Energetische Grundwasserbewirtschaftung im Kanton Nidwalden unter Verwendung des hydrothermischen Grundwasserströmungsmodell Hydterm-2

Autor(en): **Anghern, Peter P. / Hanke, Joachim / Lyons, T. Clark**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **77 (1985)**

Heft 3-4

PDF erstellt am: **30.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-940914

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

durch den Dorfbach, der wegen zu hohen Landpreises für den Geschiebesammler nicht saniert wurde.) Mitte Oktober führten langsame Kriechbewegungen eines Hanges bei Niederscherli/BE zu Verkehrsbehinderungen. Infolge Rohrbruch einer Wasserleitung beschleunigten sich dort die Bewegungen stark.
November: zu warm und trocken. Registriert wurde einzig eine Rutschung im Onsernonetal/TI mit leichteren Schäden an der Kantonsstrasse.
Dezember: schneearmer, milder und ereignisloser Monat.
Zusammenfassend war das Jahr 1984, obwohl an Zahl der Schadenereignisse eher arm, ein überdurchschnittlich schadenintensives Jahr. Die beiden Unwetterereignisse vom Juli und August beeindruckten durch ihre elementare Heftigkeit, die grossen Schäden an den Gewässern, an Landwirtschaftsgebieten, an Verkehrswegen und an Siedlungen. Im Kanton Schwyz hat es sich je nach Gebiet um bis zu einem 100jährlichen Hochwasserereignis gehandelt.

Literaturverzeichnis

[1] *J. Zeller, H. Geiger* und *G. Röthlisberger* (1978): «Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes».
Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen Birmensdorf, Band 3.

[2] Eidg. Amt für Wasserwirtschaft, Bern: Hydrographische Jahrbücher der Schweiz 1925–1950.

[3] Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau, Bern:
Die grössten bis zum Jahre 1969 beobachteten Abflussmengen von schweizerischen Gewässern.

Adresse der Verfasser: *Jürg Zeller* und *Gerhard Röthlisberger,* Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, CH-8903 Birmensdorf.

Energetische Grundwasserbewirtschaftung im Kanton Nidwalden unter Verwendung des hydrothermischen Grundwasserströmungsmodells Hydterm-2

Peter P. Angehrn, Joachim Hanke, T. Clark Lyons, Wolfgang Rau

Zusammenfassung

Erstmalig wurde in der Schweiz ein regionales hydrothermisches Grundwassermodell (mathematisches Modell) als Hilfsmittel zur Erstellung von Bewirtschaftungsgrundlagen für die Grundwasservorkommen eines Kantons (Nidwalden) eingesetzt. Die Methode zeigte gute Ergebnisse und ist für die Planung der Grundwasserwärmenutzung geeignet.
Die Einflüsse von Grundwasserentnahmen, -rückgaben und Uferinfiltrationen, insbesondere aber auch diejenigen klimatologischer und anthropogener Faktoren auf Grundwasserströmung und -temperatur konnten nachvollzogen und analysiert werden.
Auch bei Beachtung strenger ökologischer Randbedingungen stehen noch beträchtliche Reserven an Grundwasser und Grundwasserwärmeenergie zur Verfügung. In keiner der untersuchten Gemeinden wurde bisher die vorhandene Grundwasserwärmekapazität vollständig ausgenutzt. Bei Einhaltung der vorgeschlagenen Bewirtschaftungsgrundlagen ist eine grossräumige thermische Übernutzung des Grundwassers in Nidwalden auszuschliessen.

Résumé: Gestion de l'énergie des eaux souterraines et son application dans un modèle hydrothermique de l'écoulement des eaux souterraines dans le Canton de Nidwald

Pour la première fois en Suisse, un modèle hydrothermique régional de l'écoulement des eaux souterraines (modèle par ordinateur) a été mis en place comme moyen de gestion des eaux souterraines d'un canton (Nidwald). La méthode a donné de bons résultats et est particulièrement bien adaptée à la planification de l'utilisation de la chaleur des eaux souterraines.
Les influences des soustractions d'eau, des restitutions et des infiltrations de bordure, mais aussi des facteurs climatologiques et anthropogènes sur l'écoulement des eaux souterraines ont pu être déterminées et analysées.
Même en tenant compte de sévères limites écologiques, des réserves considérables d'eaux souterraines et d'énergie thermique de ces eaux souterraines restent à disposition. Jusqu'à présent, l'exploitation des capacités thermiques des eaux souterraines n'a été complète dans aucune des communes examinées. En observant les bases de gestion proposées, une surexploitation des ressources thermiques des eaux souterraines dans le Canton de Nidwald peut être exclue.

Summary: The Planned Management of Groundwater Energy in Canton Nidwalden with the Assistance of the Hydrothermal Groundwater Model Hydterm-2

A regional hydrothermal groundwater model (mathematical model) has been used for the first time in Switzerland as a planning tool in the management of groundwater resources of a Canton. The technique has produced good results and

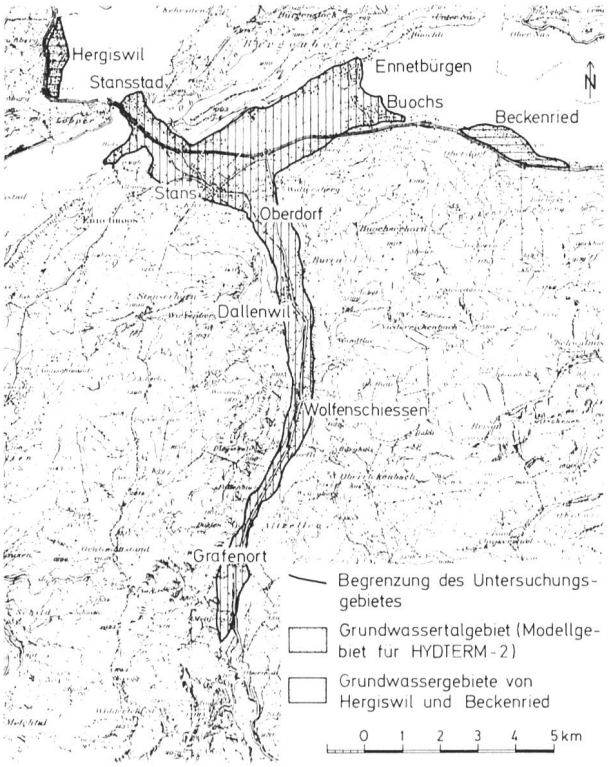


Bild 1. Das Untersuchungsgebiet zur Erstellung von Bewirtschaftungsrichtlinien für das Grundwasser im Kanton Nidwalden. Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 11. März 1985.

is very suitable for planning the development of groundwater energy. The influences of extractions, recharges and, in particular, climatological and land use factors on groundwater flow and temperature could be analyzed and predicted.
Considerable reserves of groundwater and energy were shown to be available, even when considering rigorous environmental restrictions. A full use of the energy resources was not found in any of the studied communities, and the possibility of a regional thermal over-use of the groundwater in Canton Nidwalden is excluded by the developed management plan.

1. Einleitung

Im Rahmen der Energiespar- und Umweltschutzbemühungen entsteht in unserer Zeit ein zunehmender Bedarf an alternativen, naturschonenden Energieformen. Insbesondere auf dem Gebiet der Heiztechnik wurde nach «neuen» Energieträgern gesucht. Eine praktikable Möglichkeit ist der Einsatz von Wärmepumpen, die dem Wasser oder der Luft Wärme entziehen und diese als Heizenergie zur Verfügung stellen. Vor 10 bis 15 Jahren begann man in stärkerem Umfange damit, die im Grundwasser enthaltene Wärmeenergie mittels Wärmepumpen zu nutzen.
Diese energiewirtschaftlich wünschenswerte Alternative hat jedoch ihre Rückwirkungen auf die Umwelt, in diesem Falle auf die genutzten Grundwassersysteme. Prinzipiell sollte jedoch eine sowohl quantitative als auch qualitative Beeinträchtigung oder Übernutzung eines Grundwasserträgers (beispielsweise bzgl. Entnahmemenge und Abkühlungsrate) ausgeschlossen werden. Dem Schutz des Grundwassers zur Trinkwassergewinnung ist generell Vorrang vor der Ausschöpfung des im Grundwasser enthaltenen Wärmeenergiepotentials einzuräumen.

2. Projektrahmen für den Kanton Nidwalden

Im Kanton Nidwalden wurde die erste grundwassernutzende Wärmepumpe im Jahre 1974 in Betrieb genommen. Die Anzahl der Grundwasserwärmepumpen erhöhte sich bis auf 69 Anlagen (Stand: September 1984). Nach Informationen des Amtes für Umweltschutz und Planung (AfUP) Nidwalden wurden im Jahre 1983 über 2,3 Mio m^3 Grundwasser für Wärmepumpenzwecke gefördert und etwa 45% davon in das Grundwassersystem zurückgegeben.
Eine vom Amt für Umweltschutz und Planung Nidwalden in Auftrag gegebene Untersuchung, die zur Erstellung von «Bewirtschaftungsgrundlagen für das Grundwasser» führte, konnte 1984 abgeschlossen werden. Sie trägt zur Lösung der folgenden wichtigsten Fragen im Zusammenhang mit der Grundwasserwärmenutzung bei:
– In welchen Gebieten und in welchem Umfang sind allenfalls Grundwasservorkommen bereits thermisch übernutzt?
– In welchen Gebieten ist allenfalls der verantwortbare Nutzungsgrad bereits erreicht?
– In welchen Gebieten und für welche Mengen können noch weitere Bewilligungen erteilt werden?
Bild 1 gibt einen Überblick über das gesamte Untersuchungsgebiet dieser Studie. Für das Grundwassergebiet der Gemeinden Buochs, Dallenwil, Ennetbürgen, Oberdorf, Stans, Standsstad und Wolfenschiessen konnte zur Erarbeitung der Bewirtschaftungsgrundlagen das horizontalzweidimensionale hydrothermische Grundwassermodell Hydterm-2 eingesetzt werden. Durch die Nachbildung der Grundwasserströmungs- und -temperaturverhältnisse unter Berücksichtigung des Energieaustausches an der Boden/Luft-Schnittstelle sowie anschliessender Simulation verantwortbarer Nutzungswerte (Prognose-Simulationen) war es möglich, den gewünschten Nutzungsplan zu erstellen.
Demgegenüber konnten die sehr komplizierten hydrogeologischen Verhältnisse in den Gemeinden Beckenried und Hergiswil bisher nicht modellhaft erfasst werden. Für diese Gemeinden wurde das hydrothermische Potential aufgrund einer systematischen Ausdeutung abgeschätzt.

3. Hydterm-2, ein zweidimensionales hydrothermisches Grundwasserströmungsmodell

Zur deterministischen Simulation der regionalen Grundwasserströmungs- und -temperaturverhältnisse im sogenannten Grundwassertalgebiet des Kantons Nidwalden wurde erstmals in der Schweiz das Finit-Element-Modell Hydterm-2 eingesetzt. Es ermöglicht die simultane Nachbildung von Grundwasserströmungs- und -temperaturbedingungen unter Berücksichtigung des Energieaustausches an der Erdoberfläche sowie Prognosesimulationen für die entsprechenden Belastungen.
Die Hydterm-Grundwassermodelle gehen aus langjährigen Entwicklungen in den USA hervor. Sie wurden, für den dargelegten Projekteinsatz, an typisch schweizerische Hydrogeologie- und Klimaparameter angepasst.
Prinzipiell können im Modell beliebig komplizierte Grundwasserträgerbedingungen mit ungesättigten und gesättigten sowie gespannten und ungespannten Zonen simuliert werden. Auch die Simulation von vertikal mehr oder weniger durchlässigen Sperrschichten ist möglich.
Innerhalb der ungesättigten Zone wird die Strömung von Wasser und Temperatur eindimensional-vertikal, in den Schichten der gesättigten Zone zweidimensional-horizontal dargestellt. Im vorgestellten Beispiel, in Nidwalden, wurde die ungesättigte Schicht jedoch nicht berücksichtigt. Die Zeit für deren vollständige Durchsickerung lag unter den gegebenen Voraussetzungen (Durchlässigkeitsbeiwert, Mächtigkeit) weit unterhalb eines Simulationszeitintervalls (1 Monat). Ihr Einfluss ist daher vernachlässigbar gering, und das gesamte Modellgebiet wurde als grundwassergesättigt betrachtet. In einigen Bereichen hingegen mussten zwei Grundwasserstockwerke (ungespannt und gespannt) mit einer in geringem Masse durchlässigen Sperrschicht berücksichtigt werden.
Die resultierenden Diffusions-Konvektionsgleichungen werden numerisch mittels des Finit-Element-Ansatzes gelöst. Es wird ein Finit-Element-Lösungsalgorithmus angewandt, der auf der von *Galerkin* entwickelten Methode der gewichteten Residuen beruht. Die Lösung der ursprünglichen partiellen Differentialgleichungen kann dabei auf die Lösung eines Integralproblems zurückgeführt werden.
In dem von uns in Nidwalden betrachteten oberflächennahen Bereich wird die Grundwassertemperatur hauptsäch-

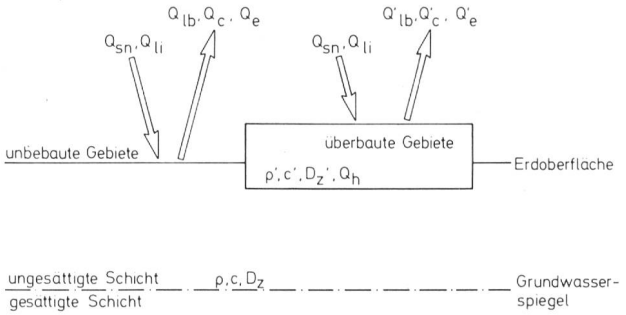


Bild 2. Randbedingungen des Wärmeaustausches an der Erdoberfläche (Strahlungsbilanz an der Boden/Luft-Schnittstelle) für unbebaute und bebaute Gebiete.

lich durch die Sonnenstrahlung beeinflusst. Der Wärmestrom aus dem Erdinnern (geothermischer Wärmestrom) ist dagegen vernachlässigbar klein. Für Simulationen der Temperaturverhältnisse in oberflächennahen Grundwasserleitern müssen daher die Wärmeströmungs-Wechselbeziehungen an der Erdoberfläche (Boden/Luft-Schnittstelle) berücksichtigt werden.

In Hydterm-2 werden die austretenden Wärmeströme gegen die eintretende Sonnenstrahlung bilanziert. Unterschiedliche Verhältnisse an der Erdoberfläche, wie beispielsweise Überbauungen oder Schneebedeckung im Winter werden in die Modellbetrachtungen mit einbezogen.

Die gerechnete Energiebilanz an der Erdoberfläche wird durch die folgende Gleichung näher beschrieben (Bild 2):

$$\bar{Q}_N = Q_{sn} + Q_{li} - Q_{lb} + Q_c - Q_e + Q_h,$$

wobei

- $\bar{Q}_N$ Gesamter Wärmefluss an der Boden/Luft-Schnittstelle im Untersuchungsgebiet
- Q_{sn} Wärmefluss aufgrund der globalen kurzwelligen Strahlung (direkte Sonnenstrahlung und diffuse Himmelsstrahlung)
- Q_{li} Wärmefluss aufgrund der atmosphärischen langwelligen Gegenstrahlung (Wärmestrahlung der Atmosphäre, hauptsächlich von Wolken reflektiert)
- Q_{lb} Wärmefluss aufgrund der an der Erdoberfläche reflektierten langwelligen Strahlung
- Q_c Wärmefluss aufgrund von Konvektion und Konduktion in der Atmosphäre
- Q_e Wärmefluss aufgrund von Verdunstung (Evapotranspiration)
- Q_h Wärmefluss aufgrund von Heizung bei überbauten Gebieten (in unbebauten Gebieten gilt: $Q_h = 0$).

Bis auf den Wärmefluss aufgrund anthropogener Beheizung (Q_h) können alle Komponenten der Energiebilanz ganz oder teilweise als Funktion verschiedener Klimavariablen berechnet werden. Diese sind wiederum eine explizite Funktion der Zeit. Für eine vollständige Darstellung der Energiebilanz an der Erdoberfläche benötigt man stückweise lineare Mittelungen über die näherungsweise bekannten mittleren monatlichen Raten verschiedener meteorologischer Zustände. Neben der einfallenden Sonnenstrahlung, dem Wärmefluss durch Evapotranspiration, der Lufttemperatur sowie der Windgeschwindigkeit und dem Bewölkungsgrad zählen dazu speziell im Winter auch Informationen über Schneehöhe und Schneedichte.

Die Bestimmung des Wärmeflusses an der Erdoberfläche wird vollständig simultan mit der Lösung des Wärmeflussproblems im Untergrund, zur Bestimmung der Grundwassertemperatur durchgeführt. Auch nichtlineare Terme, welche auf reflektierte Strahlungsanteile und auf Effekte latenter Wärme zurückgeführt werden können, sind im benutzten Iterationsschema enthalten. Der Einfluss einer Schneedecke wird durch die Berechnung der Energiebilanz über die gesamte Schneehöhe, bei Lösung für Temperaturgleichgewicht an der Schneeoberkante, nachgebildet.

4. Ist-Zustands- und Prognosesimulationen mit Hydterm-2 zur Erstellung eines Nutzungsplanes

Für die Arbeiten mit dem hydrothermischen Grundwasserströmungsmodell Hydterm-2 ist es notwendig, ein geeignetes Finit-Element Netzwerk zu erstellen und die benötigten Rand- und Anfangsbedingungen zu ermitteln. Das unter Berücksichtigung der relevanten natürlichen Gegebenheiten unter Einsatz des Computer-Hilfsprogramms RMA-1 konstruierte Netz besitzt rund 440 Elemente mit zirka 1080

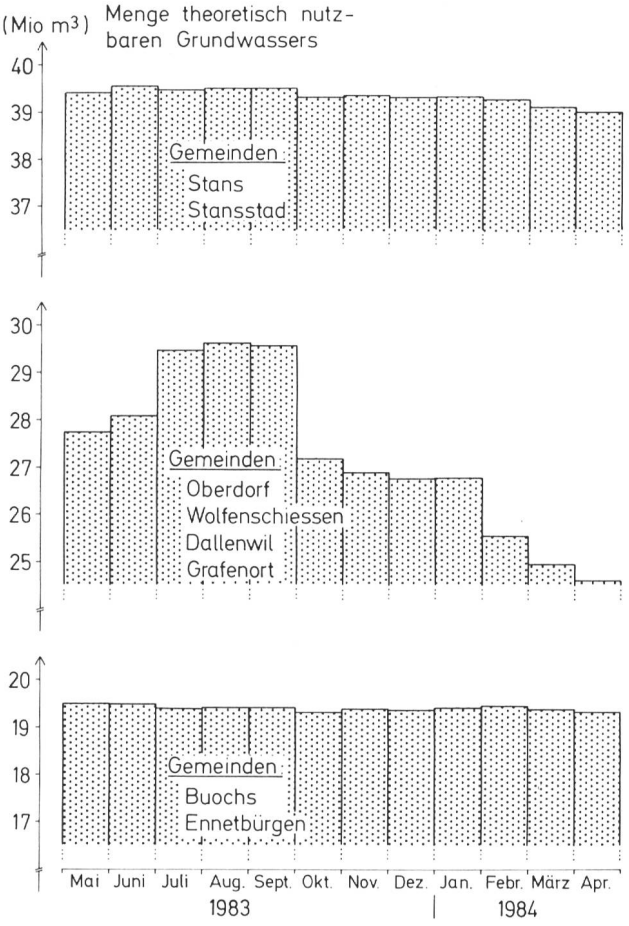


Bild 3. Mengen theoretisch nutzbaren Grundwassers für einzelne Abschnitte des Grundwassertalgebietes Nidwalden aus der instationären Ist-Zustandssimulation mit Grundwasserentnahme.

Knotenpunkten. Es wird damit eine Talfläche von über 18,5 km² überdeckt.

Für die ausgeführten Simulationsarbeiten wurde der Messzeitraum von Mai 1983 bis April 1984 zugrunde gelegt. Die für diesen Zeitraum durchgeführten Ist-Zustandssimulationen dienten der Nachbildung der «natürlichen» Gegebenheiten einschliesslich der Grundwasserentnahmen und -rückgaben. Es konnte eine befriedigende Anpassung des Modells an die realen Strömungs- und Temperaturbedingungen erzielt werden. Die durchgeführten Prognosesimulationsläufe können demnach als repräsentativ eingestuft werden.

Ergänzend erfolgten Modell-Läufe, für die jegliche Grundwasserentnahmen und -rückgaben «abgeschaltet» wurden. Aus diesen «ungestörten» Simulationen gingen die insgesamt nutzbaren Grundwasservorratsmengen hervor. Diese sind in Bild 3 für drei unterschiedliche Talabschnitte dargestellt.

Um die Sensitivität der ermittelten Klimadaten und ihren Einfluss auf die Modellierung der Grundwassertemperaturen einschätzen und überprüfen zu können, wurden Modelluntersuchungen an einem Einheitselement vorgenommen. Es handelt sich dabei um ein für das benutzte Finit-Element-Netzwerk typisches Viereckselement. Dieses besitzt Durchschnittseigenschaften, die stellvertretend für die Verhältnisse in Nidwalden sind.

Für dieses Testelement wurde die Energiebilanz an der Oberfläche (Boden/Luft-Schnittstelle) ebenso berechnet wie für jedes Netzelement des Simulationsmodells. Folgende zusammenfassende Aussagen lassen sich daraus ableiten:

Dem Auftreten einer progressiven Abkühlung des Grundwassers stehen zunehmende Anteile des von der Erdoberfläche eintretenden Wärmestroms entgegen;
2. Die monatlichen Energieeinträge sind generell bei geringeren Grundwassertemperaturen höher;
3. Der isolierende Einfluss einer Schneedecke im Winter ist deutlich erkennbar und nachvollziehbar.
Weiteren anschaulichen Aufschluss über diesen Sachverhalt gibt Bild 4.
Die Planungs- und Prognosesimulationen mit dem angepassten hydrothermischen Modell hatten das Ziel, unter den vorgegebenen Planungsbedingungen die Grenzen für eine ökologisch sinnvolle Grundwasserwärmenutzung im Talgebiet des Kantons Nidwalden auszuloten. Der simulierte Energieentzug wurde auf die potentiellen Nutzungsgebiete, das heisst die Bau- und Planungszonen der einzelnen Gemeinden im Grundwassertalgebiet, beschränkt.
Die simulierte Wärmeenergieentnahme wurde in den verschiedenen Gemeinden so lange variiert bis in einer (Buochs) die Toleranzgrenze von 1°C Abkühlung gegenüber der Simulation ohne Energieentnahme auftrat. Die Energieentnahmemengen wurden für alle Gemeindegebiete in gleichen Schritten geändert. Während in Buochs die «1°C-Abkühlung» bereits erreicht war, sank die mittlere Temperatur über das gesamte Talgebiet gesehen nur um etwa 0,7°C gegenüber dem ungestörten Zustand ab.

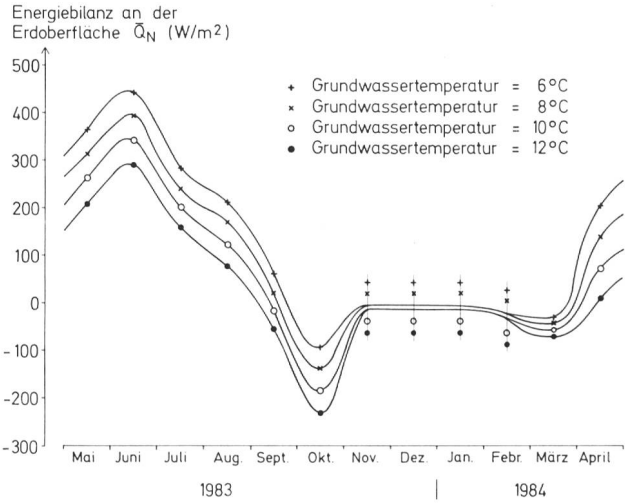
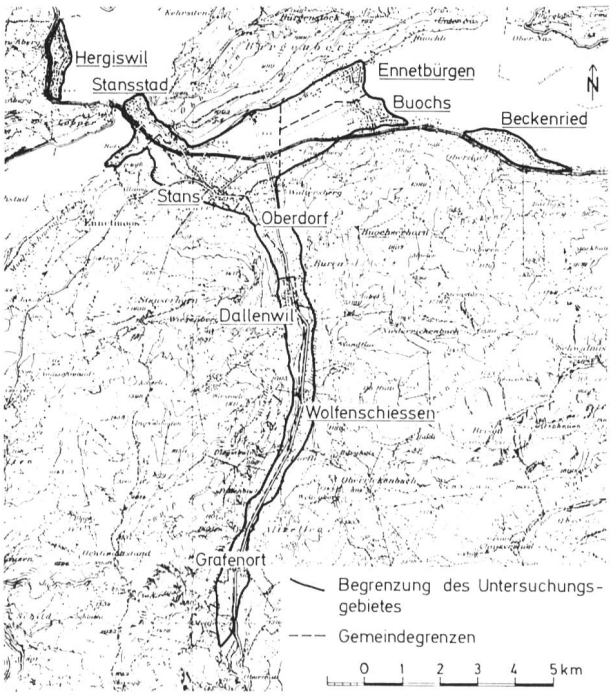


Bild 4. Simulierte Energiebilanz an der Oberfläche eines Einheitselementes in Abhängigkeit von den Klimadaten, bei jeweils konstanten Grundwassertemperaturen.

5. Diskussion der Ergebnisse

Auf der Basis der abschliessenden Planungssimulationsläufe mit Hydterm-2 und unter Berücksichtigung der vorgegebenen Planungsrahmenbedingungen wurde ein grossräumiger Nutzungsplan für das Talgebiet des Kantons Nidwalden entwickelt.
Aus den im Modell simulierten maximalen Energieentnahmemengen pro Zeit- und Flächeneinheit gehen die über ein Jahr in der Gemeinde bei vorgegebener maximaler Abkühlung theoretisch verfügbaren Grundwasserwärmemengen hervor. Unter Voraussetzung einer gewissen durchschnittlichen Abkühlungsrate innerhalb der Wärmepumpenanlagen (beispielsweise $\Delta T = 4°C$) ergibt sich die theoretisch nutzbare äquivalente Grundwasserentnahmemenge pro Jahr.
Dies sind teilweise enorme Grundwassermengen. Die auch aus Gründen der Brunnenergiebigkeit und der ungleichmässigen Verteilung der Entnahmestandorte eingeengten tatsächlich verantwortbaren Nutzungsmengen wurden auf den geschätzten Anteil der Grundwasserneubildung beschränkt. Unter diesen Voraussetzungen kann man grossräumig gesehen eine thermische Übernutzung des Grundwasserträgers ausschliessen. Da alle Betrachtungen davon ausgehen, dass das gesamte Wärmepumpenbrauchwasser ins Grundwasservorkommen zurückgegeben wird, ist eine regionale quantitative Übernutzung ebenso unwahrscheinlich.
Der in Bild 5 vereinfacht dargestellte Nutzungsplan dient den kantonalen Behörden in Nidwalden als Planungsgrundlage und Entscheidungshilfe. So wurde beispielsweise der vom Regierungsrat verfügte Bewilligungsstopp für Wärmepumpenanlagen bereits aufgehoben.

Bild 5. Stark vereinfachter hydrothermischer Nutzungsplan für den Kanton Nidwalden. Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 11. März 1985.



Hergiswil
Entnahmemenge zirka 400000 m³/a
entsprechend zirka 1,8 Mio kWh/a

Stansstad
Entnahmemenge zirka 900000 m³/a
entsprechend zirka 4,2 Mio kWh/a

Stans
Entnahmemenge zirka 5,8 Mio m³/a
entsprechend zirka 27,0 Mio kWh/a

Oberdorf
Entnahmemenge zirka 1,4 Mio m³/a
entsprechend zirka 6,5 Mio kWh/a

Wolfenschiessen
Entnahmemenge zirka 2,1 Mio m³/a
entsprechend zirka 9,8 Mio kWh/a

Ennetbürgen
Entnahmemenge zirka 900000 m³/a
entsprechend zirka 4,2 Mio kWh/a

Buochs
Entnahmemenge zirka 2,4 Mio m³/a
entsprechend zirka 11,0 Mio kWh/a

Beckenried
Entnahmemenge zirka 1,6 Mio m³/a
entsprechend zirka 9,3 Mio kWh/a

Dallenwil
Entnahmemenge zirka 700000 m³/a
entsprechend zirka 3,3 Mio kWh/a

Der Nutzungsplan zeigt, dass unter den gegebenen Voraussetzungen eine Grundwassermenge von insgesamt rund 16,2 Mio m^3/Jahr zur energetischen Nutzung zur Verfügung steht. Das entspricht einem Wärmeenergieäquivalent von zirka 77,1 Mio kWh/Jahr oder anders ausgedrückt der Heizenergie, die aus rund 8000 t Heizöl gewonnen werden könnte. Dies würde, bei einem angesetzten Energieverbrauch von 35000 kWh pro Jahr und Haus, den Heizenergiebedarf von etwa 2200 Einfamilienhäusern decken. Gegenüber dem heutigen Stand (geförderte Grundwassermenge: zirka 2,4 Mio m^3/Jahr, genutztes Wärmeenergieäquivalent: zirka 11 Mio kWh/Jahr) liessen sich bei vollständiger Ausschöpfung der angegebenen Reserven die mit der Nutzung der Grundwasserwärmeenergie verbundenen Einsparungen auf das 6- bis 7fache erhöhen.

Die Bedingungen der lokalen Abkühlungserscheinungen im kleinräumigen Bereich können mit Hydterm-2 ebenfalls erfasst werden. Dies wurde im dargestellten Projekteinsatz jedoch nicht angestrebt. Für gewisse Fragestellungen ist es sicherlich wichtig, von der generalisierten, regionalen Betrachtungsweise abzurücken und beispielsweise gemeinde- oder gar quartierweise Nutzungspläne und hydrothermische Simulationen zu erstellen. Dies wäre zum Beispiel ein gangbarer Weg, um den Einfluss von projektierten oder bereits gebauten Grossanlagen auf ihre unmittelbare Nachbarschaft oder die Einwirkungen einer Ansammlung von Grundwasserwärmepumpen auf ein enger begrenztes Gebiet zu untersuchen. Ausserdem ergäben sich aufgrund der simulierten Grösse und Intensität von Kältefahnen und deren Überlappung Anhaltspunkte über extreme Grundwasserabkühlungen und deren Folgen.

Vom grossräumigen Standpunkt aus betrachtet scheint nach den vorgelegten Untersuchungen und Simulationen die vom Bundesamt für Umweltschutz empfohlene «1 °C-Abkühlungsgrenze» eine sinnvolle Grösse zu sein. Zunächst schliesst die «1 °C-Grenze» die Gefahr einer thermischen Übernutzung für grössere Grundwassersysteme nahezu aus. Obwohl nach dem heutigen Kenntnisstand die grundsätzlichen Nutzungsmöglichkeiten kaum eingeschränkt werden, ergeben sich dennoch Konsequenzen für die Energiebewirtschaftung eines Grundwassergebietes. So wird beispielsweise die maximale Energieentnahme, unabhängig von der Grundwassermenge, von vornherein begrenzt. Nach den dargelegten Modelluntersuchungen kann man jedoch davon ausgehen, dass bei erhöhter durchschnittlicher Untergrundabkühlung ein höherer Energieeintrag im Sommer und weniger Energieverlust an die Atmosphäre im Winter für oberflächennahe Grundwasserleiter zu erwarten ist (vgl. hierzu Bild 4). Bei stärkerer Abkühlung könnte also auch bei ganzjähriger energetischer Nutzung eines Grundwasservorkommens eine Erholung der Grundwasserwärmekapazität möglich sein. Aufschlüsse über die genauen Einflüsse der vorgegebenen oder geänderten Abkühlungsgrenzen auf die Umwelt können von den vorliegenden Modelluntersuchungen nicht erwartet werden. Sie sind jedoch ein Ziel weitergehender Untersuchungen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Modellstudie hat neue, grundlegende Hinweise auf die klimatologischen, hydrogeologischen und hydrothermischen Verhältnisse und Gesetzmässigkeiten für die Grundwasserwärmenutzung im Lockergesteins-Grundwasserträger eines Alpentals aufgezeigt. Das raumzeitliche Temperaturänderungsverhalten für den grossräumigen Bereich konnte nachvollzogen werden. Weitere Modell-Simulationen sollen die Auswirkungen stärkerer langfristiger klimatologischer Schwankungen untersuchen.

Es ist vorgeschlagen, in Zusammenarbeit verschiedener Institutionen einen Grundlagenkatalog zur allgemeinen Anwendung hydrothermischer Modelle im klein- und grossräumigen Bereich zu erstellen. Die benutzten Rechenprogramme und die erzielten Ergebnisse der dargelegten Studie können hierzu einen bedeutsamen Beitrag leisten.

Bereits sind zweidimensional-vertikale und dreidimensionale hydrothermische Simulationsmodelle verfügbar (zum Beispiel Hydterm-3). Sie bedürfen jedoch noch der Erprobung. Die notwendigerweise sehr grosse Anzahl von Knoten und Elementen bewirkt einen erheblich gesteigerten Aufwand bei der Erfassung, Verarbeitung und Beurteilung des Ein- und Ausgabedatenmaterials. So bedarf beispielsweise die vergleichende Interpretation gemessener und gerechneter Werte sowie deren Anpassung neuer, insbesondere visueller Darstellungsformen.

Literaturhinweise

Angehrn P. P., Lyons T. C. (1984)
Kanton Nidwalden, Direktion des Innern, Amt für Umweltschutz und Planung. Bewirtschaftungsgrundlagen für das Grundwasser, Bericht und Planbeilagen. Büro für Hydrogeologie, Weggis.

Angehrn P. P., Lyons T. C. (1984)
Software-Katalog für hydrogeologische und hydrologische Applikationen, Software-Übersicht. Büro für Hydrogeologie, Weggis.

Angehrn P. P., Hanke J., Lyons T. C. (1984)
Kanton Luzern, Amt für Umweltschutz. Wärmenutzung aus dem Grundwasser, Hydrothermische Nutzungsplanung im Tal der Kleinen Emme von Wolhusen bis Emmenbrücke, Büro für Hydrogeologie, Weggis.

Bundesamt für Umweltschutz (1982)
Wegleitung zur Wärmenutzung aus Wasser und Boden, Bern.

King I. P. (1984)
DADS, Data Analysis and Display System. Prepared for U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Resource Management Associates, Lafayette, California.

King I. P., Lyons T. C. (1984)
Data Analysis and Display System DADS, Users' Manual. Resource Management Associates, Lafayette/Mönchengladbach.

King I. P., Lyons T. C. (1984)
Hydrothermal Model Hydterm-2, Users' Manual. Resource Management Associates, Lafayette/Mönchengladbach.

Norton W. R. (1982)
Operation Instructions for the Computer Program Geodyn, A Two-Dimensional Finite Element Program for Simulation of the Geothermal Freeze/Thaw Condition. Prepared for Foothills Pipe Lines, Calgary, Alberta. Resource Management Associates, Lafayette.

Norton W. R., King I. P. (1978)
Operating Instructions for the Computer Program RMA-1, A Preprocessor for the Two-Dimensional Hydrodynamic Program, RMA-2. Resource Management Associates, Lafayette, California.

Resource Management Associates (1980)
Ein Finit-Element-Grundwassermodell für ungespannte und gespannte Grundwasserträger und durchlässige Grundwassersperrschichten (SJFEGM-Modell). Lafayette/Mönchengladbach.

Adresse der Verfasser: Dr. *Peter P. Angehrn, Joachim Hanke, T. Clark Lyons, Wolfgang Rau,* c/o Büro für Hydrogeologie, Kastanienweg, CH-6353 Weggis.