Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 70 (1978)
Heft: 3-4

Artikel: Die Grundwasserverhältnisse im unteren aargauischen Aaretal
Autor: Jäckli, Heinrich / Ryf, Walter
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941065

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 07.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die Grundwasserverhältnisse im unteren aargauischen Aaretal

mit besonderer Berücksichtigung der Umgebung des Kernkraftwerkes Beznau

Heinrich Jäckli und Walter Ryf

Einleitung

Im Auftrage der Baudirektion des Kantons Aargau, Abteilung Gewässerschutz, und im Einvernehmen mit den Nordostschweizerischen Kraftwerken AG (NOK) werden seit 1965, d. h. seit rund zwölf Jahren systematische chemische und Temperaturstudien im Grundwasser der *weiteren Umgebung des Kernkraftwerkes Beznau (*KKB) durchgeführt, über deren Resultate im folgenden rapportiert wird.

Die vierteljährlich ausgeführten chemischen Analysen je aus 29 Rohren, 8 Grundwasserfassungen und 6 Stellen aus der Aare wurden 1965 bis 1974 durch das chemische Laboratorium des Kantons Aargau besorgt. Seither werden sie durch das Gewässerschutzlaboratorium des Baudepartementes durchgeführt.

Die vierzehntäglichen Spiegelbeobachtungen in 36 Grundwasserrohren und 9 Fassungen und in der Aare besorgte das Personal des KKB.

Die Temperaturmessungen erfolgten bei allen Probeentnahmen für chemische Analysen aus den Rohren und Fassungen durch die chemischen Latoratorien. Zusätzlich dazu wurden durch die NOK in 13 Bohrungen total 70 Telethermometer System Huggenberger an 4''-PVC-Rohren aussen befestigt und vierzehntäglich gemessen; an den zwei Stellen 553 und 555 wurden je 2 Rohre von unterschiedlicher Tiefe (Rohr «Hoch» und Rohr «Tief») montiert, um die Temperaturschichtung besser erfassen zu können.

Unabhängig von diesen langjährigen Beobachtungen, diese aber regional sinnvoll ergänzend, wurden 1976 im Hinblick auf die Ausscheidung von Grundwasserschutzarealen durch die kantonale Abteilung für Gewässerschutz auch noch die Grundwassergebiete südlich und nördlich der Region Beznau mittels 29 Bohrungen von insgesamt 1087 m Bohrlochlänge und zahlreichen Pumpversuchen und chemischen Analysen untersucht.

Allen Beteiligten danken die Verfasser für die überaus angenehme Zusammenarbeit, und besonders dem Chef der kantonalen Gewässerschutzabteilung, Dr. E. Märki, und Vizedirektor R. Veya von der NOK für die Bewilligung, die wichtigsten Ergebnisse als Auszug aus zwei ausführlichen internen Berichten hier einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich machen zu können.

1. Geologische Übersicht

Das untere Aaretal durchbricht nach dem Zusammenfluss mit der Limmat von Süden nach Norden die Schichtplatten des Tafeljuras und erreicht bei Koblenz das Rheintal. Die Schichten der Felsunterlage fallen mit 3 bis 7 ° nach SE ein und bestehen im südlichen und mittleren Abschnitt aus vorwiegend tonigen, undurchlässigen Gesteinen (Effingermergel, Opalinuston, Keupermergel), im nördlichen aus durchlässigen Kalken und Dolomiten des Muschelkalkes, dessen Karstwasser mithilft, das Schottergrundwasser zu speisen.

Darüber liegt der als Grundwasserleiter wirkende sandige Kies des Niederterrassenschotters, der als breite Rinnenfüllung (siehe Tafel I und Bild 2) bis zu 40 m mächtig sein kann.

Die aus einer grossen Zahl von Pumpversuchen bestimmten *k*-Werte zeigen, dass in der Talachse die Durchlässigkeit *k* am grössten ist und bei den Pumpwerken Unterwald Döttingen und Eien-Kleindöttingen 10 mm/s als Höchstwerte erreicht; im südlichsten Talabschnitt und den seitlichen Talrändern entlang ist die Durchlässigkeit wegen etwas erhöhten Lehmgehalts, im nördlichsten Talabschnitt wegen höheren Sandgehalts deutlich bescheidener.

Ältere Schotter, sog. «Hochterrassenschotter» von geringerer Durchlässigkeit, die im Osten im Ruckfeld, im Westen in den Höhen hinter Leuggern seitlich die Talsohle überragen, bergen eher bescheidene und isolierte Grundwasservorkommen.

2. Der Grundwasserstrom der Talsohle

Mächtigkeit und Oberfläche des Grundwasserstromes der Talsohle sind auf Tafel I dargestellt. Über grosse Flächen beträgt die nutzbare Mächtigkeit 10 bis 15 m; im Süden bei Stilli und von der Beznau an nach Norden erscheint eine tiefere Kiesrinne mit Mächtigkeiten von über 20 m. Das Gefälle ist ausgeglichen und beträgt von Stilli bis Unterwald Döttingen 1 bis 2 ‰, versteilt sich dann im Bereich der Beznau auf rund 3 ‰ unter der Vorflutwirkung des rechten Aareufers, verflacht sich jedoch wieder von Kleindöttingen abwärts auf 1 bis 1,5 ‰. Die jahreszeitlichen Grundwasserschwankungen sind sehr bescheiden und betragen 1 bis 1,5 m (Tafel I unten). Ein sinkender Trend besteht nicht.

Die engen gegenseitigen Beziehungen zwischen Aare und Grundwasser sind in Bild 3 schematisch dargestellt.

Von Stilli bis Villigen wirkt die Aare über ihr linkes Ufer als *Vorfluter* für das Grundwasser aus dem Feld von Rüfenach. Über ihr rechtes Ufer wirkt sie unterhalb des Wehres Beznau für die Insel Beznau, und unterhalb des Wasserkraftwerkes Beznau bis gegen Döttingen für das Grundwasser aus der Ebene von Würenlingen, und schliesslich unterhalb des Kraftwerkes Klingnau für das dortige Grundwasserfeld ebenfalls als Vorfluter.

Umgekehrt *infiltriert* Aarewasser ins Grundwasser über das rechte Flussufer im Feld von Würenlingen oberhalb des Wehres Beznau, beidseits aus dem Beznau-Kanal, linsufrig vom Aareknie unterhalb des Wehres Beznau bis zur Döt-

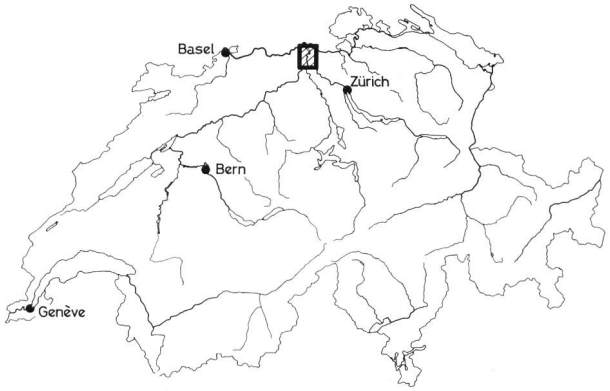
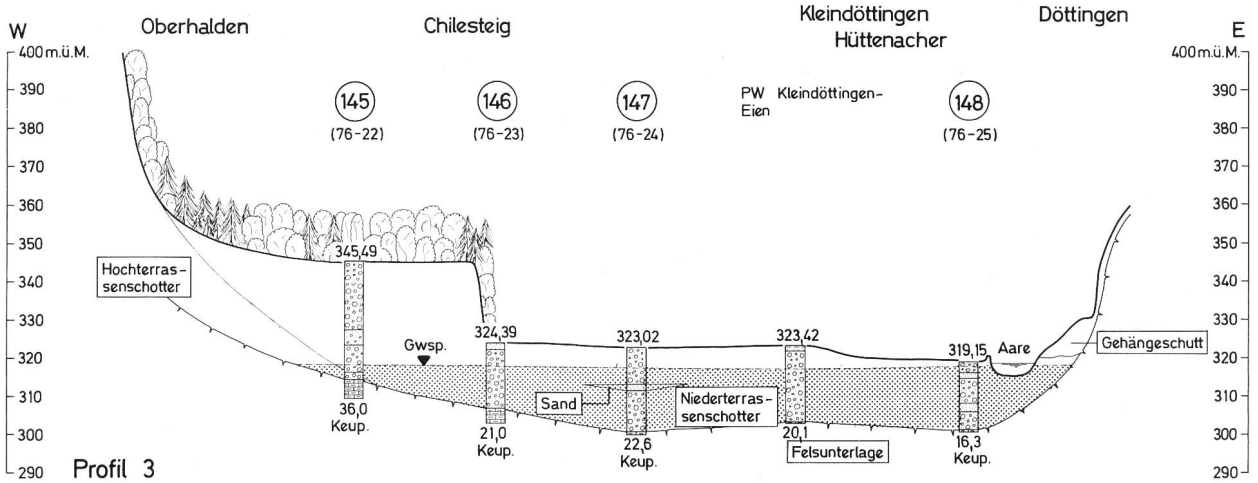
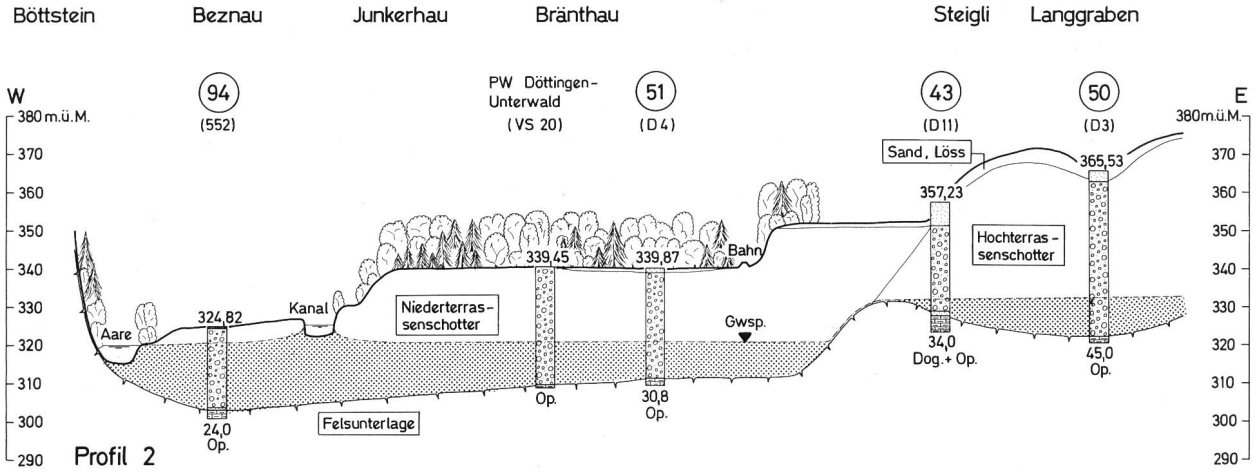
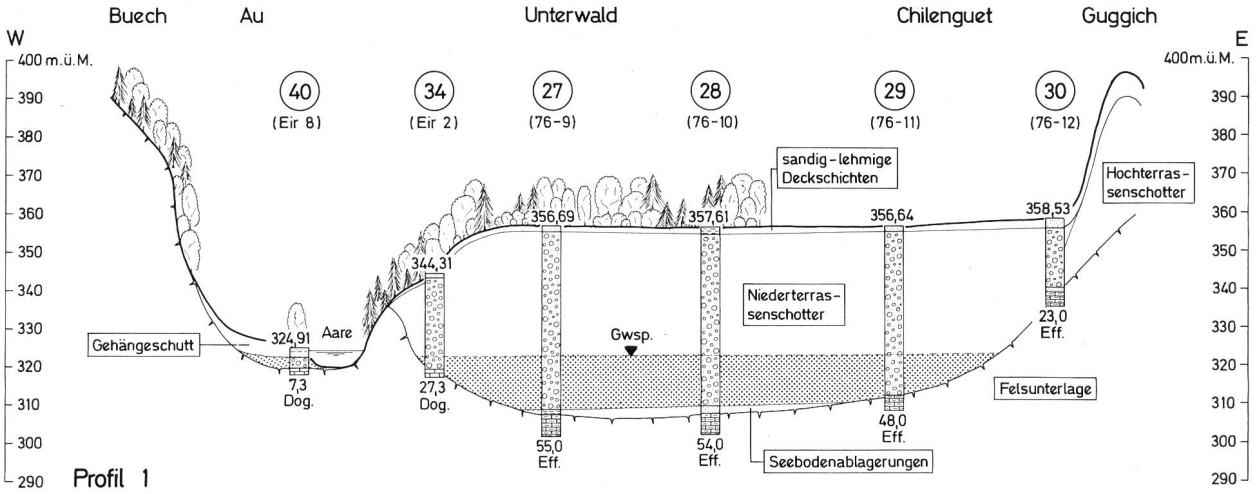


Bild 1. Lage des Untersuchungsgebietes.







Legende

Eff.	=	Effingerschichten	Op.	=	Opalinuston
Dog.	=	Dogger im allgemeinen	Keup.	=	Keupermergel

Bild 2. Geologische Querprofile durch das unterste Aaretal (Profilspuren siehe Bild 3).

Grundwasserkarte

1:50 000

Schotter am Rande und ausserhalb der Talsohle

Gebiet geringer Grundwassermächtigkeit (<2 m)

0–5 m
>5 m
} Grundwassermächtigkeit

äussere Begrenzung der Schotter

Grenze zwischen Schotter in der Talsohle und Schotter ausserhalb der Talsohle

Schotter in der Talsohle

Gebiet nur mit Hangwasserzufluss

0–5 m
5–10 m
10–20 m
>20 m
} Grundwassermächtigkeit bei Niederwasser

Begrenzung des nutzbaren Schottergrundwassers

Isohypsen des Grundwasserspiegels anfangs November 1976 bei Niederwasser

Grundwasserfassungen

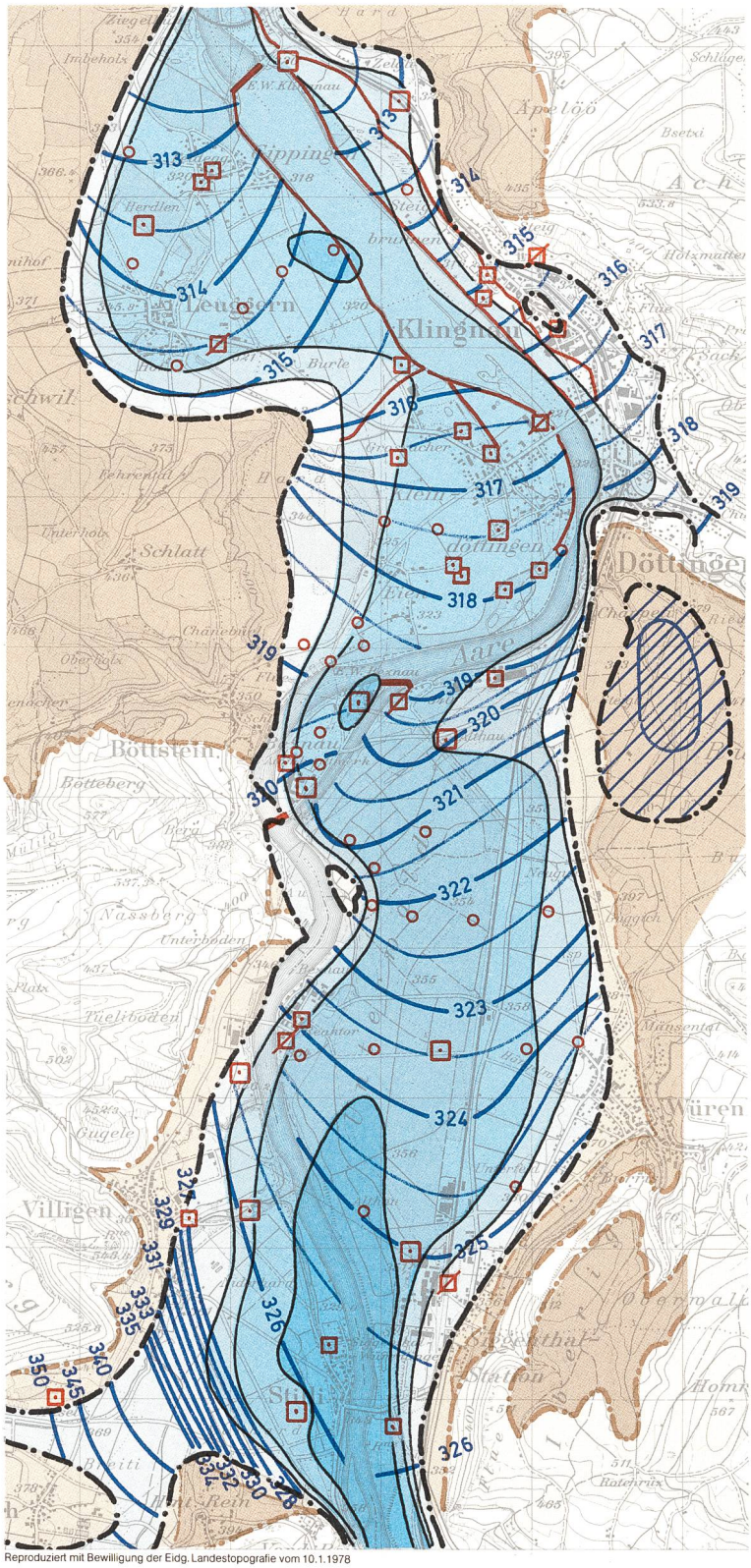
<1000 l/min
>1000 l/min
} konzessionierte Förderleistung

stillgelegte Grundwasserfassung

Piezometerrohr

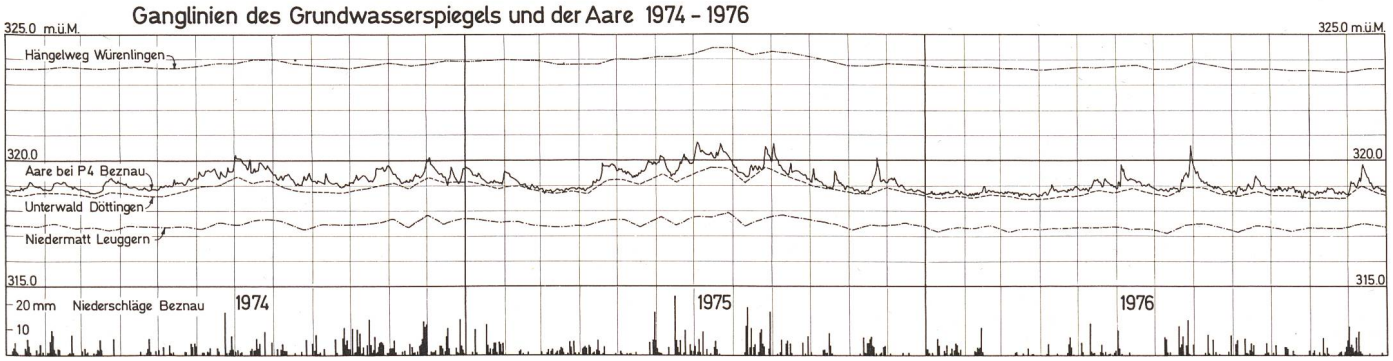
Entwässerungskanal

Stauwehr

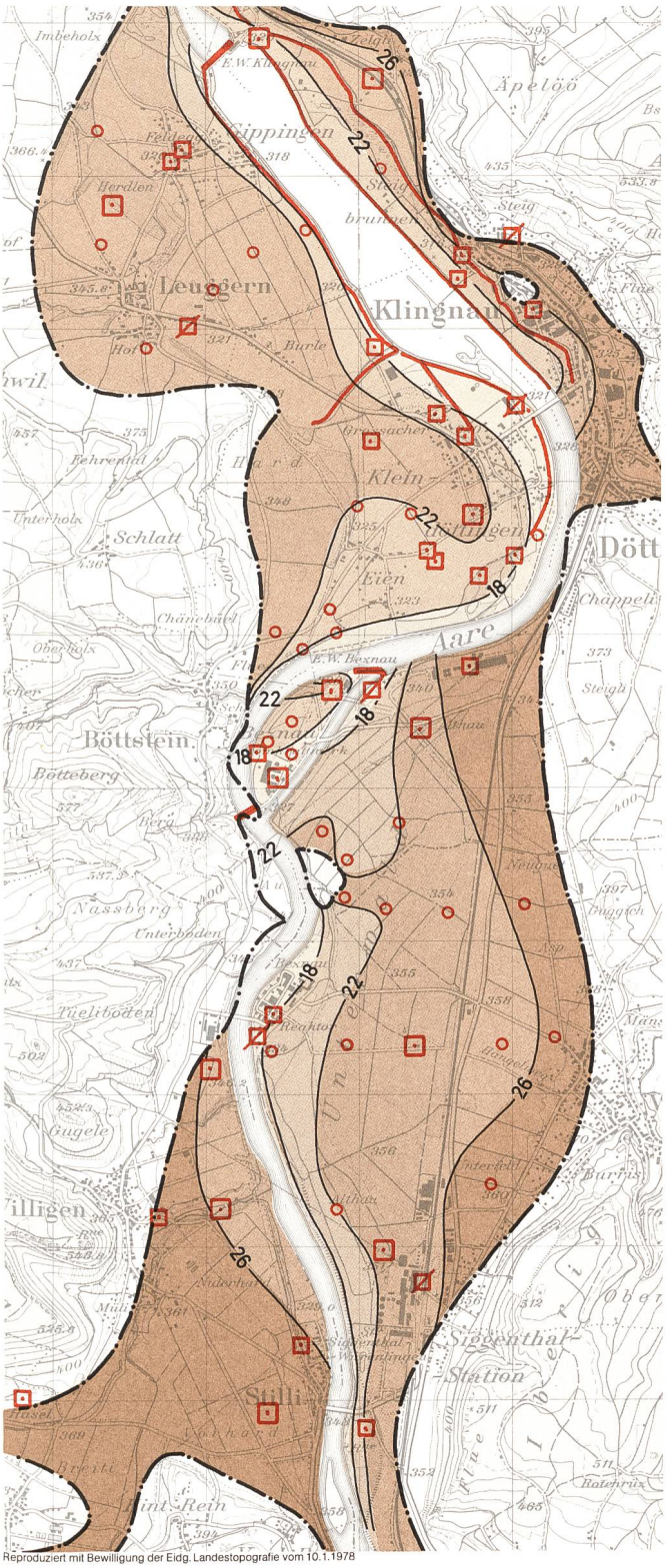


Reproduziert mit Bewilligung der Eidg. Landestopografie vom 10.1.1978

Ganglinien des Grundwasserspiegels und der Aare 1974 – 1976



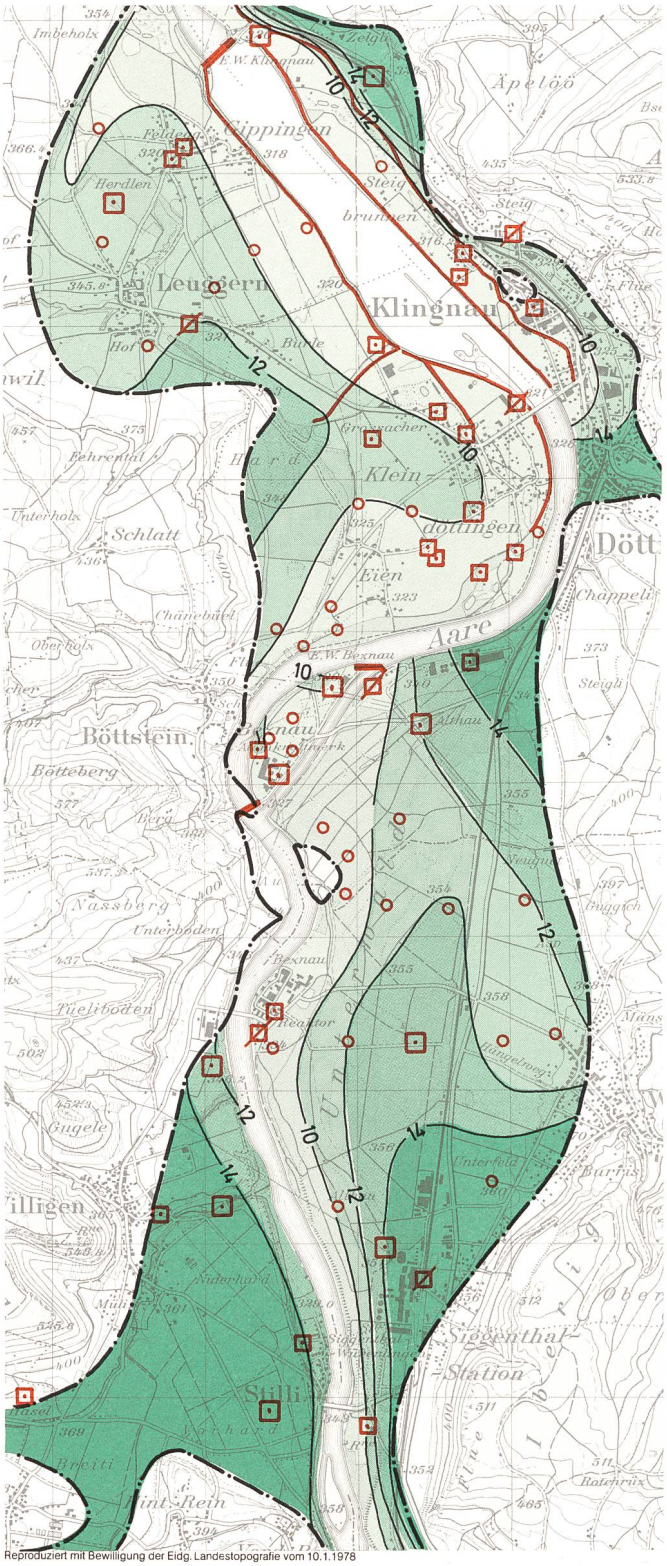
Karbonathärte



Reproduziert mit Bewilligung der Eidg. Landestopografie vom 10.1.1978

Chlorid

1:50 000



Reproduziert mit Bewilligung der Eidg. Landestopografie vom 10.1.1978

Karbonathärte in ° frz.

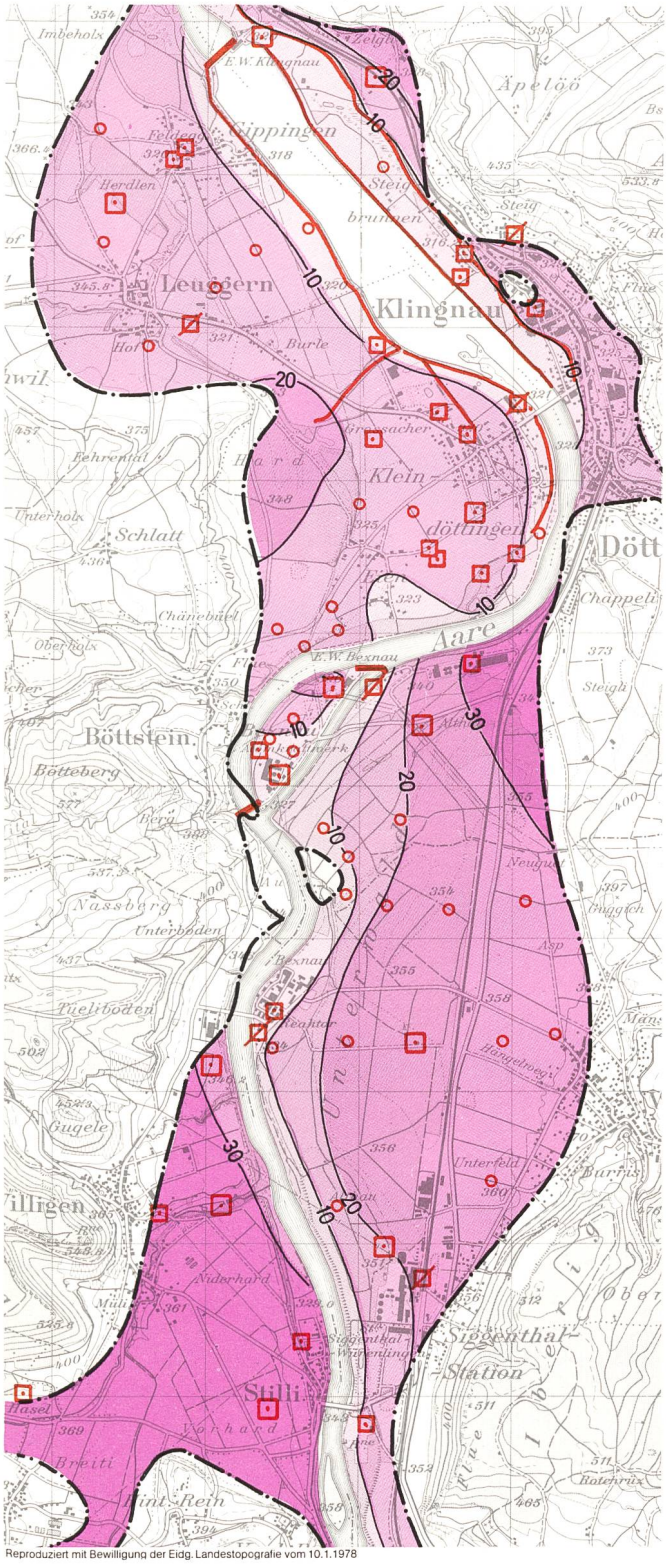
- <18°
- 18–22°
- 22–26°
- >26°

Chlorid in mg/l Cl

- <10 mg/l
- 10–12 mg/l
- 12–14 mg/l
- >14 mg/l

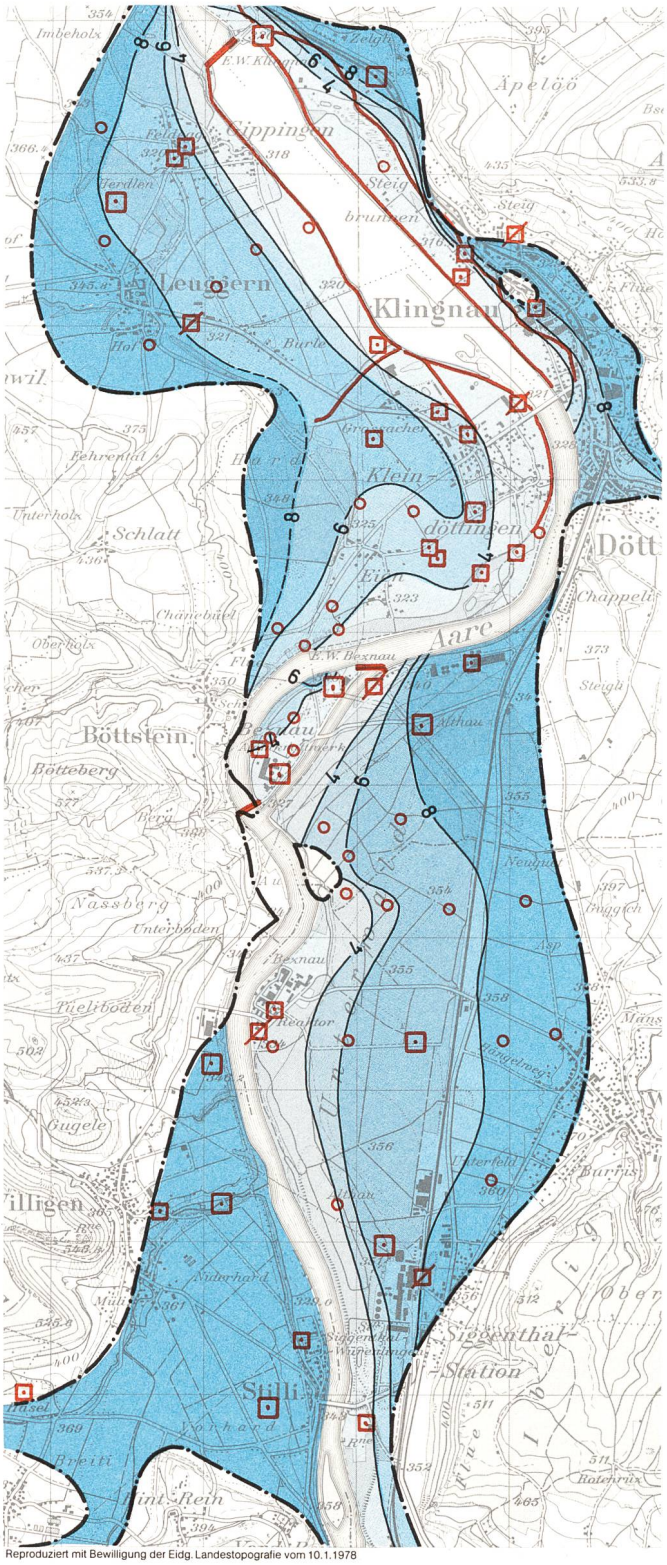
- Grundwasserfassung
- Piezometerrohr
- Begrenzung des Grundwassergebietes
- Entwässerungskanal
- Stauwehr

Nitrat



Reproduziert mit Bewilligung der Eidg. Landestopografie vom 10.1.1978

Sauerstoff



Reproduziert mit Bewilligung der Eidg. Landestopografie vom 10.1.1978

1:50 000

Nitrat in mg/l NO_3

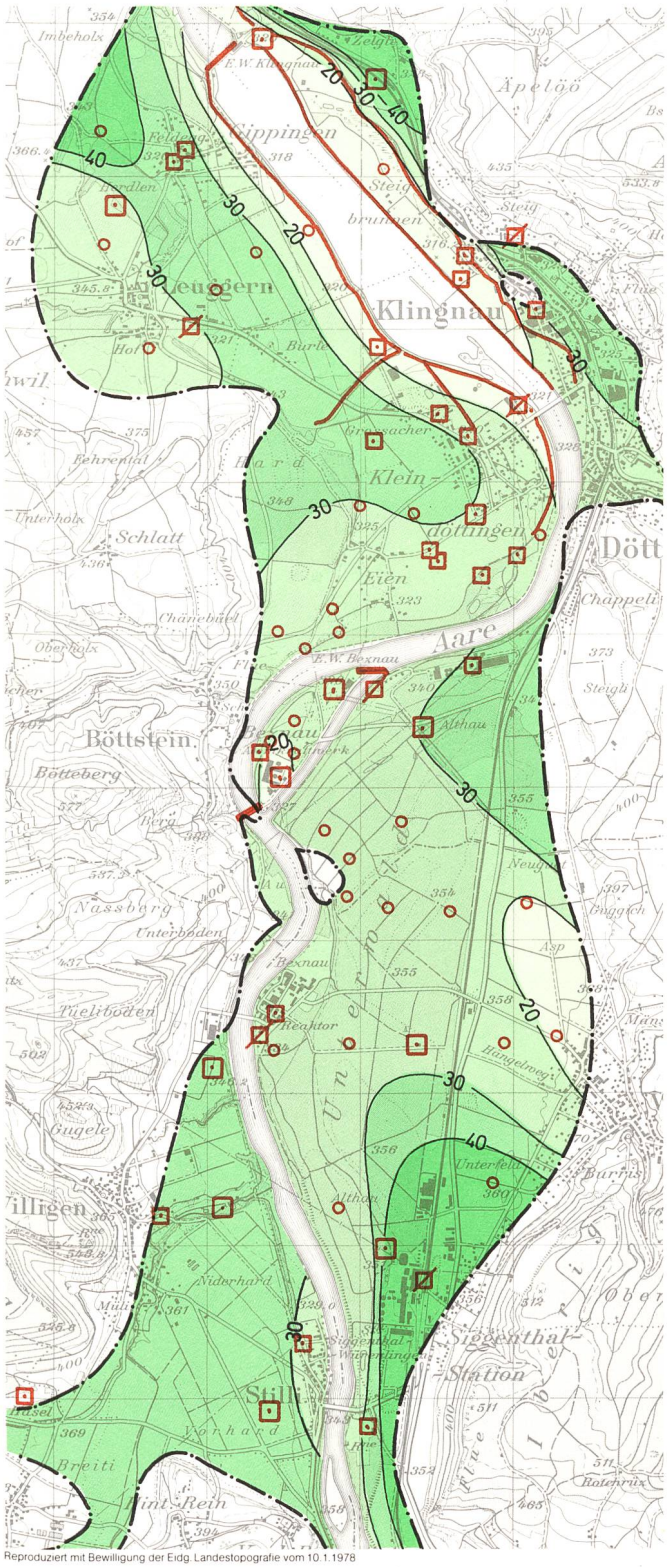
- <10 mg/l
- 10–20 mg/l
- 20–30 mg/l
- >30 mg/l

Sauerstoff in mg/l O_2

- <4 mg/l
- 4–6 mg/l
- 6–8 mg/l
- >8 mg/l

- Grundwasserfassung
- Piezometerrohr
- Begrenzung des Grundwassergebietes
- Entwässerungskanal
- Stauwehr

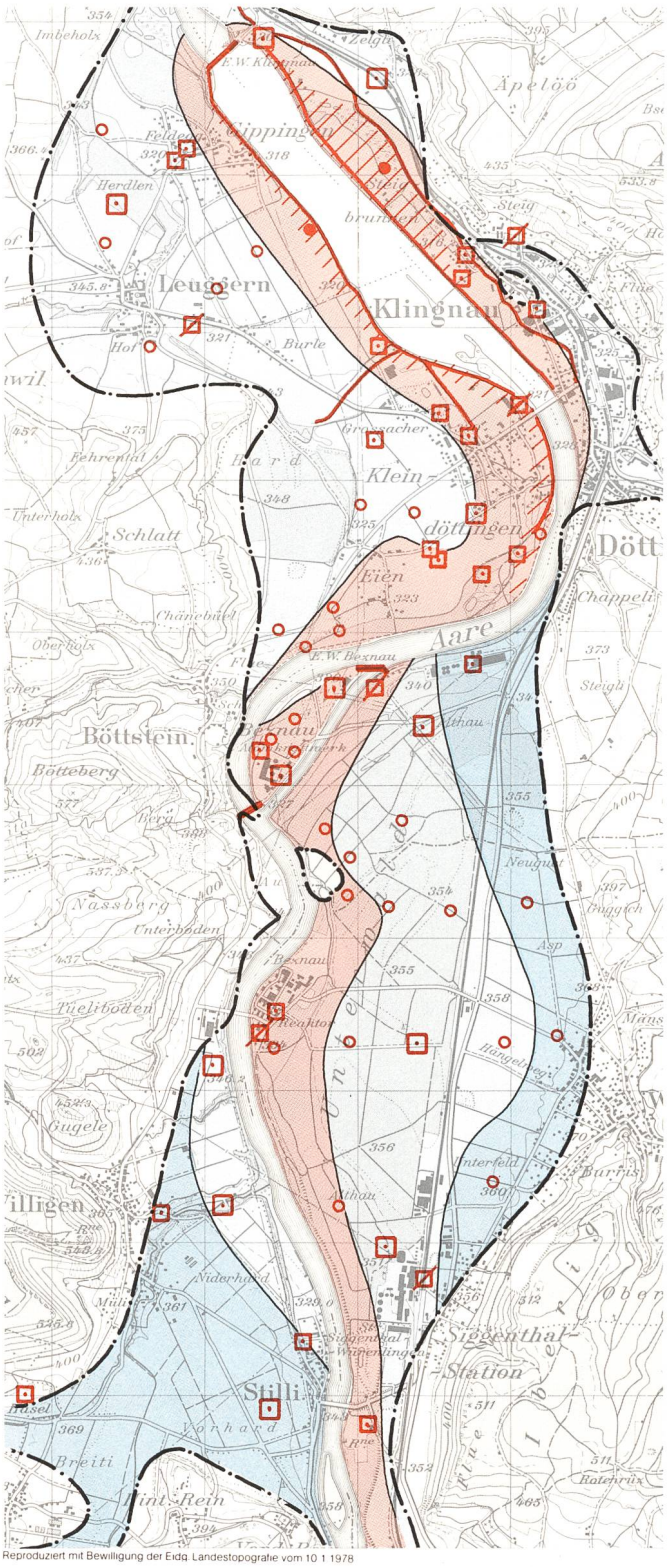
Sulfat



Reproduziert mit Bewilligung der Eidg. Landestopografie vom 10.1.1978

Chemische Provinzen

1:50 000



Reproduziert mit Bewilligung der Eidg. Landestopografie vom 10.1.1978

Sulfatgehalt in mg/l SO_4

- <20 mg/l
- 20–30 mg/l
- 30–40 mg/l
- >40 mg/l

Chemische Grundwasserprovinzen

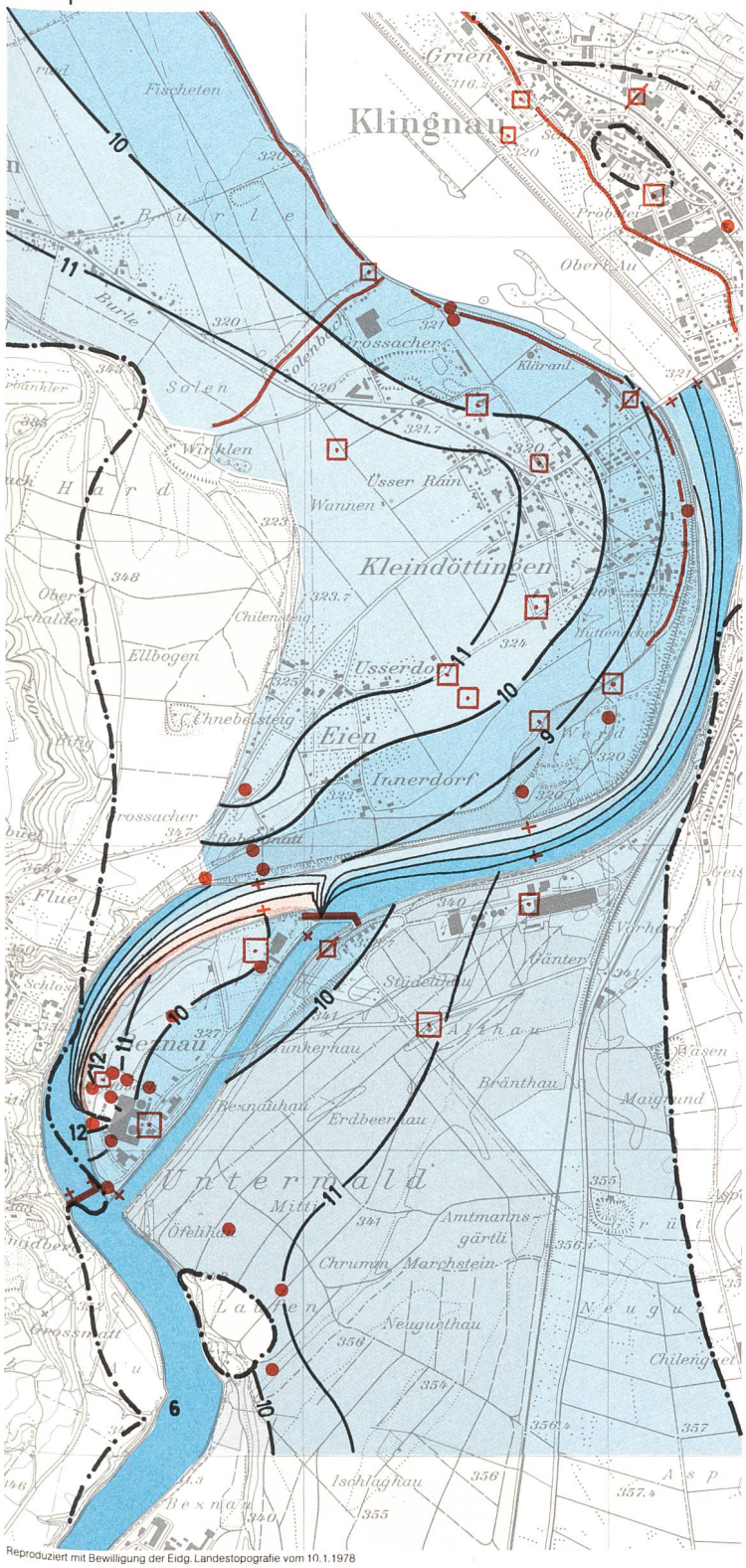
- O_2 >5 mg/l, Karbonathärte >26°
- O_2 >5 mg/l, Karbonathärte 22–26°
- O_2 <5 mg/l, Karbonathärte <22°
- Fe-haltig

- H_2S nachgewiesen

- Grundwasserfassung
- Piezometerrohr
- Begrenzung des Grundwassergebietes
- Entwässerungskanal
- Stauwehr

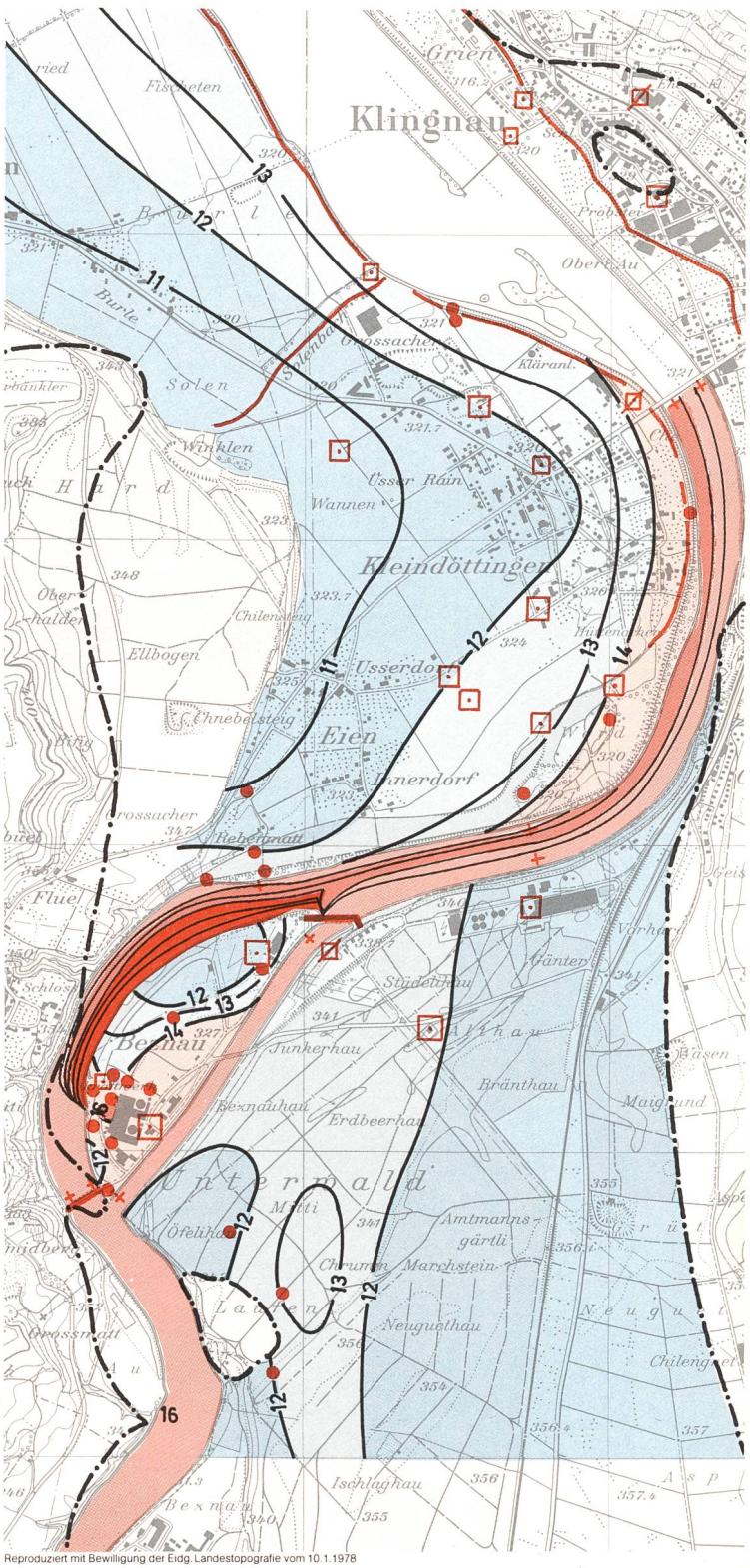
Temperatur von Aare und Grundwasser

4. April 1975



3. Oktober 1975

1:25 000



Stauwehr

Entwässerungskanal

Grundwasserfassungen

Förderleistung <1000 l/min

Förderleistung >1000 l/min

Anlage stillgelegt

Messpunkt Grundwasser

Messpunkt Aare

Temperatur

6– 8°

8–10°

10–12°

12–14°

14–16°

16–18°

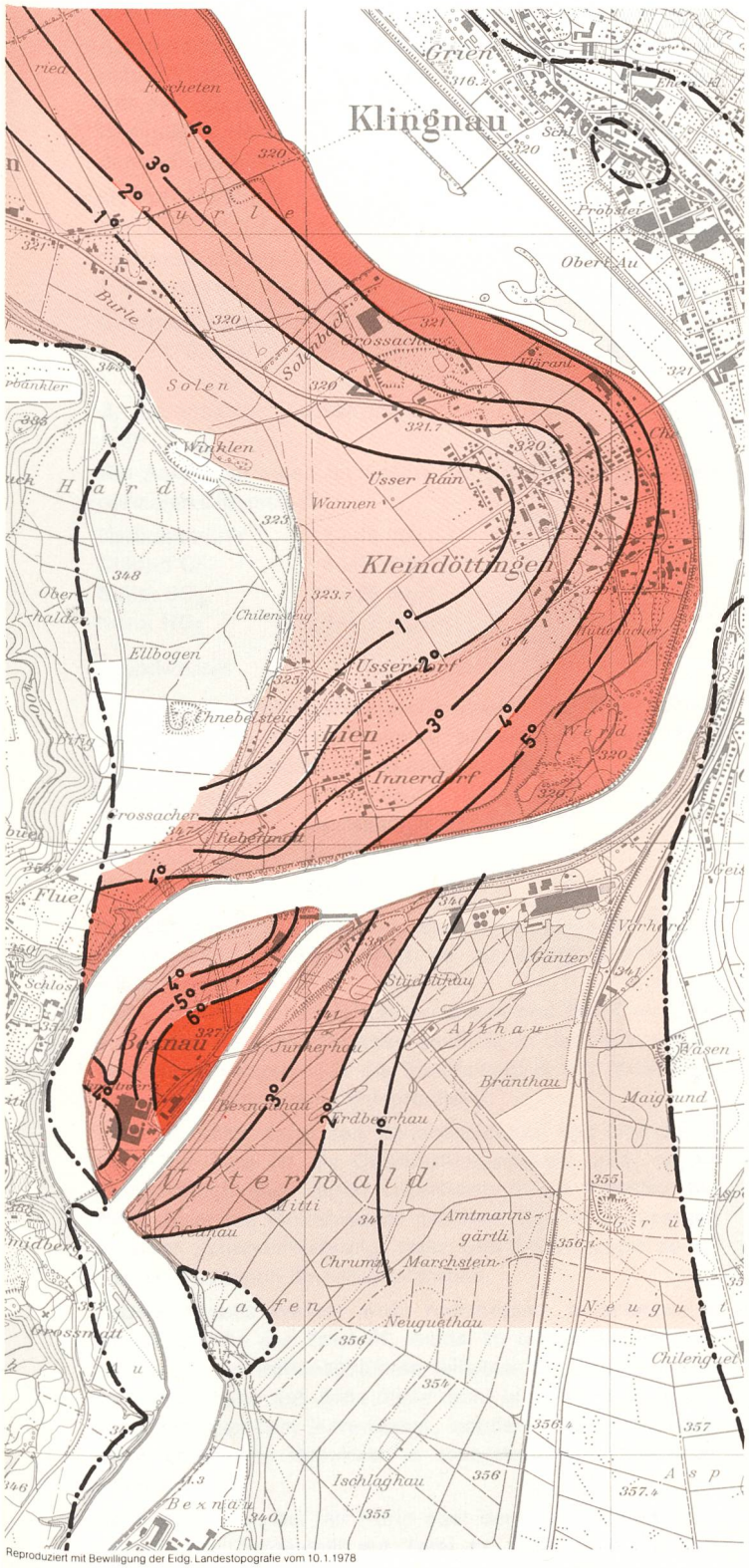
18–20°

>20°

Temperaturamplituden 1975 in °C

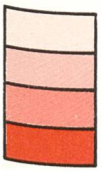
Temperaturverzögerung

1:25 000



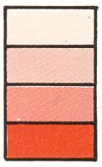
Reproduziert mit Bewilligung der Eidg. Landestopografie vom 10.1.1978

Reproduziert mit Bewilligung der Eidg. Landestopografie vom 10.1.1978



<2°
2–4°
4–6°
>6°

Jahresamplitude der Grundwassertemperatur



<2 Monate
2–4
4–6
>6

Verzögerung der Grundwassertemperatur gegenüber der Aare

tinger Brücke und schliesslich beidseits des Stausees Klingnau. Längs dieser Infiltrationsstrecken reichert die Aare durch Flusswasserinfiltration das Grundwasser an und beeinträchtigt dadurch dessen chemische Eigenschaften.

Aufgrund dieser Wechselwirkungen zur Aare unterliegt die unterirdische Durchflussmenge auch örtlichen Wechseln. Aus dem Produkt von Durchflussfläche, Gefälle und Durchlässigkeit schätzen wir für verschiedene Talquerprofile folgende Durchflussmengen (von Süden nach Norden):

Querprofil Villigen—Würenlingen:
$F = 27\,500\ m^2$; $i = 1{,}4\ ‰$; $k = 4{,}5\ mm/s$; $Q = 10{,}4\ m^3/min$.

Querprofil Böttstein—Beznau—Ruckfeld:
$F = 13\,000\ m^2$; $i = 2{,}5\ ‰$; $k = 9\ mm/s$; $Q = 17{,}6\ m^3/min$.

Querprofil Leuggern—Klingnau:
$F = 22\,000\ m^2$; $i = 1\ ‰$; $k = 6\ mm/s$; $Q = 8{,}1\ m^3/min$.

3. *Chemische Verhältnisse*

Aare

Die Aare zeigt einen für unsere Mittellandflüsse typischen, normalen Chemismus:

Karbonathärte	12—16 °frz
Chlorid Cl	4—11 mg/l
Sulfat SO_4	22—26 mg/l
Nitrat NO_3	2,5— 7 mg/l

Grundwasser

Das «echte» Grundwasser weist abseits der Flusswasserinfiltration eine für Kalkschotter nördlich der Alpen typische wesentlich höhere Mineralisation auf:

Karbonathärte	28—30 °frz
Chlorid Cl	13—15 mg/l
Sulfat SO_4	25—30 mg/l
Nitrat NO_3	25—30 mg/l

Wo sich weiches Aarewasser durch Infiltration mit hartem Grundwasser mischt, kommt es zu einem chemischen Mischwasser.

Tafel II mit Angabe der Karbonathärte und des Chloridgehalts zeigt diese Verhältnisse deutlich: In den Infiltrationsgebieten verringert sich die Mineralisation des Grundwassers durch Verdünnung entsprechend.

Tafel III, links, zeigt den Sauerstoffgehalt des Grundwassers. Die Aare ist als Oberflächengewässer zwar sauerstoffgesättigt, aber durch organische Stoffe belastet. Wo Aarewasser ins Grundwasser infiltriert, kommt es deshalb zu einer Sauerstoffzehrung, unter Umständen sogar zu einem vollständigen Sauerstoffschwund.

Sauerstofffreies Wasser wirkt reduzierend, beispielsweise auf Nitrat. Wie aus Tafel III, rechts, zu entnehmen ist, treten in den Infiltrationsgebieten teilweise so extrem niedrige Nitratgehalte auf, dass diese nicht bloss durch Verdünnung mit weichem Aarewasser, sondern zusätzlich dazu durch chemische Reduktion in sauerstoffarmem Milieu zu erklären sind.

Noch stärker als bei der Härte oder dem Chlorid zeigt sich beim Sulfat, dargestellt auf Tafel IV, links, eine aus der rechten Talflanke bei Würenlingen stammende Verdünnung. Diese kann am ehesten durch Infiltration aus dem Würenlinger Dorfbach, vielleicht auch zusätzlich durch unterirdische Zusickerung von sulfatarmem Karstwasser aus den Malmkalken des Iberig erklärt werden.

Chemische Grundwasserprovinzen

Aufgrund der zahlreichen Analysen lassen sich ohne grosse Schwierigkeiten folgende drei Grundwasserprovinzen ausscheiden (siehe Tafel IV, rechts):

I. Sauerstoffreiches Grundwasser mit hoher Härte ($O_2 >$ 5 mg/l, Karbonathärte > 26 °frz). Es handelt sich um die Gebiete zwischen Rüfenach und Stilli und dem rechten Talhang entlang von Würenlingen bis Döttingen.

II. Sauerstoffreiches Grundwasser mittlerer Härte ($O_2 >$ 5 mg/l, Karbonathärte 22 bis 26 °frz). Dazu gehören die zentralen Teile des Grundwasserstromes nördlich von Stilli, im Würenlinger und Döttinger Unterwald und von Böttstein über Leuggern nach Gippingen und von Döttingen über Klingnau bis Koblenz.

III. Sauerstoffarmes, weiches Grundwasser ($O_2 <$ 5 mg/l, Karbonathärte < 22 °frz), das in Aarenähe beidseits des

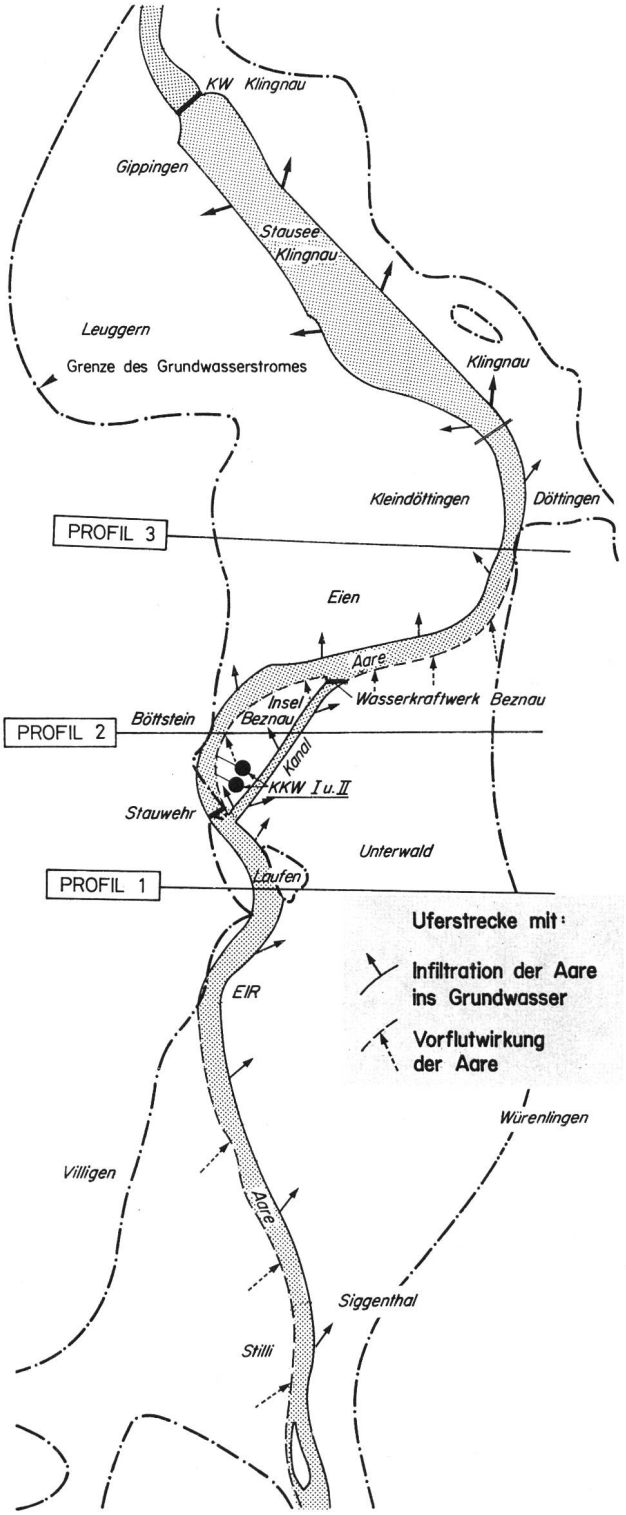


Bild 3. Beziehungen zwischen Aare und Grundwasser.

Stausees Klingnau zudem eisenhaltig und gelegentlich sogar H_2S-haltig ist. Es handelt sich um die Infiltrationszonen dem rechten Aareufer entlang von Station Siggenthal über das Eidg. Institut für Reaktorforschung, EIR, zur Beznau und dem linken Aareufer entlang von Eien über Kleindöttingen bis zum Kraftwerk Klingnau, ebenso rechtsufrig von Döttingen über Klingnau bis zum Kraftwerk Klingnau dem Seeufer entlang.

4. *Zukünftige Grundwasserbewirtschaftung*

Will man für zukünftige Grundwassergewinnung geeignete Areale erfassen, muss man zuerst jene mit zu kleiner Grundwassermächtigkeit und jene mit ungenügendem Chemismus ausscheiden. Dann bleiben in der Talachse die Gebiete mit einwandfreiem Chemismus und grosser Mächtigkeit: im Würenlinger Unterwald, im Döttinger Unterwald, in der Ebene westlich Kleindöttingen und zwischen Leuggern und Gippingen abseits des Stausees Klingnau. In diesen Gebieten wären noch ungenutzte Grundwasserreserven von einwandfreier Qualität vorhanden, die zudem durch künstliche Grundwasseranreicherung beispielsweise in den Wäldern westlich Würenlingen noch vergrössert werden könnten.

5. *Temperatur der Aare im natürlichen Zustand*

Da aus den hydraulischen Beobachtungen und den chemischen Untersuchungen eindeutig hervorgeht, dass Aarewasser in bedeutendem Umfang ins Grundwasser infiltriert, ist anzunehmen, dass sich auch die Wassertemperatur der Aare auf die Temperatur des Grundwassers überträgt, so dass in den Infiltrationszonen aus diesem Grunde grosse jahreszeitliche Temperaturamplituden entstehen, die dem Grundwasser abseits der Infiltrationszonen fremd sind.

In natürlichem Zustand, d h. oberhalb des Kernkraftwerkes Beznau, zeigt die Aaretemperatur jahreszeitliche Schwankungen in der Grössenordnung von rund 20 ° (Bild 11, T 1). Kältester Monat ist üblicherweise der Februar, wärmster Monat der August. Das Jahresmittel 1950 bis 1976 liegt bei 10,4 °.

Das langjährige Jahresmittel von 10,4 ° wurde seit 1973 stets um 0,4 bis 1,4 ° überschritten, so dass sich in diesen letzten vier Jahren eine überdurchschnittlich hohe Flusswassertemperatur ergab.

Diese Erhöhung des Jahresmittels der Aaretemperatur schon oberhalb des Kernkraftwerkes Beznau erschwert die Beurteilung des Einflusses der künstlichen Erwärmung durch das KKB.

6. *Temperatur des Grundwassers*

Im homothermen Grundwassergebiet abseits von Flussinfiltration und bei grosser Überdeckung beträgt im untersuchten Gebiet die mittlere Jahrestemperatur des Grundwassers 10,5 bis 11 °.

Eine Temperaturerhöhung würde eine Senkung der Sättigung von O_2 und eine schnellere Abbaugeschwindigkeit organischer Verunreinigungen im Wasser bewirken, was zu einem grösseren Sauerstoffbedarf und zu einer Verminderung des Selbstreinigungsvermögens führen würde. Aus diesem Grunde sind nennenswerte künstliche Temperaturerhöhungen im Grundwasser unerwünscht und müssten als Qualitätsverminderung betrachtet werden.

Wie bereits eingangs erwähnt, wurde aus diesem Grunde der Temperaturuntersuchung des Grundwassers in der Umgebung der Beznau grosses Gewicht beigemessen. Neben den Messungen aus Grundwasserfassungen bei Pumpbetrieb wurden an der Aussenseite von PVC-Rohren befestigte thermoelektrische Temperaturfühler System Huggenberger elektrisch kontrolliert. Durch diese Anordnung der Messfühler wurde ein guter Kontakt mit dem fliessenden Grundwasser und kleinere Vertikalzirkulationen und damit geringere Durchmischungen erhofft, um so eine allfällig vorhandene Temperaturschichtung eher erfassen zu können.

Temperaturschwankungen, Amplituden und Verzögerung

Die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen nahe der Grundwasseroberfläche betragen abseits der Aare-Infiltra-

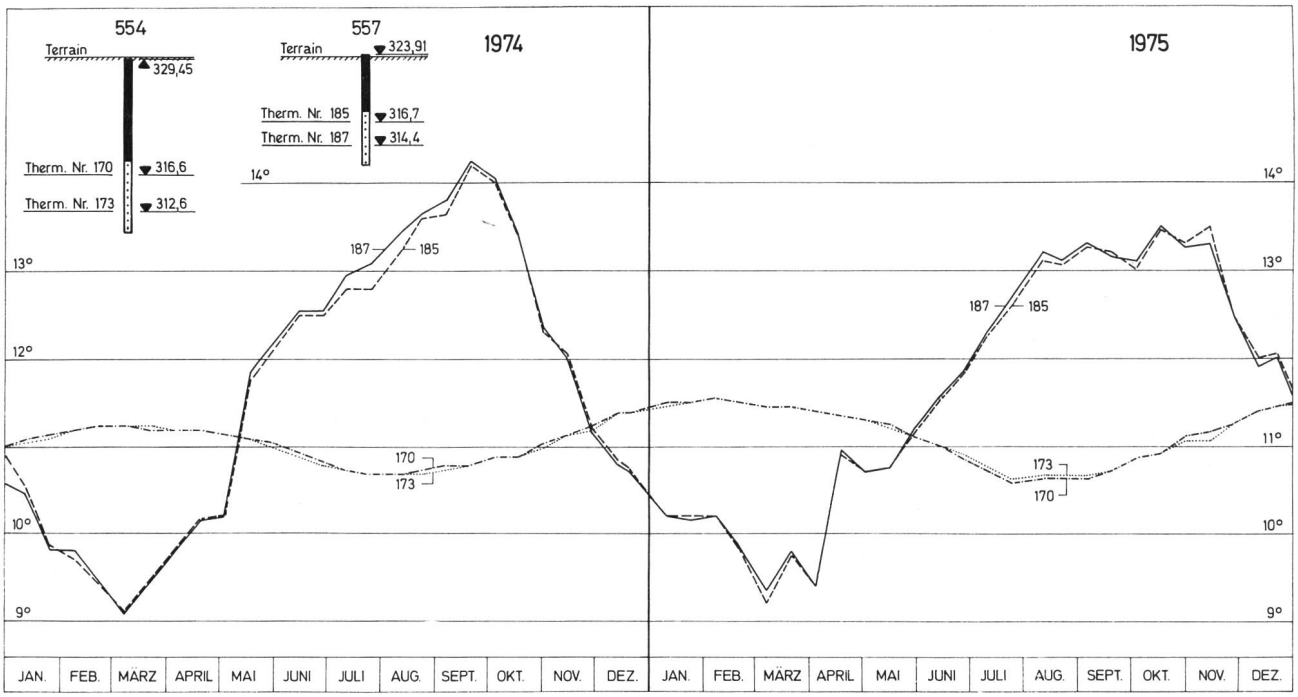


Bild 4. Ganglinien der Grundwassertemperatur bei Rohr 554 abseits der Aare und Rohr 557 am Aareufer (Lage der Rohre siehe Bild 10).

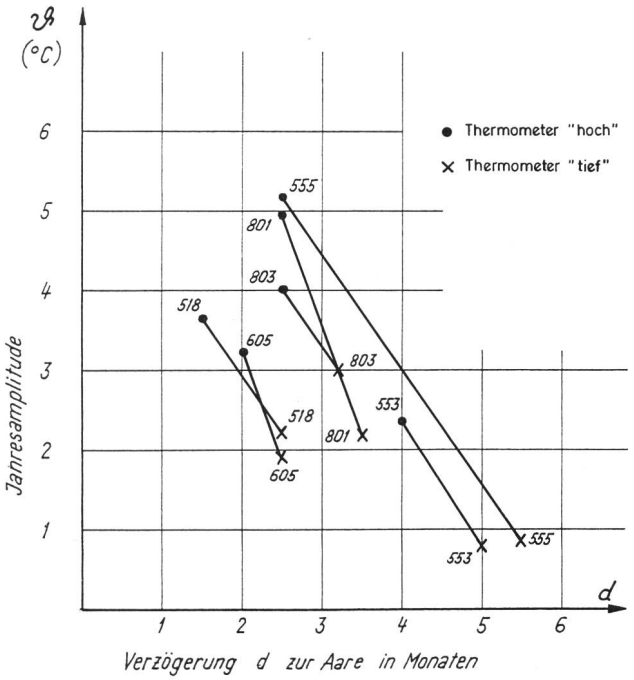


Bild 5. Jahresamplituden ϑ des Grundwassers (in °C) bei Thermometern «hoch» und «tief» am selben Rohr in Funktion der Verzögerung d zur Aaretemperatur (in Monaten).

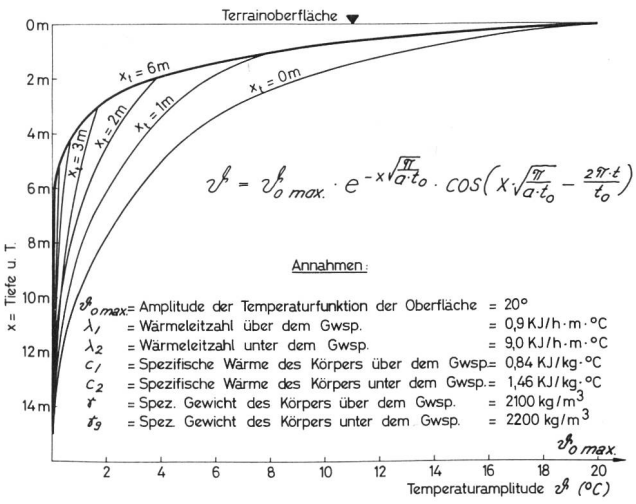


Bild 6. Dämpfung der Jahresamplitude ϑ der Grundwassertemperatur in Funktion der Tiefe unter Terrain x für verschiedene Trokkentiefen x_t (nach E. Gröber 1955).

tion rund 1 ° (Beispiel Rohr 554, Bild 4), bei starkem Einfluss der Aare-Infiltration rund 5 bis 6 ° (Beispiel Rohr 557, Bild 4).

Auf Tafel V sind die Grundwassertemperaturen im Frühling und Herbst 1975 dargestellt; deutlich zeigt sich im Einflussbereich der Aare-Infiltration das verzögerte Nachhinken der Temperatur im Grundwasser gegenüber der Aare.

Auch die Ganglinien der Grundwassertemperaturen zeigen gegenüber jenen der Aare diese zeitliche Verzögerung, die in der Nähe der Aare ein bis zwei Monate beträgt (z. B. Rohr 557, Bild 4) und sich landeinwärts auf vier bis sechs Monate vergrössert, also praktisch ein halbes Jahr beträgt, so dass in diesen Gebieten im Hochsommer die Grundwassertemperatur am tiefsten, im Winter am höchsten ist (z. B. Rohr 554, Bild 4). Es besteht eine gewisse reziproke Abhängigkeit zwischen Grösse der Verzögerung und der Amplitude: Je grösser die Amplitude, um so kleiner ist die Verzögerung (Bild 5). Diese Regel gilt insbesondere bei allen Punkten mit deutlicher Temperaturschichtung.

Aufgrund der Temperaturamplituden und der Verzögerung gegenüber der Aare lassen sich folgende zwei Temperaturbezirke im Grundwasser ausscheiden (siehe Tafel VI):

I. Sehr geringe Schwankungen und grosse zeitliche Verzögerung (praktisch isothermes Gebiet), von der Aare nicht beeinflusst: östlicher Unterwald und Feld von Eien und Leuggern.

II. Gebiete mit grosser Amplitude und kleiner Verzögerung, deutlich durch die Infiltration von Aarewasser beeinflusst: westlicher Unterwald, Gebiet der Insel Beznau und linkes Ufergebiet von Böttstein bis Kleindöttingen.

Die grossen Temperaturamplituden von 3 bis 6 °, die bei Trockentiefen von immerhin nur 3 bis 6 m auftreten, könnten nur zu einem sehr kleinen Teil durch vertikale Wärmeleitung erklärt werden. Die graphische Darstellung auf Bild 6 der bekannten Formel von *Gröber* (1955) für vertikale Wärmeleitung zeigt die Temperaturamplituden ϑ des Grundwassers bei verschiedenen Tiefen x unter Terrain für verschiedene Trockentiefen x_t unter der Annahme einer Amplitude an der Oberfläche von 20 °. Die Wirkung des hori-

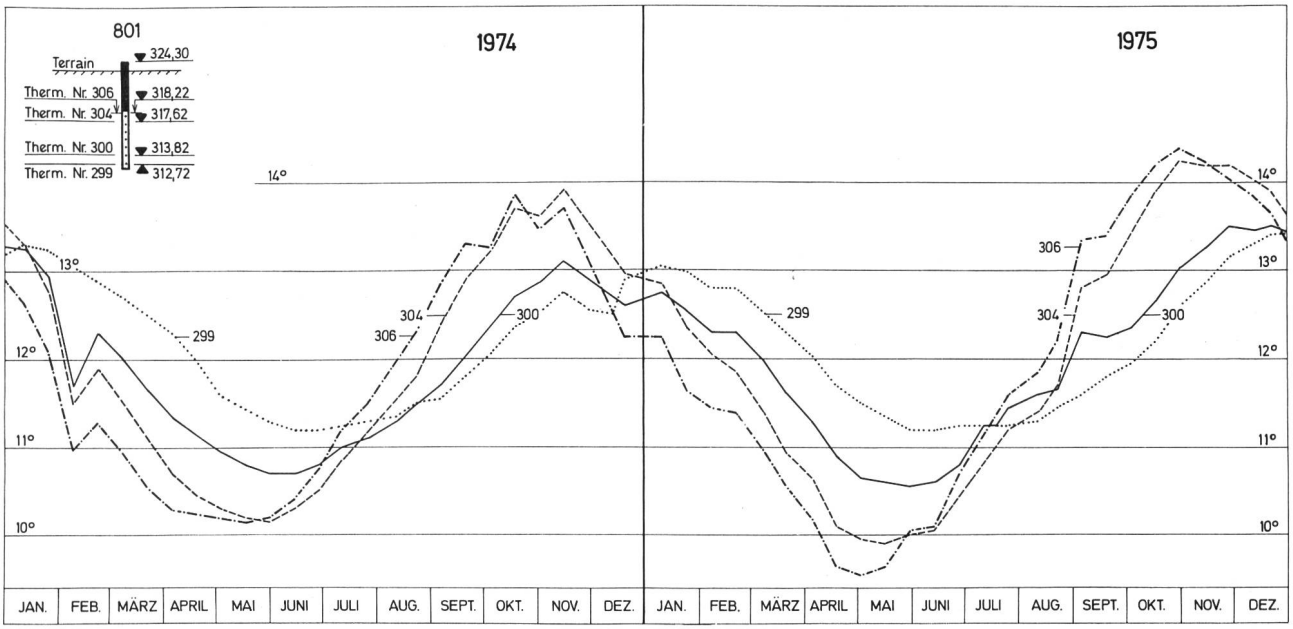


Bild 7. Ganglinien von 4 Thermometern am Rohr 801 auf der Beznau-Insel mit «diffuser» Temperaturschichtung.

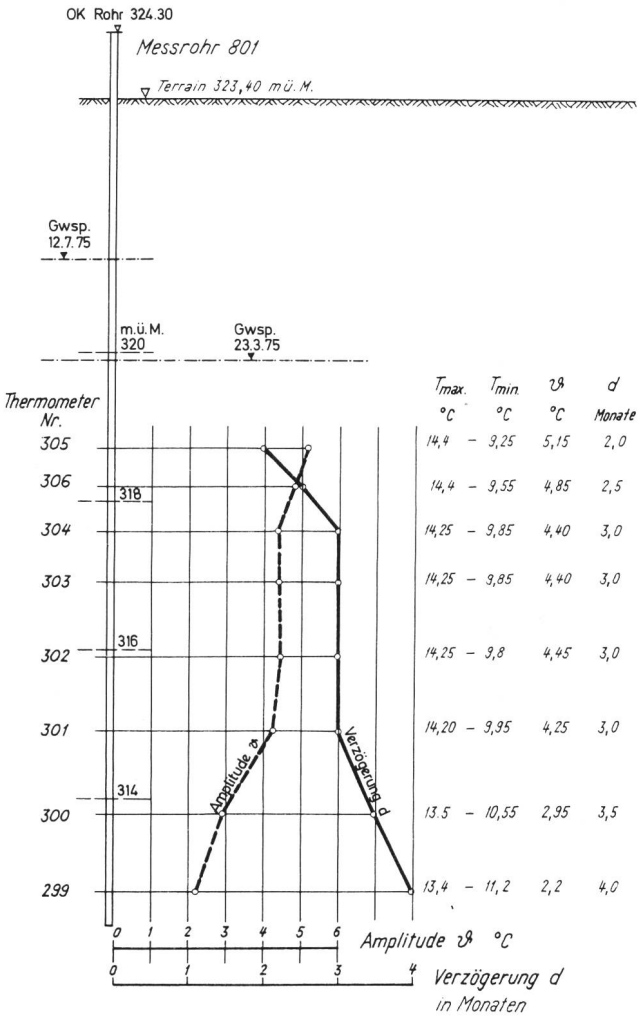


Bild 8. Amplitude ϑ 1975 und Verzögerung zur Aare d in Funktion der Tiefe unter Terrain bei «diffuser» Temperaturschichtung beim Rohr 801.

zontalen Wärmetransportes durch *Konvektion* über infiltrierendes Aarewasser muss bei weitem *dominieren.*

Aus den Temperaturbeobachtungen ergibt sich ein analoges Bild wie aus den chemischen Untersuchungen und aus den hydraulischen Folgerungen: Die Infiltration von Aarewasser ins Grundwasser beeinflusst dieses auch in thermischer Beziehung sehr stark.

Temperaturschichtung

In günstigen Fällen, wo keine Vertikalzirkulation stattfindet, lässt sich eine sog. «diffuse» Temperaturschichtung erkennen (z. B. Rohr 801, Bild 7): Eine Kurvenschar von nicht gebündelten, nicht parallelen Einzelkurven mit zwei Knotenpunkten, die zweimal pro Jahr dort entstehen, wo die Temperaturschichtung umschlägt. Das tiefste Thermometer im Rohr zeigt je die geringste, das höchste Thermometer die grösste Amplitude, während die übrigen Thermometer Mittelstellungen dazwischen einnehmen. Auf Bild 8 ist in einem Vertikalschnitt durch Rohr 801 die Amplitude ϑ und die Verzögerung *d* gegenüber der Aare in Funktion der Tiefe dargestellt, die Ganglinien von Bild 7 ergänzend. Wo im Abstand von einem Meter zwei getrennte Rohre, das eine weniger tief als das andere, versetzt sind, wurde stets eine Temperaturschichtung festgestellt (Bild 9). Dabei können aber an beiden Rohren straff gebündelte Ganglinien mit sehr kleiner Streuung auftreten, so dass innerhalb des einzelnen Kontrollpunktes keine Schichtung zu erkennen ist, wohl aber in der Differenz der beiden Punkte. Die Temperaturdifferenz beträgt in den Maxima und Minima 1 bis 1,5 °.

Es ist anzunehmen, dass die Temperaturschichtung den Normalfall darstellt, während an den Punkten, an denen keine solche festgestellt wurde, örtliche Störungen, insbesondere Vertikalzirkulationen dem Messrohr entlang, die Schichtung zerstören. In den Pumpwerken ist die Temperaturschichtung nicht zu erkennen, weil durch den Pumpbetrieb das angesaugte Wasser durchmischt wird.

Überall, wo Temperaturschichtung zu erkennen ist, bildet sich im Halbjahr der Tieftemperaturen eine sogenannte «inverse» Schichtung, indem dann das kältere und somit spezifisch schwerere Wasser sich *über* dem wärmeren und spezifisch leichteren Wasser einschichtet. Diese zum spezifischen Gewicht des Wassers inverse Schichtung wiederholt sich alljährlich und beweist, dass der Vorgang, der

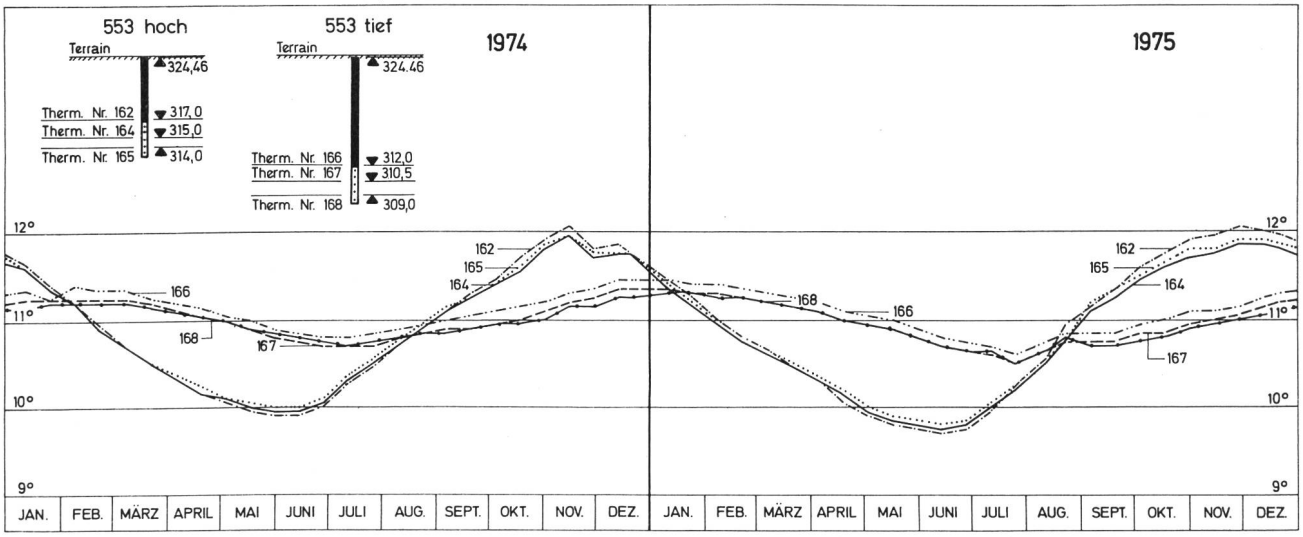


Bild 9. Ganglinien von je 3 Thermometern an den Rohren «553 hoch» und «553 tief». «Scharfe» Temperaturschichtung; «inverse» Schichtung jeweils von Februar bis Juli.

zur Temperaturschichtung führt, weit dominiert gegenüber der durch das spezifische Gewicht angestrebten Dichteschichtung, die tatsächlich nicht zur Geltung kommt. Auf Bild 9 sind solche Verhältnisse für die beiden Rohre 553 «hoch» und «tief» dargestellt; Rohr «tief» reicht dabei rund 5 m tiefer ins Grundwasser hinein als Rohr «hoch».

7. *Temperatureinflüsse des Kernkraftwerks Beznau auf die Aare und das Grundwasser*

Dotierwassermenge

Wegen der Rückgabe von erwärmtem Kühlwasser in das Aareknie unterhalb des Stauwehres wurde das frühere Wehrreglement in dem Sinne revidiert, dass nach Betriebsaufnahme des KKB die Dotierwassermenge anfänglich auf 40 m³/s, seit Dezember 1973 auf 20 m³/s festgelegt wurde. Dadurch führt seit Betriebsaufnahme des KKB das Aareknie bei Niederwasser stets wesentlich mehr Wasser als früher, nämlich mindestens das Dotierwasser und das erwärmte Kühlwasser von 20 bzw. 40 m³/s. Dadurch wird das Aareknie bei Niederwasser stärker durchflossen als vor Betriebsaufnahme, weshalb anzunehmen ist, dass dadurch in diesem Flussabschnitt auch die Infiltration über das linke Ufer im Bereich der linksufrigen Kaltwasserfahne eher etwas grösser ist als früher.

Die Erwärmung der Aare durch erwärmtes Kühlwasser des KKB

Durch die Rückgabe von erwärmtem Kühlwasser des KKB in die Aare am rechten Ufer, bei Halblast 20 m³/s, bei Vollast 40 m³/s mit einer um 9 bis 10 ° erhöhten Temperatur, entsteht in der Aare eine Warmwasserfahne (Bild 10). Diese Warmwasserfahne bewegt sich zunächst dem rechten Ufer entlang abwärts und wird vom linken Ufer durch das kalte Dotierwasser resp. den Überlauf des Wehres getrennt.

Unterhalb des hydraulischen Kraftwerkes Beznau gesellt sich von rechts her eine weitere Kaltwasserfahne des turbinierten Aarewassers, welche von hier an flussabwärts die Warmwasserfahne an das linke Ufer drängt.

Aufgrund von systematischen Temperaturmessungen in Querprofilen der Aare zeigt es sich überraschenderweise, dass dabei keine horizontale Temperaturschichtung, wie das aufgrund der Dichte zu erwarten wäre, sondern stets eine vorwiegend *vertikale* Zonierung eintritt (Bild 12). Die drei Temperaturfahnen, eine linksseitige kalte vom Wehr her, die warme aus den beiden Ausläufen der Kühlwasserrückgabe und eine rechtsseitige kalte aus den Turbinen des Kraftwerkes Beznau, sind gegenseitig annähernd vertikal begrenzt. Kaltes wie warmes Wasser reichen stets bis auf den Grund der Aare. Grösse und Wirkung der Warmwasserfahne hängen von der Wasserführung der Aare ab: Bei Niederwasser entspricht der Wehrdurchfluss der Dotierwassermenge, nämlich bis Dezember 1973 rund 40 m³/s, seither rund 20 m³/s. In solchen Phasen ist der Einfluss des erwärmten Kühlwassers viel grösser als bei Hochwasser der Aare, wenn alles nicht durch die Turbinen verarbeitete Wasser über das Wehr abfliesst. Kontrollpunkte am linken Aareufer zeigen eine Erwärmung von mehr als 1 ° nur bei Niederwasser, nicht aber bei Hochwasser. Auf Bild 11 sind die Temperaturganglinien T 1 für die Aare oberhalb der Kühlwasserrückgabe, T 4 mitten in der Warmwasserfahne und T 5 am linken Ufer unterhalb des Wasserkraftwerkes dargestellt. Deutlich ist daraus zu ersehen, wie T 4 ständig erwärmt ist, während T 5 eine gesetzmässige Abhängigkeit von der Wasserführung der Aare aufweist. Es zeigt sich, dass bis zur Döttinger Brücke die Durchmischung nicht so vollständig ist, dass dort das Wasser an beiden Ufern wieder dieselbe Temperatur aufweisen würde. Bei Niederwasser ist bis dorthin das turbinierte kalte Wasser auf der rechten Uferseite und die ans linke Ufer abgedrängte Warmwasserfahne noch deutlich zu verspüren (Bild 10).

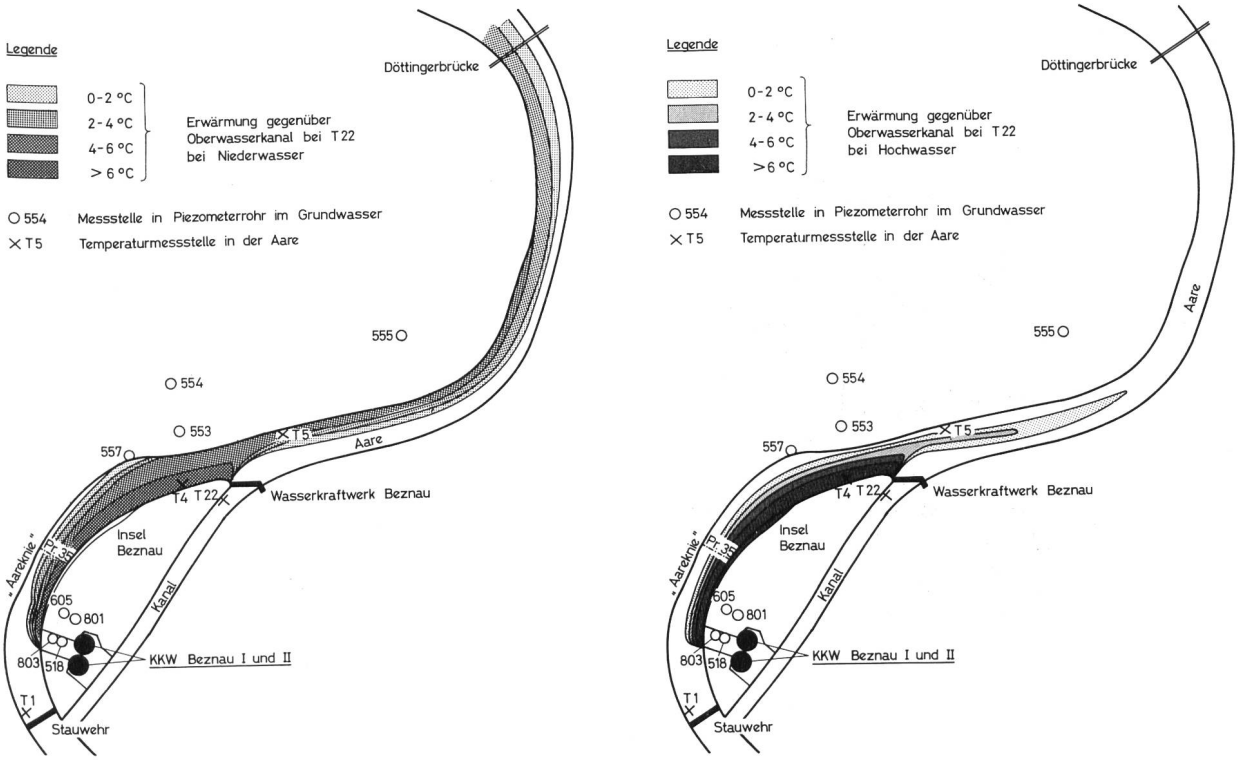


Bild 10. Die Erwärmung der Aare bei Vollast des KKB, links bei Niederwasser der Aare am 17. 10. 75, rechts bei Hochwasser der Aare am 18. 4. 76.

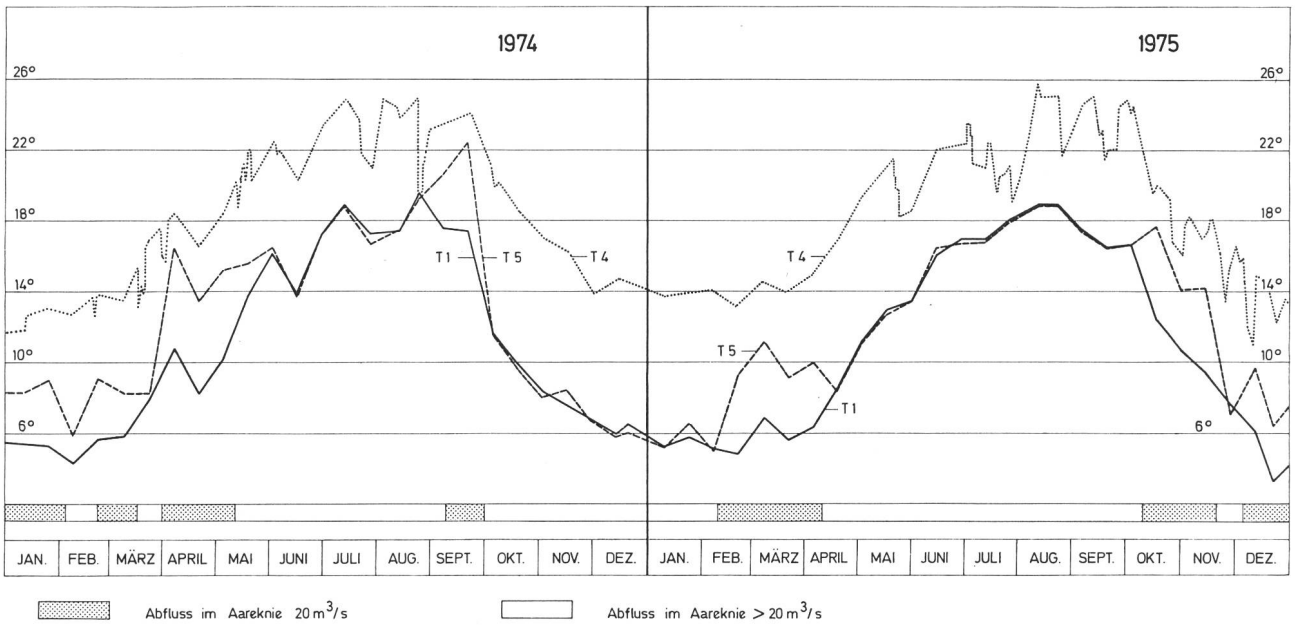


Bild 11. Ganglinien der Aaretemperatur
T 1 oberhalb der Kühlwasser-Rückgabe,
T 4 unterhalb der Kühlwasser-Rückgabe am rechten Ufer,
T 5 am linken Ufer.

(Lage der Thermometer siehe Bild 10)
Deutlich ist der Einfluss der Abflussmenge im Aareknie auf die Temperatur bei T 4 zu erkennen.

Die Kolmatierung des Aarebettes

Durch die Erwärmung des Aarewassers im Bereich der Warmwasserfahne dürfte die organische Kolmatierung des Flussbettes und damit dessen Abdichtung durch vermehrtes Bakterien- und Algenwachstum verstärkt werden. Dadurch dürfte die Infiltration von Aarewasser ins Grundwasser im Bereich der Warmwasserfahne eher etwas verkleinert werden.

Chemische Veränderungen

Weder in der Aare noch im Grundwasser auf der Beznauinsel noch im Infiltrationsgebiet links der Aare zwischen Eien und Kleindöttingen ist bisher eine gesetzmässige Veränderung in der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers zu erkennen, die auf das Kernkraftwerk Beznau bzw. auf die durch dieses bewirkte Aarewassererwärmung zurückzuführen wäre. Die örtlichen und zeitlichen Schwankungen im Chemismus lagen nach Betriebsaufnahme im selben Schwankungsbereich wie vorher und wiesen keine gesetzmässige Veränderung auf.

Thermische Beeinflussung des Grundwassers

Auf der Beznauinsel ist seit 1970 in der Umgebung des KKB eine eindeutige Erwärmung des Grundwassers zu erkennen, welche bis 1976 1 bis 4 ° erreichte. Diese Erwärmung kann nur durch Wärmeleitung über Beton erklärt werden, nämlich Kühlwasserkanäle, Leitungen und Fundamente, die ins Grundwasser eintauchen; sie ist auf Bild 13 dargestellt.

In der schmalen linken Uferzone südlich Eien bis Kleindöttingen ist eine leichte Erwärmung des Grundwassers in der Grössenordnung von 0,2 bis 0,4 ° zu erkennen, im alten Fassungsschacht neben der Döttinger Brücke sogar von 0,5 °. Weiter landeinwärts kann eine solche nicht festgestellt werden.

Rein rechnerisch wäre seit Betriebsaufnahme des KKB mit einer Temperaturerhöhung der Aare im Jahresmittel zu rechnen, die 1972 erstmals 0,5 ° erreichte, seither entsprechend der Energieproduktion ständig zunahm und 1976 0,87 ° hätte erreichen müssen. Theoretisch müsste sich diese Erwärmung des Aarewassers mittels Konvektion in gewissem Umfange auch im Grundwasser bemerkbar machen, und zwar unterhalb des hydraulischen Kraftwerkes Beznau, von wo an bei Niederwasser die Warmwasserfahne an das linke Ufer gedrängt wird. Nun lag aber das Jahresmittel der Aare oberhalb der Beznau in den Jahren 1973 bis 1976 aus klimatischen Gründen bereits über dem langjährigen Mittel. Diese klimatisch bedingten höheren Aaretemperaturen und die durch die KKB bedingte künstliche Erwärmung der Aare überlagern sich in ihrer Wirkung und lassen sich in ihrer Beeinflussung des benachbarten Grundwassers vorderhand nicht trennen.

Die Warmwasserfahne dem linken Aareufer entlang ist nur bei Niederwasser zu erkennen, bei Hochwasser wird sie vom kalten Wasser der Aare überdeckt (Bild 10). Die Temperaturstudien im Grundwasser links der Aare zwingen zur Annahme, dass aber gerade bei Niederwasser die Infiltration von Aarewasser ins Grundwasser offenbar sehr bescheiden ist, im Gegensatz zu den Hochwasserphasen, denen aufgrund der chemischen Befunde eine grosse Infiltrationswirkung zugemessen werden muss. Dann verschwindet aber die Warmwasserfahne am linken Ufer infolge Durchmischung und kann sich dadurch kaum erwärmend auf das Grundwasser auswirken. Dank diesem für das Grundwasser glücklichen Umstand ist bisher das für die Grundwassernutzung wichtige Grundwassergebiet Eien—Kleindöttingen—Leuggern *nicht* spürbar erwärmt worden.

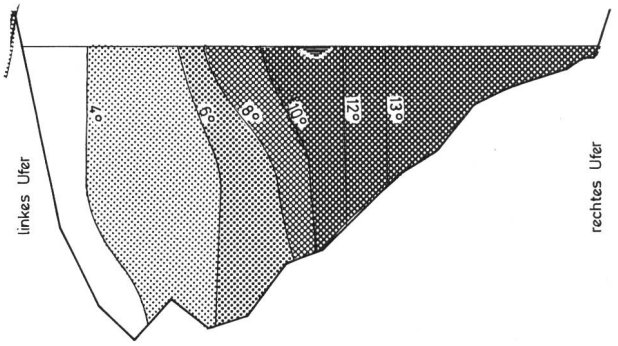


Bild 12. Temperatur-Querschnitt bei Profil 35 durch die Aare unterhalb der Kühlwasser-Rückgabe. Warmwasserfahne mit vertikaler Temperaturzonierung (9. 1. 1973).

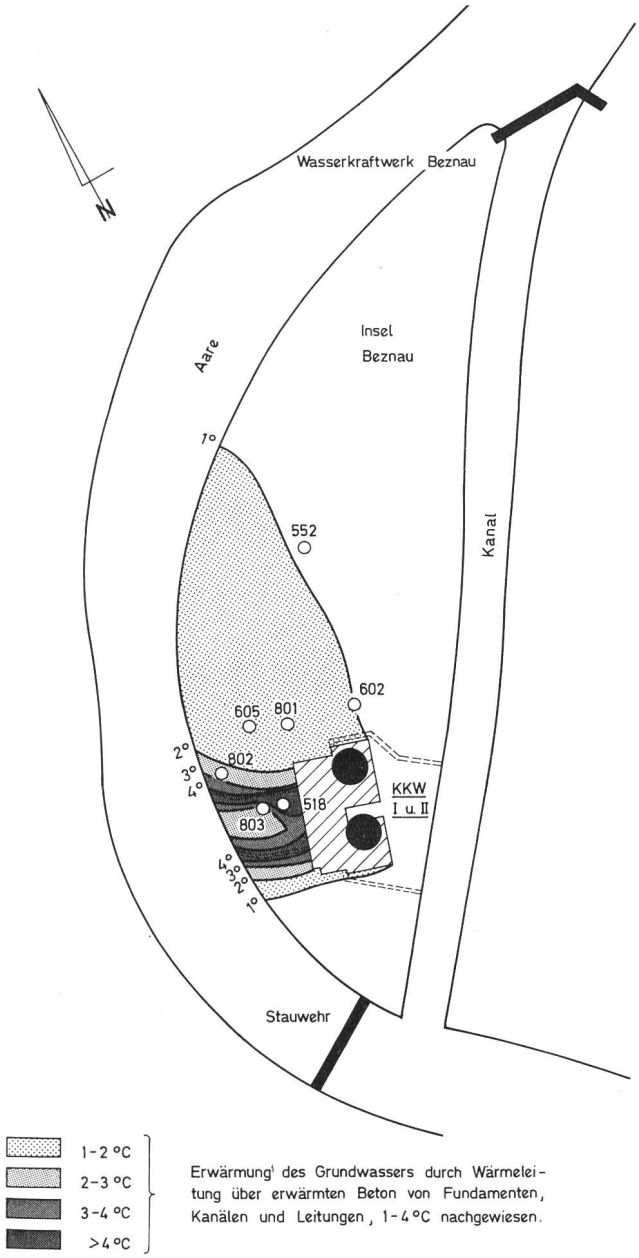


Bild 13. Erwärmung des Grundwassers 1970—1976 durch Wärmeleitung über erwärmten Beton von Fundamenten und Betonkanälen.

Literaturverzeichnis

Kanton Aargau (1946): Karte der öffentlichen Grundwasserströme und Grundwasserbecken. 1:100 000. Herausgegeben von der Kant. Baudirektion.

Bovet D., Cotton L., Menjoz A., Recordon E. (1976): Recherches expérimentales sur les propriétés thermiques et hydrauliques des sols. «Bull. Soc. vaud. sc. nat.», no. 350, vol. 73, 1976.

Clouet d'Orval M., Ledoux E. (1975): Détermination in situ des paramètres du transfert de la chaleur dans les aquifères en écoulement monophasique. «Bulletin du BRGM», 2e série, no. 1. 1975 Paris.

Eidg. Departement des Innern (1968): Gewässerschutztechnische Gesichtspunkte im Zusammenhang mit der Kühlwasserentnahme und -rückgabe bei konventionellen und nuklearthermischen Kraftwerken.

Gröber E. G. (1955): Grundgesetze der Wärmeübertragung. Springer, Berlin.

Jäckli H. (1968): Die Grundwasservorkommen des Kantons Aargau, 1:200 000. «Wasser- und Energiewirtschaft» 60 (1968) Nr. 9.

Jäckli H. (1974): Grundwasser und Oberflächengewässer in ihren gegenseitigen Beziehungen. «Jber. u. Mitt. oberrh. geo. Ver.», N. F. 56, Stuttgart.

Jäckli H. u. Kempf Th. (1972): Hydrogeologische Karte der Schweiz, 1:100 000, Blatt Bözberg—Beromünster, mit Erläuterungen.

Mathey B., Menjoz A., Saugy B. (1974): Modification du champ des températures de la nappe souterraine sous une raffinérie de pétrole. Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel.

Mathey B. (1975): Recharge thermique d'une nappe phréatique. Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel.

Mühlberg F. (1901): Quellenkarte Brugg, 1:25 000. Beilage zu einem Bericht an die aargauische Baudirektion und «Mitt. Aarg. Natf. Ges.», 9. Aarau.

NOK (1949): Kraftwerk Beznau der Nordostschweizerischen Kraftwerke. Führer durch die schweizerische Wasser- und Elektrizitätswirtschaft, Band 3, III. Ausgabe, 1949.

NOK (1976): Kernkraftwerk Beznau-Döttingen der Nordostschweizerischen Kraftwerke.

Thirriot C., Gaudu R. (1975): Le doublet hydrothermique dans les nappes souterraines. «Bulletin du BRGM», 2e série, no. 1, Paris.

Trüeb E. (1962): Hydrologische Interpretation von Temperaturbeobachtungen in Grundwasserströmen. «Schweiz. Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie», 1962, Heft 7.

Vischer D. (1971): Die Kühlung von Kernkraftwerken mit Flusswasser. «Wasser- und Energiewirtschaft» 63 (1971) Nr. 4.

Adresse der Verfasser: Prof. Dr. Heinrich Jäckli und Dr. Walter Ryf, Geologen, Limmattalstrasse 289, 8049 Zürich-Höngg.