfluß.

*Profilbeschreibung (Fig. 7):*

1. 10 m Nagelfluh, mit sandigem Bindemittel, ziemlich grobkiesig. Zwischen 3 und 4 m oberhalb der Untergrenze wird diese Nagelfluh von einer Sandsteinschicht (0,2 m mächtig) mit einer darüberliegenden Mergelschicht (0,2–0,3 m) durchzogen, welche gegen das östliche Ende des Aufschlusses auskeilen. Die ganze Bank wird von einer Kluft durchzogen, welche sich auch in den nachfolgenden Sandstein fortsetzt: Richtung N–S, Neigung  $75^\circ \text{ E}$ .
2. 2 m Sandstein, siltig-feinkörnig, braun-beige, mit kalkigen Knöllchen.
3. 1–2 m Süßwasserkalk, z. T. mergelig (nach synth. Kartierung).
4. 2–3 m Nagelfluh (nach synth. Kartierung), wirkt als Speichergestein.

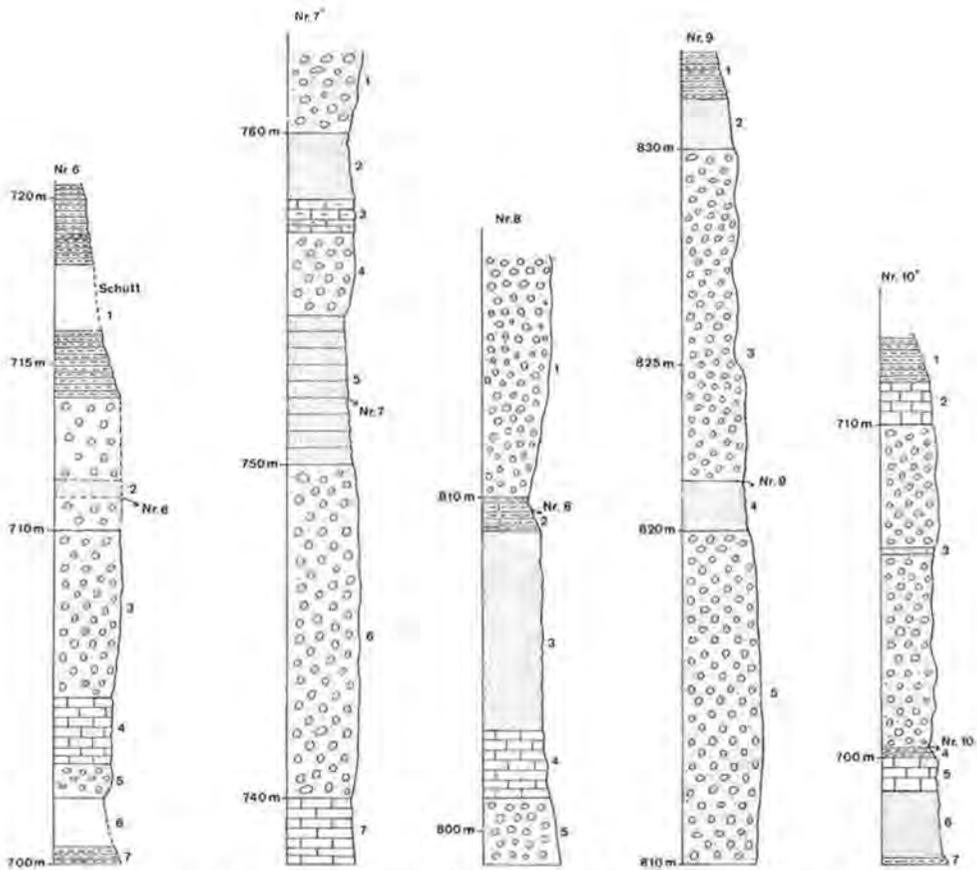


Fig. 7: Lithologische Profile der Quellaufschlüsse Nr. 6–10 (geologische Aufnahme in den Sommermonaten 1972 bis 1974; Profilbeschreibungen im Text; Lage s. Tafel I). Profil teilweise aufgrund der synthetischen geologischen Kartierung (Tafel I) ergänzt.

5. 3–5 m Sandstein, feinkörnig, plattig, grau, wirkt sowohl als Speichergestein als auch als Quellhorizont.  $Q = 8\text{--}60 \text{ l/min}$ . (Wahrscheinlich durchlässiger als umgebende Nagelfluh, darum Drainagewirkung.)
6. 10 m Nagelfluh, mittelkiesig.
7. 1,5–2 m Süßwasserkalk, wirkt als Stauhhorizont; weiß, dicht, knollig.

Quelle Nr. 8: bei Spitzegg, Koord. 714340/249540, 810 m ü. M., ungefaßt.

Profilbeschreibung (Fig. 7):

1. 20 m (– 40 m Gesamtmächtigkeit) Nagelfluh, massig, hart, geklüftet (fast vertikale Klüfte in Richtung NW–SE, E–W und N–S, auf ca. 2–5 m Länge sichtbar, Häufigkeit ca. 1 Kluft pro 3–4 m). Aus einzelnen Klüften entspringen kleinere Quellen an der Untergrenze gegen den Kontakt zum liegenden Mergel. Diese Nagelfluh wirkt also als Speichergestein und als Quellhorizont.
2. 0,5–1 m Mergel, hellbeige, gut geschichtet in Schichten von 0,5 bis 1 cm. Etwa in der Mitte dieses Mergelhorizontes entspringt eine Quelle (= Nr. 8) aus einer Öffnung an einer horizontalen Schichtfläche, welche durch eine kleine Kluft

senkrecht geschnitten wird:  $Q = 0,4-24 \text{ l/min}$ . Dieser Mergel wirkt wohl als Stauhhorizont, ist aber in vertikaler Richtung wegen der Klüftung teilweise durchlässig.

3. 6 m Sandstein, braun-oliv, feinkörnig-siltig.
4. 1,5–2 m Süßwasserkalk, beige-gelb, hart, knollig, z. T. seitlich in Mergel übergehend.
5. Ca. 10 m Nagelfluh, hart, mit kalkig-sandiger Matrix.

**Quelle Nr. 9:** Koord. 714820/249800, ca. 825 m ü. M., gefaßt für Hof Böhi (Vorder-Kappegg).

*Profilbeschreibung (Fig. 7, 8):*

1. 2–3 m Mergel, tonig.
  2. 1–2 m Sandstein, feinkörnig, nicht sehr stark verfestigt.
  3. 8–10 m Nagelfluh (nach Schilderung von Hr. Böhi mit großer, offener Kluft, welche bis auf die darunterliegende Sandsteinschicht durchzieht), ohne oberflächlichen Aufschluß. Dient als Speichergestein und als Quellhorizont.  $Q = 2-12 \text{ l/min}$ .
  4. Ca. 1–2 m Sandstein (nach Schilderung von Hr. Böhi), die Quelle wurde auf diesem Sandsteinniveau gefaßt. Dieser Sandstein kann entweder als poröse Schicht (durchlässiger als die umgebende Nagelfluh) eine drainierende Wirkung haben oder, falls feinkörnig (undurchlässiger als umgebende Nagelfluh), als Stauhhorizont wirken.
  5. 10 m Nagelfluh, mittelkörnig, sandig-kalkiges Bindemittel.
- Die Stelle wurde durch einen Rutengänger entdeckt, war aber auch durch nasses, sumpfiges Gelände aufgefallen. Mit Hilfe eines Baggers wurde die Bedeckung abgedeckt, man fand eine große, tiefe Kluft (Spalte) in der darunterliegenden Nagelfluh (ungefähr in Richtung N–S bis NW–SE verlaufend). Diese Nagelfluh wurde abgedeckt bis zum Sandsteinniveau, das hier etwa 5 m tiefer liegt. Die aus der Spalte entspringende Quelle wurde auf der Höhe der Sandsteinschicht gefaßt (Fig. 8).

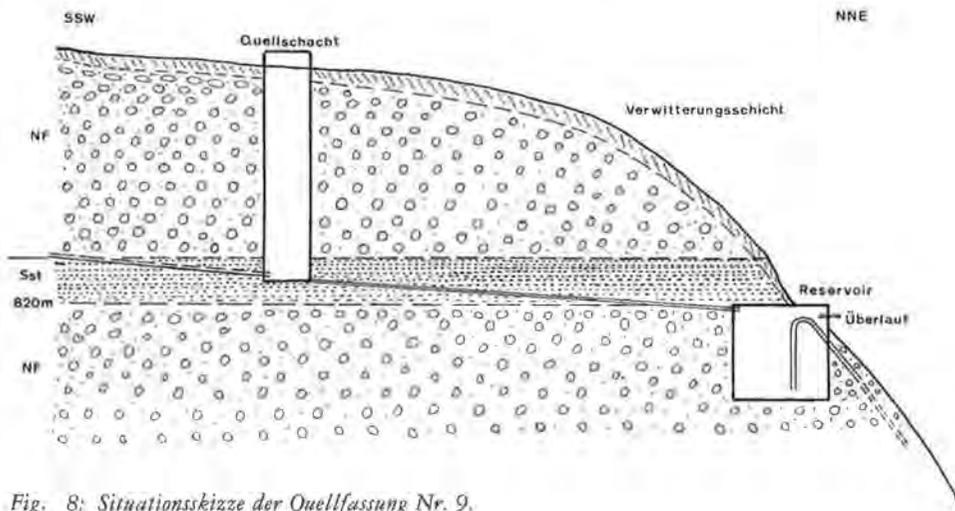


Fig. 8: Situationskizze der Quellfassung Nr. 9.

**Quelle Nr. 10:** bei Neuschür, Koord. 715250/251500, 700 m ü. M., ungefaßt.

*Profilbeschreibung* (Fig. 7, 9):

1. 1–2 m Mergel (nach synth. Kartierung).
2. 0,5–1 m Süßwasserkalk (nach synth. Kartierung).
3. 6–10 m Nagelfluh (6 m anstehend sichtbar), mit sandig-karbonatischer Matrix, fein- bis mittelkiesig. Am oberen Ende der Bank ist die Nagelfluh feinkiesig, mit großen Bollen, Verhältnis von Sand-Feinkies (Durchmesser 1–2 cm) zu Bollen (5–10 cm) = 3:1 (4:1). Die Nagelfluh hat im oberen Bereich (nach 6 m) am Ende des Aufschlusses eine dünne Einschwemmung von Sandstein von 5 bis 10 cm Mächtigkeit. Geröllverteilung an der Basis: Durchmesser 2–5 cm: 5–13 cm = 3:1 (bis 2:1). Nahe der Untergrenze ist die Nagelfluh stark verwittert und beginnt sich in Kies und Lehm zu zersetzen. Diese Nagelfluh stellt das Speichergestein und den Quellhorizont dar, einzelne Quellen treten an der Basis aus (beobachtete Quelle Nr. 10:  $Q = 0,2\text{--}5\text{ l/min}$ ).
4. 0,3–1 m Mergel, hellbeige, tonig-kreidig, Schichtung 1–2 cm, füllt Taschen oder Rinnen zwischen liegendem Süßwasserkalk und der darüberliegenden Nagelfluh aus (der Süßwasserkalk variiert aber auch in seiner Mächtigkeit). Dieser Mergel stellt den Stauhorizont für die darüber, an der Basis der Nagelfluh austretenden Quellen dar.
5. 0,5–1 m Süßwasserkalk, hellbeige-rötlich, fleckig, knollig, an der Obergrenze mergeliger, in den nachfolgenden Mergel übergehend.
6. 2 m Sandstein, grau-beige, fein-mittelkörnig, wird seitlich durch Nagelfluh ersetzt.
7. 0,2 m Mergel, beige-oliv bis gelb-dunkelbraun.

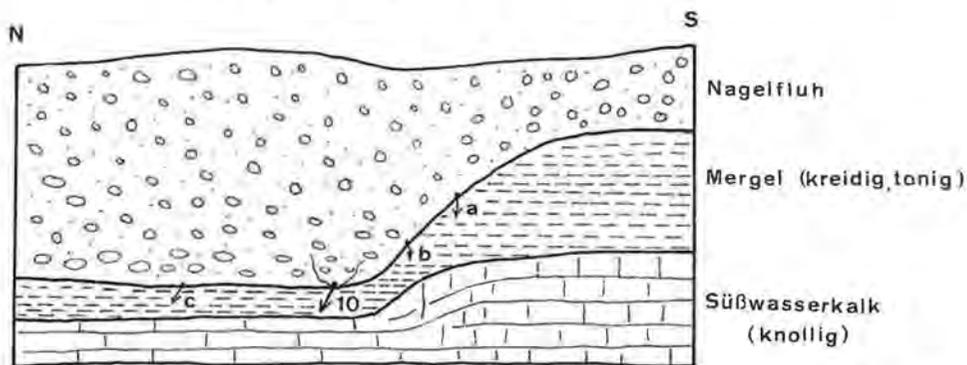


Fig. 9: Geologisch-lithologische Skizze des Aufschlusses bei der Quelle Nr. 10. a, b = Überlaufquellen (nur bei Hochwasser), c = kleine Nebenquelle (gelegentlich trocken), 10 = Hauptquelle (immer wasserführend, mit Verwitterungstasche im Bereich der Quellöffnung).

**Quelle Nr. 11:** oberhalb Straße nach Allenwinden, Koord. 714210/250000, 805 m ü. M., gefaßt.

*Profilbeschreibung* (Fig. 10):

- 1–2 m<sup>1)</sup> Mergel (Obergrenze auf 840 m).
- 3 m<sup>1)</sup> Sandstein, mit Einschaltungen von Süßwasserkalk-Mergel-Zonen.

<sup>1)</sup> Nicht in Fig. 10 dargestellt.

1. Ca. 25 m Nagelfluh (von 835 m an), kann als Speichergestein dienen.
  2. 1–2 m Sandstein, feinkörnig, bankig ausgebildet (eventuell auch Speichergestein).
  3. 5–8 m Nagelfluh, fein- bis mittelkiesig, dient als Speichergestein sowie auch als Quellhorizont, die Quellfassung liegt an der Basis dieser Nagelfluhbank.  $Q = 0,5\text{--}5\text{ l/min}$ .
  4. 4 m Sandstein, feinkörnig bis fast mittelkörnig, braun-beige (wirkt eventuell als Stauhormont gegenüber der oberen Nagelfluh, aber auch als Speichergestein nach unten).
- Die weitere Fortsetzung dieses Profils nach unten wird bei Quelle Nr. 12 beschrieben.

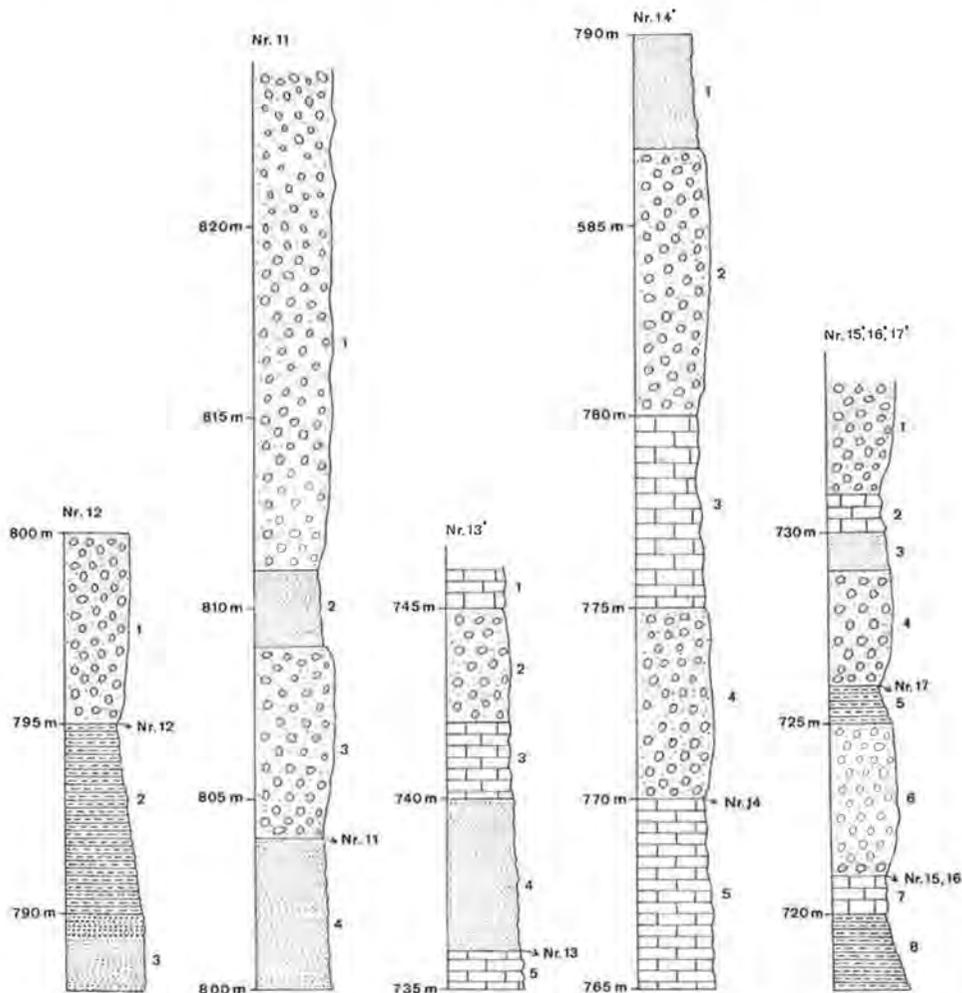


Fig. 10: Lithologische Profile der Quellaufschlüsse Nr. 11–17 (geologische Aufnahme September 1974, Oktober 1975; Profilbeschreibungen im Text; Lage s. Tafel I). Profil teilweise (Nr. 10, 13) bzw. bei völlig fehlendem Aufschluß (Nr. 14, 15–17) vollkommen aufgrund der synthetischen geologischen Kartierung (Tafel I) erstellt.

**Quelle Nr. 12:** etwas unterhalb Straße nach Allenwinden, Koord. 714280/250000, ca. 790 m ü. M., gefaßt.

*Profilbeschreibung* (Fortsetzung von Profil Nr. 11, Fig. 10):

1. 2–5 m Nagelfluh, feinkiesig, wirkt als Speichergestein und stellt auch den Quellhorizont dar. Die Quelle wurde wahrscheinlich an der Basis dieser Nagelfluhbank, über dem darunterliegenden Mergel gefaßt.  $Q = 3\text{--}21$  l/min.
2. 2–5 m Mergel, tonig, beige-gelb-grau gefärbt.
3. Ca. 2 m Sandstein.

**Quelle Nr. 13:** Koord. 714370/251070, 735 m ü. M., gefaßt für Schulhaus Au.

*Profilbeschreibung* (Fig. 10):

1. 0,5–1 m Süßwasserkalk.
2. 2–3 m Nagelfluh.
3. 1–2 m Süßwasserkalk, z. T. mergelig.
4. 2–4 m Sandstein, feinkörnig-siltig, locker, nur schwach verfestigt, hellbraun-beige. Dient als Speichergestein und Quellhorizont.  $Q = \text{ca. } 10\text{--}15$  l/min.
5. Ca. 1 m Süßwasserkalk, hart, knollig, weiß-beige, harte Bank, z. T. etwas geklüftet. Wirkt hier als Stauhhorizont, aber eventuell eine gewisse vertikale Zirkulation möglich.

**Quelle Nr. 14:** Koord. 714430/249960, Quellsammelschacht auf ca. 768 m ü. M., gefaßt für Hof Baumgartner, Hinter-Anderwil.

*Profilbeschreibung* (Fortsetzung von Nr. 12, Fig. 10):

1. 2–3 m Sandstein.
2. 5–7 m Nagelfluh.
3. 3–5 m Süßwasserkalk.
4. 5 m Nagelfluh, stellt Speichergestein und Quellhorizont dar. Die Quelle wird vermutlich an der Basis dieses Nagelfluhhorizontes gefaßt.  $Q = 4\text{--}15$  l/min.
5. Ca. 5 m Süßwasserkalk, stellt den Stauhhorizont dar.

**Quelle Nr. 15:** oberhalb Au, Koord. 714250/250420, 720 m ü. M., gefaßt, aber nicht mehr genutzt.

**Quelle Nr. 16:** oberhalb Au, Koord. 714280/250420, ca. 720 m ü. M., gefaßt.

**Quelle Nr. 17:** Au, Koord. 714350/250320, ca. 725 m ü. M., gefaßt.

*Profilbeschreibung* (Fig. 10):

1. 5–10 m Nagelfluh.
2. 1–1,5 m Süßwasserkalk.
3. Ca. 1 m Sandstein.
4. 3–4 m Nagelfluh, stellt das Speichergestein und den Quellhorizont für Nr. 17 dar, die Quelle wurde an der Basis dieses Nagelfluhhorizontes gefaßt. Quelle Nr. 17:  $Q = 10\text{--}40$  l/min.
5. 0,5–1 m Mergel.
6. 4–5 m Nagelfluh, stellt das Speichergestein und den Quellhorizont für die beiden Quellen dar, welche an der Untergrenze gefaßt wurden. Nr. 15:  $Q = 6\text{--}50$  l/min, Nr. 16:  $Q = 4\text{--}12$  l/min.

7. 1–1,5 m Süßwasserkalk, wirkt als Stauhorizont.
8. 1,5–2 m Mergel, tonig, wirkt auch als Stauhorizont.

## 4. Hydrogeologische Deutung der beobachteten Bildungsbedingungen der Quellen

Im vorliegenden Kapitel soll der Einfluß der Lithologie und Geologie auf die Hydrogeologie abgeklärt werden (zum Beispiel durch die Deutung der Bildungsbedingungen der Quellen). Anschließend wird versucht, die speziellen hydrogeologischen Eigenschaften des untersuchten Abschnittes der Oberen Süßwassermolasse in ihrer Gesamtheit darzustellen.

### 4.1. Definition der hydrogeologischen Einheiten

Die Obere Süßwassermolasse stellt in hydrogeologischer Hinsicht ein sehr komplexes System dar. L. KIRALY (1978) zeigt in seiner Arbeit „La notion d'unité hydrogéologique“ durch theoretische und praktische Überlegungen, daß, um ein hydrogeologisches System in allen seinen Eigenschaften darzustellen, eine Unterteilung in verschiedene „hydrogeologische Einheiten“ („unités hydrogéologiques“) notwendig ist. Jede dieser hydrogeologischen Einheiten (unité hydrogéologique = UHG) ist dabei als „classe d'équivalence dans le champ d'une variable caractérisant la qualité, la quantité ou le mouvement de l'eau souterraine“ definiert (L. KIRALY, 1978). Dies bedeutet: Jede hydrogeologische Einheit (= HGE) stellt eine Äquivalenzklasse (mit jeder anderen definierten hydrogeologischen Einheit durch eine Äquivalenzbeziehung verbunden) in dem Feld einer Variablen dar, welche eine Eigenschaft (wie zum Beispiel die Qualität, die Menge oder die Bewegung) des Grundwassers charakterisiert.

Die allgemeine erweiterte Definition der „unité hydrogéologique“ nach L. KIRALY (1978) lautet: „L'unité hydrogéologique (= UHG) est une classe d'équivalence spatialement connexe dans le champ des variables caractérisant la qualité, la quantité ou le mouvement de l'eau souterraine.“

Zur vollständigen Erfassung eines hydrogeologischen (Gesamt-)Systems, damit sich das gesamte Grundwassergeschehen und die Grundwasservorkommen sowohl quantitativ wie auch qualitativ in allen Aspekten darstellen und beschreiben lassen, ist nach L. KIRALY (1978) die Bestimmung folgender hydrogeologischer Einheiten HGE oder UHG nötig:

- UHG-1 = df. „système d'écoulement hydrodynamique“.
- UHG-2 = classe d'équivalence dans le champ des perméabilités.
- UHG-3 = classe d'équivalence dans le champ des porosités efficaces (nappes libres) ou des coefficients d'emmagasinement (nappe captive).
- UHG-4 = classe d'équivalence dans le champ des conditions imposées.
- UHG-5 = volume de terrain délimité, latéralement et vers le bas, par des frontières imperméables et, vers le haut, par la surface de la nappe.

Die Numerierung der Systeme ist als Reihenfolge zu verstehen, nach welcher zur Bestimmung des hydrogeologischen Gesamtsystems vorzugehen ist: Die Bestimmung jeder dieser hydrogeologischen Einheiten ist notwendig (und kann teilweise unabhängig von den anderen Einheiten erfolgen, wie bei UHG-2 bis -5), doch kann die Bestimmung des „hydrodynamischen Fließsystems“ („système d'écoulement hydrodynamique“) nur durchgeführt werden (zum Beispiel durch Modellsimulationen),

wenn alle übrigen hydrogeologischen Einheiten (UHG-2 bis -5) bestimmt oder abgeschätzt wurden und quantitativ oder wenigstens qualitativ bekannt sind.

Eigentlich repräsentiert die hydrogeologische Einheit UHG-1, welche die „hydrodynamischen Fließsysteme“ darstellt (nach Definition L. KIRALY, 1978), das hydrogeologische Gesamtsystem, da zu deren Bestimmung die Kenntnis aller übrigen hydrogeologischen Einheiten nötig ist. Durch die Kenntnis der „hydrodynamischen Fließsysteme“, welche den Ablauf der hydrodynamisch-hydrogeologischen Prozesse darstellen, lassen sich auch alle Eigenschaften eines Grundwassers, welches aus einem bestimmten Grundwasserleiter stammt, sowohl in qualitativer als auch in quantitativer Hinsicht, ableiten.

Wenn hier trotzdem der Begriff des hydrogeologischen (Gesamt-)Systems gebraucht wird, so um damit die Gesamtheit aller hydrogeologischen Einheiten und ihrer Aussagen in einem Begriff zusammenzufassen.

Bei den meisten Untersuchungen wird mit der Bestimmung der hydrogeologischen Einheiten UHG -5, -3 und -2 begonnen.

In den meisten Fällen sind aber diese nur unvollständig, an einzelnen Stellen bestimmbar und müssen oft aus Punktmessungen über die Gesamtheit des einbezogenen Gebietes sinngemäß interpoliert werden.

Im Gebiet des Aubachs (Obere Süßwassermolasse) sind fast nur indirekte oder qualitative Bestimmungen dieser hydrogeologischen Einheiten möglich. Für dieses Gebiet wird deshalb folgendes Vorgehen zur Bestimmung der hydrogeologischen Einheiten (UHG oder HGE) gewählt, wobei diese – den geologischen Gegebenheiten des Gebietes angepaßt – etwas anders umschrieben werden müssen:

**HGE-5 (UHG-5):** „Hydrogeologischer Gesamtkomplex, bestehend aus durchlässigen Schichten, welche die einzelnen, zum Teil zusammenhängenden Grundwasservorkommen darstellen, und (relativ) undurchlässigen Schichten, welche Trennungsflächen zwischen den einzelnen Grundwasservorkommen repräsentieren, in bestimmter gegebener Anordnung, so daß die einzelnen Grundwasservorkommen seitlich (horizontal) und nach unten vertikal durch undurchlässige Grenzen, sowie nach oben entweder durch den freien Wasserspiegel oder eine darüberliegende undurchlässige Schicht (bei gespanntem Grundwasser) begrenzt und damit definiert sind.“

Es wird also hier bei dieser Definition nicht jede grundwasserführende Schicht für sich allein betrachtet, sondern die Gesamtheit der Grundwasserleiter, welche zum gleichen orographischen, hydrologisch-morphologischen Einzugsgebiet gehören. Dabei wird nicht ausgeschlossen, daß eine Verbindung zwischen einzelnen grundwasserführenden Schichten an bestimmten Stellen (singuläre Punkte) bestehen kann.

**HGE-4 (UHG-4):** „Äquivalenzklasse im ‚Feld‘ herrschender, auf das hydrogeologische System einwirkender Bedingungen.“ Da es sich hier um ein Gebiet mit Quellen, also Grundwasservorkommen mit freiem Austritt handelt, kommen hier Speisung, Potentialverhältnisse an den Grenzflächen und austretende Wassermengen der Quellen in Betracht.

Für die weiteren hydrogeologischen Einheiten HGE-3, -2, -1 können die Definitionen nach L. KIRALY (1978) für UHG-3, -2, -1 direkt übernommen werden.

**HGE-3 (UHG-3):** Äquivalenzklasse im „Feld“ der nutzbaren Porosität oder des Speicherkoeffizienten S (nur notwendig für instationäre Berechnungen, zur Bestimmung des Vorrats).

**HGE-2 (UHG-2):** Äquivalenzklasse im Feld der Durchlässigkeiten.

**HGE-1 (UHG-1):** Hydrodynamische Fließsysteme (nach I. TOTH, 1962, 1963).

Da im Aubachgebiet, in der Oberen Süßwassermolasse, als erste äußerlich festzu-

haltende Merkmale die Geologie und Lithologie sowie der Ursprung der Quellen zur Verfügung standen, wurden zuerst diese Phänomene untersucht und auch kartographisch festgehalten. Anschließend galt es, die Arbeitshypothese zu beweisen, daß die Quellen nicht an beliebiger Stelle entstanden sind, sondern in enger Beziehung zur Lithologie und den lokalen geologischen Verhältnissen stehen.

Es kann nun als These postuliert werden, daß diese synthetische lithologische Karte eine hydrogeologische Einheit im Sinne von HGE-5 darstellt, falls die kartierten lithologischen Einheiten mit hydrogeologisch wirksamen, sich unterscheidenden Einheiten identisch sind.

Um also die synthetische lithologische Karte als eine HGE-5 beweisen zu können, müssen zuerst die hydrogeologischen Einheiten im „Feld“ der Porositäten und der Durchlässigkeiten (Permeabilitäten) abgeklärt werden, also HGE-3 und HGE-2. Diesem Zweck dienen unter anderem die in Abschn. 3 angeführten lithologischen Beschreibungen von Quellentstehungssituationen: Unter der Annahme, daß jede Quelle einen natürlichen Abfluß aus einem bestimmten Grundwassergebiet mit einem dazugehörigen Grundwasserleiter darstellt, dieser Wasseraustritt aber durch eine bestimmte Anordnung der Durchlässigkeiten bewirkt wird, lassen sich aus den Situationen, in welchen Quellen entstanden sind, Rückschlüsse auf die Verteilung der Durchlässigkeiten (in schwächerem Maße auch der Porositäten) ziehen, einmal rein qualitativ, aber durch eventuelle Abschätzungen auch quantitativ (im Maßstab des Einzugsgebietes einzelner Quellen). Zur konkreten hydrogeologischen Deutung der Quellbildungssituationen müssen noch folgende Bedingungen vorausgesetzt werden:

- Die Schichtung im Bereich des Untersuchungsgebietes liegt  $\pm$  horizontal, mit Ausnahme von stratigraphisch-faziellen Grenzen (Fazieswechsel bewirkt Wechsel in der Lithologie).
- Die lithologischen Einheiten stellen in sich selbst  $\pm$  homogene Körper dar, aus dem homogenen lithologischen Aufbau wird auf eine homogene (aber nicht unbedingt isotrope) Verteilung der physikalischen Parameter geschlossen.
- Die Quellen bedürfen eines Speichergesteins als Grundwasserleiter, sie stellen die natürlichen Abflüsse dieser Grundwasserleiter dar, und ihre Entstehung ist an bestimmte, allgemein gültige hydrogeologische und hydrodynamische Gesetze und Bedingungen gebunden.

## 4.2. Qualitative Klassierung der lithologischen Einheiten bezüglich ihrer Durchlässigkeit

Gemäß den vorausgesetzten Bedingungen können die in Abschn. 3 geschilderten Quellbildungssituationen durch folgende hydrogeologische Überlegungen anhand der anschließend dargestellten vereinfachten Beispiele erklärt werden.

### 4.2.1. Durchlässigkeitsbeziehungen der verschiedenen lithologischen Einheiten in bezug auf die Nagelfluh

1a) Sandsteinschicht zwischen zwei Nagelfluhhorizonten (Fig. 11):

In diesem Fall muß

$$K_{\text{Sst}} > K_{\text{NF}}$$

sein, da der Sandsteinhorizont als Drain (Leitungshorizont) wirkt (durchlässiger als die umgebende Nagelfluh). Der darüberliegende Nagelfluhhorizont stellt aber trotzdem (vor allem wegen der größeren Mächtigkeit) das hauptsächliche Speichergestein dar. Da aber die Differenz und damit auch das Verhältnis  $K_{\text{Sst}}/K_{\text{NF}}$  nicht sehr groß ist, wird

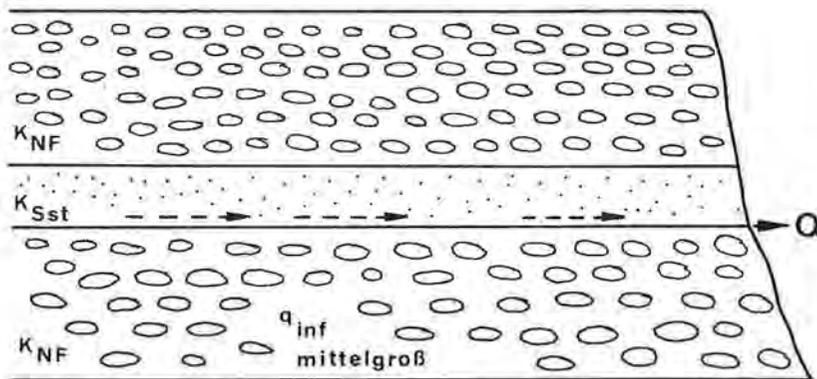


Fig. 11: Skizze der Quellbildungssituation 1a (beobachtet an den Quellen Nr. 6 und 7).  $K$  = Durchlässigkeitsbeiwert, NF = Nagelfluh, Sst = Sandstein.

noch ein beträchtlicher Teil des Wassers durch die Sandsteinschicht hindurch in die darunterliegende Nagelfluh infiltrieren ( $q_{inf}$  = mittelgroß, Fig. 11).

1b) Nagelfluhhorizont über Sandsteinschicht (mit eventuell darunter folgendem Nagelfluhhorizont, Fig. 12):

In diesem Fall ist die Sandsteinschicht, hier in feinkörniger Ausbildung, weniger durchlässig als der Nagelfluhhorizont, somit tritt das Wasser, welches im Nagelfluhhorizont gespeichert wird, direkt an der Basis der Nagelfluhbank aus. Die Sandsteinschicht wirkt also in diesem Fall gegenüber der Nagelfluh als Stauhorizont, so daß also

$$K_{NF} > K_{Sst} \text{ (feinkörnig)}$$

ist.

Die unterhalb der Sandsteinschicht liegende Nagelfluhschicht übt in diesem Fall keinen direkten Einfluß aus, sie erhält aber auch eine gewisse Infiltration aus dem Sandstein, deren Betrag aber sehr klein ist.

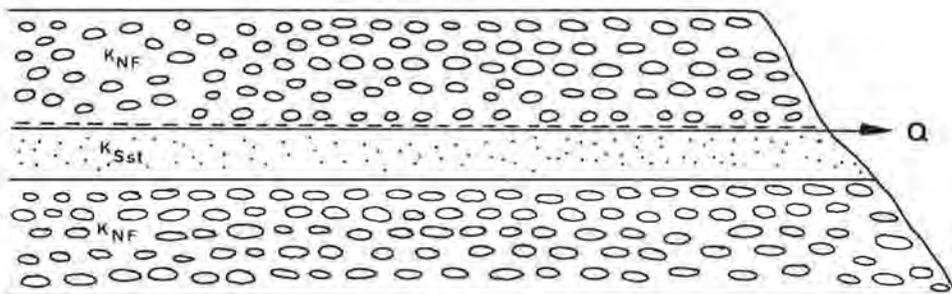


Fig. 12: Skizze der Quellbildungssituation 1b (beobachtet an den Quellen Nr. 9 und 11). Legende s. Fig. 11.

1c) Nagelfluhhorizont direkt über Süßwasserkalkhorizont (Fig. 13):

Hier wiederum ist die Nagelfluh die wasserspeichernde und wasserleitende Schicht, der Süßwasserkalk stellt in allen beobachteten Fällen den undurchlässigeren Stauhorizont dar, so daß also gilt:

$$K_{NF} > K_{SWK}$$

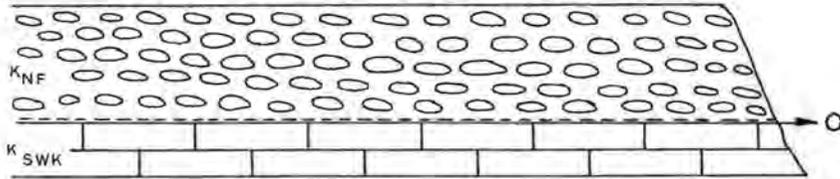


Fig. 13: Skizze der Quellbildungssituation 1c (beobachtet an den Quellen Nr. 14, 15 und 16). SWK = Süßwasserkalk.

1d) Nagelfluhhorizont direkt über Mergelhorizont (Fig. 14):

Auch in diesem Fall stellt die Nagelfluh die wasserspeichernde und wasserleitende Schicht dar, die Mergelschicht die (relativ) undurchlässige Basis (Stauhorizont). Das Wasser aus der Nagelfluhschicht tritt bevorzugt an der Basis, an der Grenze zur Mergelschicht aus.

Falls der Mergel stark geklüftet ist (senkrecht zur Schichtung), so erhöht sich seine Durchlässigkeit. Im Fall der Quelle Nr. 8 erfolgt der Quellaustritt innerhalb des Mergelhorizontes. Da dieser Mergel gut geklüftet ist, hat sich wahrscheinlich das Austrittsniveau der Quelle im Laufe der Zeit von der Basis der Nagelfluhbank nach unten in die Mergelschicht verlegt, eventuell unter dem Einfluß des hydrostatischen Druckes oder von Lösungserscheinungen.

Es gilt also allgemein nach den Beobachtungen:

$$K_{NF} > K_{Mergel}$$

Da diese Mergel teilweise stark tonig sind, wurden sie speziell beobachtet. Es zeigte sich für diese Fälle durch die Feldbeobachtung, daß die Durchlässigkeit der Mergel mit zunehmendem Tongehalt noch weiter abnimmt, es gilt also:

$$K_{Mergel} > K_{Ton}$$

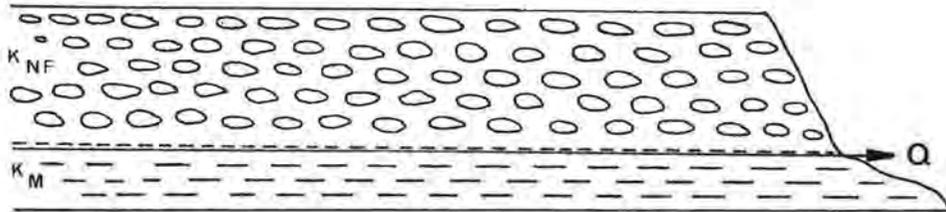


Fig. 14: Skizze der Quellbildungssituation 1d (beobachtet an den Quellen Nr. 5, 8, 12 und 17). M = Mergel.

Schlußfolgerungen aus 1a, 1b, 1c, 1d (Durchlässigkeitsbeziehungen der verschiedenen lithologischen Einheiten in bezug auf die Nagelfluh):

Beim Vergleich der Fälle 1b, 1c, 1d mit Beispiel 1a zeigt sich (durch Feldbeobachtungen) folgende Eigenschaft der Nagelfluh: Wenn die drainierende, sammelnde Schicht des durchlässigeren Sandsteinhorizontes fehlt, so ergibt sich eine diffusere Verteilung der Wasseraustritte (an der Basis der Nagelfluhbank), es gibt in diesem Fall unzählige austretende Quellen mit einer sehr kleinen, durchschnittlichen Ergiebigkeit. Bei größer werdender Durchlässigkeitsdifferenz zwischen der Nagelfluh und der darunterfolgenden Schicht nimmt die spezifische Ergiebigkeit ( $q_{spez}$ ) des Nagelfluhhorizontes etwas zu, da dadurch die Infiltration in und durch die darunterliegende Schicht abnimmt.

#### 4.2.2. Durchlässigkeitsbeziehungen der verschiedenen lithologischen Einheiten in bezug auf die Sandsteinschichten

##### 2a) Das Verhältnis von Sandstein zur Nagelfluh:

Die Beziehung zwischen Nagelfluh und Sandstein wurde in den Beispielen 1a und 1b bereits dargestellt, grobkörnige Sandsteine sind in der Regel durchlässiger als die durchschnittlichen Nagelfluhhorizonte. Doch mit Abnahme der Korngröße, bei Zunahme der Silt-Fraktion werden die Sandsteine gleich und zum Teil sogar weniger durchlässig als Nagelfluhhorizonte.

Nach 1a:  $K_{Sst} > K_{NF}$

Nach 1b:  $K_{NF} > K_{Sst(\text{feinkörnig})}$

##### 2b) Sandsteinhorizont über Süßwasserkalk (Fig. 15):

Die Sandsteinhorizonte sind in allen beobachteten Fällen durchlässiger als die Süßwasserkalkschichten. Die Sandsteine stellen poröse Grundwasserleiter dar, das in ihnen enthaltene Wasser wird durch die weniger durchlässige Süßwasserkalkschicht an der Basis zum Austritt gezwungen. Es gilt also nach den Beobachtungen:

$$K_{Sst} > K_{SWK}$$

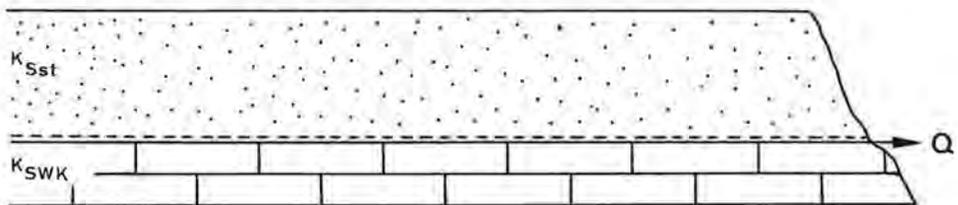


Fig. 15: Skizze der Quellbildungssituation 2b (beobachtet an Quelle Nr. 13).

##### 2c) Sandsteinhorizont über Mergelschichten (Fig. 16):

Auch bei dieser Konfiguration stellt der Sandsteinhorizont immer die grundwasserleitende und -speichernde Schicht dar, hingegen tritt die Mergelschicht (wie auch die Mergelkalkschicht) immer als undurchlässiger Stauhorizont auf (undurchlässig im relativen Sinn, zu verstehen als schlechter durchlässig), das Wasser tritt in allen beobachteten Fällen an der Basis des Sandsteinhorizontes aus:

$$K_{Sst} > K_{Mergel}$$

Wie im Fall 1d erwähnt, nimmt mit zunehmendem Tongehalt der Mergel deren Durchlässigkeit weiter ab, somit wird gleichzeitig die Differenz der Durchlässigkeitswerte zwischen Sandsteinen und Mergeln größer.

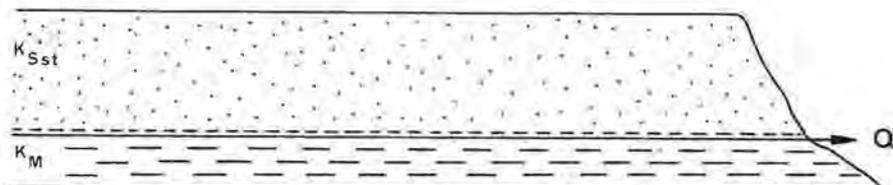


Fig. 16: Skizze der Quellbildungssituation 2c (beobachtet an den Quellen Nr. 2 und 3).

#### 4.2.3. Durchlässigkeitsbeziehungen der weiteren lithologischen Einheiten (Süßwasserkalke, Mergel, Tone) zueinander

Da nun die Beziehungen der Durchlässigkeiten der Nagelfluh und der Sandsteine zueinander und zu den weiteren lithologischen Einheiten dargestellt wurden, bleiben nun noch die Beziehungen von Süßwasserkalk zu Mergeln sowie der Mergel zu den Tonen (zum Teil siltig-lehmig) zu beschreiben. Da aber alle diese lithologischen Einheiten recht wenig durchlässig sind, ist es schwierig, durch Quellbeobachtungen Aussagen über deren Durchlässigkeit zu gewinnen.

Bei der Kartierung konnte folgende Beobachtung gewonnen werden: Beim Ausstreichen von Mergel- und in noch stärkerem Maße von Tonhorizonten ist die ganze Umgebung extrem sumpfig, was bedeutet, daß diese Horizonte sehr schlecht durchlässig sind. Bei harten Süßwasserkalkhorizonten treten einzelne Quellen aus (vorwiegend über mergeligen Zonen), doch trifft man auch auf trockene Kalkbänder. Aus allen Erfahrungen und Beobachtungen bei der Kartierung von mehreren hundert Quellen kann folgende Gliederung der schlecht durchlässigen Schichten vorgeschlagen werden:

$$K_{\text{SWK}} \gg K_{\text{Mergel}} \gg K_{\text{Ton}}$$

wobei bei der vertikalen Durchlässigkeit größere Differenzen angenommen werden müssen:

$$K_{\text{SWK(vertikal)}} \gg K_{\text{Mergel}} \gg K_{\text{Ton}}$$

da vor allem die Süßwasserkalke sich extrem anisotrop (schlechte Durchlässigkeit in horizontaler, höhere Durchlässigkeit in vertikaler Richtung infolge von Klüftung senkrecht zur Schichtung) verhalten.

#### 4.2.4. Durchlässigkeitsbeziehungen zwischen mehr als zwei lithologischen Einheiten

Als Spezialfall kann hier die unter 1a und 1b erwähnte lithologische Konstellation einer Sandsteinschicht zwischen zwei Nagelfluhhorizonten erwähnt werden. Aus den Fällen 1a und 1b lassen sich folgende allgemeine Gesetzmäßigkeiten ableiten:

Falls  $K_{\text{Sst}} > K_{\text{NF}}$  (wie im Fall 1a), so spielen alle drei Horizonte hydrogeologisch eine wichtige Rolle:

- die Nagelfluh oberhalb als Speichergestein (réservoir),
- die Sandsteinschicht als Drain,
- die Nagelfluh unterhalb als relativ undurchlässigerer Stauhorizont.

Falls jedoch  $K_{\text{NF}} > K_{\text{Sst}}$  (wie bei 1b), so sind nur die beiden obersten Horizonte hydrogeologisch für die Quellbildung von Bedeutung:

- die Nagelfluh oberhalb als Speichergestein sowie als Quellhorizont,
- die Sandsteinschicht als undurchlässiger Stauhorizont. Der untere Nagelfluhhorizont spielt dagegen bei dieser Verteilung der Durchlässigkeiten keine Rolle mehr, er dient höchstens als Grundwasserleiter für einen eventuellen tieferen Quellhorizont.

Aus diesen beiden Beispielen läßt sich folgende Aussage ableiten: **Es sind immer die relativen Unterschiede in der Durchlässigkeit für eine Quellbildung maßgebend.** Diese Aussage soll durch drei weitere Beispiele veranschaulicht werden (siehe auch lithologische Profile der Quellentstehungen, Fig. 6–10).

*4a) Nagelfluhhorizont über einem Sandsteinhorizont mit darunterliegendem Süßwasserkalk (sowie einem darunterfolgenden Nagelfluhhorizont, Fig. 17):*

Auch in diesem Fall ist  $K_{\text{Sst}} > K_{\text{NF}}$ , doch wird die drainierende Wirkung der Sandsteinschicht (siehe 1a) noch durch die darunterliegende undurchlässigere Schicht

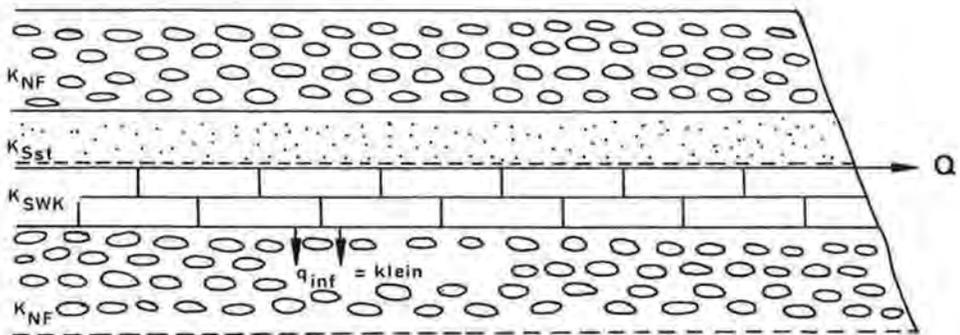


Fig. 17: Skizze der Quellbildungssituation 4a.

aus Süßwasserkalk verstärkt. Die Infiltration in den unteren Nagelfluhhorizont ist deshalb sehr klein.

Es können folgende Beziehungen der Durchlässigkeiten festgehalten werden:

$$\begin{aligned} K_{Sst} &> K_{NF}, \\ K_{Sst} &> K_{SWK}, \\ \text{sowie } K_{NF} &> K_{SWK} \text{ (nach 1c)}. \end{aligned}$$

4b) Nagelfluh über Sandsteinschicht mit tieferliegendem Mergel- und Süßwasserkalkhorizont (Fig. 18):

Auch in diesem Fall ist der Mergelhorizont weniger durchlässig als die darüberliegende Sandsteinschicht:

$$\begin{aligned} K_{Sst} &> K_{NF}, \\ K_{Sst} &> K_{Mergel}. \end{aligned}$$

Aus weiteren Beobachtungen wird vermutet, daß

$$K_{SWK} > K_{Mergel}.$$

Deshalb ist hier eigentlich nur der Mergelhorizont für die Quellbildung direkt von Bedeutung, er stellt das undurchlässige Niveau unterhalb des Sandsteins dar, über den Süßwasserkalk läßt sich deshalb hier keine direkte Aussage machen.

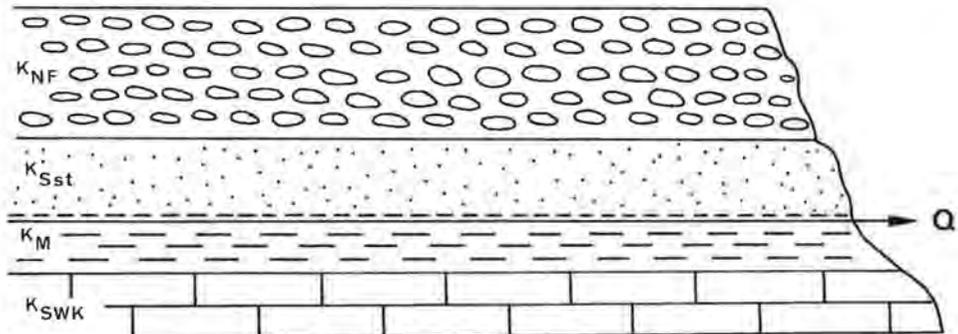


Fig. 18: Skizze der Quellbildungssituation 4b (beobachtet bei Quelle Nr. 1).

4c) Nagelfluh über einer Sandstein- und einer Mergelschicht (Fig. 19):

$$K_{NF} > K_{Sst \text{ (feink.)}} \text{ (siehe 1b).}$$

Da hier der Sandstein feinkörnig-mergelig und deshalb weniger durchlässig als die Nagelfluh ist (wie bei 1b), stellt dieser Sandstein den eigentlichen Stauhohizont dar,

welcher die Quellbildung hervorruft. Der darunterliegende Mergelhorizont kann eventuell den Effekt noch etwas verstärken, da er noch undurchlässiger ist als die Sandsteinschicht. Diese Quellentstehungssituation ist vollkommen mit jener von 1b vergleichbar, obwohl dort ein durchlässiger Nagelfluhhorizont unterhalb des undurchlässigeren Sandsteinhorizontes folgt.

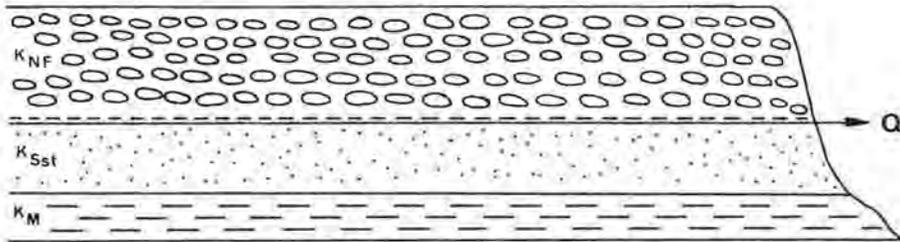


Fig. 19: Skizze der Quellbildungssituation 4c (beobachtet bei Quelle Nr. 4).

#### 4.2.5. Zusammenhang zwischen der Durchlässigkeit der einzelnen Schichten und der Quellbildung

Bei der Entstehung einer Quelle ist immer ein Unterschied in der Durchlässigkeit maßgebend (bei den vorangehend behandelten Fällen stratigraphisch-lithologisch bedingt):

Die untere, nächsttieferliegende Schicht muß undurchlässiger sein als die darüberliegende. Die Quelle entspringt in diesem Fall an der Untergrenze der oberen, durchlässigeren Schicht zur unteren, stauenden Schicht.

Sind mehrere verschiedene Schichten (Horizonte) vorhanden, so lassen sich folgende Verhältnisse unterscheiden:

Ist die obere Schicht weniger durchlässig als die darunterfolgende (jedoch mit einer genügend großen absoluten Durchlässigkeit und einer genügend großen effektiven Porosität), so wird die obere Schicht durch die untere drainiert (unter der Voraussetzung, daß unterhalb der unteren Schicht eine undurchlässigere Lage folgt: Beispiele 1a, 4a, 4b).

Ist die untere Schicht weniger durchlässig als die darüberliegende, so wirkt sie als Grundwasserstauer, dabei ist die nächsttieferliegende Schicht qualitativ ohne Einfluß auf die Quellbildung; ist sie durchlässiger, so erhält sie eventuell eine geringe „vertikale Infiltration“, ist sie noch weniger durchlässig, so fällt diese „vertikale Infiltration“ praktisch ganz weg, wodurch eventuell die Ergiebigkeit des Quellhorizontes noch etwas gesteigert wird. In den meisten Fällen ist jedoch die vertikale Sickerung so unbedeutend, daß dieser Einfluß vernachlässigt werden kann.

Da nun einzig die relativen Unterschiede der Durchlässigkeiten der einzelnen lithologischen Einheiten für die Quellbildung wichtig und wirksam sind, ist es in erster Näherung genügend, ihre Durchlässigkeiten qualitativ, d. h. die gegenseitigen relativen Beziehungen zueinander zu kennen.

Aufgrund der untersuchten Bildungsbedingungen der Quellen (Nr. 1 bis Nr. 17) können über die relativen Durchlässigkeiten der lithologischen Haupteinheiten, in ihrer Beziehung zueinander, erste Aussagen gemacht werden. Aus den verschiedenen Beispielen geht hervor:

$K_{Sst(\text{grob-mittel})} \rangle K_{NF}, K_{NF} \rangle K_{SWK}, K_{NF} \rangle K_{Mergel}, K_{NF} \rangle K_{Ton}, K_{NF} \rangle K_{Sst(\text{feinkörnig})}$ ,  
 $K_{Sst} \rangle K_{NF}, K_{Sst} \rangle K_{SWK}, K_{Sst} \rangle K_{Mergel}, K_{Sst} \rangle K_{Ton}$

durch weitere Feldbeobachtungen:

$K_{\text{SWK}} \rangle K_{\text{Mergel}}, K_{\text{SWK}} \rangle K_{\text{Ton}}, K_{\text{Mergel}} \rangle K_{\text{Ton}}$ .

Somit kann nun für die lithologischen Einheiten der Oberen Süßwassermolasse folgende relative Klassierung entsprechend ihrer Durchlässigkeiten vorgenommen werden:

$K_{\text{Sst(grob-mittelkörnig)}} \rangle\} K_{\text{NF}} \rangle\} K_{\text{Sst(mittel-feinkörnig)}} \rangle\} K_{\text{SWK}} \rangle\} K_{\text{Mergel}} \rangle\} K_{\text{Ton}}$ .

### 4.3. Quantitative Abschätzung der Durchlässigkeit mit Hilfe des Quellabflusses

Da für die lithologischen Einheiten der Oberen Süßwassermolasse des Hörnlischuttfächers im untersuchten Gebiet des Aubachs Durchlässigkeitsbestimmungen (welche eine notwendige Voraussetzung für die Durchführung von Modellsimulationen darstellen), weder durch Bohrungen noch durch Labormessungen (Durchströmungsversuche) vorhanden waren, wurde eine Methode entwickelt, welche erlaubt, diese mit Hilfe des Quellabflusses abzuschätzen.

Um die notwendigen Bestimmungsmethoden darstellen zu können, müssen zuerst die hydrodynamischen Gesetze und Bedingungen, welche eine Quellbildung ermöglichen, betrachtet werden.

#### 4.3.1. Definition des Zustandes bei freiem Wasseraustritt

Bei den Quellen tritt das Wasser selbständig aus, es muß also im Inneren des Reservoirgesteins (Grundwasserleiters) ein hydrodynamisches Gleichgewicht herrschen (oder sich einstellen). Die Verhältnisse und Vorgänge in und um den Grundwasserleiter der Quellen stellen also als Ganzes ein „selbstregulierendes System“ dar, d. h. jede Änderung (der Randbedingungen) führt wieder zum Gleichgewicht, ein Ungleichgewicht entsteht höchstens vorübergehend durch zeitliche Verzögerung.

Als Grundlagen für die Berechnungen gelten folgende Annahmen:

##### a) Grundsätzliche Voraussetzungen:

1. Das Gesetz von Darcy trifft zu (lineares Widerstandsgesetz).
2. Der Grundwasserleiter (Speichergestein) wird unten durch eine undurchlässigere Schicht begrenzt.
3. Die Theorie von Dupuit ist anwendbar, dies bedeutet folgende zusätzliche Voraussetzungen:
  - Es wird angenommen, daß die grundwasserführende Schicht annähernd ein homogenes und isotropes Medium bezüglich der Durchlässigkeit darstellt (was bei vorwiegend interstitieller Porosität und Durchlässigkeit angenommen werden darf; damit wird in erster Näherung die Rolle der Klüfte ausgeklammert, der auf diese Weise bestimmte Durchlässigkeitswert entspricht somit einem räumlichen Mittelwert für den Fall eines anisotropen Mediums).
  - Der Aktionsradius (rayon d'action) bleibt zeitlich konstant.

##### b) Spezielle Voraussetzungen für Bestimmungen an Quellen:

1. Zur Berechnung der Durchlässigkeit  $K$  wird angenommen, daß die ganze Ergiebigkeit einer Quelle (débit) aus dem Reservoirgestein (Grundwasserleiter), der lithologischen Schicht entstammt, aus (unterhalb) welcher die Quelle entspringt (das Reservoirgestein kann sich aber aus mehreren permeablen und porösen Horizonten zusammensetzen).

2. Es wird angenommen, daß genügend tief im Gesteinskörper die gesamte wasserleitende und speichernde Schicht gesättigt ist, so daß die Grundwassermächtigkeit  $H$  gleich der Mächtigkeit  $e$  der grundwasserleitenden Schicht ist.
  - 3.a Da der Quellaustritt selbständig erfolgt, wird angenommen, daß der Wasserspiegel in der Nähe des Quellaustrittes ungespannt ist und sich selbständig auf das Niveau des Quellaustrittes einstellt.
  - 3.b Falls der Quellaustritt an der Basis der grundwasserführenden Schicht erfolgt, so wird angenommen, daß sich der Wasserspiegel auf die Höhe der Basis eingestellt hat und somit die Absenkung  $\Delta$  gleich der Grundwassermächtigkeit  $H$  gesetzt werden kann (da  $h = 0 \rightarrow H - h = \Delta = H$ ).
  - 3.c Da das Wasser bei der Quelle selbständig austritt, wird auch angenommen, daß sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat und somit der Absenkkeil (-zylinder) oder Absenkkegel flach verläuft (nicht zu große Geschwindigkeit beim Quellaustritt).
- 4.3.2. Theoretische hydrodynamische Überlegungen zur Berechnung der Durchlässigkeit von Speichergesteinen mit Hilfe des Quellabflusses
- 4.3.2.1. Situation bei vorwiegend interstitieller Porosität und Durchlässigkeit bei punktförmigem Quellaustritt

Ein punktförmiger Quellaustritt kann entstehen durch eine lokale Depression der wasserführenden Schicht (Potentialdifferenz), durch eine lokale Inhomogenität im Gestein (mit lokal erhöhter Durchlässigkeit) oder durch kleine, lokale Risse im Gestein.

Um einen solchen punktförmigen Quellaustritt herum bildet sich ein ungefähr halbkreisförmiger Absenktrichter (-konus) aus, mit dem Quellaustritt im Zentrum.

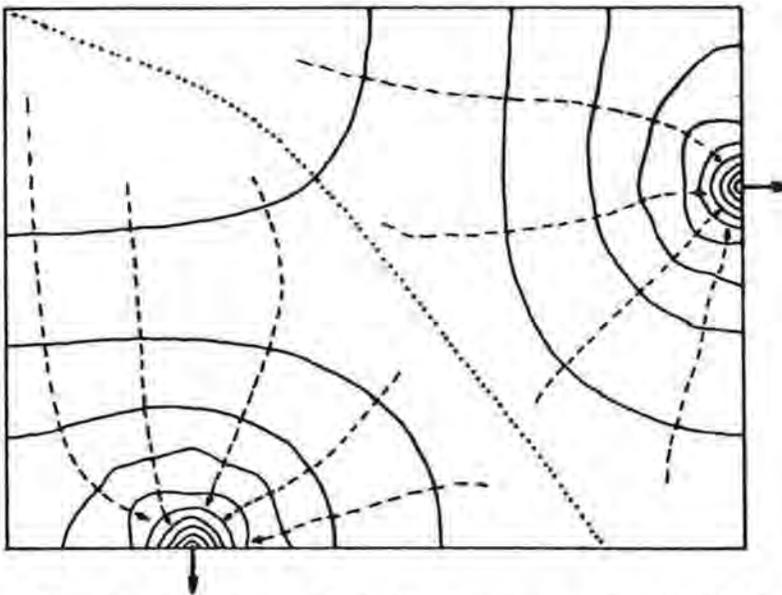


Fig. 20: Äquipotentiallinien, Strömungsverlauf und Fließsysteme in „zweidimensionalen“, horizontalen Grundwasserleitern bei vorwiegend interstitieller (homogener) Durchlässigkeit, in Abwesenheit einer organisierten Verkarstung (L. KIRALY, 1978).

Diese Situation hat L. KIRALY (1978) mit Hilfe einer mathematischen Modellsimulation nachgebildet. Die obenstehende Abbildung (Fig. 20) ist dieser Arbeit entnommen.

Bei der Berechnung wird deshalb für diesen Fall die Theorie von Dupuit modifiziert und auf einen halbkreisförmigen Absenktrichter (Absenktrichter) angewendet (Fig. 21).

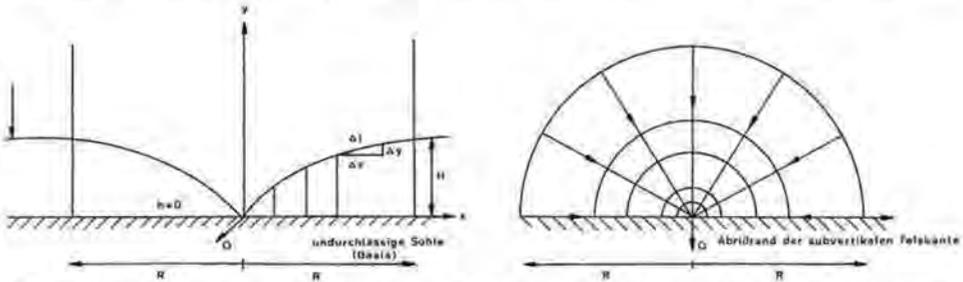


Fig. 21: Schema des Absenkbereiches bei punktförmigem Quellaustritt (links Vertikalschnitt, rechts Horizontalschnitt). Weitere Erläuterungen im Text.

Ableitung der Formel für  $Q$  (nach Theorie von Dupuit, Fig. 21):

Zuflußmenge nach Dupuit für einen ganzen kreisförmigen Absenktrichter (für kompletten Brunnen):

$$Q = V_x \cdot 2\pi \cdot x \cdot y.$$

Zuflußmenge für halbkreisförmigen Absenktrichter (punktförmiger Quellaustritt):

$$Q_{\text{Quelle}} = \frac{V_x \cdot 2\pi xy}{2} = V_x \pi xy.$$

Die weitere Ableitung erfolgt genau entsprechend der Theorie von Dupuit. Für  $x = R$ ,  $y = H$  ergibt sich die allgemeine Formel für  $Q$  nach Dupuit für punktförmigen Quellaustritt bei freiem, ungespanntem Wasserspiegel:

$$Q_{\text{Quelle}} = \frac{\pi}{2} K \frac{H^2 - h^2}{\ln(R/r)}.$$

$$H^2 - h^2 = (2H - \Delta) \Delta,$$

wobei  $\Delta$  = Absenkung (m);

$Q_{\text{Quelle}}$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) = Abflußmenge, Ergiebigkeit der Quelle;

$H$  (m) = Mächtigkeit des ungestörten Grundwassers, außerhalb des Absenktrichters;

$h$  (m) = Grundwassermächtigkeit bei der Quelle (bei Austritt an der Basis  $h = 0$ );

$R$  (m) = Aktionsradius der Quelle (Bereich des Absenktrichters);

$r$  (m) = Radius der Austrittsöffnung der Quelle.

Da nun mit Hilfe der Ergiebigkeit der Quellen versucht werden soll, die Durchlässigkeit des betreffenden Speichergesteins (Grundwasserleiters) zu bestimmen, wird diese Formel nach  $K$  aufgelöst:

$$K \text{ (m/s)} = \frac{2}{\pi} Q_{\text{Quelle}} \cdot \frac{\ln(R/r)}{H^2 - h^2}.$$

Bei einer Bestimmung von  $K$  nach dieser Formel über die Quellergiebigkeit sind aber einzelne Größen nur indirekt durch vereinfachte Annahmen oder Abschätzungen bestimmbar.

*Bestimmungsmöglichkeiten der einzelnen Größen:*

- h wird bestimmt als vertikaler Abstand der Quellöffnung von der Basis der wasserführenden Schicht.
- H ist nur schwierig abzuschätzen, es wird daher als Maximalwert gleich der Mächtigkeit der grundwasserspeichernden Schicht gesetzt, dies unter der Voraussetzung, daß das Grundwasser im Bereich des Absenktrichters ungespannt ist.
- r entspricht der Größe der Quellöffnung, im allgemeinen 0,5–1 cm.
- R der Aktionsradius der Quelle ist am schwierigsten abzuschätzen, da darüber überhaupt keine Beobachtungen bestehen. Zu Vergleichszwecken können die Erfahrungen bei Pumpversuchen in Brunnen und Piezometern (Bohrungen) herangezogen werden, mit dem Unterschied, daß bei den Quellen, im Gegensatz zu Pumpversuchen in Brunnen, sich das Gleichgewicht vollständig eingestellt hat (da ja die Quellen ständig fließen). Der Aktionsradius der Quellen ist deshalb etwas größer als bei Bohrungen mit Pumpversuchen in einem Gestein mit vergleichbarer Durchlässigkeit.

Verschiedene Autoren haben aus den Erfahrungswerten bei Pumpversuchen folgende Formeln vorgeschlagen, um den Aktionsradius abzuschätzen (zitiert nach E. RECORDON, 1969):

SICHARDT:  $R = 3000 (H - h) \sqrt{K}$   
 $K$  in m/s,  $R$ ,  $H$ ,  $h$  in m.

CHOULTSE:  $R = \sqrt{\frac{6 H K t}{m_e}}$

$t$  = Pumpdauer in s,  $m_e$  = wirksame, effektive Porosität.

Diese Formel ist homogen nach dem Gesichtspunkt der Dimensionen.

E. RECORDON (1969) gibt folgende Erfahrungswerte für den Aktionsradius (rayon d'action) bei Lockergesteinen an:

$R = 65$  m für tonige Sande und Feinsande (Pumpmenge 2–8 l/min).

$R = 150$ – $200$  m für Kiese (Pumpmenge 1500–2000 l/min).

Aufgrund der Abschätzungen mit Hilfe der zwei Formeln und den Erfahrungswerten nach E. RECORDON (1969) wird ein Aktionsradius  $R$  von 100 m für die weiteren Berechnungen der Durchlässigkeit der Nagelfluhen und Sandsteine der Oberen Süßwassermolasse als wahrscheinlichster Näherungswert angenommen. Außerdem ist zu bemerken, daß das Verhältnis  $R/t$  bei der Berechnung von  $K$  nach der Formel von Dupuit nur einen kleinen Einfluß ausübt, da nur der Logarithmus dieses Verhältnisses verwendet wird.

Aus diesem Grunde erlaubt die Formel von Dupuit, auf die Quellen angewendet, eine recht genaue Abschätzung der Durchlässigkeit.

4.3.2.2. Situation bei vorwiegend interstitieller Porosität und Durchlässigkeit bei punktförmigem Quellaustritt, bewirkt durch eine einzelne Kluft senkrecht zur Schichtung (stratification).

Auch in diesem Fall wird angenommen, daß der Quellaustritt an der Basis der durchlässigen Schicht, an der Schichtgrenze zur undurchlässigen Schicht erfolgt. Es

wird angenommen, daß dieser vertikale (oder subvertikale) Riß nur eine beschränkte horizontale Ausdehnung besitzt und als Drain wirkt, mit Abfluß an der Basis, der Grenzfläche zur undurchlässigen, darunterliegenden Schicht.

Da der umgebende Gesteinskörper außerhalb des Risses (Kluft) ein poröses (porosité primaire d'interstice), homogenes Medium darstellt (zumindest in bezug auf die horizontale Durchlässigkeit und die Porosität), so stellt sich die Absenkzone um den Riß herum (welcher als Drain wirkt) als eine Kombination eines halbkreisförmigen Absenkkegels am Ende des Risses (mit konvergierenden Stromlinien) und eines zweidimensional-symmetrischen, zylindrischen Absenkbereiches auf der ganzen Längserstreckung des Risses dar.

Diese geschilderten Verhältnisse lassen sich durch eine Skizze mit Vertikal- und Horizontalschnitt darstellen (Fig. 22).

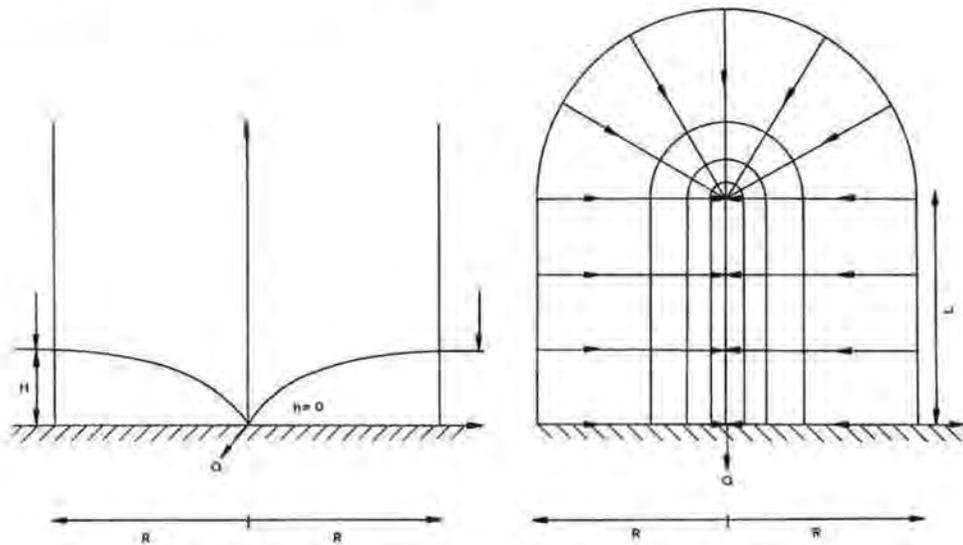


Fig. 22: Schema des Absenkbereiches bei Kluft senkrecht zur Schichtung mit punktförmigem Quellaustritt (links Vertikalschnitt, rechts Horizontalschnitt).  $L$  = Länge der Kluft.

Die in diesem Fall anzuwendende Formel wird wie beim ersten Beispiel (Abschn. 4.3.2.1.) nach der Theorie von Dupuit abgeleitet und stellt eine Kombination der Formeln für einen halbkreisförmigen Absenktrichter und einen zweidimensional-symmetrischen, zylindrischen Absenkbereich (mit beiderseitigem Zufluß) dar.

$$Q_{\text{Quelle}} = K (H^2 - h^2) \left( \frac{\pi}{2 \ln(R/r)} + \frac{L}{R} \right) \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$K = \frac{2 R Q \ln(R/r)}{(H^2 - h^2) (\pi R + 2 L \ln(R/r))} \text{ (m/s)}$$

Der praktische Wert dieser Formel ist etwas beschränkter, da meistens die horizontale Länge  $L$  der Kluft nicht oder nur schlecht bekannt ist und deshalb nur geschätzt werden kann.

4.3.2.3. Situation bei diffusem Wasseraustritt (bei interstitieller Porosität und Durchlässigkeit) entlang der Schichtgrenze, des Ausstreichens der Schichten, des subvertikalen Abrißrandes

Solche diffuse, verteilte Wasseraustritte können vor allem bei den weniger durchlässigen Schichten an der Schichtgrenze zur darunterliegenden, noch undurchlässigeren Schicht beobachtet werden (Fig. 23). So kann beobachtet werden, wie das Wasser diffus an der Basis einer kreidigen Süßwasserkalkschicht austritt, an der Schichtgrenze zum darunterliegenden tonigen Mergel.

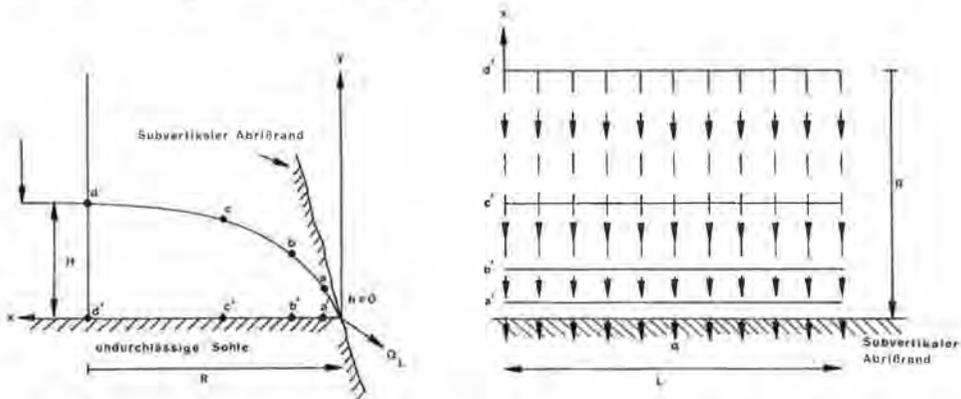


Fig. 23; Schema des Absenkbereiches bei diffusem Wasseraustritt entlang der Schichtgrenze (links Vertikalschnitt, rechts Horizontalschnitt). Weitere Erläuterungen im Text.

Die in diesem Fall anzuwendende Formel ist jene nach Dupuit für einen zweidimensional-zylindrischen Absenkbereich mit einseitigem Zufluß:

$$Q = \frac{K L}{2 R} (H^2 - h^2)$$

Q bedeutet hier also die Abflußmenge für die betrachtete Länge L der Austrittslinie.

$$\frac{Q}{L} = q = \frac{K}{2 R} (H^2 - h^2)$$

q stellt hier den spezifischen Abfluß pro Längeneinheit dar ( $m^3/s.m$ ).

Für die Durchlässigkeit K ergibt sich folgender Ausdruck:

$$K = \frac{Q}{L} \cdot \frac{2 R}{(H^2 - h^2)} = q \cdot \frac{2 R}{H^2 - h^2}$$

wobei  $H^2 - h^2 = (2 H - \Delta) \Delta$ .

h = Grundwassermächtigkeit entlang der Austrittslinie, wird für den Fall der diffusen Wasseraustritte gleich Null, also  $h = 0$ . Um die Formel anwenden zu können, sollte das Gelände nicht zu flach, eher steil und die Austrittslinie möglichst gerade sein.

4.3.2.4. Abschätzung des Grenzwertes der Durchlässigkeit von Schichten, welche das ganze Jahr an der Schichtoberfläche feucht bleiben

Damit die Austrittsoberfläche der betreffenden Schicht feucht bleibt, muß die

Wasseraustrittsmenge dieser Schicht mindestens gleich groß oder größer sein als die mittlere tägliche (maximale) Verdunstungsrate.

In diesem Berechnungsbeispiel wird diese Austrittsoberfläche als senkrecht zur Schichtung angenommen (sie kann aber auch geneigt sein). Das Wasser tritt, wie die Beobachtungen zeigen, aus den einzelnen Schichtungsfugen (Schichtung von 1 bis 2 cm) hervor, also eigentlich flächenhaft, diffus. Um nun die Berechnung zu ermöglichen, wird die gesamte Ergiebigkeit der betreffenden Schicht als auf eine Schichtfuge konzentriert angenommen, somit kann die Berechnungsformel für den diffusen, linienhaften Wasseraustritt angewendet werden (Fig. 24).

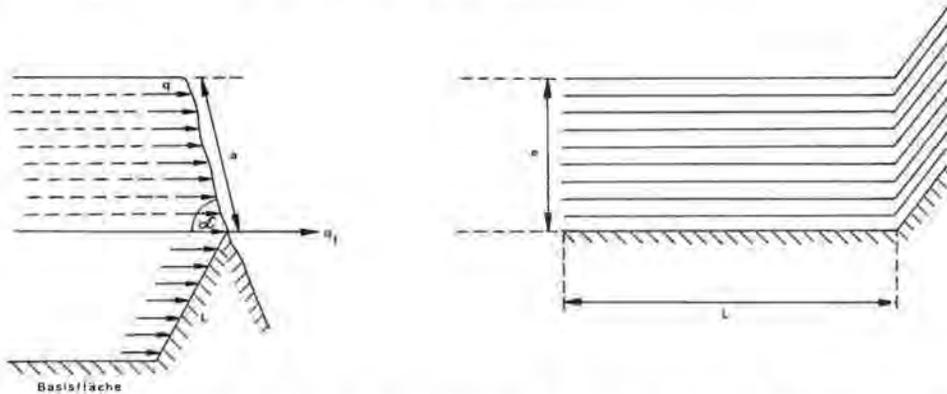


Fig. 24: Schema zur Abschätzung des Grenzwertes der Durchlässigkeit für Schichten, welche an der Oberfläche feucht bleiben (links Vertikalschnitt, rechts Horizontalschnitt). Weitere Erläuterungen im Text.

Definitionen:

Gesamtaustrittsmenge (Gesamtabfluß  $\text{m}^3/\text{s}$ ):

$$Q = \frac{\sum q}{S}$$

wobei  $S = a \cdot L$  die Austrittsoberfläche darstellt.

Mittlere Austrittsmenge pro Flächeneinheit ( $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ ):

$$q_s = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{a \cdot L}$$

Gesamtaustrittsmenge pro Längeneinheit ( $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ ):

$$q_L = \frac{Q}{L} = q_s \cdot a = q_s \cdot \frac{e}{\sin \alpha}$$

Nach diesen Definitionen wird die Formel für den diffusen, linienhaften Wasseraustritt angewendet:

$$K = \frac{Q}{L} \cdot \frac{2R}{H^2 - h^2} = q_L \cdot \frac{2R}{H^2 - h^2} = q_s \cdot a \cdot \frac{2R}{H^2 - h^2}$$

Für die weitere Berechnung werden folgende Vereinfachungen eingeführt:  
 $H = e$ ,  $h = 0$  (Austritt des Wassers an der Basis), sowie  $a = e$  (Austrittsoberfläche senkrecht zur Schichtung,  $\sin \alpha = 1$ ).

Zur Berechnung der Durchlässigkeit der Schicht bei Annahme einer Austrittsmenge, welche der mittleren Verdunstungsrate entspricht, wird wie folgt vorgegangen:

$q_s = e_p$ , wobei  $e_p$  die mittlere Verdunstungsrate darstellt;

$q_L = q_s \cdot a = e_p \cdot a$ , da  $a = e$  gesetzt wird:

$$q_L = e_p \cdot e$$

in die Formel für  $K$  eingesetzt:

$$K = q_L \cdot \frac{2R}{H^2 - h^2} = e_p \cdot e \cdot \frac{2R}{H^2 - h^2}$$

$$K = e_p \cdot e \cdot \frac{2R}{e^2}$$

Es ist festzuhalten, daß dieser Grenzwert nur bei flächenhaft-diffusem Wasseraustritt gültig ist (da in diesem Fall auf der ganzen Austrittsoberfläche Wasser verdunsten kann), nicht aber für punktförmige oder linienförmige, also konzentrierte Quellaustritte. In diesen Fällen kann die Durchlässigkeit des Gesteins kleiner sein als dieser Grenzwert, da die Verdunstung ja nur an der Quellöffnungsfläche wirksam sein kann (oder anschließend am Abfluß außerhalb der Quellöffnung; hier ist auch oft zu beobachten, daß nach einigen Metern Verlauf der gesamte Abfluß der Quelle verschwunden ist).

*Beispiel: Abschätzung für eine feuchte Mergelschicht von 5 m Mächtigkeit.*

Im Jahr 1975 beträgt die maximale monatliche Verdunstung im Aubachgebiet (nach Wasserbilanzschreiber) 113,2 mm (Juli 1975). Dies ergibt eine mittlere tägliche Verdunstungsrate von 3,65 mm/Tag (im Monat Juli 1975).

Durch Einsetzen der folgenden Werte:

$e_p = 3,65 \text{ mm/Tag} = 3,65 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{Tag} = 4,23 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ,  
 $e = 5 \text{ m}$ ,  $R = 100 \text{ m}$  erhält man:

$$K = e_p \cdot e \cdot \frac{2R}{e^2} = 4,23 \cdot 10^{-8} \cdot 5 \cdot \frac{200}{25} = 1,69 \cdot 10^{-6} \text{ m/s.}$$

Der Grenzwert der Durchlässigkeit für eine 5 m mächtige Mergelschicht, falls  $q_s = e_p$ ,  $\alpha = 90^\circ$ , ist also gleich

$$K = 1,69 \cdot 10^{-6} \text{ m/s.}$$

Dieser Wert stellt bei der gegebenen Mächtigkeit den kleinsten Wert dar; wird  $\alpha$  kleiner als  $90^\circ$ , so muß  $K$  mit der größeren, verdunstenden Oberfläche größer werden. Wird zum Beispiel  $\alpha 45^\circ$ , so ergibt sich für  $K = 2,39 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ .

Andererseits nimmt  $K$  unter den angenommenen Bedingungen mit zunehmender Mächtigkeit  $e$  der Schicht ab (da  $H = e$ ,  $h = 0$ ): für  $e = 10 \text{ m}$  ergibt sich für  $K = 8,45 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$  ( $\alpha = 90^\circ$ ).

Darum stellt dieser Grenzwert der Durchlässigkeit nur einen relativen Wert dar, gültig für eine bestimmte Mächtigkeit  $e$  (m) und eine bestimmte Neigung  $\alpha$  der Austrittsoberfläche.

Da die Mächtigkeit der Mergelschichten meistens bei etwa 5 m liegt und die Lage

der Austrittsfläche oft steil ist, wird als allgemeiner Grenzwert für K bei feuchter Oberfläche ( $q_s = e_p$ )

$$K = 1,69 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$$

angenommen.

#### 4.3.3. Auswertung der Quellergiebigkeit

Für die im Aubachgebiet beobachteten hydrogeologischen und lithologischen Verhältnisse konnten mit Hilfe der dargestellten Bestimmungsformeln durch die Abflüsse der Quellen die Durchlässigkeiten der verschiedenen lithologischen Horizonte quantitativ bestimmt werden. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 1–4 mit Angabe der verwendeten Ausgangswerte und der Bestimmungsmethode dargestellt.

Tab. 1: Berechnung der Durchlässigkeiten (K) und Transmissivitäten (T) der verschiedenen Speichergesteine mit Hilfe der adaptierten Formel von Dupuit aus der Ergiebigkeit der Quellen (gültig für punktförmige Quellen, mit Halbkreis-Absenkekegel, s. Abschn. 4.3.2.1.,  $R = 100 \text{ m}$ ,  $r = 0,01 \text{ m}$ . Weitere Erläuterungen im Text, Lage der Quellen s. Tafel I).

Quelle Nr.	Lithologie Aquifer	e (m) = H (m) = $\Delta$ (m)	Q (l/min)	K (m/s)	T (m <sup>2</sup> /s)
1	NF (Sst)	10	1,2 min. 48,0 max.	$1,17 \cdot 10^{-6}$ $4,69 \cdot 10^{-5}$	$1,17 \cdot 10^{-5}$ $4,69 \cdot 10^{-4}$
2	Sst	ca. 2	0,5 min. 3,5 max.	$1,22 \cdot 10^{-3}$ $8,55 \cdot 10^{-3}$	$2,44 \cdot 10^{-5}$ $1,71 \cdot 10^{-4}$
3	Sst	ca. 4	5,0 min. 60,0 max.	$3,05 \cdot 10^{-3}$ $3,66 \cdot 10^{-4}$	$1,22 \cdot 10^{-4}$ $1,47 \cdot 10^{-3}$
4	NF	ca. 2	0,3 min. 2,0 max.	$7,33 \cdot 10^{-6}$ $4,89 \cdot 10^{-5}$	$1,47 \cdot 10^{-5}$ $9,77 \cdot 10^{-5}$
5	NF	ca. 4	0,8 min. 8,5 max.	$4,89 \cdot 10^{-6}$ $5,19 \cdot 10^{-5}$	$1,95 \cdot 10^{-5}$ $2,08 \cdot 10^{-4}$
6	NF	ca. 3	0,6 min. 2,5 max.	$6,51 \cdot 10^{-6}$ $2,71 \cdot 10^{-5}$	$1,95 \cdot 10^{-5}$ $8,14 \cdot 10^{-5}$
7	NF (3 m) Sst (2,5 m)	5,5	8,0 min. 60,0 max.	$2,58 \cdot 10^{-5}$ $1,94 \cdot 10^{-4}$	$1,42 \cdot 10^{-4}$ $1,07 \cdot 10^{-3}$
8	NF (mit Klüften)	ca. 20	0,35 min. 24,0 max.	$8,55 \cdot 10^{-8}$ $5,86 \cdot 10^{-6}$	$1,71 \cdot 10^{-6}$ $1,17 \cdot 10^{-4}$
9	NF (mit Kluft)	ca. 10	2,0 min. 12,0 max.	$1,95 \cdot 10^{-6}$ $1,17 \cdot 10^{-5}$	$1,95 \cdot 10^{-5}$ $1,17 \cdot 10^{-4}$
10	NF	ca. 6	0,2 min. 5,0 max.	$5,43 \cdot 10^{-7}$ $1,36 \cdot 10^{-5}$	$3,26 \cdot 10^{-6}$ $8,14 \cdot 10^{-5}$
11	NF	ca. 35	0,5 min. 5,0 max.	$3,99 \cdot 10^{-8}$ $3,99 \cdot 10^{-7}$	$1,40 \cdot 10^{-6}$ $1,40 \cdot 10^{-5}$

Quelle Nr.	Lithologie Aquifer	e (m) = H (m) = Δ (m)	Q (l/min)	K (m/s)	T (m <sup>2</sup> /s)
12	NF	6	3,0 min. 21,0 max.	$8,14 \cdot 10^{-6}$ $5,70 \cdot 10^{-5}$	$4,89 \cdot 10^{-5}$ $3,42 \cdot 10^{-4}$
13	Sst	4	ca. 10 min. 15 max.	$6,11 \cdot 10^{-5}$ $9,16 \cdot 10^{-5}$	$2,44 \cdot 10^{-4}$ $3,66 \cdot 10^{-4}$
14	NF	5	4,0 min. 15,0 max.	$1,56 \cdot 10^{-5}$ $5,86 \cdot 10^{-5}$	$7,82 \cdot 10^{-5}$ $2,93 \cdot 10^{-4}$
15	NF	5	6,0 min. 50,0 max.	$2,35 \cdot 10^{-5}$ $1,95 \cdot 10^{-4}$	$1,17 \cdot 10^{-4}$ $9,77 \cdot 10^{-4}$
16	NF	5	4,0 min. 12,0 max.	$1,56 \cdot 10^{-5}$ $4,69 \cdot 10^{-5}$	$7,82 \cdot 10^{-5}$ $2,35 \cdot 10^{-4}$
17	Sst (1 m) NF (4 m)	5	10,0 min. 40,0 max.	$3,91 \cdot 10^{-5}$ $1,56 \cdot 10^{-4}$	$1,95 \cdot 10^{-4}$ $7,82 \cdot 10^{-4}$

Tab. 2: Berechnung der Durchlässigkeiten und Transmissivitäten der verschiedenen lithologischen Einheiten mit Hilfe der Quellergiebigkeit (Berechnungsformel für Klustquellen senkrecht zur Schichtung, s. Abschn. 4.3.2.2., weitere Erläuterungen im Text, Lage der Quellen s. Tafel I).  
R = 100 m, r = 0,01 m.

Quelle Nr.	Lithologie Aquifer	H (m) = Δ (m) = e (m)	Q (l/min)	L (m)	K (m/s)	T (m <sup>2</sup> /s)
8	NF (Mergel)	20	0,35 min. 24,0 max.	0,5	$8,31 \cdot 10^{-6}$ $5,70 \cdot 10^{-6}$	$1,66 \cdot 10^{-6}$ $1,14 \cdot 10^{-4}$
9	NF	10	2,0 min. 12,0 max.	10	$1,23 \cdot 10^{-6}$ $7,39 \cdot 10^{-6}$	$1,23 \cdot 10^{-5}$ $7,39 \cdot 10^{-5}$
7	NF (3 m) Sst (2,5 m)	5,5	8,01 min. 60,0 max.	10	$1,63 \cdot 10^{-5}$ $1,22 \cdot 10^{-4}$	$8,96 \cdot 10^{-5}$ $6,72 \cdot 10^{-4}$

Tab. 3: Abschätzung der Durchlässigkeiten und Transmissivitäten der verschiedenen lithologischen Einheiten bei diffusum Wasseraustritt (Berechnungsformel für diffusen, linienförmigen Wasseraustritt, s. Abschn. 4.3.2.3.). R = 100 m.

Lokalität des Wasser- austrittes	Lithologie Aquifer	H (m) = Δ (m) = e (m)	Q (pro L) (l/min · cm)	L (m)	q (m <sup>3</sup> /s · m)	K (m/s)	T (m <sup>2</sup> /s)
Aubach, östlich, Ufer, auf 630 m unterhalb Bündt	Stußwasser- kalk	5	$10^{-4}$ min. 0,0833 max. = (5 l/h)	0,01 1,00	$1,67 \cdot 10^{-7}$ $1,39 \cdot 10^{-6}$	$1,33 \cdot 10^{-6}$ $1,11 \cdot 10^{-5}$	$6,67 \cdot 10^{-6}$ $5,56 \cdot 10^{-5}$

Mittelwert für Süßwasserkalk:  $K_m = 6,22 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$   
 $T_m = 3,11 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

(Die Ergiebigkeit von  $10^{-4} \text{ l/min} \cdot \text{cm}$  entspricht dem Volumen von  $1 \text{ cm} \cdot 1 \text{ cm}$  Grundfläche und  $1 \text{ mm}$  Höhe, das sich pro Minute bildet.)

Tab. 4: Abschätzung der Durchlässigkeit nach der Berechnungsformel für Schichten, welche feucht bleiben (s. Abschn. 4.3.2.4.).  $R = 100 \text{ m}$ .

Lokalität des Wasseraustrittes	Lithologie Aquifer	e (m)	$e_p$ (mm/Tag)	$\alpha^\circ$	K (m/s)	T ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
Aubach Mergelschicht	Mergel	5	3,65	90	$1,69 \cdot 10^{-6}$	$8,45 \cdot 10^{-6}$

Die Resultate der einzelnen Berechnungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:  
*Die mittleren Durchlässigkeiten der verschiedenen lithologischen Einheiten:*

**Sandsteine:**  $K_m = 1,08 \cdot 10^{-4} \pm 0,42 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$   
 (Quellen Nr. 2, 3, 7, 13)

**Nagelfluhen:**  $K_m = 3,25 \cdot 10^{-5} \pm 0,92 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$   
 (Quellen Nr. 1, 4–6, 8–12, 14–17)

Diese Werte wurden mit Hilfe der Formel für punktförmigen Quellaustritt berechnet (Tab. 1). Für einzelne Quellen, an welchen Klüfte beobachtet wurden, ist noch die Formel für Kluftquellen (Klüfte senkrecht zur Schichtung) angewendet worden. Der Vergleich der Ergebnisse der beiden Berechnungsarten läßt sich wie folgt deuten: Die Berechnungen mit der Formel für Kluftquellen ergeben eine kleinere Durchlässigkeit für das feste Gestein, also für die interstitielle Gesamtdurchlässigkeit. Der Grund dafür ist, daß mit der Formel für Kluftquellen eine größere Zuflußzone bei der Berechnung angenommen wird. In diesem Fall resultiert folglich eine kleinere Durchlässigkeit des Gesteins bei gleich großer Ergiebigkeit.

Die weiteren Resultate sind im Sinne von Abschätzungen zu betrachten:

**Süßwasserkalke:**  $K_m = 6,2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$

**Mergel:**  $K_m = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$

(Dieser Wert stellt den Grenzwert für feuchte Mergel dar, bei trockenen Mergeln kann die Durchlässigkeit kleiner sein.)

*Schema der Größenordnungen der Durchlässigkeiten:*

$K_{\text{Sst}} \text{ (grob-mittel)} > K_{\text{NF}} > K_{\text{SWK}} > K_{\text{Mergel}}$   
 $(1,1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}) > (3,25 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}) > (6,2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}) > (1,7 \cdot 10^{-6} \text{ m/s})$

#### 4.3.4. Schlußfolgerungen

Die nun dargestellte Bestimmungsmethode setzt bewußt eine Vereinfachung der wirklichen Vorgänge voraus. Die daraus hervorgehenden Werte der Durchlässigkeiten dürfen deshalb nur im Sinne einer Abschätzung verstanden werden. Sie sind streng genommen nur für jene Schicht charakteristisch, aus welcher die Quelle unmittelbar entspringt (Quellhorizont), dabei vor allem für das hydrodynamische System, zu welchem die betreffende Quelle gehört. Wie bei jeder experimentellen Bestimmungsmethode wird das Gestein in seiner wirklichen Ausbildung, also nicht im vorausgesetzten, idealisierten Zustand (homogen, isotrop) erfaßt. Es ist jedoch offensichtlich, daß innerhalb der grundwasserleitenden Horizonte der Oberen Süßwassermolasse Inhomogenitäten und Anisotropien der Durchlässigkeit und Porosität infolge von

(meist subvertikalen) Klüften, lokalen Schüttungsunterschieden (in der Geröllgröße sichtbar) und lokalen, in horizontaler Richtung verlaufenden Lösungserscheinungen bestehen, welche höchstens über indirekte Annahmen oder durch statistische Methoden erfaßt werden können. Es ist deshalb auch mit einem gewissen Einfluß des Maßstabeffekts (effet d'échelle nach L. KIRALY, 1978) zu rechnen, der sich dahingehend auswirkt, daß bei Bestimmungen mit Hilfe des Quellabflusses infolge des größeren einbezogenen Gebietes (Einflußgebiet) sich größere Durchlässigkeitswerte ergeben als bei Labormessungen.

Die nun vorliegenden ersten Resultate stimmen jedoch mit den wenigen, aus der Literatur bekannten Werten in der Größenordnung überein. Es wäre deshalb interessant, sie auch mit weiteren, nach der dargestellten Methode erzielten Resultaten aus anderen Quellgrundwassergebieten mit bekanntem lithologischen Aufbau vergleichen zu können.

#### 4.4. Abschätzung der Porositäten der einzelnen lithologischen Einheiten

Ebenfalls aufgrund der Feldbeobachtungen können die lithologischen Einheiten der Oberen Süßwassermolasse auch hinsichtlich ihrer nutzbaren Porosität sowohl qualitativ als auch quantitativ durch Abschätzung der Größenordnung klassiert werden:

Speichergesteine (K = mittelgroß):  $P_{Sstf} // P_{NF} \approx 5-10\%$

Stauhorizonte (K = klein):  $P_{SWK} // P_{Mergel} // P_{Ton}$

oder  $P_{Mergel} // P_{SWK} // P_{Ton}$  (je nach lith. Ausbildung).

#### 4.5. Die Obere Süßwassermolasse als hydrogeologisches Gesamtsystem

Die Durchlässigkeit und die (nutzbare) Porosität stellen nun Variablen dar, deren räumliche Verteilung innerhalb eines Gesteinsmassivs eine Eigenschaft des Grundwassers charakterisiert und welche zudem zueinander in einer Äquivalenzbeziehung stehen.

Aus den vorangehend dargestellten Beobachtungen und Bestimmungen darf der Schluß gezogen werden, daß auch zwischen der Anordnung der Ablagerungen entsprechend den ausgewählten lithologischen Einheiten und der Verteilung der Durchlässigkeit und der Porosität Äquivalenzbeziehungen bestehen. Dieser lithologische Parameter charakterisiert die räumliche Ausdehnung (Form, Geometrie) und Anordnung der Gesamtheit der wasserleitenden (und speichernden) Gesteinskörper innerhalb des Gesamtmassivs, er kann deshalb als hydrogeologische Einheit der Grundwasserleiter oder bei Kenntnis der Lage der lokalen Grundwasserspiegel als hydrogeologische Einheit der Grundwasservorkommen bezeichnet werden. Somit stellt der lithologische Aufbau der Oberen Süßwassermolasse innerhalb des Aubachgebietes eine weitere hydrogeologische Einheit dar, welche die Anordnung und Ausdehnung der grundwasserleitenden Schichten, begrenzt von undurchlässigen Schichten, festlegt.

Nach diesen Überlegungen können nun die Nagelfluh- und Sandsteinhorizonte, welche gegenüber den übrigen Schichten durch eine größere Durchlässigkeit und Porosität charakterisiert sind, innerhalb der lithologischen Kartierung des Aubachgebietes qualitativ als grundwasserleitende und -speichernde Horizonte, die übrigen Ablagerungen hingegen als undurchlässige Stauhorizonte betrachtet werden. Die damit aus der (synthetischen) lithologischen Kartierung hervorgehende Situation (s.

Tafel I) der Anordnung der grundwasserleitenden und -speichernden Horizonte kann durch die schematische Darstellung in Fig. 25 charakterisiert werden.

Der ganze Gesteinskomplex der Ablagerungen der Oberen Süßwassermolasse bildet also ein System von Grundwasserleitern, welche an einigen Stellen verbunden, aber auch über weite Strecken voneinander getrennt sind. Aufgrund der Beobachtungen muß dabei angenommen werden, daß der Austritt des Wassers an den Quellen frei, d. h. unter dem an der betreffenden Austrittsstelle herrschenden Druck erfolgt und somit die Grundwasservorkommen der grundwasserleitenden Horizonte seitlich durch freie Wasserspiegel begrenzt werden. Werden nun diese freien Grundwasserspiegel als seitliche Begrenzung der Grundwasservorkommen mitberücksichtigt, so kann aus der schematisch dargestellten Situation (Fig. 25) der Grundwasserleiter und -stauer eine (schematische) Anordnung der Grundwasservorkommen gemäß Fig. 26 gewonnen werden.

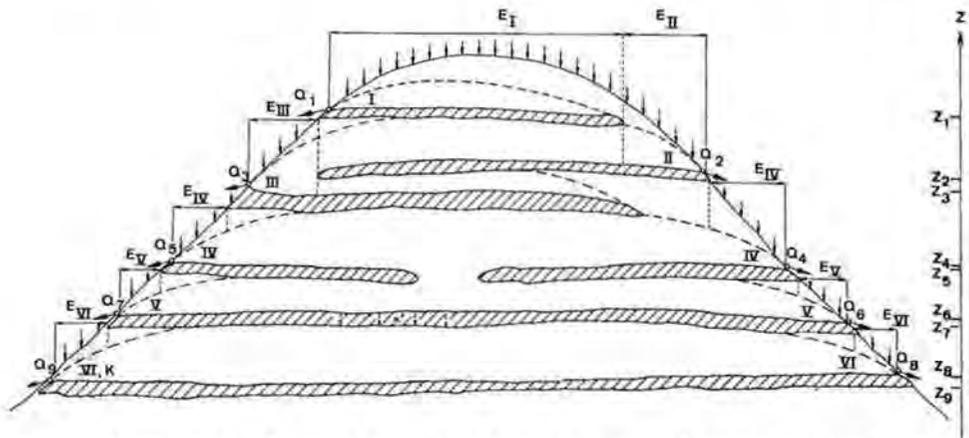


Fig. 25: Darstellung der hydrogeologischen Verhältnisse in einem Quellgrundwassergebiet der Oberen Süßwassermolasse (schematisches Querprofil; schraffiert: undurchlässige Horizonte).

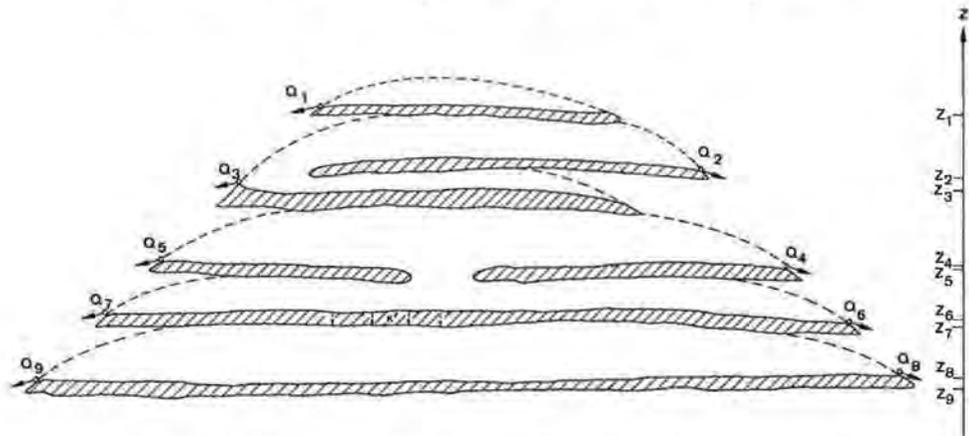


Fig. 26: Darstellung der Grundwasservorkommen in einem Quellgrundwassergebiet der Oberen Süßwassermolasse (schematisches Querprofil; schraffiert: undurchlässige Horizonte; strichliert: Fläche des freien Grundwasserspiegels).

Die hydrodynamischen Fließsysteme können meist nur mit Hilfe von Simulationsmodellen bestimmt werden, doch können die in den Ablagerungen der Oberen Süßwassermolasse des Aubachgebietes möglichen Prozesse aufgrund der dargestellten Beobachtungen und Überlegungen qualitativ wie folgt umschrieben werden: Das Wasser wird in den porösen, durchlässigen Horizonten gespeichert; es wird einerseits durch die undurchlässigen Horizonte entlang der Geländeoberfläche zum Austritt gezwungen (Quellen), fließt aber andererseits innerhalb des Gesteinsmassivs über Zonen, in denen diese undurchlässigen Horizonte fehlen, in den nächsttieferliegenden, porösen durchlässigen Horizont ab, ohne aus dem Gestein auszutreten. Dieser geschilderte Vorgang, welcher sich entsprechend der lokalen Situation verschieden oft wiederholen kann, stimmt auch mit den Beobachtungen im Aubachgebiet überein.

Die Ablagerungen der Oberen Süßwassermolasse des Hörnlichuttfächers bilden also einen hydrogeologischen Gesamtkomplex, bestehend aus durchlässigen Schichten, welche die einzelnen, zum Teil zusammenhängenden Grundwasservorkommen darstellen, und aus (relativ) undurchlässigen Schichten, welche Trennungsf lächen in bestimmter, gegebener Anordnung darstellen, so daß die einzelnen Grundwasservorkommen nach unten (in vertikaler Richtung) durch undurchlässige Grenzen sowie seitlich und nach oben entweder durch freie Wasserspiegel oder eine undurchlässige Schicht begrenzt werden.

Diese dargestellte Charakterisierung der hydrogeologischen Verhältnisse innerhalb der Ablagerungen der Oberen Süßwassermolasse des Aubachgebietes und ihre Deutung in bezug auf die Wasserzirkulation (hydrodynamische Fließsysteme) stellt bewußt eine Vereinfachung der wirklichen Vorgänge dar. Diese sind aber nur schwierig und unvollkommen darstellbar, da innerhalb der grundwasserleitenden Horizonte Inhomogenitäten und Anisotropien der Durchlässigkeit und Porosität infolge von (meist subvertikalen) Klüften, lokalen Schüttungsunterschieden (in der Geröllgröße) und lokalen in horizontaler Richtung verlaufenden Lösungserscheinungen bestehen, welche höchstens über indirekte Annahmen oder durch statistische Methoden erfaßt werden können. Bei näheren Betrachtungen müßte deshalb jeder grundwasserleitende Horizont innerhalb seiner räumlichen Ausdehnung in mehr oder weniger durchlässige Zonen mit Unstetigkeiten entlang von Klüftzonen unterteilt werden. Außerdem sollte durch Markierungsversuche versucht werden, die Abflußsysteme der einzelnen Quellen und das von ihnen affektierte Einzugsgebiet experimentell zu bestimmen.

## Zusammenfassung

Das Einzugsgebiet des Aubachs, welches das Untersuchungsgebiet der vorliegenden Studie darstellt, liegt im nordöstlichen Teil des schweizerischen Mittellandes und gehört zum Einzugsgebiet der Thur (Einzugsgebietsfläche 3,8 km<sup>2</sup>, Höhenlage 625–996 m ü. M., mittlere Höhe 778 m ü. M.). Die Landschaftsformen sind vorwiegend durch die fluviatile Erosion (Wildbäche, steile Tobel, häufig mit Rutschungen) und das ausgeprägte Relief der Hügel aus anstehender Molasse gekennzeichnet (H. ANDRESEN, 1964). Die Anlage des Flußnetzes zeigt deshalb die typische dendritische Ausbildung. Der anstehende Fels wird im untersuchten Einzugsgebiet des Aubachs durch die Schichten der Oberen Süßwassermolasse (Tortonien), welche zu den Ablagerungen des Hörnlichuttfächers gehören (E. GEIGER, 1943; H. TANNER, 1944; R. HANTKE, 1967; L. HOTTINGER, A. MATTER, W. NABHOLZ & C. SCHINDLER, 1970), gebildet.

Die Grundwasserverhältnisse der Oberen Süßwassermolasse wurden für das Einzugsgebiet des Aubachs im Detail studiert und können wie folgt charakterisiert werden. Als Quellgrundwasserleiter wirken (infolge primärer sowie sekundärer Durchlässigkeit und Porosität) Sandstein- und Nagelfluhhorizonte, als Stauhorizonte dagegen Mergelschichten und Süßwasserkalkbänke. Da die Obere Süßwassermolasse des Hörnlischuttfächers im Aubachgebiet durch horizontale Lagerung sowie durch Wechsellagerung der verschiedenen lithologischen Horizonte (in wechselnder Ausbildung und Mächtigkeit) charakterisiert ist, wird eine Verbindung der durchlässigen Horizonte einzig durch Schichtlücken, infolge der häufig auftretenden Faziesübergänge ermöglicht. Dadurch ist aber eine Speisung der unteren durchlässigen Schichten durch die darüberliegenden innerhalb der Ablagerungen der Oberen Süßwassermolasse des Aubachgebietes denkbar, so daß diese als Gesamtkomplex ein hydrogeologisches Gesamtsystem bilden.

Die Nutzung der Grundwasservorkommen erfolgt ausschließlich durch Quellen, welche eine mittlere Ergiebigkeit von 1,0 bis 20 l/min aufweisen.

## Literatur

- ANDRESEN, H. (1964): Beiträge zur Geomorphologie des östlichen Hörnli-Berglandes. – Jb. st. gall. naturw. Ges., 78, 1961–1962.
- BALDERER, W. (1979): Die Obere Süßwassermolasse als Hydrogeologisches Gesamtsystem. – Bull. Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, 3, 27–39, Neuchâtel.
- BALDERER, W. (1979): Hydrogeologie des Murgtales (Kt. Thurgau). – Manuscript de thèse, Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, Bd. 1 u. 2.
- BALDERER, W. (1981): Hydrogeologie des Murgtales (Kt. Thurgau). – Gas – Wasser – Abwasser, 1981/3, Schweiz. Verein des Gas- und Wasserfaches, Zürich.
- BALDERER, W. (1981): Berechnungsmethoden zur quantitativen Abschätzung der Durchlässigkeit von porösen Festgesteinen mit Hilfe des Quellabflusses. – Bull. Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, 4, Neuchâtel.
- BUECHI, U. P., G. WIENER, HOFMANN (1965): Neue Erkenntnisse im Molassebecken aufgrund von Erdöltiefbohrungen in der Zentral- und Ostschweiz. – Eclogae geol. Helv., Vol. 58, Nr. 1.
- BUECHI, U. P. (1975): Wasser und Energiegewinnung aus der Oberen Meeresmolasse und dem Mesozoikum. – Inst. für bauwiss. Forschung, Stiftung, Kollbrunner, Rodio.
- GEIGER, E. (1943): Erläuterungen/Geol. Atlas der Schweiz, Blätter 56 Pfyn, 57 Märstetten, 58 Frauenfeld, 59 Bussnang. – Schweiz. Geol. Kommission.
- HANTKE, R. (1967): Geologische Karte des Kantons Zürich und seiner Nachbargebiete/Erläuterungen. – Kommissionsverlag Leemann, Zürich.
- HOTTINGER, L., A. MATTER, W. NABHOLZ & C. SCHINDLER (1970): Erläuterungen zu Blatt 1093 Hörnli, Geol. Atlas der Schweiz, Schweiz. Geol. Kommission
- KEILHACK, K. (1935): Lehrbuch der Grundwasser- und Quellenkunde. – Berlin.
- KIRALY, L. (1978): La notion d'unité hydrogéologique, essai de définition. – Bull. Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, 2, 83–216, Neuchâtel.
- PERRIAUX, J. (1969): Sédimentologie. – Cours de 3<sup>e</sup> Cycle, Université de Grenoble, Institut Dolomieu.
- RECORDON, E. (1969): Dynamique des eaux souterraines. – Cours du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel.
- SCHERLER, K. (1977): Zur Morphogenese der Täler des südlichen Tössberglandes. – Diplomarbeit/Geograph. Seminar ETH-Z vom 15. 2. 1977.
- RYBACH, L., U. P. BUECHI, P. BODMER & H. R. KRÜSI (1980): Die Tiefengrundwässer des schweizerischen Mittellandes aus geothermischer Sicht. – Eclogae geol. Helv., Vol. 73, 1, 293–310.

- TANNER, H. (1944): Beitrag zur Geologie der Molasse zwischen Ricken und Hörnli. – Diss. Univ. Zürich.
- TOTH, I. (1962): A theory of groundwater motion in small drainage basins in Central Alberta, Canada. – *J. Geophys. Res.*, 67, 11, 4375–4387.
- TOTH, I. (1963): Theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. – *J. Geophys. Res.*, 68, 16, 4795–4812.

## Karten

- Geol. Atlas der Schweiz (1943): Blatt 58, Frauenfeld.
- Geol. Atlas der Schweiz (1970): Blatt 1093, Hörnli.
- Geol. Generalkarte der Schweiz (1950): Blatt 3, Zürich–Glarus.
- Geotechn. Karte der Schweiz (1963): Blatt 2, Luzern–Zürich–St. Gallen–Chur.
- HANTKE, R. (1967): Geologische Karte des Kantons Zürich und seiner Nachbargebiete. – Verlag Leemann, Zürich.
- JACKLI, H. (1967): Hydrogeologische Karte der Schweiz. – *Eclogae geol. Helv.*, Vol. 60, 2.
- JACKLI, H., Th. KEMPF et al. (1980): Hydrogeologische Karte der Schweiz, Blatt Bodensee. – Schweiz. Geotechn. Komm. Zürich.

## Summary

The study region of the Aubach catchment is situated in the North-Eastern part of Switzerland (Surface 3.8 km<sup>2</sup>, altitude range 625–996 m a. S. L., mean altitude 778 m a. S. L.). Its morphology is fashioned mainly by river erosion. The bed-rock is formed by the consolidated nearly horizontal stratified fan deposits of the "Upper Freshwater Molasse" (Tortonian). In this area the hydrogeological properties of this "Upper Freshwater Molasse" have been studied. These deposits, belonging to the "Hörnli-Fan", consists of clastic sediments: conglomerates (Nagelfluh), sandstones, marls and freshwater limestones. By mapping the lithological structure and the origins of observed springs the following conceptual model for the hydrodynamic behaviour was deduced: The precipitation water infiltrates at surface in the permeable layers (conglomerates and sandstones) which are interbedded within impermeable layers (freshwater limestones and marls). Once entered in this sedimentary complex itself, two possibilities for the circulating water exist: whether it continues to circulate along the same layer (strata) and is flowing outside at the rock surface in forming springs, or it circulates through lithologically caused connections (by changes in the sedimentary facies) down to the next deeper permeable layer. In this way the sedimentary complex of the "Upper Freshwater Molasse" is forming a system of interconnected aquifer layers.

## Résumé

La région étudiée, le bassin versant de l'Aubach est située dans la partie nord-est du plateau suisse et appartient au bassin versant de la Thur (surface 3,8 km<sup>2</sup>, situé entre 625 et 996 m s. m. avec une altitude moyenne de 778 m s. m.). La forme morphologique est caractérisée par l'effet d'érosion des torrents (avec des collines à forte pente, des ravins avec des glissements de terrain). Dans tout le bassin, la roche affleurante est constituée par des formations de molasse d'eau douce supérieure (Tortonien). Les propriétés hydrogéologiques de cette molasse d'eau douce supérieure, qui est caractérisée par une stratification horizontale et une sédimentation rythmique, ont été étudiées en détail. Les déterminations de la perméabilité à partir du débit des sources et les observations de terrain ont conduit à la postulation d'un schéma théorique de l'écoulement souterrain dans l'ensemble du complexe sédimentaire de la molasse d'eau douce supérieure (hydrogeologisches Gesamtsystem):

L'eau s'infiltré et est emmagasinée dans les couches poreuses et perméables (grès et conglomérats de type «Nagelfluh») qui sont entourées de niveaux imperméables (marnes et calcaires d'eau douce). Soit elle circule le long des couches (horizontalement) et ressurgit à la surface le long de la pente topographique en formant des sources, soit elle continue à circuler à l'intérieur du massif rocheux en passant aux niveaux inférieurs par des points de communication des niveaux perméables qui sont dus à des lacunes des niveaux séparants imperméables (à cause des changements du faciès de sédimentation).

Anschrift des Verfassers: Dr. W. BALDERER, Physikalisches Institut, Universität Bern, Sidlerstraße 5, CH-3012 Bern.

# Hydrogeologische Karte des Einzugsgebietes des Aubachs (Kanton Thurgau/Schweiz)

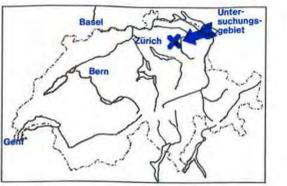
1:5000

Steir. Beitr. z. Hydrogeologie / 34 / Tafel I / Graz 1982  
Geologische Aufnahme und synthetische Konstruktion: WERNER BALDERER

Aequidistanz der Höhenkurven 10 m



Gedruckt mit Unterstützung des Amtes für Umweltschutz und  
Wasserversorgung des Kantons Thurgau und der Schweizerischen  
Naturforschenden Gesellschaft.



Hydrogeologische/lithologische Gliederung der Oberen  
Süswassermolasse des Hornifächers:

- Nagelfluh (Konglomerate)
  - Sandsteine
  - Süswasserkalke
  - Mergel, Tone
- (Reihenfolge  
gemäss abnehmender  
Durchlässigkeit)

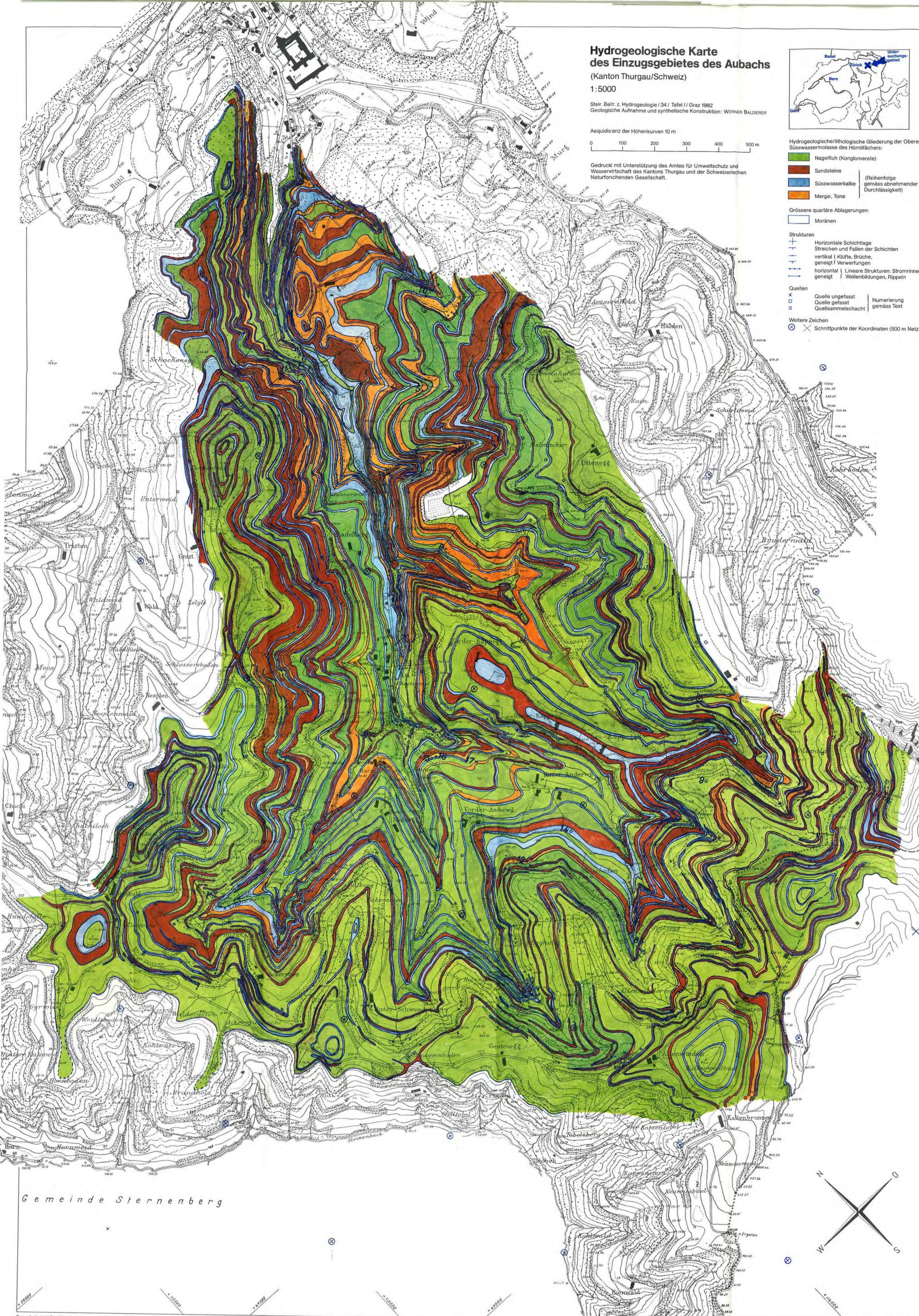
Grössere quartäre Ablagerungen:

- Moränen

- Strukturen
- Horizontale Schichtlage
  - Streichen und Fallen der Schichten
  - vertikal | Klüfte, Brüche, geneigt | Verwerfungen
  - horizontal | Lineare Strukturen: Stromrinnen, geneigt | Wellenbildungen, Rippeln

- Quellen
- Quelle ungefasst
  - Quelle gefasst
  - Quellsammelschacht
- Numerierung  
gemäss Text

- Weitere Zeichen
- Schnittpunkte der Koordinaten (500 m Netz)



Gemeinde Sternenberg

