

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

Artikel: Untersuchungen über die Temperaturverhältnisse des Grundwassers im Raume Beznau-Döttingen
Autor: Véya, Raymond / Hardy, Erwin
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-941066>

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: 13.01.2026

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

Untersuchungen über die Temperaturverhältnisse des Grundwassers im Raume Beznau-Döttingen

Raymond Véya und Erwin Hardy

1. Einleitung

Die Kühlwassereinleitung beim Kernkraftwerk Beznau hat als erstmalige bedeutsame Wärmeeintragung in ein schweizerisches Fließgewässer, das sowohl als Vorfluter und Infiltrant mit einem wertvollen und genutzten Grundwasservorkommen in Wechselwirkung steht, Anlass zu einer umfangreichen Untersuchungskampagne gegeben. Dem damaligen Wissensstand entsprechend, konnte die Frage der Auswirkungen einer künstlichen Flusserwärmung auf die Temperatur des Grundwassers nur mittels umfangreichen Beobachtungen angegangen werden. In der land- und forstwirtschaftlichen Literatur ist zwar das Temperaturregime der obersten Bodenschicht (Wurzelbereich) sehr gut abgehandelt. Für die tieferen Bodenschichten und Grundwassersträger sowie für die Temperaturbeziehungen zwischen Fluss- und Grundwasser jedoch musste ein lückenhafter Erkenntnisstand festgestellt werden.

Mit dem im Raume Beznau aufgezogenen Messnetz mit über 70 Thermometern in 13 Grundwassermessstellen, mit Temperaturbeobachtungen in 10 Grundwasserfassungen, ergänzt mit Thermometern in der Trockenschicht, konnte im Laufe der zwölfjährigen Mess- und Auswertungskam-

pagne wertvolles Datenmaterial über das Temperaturregime des Grundwassers im Raume Beznau gesammelt werden.

Bessere Kenntnisse über das natürliche und beeinflusste Temperaturregime des Bodens sind auch im Hinblick auf neuere Energiebetrachtungen von Bedeutung, sei es, dass die Wärme des Bodens bzw. des Grundwassers als Wärmequelle nutzbar gemacht oder dass der Boden als Wärmespeicher oder -austauscher herangezogen wird. In diesen Fällen der forcierten Wärmebewirtschaftung von Boden und Grundwasser stellt das vertiefte Wissen über die natürlichen Verhältnisse eine wichtige Grundlage dar.

2. Beobachtungsnetz und Messanordnung

Der Problemstellung entsprechend wurden die Schwerpunkte der Grundwasserbeobachtung, Bild 1, einerseits auf die Umgebung des Kernkraftwerkes auf der Insel Beznau und andererseits auf das linksufrige Infiltrationsgebiet, das ins Grundwasserfeld von Eien-Kleindöttingen überleitet, konzentriert.

Die Standardausführung der Messstellen, Bild 2, gestattet die Beobachtung sowohl des Pegelstandes als auch der Grundwassertemperaturen und erlaubt das Pumpen von Wasser zwecks chemischer Analyse. Die Temperaturfühler «Huggenberger» sind grundsätzlich alle im Grundwassersträger, d. h. im Bereich des gelochten Piezometerrohres, angeordnet. Je nach Grösse der erfassten Wassertiefe wurden 2 bis 11 Thermosonden pro Messstelle vorgesehen. Bei den zwei Messstellen 553 und 555 im Infiltrationsgebiet wurde versucht, die Grundwassertemperaturen in zwei Etagen zu erfassen. Von den je zwei separat angeordneten Rohren ist das eine nur für den oberen, das andere nur für den unteren Bereich instrumentiert. Lediglich bei der Messstelle 801 wurden nachträglich noch vier Thermosonden im Bereich zwischen Grundwasserspiegel und Oberfläche eingebaut.

Neben anfänglichen Schwierigkeiten mit den Kontakten in den Steckdosen für den Anschluss des Ohm-Meters, Bild 3, hat sich bei einer Reihe dieser Mehrzweck-Messstellen ein systematischer Mangel bemerkbar gemacht, der den Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Tiefe zu verfälschen vermag. Im Innern des Piezometerrohres, das im Grundwasserbereich gelocht ist, kann sich leicht ein vertikaler Temperaturschleiss vollziehen. Als Ursache für diesen Temperaturkurzschluss können einmal die im anisotropen Grundwassersträger vorkommenden örtlichen Vertikalkomponenten der Grundwasserströmung [1] in Frage kommen, oder aber die vertikale Dichteströmung, die sich vor allem im Winterhalbjahr mit höheren Temperaturen in den tieferen Schichten im Rohr einstellen kann. Ein zweiter bevorzugter vertikaler Strömungsweg kann sich zwischen Rohr- und Bohrlochwand einstellen. Bei der Verfüllung dieses Zwischenraumes musste auf die auf der Aussenseite angebrachten Thermosonden und Kabel Rücksicht genommen werden. Der Verdichtungsgrad in diesem Zwischenraum dürfte deshalb deutlich unter demjenigen des ungestörten Bodens liegen. Beide Möglichkeiten des Temperaturkurzschlusses sind wohl die Ursache dafür,

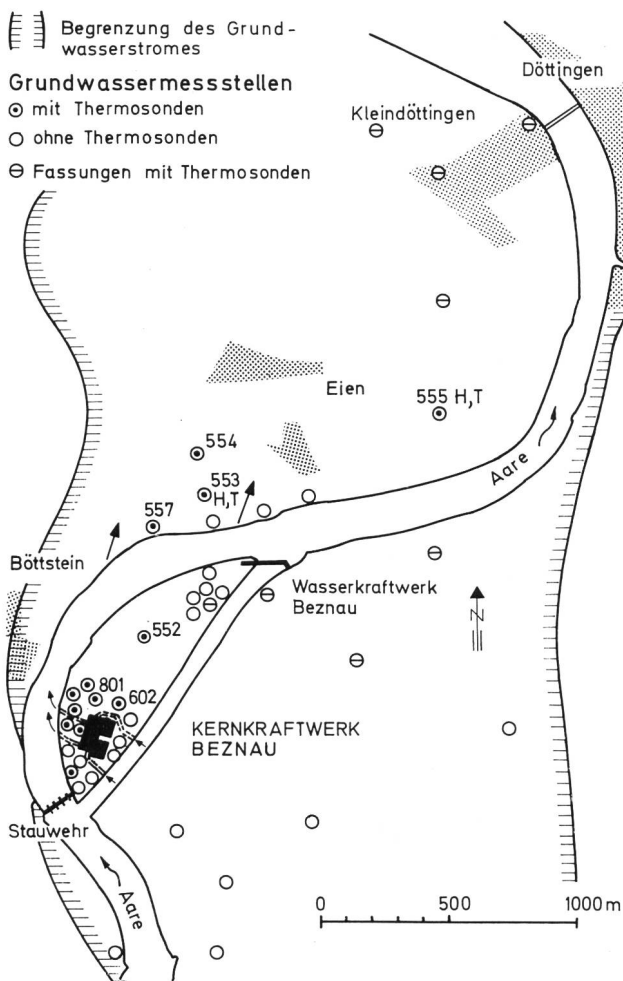


Bild 1. Situation mit sämtlichen Grundwassermessstellen.

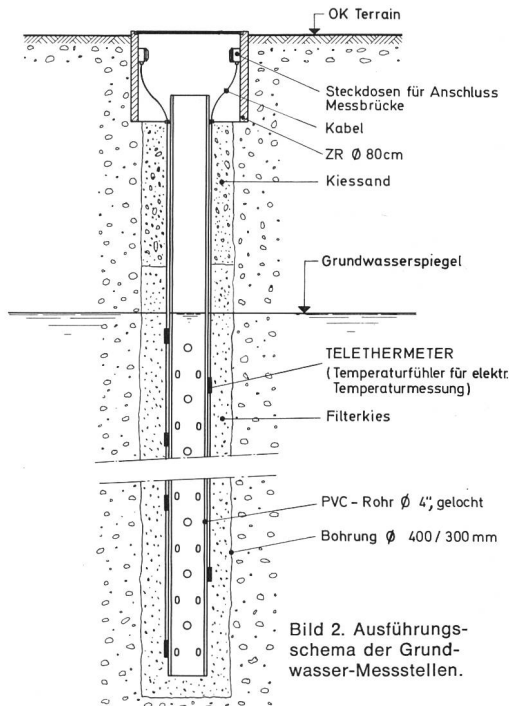


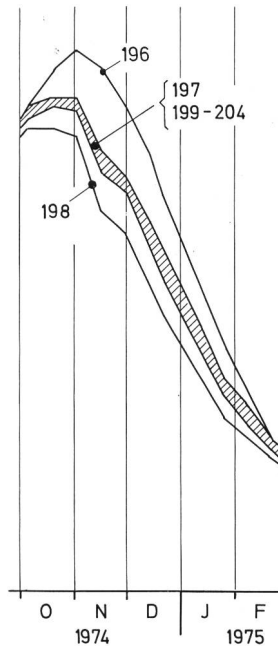
Bild 2. Ausführungsschema der Grundwasser-Messstellen.



Bild 3. Schacht für die Messung der Temperaturen im Grundwasser mit Anschlussdosen für die Messwerterfassung in verschiedenen Tiefen. Unten im Bild ist das festeingebaute Messrohr sichtbar.

Typische Ganglinien

a) Piezometerrohr wassergefüllt



b) Piezometerrohr sandgefüllt

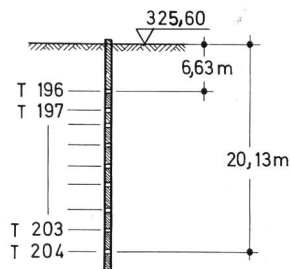
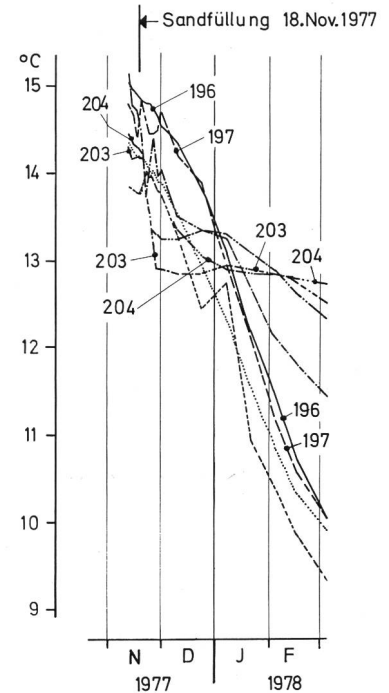


Bild 5. Messstelle 602. Einfluss der Sandfüllung im Piezometerrohr auf die gemessenen Grundwassertemperaturen.

dass eine Reihe von Messstellen für alle Thermometer praktisch den gleichen gebündelten Jahrestemperaturgang aufweisen, während die übrigen, und vor allem diejenigen Messstellen, bei denen der höhere und der tiefere Grundwasserbereich getrennt gemessen werden können, eine deutlich tiefenabhängige Temperaturabstufung zeigen. Diese an sich widersprüchliche Erscheinung im gleichen Grundwasserstrom war Gegenstand eingehender Untersuchungen.

Bei der Messstelle 552, die stets einen gebündelten Temperaturgang aller Fühler aufweist, konnte durch Pumpen mittels Tauchpumpe in bestimmter Tiefe die theoretisch für diese tiefere Schicht errechnete, der natürlichen Abstufung entsprechende Temperatur nachgewiesen werden, Bild 4. Viel einleuchtender ist der umgekehrte Effekt, dass nämlich durch Pumpen im Rohr 555 «Tief», die natürliche Temperaturschichtung zerstört werden kann. Letzterem Fall entsprechen die Verhältnisse in den Wasserfassungen, wo die jeweils gemessene Mischwassertemperatur stark durch die Temperatur der ergiebigen Schicht geprägt sein dürfte.

Wertvolle Hinweise über Konvektionserscheinungen in Piezometerrohren [2] hatten uns veranlasst, bei der seit 1976 aus dem Beobachtungsprogramm eliminierten Messstelle 602, welche stets uniformen Temperaturgang für alle Thermosonden aufwies, das Piezometerrohr mit Sand aufzufül-

len. Diese einfache Massnahme zur Erschwerung der Konvektion im Rohr hat, wie Bild 5 zeigt, sofort zu der tiefenabhängigen Temperaturabstufung geführt.

Dieses Ergebnis lässt erkennen, dass verlässliche Grundwassertemperaturen nur mittels separat angeordneten und gegeneinander abgedichteten Temperaturfühlern erhoben werden können.

3. Der Wärmeaustausch mit der Atmosphäre

In den betrachteten Grundwassergebieten — Insel Beznau und die Ebene von Eien-Kleindöttingen — ist der freie Spiegel grösstenteils vier bis sechs Meter unter der Oberfläche anzutreffen. Für das natürliche Temperaturregime des Grundwassers ist deshalb neben der Wärmebeeinflussung infolge Aareinfiltration auch der Wärmeaustausch mit der Atmosphäre noch wesentlich beteiligt.

3.1 Energieumsetzung an der Bodenoberfläche

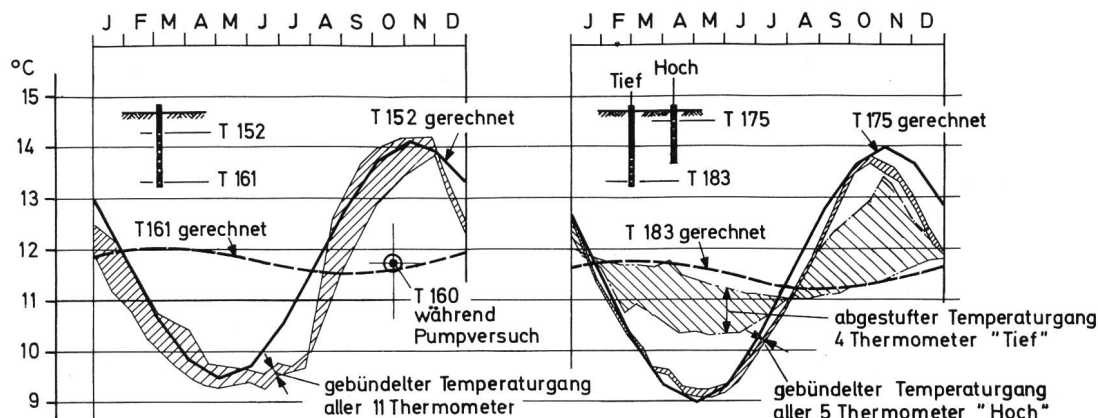
Die Ankopplung des Temperaturgeschehens des Bodens an die Energetik der Atmosphäre vollzieht sich über die komplexen Strahlungsumsetzungen und den konvektiven Wärmeübergang an der Oberfläche. Die für unsere Breitengrade massgeblichen Daten für die Leistungsbilanz sind [3] entnommen und vereinfacht in Bild 6 veranschaulicht. Von der gesamten, auf die Erdoberfläche eingestrah-

Messstelle 552

Messstelle 555 "H" und "T"

Temperaturgang 1974

Temperaturgang 1974



Temperaturprofil

Pumpversuch 21.Okt.74

Temperaturprofil

Pumpversuch 7.Nov.74

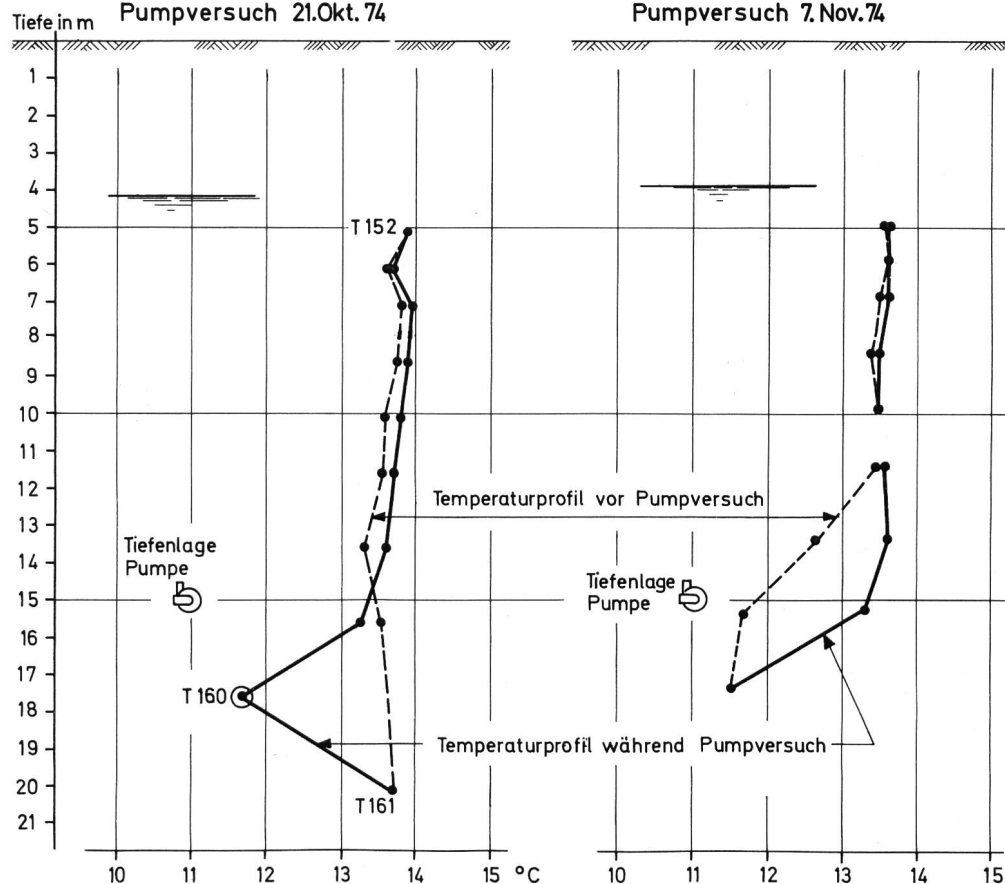


Bild 4. Beeinflussung des vertikalen Temperaturprofils durch Pumpversuche im Piezometerrohr.

Leistung $S_B = 179 \text{ W/m}^2$ erfolgt die Rückgabe an die Atmosphäre neben dem Albedoanteil über folgende Umsetzungen, welche auch die Temperatur der Erdoberfläche zu beeinflussen vermögen. Die Leistungsangaben sind jährliche Mittelwerte:

- Leistungsanteil für die Verdampfung von Bodenfeuchtigkeit, S_v ca. 48 W/m^2
- Infrarote Abstrahlung und konvektiver Wärmefluss, $S_k + S_i$ ca. 117 W/m^2
- Vergleich: Terrestrischer Wärmefluss $0,062 \text{ W/m}^2$

Ein mengenmäßig kleiner Anteil obiger Leistungsumsetzungen vermag in die Tiefe zu wirken und den oberen Bodenschichten ein Temperaturregime aufzuzwingen. Über das Sommerhalbjahr wird ein Wärmefluss von im Mittel

rund 5 W/m^2 erzeugt, der von der Oberfläche nach unten dringt und dann in der darauffolgenden Winterperiode wieder an die Atmosphäre abgegeben wird.

Der terrestrische Wärmestrom von $0,062 \text{ W/m}^2$ dagegen vermag wegen seines bescheidenen Anteils den Wärmehaushalt der oberen Bodenschichten kaum zu beeinflussen und kann für die nachstehenden Betrachtungen vernachlässigt werden.

Mittels einer speziellen Instrumentierung im engeren Bereich der Bodenoberfläche lässt sich der im Sommer in den Boden eingetragene Wärmeüberschuss ermitteln. Im Bild 7 sind — allerdings für einen anderen Standort — der Verlauf des Temperaturgradienten sowie der integrierte Wärmefluss in der obersten Bodenschicht über drei sonnige Junitage dargestellt.

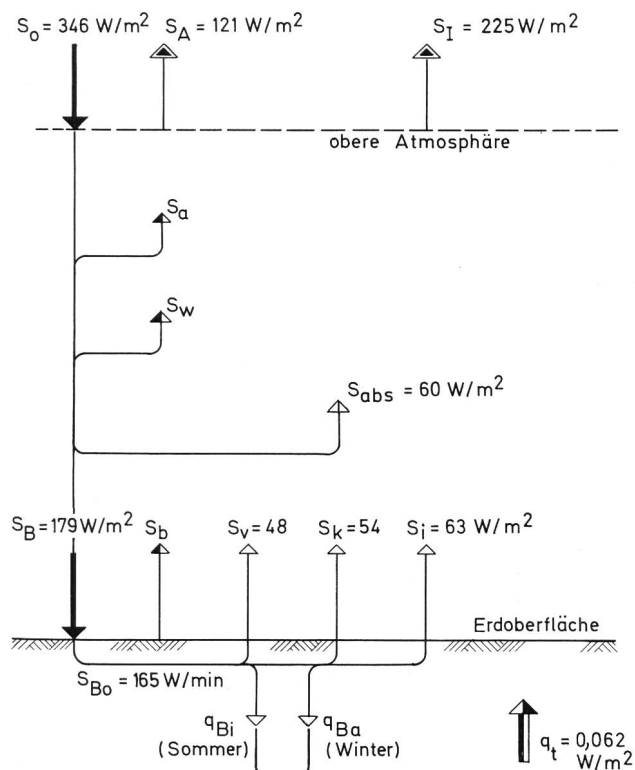


Bild 6. Leistungsbilanz des Systems Erde—Atmosphäre.

3.2 Wärmeleitung im Boden über dem Grundwasser

Als Rechenmodell dient ein nach unten unbegrenzter Körper, dessen Oberfläche einem periodischen Temperaturgang unterworfen ist, Bild 8. Der sich einstellende vertikale Wärmefluss mit positivem und negativem Vorzeichen lässt sich mit den Gesetzen der Wärmeleitung behandeln. Als massgebliche Ausgangsgrösse an der Oberfläche kann bei Annahme einer dichten, vor Direktstrahlung schützenden Bodenbepflanzung der Jahresgang der Lufttemperatur angenommen werden, der sich, wie Bild 9 zeigt, in erster Näherung als cos-Funktion darstellen lässt.

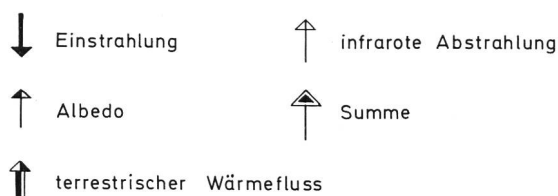
Wegen des grossen Luftporenanteils der Trockenschicht erfährt die Temperaturwelle mit zunehmender Tiefe eine starke Dämpfung. Anhand typischer Stoffwerte für die Trockenschicht sind in Bild 10 die Wirkungstiefen von Temperaturwellen verschiedener Frequenzen dargestellt. Während die Amplituden von Tagesschwingungen bereits in 70 cm Tiefe auf 1 % des Ausgangswertes abklingen, liegt derselbe Wert für Monatsschwingungen bei vier Meter Tiefe. Der Jahrestemperaturgang dringt tiefer in den Boden ein, z. B. beträgt dessen Amplitude in der für das Gebiet typischen Tiefe des Grundwasserspiegels von fünf Metern noch 20 % des Ausgangswertes.

3.3 Wärmetransport im Grundwasser

Der nach dem Durchlaufen der Trockenschicht noch verbleibende Wärmefluss setzt sich auch im Grundwasser, allerdings mit deutlich vergrösserter Wärmeleitfähigkeit weiter nach unten fort. Durch das Vorhandensein der Wasserphase in ständiger, ungeordneter Mischbewegung überlagert sich dem konduktiven ein konvektiver Wärmetransport.

Damit kann für einen gegebenen Jahresgang der Lufttemperatur und für typische Stoffwerte die theoretische Dämpfungscharakteristik und die zeitliche Phasenverschiebung in Abhängigkeit von der Tiefe gerechnet werden, Bild 11. Die Isolationswirkung der Trockenschicht hat zur Folge, dass in erster Linie deren Mächtigkeit bzw. die Tiefen-

Legende



| | |
|-----------------|---|
| S_0 | in die Atmosphäre einfallende Strahlungsleistung |
| S_A | gesamtes Albedo = $S_a + S_w + S_b$ |
| S_I | gesamte infrarote Abstrahlung |
| S_a, S_w, S_b | Albedo, hervorgerufen durch Atmosphäre, bzw. Wolken, bzw. Boden |
| S_{abs} | von der Atmosphäre absorbierte Strahlungsleistung |
| S_B | auf die Erdoberfläche einfallende Strahlungsleistung |
| S_{Bo} | von der Erdoberfläche absorbierte Strahlungsleistung |
| S_v | Wärmeleistung für Verdampfung von Bodenfeuchtigkeit |
| S_k | durch Konvektion übergebener Wärmefluss |
| S_i | infrarote Strahlung der Erdoberfläche |
| S_{Bi} | in den Erdboden geleitete Wärme |
| S_{Ba} | vom Erdboden zur Oberfläche geleitete Wärme |
| q_t | terrestrischer Wärmefluss |

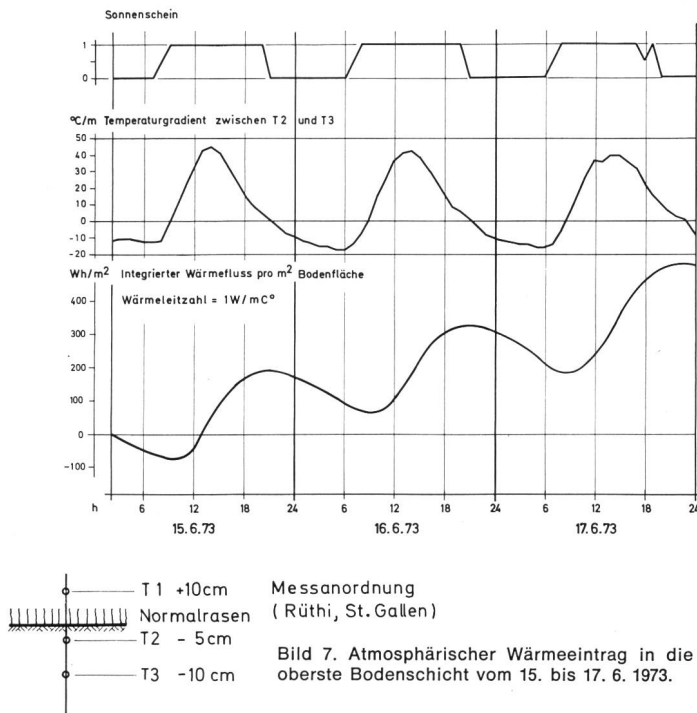
lage des freien Spiegels für das Temperaturgeschehen im Grundwasser ausschlaggebend ist und erst in zweiter Linie die Tiefe des Bezugspunktes.

3.4 Diskussion des vertikalen Wärmeaustausches

Anhand der beobachteten Ganglinien der Temperaturfühler der Messstelle 801, wobei zur Vereinfachung in Bild 12 von den insgesamt 12 Fühlern nur je der oberste und der unterste in der Trockenschicht bzw. im Grundwasserbereich wiedergegeben sind, können sowohl die tatsächliche Dämpfungscharakteristik als auch die zeitliche Phasenverschiebung in Abhängigkeit der Tiefe dargestellt werden, Bild 13. Bei Berücksichtigung der im Beobachtungszeitraum eingetretenen Schwankungen des Grundwasserspiegels kann von einer guten Übereinstimmung mit dem theoretischen Verlauf, Bild 11, gesprochen werden.

Ebenso ergibt der rechnerisch ermittelte Temperaturverlauf für das oberste und unterste Thermometer im Grundwasser die im Bild 14 ersichtliche gute Annäherung an die beobachteten Ganglinien. Sich überschneidende Temperaturgänge von höher und tiefer liegenden Fühlern sind typisch für die sich halbjährlich einstellende Umkehrung des Wärmeflusses. Es ergibt sich im Grundwasser im Winter und Frühling eine inverse Temperaturschichtung, wobei das eindeutige vertikale Temperaturregime in Verbindung mit der Querströmung den Einfluss der schwachen vertikalen Dichteströmung im Rohr auf die Temperaturfühler nicht wirksam werden lässt.

Die schichtweise Darstellung von Grösse und Richtung des vertikalen Wärmeaustausches in Bild 15 zeigt im Sommer den nach unten gerichteten, sich mit der Tiefe aber abschwächenden Wärmestrom. Ebenfalls tiefenabhängig ist die Phasenverschiebung der Zeitpunkte für die Umkehrung des Wärmeflusses. Mit der Änderung und Umkehrung des Temperaturgradienten geht auch eine Änderung und Umkehrung des Dampfdruckgradienten einher, der für die Feuchtigkeitsmigration in der Bodenschicht über dem Grundwasser bestimmend ist.



Messanordnung (Rüthi, St.Gallen)
Bild 7. Atmosphärischer Wärmeeintrag in die oberste Bodenschicht vom 15. bis 17. 6. 1973.

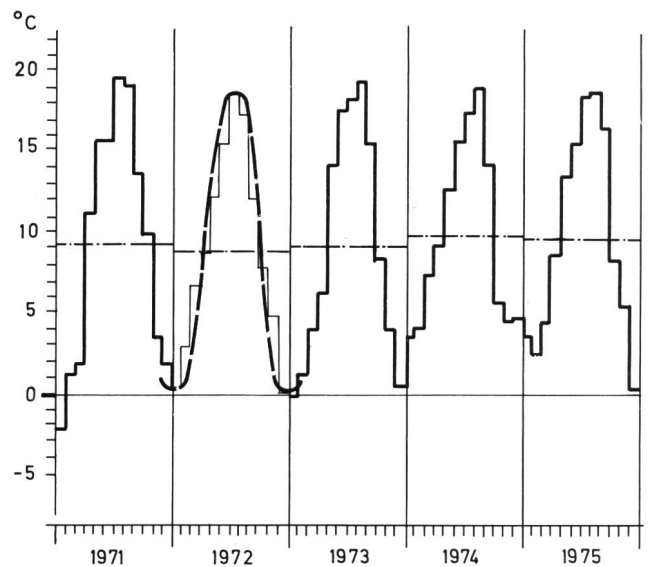


Bild 9. Ganglinie der Lufttemperatur in Beznau aufgrund von Monatsmitteln.

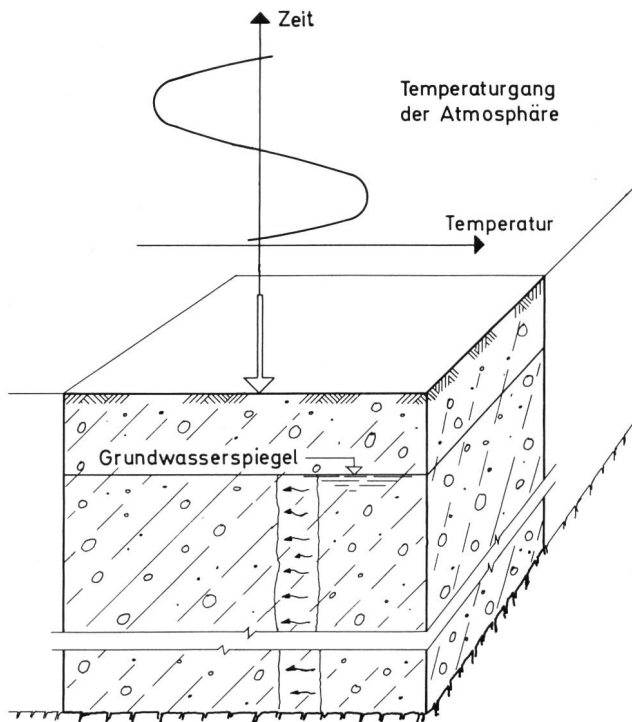
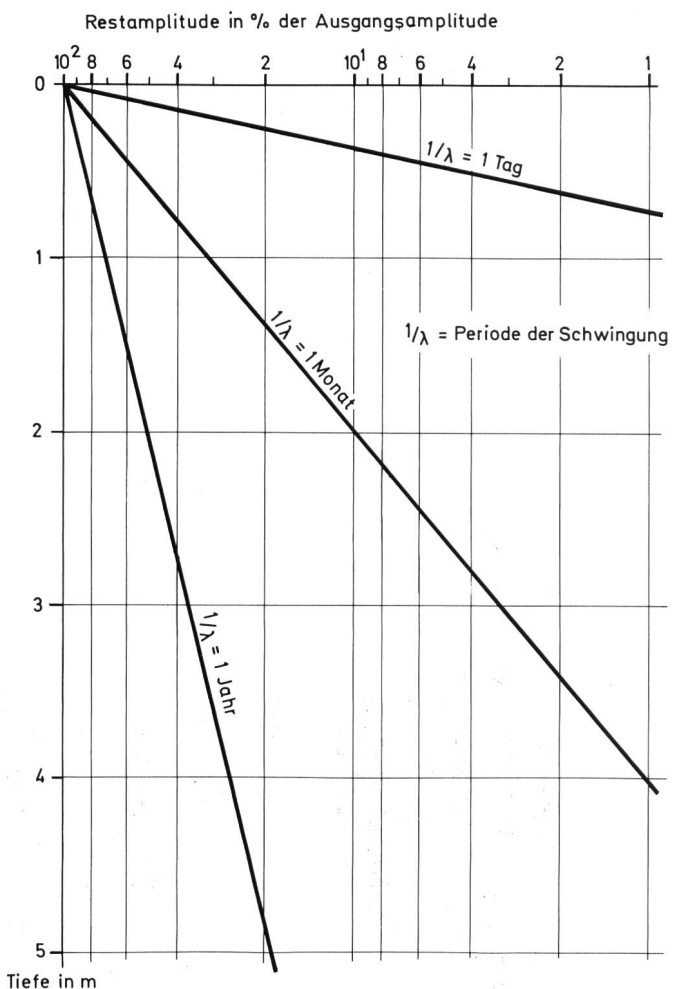


Bild 8. Rechenmodell für die Behandlung des Wärmeaustausches mit der Atmosphäre.

Bild 10, rechts. Wirkungstiefe von Temperaturschwingungen im Boden (ohne Grundwasser).



Die Isoplethendarstellung für die gleiche Messstelle und die Jahre 1972 und 1973, Bild 16, bestätigt, dass die oberste Bodenschicht am Wärmeaustausch mit der Atmosphäre am intensivsten beteiligt ist. Ein bereits deutlich abgeschwächtes Temperaturgeschehen ist für die Grundwasserschicht zwischen 6 und 15 m Tiefe erkennbar. Darunter schliesst sich der homotherme Bereich des Grundwasserstromes mit einer Temperatur von rund 11 °C an, die mit zunehmender Tiefe entsprechend dem terrestrischen Temperaturgradienten ansteigt.

3.5 Störungseinflüsse

Die Gründe für kurzzeitige oder längerdauernde Abweichungen vom theoretischen Verlauf des vertikalen Wärmeaustausches sind mannigfaltig:

- Es wird nicht der atmosphärisch induzierte Wärmefluss isoliert gemessen, sondern immer in Kombination mit dem Wärmebeitrag des einsickernden Anteils des Niederschlages.
- Die Darstellung des Temperaturganges der Luft mit ei-

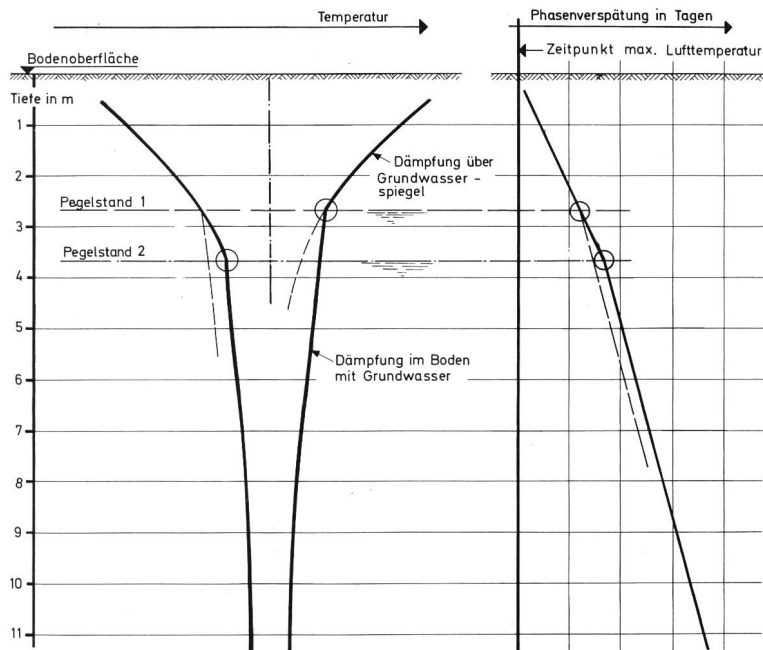


Bild 11. Typische Amplitudendämpfung und Phasenverspätung von Temperaturschwingungen im Boden in Abhängigkeit der Tiefe.

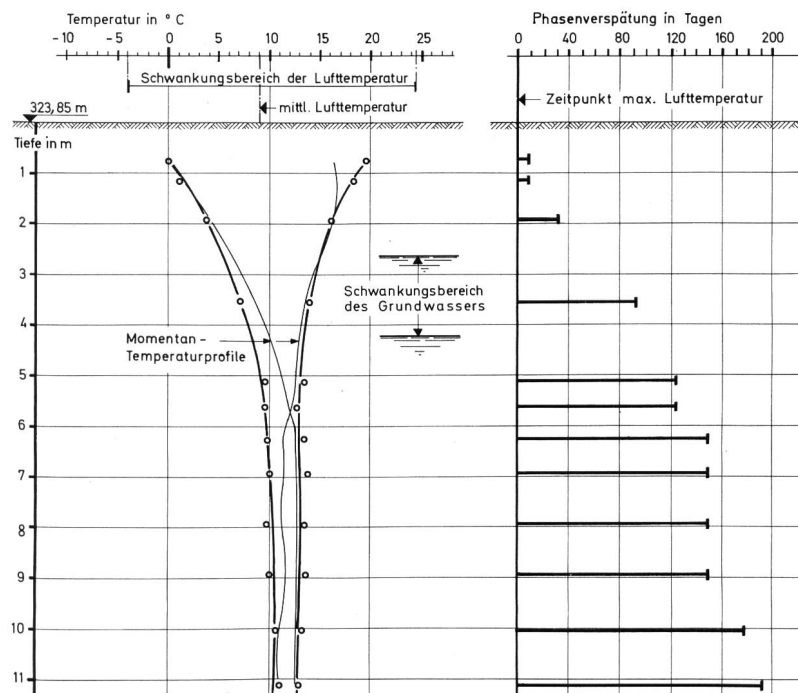
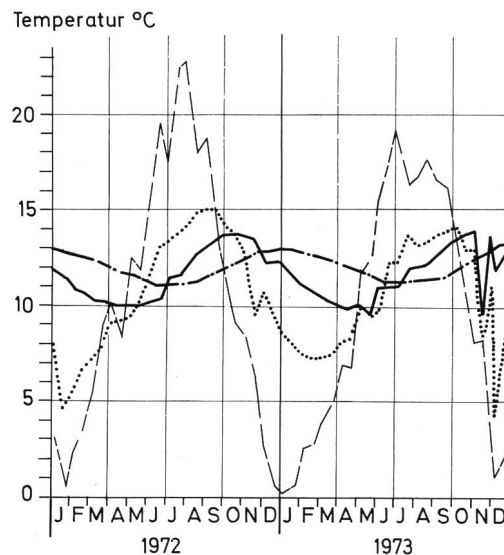


Bild 13. Gemessene Amplitudendämpfung und Phasenverspätung in Abhängigkeit von der Tiefe. Messstelle 801, 1973.



Messprofil 801

Trockenschicht

Grundwasser

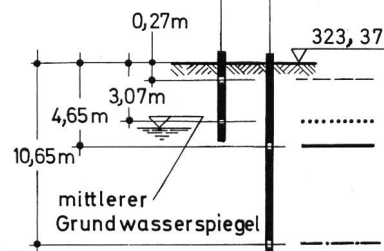


Bild 12. Jahresgang typischer Temperaturfühler der Messstelle 801, 1972/1973.

ner harmonischen Schwingung ist eine grobe Näherung. Die Dauer der tatsächlichen Halbwellen kann zwischen 5 bis 7 Monate betragen. Die Schwingungsform kann verändert werden durch Kälte- bzw. Wärmeeinbrüche von über einem Monat Dauer.

— Thermographische Geländeaufnahmen zeigen, dass die Wärmetönung der Bodenoberfläche je nach Exposition und Vegetation lokal grosse Unterschiede aufweist.

— Der Grundwasserträger ist anisotrop. Die Stoffwerte können innerhalb weiter Grenzen schwanken.

— Schneeschichten haben eine deutlich verzerrende Wirkung auf den Wärmeaustausch an der Bodenoberfläche.

Einerseits geht von ihnen ein Isoliereffekt aus, andererseits verursachen sie während der Schmelzphase eine erhebliche Bodenabkühlung durch einsickerndes Schmelzwasser.

— Reichliche Niederschläge im Frühjahr und Spätherbst, d.h. bei grossen Unterschieden zwischen der Feuchtlufttemperatur und der Bodentemperatur, können deutliche Spuren im Temperaturgang des Bodens hinterlassen. Einmal bedeutet der einsickernde Massenstrom je nach Temperaturunterschied einen negativen oder positiven Wärmeeintrag. Ferner wird die Wärmeleitfähigkeit bei durchnässtem Boden temporär stark erhöht.

Ein typischer Niederschlagseffekt ist bei der aus topographischen Gründen empfindlichen Messstelle 801, Mitte No-

vember 1973 feststellbar, Bild 12. Drei der vier Temperaturfühler sprechen deutlich auf die Temperatur des Niederschlags an. Die Überprüfung dieser Erscheinung durch Versprühen von erwärmtem Wasser hat die Niederschlagsempfindlichkeit bestätigt. Wie im Bild 17 dargestellt, haben alle Thermometer, mit Ausnahme der beiden untersten, auf den warmen Niederschlag angesprochen. Erwartungsgemäss wird diese kurzzeitige Störung im Grundwasser rasch «abgeschwemmt». In der überlagernden Schicht dagegen vermag die Temperaturstörung infolge Rückhaltung von Niederschlagswasser länger nachzuwirken. Die ungleiche Reaktion der Temperaturfühler in dieser Schicht dürfte auf Anisotropie, z. B. ungleiche Durchnässung des Bodens im Bereich der Temperaturfühler zurückzuführen sein.

4. Wärmeeintrag durch Infiltration

Im Hinblick auf eine mögliche Beeinflussung des Temperaturgeschehens im Grundwasser durch eine künstliche Erhöhung der Aaretemperatur wurden im interessierenden linksufrigen Infiltrationsgebiet, Bild 1, die Messstellen 557, 553, 554 und 555 vorgesehen und mit insgesamt 27 Temperaturfühlern ausgerüstet. In den Messstellen 553 und 555 stehen je zwei voneinander getrennt eingebrachte Fühlersätze für den höheren und tieferen Grundwasserbereich zur Verfügung.

In Bild 18 sind die Temperaturganglinien der ufernahen Messstelle 557 und der weiter stromabwärts liegenden Messprofile 553 «Hoch» und «Tief» dem Jahresgang der Aaretemperatur gegenübergestellt. Die sich dabei stellenden Fragen sind:

- Inwieweit wird der Temperaturgang des Grundwassers durch Infiltration von Aarewasser bestimmt, und
- inwieweit vermag eine künstliche Erhöhung der Aarewassertemperatur das Mittel der Grundwassertemperatur anzuheben?

Ein vereinfachtes Modell für die theoretische Behandlung dieser komplexen Vorgänge ist in Bild 19 dargestellt, wobei für den Grenzfall einer ständigen und starken Infiltration als Randbedingung der Jahresgang der Aaretemperatur angesetzt werden kann.

Für diesen Grenzfall der ständig wirkenden und den Grundwasserstrom zu 100 % speisenden Infiltration hat Mustert [4] Ansätze gemacht, die für den infiltrierten Massenstrom den konvektiven Wärmetransport und den Wärmeaustausch mit der Trockenschicht und dem Untergrund berücksichtigen. Diese Ansätze zeigen, dass sich die Temperaturwelle immer langsamer fortbewegt als der Massenstrom. Bei Zugrundelegung des Jahresganges der Aaretemperatur als Randbedingung haben wir es mit einer Wellenbewegung zu tun, die auf einen Körper mit vorgegebener Mitteltemperatur und grosser Wärmekapazität einwirkt. Somit muss die Amplitude längs der Fliessstrecke eine Dämpfung erfahren. Für diesen Grenzfall der Infiltration und die vereinfachenden Rechnungsansätze sind die Dämpfungsfunktionen für die Fliessgeschwindigkeit des Grundwassers von 0,1 m/Tag, 1,0 m/Tag und 10,0 m/Tag in Bild 20 dargestellt. Der Schwankungsbereich der Grundwassertemperatur wäre demgemäss abhängig von der Fliessgeschwindigkeit und der Distanz vom Flussufer. Selbst für diese Grenzbetrachtung mit Infiltration als ausschliesslicher Grundwasserquelle würde für die nach [5] für das betrachtete Gebiet typischen Geschwindigkeiten von 1,0 bis 7,0 m/Tag bereits in einer Distanz von rund 50 bzw. 300 m vom Infiltrationshorizont im Grundwasser kaum noch ein Temperaturgang messbar sein.

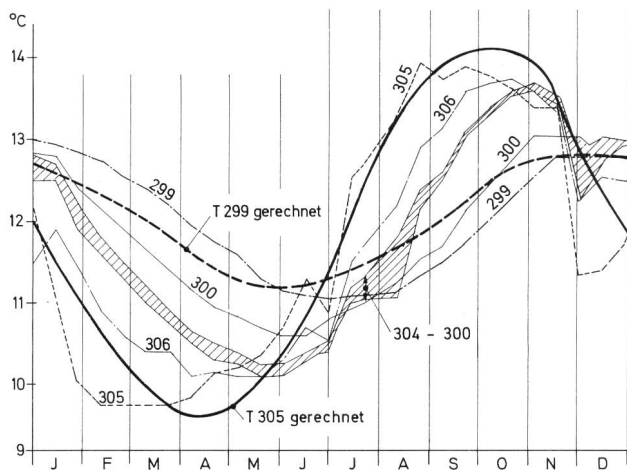


Bild 14. Vergleich von gemessenen und rechnerisch ermittelten Temperaturganglinien für zwei Tiefenstufen im Grundwasser, Messstelle 801, 1972. Die Temperaturmessfühler im Grundwasser sind in folgenden Tiefen unter der Oberfläche angebracht: 306 auf 5,29 m; 305 auf 4,79 m; 304 auf 5,89 m; 302 auf 6,59 m; 301 auf 8,59 m; 300 auf 9,69 m; 299 auf 10,79 m.

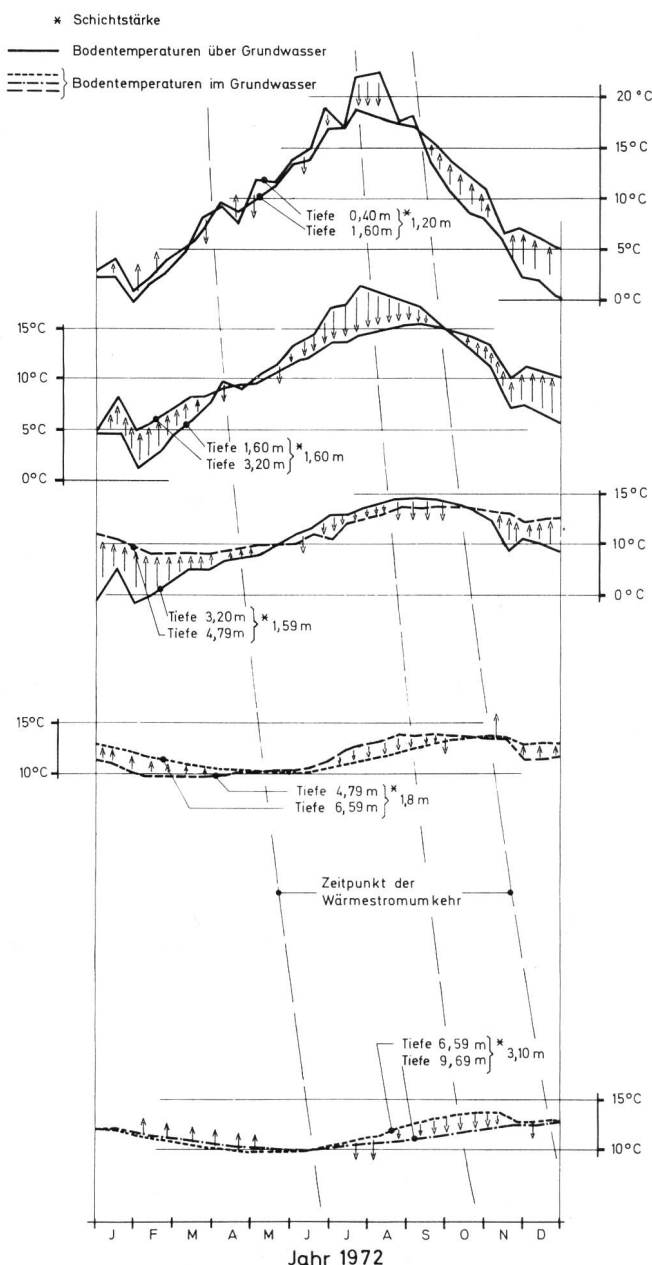


Bild 15. Vertikale Wärmeströme, Messstelle 801, 1972.

..... Grundwasserspiegel

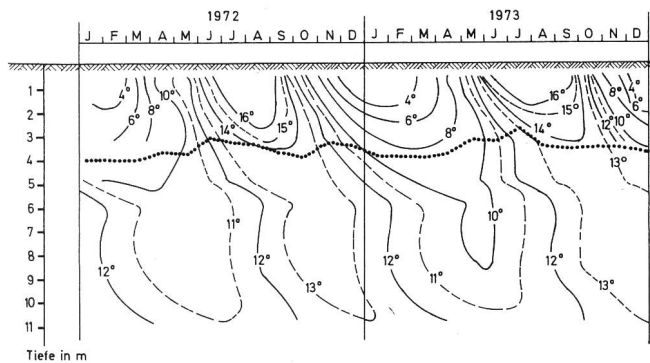


Bild 16. Isoplethen, Messstelle 801.

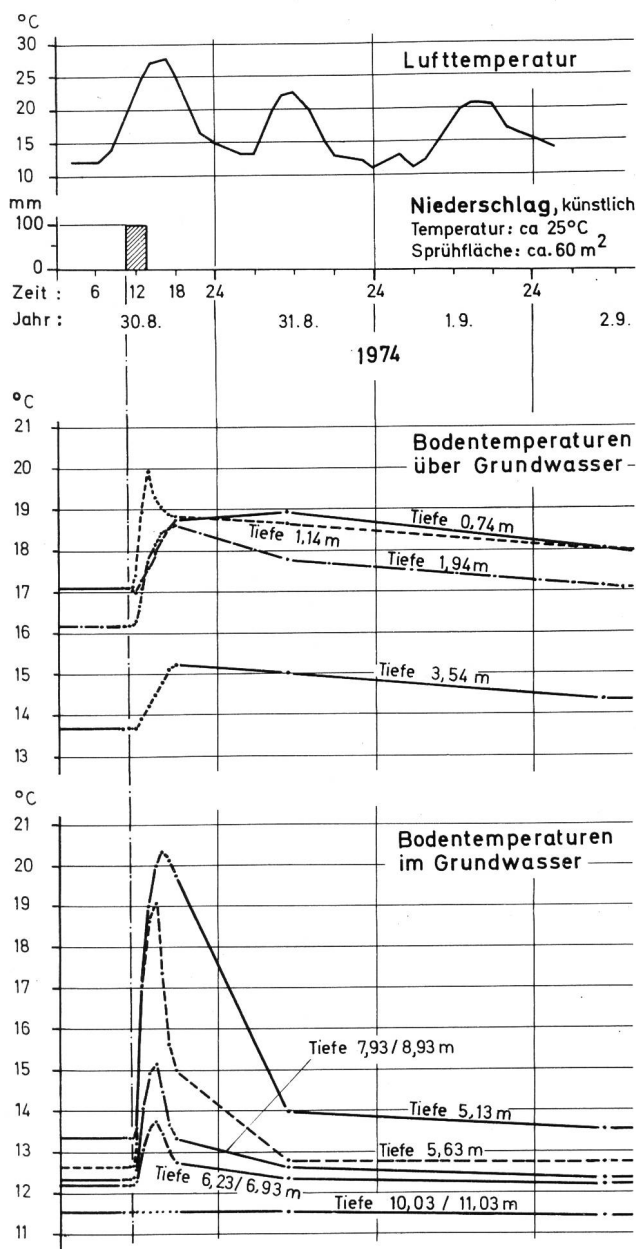


Bild 17. Empfindlichkeit der Bodentemperaturen auf Beeinflussung durch Niederschläge, Messstelle 801.

In Wirklichkeit variiert aber in diesem Flussabschnitt der Infiltrationsanteil am gesamten Grundwasserstrom ganz beträchtlich. Die Auswertung der Spiegelgefälle im betrachteten Gebiet ergibt die aus Bild 21 ersichtlichen und stark von der Aarewasserführung abhängigen Infiltrationsanteile. Der Grundwasserstrom setzt sich aus dem praktisch konstanten, die Aare unterströmenden Anteil und dem hauptsächlich bei grossen Aarewassermengen einflussenden Infiltrationsstrom zusammen. Im konkreten Falle ist der Wärmeeintrag infolge Infiltration durch instationäre, durch das aperiodische Abflussgeschehen der Aare verursachten positiven und negativen Wärmeschübe gegeben, die in der theoretischen Betrachtung eher mittels aperiodischen Impulsen zu behandeln wären. In der langjährigen Messreihe konnte aber bei keiner der im Infiltrationsgebiet liegenden Messstelle ein Temperaturgang festgestellt werden, der durch solche hochwasserabhängigen Temperaturschübe beeinflusst worden wäre.

Die Disposition der Kühlwasserrückgabe beim Kernkraftwerk Beznau bietet die einmalige Möglichkeit, während Niederwasserperioden, d. h. wenn die ganze Aarewassermenge durch den Oberwasserkanal geschluckt werden kann, Infiltrationsversuche mit stark erwärmtem Aarewasser im Massstab 1:1 durchzuführen. Durch vollständiges Schliessen des Stauwehres, d. h. Verzicht auf die Dotierung des Aareknies, kann dank der Kühlwasserrückgabe die Temperatur der Wassermasse von rund 200 000 m³ zwischen Stauwehr und Wasserkraftzentrale innert Stunden um rund 9 °C erhöht werden. Mit einem solchen Temperatur-

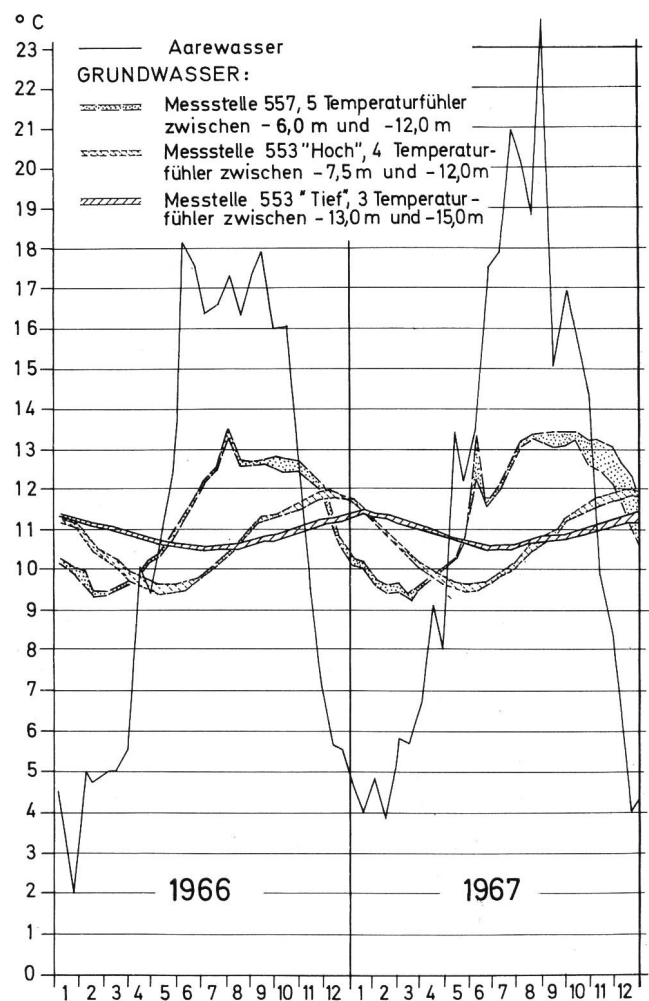


Bild 18. Temperaturgang der Aare und typischer Grundwassermessstellen im Infiltrationsbereich.

Bild 19. Vereinfachtes Modell für die Behandlung des Wärmeeintrages infolge Infiltration.

$q, q_1, q_2 =$ Massenströme
 $k, k_1, k_2 =$ Wärmeströme

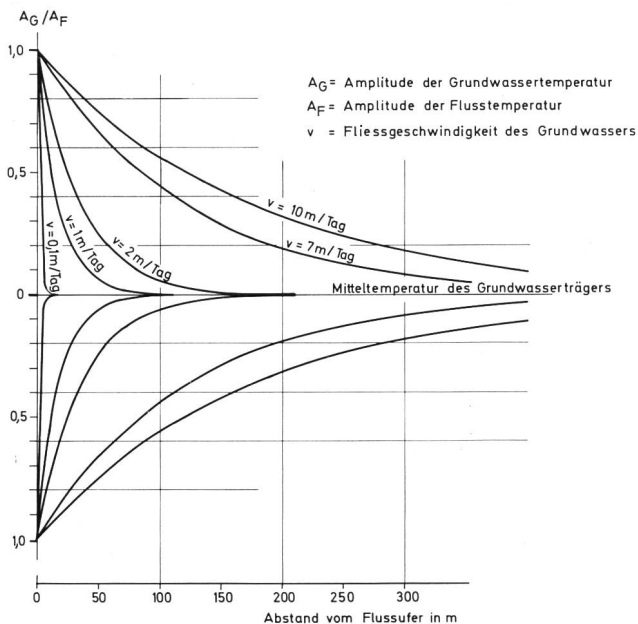
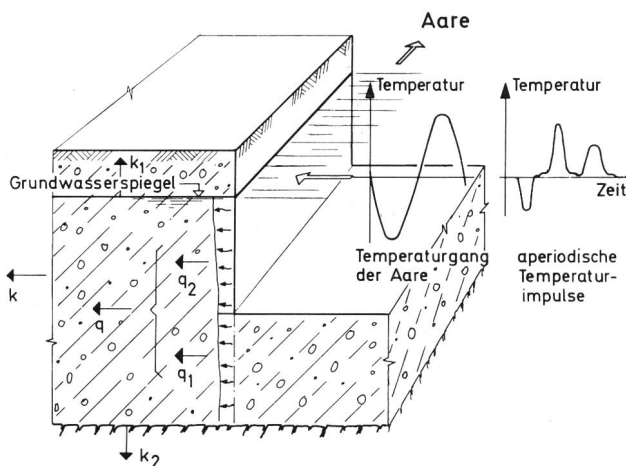


Bild 20. Theoretische Amplitudendämpfung der Grundwassertemperatur für den Grenzfall mit Infiltration als ausschliesslichem und ständigem Grundwasserspender.

impuls wurde gemäss Bild 22 der Infiltrationshorizont im Januar 1970 während 21 Tagen beaufschlagt. Im Januar/Februar 1971 wurde der Infiltrationsversuch wiederholt und zwar mit einer zyklischen Beaufschlagung von 15 und 13 Tagen mit einer Zwischenphase von 34 Tagen mit natürlicher Aaretemperatur. Die anschliessende Analyse der Temperaturganglinien der ufernahen und der weiter stromabwärts liegenden Messstellen hat keinerlei Hinweise auf diese Temperaturbeaufschlagung des Infiltrationshorizontes ergeben. Es hat sich damit bestätigt, dass bei den in Niederwasserperioden herrschenden geringen Sickergefällen die Infiltration praktisch vernachlässigt werden kann.

5. Die Kombination der Wärmeeinträge über die Bodenoberfläche und durch Infiltration

Die im Infiltrationsgebiet beobachteten Temperaturganglinien des Grundwassers widerspiegeln die Kombination beider Wärmebeeinflussungen. In Bild 23 wird für je einen

q_1, q_2, q_3
in $\text{cm}^3/\text{s m}$

Bild 21. Grundwasserstromanteile in Abhängigkeit von der Aarewasserführung.

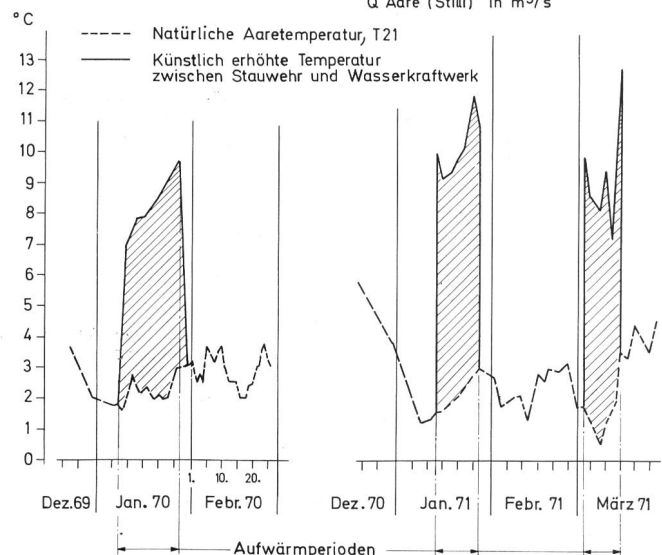
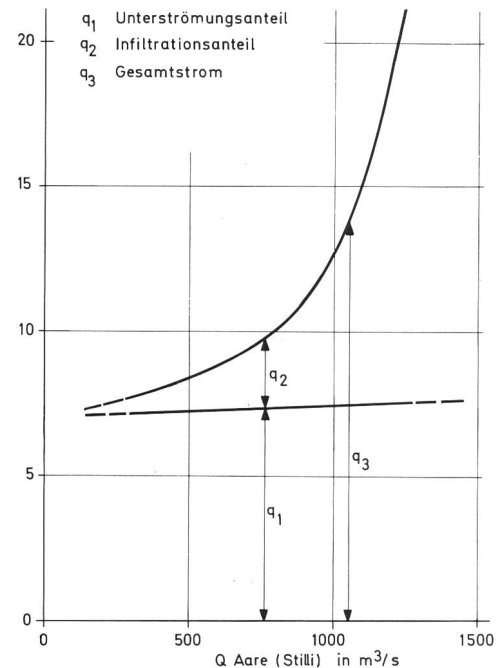


Bild 22. Infiltrationsversuche mit erwärmtem Aarewasser. Grösse und Dauer der künstlichen Wärmeeinwirkung.

Tag der vier Jahreszeiten des Jahres 1974 der Temperaturzustand der Aare mit demjenigen des Grundwassers in Beziehung gesetzt und über der Distanz zum Flussufer aufgetragen. Daraus ist ersichtlich, dass die extremen Aaretemperaturen schon mit dem Eintritt in den Grundwasserträger stark moderiert werden. Interessant sind die Überkreuzungen dieser Momentantemperaturprofile zwischen der Wasserlinie und den Grundwassermessstellen 557 und 553, welche kaum durch die Infiltrationsvorstellungen gestützt werden können. Vielmehr drängt sich der Schluss auf, dass der atmosphärische Wärmeaustausch dominiert und in erster Linie den Temperaturgang im Grundwasser bestimmt. Damit kommt der Stärke der den Grundwasserstrom überlagernden Trockenschicht massgebliche Bedeutung zu.

Diese Darstellung macht ferner klar, dass von einer im Grundwasser gemessenen Temperatur ausgehend, kaum Rückschlüsse auf die Grösse des Infiltrationsmassenstromes gezogen werden können, d. h. es ist keine Verknüpfung

Überdeckungsverhältnisse

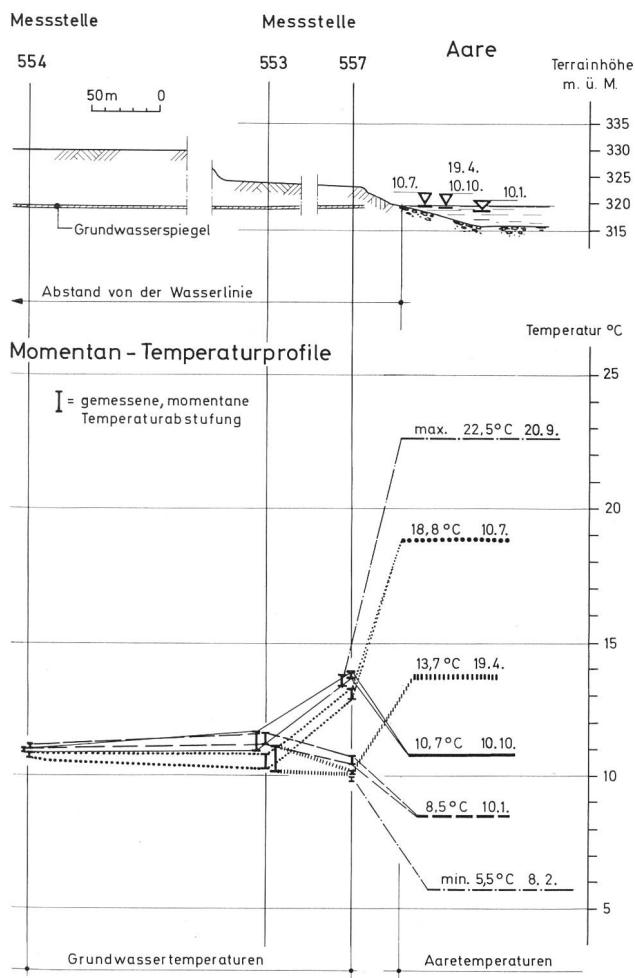


Bild 23. Temperaturprofile im Infiltrationsbereich, 1974.

von Grundwassertemperatur und Infiltrationsanteil erkennbar. Gleichermassen muss eine Verknüpfung der Temperatur als physikalische Grösse mit dem Chemismus des Grundwassers, der massgeblich durch den Infiltrationsmassenstrom mitbestimmt wird, im betrachteten Untersuchungsgebiet fragwürdig bleiben.

Zur Frage, inwieweit eine künstliche Flusserwärmung zu einer Erhöhung der mittleren Grundwassertemperatur beiträgt, kann mit den im Raume Beznau durchgeführten Untersuchungen keine quantitative Antwort gegeben werden. Dies liegt einmal daran, dass mit der Zonierung des Abflusses im Aareknie das erwärmte Kühlwasser vom Infiltrationshorizont ferngehalten werden kann, und dass die mittlere Erhöhung der Aaretemperatur mit 0,67 °C ohnehin

bescheiden ist. Die Untersuchungen haben aber soweit Einblick in die Zusammenhänge gegeben, dass die Einflüsse, welche zur Minderung der Auswirkungen einer künstlichen Aaretemperaturerhöhung auf die Grundwassertemperatur erkannt wurden und erlauben, für das betrachtete Gebiet eine grobe Abschätzung durchzuführen. Einzelne oder alle der nachstehenden Einflüsse sind in unterschiedlichem Masse auch auf andere Fluss- und Grundwassergebiete übertragbar.

Ausgehend von der theoretischen, künstlichen Aaretemperaturerhöhung von im Mittel 0,67 °C sind beim Übergang auf das Grundwasser folgende Minderungseinflüsse in Betracht zu ziehen.

— Die Infiltration findet zur Hauptsache bei Abflussmengen grösser als Q_{mittel} statt. Die infiltrationswirksame Aufwärmspanne ist deshalb kleiner als 0,67 °C.

— Das Kernkraftwerk ist nicht dauernd, sondern nur während rund 7000 Stunden pro Jahr in Betrieb. Bedeutsam ist, dass in den für die Infiltration wichtigen Sommermonaten während 5 bis 6 Wochen das Kraftwerk zur Überholung ausser Betrieb ist. Dadurch reduziert sich die mittlere Aufwärmspanne.

— Der Anteil der Infiltration am gesamten Grundwasserstrom beträgt im Mittel nur etwa 30 %.

— Der Wärmeaustausch zwischen Grundwasserträger und Atmosphäre wirkt ständig und ausgleichend. Er vermag einen Teil der künstlichen Temperaturerhöhung des Grundwassers an die Atmosphäre abzuleiten.

Es darf vermutet werden, dass durch das Zusammenwirken vorstehender Einflüsse eine sich längerfristig einstellende Erhöhung der mittleren Temperatur im angrenzenden Grundwasserträger kaum 0,1 °C überschreiten dürfte. Eine mittlere künstliche Erwärmung der Aare vermag sich im betrachteten Gebiet also nur zu einem Bruchteil auf den von ihr gespeisten Grundwasserstrom zu übertragen.

Literatur:

- [1] Drost W., Moser H., Neumaier F., Rauert W.: Méthodes Isotopiques en Hydrologie. EURISOTOP, Série 61, Monographie 16, 1973.
- [2] Sammel E. A.: Convective flow and its effect on temperature logging in small-diameter wells. «Geophysics», Vol. 33, No. 6, 1968, p. 1004—1012.
- [3] Schaefer H. und Philippi K.: Der Energiehaushalt der Erde. «FfE-Berichte», München, Nr. 3, September 1973.
- [4] Mustert R.: Rechnungen zur Temperaturverteilung eines Grundwasserstromes, der aus Flusswasser mit jahreszeitlichem Temperaturgang gespeist wird (unveröffentlicht), 1956.
- [5] Jäckli H.: Die Grundwasserverhältnisse im Aaretal zwischen dem Unterwald Würenlingen und Leuggern. Resultate der Untersuchungen 1965—1976. Bericht zuhanden des Baudepartementes des Kantons Aargau, 1977.

Adresse der Verfasser: Raymond Véya, dipl. Ing. ETH, Vizedirektor, und Erwin Hardy, dipl. Ing., Nordostschweizerische Kraftwerke AG, NOK, 5401 Baden.