

Numerische Modellierung der Interaktionen zwischen Oberflächengewässern und dem Grundwasser mit Hilfe von geohydraulischen, isopenhydrologischen und hydrochemischen Untersuchungen

Von WERNER MICHEL, Singen

KURZFASSUNG

Das Ziel ist mit Hilfe natürlicher Tracer und hydraulischer Berechnungen die am Grundwasserfließgeschehen im quartären Porengrundwasserleiter des Argendeltas beteiligten Grundwasserkomponenten sowie die Interaktion der Oberflächengewässer mit dem Grundwasser eingehend qualitativ und quantitativ zu beschreiben. Als Tracer wurden das stabile Sauerstoff-18-Isotop und hydrochemische Inhaltsstoffe, die in der Argen eine deutliche Markierung gegenüber dem Grundwasser zeigen, verwendet. Die Verteilung der isopenhydrologisch und hydrochemisch ermittelten Anteile von Argen-Uferfiltrat im Grundwasserleiter des Argendeltas wurde mit einem numerischen Grundwasserströmungs- und Transportmodell simuliert. Die Berechnungen erfolgten instationär

Die bisherige Nutzung erfolgt im westlichen Teil des Argendeltas durch einen Horizontalfilterbrunnen mit einer möglichen Förderrate von 150 l/s. Für eine neue Erschließung auf der östlichen Seite der Argen musste aufgrund der auch hier intensiv betriebenen landwirtschaftlichen Flächennutzung die räumliche und zeitliche Beeinflussung des Grundwassers durch Argen-Uferfiltratanteile genau erkundet werden.

Zur Erstellung des konzeptionellen Modells wurde eine Quantifizierung der räumlich-zeitlichen Verteilung des Argen-Uferfiltrats durchgeführt.

Das numerische Modell musste aufgrund der neuen geologischen Erkenntnisse dreidimensional aufgebaut werden, um die Anbindung der Argen an den Grundwasserleiter und den Einfluss oberflächennaher Grundwässer auf die geplante Erschließung des tieferen Aquiferbereiches besser beschreiben zu können.

Das kalibrierte Grundwasserströmungsmodell bildete die Grundlage für die Prognoseberechnungen zur Erstellung eines Bewirtschaftungskonzeptes für das gesamte Grundwasservorkommen im Argendelta. Die Berechnungen der Fließzeiten und der 50-Tage-Linie als Grundlage für die Bemessung des notwendigen Wasserschutzgebietes für eine zukünftige Trinkwasseranlage war ebenfalls möglich.

Die vorgestellten Untersuchungen zeigten, dass mit dem natürlichen Tracer Sauerstoff 18 und mit hydrochemischen Inhaltsstoffen bei einer ausreichenden Anzahl von Analysen die Interaktion zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser räumlich und zeitlich sowohl qualitativ als auch quantitativ beschrieben werden kann.

Schlüsselwörter: natürliche Tracer und Isotope, numerisches Grundwassermodell, Uferfiltrat, Interaktion zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser

ABSTRACT

The aim of this thesis is the qualitative and quantitative description of the groundwater flow regime and the groundwater components of the Quaternary porous aquifer in the Argen-Delta with natural tracers and hydraulic calculations as well as describing the interaction between the surface water bodies and the groundwater.

The stable oxygen-18 isotope and hydrochemical components, which have clearly different markings in the river as in ground water, were selected as tracers.

The distribution of the portions of the Argen bank filtrate in the aquifer were determined with isotopic and hydrochemical methods and simulated with a numerical hydrodynamic transport model.

Transient computations were carried. The present use of the groundwater takes place in the western part of the Argen delta via a horizontal filter well with a maximum discharge of 150 l/s. For a new exploitation on the eastern side of the Argen River, the spatial and temporal influence of the groundwater by bank filtrate had to be determined exactly.

For a delineation of a groundwater protection area in accordance with valid guidelines, the portions from short-term and long-term flowing river bank filtrate to the wells had to be regarded differently.

For the creation of the conceptual model and for the quantification and description of the spatial and temporal distribution of the bank filtrate in the aquifer, numerous isotope investigations were conducted.

The numerical model had to be developed three dimensionally because of new geological knowledge, in order to better describe the interaction between Argen River, Lake Constance and the aquifer. The numerical groundwater model formed the basis for the prognosis calculations to create a ground water management concept for the entire ground water supply in the Argen delta. The computation of flow times of groundwater as basis for a precise delineation of the necessary water protection area for future drinking water supply was likewise possible.

The presented investigations showed that the interaction between surface water and groundwater can be described with a sufficient number of analyses of the natural tracer 18-oxygen and the chemical ingredients in the Water.

Key words: Environmental Tracers and Isotopes, Numerical Groundwater Model, River Bank Filtrate, Interaction between Groundwater and Surface water

1. EINLEITUNG

Unter der Federführung des Zweckverbandes Wasserversorgung „Unteres Schussental“ (ZWUS) in Meckenbeuren wurde zur Steigerung der zukünftigen Versorgungssicherheit mit Trink- und Brauchwasser von über 50.000 Bürgern im südlichen Bodenseeraum ein Regionaler Trinkwasserverband gegründet. Eine Verbundsvergrößerung wird notwendig, weil künftige Änderungen der Grundwasserhaushaltsgrößen und der Grundwasserbeschaffenheit von bereits erschlossenen Grundwasservorkommen als Folge intensiver, vielfältiger Flächennutzungen und derzeit noch nicht voraussagbaren Änderungen klimatischer



Abb. 1: Argemündung bei Kressbronn

Randbedingungen zu erwarten sind. Zusammen mit den zuständigen Fachbehörden wurde ein Untersuchungsrahmen zur Erschließung von Zusatzwasser aufgestellt. Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen einer Machbarkeitsstudie zur Erschließung von Zusatzwasser in den Jahren 2007–2010 durchgeführt.

Die Arbeiten wurden finanziell getragen vom Zweckverband Wasserversorgung Unteres Schussental (ZWUS) und mit Fördermitteln vom Regierungspräsidium Tübingen unterstützt.

1.1 Bisherige Erkenntnisse im Untersuchungsgebiet

Bereits seit den 60er Jahren des vorigen Jahrhunderts wurden die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse der quartären Ablagerungen aus Kies und Sand westlich und östlich der Argem im sog. „Argendelta“ von verschiedenen Fachbehörden eingehend untersucht. Schwerpunkt der Untersuchungen war damals das Gebiet westlich der Argem, wo im Gewinn „Obere Wiesen“ eine Trinkwasserfassungsanlage erstellt wurde, die aus einem Vertikalfilterbrunnen und einem sehr ergiebigen Horizontalfilterbrunnen besteht.

Das Grundwasservorkommen im Porengrundwasserleiter östlich der Argem wurde weniger intensiv erkundet und bisher nur mit zwei Versuchsbrunnen vom Land Baden-Württemberg erschlossen.

Die Nähe des Standortes zum Ufer des Bodensees bzw. zum Baggersee „Gohren“ – heute Sportseehafen „Gohren“ – war ausschlaggebend für die Auswahl des

zu untersuchenden Standortes , um mittels Seeuferfiltrat die Fördermenge und gegebenenfalls die Wasserqualität aus dem Brunnen steigern und verbessern zu können.

1.2 Ziele der Untersuchungen und Vorgehensweise

Konkurrierende Grundwassernutzungen im näheren Einzugsgebiet der Versuchsbrunnen, Unsicherheiten der Qualitätsbeständigkeit infolge intensiver landwirtschaftlicher Flächennutzung im gesamten Argendelta und mögliche Beeinflussungen des Grundwasserhaushalts durch klimatische Änderungen in der Zukunft sind die Gründe der derzeitigen komplexen hydrogeologischen, hydrochemischen und isopenhydrologischen Untersuchungen im östlichen Argendelta.

Ziel der Machbarkeitsstudie war es, einen geeigneten Standort für eine Trinkwassererschließung im Argendelta östlich der Argen zu erkunden, die maximal mögliche Dauerentnahmemenge zu ermitteln und die Grundlagen für die Erstellung eines Bewirtschaftungskonzepts für das nutzbare Grundwasservorkommen im gesamten Argendelta zu erarbeiten.

Die Auswahl des Standortes für die Neuerschließung musste gewährleisten, dass eine Beeinträchtigung des bestehenden Horizontalfilterbrunnens „Obere Wiesen“ nicht eintritt und die Ausweisung eines Wasserschutzgebietes (Zone I-III) gemäß den gültigen Richtlinien möglich ist. Der neue Standort sollte schließlich so gewählt werden, dass das neu erschlossene Grundwasser ein von den anderen Brunnenstandorten der Trinkwasserversorgung möglichst unabhängiges Einzugsgebiet hat.

Es sollten vor allem wissenschaftlich fundierte Kenntnisse über die komplexen Wechselwirkungen zwischen dem Grundwasservorkommen mit den Oberflächengewässern Argen und Bodensee aus qualitativer und quantitativer Sicht gewonnen werden.

Hierzu wurden hydrogeologische, hydrochemische und isopenhydrologische Methoden eingesetzt. Im konzeptionellen Modell waren die dreidimensionalen Fließverhältnisse im Aquifer zu bestimmen und mit den ermittelten Parametern der Einfluss des Uferfiltrats der Argen und des Bodensees im Grundwasserleiter räumlich, d.h. flächendeckend und zeitlich mit Berücksichtigung saisonaler Schwankungen im Oberflächengewässer zu beschreiben.

Die Untersuchungen sollten sowohl die ufernahen Bereiche mit kurzfristig zufließenden Uferfiltratanteilen als auch Bereiche mit langfristig abfließenden Argen-Uferfiltratanteilen unterscheiden und diese Bereiche gegenüber denen ohne Einfluss der Uferfiltration abgrenzen.

Da die Prognoseberechnungen, welche die Verhältnisse im Grundwasserleiter bei geänderten Bedingungen beschreiben, nur mit einem geeigneten Grundwasserströmungs- und Transportmodell durchgeführt werden können, wurde seine Erstellung auch Gegenstand dieser Arbeit.

2. BESCHREIBUNG DES KONZEPTIONELLEN MODELLS ALS GRUNDLAGE FÜR DIE NUMERISCHE MODELLIERUNG

2.1 Geographische Lage und morphologische Verhältnisse

Das Untersuchungsgebiet mit einer Größe von etwa 40 km² liegt im östlichen Bodenseeraum zwischen Friedrichshafen, Kressbronn und Tettngang. Im Lageplan der Abb. 2 ist das Untersuchungsgebiet markiert.

Aus geomorphologischer Sicht liegt das Untersuchungsgebiet im so genannten Argendelta, dem grundwasserdurchströmten Teil der würmeiszeitlichen Schotterterrassen östlich und westlich der Argen zwischen Tettngang und dem Boden-



Abb. 2: Lageplan mit markiertem Untersuchungsgebiet

see (Abb. 2). Das Untersuchungsgebiet ist Teil des alpinen Vorlandes, welches sich rund um den Bodensee erstreckt. Es wurde durch mehrfache Vorstöße des Rheingletschers während des Pleistozäns maßgebend überprägt. Die auf dem tertiären Molasse-Untergrund verbliebenen älteren pleistozänen Ablagerungen wurden zu Beginn des Würmglazials mit einem moderaten Relief versehen. Demzufolge ist das heutige Landschaftsbild im Wesentlichen das Ergebnis der jüngsten, stark ausgeprägten Vorstöße des Rheingletschers und seiner Schmelzwasserströme.

Morphologisch betrachtet besteht das Untersuchungsgebiet aus einer Terrassenlandschaft mit weit reichenden Kiesterrassen (Tettninger Terrassen und Argen-Talterrasse) und Talauen. Höhenmäßig fällt die Landschaft gestuft von Nordosten nach Südwesten von rd. 450 m NN südlich Tettning auf rd. 400 m NN am Bodensee.

Hydrographisch gehört das Untersuchungsgebiet zum Einzugsgebiet des Rheins, wobei der Bodensee für das gesamte Grund- und Oberflächenwasser des Untersuchungsgebietes die Vorflutfunktion einnimmt. Das Oberflächengewässer mit dem größten Einfluss auf die Grundwasserfließverhältnisse sowie auf den Grundwasserhaushalt und schließlich auch auf die Grundwasserbeschaffenheit im gesamten Argendelta ist die Argen. Diese teilt das Modellgebiet von Nordost nach Südwest in zwei etwa gleich große Flächen.

In Folge der intensiven landwirtschaftlichen Flächennutzung mit Sonderkulturen in großen Teilen des Argendeltas stellt hier der Einsatz von Dünge- und Pflanzenbehandlungsmitteln stets eine potenzielle Gefährdung des Grundwasservorkommens dar. Eingehende hydrochemische Untersuchungen ab den 80er Jahren belegen die Beeinflussung der Grundwasserbeschaffenheit durch flächenhaften und punktuellen Stoffeintrag. Die im Einflussbereich landwirtschaftlicher Nutzungsflächen untersuchten Grundwässer weisen deutliche Einflüsse verschiedener, flächenhafter Stoffeinträge auf, so dass sie sich unterscheiden von den Grundwässern im Bereich von Waldflächen oder von Grundwässern mit einer Hauptkomponente aus Uferfiltrat der Argen.

Grundwasserhaushaltsbetrachtungen für den Argendelta-Aquifer ließen schon sehr früh bedeutende Uferfiltratsmengen der Argen annehmen (SCHREINER 1978). Ergebnisse umfangreicher isopenhydrologischer und hydrochemischer Untersuchungen vom Ende der 80er und Anfang der 90er Jahre (BERTLEFF et al. 1991, LFU 1990) bestätigten diese Annahmen.

2.2 Geologische Verhältnisse

Aus regional-geologischer Sicht ist das Untersuchungsgebiet Teil der von Osten nach Westen, vereinfacht betrachtet, sich anreihenden drei Sedimentationsräume. Nach Westen und Südwesten bildeten sich großflächige Kiesterrassen heraus, die als glaziofluviale Deltaschüttungen der vom Eisrand ausgehenden Schmelzwasserströme zu deuten sind. Diese gehen in westliche Richtung über in die feinkörnigen Beckensedimente des Schussenbeckens. Es handelt sich um Sedimente, welche in Gletscherstauseen abgelagert wurden. Im Gebiet des Argendeltas lagert auf den tertiären Molasseschichten (Obere Süßwassermolasse;

OSM) eine bis 150 Meter mächtige Schichtenfolge aus eiszeitlichen, fluviatilen und lakustrinen Sedimenten, bestehend aus Beckenton (feinsandig toniger Schluff), Grundmoräne (Geschiebemergel; Diamikte) und kiesig sandigen Kiesfeldern, die in folgende geomorphologische Kartiereinheiten unterteilt sind:

- obere Tettninger Terrasse (ds40)
- mittlere Tettninger Terrasse (ds4m)
- untere Tettninger Terrasse (ds4u)
- Argentalterrasse (ds5)
- alluviale Talaue der Argen (al/as)

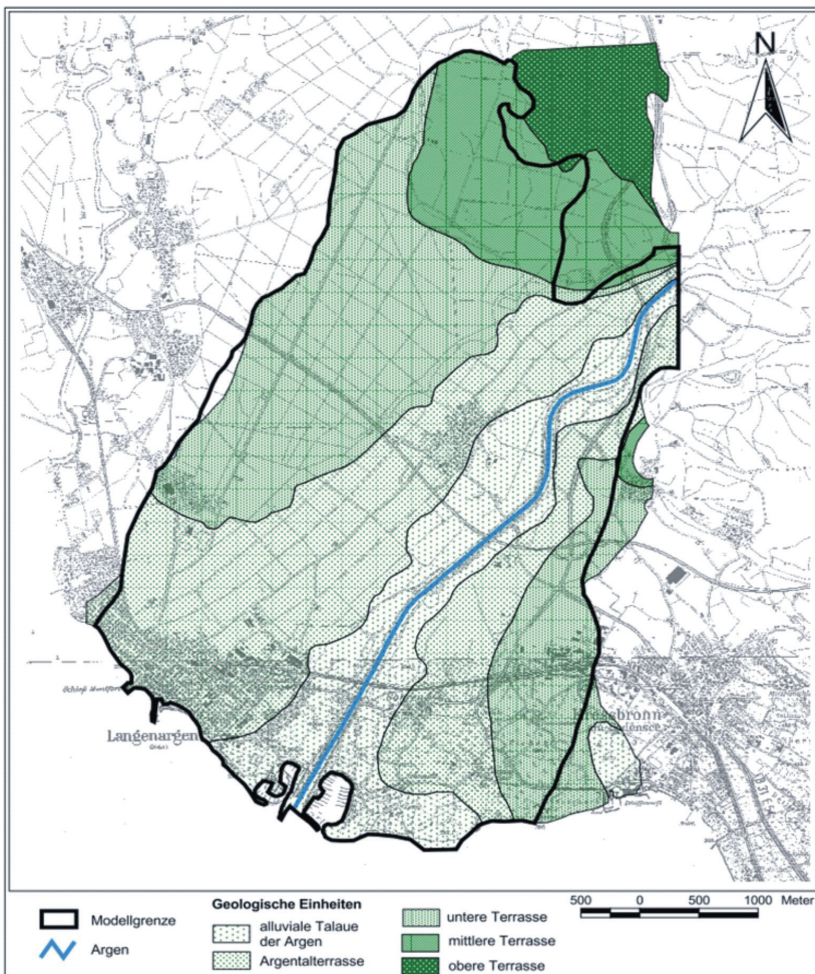


Abb. 3: Vereinfachte Geologische Karte mit den geologischen Einheiten nach der Geologischen Karte 1:25.000 (GK25) Blätter 8223 Tettwang und 8423 Kressbronn a.B.

Diese Schichten wurden gegen Ende und nach der Würm-Eiszeit abgelagert. Das Relief der Quartärbasis fällt stärker als die rezente Landoberfläche nach Süden zum Bodensee ein und wurde durch Glazialerosion gebildet.

Die Kiese und Sande des Grundwasserleiters erreichen Mächtigkeiten von wenigen Metern bis über 50 Metern.

In der Abb. 3 sind die kartierten Einheiten innerhalb des Modellgebietes gemäß der Geologischen Karte 1:25.000 (GK25) Blatt 8323 Tett nang vereinfacht dargestellt.

Bei den Tett nanger Terrassen (ds40 – ds4u) handelt es sich um Deltaschüttungen, die in einen Gletscherstausee geschüttet wurden, der sich vom Schussental nach Osten erstreckte. Das Niveau der einzelnen Terrassen ist auf den sinkenden Wasserspiegel des Stausees durch den Rückzug des Rheingletschers nach Süden zurückzuführen.

Die Kiese und Sande dieser Deltaschüttungen wurden durch Flusswasserströme, die von Osten aus dem Argental kamen, herantransportiert. Durch die von Ost nach West abnehmende Transportkraft der Flusswasserströme nimmt der Feinkornanteil nach Westen bzw. Nordwesten zu.

Neuere geologische Untersuchungen im nordwestlichen Teil des Argendeltas zeigten hydraulisch wirksame Barrieren aus Sanden und Feinsedimenten im Bereich der unteren Tett nanger Terrasse. Im Gegensatz zu den Tett nanger Terrassen erfolgte die Schüttung der Argentalterrasse (ds5) von Nordost nach Südwest und hat sich erosiv in die untere Tett nanger Terrasse eingegraben. Während der Ablagerung der Talterrasse bestimmte das Höhenniveau des Bodensees mit ca. 405–403 m NN als Vorfluter und nicht wie bei der Ablagerung der Tett nanger Terrassen der Eisstausee im Schussental die Sedimentationsverhältnisse.

Die Kenntnisse zum geologischen Aufbau des Untersuchungsgebietes beruhen auf geologischen Kartierungen, geoelektrischen Messungen und den Informationen von über 140 Bohraufschlüssen.

Die Interpolation der Aquiferbasislinien in Abb. 4 zeigt verschiedene Rinnen- und Muldenstrukturen, die unterschiedlich stark ausgeprägt sind.

2.3 Hydrogeologische Verhältnisse

Aquifergeometrie

Das Untersuchungsgebiet und damit der Bereich des konzeptionellen Modells wurden so ausgewählt, dass die Aquifergrenzen auch die Modellgrenzen bilden. Die Grenzen sind durch zahlreiche Bohrungen und Grundwassermessstellen belegt. Im Westen gehen die wassererfüllten Kiese in sandige, schluffige Ablagerungen über, die nur gering wasserführend sind und damit die Aquifergrenze bilden. Die südliche Aquifergrenze entspricht dem Bodenseeufer. Der Bodensee stellt die natürliche Vorflut für den Aquifer dar.

Im Norden und Nordosten steigt die Basis des sandig-kiesigen Grundwasserleiters an und führt dazu, dass der Kies nicht mehr wassererfüllt ist. Die Basis wird von undurchlässigen Diamikten (Geschiebemergeln) gebildet.

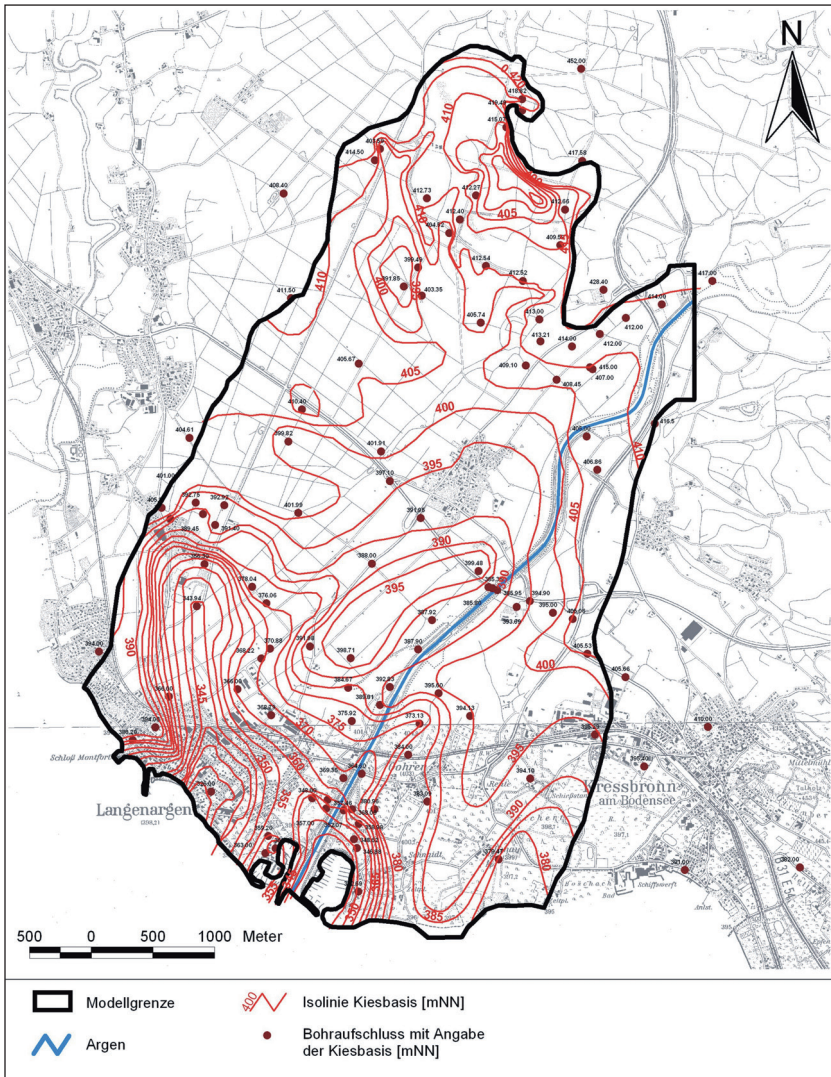


Abb. 4: Isolinienkarte der Kiesbasis mit Bohraufschlüssen im Untersuchungsgebiet

Im Osten bildet die Grenze der Unteren Tettlinger Terrasse den Aquiferrand. Lediglich im Bereich von Gießen setzt sich die Kiesrinne und damit der Aquifer ins Argental nach Nordosten fort.

Die Aquiferbasis steigt von 345 m NN im Süden (Hafenbereich) auf 420 m NN im Norden (Tettlinger Wald) an, wobei die Kiesbasis hier noch weiter ansteigt, so dass der Grundwasserleiter trocken fällt.

Im Bereich der Argenmündung ist eine durch geoelektrische Messungen angedeutete, tief eingeschnittene Rinnenstruktur durch neue Bohrungen nachgewiesen worden (HYDRO-DATA 2010). Die erbohrte Basis liegt bei 350 m NN. Ausgehend vom Seeufer in Langenargen erstreckt sich nach Nordwesten auch eine schmale Rinne, die bis nach Tuniswald reicht.

Die Größe des Modellgebietes und damit des betrachteten Aquifers beträgt in der Ost-West-Erstreckung ca. 3 km und in der Nord-Süd-Erstreckung ca. 6,5 bis 7 km.

Die Oberflächengewässer, die den Aquifer hydraulisch beeinflussen, sind die Argen und der Bodensee. Bis zur Mündung im Bodensee zwischen den beiden Hafengebieten infiltriert und exfiltriert die Argen abschnittsweise. Der Bodensee bildet wie erwähnt den Vorfluter für den Aquifer und die Argen. Durch die Variation des Seepiegels von 1,5 bis 2,5 Metern pro Jahr verändert sich auch die Grundwasserspiegelhöhe.

Weitere Oberflächengewässer, die den Haushalt und die Beschaffenheit der Grundwässer beeinflussen, sind im Modellgebiet nicht vorhanden.

Geohydraulische Kennwerte

Der Grundwasserleiter ist im größten Teil des Argendelta-Aquifers ungespannt. Im Bereich einer Zwischenschicht im südlichen Bereich liegen teilgespannte Verhältnisse vor, die auch dazu führen, dass Uferfiltrat im Nahbereich der Argen nicht unmittelbar in den tieferen Teil des Grundwasserleiters einspeist. Dies wird durch die isopenhydrologischen Untersuchungen bestätigt.

Die Ermittlung der Aquiferkennwerte erfolgte anhand von Pumpversuchsauswertungen und zeigt im Vergleich der einzelnen Werte die Inhomogenität des Aquiferaufbaus. Die Pumpversuche wurden in den Brunnen der Trinkwasserversorgung, den Versuchsbrunnen und in Grundwassermessstellen durchgeführt. Beispielfhaft sind nachfolgend einige Pumpversuchsergebnisse aufgeführt. (Lage der Grundwassermessstellen siehe Abb. 8)

Der Pumpversuch 1988 im Horizontalfilterbrunnen (GWM 2/624) ergab einen Transmissivität (T)-Wert von $4\text{--}5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, was bei einer mittleren Mächtigkeit von 15 m einen kf-Wert von $3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ bedeutet. Der Speicherkoeffizient wurde damals mit $S = 0,07$ ermittelt.

Im Landesbrunnen „Baggersee bzw. Gohren“ (GWM 103/624) ergaben die Auswertungen eine Transmissivität von $6,3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ und bei einer Mächtigkeit von 21,4 m einen kf-Wert von $3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$. Der Speicherkoeffizient liegt zwischen 0,1 und 0,15.

In den Messstellen, die 2008 im südöstlichen Bereich zwischen der Verbindungsstraße zwischen Langenargen – Kressbronn und dem Hafen Gohren erstellt wurden, konnten folgende hydraulische Parameter bestimmt werden:

- Transmissivität T : $2,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ bis $3,9 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
- Aquifermächtigkeit H : 7,5 m bis 35 m
- Speicherkoeffizient S ; $S < 0,05$ (teilgespannt) bis $S > 0,15$ (ungespannt).

Aus den Einzelwerten der Durchlässigkeitsbeiwerte (kf-Wert), ermittelt für Brun-

nen und Grundwassermessstellen aus den Ergebnissen o. g. Pumpversuche, wurde die Verteilung für den gesamten Aquifer extrapoliert bzw. interpoliert (Regionalisierung).

Hydraulisches Gefälle und Wasserspiegelschwankungen

Die Schwankungen des Grundwasserspiegels im nördlichen und mittleren Bereich des Aquifers liegen in den Jahren 2000 bis 2009 zwischen 0,5 und 1 m, wobei die größeren Schwankungen in den Messstellen auftreten, die hydraulisch von der Argen beeinflusst sind. Im südlichen Bereich des Aquifers traten während des Untersuchungszeitraums 2007–2010 Schwankungen bis 1,6 m im Jahr auf. Für den Betrachtungszeitraum 2000–2010 änderte sich der Grundwasserspiegel entsprechend dem Seewasserstand um bis zu 2,5 Meter.

Das aus den Grundwassergleichen bestimmte hydraulische Gefälle liegt im nördlichen Bereich des Modellgebietes bei 4,5 ‰ und im südlichen Bereich zwischen 1,3 ‰ (Seehochwasser) und 2,1–2,3 ‰ (Seeniedrigstand).

Grundwasserfließverhältnisse

Die räumliche (stationäre) und zeitliche (instationäre) Beschreibung der Grundwasserfließverhältnisse erfolgt anhand von Grundwassergleichenplänen für Hoch- und Niedrigwasser, und anhand von Wasserspiegelganglinien der Grundwassermessstellen und von Oberflächengewässer.

Die Messungen des Wasserspiegels zeigten zusammen mit den Auswertungen von Pumpversuchen (Bestimmung hydraulischer Ränder), dass der Aquifer, der vom Tettlinger Wald (südlich Hagenbuchquelle) bis zum Bodensee ein hydraulisches System darstellt, in einzelne Zonen unterteilt werden kann. Isotopenhydrologische, hydrochemische und geoelektrische Untersuchungen bestätigen diese Modellvorstellung und erlauben die hydraulischen Barrieren, die die einzelnen Zonen abgrenzen, genauer zu lokalisieren. Eine weitere Unterteilung kann aufgrund des hydraulischen Einflusses der Argen und des Wasserstandes des Bodensees, vor allem vom Seehochwasserstand (Sommer), vorgenommen werden.

Für die Beschreibung der Grundwasserfließverhältnisse im Modellgebiet, basierend auf Wasserspiegelstichtagsmessungen, standen ca. 140 Grundwassermessstellen zur Verfügung. Ein Teil dieser Messstellen wurde für Reihmessungen (Wasserspiegelganglinien) ausgewählt, bzw. gehört dem amtlichen Messnetz für Grundwassermonitoring an. Damit stehen Ganglinien von wenigen Monaten bis mehreren Jahrzehnten zur Verfügung. Die ersten Stichtagsmessungen im Untersuchungsgebiet liegen aus den Jahren 1962–1966 vor. In den Jahren 2008–2010 wurden mehrere großräumige Stichtagsmessungen durchgeführt, die durch weitere kleinräumigere Messungen im südlichen Bereich des Argendeltas und im nördlichen Bereich des Modellgebietes ergänzt wurden.

Wasserspiegelmessungen 2000–2010

Auf der Datengrundlage von 2008–2010 konnten für das gesamte Modellgebiet die Fließverhältnisse anhand von Grundwassergleichenplänen beschrieben

werden. Es wurde ein Referenzgleichenplan für Niedrigwasser (Winter) und für Hochwasserstand des Bodensees (Sommer) erstellt. Die Werte für die Argen wurden auf der Grundlage der Messungen von 1965 und zwischen 2007–2010 für den gesamten Zeitraum 2000–2010 extrapoliert.

Grundwassergleichenplan bei Niedrigwasser (auf der Basis des Stichtages Februar 2008 und zusätzlichen Messungen im Jahr 2009)

Der Grundwassergleichenplan für Niedrigwasserverhältnisse in Abb. 5 verdeutlicht die Fließrichtung parallel der Argen von Nord nach Süd. In der Argen erkennt man Abschnitte mit effluenten und influenten Verhältnissen. Im Gleichenplan wird ein bedeutender Randzufluss über die Argentalrinne aus Osten (Bereich Gießen) deutlich. Im Nordosten (Tettnanger Wald) werden weitere geringere Randzuflüsse angenommen, wohingegen aus Norden, Nordwesten und Westen keine Randzuflüsse über den Aquiferrand erkennbar sind. Im Osten werden nördlich von Kressbronn im Bereich des ehemaligen Kiesabbaus Randzuflüsse angenommen, erkennbar an den höheren Wasserspiegelnhöhen der Messstellen außerhalb des betrachteten Aquifers. Im nördlichen Bereich des Argendeltas (Tettnanger Wald) konnten die Fließverhältnisse mit der Annahme der hydraulisch wirksamen Barrieren, belegt durch Wasserspiegelmessungen, hydrochemische (Lf-Messungen) und geoelektrische Messungen, plausibler interpretiert werden. Bei Oberdorf fließen die verschiedenen Grundwasserkomponenten aus dem Argental und aus dem Tettnanger Wald zusammen und streben dem Bodensee zu.

Das Fließsystem im südlichen Teil des Argendeltas wird durch die Argen und den Bodensee geprägt. Das hydraulische Gefälle im Grundwasser nimmt nach Süden (südlich Langenargen/Gohren) deutlich ab. Im nördlichen und mittleren Bereich bis zum Horizontalfilterbrunnen liegt das Gefälle bei ca. 4,5 ‰. Südlich der Verbindungsstraße Langenargen-Kressbronn reduziert sich das Gefälle auf 2,1–2,3 ‰ (Seeniedrigwasser).

Grundwasserverhältnisse Juni 2008 (Hochwasser See)

Die Grundwasserfließverhältnisse für Hochwasser (Bodensee) sind im nördlichen und mittleren Modellgebiet vergleichbar mit denen bei niedrigem See Wasserstand.

Deutliche Unterschiede sind nur im südlichen Bereich erkennbar, da der Bodensee zu diesem Zeitpunkt einen um ca. 1,5 m höheren Wasserstand aufweist. Da der See, wie bereits beschrieben, die Vorflut auch für den Grundwasserleiter darstellt, erhöht sich der Wasserstand auch im Aquifer als Folge eines hydraulischen Rückstaus. Das hydraulische Gefälle nimmt nach Süden (südlich Langenargen /Gohren) noch deutlicher ab als im Winterhalbjahr und reduziert sich auf 1,3–1,4 ‰. Im nördlichen und mittleren Bereich bis zum Horizontalfilterbrunnen liegt das Gefälle wie bei Niedrigwasser bei ca. 4,5 ‰.

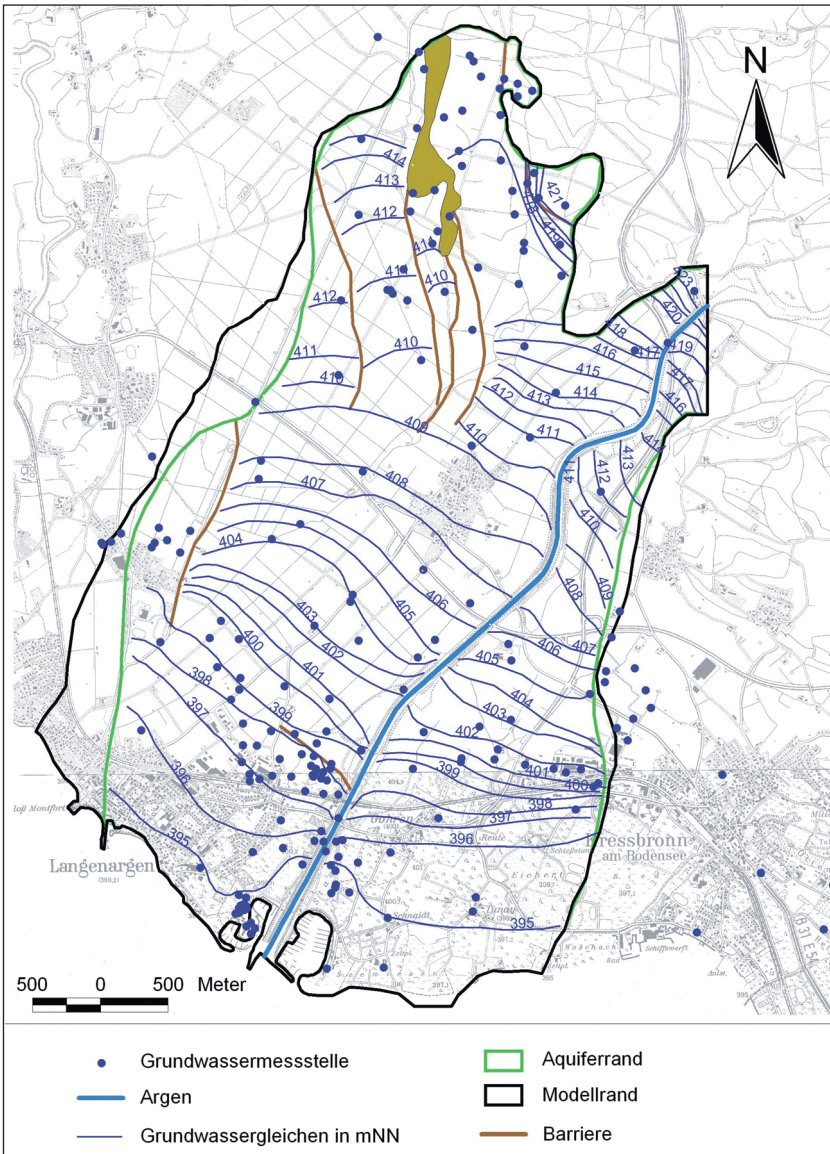


Abb. 5: Grundwassergleichenplan für Februar 2008 bei einem Bodensee-Niedrigwasserstand

Fazit aus der Interpretation der Grundwassergleichenpläne im Hinblick auf die Grundwasserfließverhältnisse

Die Fließverhältnisse im Grundwasserleiter des Argendeltas werden durch die Argen und den Bodensee bestimmt. Für den nördlichen und mittleren Bereich

bleiben die Fließrichtungen und Fließgeschwindigkeiten (Nachweis durch hydraulisches Gefälle) über das Jahr hinweg nahezu konstant. Die Neubildung durch Randzuflüsse findet hauptsächlich über das Argental im Osten statt. Geringere Zuflüsse erfolgen im nordöstlichen Teil (Obere Tettlinger Terrasse). Zuflüsse über den nördlichen und westlichen Aquiferrand konnten nicht nachgewiesen werden, so dass sie vernachlässigt werden. Zuflüsse über den östlichen Aquiferrand aus Bereichen mit höherem Grundwasserstand sind erkennbar.

Die Hauptfließrichtung von Nord nach Süd erfolgt parallel zur Argen. Der Bodensee ist der Hauptvorfluter. Das Grundwasser entwässert entweder direkt über die Uferlinie in den See oder über die Argen.

Da die Seespiegellhöhe in Kombination mit der Argen einen unmittelbaren starken Einfluss auf die Grundwasserspiegellhöhen hat, sind im südlichen Bereich die Fließverhältnisse im Grundwasserleiter bei Seehochwasserstand (Sommer) und Seeniedrigwasserstand (Winter) unterschiedlich.

Dies wird anhand des hydraulischen Gefälles und anhand der Fließrichtungen des Grundwassers verdeutlicht. Im Winter ist das Gefälle mit ca. 2,2 ‰ deutlich stärker als im Sommer mit 1,3 ‰ ausgebildet. Die Auswertungen der Wasserspiegelmessungen zeigen auch, dass im Sommer bei Seespiegellhochstand das Grundwasser vermehrt über die Hafenbecken und die Argen abströmt, da das Gefälle westlich und östlich der Argen in Folge des Grundwasserrückstaus für einen Gesamtabfluss zum See in südliche Richtung zu gering ist. Dies muss bei einer neuen Erschließung des Grundwasservorkommens für die Trinkwasserversorgung am geplanten Standort (Versuchsbrunnen – GWM 2087/624) berücksichtigt werden. Wie sich schließlich die Änderungen der Seespiegellhöhen auf die Grundwasserfließverhältnisse im Bereich der geplanten Neuerschließung auswirken, wurde durch die Prognoseberechnungen mit und ohne Entnahme ermittelt bzw. überprüft.

Wasserspiegelganglinien Zeitraum 2000–2010

Für den Zeitraum 2000–2009 standen neben der Pegelganglinie des Bodensees Grundwasserspiegellhöhen von ca. 25 Messstellen zur Verfügung. Die Ganglinien (Abb. 6 und Abb. 7) zeigen die jahreszeitlichen Schwankungen, die von Niederschlags- bzw. Neubildungsmengen bestimmt werden. Die südlichen Grundwassermessstellen zeigen auch Einflüsse des Bodenseewasserspiegels und der Abflussmenge der Argen (gemessen am Pegel Gießen). Es fällt auf, dass der Wasserspiegel seit 2003 eine abnehmende Tendenz hat und die höheren Werte von 2000–2003 im Mittel derzeit nicht mehr erreicht wurden.

Vergleich der Höhen von Seewasser- und Grundwasserspiegel im südlichen Bereich mit dem Abfluss in der Argen

Für die Beschreibung der Abhängigkeit des Grundwasserspiegels vom Seewasserstand und Argenabfluss wurden die Spiegelhöhenmessungen in den GWM 05/08 (2084/624) und im provisorischen Pegel am Argendamm (2066/624) ausgewählt. Die Grundwasserspiegellhöhen in diesen beiden Messstellen sind

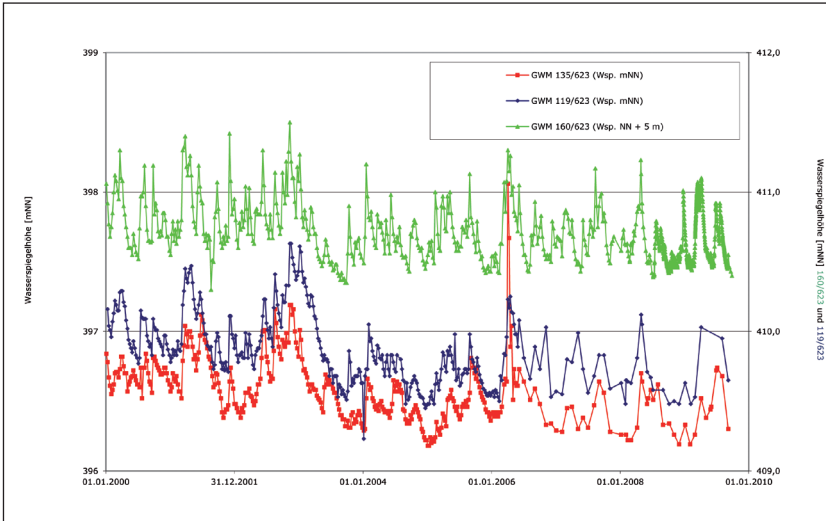


Abb. 6: Grundwasserspiegelganglinien in Messstellen unterschiedlicher Aquiferbereiche im Zeitraum 2000–2009

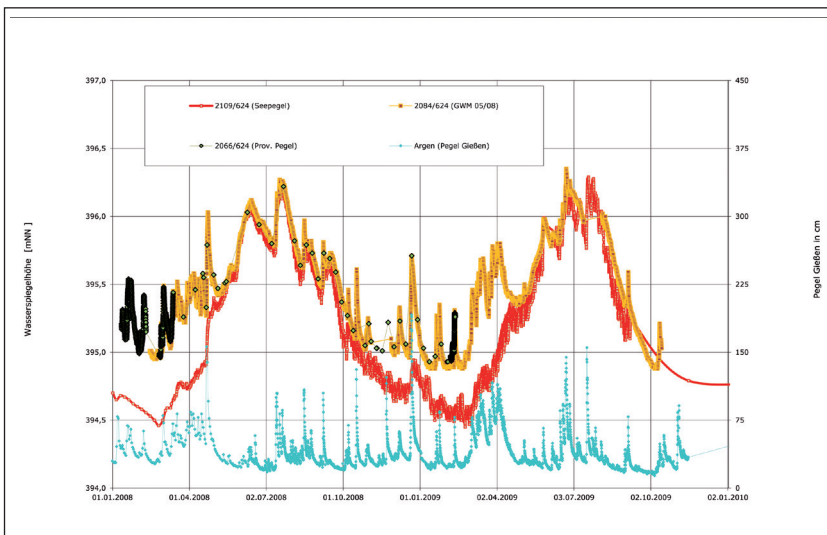


Abb. 7: Vergleich der Ganglinie des Bodenseepiegels mit der Abflusshöhe der Argen (Pegel Gießen) und mit Grundwasserspiegelhöhen im südlichen Aquiferbereich während des Zeitraums 2008–2009

identisch. Man erkennt, dass bei Seeniedrigwasserstand die Grundwasserspiegelhöhen stark von der Argen (Hochwasserereignisse) beeinflusst werden. Bei Seehochwasserstand wird das Verhalten im Grundwasserleiter bis zur Fischtreppe vom See bestimmt. Die Höhe der Argen bezogen auf NN nördlich der Fischtreppe liegt um ca. 2,5 m höher als südlich der Fischtreppe und der See staut bis unterhalb der Fischtreppe im Argenbett zurück. Eine Einspeisung der Argen im Bereich der GWM 05/08 und 2066 in den Grundwasserleiter ist aufgrund des Potenzialunterschiedes nur im Winterhalbjahr möglich. Auch die restlichen Messstellen im Bereich des Landesbrunnens (103/624) zeigen ein ähnliches Verhalten wie die GWM 05/08 (2084/624). Ein Gefälle zum Zeitpunkt des Sommerhochwassers ist im südöstlichen Aquiferbereich praktisch nicht messbar.

Grundwasserneubildung

Die monatlichen Neubildungsraten für den Zeitraum 2000–2009 wurden von der LUBW zur Verfügung gestellt. Sie wurden nach der Methode von ARMBRUSTER (2002) flächendifferenziert berechnet.

Die mittlere Neubildungsrate NB der letzten 10 Jahre wurde aus den Monatswerten der Sickerwassermengen mit

$$NB = 9,75 \text{ l/s pro km}^2 \quad \text{ermittelt.}$$

3 ISOTOPENHYDROLOGISCHE UND HYDROCHEMISCHE UNTERSUCHUNGEN

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bilden die Grundlage für die Erstellung eines prognosefähigen numerischen Grundwasserströmungsmodells und Stofftransportmodells als Entscheidungshilfe für eine neue künftige Erschließung und Bewirtschaftung sowie für den wirksamen Schutz dieses bedeutenden Grundwasservorkommens im gesamten Argendelta.

Ziel der isotopehydrologischen und hydrochemischen Untersuchungen ist es, im mutmaßlichen Erschließungsgebiet wissenschaftlich fundierte Kenntnisse über die komplexen Wechselwirkungen zwischen dem Grundwasservorkommen mit den Oberflächengewässern Argen und Bodensee zu gewinnen. Die Lage des Untersuchungsgebietes und der Probenentnahmestellen für isotopehydrologische und hydrochemische Untersuchungen ist der Abbildung 8 zu entnehmen.

3.1 Grundlagen der isotopehydrologischen Untersuchungsmethode

Im Wasserkreislauf kommen die Wassermoleküle $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$, $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$ und $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ in unterschiedlichen Konzentrationen vor. Die physikalische Ursache dafür ist das unterschiedliche Molekulargewicht und damit der unterschiedliche Dampfdruck der einzelnen Molekülarten. Bei Phasenumwandlungen, z. B. bei Kondensations- und Verdunstungsvorgängen, findet eine temperaturabhängige Isotopenfraktionierung statt, wodurch sich für Untersuchungen des Wasserkreislaufs die Möglichkeit ergibt, Deuterium (^2H) und Sauerstoff-18 (^{18}O) als natürliche Tracer zu verwenden (MOSER 1972, 1979, MOSER & RAUERT 1980, FRITZ et al. 1980).

Die Konzentrationen von ^2H und ^{18}O werden international üblicherweise als re-

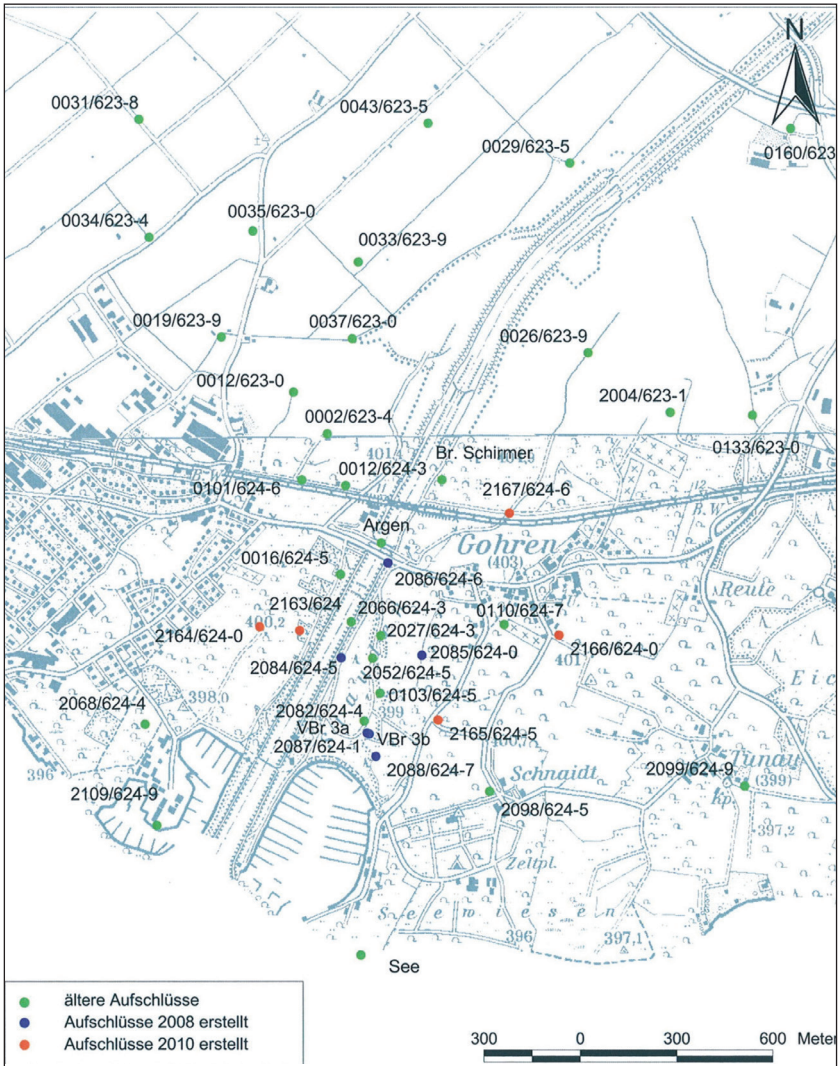


Abb. 8: Lage und Bezeichnung der Probenentnahmestellen für die isotopenhydrologischen und hydrochemischen Untersuchungen 2010

lative Abweichung gegen einen definierten Standard (VSMOW: Vienna Standard Mean Ocean Water) angegeben:

$$\delta^2\text{H} \text{ bzw. } \delta^{18}\text{O} = \left(\frac{R_{\text{Probe}}}{R_{\text{Standard}}} - 1 \right) 1000 \text{ [‰]}$$

mit:

R_{Probe} : $\delta^2\text{H}$ - bzw. $\delta^{18}\text{O}$ -Konzentration in der Probe

R_{Standard} : $\delta^2\text{H}$ - bzw. $\delta^{18}\text{O}$ -Konzentration im Standard

Die Messgenauigkeiten der Isotopenmessungen betragen für $\delta^2\text{H} \pm 1,0 \text{ ‰}$ und für $\delta^{18}\text{O} \pm 0,15 \text{ ‰}$.

Durch Unterschiede im Isotopengehalt in den Niederschlägen wird auch das Grundwasser örtlich und zeitlich signifikant markiert (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), 1992). Dadurch können Fließwege verfolgt und Fließzeiten bestimmt werden.

Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der monatlichen Niederschlagsproben zeigen den üblichen Jahresgang mit höheren Isotopengehalten in den Sommermonaten und niedrigeren Werten in den Wintermonaten, bei einer durchschnittlichen Schwankungsbreite von etwa $\Delta \delta^{18}\text{O} = 8 \text{ ‰}$ (CRAIG 1961).

Der Vergleich der absoluten Isotopengehalte der Messwerte der aktuellen Untersuchung (2007–2010) mit denen von 1987–1988 zeigt für 1988 einen $\delta^{18}\text{O}$ Wert, der etwa 0,55 ‰ niedriger ist. Diese leichteren Werte können u. a. auch auf reduzierte Winterniederschläge zurückgeführt werden

Zwischen Deuterium- und Sauerstoff-18-Gehalten im Niederschlag besteht eine lineare Beziehung, die sich durch die so genannte Niederschlagsgerade (MWL: Meteoric Water Line) darstellen lässt. Diese Beziehung findet sich auch im Allgemeinen in Grundwässern wieder (Abb. 9). Treten bei Oberflächengewässern Verdunstungseffekte auf, so reichern sich die schweren Isotope sukzessiv an, was im Untersuchungsgebiet bei den Proben aus dem Baggersee Marschall zu sehen ist. ($\delta^{18}\text{O}$ Gehalt = $-9,00 \text{ ‰}$, $\delta^2\text{H}$ Gehalt = $-65,7 \text{ ‰}$). In der nachfolgenden Interpretation wird nur auf die Sauerstoff-18-Messergebnisse zurückgegriffen.

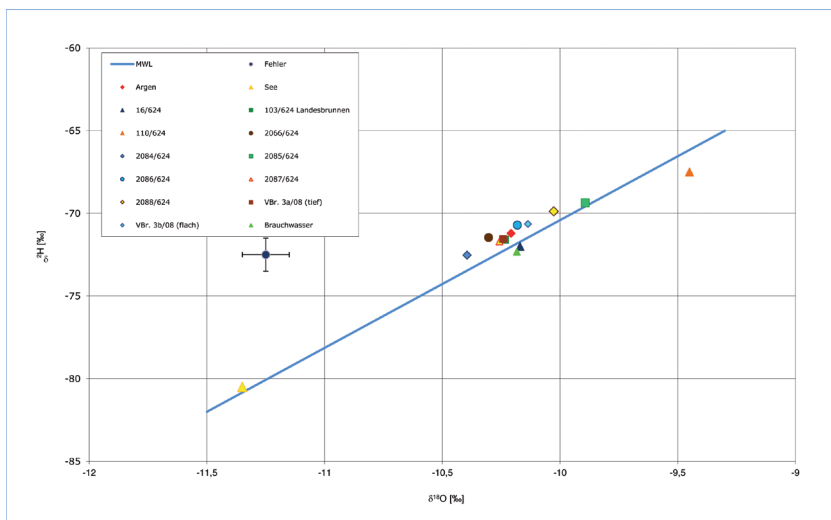


Abb. 9: $^2\text{H}/^{18}\text{O}$ -Diagramm der Isotopenmittelwerte der zwischen 2007–2009 beprobten Entnahmestellen

3.2 Untersuchungsumfang

Zur qualitativen und quantitativen Beschreibung verschiedener Grundwasserkomponenten im östlichen Teil des Argendeltas und zur näheren Erkundung der räumlichen und zeitlichen Wechselwirkung zwischen den Oberflächengewässern – Argen und Bodensee – mit dem lokal aus Niederschlägen neu gebildeten Grundwasser musste ein sehr umfangreiches Beprobungs- und Messprogramm durchgeführt werden.

Für den direkten Nachweis von kurzfristigem Uferfiltrat der Argen im Grundwasser wurden neben der elektrischen Leitfähigkeit solche hydrochemische Parameter ausgesucht, deren Gehalte in der Argen sich von denen des Grundwassers deutlich unterscheiden bzw. das Argenwasser bei Hochwasserereignissen deutlich markieren. Die Parameter Chlorid-, Magnesium-, Calcium-, Nitrat-Härte wurden regelmäßig von April 2008 bis April 2009 bestimmt. Es wurden die Messstellen beprobt, die hydraulisch auf die Argen im Winterhalbjahr bei Seeniedrigstand reagieren.

Oberhalb der Fischtreppe ist im Nahbereich der Argen hydraulisch über das ganze Jahr hinweg ihr Einfluss auf den Grundwasserleiter (repräsentiert hier durch die GWM 2086/624 und GWM 16/624) zu erkennen. Auf Grund von Wasserspiegelbeobachtungen war zu erwarten, dass die kurzfristigen Uferfiltratanteile unterhalb der Fischtreppe bzw. südlich der GWM 2086/624, falls vorhanden, saisonal variieren.

An den entnommenen Wasserproben wurden auch die Gehalte der stabilen Isotope Deuterium (^2H) und Sauerstoff-18 (^{18}O) bestimmt. (MATTHESS 1990).

Die hydrochemischen Reihenuntersuchungen begannen im April 2008 in den Messstellen (Lage siehe Abb. 8):

- GWM 2087/624 – Standort einer möglichen neuen Fassungsanlage östlich der Argen (unterhalb Fischtreppe)
- GWM 2084/624 – in der Nähe des östlichen Argenufers (unterhalb der Fischtreppe)
- GWM 16/624 nahe des westlichen Argenufers (oberhalb der Fischtreppe)
- GWM 2066/624 – am östlichen Damm der Argen (unterhalb der Fischtreppe)
- GWM 2086/624 – am östlichen Damm der Argen (oberhalb der Fischtreppe)

3.3 Ergebnisse der isotopehydrologischen Untersuchungen und der Leitfähigkeitsmessungen

Die Ergebnisse der Isotopengehaltsbestimmungen sowie der physikalisch-chemischen und hydrochemischen Untersuchungen an den Wasserproben sämtlicher Beprobungsstellen wurden für den jeweiligen Untersuchungszeitraum als Ganglinien dargestellt.

$\delta^{18}\text{O}$ -Gehalte

Wie der Abb. 10 entnommen werden kann, liegen die von 2007 bis 2009 gemittelten minimalen bzw. maximalen $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Einzelmessungen für die Proben aus der Argen bei $\delta^{18}\text{O} = -11,21 \text{ ‰}$ bzw. bei $\delta^{18}\text{O} = -9,40 \text{ ‰}$. Die Schwan-

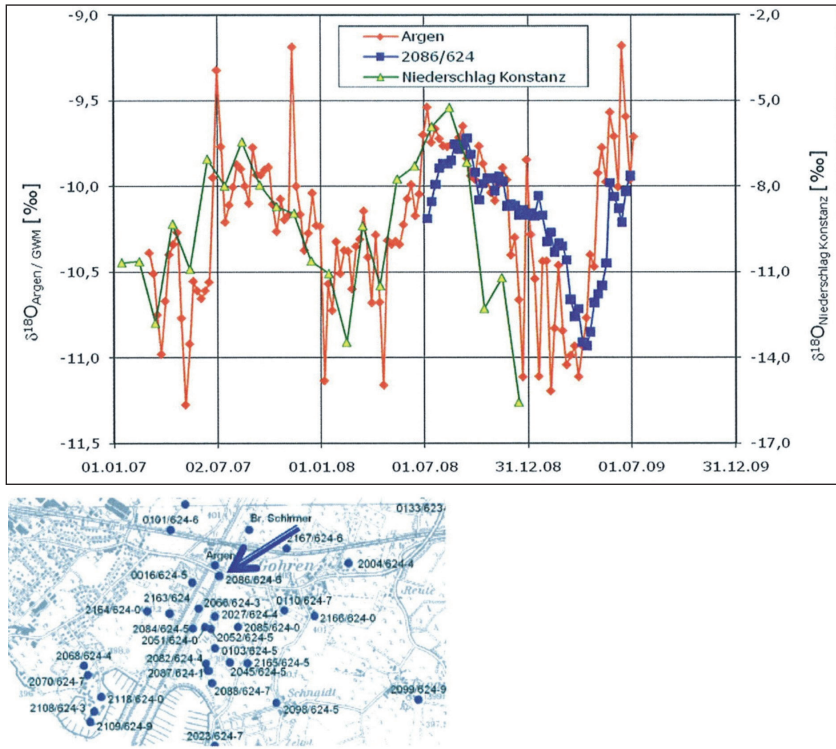


Abb. 10: $\delta^{18}\text{O}$ -Ganglinien gemessen in der Argen (Wochenproben) und in der GWM 2086/624 im Vergleich mit der $\delta^{18}\text{O}$ -Ganglinie der ...

kungsbreite von $\Delta\delta^{18}\text{O} = 1,8 \text{ ‰}$ für die Proben aus der Argen ist – wie zu erwarten – wesentlich kleiner als für die Niederschläge. Für die Jahre 2007 und 2008 sind, zum Vergleich, die $\delta^{18}\text{O}$ -Gehalte der Monatsproben der Niederschlagsstation Konstanz mit einer sekundären $\delta^{18}\text{O}$ -Achse eingetragen. Aus den $\delta^{18}\text{O}$ -Werten, die im Zeitraum 2007–2009 im Argengewasser gemessen wurden, ergibt sich ein Mittelwert von $\delta^{18}\text{O} = -10,21 \text{ ‰}$.

Die Verteilung der $\delta^{18}\text{O}$ -Mittelwerte zeigt, dass die untersuchten Grundwässer – so wie auch die Wässer im westlichen Teil des Argendeltas – in mehrere Gruppen eingeteilt werden können.

- Zu der einen Gruppe gehören die Grundwässer, welche aus den lokalen Niederschlägen gebildet werden – ihre $\delta^{18}\text{O}$ -Mittelwerte liegen zwischen $\delta^{18}\text{O} = -9,44 \text{ ‰}$ und $\delta^{18}\text{O} = -9,75 \text{ ‰}$.
- Einer zweiten Gruppe gehören Grundwässer an, welche unterschiedlich hohe Anteile oder nur Uferfiltrat der Argen enthalten. Ihre $\delta^{18}\text{O}$ -Werte liegen zwischen $\delta^{18}\text{O} = -10,10 \text{ ‰}$ und $\delta^{18}\text{O} = -10,61 \text{ ‰}$.

Der $\delta^{18}\text{O}$ -Mittelwert der Argen für den Zeitraum Februar 2010 – Juni 2010 beträgt $\delta^{18}\text{O} = -10,91\text{‰}$. Dieser niedrigere Wert ist darauf zurückzuführen, dass es sich nur um Isotopengehalte des Winter- und Frühjahrabflusses 2010 handelt.

Aufgrund der jahreszeitlichen Schwankungen wurden die Zeiträume 2007–2009 und 2010 getrennt ausgewertet.

Elektrische Leitfähigkeitsmessungen

Die elektrische Leitfähigkeit der Argen schwankt relativ stark, was auf unterschiedliche Zuflüsse schließen lässt. Der höchste Wert mit ca. $645\ \mu\text{S}/\text{cm}$ und der niedrigste Wert mit $325\ \mu\text{S}/\text{cm}$ wurden jeweils bei einem Hochwasserereignis in der Argen (im Januar und November 2008) gemessen. Im Untersuchungszeitraum 2008–2009 betrug der Mittelwert der elektrischen Leitfähigkeit in der Argen $471\ \mu\text{S}/\text{cm}$. Für die Temperatur ergibt sich ein Mittelwert von $8,97\text{°C}$.

Die Werte der elektrischen Leitfähigkeit (Lf-Mittelwerte) in den Grundwassermessstellen zeigen, dass die untersuchten Grundwässer hiernach in drei Gruppen eingeteilt werden können. Zu der ersten Gruppe gehören die Grundwässer, welche aus den lokalen Niederschlägen gebildet werden und von landwirtschaftlicher Nutzung praktisch nicht bzw. nur sehr gering beeinflusst sind. Ihre Lf-Mittelwerte liegen zwischen 460 und $500\ \mu\text{S}/\text{cm}$. Zu der zweiten Gruppe gehören die Grundwässer, welche aus den lokalen Niederschlägen gebildet werden und deutlich von landwirtschaftlicher Nutzung beeinflusst sind. Ihre Lf-Mittelwerte liegen zwischen 725 und $850\ \mu\text{S}/\text{cm}$. Der dritten Gruppe gehören Grundwässer an, welche unterschiedlich hohe Anteile oder nur Uferfiltrat der Argen enthalten. Ihre Lf-Werte liegen zwischen 500 und $700\ \mu\text{S}/\text{cm}$. Zwischen diesen drei Gruppen besteht räumlich keine scharfe Abgrenzung, sondern es gibt Mischungsbereiche, in denen die Grundwasserentnahmestellen, je nach geohydraulischen Randbedingungen, unterschiedliche hohe Anteile aus diesen drei Grundwasserkomponenten aufweisen.

Bestimmung Anteil Uferfiltrat der Argen im Grundwasser

Auf Grund der Tatsache, dass einerseits die Leitfähigkeitsmessungen von anthropogenen Tätigkeiten (Landwirtschaft, Winterdienst auf Straßen usw.) beeinflusst werden und andererseits der Sauerstoff-18 (^{18}O) sich wie ein idealer Tracer verhält und mit einer hohen Messgenauigkeit nachgewiesen werden kann, wurde die Abschätzung der Uferfiltratanteile aus der Argen mittels der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte vorgenommen. Hierzu wird angenommen, dass das Grundwasser verschiedener Entnahmestellen ausschließlich aus den beiden erwähnten Gruppen – Uferfiltrat aus der Argen und lokal gebildetes Grundwasser – besteht. Es wurden auch Erkenntnisse aus der geohydraulischen und der hydrochemischen (Lf-Messungen) für die Anteilsberechnung verwendet.

Für die nur aus den lokalen Niederschlägen neu gebildeten Grundwässer wurde der Mittelwert von $\delta^{18}\text{O} = -9,65\text{‰}$ für die von der Argen entfernt gelegenen Probenentnahmestellen festgesetzt.

Der für die prozentualen Anteilsabschätzungen eingesetzte $\delta^{18}\text{O}$ -Mittelwert

der Argen für den gesamten Untersuchungszeitraum 2007–2009 beträgt $\delta^{18}\text{O} = -10,21\%$. Die Berechnung des prozentualen Anteils von Argen-Uferfiltrat erfolgt nach der Mischungsformel:

$$\text{Anteil} = \{ (\delta_{\text{GWM}} - \delta_{\text{LN}}) / (\delta_{\text{Argen}} - \delta_{\text{LN}}) \} 100\%$$

mit:

Anteil: prozentualer Anteil von Uferfiltrat

δ_{GWM} : $\delta^{18}\text{O}$ -Mittelwert des Grundwassers aus den einzelnen Probenentnahmestellen

δ_{LN} : der $\delta^{18}\text{O}$ -Mittelwert des aus den lokalen Niederschlägen gebildeten Grundwassers

δ_{Argen} : der $\delta^{18}\text{O}$ -Mittelwert des Oberflächengewässers Argen

Für die Bestimmung der kurzfristigen Anteile des Argenuferfiltrates im Grundwasser werden die Ganglinien der Messstellen 2066/624, 2085/624, 2086/624 und 2088/624 zugrunde gelegt.

Aus dem Vergleich der $\delta^{18}\text{O}$ -, Lf- und Temperatur-Ganglinien der Argen mit den Ganglinien der Entnahmestelle 2086/624 und 2066/624 (Abb. 11 und 12) ist zu ersehen, dass in diesen Entnahmestellen während des gesamten Untersuchungszeitraumes Uferfiltrat aus der Argen vorliegt. Es ist möglich, an Hand der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte eine Abschätzung der mittleren Fließzeit des Uferfiltrats zur Messstelle mittels einer Modellierung vorzunehmen.

Mit den „Lumped-Parameter“-Modellen (MALOSZEWSKI 1982) werden die Fließzeiten und die Dispersionsparameter für die Messstellen im Nahbereich der Argen bestimmt. Aus den Ergebnissen des konzeptionellen Modells und der „Lumped-Parameter“-Modelle werden die Input-Parameter für das numerische Advektion-Dispersionsmodell (BEAR 1979) abgeleitet.

Seewasser

Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Seewassers liegen während des Beobachtungszeitraums zwischen $\delta^{18}\text{O} = -10,99\%$ und $\delta^{18}\text{O} = -11,68\%$ und repräsentieren weitgehend die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des alpinen Rheinwassers. Solche Werte wurden in keiner dem See nahen Probeentnahmestelle beobachtet, was bedeutet, dass keine Seewasserinfiltration unter den während des Untersuchungszeitraums vorgelegenen hydraulischen Bedingungen stattgefunden hat, auch wenn das gesamte Untersuchungsgebiet südlich der letzten Fischtreppe zeitweise hydraulisch vom Seewasserspiegel geprägt ist.

Wie eine Wechselwirkung zwischen dem Grundwasservorkommen im Bereich der zukünftigen Förderanlage und dem Bodensee unter den durch den Betrieb der Förderanlage veränderten hydraulischen Verhältnissen im Detail aussehen wird, konnte nur anhand der Prognoseberechnungen mit dem Grundwasserströmungs- und Stofftransportmodell ermittelt werden.

3.4 Ergebnisse hydrochemischer Untersuchungen von 2008–2009

Anhand der Nitratgehalte wird der hydrochemische Einfluss der Argen auf das Grundwasser verdeutlicht. Die restlichen Inhaltsstoffe zeigen im Vergleich

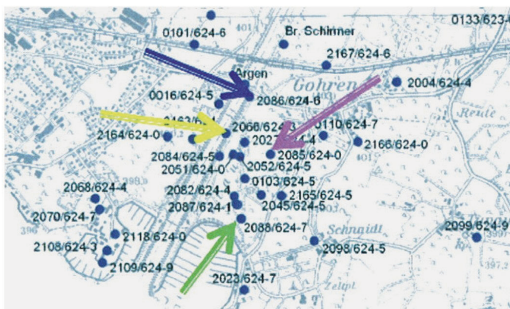
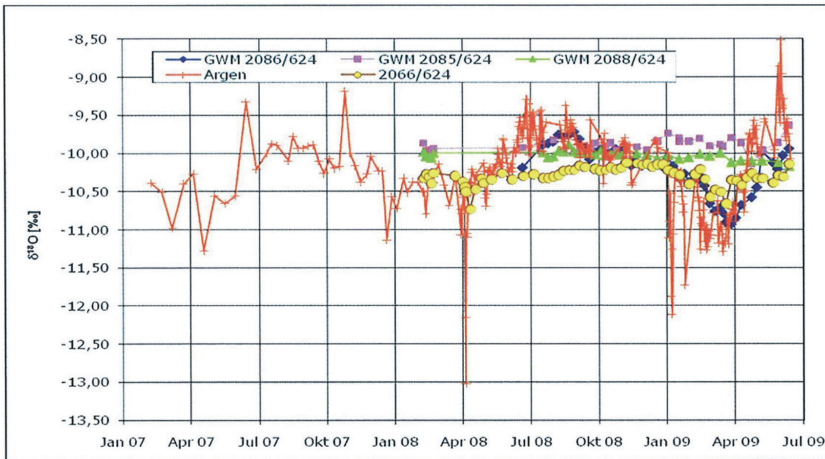


Abb. 11: $\delta^{18}\text{O}$ -Ganglinien der Argen und der Messstellen 2086/624, 2085/624, 2088/624 und 2066/624

Grundwasser/Argen nicht so eindeutig den Einfluss der Argen auf das Grundwasser, bestätigen aber die Ergebnisse der Chlorid- und Nitratuntersuchungen.

Vergleich der Nitrat-Gehalte von Argen- und Grundwasser

Beim Vergleich der Ganglinien des Nitratgehaltes (Abb.13) wird deutlich, dass der Nitratgehalt der Argen gegenüber dem des Grundwassers sehr gering ist (1–2 mg/l). Die Nitratgehalte im Grundwasser werden bestimmt durch Uferfiltrat der Argen (Gehalt wird reduziert) und durch anthropogene Einträge (Gehalt steigt an).

Die GWM 2087/624 zeigt deutlich einen anthropogenen Einfluss. Bei Seehochwasserstand nimmt der Gehalt an Nitrat mit einer gewissen Verzögerung zu, was auf einen vermehrten Zustrom von Osten schließen lässt. Bei Seeniedrigwasserstand (ab November) nimmt der Gehalt an Nitrat deutlich ab, da die langfristige Komponente von Argenuferfiltrat anteilsmäßig ansteigt.

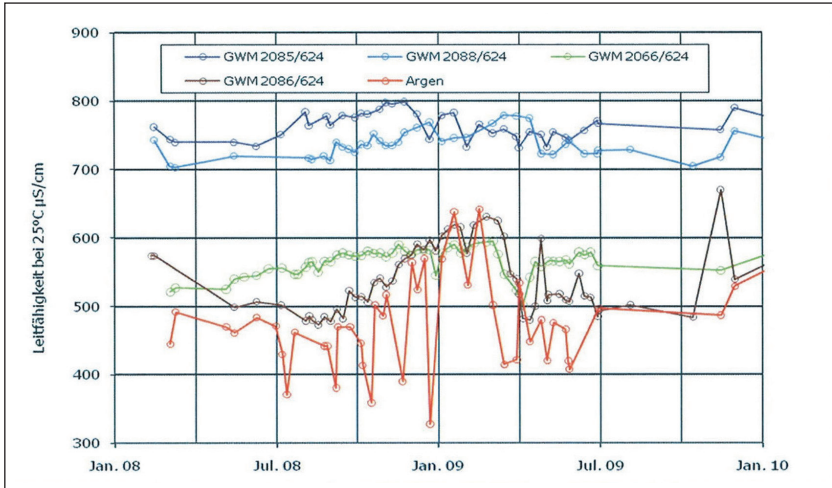


Abb. 12: Vergleich der Lf-Ganglinie der Argon mit den Lf-Ganglinien der Messstellen GWM 2085/624, 2088/624, 2066/624 und 2086/624

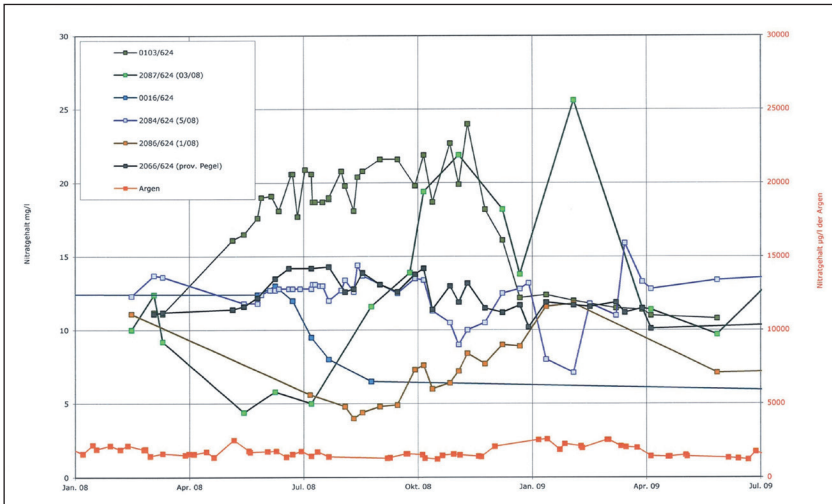


Abb. 13: Vergleich der Nitrat-Ganglinie der Argon mit den Ganglinien der GWM 2066/624, 2084/624 und 2086/624, 103/624, 2087/624 und 16/624 im Zeitraum 2008–2009

Der Verlauf der Nitrat-Ganglinie von der GWM 2086/624 deutet auf einen kurzfristigen Einfluss der Argon hin. Nach den Verhältnissen im Frühjahr mit andauerndem überdurchschnittlich hohem Abfluss in der Argon, reduziert sich

der Nitratgehalt im Grundwasser durch den Einfluss von Argen-Uferfiltrat mit geringem Nitrat-Gehalt deutlich und nimmt dann im Sommer, aufgrund landwirtschaftlicher Einflüsse deutlich zu.

3.5 Räumliche und zeitliche Variation der Beeinflussung des Grundwasserfließgeschehens durch das Uferfiltrat aus der Argen

Die Verteilung der $\delta^{18}\text{O}$ - und Lf-Mittelwerte von Grundwässern und Oberflächengewässern – Argen und Bodensee – bestätigt ebenfalls die an Hand komplexer Untersuchungen erarbeitete Modellvorstellung der Grundwasserströmungsverhältnisse im Untersuchungsgebiet. Die Bedeutung des Einflusses der Argen und des Bodensees für das gesamte Grundwasserfließgeschehens wird verdeutlicht. Aus der räumlichen Verteilung der $\delta^{18}\text{O}$ - und Lf-Messwerte von verschiedenen Stichtagsbeprobungen während des Untersuchungszeitraumes erkennt man, dass das Ausmaß dieses Einflusses sowohl von den lokalen geologisch-hydrogeologischen Verhältnissen als auch von den zu den entsprechenden Zeiträumen herrschenden regionalen geohydraulischen Verhältnissen abhängig ist.

Die räumliche Verteilung der Messwerte deutet darauf hin, dass sich zu dieser Grundwasserkomponente sowohl von Osten wie auch von Westen aus lokalen Niederschlägen gebildetes Grundwasser beimischt. Mit zunehmendem Abstand von der Argen ist ein steter Übergang zu reinem Grundwasser zu beobachten, welches nur aus lokalen Niederschlägen gebildet wurde, allerdings durch andere Faktoren (Landwirtschaft) beeinflusst wird. Im Nahbereich des Bodensees zeigen die $\delta^{18}\text{O}$ - und Lf-Messwerte keinerlei Beimischung von Seewasser in das Grundwasser.

3.6 Schlussfolgerungen aus isotopehydrologischen und hydrochemischen Untersuchungen

Die $\delta^{18}\text{O}$ -Mittelwerte und die aus diesen abgeschätzten Uferfiltratanteile sowie die räumliche Verteilung dieser Anteile gestatten es, auch das östlich der Argen gelegene Untersuchungsgebiet aus Sicht der Grundwasserneubildung in zwei Bereiche zu unterteilen.

Im größten Teil des Untersuchungsgebietes wird das Grundwasser fast ausschließlich aus den lokalen Niederschlägen neu gebildet. Ein die Argen räumlich eng begleitender Grundwasserfließbereich führt reines Argen-Uferfiltrat, welches nur im näheren Zustrombereich der Entnahmestelle 2086/624 kurzfristig (ca. 4–6 Wochen) von der Argen dieser Messstelle direkt zufließt.

Ein die Argen begleitendes, überwiegend aus Uferfiltrat bestehendes und langfristig abfließendes Grundwasser wurde in der Messstelle 26/623 angetroffen (mittlerer Bereich des Aquifers).

Ein räumlich eng begrenzter, die Argen begleitender Mischungsbereich dieser beiden Grundwasserkomponenten ist ebenfalls erkennbar. Die Größe dieser Teilbereiche wird, wie bereits oben gezeigt, von den lokalen wie auch von den regionalen geologischen, hydrogeologischen und geohydraulischen Verhältnissen gesteuert.

Der Bodensee ist die Vorflut für das Grundwasservorkommen im östlichen sowie westlichen Teil des Argendeltas. Der Wasserstand im Bodensee steuert die Abflussbereiche aus dem Grundwasserleiter in den See. Bei Niedrigwasserstand im Bodensee findet der Grundwasserabfluss über die gesamte Uferstrecke statt. Unter diesen Verhältnissen nimmt am untersuchten Standort für eine neue Grundwassererschließung der Anteil der aus östlicher Richtung zufließenden, aus lokalen Niederschlägen neu gebildeten Grundwasserkomponente ab.

Bei hohem Seewasserstand und damit hervorgerufenem starkem Grundwasserrückstau verlagert sich die Hauptvorflut auf den Mündungsbereich der Argen mit den beiden Hafenbecken. Damit erhöht sich zu dieser Zeit der Grundwasserzustrom von Osten in den zukünftigen Fassungsbereich. Durch den Rückstau bei Seewasserhochstand erfolgt in der Grundwassermessstelle direkt an der Argen (2066/624) auch keine Beeinflussung durch Argenwasser. Selbst bei diesem Hochstand des Seewasserspiegels wurde in keiner seenahen Grundwassermessstelle Seeuferfiltrat festgestellt.

An den untersuchten Standorten für eine neue Grundwassererschließung konnte unter den vorherrschenden natürlichen Fließverhältnissen keine kurzfristige, direkt aus der Argen zufließende Uferfiltrationskomponente nachgewiesen werden. Aus isotopenhydrologischer und hydrochemischer Sicht – Komponentenzusammensetzung und Wassertyp – sind die Grundwässer an den beiden möglichen Standorten Landesbrunnen 103/624 und der Messstelle 2087/624 praktisch gleich zu setzen.

Für die Festlegung eines endgültigen Brunnenstandortes sind somit andere Kriterien heranzuziehen:

- Berücksichtigung der lokalen hydrogeologischen Verhältnisse,
- Möglichkeiten der Ausweisung einer Engeren Schutzzone (Zone II),
- Anreicherungsbedingungen des Grundwassers durch Seeuferfiltrat.

Wie sich das Fließbild und die Komponentenzusammensetzung, speziell auch bei Nutzung der Uferfiltration von Seewasser bei Betrieb eines möglichen Förderbrunnens verändert, kann nur durch die Prognoseberechnungen mit dem numerischen Grundwasserströmungs- und Transportmodell abgeschätzt werden.

4. NUMERISCHES GRUNDWASSERSTRÖMUNGSMODELL UND TRANSPORTMODELL

4.1 Allgemeine Bemerkungen

Für die Nutzung des Grundwasservorkommens als Trinkwasser sind eine kurzfristig zufließende Argen-Uferfiltratkomponente und Grundwasseranteile aus dem Bereich der intensiv landwirtschaftlich genutzten Fläche zu vermeiden. Das numerische Grundwasserströmungs- und -transportmodell wird für die Berechnung der Argen-Uferfiltratanteile im Grundwasser bei der aktuellen Bewirtschaftung des Grundwasservorkommens und für Prognoseberechnungen bei erhöhter Entnahme eingesetzt. Im Gegensatz zu früheren numerischen Berechnungen (WATZEL 1994, HYDRO-DATA 2001) erfolgen die Betrachtungen drei-

dimensional mit Prognoseberechnungen für die Änderung des Argen-Uferfiltratanteils bei Änderung der Entnahme. Diese Änderungen wurden räumlich und zeitlich abgeschätzt.

Die wechselnden geohydraulischen Schwankungen im Aquifer, bedingt durch den Wasserstand im Bodensee und den Abfluss in der Argen, machen eine instationäre Betrachtung der Strömungs- und Transportverhältnisse im Grundwasser notwendig.

4.2 Mathematische Grundlagen der numerischen Modellierung

Die durchgeführten Berechnungen erfolgten mit einem Advektions-Dispersionsmodell (BEAR 1979, DONALD et al. 1984). Die verwendeten partiellen Differentialgleichungen gehen vom Prinzip der Massenerhaltung für Fluide und Festkörper, Massenerhaltung der Inhaltsstoffe und der Impulserhaltung aus. Da hier keine thermischen Berechnungen durchgeführt werden, braucht das Prinzip der Energieerhaltung nicht berücksichtigt zu werden.

Die stabilen Isotope des Wassermoleküls ^2H und ^{18}O im Grundwasser werden als ideale Tracer angesehen. Sorption und ein Konzentrationsabbau/Zerfall werden ausgeschlossen. Bei den herrschenden Fließgeschwindigkeiten und bei der Auswahl des Tracers (^{18}O) können Diffusionsprozesse beim Stofftransport vernachlässigt werden.

Neben den hydraulischen Parametern

- hydraulischer Leitfähigkeitsbeiwert K_{ij} ,
- Aquifermächtigkeit M ,
- Speicherkoeffizient S bzw. spezif. Speicherkoeffizient S_s ,
- durchflusswirksame Porosität ϵ

sind zur Berechnung der Druckhöhe h , die das hydraulische Potenzial beschreibt, auch die Stofftransportparameter der Dispersion, die Koeffizienten der Dispersivität (longitudinal β_L , transversal β_T) für die instationäre Berechnung der Konzentration C in das Modell einzugeben. Der Parameter Retardationsfaktor R kann für die Betrachtung des Isotops Sauerstoff-18 (^{18}O) vernachlässigt werden, da im Aquifer nicht mit einer Isotopenfraktionierung gerechnet wird (LEIBUNDGUT et al. 2009, EHRMINGER 1992, 1993).

Die Basis-Gleichungen werden mit der Methode der Finite Elemente (FE) gelöst. Dazu wurde das Programm FEFLOW (WASY, DIERSCH 1996) verwendet.

Parameter für die Strömungsberechnung

Die hydraulischen Parameter können im Programm FEFLOW orts- und zeitabhängig eingegeben werden. Für die Berechnung im Argendelta wurden die Parameter hydraulische Leitfähigkeit K_{ij} , Speicherkoeffizient S und Transferrate für die Randbedingungen 3. Art (für die Anbindung der Argen) stationär eingegeben. Die Größen K_{ij} und S sind aquiferspezifische Parameter, die sich bei den vorliegenden ungespannten Verhältnissen nicht ändern. Ob und in welchem Maße sich die Transferrate mit Hochwasserereignissen ändert, kann aufgrund der Datenlage nicht abgeschätzt werden.

Stofftransportparameter

Die Dispersionskoeffizienten und die speicherwirksame Porosität wurden bei den Berechnungen als zeitlich konstant angesehen. Es gibt hier keine physikalische Begründung, dass sich diese Parameter zeitlich verändern.

4.3 Modellaufbau

Diskretisierung

Das Modellgebiet wurde aufgrund der hohen Informationsdichte in ca. 30.000 Elemente mit 20.000 Knotenpunkten pro Schicht unterteilt. Der inhomogene Aufbau des Aquifers wurde durch drei Schichten berücksichtigt. Damit ergeben sich ca. 90.000 Volumenelemente (Prismen).

Die geologischen Strukturen, die das hydraulische Geschehen im Aquifer beeinflussen (hydraulische Barrieren), und der Bereich der Argen sind feiner diskretisiert, um sie räumlich besser beschreiben zu können und um numerische Fehler zu vermeiden.

Für die Stofftransportberechnungen muss darauf geachtet werden, dass das PECL-ET-Kriterium eingehalten wird (KINZELBACH 1991, KINZELBACH et al. 1995). Für die PECL-ET-Zahl (Pe) gilt:

$$Pe = \Delta L / \beta_L <= 2$$

mit ΔL = räumliche Diskretisierung
 β_L = longitudinale Dispersivität

Die Feinheit der Diskretisierung hängt neben dem PECL-ET-Kriterium auch von den abzubildenden Geometrien, hier die Argen und die hydraulischen Barrieren im nördlichen Bereich, ab.

Die Dimensionen der horizontalen und der vertikalen Diskretisierung sind mit Gitterabständen bzw. Schichtmächtigkeiten von 5–50 Metern vergleichbar.

Zeitliche Diskretisierung

Die zeitliche Diskretisierung erfolgt in FEFLOW durch die Zeitschrittweitensteuerung automatisch, wobei das Courant-Kriterium C_0 erfüllt sein muss (KINZELBACH et al. 1995).

$$C_0 = \frac{u \cdot \Delta t}{\Delta L} \leq \frac{Pe}{2}$$

mit ΔL = räumliche Diskretisierung
 Δt = zeitliche Diskretisierung
 u = Fließgeschwindigkeit
 Pe = PECL-ET-Zahl

Die Steuerung der Zeitschritte für die zeitliche Diskretisierung ist bei DIERSCH (1992 und 1996) ausführlich behandelt. Die aktuellen hier vorgestellten Berechnungen benutzen die Methode AB/Trapezregel-Verfahren.

Diese zeitliche Diskretisierung bei der iterativen Lösung des Gleichungssystems unterscheidet sich von den Zeitschritten der Änderungen der instatio-

nären Randbedingungen. Die Zeitschritte der instationären Randbedingungen betragen einen Monat (z.B. Entnahmemengen, Neubildungsmengen). Der Berechnungszeitraum für die instationäre Kalibrierung wurde auf zehn Jahre (2000–2009) festgelegt.

Modellgrenzen

Der Modellrand des numerischen Modells wurde, soweit möglich, mit dem Aquiferrand gleichgesetzt.

Bei ungespannten Verhältnissen ändert sich der Aquiferrand in Abhängigkeit von der Grundwasserspiegellhöhe. Für den betrachteten Aquifer können diese Änderungen vernachlässigt werden und der Aquiferrand kann als stationär angenommen werden.

Wie bereits beschrieben, setzt sich lediglich im Bereich von Gießen (Flusspegel Gießen) die Kiesrinne und damit der Aquifer ins Argental fort, hier ist die Modellgrenze nicht mit der Aquifergrenze identisch. Es erfolgt hier ein Zustrom aus dem Argental.

Im Süden bildet der Bodensee als natürliche Vorflut die Aquifergrenze. Der Modellrand wurde als Randbedingung 1. Art im Modell berücksichtigt (instationäres Festpotenzial).

Ansonsten wird der Aquiferrand als eine „no-flow“ Grenze angenommen und als Modellgrenze festgesetzt.

Hydraulische Randbedingungen

Oberflächengewässer Argen als Randbedingung 3. Art

Das Modellgebiet wird auf einer Länge von ca. 5,5 km von der Argen durchströmt. Die Argen ist größtenteils an das Grundwasserfließsystem angebunden. Der Einfluss der Argen auf die Grundwasserfließverhältnisse wird durch Leakage, einer Randbedingung der 3. Art (CAUCHY), berücksichtigt.

Bodensee

Neben der Argen bestimmt der Wasserspiegelstand des Bodensees, der die Vorflut des Grundwasserleiters im Argendelta darstellt, die Grundwasserfließverhältnisse. Der Bodensee bildet die südliche Grenze des Grundwasserströmungsmodells. Der Wasserspiegel des Bodensees geht als Randbedingung der 1. Art (DIRICHLET) in das Grundwasserströmungsmodell ein. Die monatlichen Durchschnittswerte des Bodenseewasserspiegels stammen vom Pegel Konstanz und Langenargen.

Nordöstlicher Randzustrom aus dem Argental

Der Randzustrom aus dem Argental ist der einzige Modellrand, der nicht mit dem Aquiferrand identisch ist. Er wurde durch eine Randbedingung der 1. Art (DIRICHLET) festgelegt. Dabei orientiert sich das Festpotenzial an den Wasserspiegelmessungen in der GWM 115/623, die direkt am Modellrand liegt. Durch diese

Randbedingung können die unterschiedlichen Zuflussmengen berücksichtigt werden, die bei unterschiedlichen Grundwasserständen auftreten.

Grundwasserneubildung und Grundwasserentnahmen

Die Grundwasserneubildung umfasst die Neubildung aus den Niederschlägen im Modellgebiet und im oberirdischen Einzugsgebiet des Aquifers. Anhand der Neubildungsberechnung (durchgeführt mit dem Programm GWN-BW durch die LUBW) ergeben sich auf der Grundlage der monatlichen Niederschlagsmengen Neubildungsmengen zwischen 0 und 943 l/s (bei einem Grundwasserhochstand 2002/2003) für das gesamte Modellgebiet. Die Mengen werden instationär und flächendifferenziert als Randbedingung der 2. Art in das Modell eingegeben. Die Berechnungen der LUBW werden für eine Rastergröße von 500 m x 500 m nach dem Verfahren von ARMBRUSTER (2002) monatlich für den Zeitraum 2000–2009 durchgeführt.

Der Randzustrom östlich des Tettninger Waldes (*Nordöstlicher Randzustrom aus dem Argental*) wurde als Randbedingungen 4. Art (Brunnentyp) berücksichtigt. Die Zuflussmenge wurde anhand der Niederschlagsmengen und der Größe des Einzugsgebiets abgeschätzt und im Rahmen der Modellkalibrierung genauer berechnet. Die Menge liegt im Mittel bei 11,5 l/s. Für die aktuell betriebenen Entnahmehäuser (Randbedingung 4. Art) wurden die Entnahmemengen der letzten zehn Jahre ermittelt und als Monatswerte ins Modell bei der instationären Kalibrierung eingegeben. Aus dem Horizontalfilterbrunnen „Obere Wiesen“ und den Brunnen „Bierkeller“ wurden im Mittel der letzten Jahre zusammen ca. 46 l/s entnommen. Dieser Wert wird als aktuelle Entnahmemenge bei den weiteren Betrachtungen bezeichnet.

Randbedingungen für das Stofftransportmodell

Wie bereits beschrieben wird das Stofftransportmodell für die Berechnung des Anteils von Argen-Uferfiltrat im Grundwasser verwendet. Dieser Anteil wird aus den Messdaten der Gehalte des Sauerstoffisotops ^{18}O mit der Mischungsformel berechnet. Die isotopehydrologischen Untersuchungen haben ergeben, dass der Uferfiltratanteil der Argen im Grundwasser nahezu konstant ist, d.h. diese Randbedingung kann als stationär angenommen werden. Saisonale Schwankungen der Niederschlagsmenge können im Grundwasserleiter auch nicht erkannt werden. Damit wird auch diese Randbedingung stationär angenommen.

Für die Stofftransportberechnung bzw. die Berechnung des Argen-Uferfiltratanteils im Grundwasser wird der Argen eine Konzentration von 100 (dimensionslos) und dem Niederschlag bzw. dem Grundwasser ohne Argen-Uferfiltrat eine Konzentration von 0 (dimensionslos) zugeordnet. Es wird dadurch die Ausbreitung von Argenwasser im Grundwasser berechnet. Diese Transformation der Sauerstoff-18-Werte auf eine dimensionslose Konzentration erlaubt es mit FEFLOW, obwohl hier für den Stofftransport standardmäßig eine Konzentration in mg/l erwartet wird, die Berechnungen durchzuführen. Vergleichbare Berech-

nungen und Transformationen wurden auch bei STICHLER et al. (2008) angewandt.

Anfangsbedingungen

Für die Berechnung der Änderungen der Strömungs- und Transportverhältnisse im Grundwasserleiter mit dem numerischen Modell sind noch Anfangsbedingungen für die zu berechnenden Größen zu definieren.

Für die Strömungsberechnungen werden die gemessenen Grundwasserspiegeln vom Januar 2000 zugrunde gelegt und daraus jedem Element ein Anfangswert zugeordnet. Die Transportberechnung berücksichtigt als Anfangsbedingung den aus den Sauerstoff-18-Gehalten bestimmten Argon-Uferfiltratanteil, gemittelt für den Zeitraum 2007–2009 (Abb. 14).

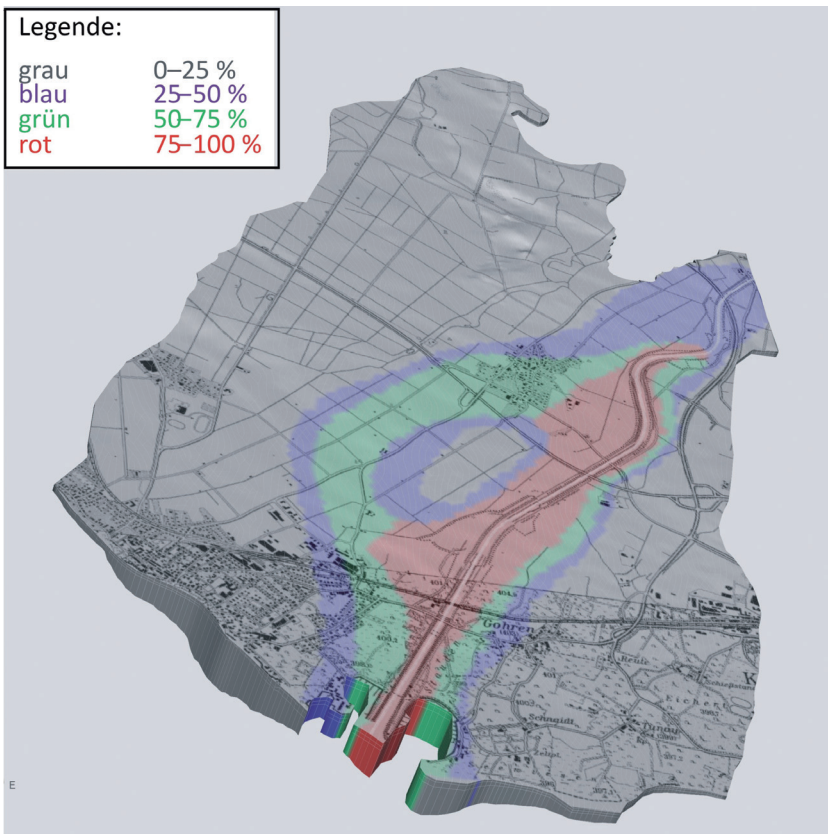


Abb. 14: Berechnete Anteile des Uferfiltrats der Argonne im Grundwasser (in Prozent) für 2007–2009 – Anfangsbedingung für die Stofftransportberechnung

Beschreibung der Materialparameter

Durchlässigkeitsbeiwert (k_f -Wert)

Die Durchlässigkeitsbeiwerte des Grundwasserleiters im Modellgebiet stützen sich primär auf die Ergebnisse der hydraulischen Versuche in Brunnen und Grundwassermessstellen. Da diese Versuche nur punktuelle Informationen über den Grundwasserleiter liefern, müssen die Punktinformationen unter Berücksichtigung der geologischen Erkenntnisse regionalisiert werden.

Die geologisch-hydrogeologischen Auswertungen der neuen Bohrungen und die anschließend durchgeführten hydraulischen Versuche ergaben, dass sich der Grundwasserleiter im südöstlichen Teil des Modellgebietes, sowohl im Bereich der Versuchsbrunnen als auch im Bereich des Landesbrunnens in drei Schichten unterteilen lässt. Im Bereich, in dem die Zwischenschicht ausgebildet ist, besitzen die Durchlässigkeitsbeiwerte der drei Schichten unterschiedliche Werte. Außerhalb des Bereichs der Zwischenschicht sind allen drei Schichten identische Durchlässigkeitsbeiwerte pro Element zugeordnet.

In einem 3-D-Modell werden die Strömungsverhältnisse im Vergleich zum 2-D-Modell auch durch die vertikale Komponente bestimmt. Bei Porengrundwasserleitern wird daher durch die Sedimentationsverhältnisse in der vertikalen Richtung ein geringerer Durchlässigkeitsbeiwert (k_f -Wert) wirksam. Im vorliegenden Modell wird gemäß Literaturangaben (z.B. KINZELBACH et al. 1995) der Durchlässigkeitsbeiwert in z-Richtung (vertikal) mit einem Zehntel der Durchlässigkeitsbeiwerte in x-y-Richtung angesetzt. In x- und y-Richtung besitzen die Vektorkomponenten den gleichen Betrag.

Speicherkoeffizient

Bei instationären Berechnungen muss der Speicherkoeffizient berücksichtigt werden, da dieser das Speichervermögen des Grundwasserleiters bei sich ändernden Wasserspiegeln beschreibt. Bei ungespannten Grundwasserleitern kann der Speicherkoeffizient dem nutzbaren Porenvolumen gleichgestellt werden. Für das vorliegende Strömungsmodell wurde ein einheitlicher Wert von 0,15 festgelegt. Eine Sensitivitätsanalyse zeigte, dass die Ergebnisse der instationären hydraulischen Berechnungen für unterschiedliche Werte der Speicherkoeffizienten sich nicht signifikant unterscheiden.

Mächtigkeit des Grundwasserleiters und Transmissivität

Die Mächtigkeit des Grundwasserleiters für ungespannte Verhältnisse berechnet sich aus der Grundwasserspiegelhöhe und der Basis des Grundwasserleiters. Aus dem Produkt der Mächtigkeit und des Durchlässigkeitsbeiwertes resultiert die Transmissivität einer Schicht. Bei dem dreidimensionalen (3-D)-Modell entspricht die Summe der Mächtigkeiten der einzelnen Schichten der Gesamtmächtigkeit des Aquifers.

Für unvollkommene Brunnen und Grundwassermessstellen, die nicht in allen

Schichten ausgebaut bzw. verfiltert sind, muss der aus Pumpversuchen ermittelte Wert der Transmissivität entsprechend korrigiert werden.

Porosität

Es wird von ungespannten Verhältnissen ausgegangen. Für das Modell des Porengrundwasserleiters wird standardmäßig ein Wert von 0,15 angenommen. Eine Änderung der Porosität von 15% auf 10% und 5% für die einzelnen Schichten zeigt keine bzw. nur geringe Änderungen bei der Berechnung der Anteile des Uferfiltrats (Sensitivitätsanalyse).

Diffusion und Dispersion

Die Diffusion wird durch Konzentrationsunterschiede hervorgerufen und der diffusive Stofffluss wird durch den Diffusionskoeffizienten beschrieben. In Porengrundwasserleitern mit Fließgeschwindigkeiten größer als 0,1 m/Tag kann der Anteil des durch die molekulare Diffusion transportierten Stoffes vernachlässigt werden (KINZELBACH et al. 1995).

Die Dispersion wird durch den dispersiven Stofffluss beschrieben, der richtungsabhängig ist. Bei großräumiger Betrachtung wird die Makrodispersion dominant. Maßgebend hierfür ist die Fließrichtung des Grundwassers. Bestimmt wird die dispersive Stoffausbreitung durch die Dispersionskoeffizienten D_L (longitudinal = in Fließrichtung) und D_T (transversal = quer zur Fließrichtung). Da die Dispersionskoeffizienten auch abhängig von der Größe der Fließgeschwindigkeit sind, werden bei der numerischen Modellierung die Dispersivitäten β_L und β_T eingegeben, die mit dem Dispersionskoeffizienten über folgende Beziehung verknüpft sind:

$$D_L = \beta_L \cdot V \text{ und } D_T = \beta_T \cdot V \text{ (mit } V = \text{Betrag der Geschwindigkeit)}$$

Die Dispersivitäten sind auch von der Fließweglänge abhängig, mit wachsender Fließweglänge nehmen auch die Werte der Dispersivitäten zu (PICKENS et al. 1981).

Diffusion, Zerfall und Retardation

Die Diffusionsprozesse sowohl für Deuterium ($\delta^2\text{H}$) als auch für Sauerstoff-18 ($\delta^{18}\text{O}$) sind vernachlässigbar. Für die stabilen Isotope des Sauerstoffes (^{18}O) und des Wasserstoffs (Deuterium, ^2H), mit dem Verhalten eines idealen Tracers, braucht keine Abbauraten bzw. Zerfallskonstante berücksichtigt zu werden.

Berechnung der $\delta^{18}\text{O}$ -Mittelwerte und ihre räumliche Verteilung

Die Modellierung des Argen-Uferfiltrats anhand der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte geht von der Annahme aus, dass es im Modellgebiet zwei Grundwasserkomponenten gibt:

- a.) die lokale von der Argen unbeeinflusste Komponente, welche aus dem lokalen Niederschlag gebildet wird und

b.) das Argen-Uferfiltrat, mit unterschiedlich langen Fließwegen und damit unterschiedlichen Verweilzeiten.

Das Argen-Uferfiltrat kann in eine langfristige, mittelfristige und in eine kurzfristige Komponente unterteilt werden. Für die Berechnung der Anteile von Argen-Uferfiltrat nach der Mischungsgleichung ist jeweils ein $\delta^{18}\text{O}$ -Mittelwert für die Argen und für den lokalen Niederschlag bzw. für Messstellen, die von der Argen unbeeinflusst sind, zu ermitteln.

Da neben den saisonalen Schwankungen auch eine Erhöhung der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte um 0,55 ‰ von 1987 bis 2001 und ca. 0,65 ‰ bis 2007 zu verzeichnen ist, wurde die Bestimmung der Anteile für den Zeitraum 2007–2009 und getrennt für das 1. Halbjahr 2010 durchgeführt und mit den Werten von 1987/1988 (HYDROISOTOPI) verglichen. Für die einzelnen Beobachtungszeiträume ergeben sich für die Komponenten folgende $\delta^{18}\text{O}$ -Werte:

Tab. 1: $\delta^{18}\text{O}$ -Mittelwerte der Argen und der aus Niederschlägen neugebildeten Grundwasserkomponente

Zeitraum	$\delta^{18}\text{O}$ -Mittelwerte	
	Lokale Komponente	Argen
1987/1988 **	-10,50 ‰	-10,86 ‰
2007/2009	-9,65 ‰	-10,21 ‰
1. Halbjahr 2010	-9,68 ‰	-10,91 ‰

** Werte der GWM 128/623 und 131/623

Mit diesen Werten und unter Berücksichtigung der Erkenntnis bezüglich der hydraulischen und geologischen Verhältnisse wurden die Anteile von Argen-Uferfiltrat im gesamten Aquifer ermittelt und damit Verteilungskarten konstruiert. Diese bilden die Anfangsbedingungen und die Grundlage für die Modellkalibrierung (Abb. 14).

4.4 Modellkalibrierung

Kalibrierung des Strömungsmodells

Die Anpassung der berechneten an die gemessenen Wasserspiegelmessstellen für den Zeitraum von 2000–2009 erfolgte durch die Variation der hydraulischen Parameter in plausiblen Grenzen. Die Güte für die Beschreibung des zeitlichen Fließverhaltens mit dem numerischen Modell ist ersichtlich aus dem Vergleich von Grundwasserganglinien, die aus den Wasserspiegelmessdaten und den berechneten Wasserspiegelmessstellen erstellt wurden.

Für ausgewählte Grundwassermessstellen, für die ausreichend lange Messreihen vorliegen, wurden die Messdaten mit den berechneten Wasserspiegelmessstellen des Zeitraums 2000–2009 verglichen bzw. die berechneten Messwerte so lange

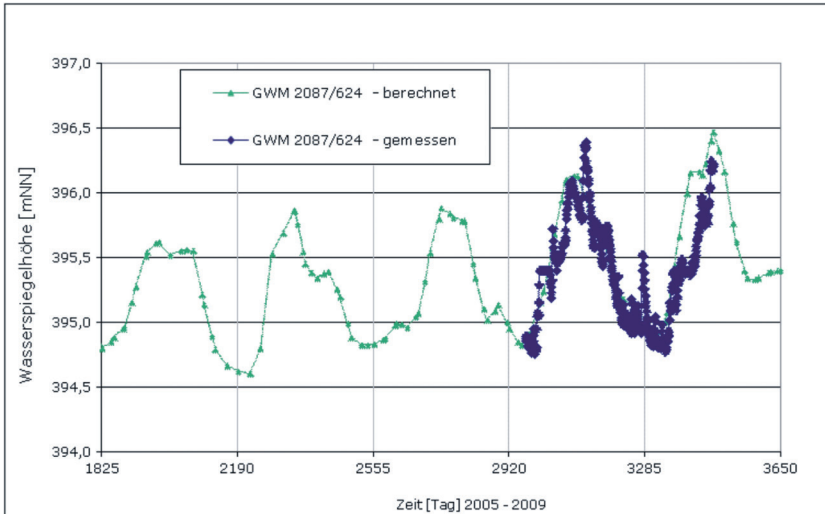


Abb. 15: Instationäre Kalibrierung: Vergleich der gemessenen mit der berechneten Wasserspiegelganglinie für die GWM 2087/624 im Zeitraum 2005 bis 2009

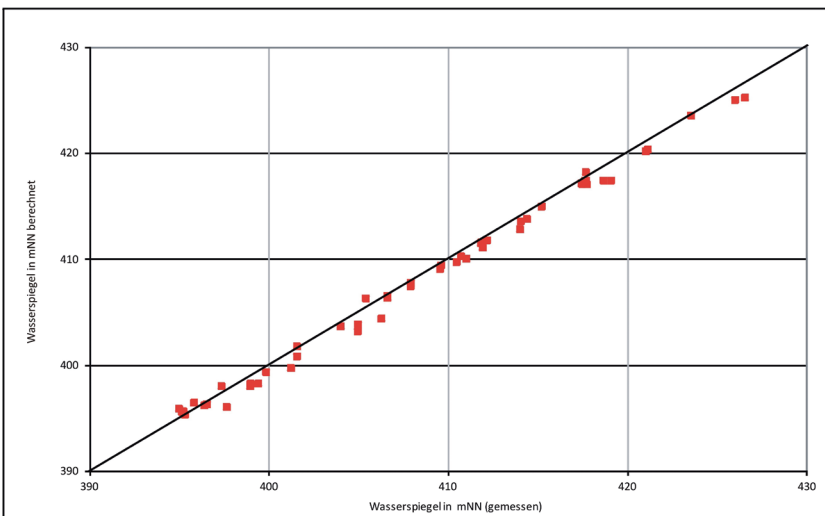


Abb. 16: Stationäre Kalibrierung: Vergleich der gemessenen mit den berechneten Wasserspiegeln für den Stichtag November 2009

angepasst bis eine gute Anpassung der berechneten an die gemessenen Grundwasserspiegelhöhen erzielt wurde. Am Beispiel der Messstelle GWM 2087/624 ist die Anpassung in der Abbildung 15 dargestellt.

Der Vergleich der gemessenen Daten von Wasserspiegelstichtagsmessungen mit den berechneten Werten aller verfügbaren Messstellen in Form eines „CROSS-Plots“ ist ein Maß für die Güte der räumlichen Anpassung. Der Vergleich der am Stichtag November 2009 gemessenen mit den mit dem 3-D-Modell berechneten Wasserspiegelhöhen belegt eine gute Anpassung (Abb. 16).

Die guten Anpassungen der berechneten an die gemessenen Wasserspiegelhöhen im Bereich des Landesbrunnens (103/624) und der Versuchsbrunnen belegen dass das kalibrierte 3-D-Strömungsmodell für hydraulische Prognoseberechnungen geeignet ist.

Neben der Berechnung der Fließverhältnisse ist die Bestimmung der Grundwasserhaushaltsbilanz ein wesentliches Ergebnis der numerischen Modellierungen. Die dreidimensionalen gerechneten und danach gemittelten Bilanzglieder des Grundwasserhaushaltes für den Zeitraum 2000–2009 sind in der Tabelle 2 zusammengestellt.

Tab. 2: Berechnete Grundwasserhaushaltsbilanz mit dem 3-D-Modell; Durchschnittswerte für den Zeitraum 2000–2009

Input	[l/s]	Output	[l/s]
Grundwasserneubildung			
einschl. Randzufluss	251,90	Entnahme Brunnen	45,6
Grundwasserzuströme (Argental)	36,30	Abstrom Bodensee	436,7
Infiltration Argen	343,8	Exfiltration Argen	150,2
Gesamtzustrom	632,0	Gesamtabstrom	632,5

Die geringe Differenz der negativen und positiven Bilanzglieder in der Tabelle 2, die kleiner als 1 % ist, zeigt, dass das Gleichungssystem für die Massenbilanz des Grundwasserhaushaltes mathematisch mit dem gewählten Iterationsverfahren sehr gut gelöst ist.

Kalibrierung des Stofftransportmodells

Mit den gewählten Randbedingungen konnte eine gute Anpassung der berechneten an die gemessenen hydraulischen Verhältnisse erzielt werden. Das kalibrierte Strömungsmodell konnte damit zu einem Stofftransportmodell erweitert werden. Auf der Grundlage der Ergebnisse der isotopehydrologischen Untersuchungen wurden die Input-Daten für die Kalibrierung ermittelt. Mit dem Grundwassertransportmodell wurden die Anteile des Argen-Uferfiltrats im Grundwasser berechnet und mit den isotopehydrologisch ermittelten Anteilen verglichen.

Die isotopehydrologischen Bestimmungen der Argen-Uferfiltratanteile für verschiedene Zeiträume belegen, dass die Verteilung des Uferfiltrats im Grund-

wasser zeitlich nahezu konstant ist und nur im Nahbereich der Argen Schwankungen, die durch Hochwasserereignisse verursacht werden, aufweist.

Fehlerbetrachtung

Die Genauigkeit der Verteilung der Uferfiltratanteile hängt einmal von der Messgenauigkeit von $\pm 0,15$ ‰ der $\delta^{18}\text{O}$, von der Anzahl der Messdaten für die Mittelwertbestimmung, von der Probennahme (Eignung der Messstellen) und von den numerischen Ungenauigkeiten des Modells ab. Der Fehler, verursacht durch die Messgenauigkeit der $\delta^{18}\text{O}$ -Bestimmung, kann durch eine ausreichende Anzahl von Messdaten für die ausgesuchte Messstelle reduziert werden, indem unplausible Messwerte nicht berücksichtigt werden. Für die Konstruktion der Verteilungskarten der Uferfiltratanteile wurden nur relevante Messstellen mit ausreichender Anzahl von Messdaten verwendet. Ebenso wurden ungeeignete Messstellen, die z. B. unzulänglich ausgebaut sind, weniger gewichtet.

Bei einer Differenz der $\delta^{18}\text{O}$ -Mittelwerte der Argen und der lokalen Komponente im Grundwasser von 0,5–0,6 ‰ wird ein möglicher Fehler von 0,05–0,1 ‰ angenommen, der einem Fehler bei der Bestimmung des Anteils von etwa $\pm 10\%$ – 15% entspricht. Diese Ungenauigkeit wurde auch bei der flächenhaften Darstellung (Abb. xx) berücksichtigt, die in Abständen von 25% erfolgt.

5. PROGNOSEBERECHNUNGEN

5.1 Hydraulische Berechnungen

Mit den Prognoseberechnungen soll die Machbarkeit einer zusätzlichen Entnahme von Trinkwasser im südöstlichen Bereich des Argendeltas überprüft werden. Für die hydraulische Betrachtung wurden Berechnungen für mehrere Szenarien durchgeführt, die sich an der geplanten Nutzung des Grundwasservorkommens orientieren. Die Szenarien beinhalten die instationäre Berechnung für einen Zeitraum von zehn Jahren mit der aktuellen Entnahme von $Q = 46$ l/s bis 150 l/s aus dem Horizontalfilterbrunnen „Obere Wiesen“ und 150 l/s am Standort des neuen Brunnens.

Im Bereich des geplanten neuen Brunnens haben rezente Bohrungen eine Zwischenschicht mit geringerer Durchlässigkeit nachgewiesen. Um bei einer zukünftigen Grundwassernutzung auch die lokale Schutzfunktion der Zwischenschicht zu nutzen, wurde bei den Prognoseberechnungen von einer Grundwasserentnahme aus der unteren Aquiferschicht (Schicht 3) ausgegangen.

Beeinflussung des Horizontalfilterbrunnens durch einen neuen Brunnen

Die Berechnungen der Stromlinien („partikel-tracking“) zeigen, dass eine gegenseitige Beeinflussung bei einer Entnahmemenge von 150 l/s am Standort der jetzigen Versuchsbrunnen und von durchschnittlich ca. 46 l/s aus dem Horizontalfilterbrunnen (durchschnittliche Entnahme zwischen 2000 und 2009) nicht gegeben ist (Abb. 17). Das Einzugsgebiet des Horizontalfilterbrunnens bleibt trotz unterschiedlicher Entnahmemengen aus der neuen Fassung nahezu konstant.

Einfluss der Argen und des Bodensees

Durch die Zwischenschicht besteht kein direkter Kontakt zwischen der Argen und dem zukünftig genutzten Aquiferbereich im neuen Brunnen. Im Modell wird ein hydraulischer Kontakt zwischen Argen und der oberen Schicht des Grundwasserleiters angenommen.

Die Berechnungen ergeben, dass bis zur maximalen Entnahme von 150 l/s kein direkter hydraulischer Kontakt der unteren Schicht des Grundwasserleiters zur Argen unmittelbar westlich des untersuchten Standortes erfolgt. Der Kontakt erfolgt erst bei einem Abstand ab ca. 2000 m und damit außerhalb der 50-Tage-Linie, die die Grundlage für die Berechnung der Engeren Schutzzone (Zone II) eines künftigen Wasserschutzgebietes bildet.

Durch eine angenommene kontinuierliche Entnahme von 150 l/s aus dem Versuchsbrunnen ändert sich die Grundwasserhaushaltsbilanz gegenüber den aktuellen Verhältnissen. Die Entnahme verursacht einen Anstieg der durchschnittlichen Infiltration der Argen auf 369 l/s gegenüber rund 344 l/s ohne Entnahme, wohingegen die Exfiltrationsmenge nahezu gleich bleibt.

Der Abstrom in den Bodensee reduziert sich um ca. 120 l/s auf 318 l/s gegenüber ca. 437 l/s, damit ist die Bilanz wieder ausgeglichen. Die Darstellung in Abb. 17 lässt erkennen, dass nur bei einer Dauerentnahme von 150 l/s und mehr aus dem neuen Brunnen auch Uferfiltrat des Bodensees erschlossen wird.

Beeinflussung des neuen Brunnens durch den Horizontalfilterbrunnen

Die Prognoseberechnungen für die erhöhte Entnahme von 100 l/s und 150 l/s aus dem Horizontalfilterbrunnen und einer Entnahme von 150 l/s aus dem neuen Brunnen zeigen, dass die berechneten Stromlinien (Einzugsgebiet) für den neuen Brunnen durch die erhöhte Entnahme aus dem Horizontalfilterbrunnen keine große Veränderung erfahren.

Einfluss hoher Grundwasserentnahmen auf die Argen-Infiltrationsmengen

Durch die erhöhten Entnahmen aus dem Horizontalfilterbrunnen und die Entnahme von 150 l/s aus dem neuen Brunnen lassen sich vor allem ein Anstieg der Infiltrationsmengen aus der Argen und eine Reduzierung der Abstrommengen in den Bodensee beobachten. Nachfolgende Tabelle 3 zeigt den Vergleich der In-

Tab. 3: Vergleich der Infiltrationsmengen aus der Argen und Abflussmengen in den Bodensee bei unterschiedlichen Entnahmen aus dem Horizontalfilterbrunnen (HFB) und der gleichzeitigen Entnahme von 150 l/s aus dem Neuen Brunnen

Entnahmerate	Infiltration	Abstrom in den Bodensee
SZM1: Entnahme 46 l/s (HFB)	369 l/s	318 l/s
SZM2: Entnahme 100 l/s (HFB)	393 l/s	285 l/s
SZM3: Entnahme 150 l/s (HFB)	425 l/s	256 l/s

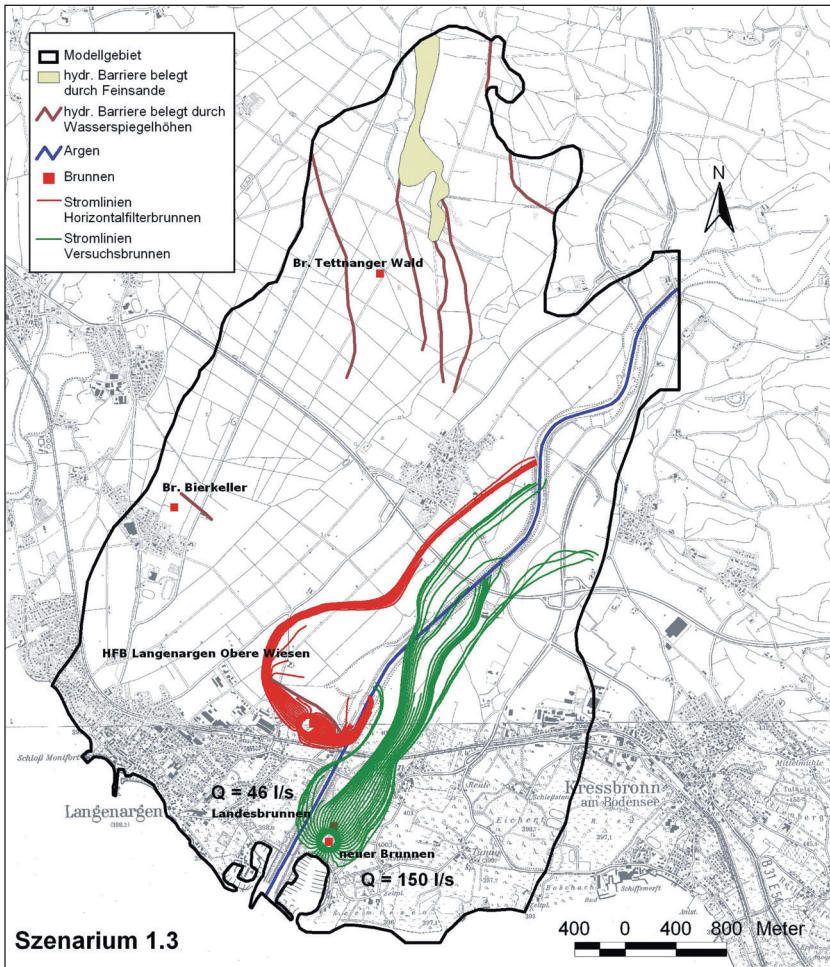


Abb. 17: Prognoseberechnung: Berechnete Stromlinien für die aktuelle Entnahme aus dem Horizontalfilterbrunnen und für eine Entnahme von 150 l/s aus dem neuen Brunnen (SZM1)

filtrationsmengen aus der Argon und der Abflussmengen in den Bodensee für unterschiedliche Entnahmen aus dem Horizontalfilterbrunnen und der gleichzeitigen Entnahme von 150 l/s aus dem neuen Brunnen.

Ab schätzung der Uferfiltratsmenge aus dem Bodensee

Bei höheren Entnahmen aus dem Horizontalfilterbrunnen „Obere Wiesen“ und der Entnahme von 150 l/s aus dem neuen Brunnen zeigt sich, dass das Gefälle zwischen dem künftigen neuen Brunnen am Standort der derzeitigen Versuchs-

brunnen und dem Bodensee sich nur insignifikant ändert. Die gemittelte Infiltrationsmenge aus dem Bodensee steigt auf ca. 14 l/s an, liegt aber bei einer Gesamtentnahme von 300 l/s immer noch unter 5%.

5.2 Berechnung der Argen-Uferfiltratanteile bei unterschiedlichen Entnahmemengen

Die Ergebnisse der isotopehydrologischen und hydrochemischen Untersuchungen zeigen, dass die Anteile des Argen-Uferfiltrats im Grundwasser bei der aktuellen Entnahme aus dem Horizontalfilterbrunnen aufgrund der geohydraulischen Randbedingungen schwanken. Es wurde überprüft, ob auch hohe Entnahmen aus dem Horizontalfilterbrunnen und aus einem neuen Brunnen östlich der Argen die Anteile und Verteilung der am Fließgeschehen beteiligten Grundwasserkomponenten beeinflussen. Für die Bestimmung der Änderungen der Argen-Uferfiltratanteile bei unterschiedlichen Entnahmemengen wurden Prognoseberechnungen für drei Szenarien (SZU₁–SZU₃) instationär für die Zeit von drei Jahren durchgeführt.

- SZU₁: Entnahme von 46 l/s aus dem Horizontalfilterbrunnen und 0 l/s aus dem neuen Brunnen
- SZU₂: Entnahme von 46 l/s aus dem Horizontalfilterbrunnen und 150 l/s aus dem neuen Brunnen
- SZU₃: Entnahme von 150 l/s aus dem Horizontalfilterbrunnen und 150 l/s aus dem neuen Brunnen

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Abb.18 als Ganglinien und des prozentualen Anteils des Argen-Uferfiltrats dargestellt. Die Ganglinien wurden für die Messstelle GWM 2087/624 (am Standort eines möglichen neuen Brunnens) erstellt.

Mit steigender Entnahmemenge nimmt auch der Anteil der lokal aus Niederschlag neu gebildeten Grundwasserkomponente ab. Die Zunahme des Argen-Uferfiltratanteils mit fallendem Grundwasserspiegel ab dem Jahre 2003 (ca. nach 1400 Tagen) ist bei den ausgewählten Messstellen auffällig. Es ist darauf zurückzuführen, dass bei fallender Grundwasserspiegellhöhe sich die Potenzialdifferenz zwischen Argenpegel und Grundwasserstand erhöht und damit über Leakage mehr Argenwasser in den Grundwasserleiter infiltriert.

Die Änderungen sind konform mit den Messergebnissen der isotopehydrologischen Untersuchungen, die für den Bereich des möglichen neuen Brunnenstandortes bei entsprechendem Hochstand des Bodenseepiegels, einen vermehrten Zustrom aus Osten bzw. Nordosten belegen.

5.3 Fazit aus den Prognoseberechnungen

Beeinträchtigung des Horizontalfilterbrunnens durch einen neuen Brunnen

Die Entnahme aus einem neuen Brunnen am Standort „Versuchsbrunnen“ ist mit $Q_{24} = 150$ l/s bei gleichzeitiger Entnahme von 150 l/s aus dem Horizontalfilterbrunnen möglich, ohne dass sich die Brunnen gegenseitig beeinflussen.

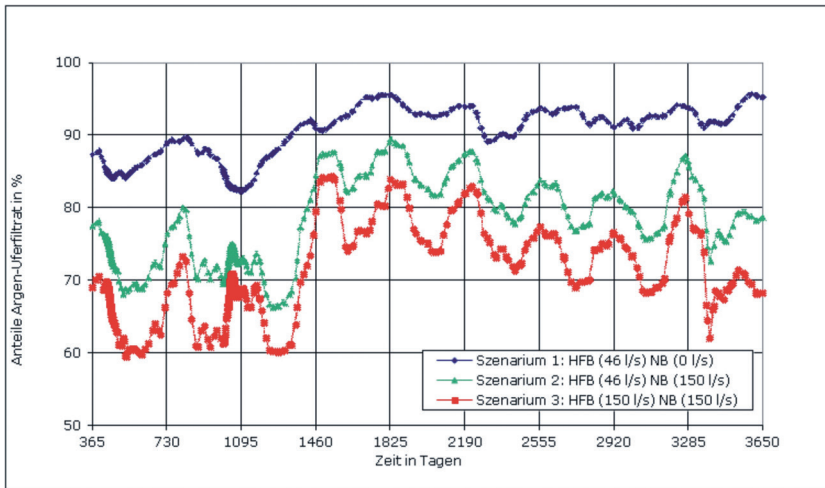


Abb. 18: Prognoseberechnungen der Argon-Uferfiltratanteile in der GWM 2087/624 bei unterschiedlichen Entnahmemengen (Szenarium U₁ – U₃) über einen Zeitraum von neun Jahren (HFB = Horizontalfilterbrunnen, NB = Neuer Brunnen)

Fachtechnische Abgrenzung der „Engeren Schutzzone“ des WSG für den neuen Brunnen

Die Berechnungen wurden für eine Entnahme aus der unteren Aquiferschicht durchgeführt. Eine fachtechnische Ausweisung der Engeren Schutzzone (Zone II) ist möglich. Die Entnahme aus der oberen Schicht bzw. aus allen Schichten mit einem vollkommenen Brunnen am Standort des Landesbrunnens (103/624) mit $Q = 150 \text{ l/s}$ ist aus Sicht der Ergiebigkeit des Aquifers möglich, eine fachtechnische Abgrenzung des Schutzgebietes, bzw. der 50-Tage-Linie zeigt, dass die Verbindungsstraße Langenargen – Kressbronn und die Bahnlinie bei Niedrigwasser im Bodensee und damit bei entsprechendem Gefälle innerhalb der 50-Tage-Linie liegen.

Nutzung des See-Uferfiltrats

Die Szenarien zeigen, dass für den Standort „Versuchsbrunnen“ See-Uferfiltrat nur bei Dauerbetrieb von 100–150 l/s und nur bei Seehochstand beigezogen wird. Die Anteile von See-Uferfiltrat sind aber mit max. 10% an der Gesamtmenge für eine mögliche Verbesserung der Qualität zu gering.

Hydraulisch wirkt sich der Bodensee aber bei der großen Entnahme von 150 l/s durch eine Reduzierung der Absenkung im neuen Brunnen aus. Man spricht hier von einer hydraulischen Anreicherungsgrenze, die durch Druckübertragung, aber nicht unbedingt durch Massentransport (vom See zum Brunnen) wirksam wird. Da der Landesbrunnen (103/624) weiter vom See entfernt ist, wird der An-

teil an See-Uferfiltrat noch geringer im Vergleich zum Standort bei den Versuchsbrunnen und ist in der Praxis zu vernachlässigen.

Uferfiltrat der Argen

Beide Standorte nutzen langfristig zufließendes Argen-Uferfiltrat mit deutlich längeren Verweilzeiten als 50 Tage. Solange nur der untere Bereich des Aquifers (GWM 2087/624 bei 30–50 m u. Gelände) genutzt wird, besteht keine Gefährdung, dass eine kurzfristig zufließende Argen-Uferfiltratkomponente beigezogen wird. Die erkundete Zwischenschicht im südöstlichen Bereich des Argendeltas schützt den neuen Brunnen vor dieser kurzfristigen Komponente.

Die langfristig zufließende Uferfiltratkomponente ist aber für die Nutzung notwendig, da hierdurch eine ausreichende Neubildung von Grundwasser, ähnlich wie für den Horizontalfilterbrunnen, zur Verfügung steht.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE

6.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurde im Rahmen der Erkundung des Grundwasservorkommens im Argendelta (Bodenseekreis-Baden-Württemberg) ein numerisches 3-dimensionales (3-D)-Grundwasserströmungs- und Transportmodell erstellt. Die am Grundwasserfließsystem beteiligten Komponenten wurden anhand von Sauerstoff-18-Gehaltsmessungen ($\delta^{18}\text{O}$) und hydrochemischen Parametern qualitativ und quantitativ beschrieben und mit dem numerischen 3-D-Modell überprüft. Die hiermit erzielten Ergebnisse bilden die Grundlage für eine Machbarkeitsstudie einer neuen Trinkwasserfassungsanlage und für deren Bewirtschaftung.

Für die instationäre Kalibrierung standen die hydrogeologischen Messdaten von 2000–2010 zur Verfügung. Die isotopehydrologischen und hydrochemischen Untersuchungen mit einem umfangreichen Beprobungs- und Messprogramm erfolgten von 2007–2010.

Die Auswertung der unterschiedlichen Messreihen ergab, dass die ermittelte Jahresganglinie der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Argen im Grundwasser nicht genau genug abgebildet wurde, da sich die unterschiedlich zufließenden Argen-Uferfiltratanteile im Grundwasserleiter mischen. Kurzfristig zufließende Argen-Uferfiltratanteile konnten nur in Messstellen erkannt werden, die unmittelbar an der Argen liegen und ins langzeitige Messprogramm integriert wurden.

Die isotopehydrologischen Untersuchungen bestätigen auch die Ergebnisse der geohydraulischen Untersuchungen, wonach das Fließsystem im Bereich des südlichen Argendeltas im Sommer vom Hochstand des Bodenseepiegels gesteuert und im Winter bei Seeniedrigstand hydraulisch von der Argen beeinflusst wird. Im Sommer kann bei den aktuellen hydraulischen Verhältnissen im Grundwasserleiter kein kurzfristig zufließendes Argen-Uferfiltrat im Grundwasser der Messstellen des südlichen Argendeltas nachgewiesen werden.

Influente Verhältnisse konnten nur bei Niedrigwasserstand im Bodensee und bei lang anhaltendem Extremhochwasser der Argen erkannt werden. Bei Niedrig- und Mittelabfluss der Argen wurden effluente Verhältnisse nur im südlichen Abschnitt der Argen (unterhalb der Fischtreppe) nachgewiesen.

Die Berechnungen der mittleren Verweilzeiten und der Fließgeschwindigkeiten im Grundwasser ergaben, dass bei einer Nutzung des Grundwassers im südlichen Argendelta mit kurzfristig zufließendem Uferfiltrat in den oberen Aquiferschichten gerechnet werden muss. Die Verweilzeiten des Argen-Uferfiltrats in der unteren Aquiferschicht sind größer als 50 Tage.

Langfristig parallel zur Argen abfließendes Argen-Uferfiltrat bildet die Hauptkomponente des Grundwassers am Standort einer möglichen neuen Fassungsanlage. Im Nahbereich der Argen mischen sich die beiden Komponenten der kurz- und langfristig zufließenden Argen-Uferfiltratanteile.

Die prozentualen Anteile des Argen-Uferfiltrats konnten anhand der Ergebnisse isopenhydrologischer und hydrochemischer Untersuchungen abgeschätzt und mit dem numerischen Modell bestätigt werden.

Das kalibrierte numerische Strömungs- und Transportmodell wurde auch für Prognoseberechnungen eingesetzt, die die Machbarkeit der Erschließung des Grundwasservorkommens im südöstlichen Argendelta belegen. Es konnte gezeigt werden, dass bei gleichzeitiger Entnahme von je 150 l/s aus dem bestehenden Horizontalfilterbrunnen und aus einer neuen Brunnenanlage das hierfür notwendige Wasserschutzgebiet fachtechnisch nach den gültigen Richtlinien abgegrenzt werden kann und sich die beiden Fassungsanlagen gegenseitig nicht beeinflussen.

Mögliche Änderungen der Anteile der einzelnen Komponenten in Abhängigkeit von den jeweiligen Entnahme-Szenarien und den herrschenden geohydraulischen Randbedingungen wurden berechnet, wobei die langfristig zufließenden Argen-Uferfiltratanteile immer die Hauptkomponente im Grundwasser bilden.

Bodensee-Uferfiltrat konnte bei den durchgeführten Untersuchungen selbst im Grundwasser der seeufernen Grundwassermessstellen nicht nachgewiesen werden. Die Prognoseberechnungen zeigen, dass Anteile von See-Uferfiltrat in einem neuen Brunnen nur unter bestimmten geohydraulischen Verhältnissen auftreten, im Jahresmittel aber praktisch vernachlässigbar sind.

Für einen neuen Brunnen am Standort der heutigen Versuchsbrunnen konnte ein Bewirtschaftungskonzept erstellt werden. Hier kann mit einem oder mehreren neuen Brunnen eine Menge von 150 l/s zusätzlich zu der Entnahme aus dem Horizontalfilterbrunnen von ebenfalls 150 l/s entnommen werden. Durch einen Ausbau bzw. Verfilterung des neuen Brunnens im tieferen Aquiferbereich wird die Schutzfunktion der erkundeten Zwischenschicht gegen oberflächennahe Einflüsse und kurzfristig zufließende Argen-Uferfiltrate genutzt.

Die Nähe zum Bodensee wirkt sich hydraulisch positiv mit einer Reduzierung der Absenkungsbeiträge in einem neuen Brunnen aus.

6.2 Diskussion der Ergebnisse

Erstellung des Konzeptionellen Modells

Das Ziel der Untersuchung, die Beschreibung der Interaktion zwischen Grundwasser und Oberflächengewässer mit Hilfe numerischer Methoden, konnte nur mit der Kombination verschiedener Untersuchungsmethoden erreicht werden. Es stellte sich auch bei früheren Untersuchungen (z.B. STICHLER et al. 2008) heraus, dass die Anwendung einer einzelnen Methode häufig keine eindeutigen Aussagen ermöglicht.

Methoden zur Beschreibung des Uferfiltratanteils

Die Ermittlung der Argon-Uferfiltratanteile und die Beschreibung ihrer räumlichen Verteilung erfolgten anhand der Untersuchungsergebnisse von natürlichen Umwelt-Tracern (^{18}O , chemische Inhaltsstoffe) und gemessener Leitfähigkeitswerte des Wassers. Die alleinige Verwendung der hydrochemischen Inhaltsstoffe und der Temperatur zur Beschreibung der Uferfiltratanteile oder von Infiltrationsvorgängen liefert nur für den ufernahen Bereich und beim Fehlen anthropogener Einflüsse zufriedenstellende Ergebnisse. Diese Untersuchungen in der Argon und im Grundwasser bestätigten jedoch im ufernahen Bereich die Ergebnisse der isotohydrologischen Untersuchungen.

Verwendung von Sauerstoff-18 (^{18}O) als Tracer

Für die quantitative und qualitative Beschreibung des Uferfiltratanteils im Grundwasser war das Umweltisotop ^{18}O am besten geeignet, da es sich wie ein idealer Tracer verhält. Es konnte mit den Werten von Zeitreihenuntersuchungen dieses Isotops eine Abgrenzung der kurzfristig und langfristig zufließenden Argon-Uferfiltratkomponenten vorgenommen werden. Mit den verwendeten „Lumped-Parameter“-Modellen (Box-Modelle), die auch eine instationäre Interpretation der isotohydrologischen Daten darstellt, konnte das konzeptionelle Modell verbessert werden. Voraussetzung für die Anwendung der Umwelt-Tracer ist eine deutlich unterschiedliche Markierung des Grundwassers und der Oberflächengewässer und eine ausreichende Anzahl von Messdaten und Messstellen. Der Beobachtungszeitraum sollte mindestens zwei Jahreszyklen umfassen, um saisonale Ereignisse, wie Hochwasserstände im Grundwasser und im Oberflächengewässer oder saisonale Schwankungen der Gehalte von Inhaltsstoffen und Umwelttracern zu erfassen.

Kalibrierung des Stofftransportmodells

Die stationäre Kalibrierung des Stofftransportmodells erfolgte mit den Anteilen des Argon-Uferfiltrats für den gesamten Aquifer und für alle drei Schichten. Eine instationäre Kalibrierung war aufgrund fehlender Inputdaten bzw. wegen fehlender eindeutiger Markierungen, hier zeitliche Variationen der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte in einer ausreichenden Anzahl von Messstellen, nicht möglich. Im Nahbereich der Argon erfolgte eine instationäre Kalibrierung mit den „Lumped-Parameter“-Mo-

dellen für wenige Messstellen und damit war die Bestimmung der Fließzeiten des Uferfiltrats hier möglich. Damit konnten die Infiltrationsstellen der Argen lokalisiert und eine Abschätzung der Stofftransportparameter vorgenommen werden.

Ausblick

Das bestehende Modell kann für Untersuchungen von Schadstoffeinträgen (z. B. Pflanzenschutzmittel PSM) erweitert werden. Weiter kann die Qualitätsverbesserung der hiesigen Grundwasservorkommen durch Uferfiltrat und die Schutzfunktion der Zwischenschicht untersucht und deren Verhalten in der ungesättigten Zone (Verweildauer) näher betrachtet werden. Als möglicher Tracer kann hier auch wieder Sauerstoff-18 verwendet werden. Dafür sind der Transport und die Vermischung von Niederschlägen in der ungesättigten Zone durch Messreihen zu erkunden und der Eintrag der aus dem Niederschlag gebildeten Grundwasserkomponenten zu ermitteln.

Allgemein kann bei der Nutzung von durch Uferfiltrat beeinflusstem Grundwasser die Bestimmung von $\delta^{18}\text{O}$ -Gehalten und weiterer Parameter (Lf und auszuwählender Inhaltsstoff) zur Qualitätssicherung empfohlen werden. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte sind unabhängig von anthropogenen Einflüssen und daher geeignet anthropogene Gefährdungen besser als andere Parameter zu beschreiben. Auch bei der Erkundung des Einflusses von Oberflächengewässern können hiermit die Bereiche mit Uferfiltrat qualitativ und quantitativ abgeschätzt und das Verhalten der Uferfiltrat-Anteile prognostiziert werden. Anhand dieser Ergebnisse kann dann im Bedarfsfall zusammen mit weiteren hydrogeologischen Untersuchungen entschieden werden, ob ein numerisches Grundwasserströmungs- und Transportmodell sinnvoll ist bzw. wie detailliert es aufgebaut sein sollte.

DANK

Bedanken will ich mich beim Zweckverband Wasserversorgung „Unteres Schusental“ (ZWUS), besonders bei den Herren Weiss, Spieth, Mühlebach und Vallaster, die die notwendigen Untersuchungen finanziell ermöglichten.

Für die wissenschaftliche Betreuung gilt mein Dank den Herren Prof. Dr. P. Maloszewski, Prof. Dr. C. Leibundgut, Prof. Dr. M. Weiler und Prof. Dr. R. Watzel. Mein besonderer Dank gilt den Herren Dr. B. Bertleff und W. Stichler, die stets für Diskussionen zur Verfügung standen und durch ihre fachliche Unterstützung zum Zustandekommen der Arbeit beigetragen haben.

Für die Verleihung des Walter-Schall-Preises 2012 will ich mich ganz herzlich bei der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg und bei Herrn Dr. W. Schall bedanken.

LITERATURVERZEICHNIS

ARMBRUSTER, V. (2002): Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg – Freiburger Schriften zur Hydrologie – Band 17: 140 S.

- BEAR, J.** (1979): *Hydraulics of Groundwater*. – McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, 544 S.; New York
- BERTLEFF, B., WATZEL, R., EICHINGER, L., TRIMBORN, P.** (1991): *Isotope Investigations and Hydraulic Measurements for the Delineation of a groundwater Protection Area*. – In: *Proceedings of the International Symposium on Isotope Techniques in Water Resources Development in Vienna 1991*, IAEA-Report SM-319/33P: 671–673; Vienna
- CRAIG, H.** (1961): *Isotope Variations in Meteoric Waters*. – *Science*, 133: 1702–1703
- DIERSCH, H.-J.** (1992): *FEFLOW – An Interactive, Graphics-Based Finite Element Simulation System for Modeling Groundwater contamination Processes*. – User Manual, Version 3.20, WASY GmbH; Berlin
- DIERSCH, H.-J.** (1996): *FEFLOW – Physical Basis of Modeling*, Berlin
- DONALD, M. G., HARBAUCH, A. W.** (1984): *A Modular Three-Dimensional Finite Difference Ground-Water Flow Model*. – U.S. Geological Survey – Open File Report 83–875, 538 S.
- EHRMINGER, B., HERDEG, U., STRAYLE, G.** (1992): *Ermittlung und Bewertung des Einzugsgebietes von Wasserfassungen*. DVGW-Schriftenreihe Wasser, 72: 213–236, Eschborn (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches)
- EHRMINGER, B.** (1993): *Simulation der Sauerstoffisotopenzusammensetzung von Grundwasser mit einem numerischen Strömungs- und Transportmodell am Beispiel des Zartener Beckens*. – Diss. Univ. Freiburg, 104 S.; Freiburg i. Br.
- FRITZ, P., FONTES, J. C.** (1980): *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Vol. I: The Terrestrial Environment*. – 545 S.; Amsterdam, Oxford, New York
- HYDRO-DATA** (2001): *Bericht; Raumordnungsverfahren (ROV) für die Erweiterung des Kiesabbaus Tettninger Wald – numerisches Modell*. – 95 S., 14 Anlagen.; Radolfzell – [Unveröff.]
- HYDRO-DATA** (2010): *Abschlussbericht zum Projekt: „Erkundung des Grundwasservorkommens im südöstlichen Bereich des Argendeltas zur Sicherung der Trinkwasserversorgung durch den ZWUS“*, 105 S, mit Anlagen Radolfzell. – [Unveröff.]
- HYDROISOTOP GMBH** (1989): *Isotopenhydrologische Untersuchungen zur Überprüfung und Abgrenzung des Wasserschutzgebietes „Obere Wiesen“ (Argendelta) des Zweckverbandes Wasserversorgung Unteres Schussental, Meckenbeuren, Bodenseekreis*. – 24 S., Anlagen; Attenkirchen. – [Unveröff.]
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA)** (1992): *Statistical Treatment of Data on Environmental Isotopes in Precipitation*. – Technical Report Series, 331: 781 S.; Vienna
- KINZELBACH, W.** (1991): *Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser*. Schriftenreihe gwf Wasser, Abwasser, 21: 2. Aufl., 343 S.; München
- KINZELBACH, W. und RAUSCH, R.** (1995): *Grundwassermodellierung*; 283 S.; Gebr. Borntraeger, Berlin-Stuttgart
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG – LFU** (1990): *Forschungsprojekt Argon-Delta, Abschlussbericht*. – Veröffentlichungsreihe Inst. F. Wasser- und Abfallwirtschaft, 80: 78 S.; Karlsruhe
- LEIBUNDGUT, C., et al.** (2009): *Tracers in Hydrology*, Wiley-Blackwell, ISBN 978-0-470-51885-4
- MALOSZEWSKI, P., ZUBER, A.** (1982): *Determining the Turnover Time of Groundwater*

Systems with the Aid of Environmental Tracers: I. Models and their Applicability. *Journal of Hydrology*, 57: 207–231

MALOSZEWSKI, P., et al. (1990a): Modelling of groundwater pollution by river bank filtration using oxygen-18 data. *IAHS Publ.*, No 173, Dresden

MATTHESS, G. (1990): Die Beschaffenheit des Grundwassers. *Lehrbuch der Hydrogeologie*, Bd. 2: 498 S.; Berlin

MOSER, H. (1972): Verwendung des Deuterium- und Sauerstoff-18-Gehalts bei hydrogeologischen Untersuchungen. *Gas-Wasser-Abwasser*, 52: 329–334

MOSER, H., RAUERT, W. (1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie. *Lehrbuch der Hydrogeologie*, Bd. 8: 400 S.; Berlin

NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG – NLFB (1953, 1994, 1959, 1965, 1972, 1987): Geoelektrische Sondierungsmessungen im Argendelta und Tettninger Wald; Hannover. – [Unveröff.]

PICKENS, J. F., G. E. GRISAK (1981): Scale-Dependent Dispersion in a Stratified Granular Aquifer. *Water Resour. Res.*, 17(4): 1191–1211

REICHERT, B. (1991): Anwendung natürlicher und künstlicher Tracer zur Abschätzung des Gefährdungspotenzials bei der Wassergewinnung durch Uferfiltration; Schriftenreihe AGK Karlsruhe – Band 13

SCHREINER, A. (1978): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Baden-Württemberg 1:25 000, Blatt 8323 Tettngang. – 60 S.; Stuttgart

STICHLER, W. (1980): Application of ^2H and ^{18}O in hydrological studies. – *GSF-Bericht, R* 229:32 S., 18 Abb.; München (GSF)

STICHLER, W., MOSER, H., BATSCHKE, H., BERTLEFF, B., EGGER, R. (1983): Interrelations between river water and groundwater on water supply areas using environmental isotopes. – *Isotope Hydrology 1983, Proc. Int. Symp. Vienna 1983, IAEA-SM-270/30*; Vienna

STICHLER, W., MALOSZEWSKI, P., BERTLEFF, B., TRAPP, C., WATZEL, R. (2000a): Modellierung der Wechselwirkung Baggersee – Grundwasser mit Hilfe von Umweltisotopen. – *Jh. Geol. Landesamt Baden-Württemberg*

STICHLER, W., ET AL. (2002): Modellierung der Wechselwirkung Baggersee-Grundwasser mit Hilfe von Umweltisotope im mittleren Oberrheingraben bei Baden-Baden; *Abh. LGRB BW* 15 S 91–104

STICHLER, W., et al. (2008): Use of environmental isotopes to define the capture zone of a drinking water supply situated near a dredge lake. *Journal of Hydrology*, 362: 220–233

WATZEL, R. (1994): Stofftransportmodellierung im Grundwasser des Argendeltas unter Verwendung des Umweltisotops Tritium. – *Diss. Univ. Freiburg*, 147 S.

Anschrift des Autors:

Dr. WERNER MICHEL

Hinter Hof 22

78224 Singen

Tel. 07731/186222

Email: w.michel@hydro-data.de

