

## Modellbetrachtungen für die Tiefengrundwässer im Oberen Muschelkalk zwischen Stuttgart und Oberschwaben

Von WOLFGANG UFRECHT, JUTTA JUSTIZ & ULRICH LANG, Stuttgart.

### ZUSAMMENFASSUNG

Im Raum südlich Stuttgart und dem Südrand der Schwäbischen Alb reichen mehr als 20 Tiefbrunnen bis in den Oberen Muschelkalk, der hier von 200 bis über 1.000 m mächtigen Gesteinen aus Keuper und Jura, südlich der Donau auch von Molassesedimenten (Tertiär) und quartären Lockergesteinen überdeckt ist. Die Brunnen erschließen im Muschelkalk thermale und größtenteils auch mineralisierte und kohlendioxidführende Tiefengrundwässer ( $\text{Na-Ca-Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$ ,  $\text{Ca-Na-Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$  und  $\text{Na-Ca-SO}_4\text{-Cl}$ , gelöste Feststoffe: 4 bis 8 g/l) zur balneologischen Nutzung und Gewinnung von Mineralwasser für die Getränkeindustrie. Aus Daten zu Schichtaufbau und -geometrie dieses Raums sowie zur Hydraulik und Beschaffenheit der Wässer wird ein konzeptionelles Hydrogeologisches Modell für die tiefen Aquifersysteme zwischen Kristallin und Sandsteinkeuper entwickelt und die Kernpunkte der Grundwasser-Alimentation (Zeit und Ort der Grundwasserneubildung), der Fließdynamik und insbesondere der Mechanismen der Aufkonzentrierung des Tiefengrundwassers beschrieben. Eine quantitative Umsetzung des Hydrogeologischen Modells erfolgt mit einem numerischen 3D-Grundwasserströmungs- und Transportmodell. Es wird einer kombinierten Kalibrierung unterzogen, bei der sowohl die Piezometerhöhen als auch die Chloridkonzentrationen im Oberen Muschelkalk als Prüfgröße Verwendung finden, was erstmals eine konsistente Interpretation der regionalen Grundwasserströmung und des vertikalen Austauschs zwischen den Aquiferen ermöglicht. Dadurch kann auch der aus Isotopendaten abgeleitete Prozess des formationsübergreifenden *cross formation flow*, das heißt des Austauschs zwischen Oberem Muschelkalk und tieferen Grundwasserstockwerken, gut nachgebildet werden. Er erklärt die Aufkonzentrierung der Tiefengrundwässer im Oberen Muschelkalk in Stuttgart (Heilquellen), sowie unabhängig davon auch zwischen dem Fildergraben und der Schwäbischen Alb.

In der praktischen Anwendung geben die Modelle erstmals die Möglichkeit, hydraulische Zusammenhänge zu quantifizieren, um damit wasserwirtschaftliche Fragen qualifiziert abhandeln zu können. Im Vordergrund stehen hier Betrachtungen des Grundwasserhaushalts und einzelner Haushaltskomponenten im Hinblick auf die Frage der Bewirtschaftung des Muschelkalk-Aquifersystems sowie der hydraulischen Verbindung zwischen dem Stuttgarter Mineralwassersystem und dem tiefen Aquifersystem zwischen Fildergraben und dem ober-schwäbischen Molassebecken.

**Schlüsselwörter:** Tiefengrundwasser, Oberer Muschelkalk, Karsthydrogeologie, Hydrogeologisches Modell, Strömungs- und Transportmodellierung.

## ABSTRACT

More than 20 deep wells tap the Upper Muschelkalk (Middle Triassic) aquifer in the area south of Stuttgart and the southern border of the Schwäbische Alb. About 200 to 1.000 m thick sediments of Keuper and Jurassic confine the Upper Muschelkalk aquifer. The wells discharge highly mineralized and carbogaseous water ( $\text{Na-Ca-Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$ ,  $\text{Ca-Na-Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$  and  $\text{Na-Ca-SO}_4\text{-Cl}$ , total dissolved solids: 4 to 8 g/l) with temperatures in a range of 25 to 55 °C. The mineral water is mainly used for spa activities, but also by the beverage industry.

The results of long term hydrogeological, isotopic and hydrochemical investigations, coordinated by the City of Stuttgart, are used to set up a conceptual (hydrogeological) model as well as a 3D numerical groundwater model for the Upper Muschelkalk aquifer and underlying aquifers (Lower Triassic Buntsandstein, crystalline basement). In the model, chloride concentration was used to calculate transport processes. The comparison between calculated and measured chloride concentrations confirmed the applied assumptions related to the groundwater recharge, the direction of groundwater flow and the amount of vertical interactions with deeper aquifers. For the first time, this model set-up enables the quantification of the mentioned processes. This is particularly related to the cross formation flow that can be observed and verified by means of sulfur and strontium isotopes. In the river Neckar valley located in Stuttgart, where 500 l/s of mineralized water emerge, the uprising component of water in cross formation from Buntsandstein aquifer into Upper Muschelkalk is calculated to be approximately 20 l/s. However, in the south of Stuttgart the flow rate into the Upper Muschelkalk is much smaller, i. e. less than 5 l/s rise along strike slip faults and diatreme vulcanoes (belonging to the so-called Urach-Kirchheimer Vulkangebiet). This produces highly mineralized waters that are well comparable with those of Stuttgart.

The developed 3D groundwater model is the essential tool for practical use to deal with groundwater management of the mineral springs in Stuttgart. It enables to sustainably manage extraction rates and to estimate a hydraulic impact of the Stuttgart spas.

**Keywords:** Deep groundwater, Upper Muschelkalk, Conceptual model, Groundwater flow and transport modeling.

## 1. EINFÜHRUNG

Einer der bedeutendsten Grundwasserleiter in Baden-Württemberg ist der Obere Muschelkalk. Vor allem längs seines Ausstrichs in den Gäulandschaften bildet er eine wichtige Stütze für die Wasserversorgung. Darüber hinaus sind in dieser Formation auch kohlenstoffführende Mineral-Thermalwässer bekannt. Hierzu gehören sowohl die 500 Liter pro Sekunde schüttenden Stuttgarter Heil- und Mineralquellen (UFRECHT & WOLFF 2014), die im Fildergraben genutzten Wässer (Merkel-Bad Esslingen, PRESTEL & SCHLOZ 2009) als auch die Wässer im südlich daran anschließenden Albvorland und unter der Schwäbischen Alb (CARLÉ 1971, 1982; VILLINGER 1982). Die Erschließung letzterer setzte 1969 in Bad Ditzgenbach

mit bis zu 650 Meter tiefen Bohrungen ein, gefolgt von weiteren Tiefbohrungen in Bad Urach, Beuren, Bad Boll, Göppingen, Bad Überkingen, Aalen, Tuttlingen, Neu-Ulm und zuletzt Rommelsbach. Die Brunnen fördern unterschiedlich mineralisierte und kohlenäurereiche Thermalwässer im Temperaturbereich von 25 °C bis 55 °C.

Zur Frage der Herkunft und Entstehung der Tiefengrundwässer im Albvorland und ihre mögliche Korrespondenz mit den Stuttgarter Heil- und Mineralquellen werden seit langem hydrogeologische Untersuchungen in diesem Aquifersystem durchgeführt. Die dabei gewonnenen Daten und Informationen wurden zusammen mit Literatur- und Archivdaten zum Aufbau eines konzeptionellen Hydrogeologischen Modells verwendet. Die Ergebnisse der Untersuchungen vermitteln ein Bild der komplexen Zusammenhänge, die im konzeptionellen Hydrogeologischen Modell dokumentiert werden. Das dadurch gewonnene System- und Prozessverständnis liefert die Grundlage für numerische Modellierungen. Im Vordergrund der Anwendung beider Modelle stehen hier erstmals Berechnungen der Grundwasserströmung sowie des Wasser- und Stoffaustauschs zwischen den Grundwasserstockwerken, Betrachtungen des Grundwasserhaushalts und einzelner Haushaltskomponenten im Hinblick auf die Frage der Bewirtschaftung des Muschelkalk-Aquifersystems sowie der hydraulischen Verbindung zwischen dem Stuttgarter Mineralwassersystem und dem tiefen Aquifersystem zwischen Fildergraben und dem Südrand der Schwäbischen Alb.

## 2. HYDROGEOLOGISCHES MODELL

Eine konsistente hydrogeologische Modellvorstellung wird für das tiefe Aquifersystem zwischen Fildergraben und Schwäbischer Alb neben geologischen Daten (Stockwerksgliederung, Aquifergeometrie, Fazies, Tektonik) auf Basis von hydraulischen Daten (Piezometerhöhen, hydraulische Kennwerte), Isotopenuntersuchungen am Wassermolekül und an gelösten Feststoffen ( $\delta^{34}\text{S}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ ), hydrochemischer Analytik und im Wasser gelöster Gase (Konzentrationen und Isotope) entwickelt und dabei auf die relevanten Kernpunkte der Grundwasseralimentation (Zeit und Ort der Grundwasserneubildung), der Grundwasserhydraulik und Fließdynamik und insbesondere der Mechanismen der Aufkonzentrierung des Tiefengrundwassers eingegangen. Gerade in tiefen Aquifersystemen sind die auftretenden Fragen wegen der dort zu beleuchtenden extremen Raum- und Zeitskalen, die im Albvorland mit einem mehrere zehntausend Quadratmeter großen Betrachtungsraum und bis zu mehreren zehntausend Jahre alten Wässern gegeben sind, eine besondere Herausforderung. Erschwerend kommt hinzu, dass das Aquifersystem nur mit sehr wenigen Brunnen erschlossen ist, die zudem auch noch sehr ungleich verteilt sind. Um dennoch den hydrogeologischen Modellbildungsprozess auf eine hochwertige Datenbasis zu stellen, wurden durch die Stadt Stuttgart in den bestehenden Aufschlüssen während der letzten Jahrzehnte gezielt Untersuchungen zur Hydrogeologie, Hydrochemie sowie Isotopie des Wassers und der Gase durchgeführt. Der Einsatz isotopischer und hydrochemischer Parameter ist in der Hydrogeologie eine seit langem prak-

Tab. 1: Erschlossene und genutzte Tiefengrundwässer (Oberer Muschelkalk) in Stuttgart, im Fildergraben und im Alborland/Schwäbische Alb. Der Gruppe „westliches Alborland“ sind hydraulisch die Brunnen Tuttligen und Rommelsbach zuzurechnen, die Wässer von Bad Boll und Bad Ditzgenbach gehören lagemäßig zur Gruppe „östliches Alborland“, nehmen jedoch hydrochemisch und isotopisch eine intermediäre Stellung ein.

Gruppe	Aufschluss	Signatur	Bohrtiefe (m)	Temperatur (°C)	Gelöste Feststoffe (g/l)	CO <sub>2</sub> (g/l)	Hydrochemie
Stutt- gart	Inselquelle	IS	38	20	5,7	2,3	Na-Ca-Cl-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>
	Leuzequelle	LS	37	19	4,3	1,5	Na-Ca-Cl-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>
Filder- graben	TB Scharnhausen	SCH	338	32	6,2	2,3	Na-Ca-Cl-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>
	Merkel-Bad	ESS	203	32	8,6	1,9	Na-Ca-Cl-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>

östliches Alvorland und Ostalb	Bad Überkingen, Otto 1	ÜB1	1020	40,8	4,8	0,2	Na-Ca-SO <sub>4</sub> -Cl
	Bad Überkingen, Otto 2	ÜB2	1051	43,2	5,2	0,3	Na-Ca-SO <sub>4</sub> -Cl
	Bad Boll, Tiefbrunnen	BB	467	45,6	7,6	1,2	Na-Ca-Cl-SO <sub>4</sub>
	Göppingen, Stauferquelle	GÖP	512	26,0	5,4	0,5	Na-Ca-SO <sub>4</sub> -Cl
	Jebenhausen, Marienquelle	JEB	390	--	5,7	--	Na-Ca-SO <sub>4</sub> -Cl
	Neu-Ulm, Donautherme	NU	1035	46,0	7,3	0,3	Na-Ca-SO <sub>4</sub> -Cl
	Aalen, Limestherme 1	AA1	650	36,4	3,6	0,1	Ca-Na-SO <sub>4</sub>
	Aalen, Limestherme 2	AA2	570	36,3	3,6	0,1	Ca-Na-SO <sub>4</sub>
	Bad Ditzenbach, Canisius 1	DIT1	561	45,7	7,3	1,3	Na-Ca-Cl-SO <sub>4</sub>
	Bad Ditzenbach, Canisius 2	DIT2	584	45,8	7,7	1,7	Na-Ca-Cl-SO <sub>4</sub>
	Tuttlingen, GB1	TUT	644	46,9	1,0	<0,1	Ca-Mg-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>
	Beuren, Brunnen 1	BEU1	750	48,7	6,4	1,3	Na-Ca-Cl-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>
	Bad Urach, TB 1	UR1	770	53,5	5,6	1,7	Ca-Na-Cl-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>
	Bad Urach, TB 2	UR2	760	54,0	5,4	2,5	Ca-Na-Cl-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>
Rommelsbach, Br. 9-33	ROM	370-405	24,2-27,4	0,8-1,3	<0,1	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>	
Westliches Alvorland und Westalb							

tizierte und bewährte Methode zum Erkennen vertikaler Interaktionen zwischen Grundwasserstockwerken sowie Migrationspfaden des Tiefengrundwassers. Die Parameter visualisieren nicht messbare hydraulische Prozesse. Eine wichtige Rolle spielt hier auch das a priori-Wissen des Geologen um Strukturen und Prozesse, einschließlich ihrer Auswirkungen auf die Hydraulik der Grundwasserleiter (AK Hydrogeologische Modelle 2010). Isotopeninformation und a priori-Wissen verhelfen dazu, bestehende Freiheitsgrade in der Systemanschauung einzuengen und zur Verbesserung der Aussagequalität der Modelle beizutragen.

Aus früheren Erschließungs- und Erkundungsaktivitäten haben CARLÉ (1971, 1982), VILLINGER (1982), PLÜMACHER (1999), SCHLÖSER (1994) und UFRECHT (2006a, 2018) eine Übersicht der regionalen Hydrogeologie des Oberen Muschelkalks im Albvorland erarbeitet. Die hier vorgelegten Modelle bauen darauf auf.

### 2.1 Geologischer Aufbau und Strukturgeologie

Im Osten des aufgedomten Schwarzwaldkristallins streichen zwischen oberem Neckar und oberer Donau die Schichtglieder von Buntsandstein und Muschelkalk in einem nur wenige Kilometer breiten und in N-S-Richtung verlaufenden Saum aus. Sie tauchen nach E und SE unter eine geschlossene Überdeckung mit Keuper, Jura und südlich der Donau auch mit mächtiger tertiärer Molasse und eiszeitlichen Sedimenten ab. Die Überdeckung des Muschelkalks erreicht im Albvorland etwa 500 m, am Südrand der Schwäbischen Alb etwa 1.000 m und im oberschwäbischen Molassebecken nördlich des Bodensees sogar mehr als 2.500 m. Die Sedimente des Deckgebirges wurden über dem mit Permokarbon-Becken durchsetzten kristallinen Rumpf des variscischen Gebirges abgelagert. Die Küstenlinie verschob sich während der Trias zunehmend nach Osten und Südosten und erweiterte den Sedimentationsraum im Germanischen Becken gegenüber dem Kristallinhochgebiet des Vindelizischen Landes. Die Schichten des Muschelkalks und Keupers, die über die Verbreitungsgrenze des Buntsandsteins hinausgehen, liegen dann im östlichen und südöstlichen Modellraum direkt dem Kristallin auf. Ab dem Unteren Muschelkalk bis zum höheren Mittelkeuper wurden vom Vindelizischen Festland klastische Abtragungsprodukte beckenwärts geschüttet (Grafenwöhr-Formation, Eschenbach-Formation, Benk-Formation; BACHMANN et al. 1999; BEUTLER et al. 1999; GEYER et al. 2011), die ihre größte laterale Ausbreitung nach NW im Unteren Muschelkalk mit der Eschenbach-Formation erreichen (Abb. 2). Sie verzahnen sich mit einer aus Tonstein, Kalk- und Dolomitstein aufgebauten Beckenfazies, die von Anhydrit (Mittlerer Muschelkalk und Gipskeuper) sowie in einem in SSW-NNE-Richtung längsgestreckten Bereich auch von gesteinsbildendem Steinsalz (Mittlerer Muschelkalk) durchsetzt wird. Die Karbonatgesteinsfolge des Oberen Muschelkalks nimmt vom Enzgebiet im NW zum Bodensee im SE von 90 auf 40 m Mächtigkeit ab. Nach Osten keilt er zur Iller hin aus (Abb. 2). In der küstennahen Randzone sind die Karbonatgesteine durch silikatisch-klastische Sedimente ersetzt. Im obersten Teil des Muschelkalks entsteht südlich der Enz der poröse bis feinkavernöse Trigonodusdolomit (Rottweil-Formation) unter lagunären Bedingun-

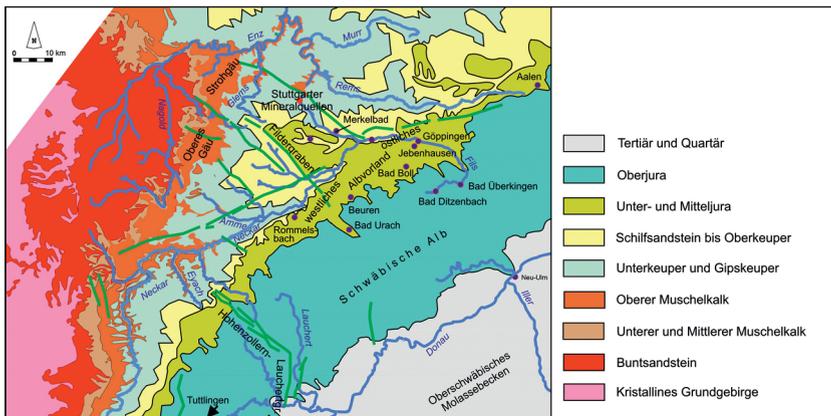
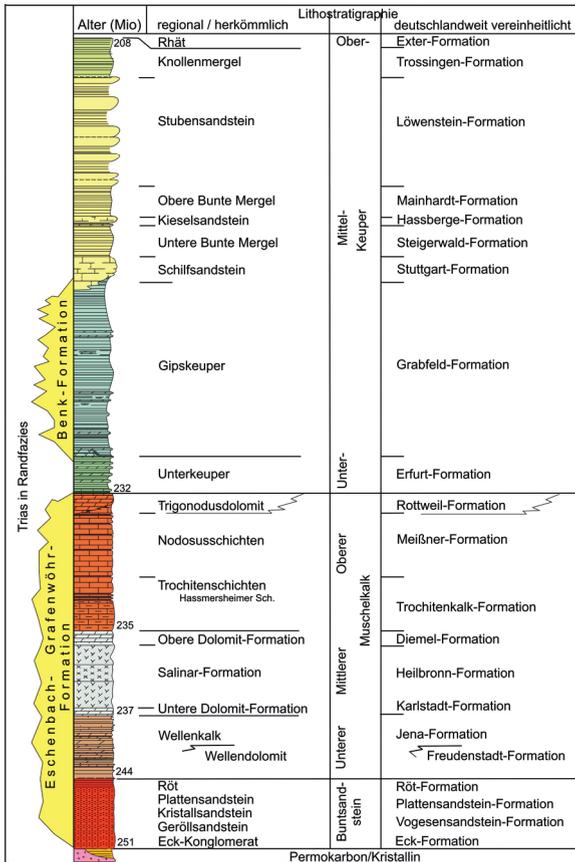
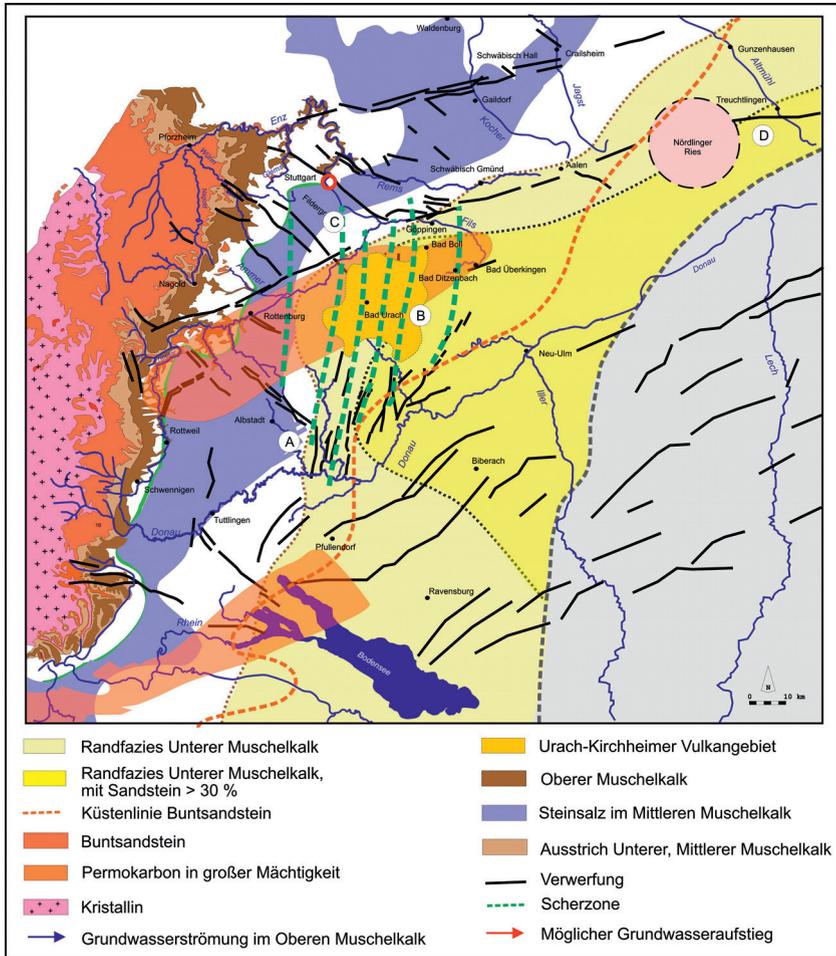


Abb. 1 oben: Übersichtsprofil der Trias mit lithostratigraphischer Nomenklatur (deutschlandweit vereinheitlicht GEYER et al. 2011). Unten: Vereinfachte Geologische Karte des Modellraums (nach Geologischer Karte Baden-Württemberg 1:500.000, LGRB).



**Abb. 2:** Synoptische Darstellung der strukturell-tektonischen, lithofaziellen und paläogeographischen Gegebenheiten zwischen Stuttgart und dem ober-schwäbischen Molassebecken. Vertikale Austauschvorgänge werden neben den hydraulischen Druckgradienten durch Strukturen (Verwerfungen, Schlotte im Urach-Kirchheimer Vulkangebiet) und die fazielle Ausbildung der Gesteine (klastische Randfazies im Unterem und Mittlerem Muschelkalk) beeinflusst.

gen. Nach SE und E geht die Dolomitmächtigkeit auf unter 10 m zurück, ebenso im Gebiet des westlichen Albvorlands und unter der Schwäbischen Alb (Werte zwischen 5 und 8 m). Im Gebiet der Fils und des östlichen Remstals ist der Obere Muschelkalk ohne erkennbare Dolomitisierung durchgehend als Kalkstein entwickelt (ALESI 1984).

Das Deckgebirge ist tektonisch stark beansprucht und wird von länger aushaltenden Störungssystemen mit Versatzbeträgen zwischen 10 und 150 m durchzogen, wie etwa Fildergraben, Hohenzollern- und Lauchertgraben (Abb. 1). Die meisten Brüche zeigen eine lange und komplexe Bildungsgeschichte, da zeitlich variierende Spannungsfelder mehrmals zur Reaktivierung und Überprägung der Strukturen führten. Unter einer ab dem Miozän eingeleiteten Neuorientierung des Spannungsfelds wurde das Strukturinventar mit dextralen (W-E bis WNW-ESE) und sinistralen Blattverschiebungen (N-S bis NNE-SSW) überprägt. An letztere dürfte auch die in Nord-Süd-Richtung vom westlichen Bodensee über Schwäbische Alb und Albvorland nach Norden reichende, seismisch aktive „Schwäbische Erdbebenlinie“ (Albstadt-Scherzone) gebunden sein (SCHNEIDER 1993).

Gerade die Scherzonen sind für die sehr tiefreichende Zerrüttung und hydraulische Wegsamkeit des Gebirges von Bedeutung. Aufgrund des fehlenden oder geringen vertikalen Versatzes sind diese jedoch nur schwer kartierbar und daher im Verlauf nur wenig bekannt. Hinweise auf ihren Verlauf ergeben sich mit Methoden der Fernerkundung und morphostruktureller Kartierung mit digitalen Geländemodellen. Damit kann zwischen Stuttgart und der Schwäbischen Alb in N-S-Richtung ein intensiv ausgeprägtes Lineationsmuster ausgemacht werden (KRONBERG 1977; WETZEL & FRANZKE 2003), wonach die Mittlere Schwäbische Alb von einer ca. 30 km breiten Zone intensiverer tektonischer Beanspruchung durchzogen wird. Sie deckt sich im Südwesten mit dem System des Lauchertgrabens und der kartiertechnisch nur schwer fassbaren Münsinger Bruchzone (CARLÉ 1955) und zieht nach Norden über den Raum Urach in das Gebiet des Albvorlands. Die Lineare fallen vor allem im Gebiet der Albhochfläche abschnittsweise mit kartierten Verwerfungen zusammen, wie Lauchertgraben, Bruchfeld von Münsingen und Teckverwerfung (ILLIES 1978).

Ebenso wie die das Deckgebirge durchziehenden Scherbrüche haben auch die etwa 360 Diatreme des Urach-Kirchheimer Vulkanfelds (Abb. 2), die vom lithosphärischen Mantel ausgehend den über 30 km mächtigen Krusten-Deckgebirgsstapel durchfahren haben, eine tiefreichende Zerrüttung und örtlich lineare bzw. punktuelle hydraulische Wegsamkeiten im Gebirge geschaffen.

## 2.2 Aquifergeometrie und hydrogeologischer Stockwerksbau

Die beschriebenen Lithologien erzeugen eine Wechselfolge wasserleitender bzw. -stauender Einheiten. Unterhalb des Juras sind zwischen dem Albvorland und dem oberschwäbischen Molassebecken der Sandsteinkeuper (höherer Mittelkeuper), der Obere Muschelkalk (hydraulisch verbunden mit Unterkeuper und Oberer Dolomit-Formation des Mittleren Muschelkalks), der Buntsandstein

(ohne Röt) und die Auflockerungszone des Kristallins (nur außerhalb der Permo-karbon-Becken) großflächig als Aquifersystem ausgebildet.

Trennende Wirkung haben die mächtigen Füllungen der Permokarbon-Becken ebenso wie Röt (nur im nördlichen Modellraum), Unterer Muschelkalk, Mittlerer Muschelkalk und Gipskeuper im westlichen und mittleren Albvorland, solange sie aus Tonstein- bzw. Evaporit- und Karbonatfolgen der Beckenfazies aufgebaut sind. Dagegen ist in der sich nach Osten anschließenden Randfazies mit der Zunahme von Sandsteineinschaltungen die vertikale hydraulische Trennfunktion in Auflösung begriffen. Grundsätzlich erscheint in diesen ehemals küstennahen Gebieten im Gegensatz zu den anderen Räumen mit mächtiger Überdeckung eine vertikale Verlagerung von Grundwasser aus dem Sandsteinkeuper bis in den Oberen Muschelkalk und tiefer möglich. In der Funktion eines hydraulischen Fensters lässt die Randfazies im östlichen Albvorland sowohl den vertikalen Austausch zwischen den genannten Schichten zu, als auch die Herabsickerung von neugebildetem Grundwasser aus dem Niederschlag bis zum Oberen Muschelkalk und tiefer.

Die im Mittleren Muschelkalk und Gipskeuper außerhalb der Randfazies auftretenden Sulfatgesteine sind unter hoher Überdeckung unausgelaugt und haben daher in der Fläche Barrierefunktion. Steinsalz ist im Allgemeinen erst unter einer Bedeckung ab höherem Mittelkeuper, das heißt in Tiefen größer 200 m konserviert und folglich als Trennschicht (mit Barrierefunktion) voll wirksam (SIMON 1995, 2003). Die Frage der Auslaugung entlang von Störungen unter hoher Überdeckung ist nicht pauschal zu beantworten und hängt in erster Linie von der hydraulischen Funktion der Störung ab. Grundsätzlich dürfen Bereiche, in denen sich hydraulisch aktive Großstörungen mit der Salzverbreitung berühren, als potenzielle Auslaugungsräume aufgefasst werden. Auslaugung findet besonders dort statt, wo Steinsalz an Störungen gegen durchlässiges Gebirge versetzt ist und dort zirkulierendes Grundwasser kontaktiert. In diesem Bereich können längs der Störungs- bzw. der Kontaktflächen vertikale stockwerksverbindende Wegsamkeiten entstehen. Von den bekannten Verwerfungssystemen queren die Fildergraben-Randverwerfungen, das Schwäbische Lineament sowie der Hohenzollern- und der Lauchertgraben das Steinsalzlager im Mittleren Muschelkalk (Abb. 2). Sichere Befunde zu dort ablaufender Ablaugung des Steinsalzes und Schaffung möglicher Vertikalverbindungen liegen allerdings nicht vor. Das Auftreten hoher und durch NaCl geprägter Mineralisierung des Buntsandsteinwassers im Abstrom der genannten Störungen lässt jedoch solche Zusammenhänge vermuten. Insgesamt kommen für vertikale Austauschvorgänge lineare oder punktuelle Strukturelemente, wie Verwerfungen oder die Schlotte im Urach-Kirchheimer Vulkangebiet, in Frage, ebenso wie die in der Fläche wirksame klastische Randfazies im östlichen und südöstlichen Modellraum.

Die Aquifergeometrie des Oberen Muschelkalks wird in horizontaler Ausdehnung durch Großverwerfungssysteme bestimmt, die aufgrund ihrer geringen lateralen Durchlässigkeit einen hohen Fließwiderstand aufbauen. In der Modellannahme ist der Fließwiderstand einer Störung groß, wenn es im Bereich der Bruch-

fläche durch Schichtversatz zu einer erheblichen Minderung des durchströmbareren Querschnitts kommt. Im Modellraum werden aufgrund des Versatzbetrags von mehr als zwei Dritteln der Aquifermächtigkeit Störungen des Fildergrabens, des Hohenzollern- und Lauchertgrabens sowie der Saulgauer und Hochbühl-Fronhofer Verwerfung als lateral stauende Elemente betrachtet. Letztere begrenzen das Strömungsregime im Albvorland und unter der Schwäbischen Alb zum oberschwäbischen Molassebecken und zu den dortigen hochmineralisierten Formationswässern (STOBER 2014; STOBER et al. 2013).

### 2.3 Grundwasserströmung im Oberen Muschelkalk

Das tiefe Grundwasser im westlichen Albvorland wird entlang der Ausstrichsfläche des Muschelkalks zwischen den Quellgebieten von Donau und Neckar neugebildet. Der Abstrom divergiert unter dem Einfluss der sperrenden Wirkung des Hohenzollern-Lauchertgrabens in nordöstliche sowie östliche bis südöstliche Richtung und gelangt in der südlichen Verlängerung des Fildergrabens im zentralen Albvorland in eine Zone, die durch sehr geringe hydraulische Gradienten gekennzeichnet ist (Abb. 3). Diese „Talwegzone“ ist das Produkt aus Durchlässigkeitskontrasten und geringdurchlässigen bis teildichten Störungen. Die höchsten Transmissivitäten erstrecken sich innerhalb der Talwegzone zwischen dem östlichen Teil des zentralen bis südlichen Fildergrabens (Scharnhausen:  $6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , Merkel-Bad:  $1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ ) und dem Gebiet zwischen Rommelsbach und Bad Urach (bis  $4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ). Sie wird nach Westen, Osten und Süden allerdings von den geringer durchlässigen Gebieten mit T-Werten  $< 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  umrahmt. Dadurch ist der durchlässige Raum im Fildergraben und südlich davon hydraulisch von geringem Einfluss, da der durch die geringere Transmissivität aufgebaute Fließwiderstand in deren Umfeld den Betrag der möglichen Zuflüsse in den Fildergraben und damit ins Cannstatter Becken zu den Stuttgarter Mineral- und Heilquellen limitiert. Zu den Ausstrichsflächen des Muschelkalks hin nehmen aufgrund zunehmender Verkarstung die Transmissivitäten auf Werte um  $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  zu.

Die als Sammler wirkende Talwegzone nimmt auch das aus dem östlichen Albvorland westwärts abströmende Wasser auf. Im östlichen Albvorland ist aufgrund der geschlossenen mächtigen Überdeckung von einer komplexen Alimentation des Muschelkalks auszugehen. Grundwasserneubildung bis in den Muschelkalk ist hier nur infolge der vertikal durchlässigen Randfazies im Keuper und der geringeren Mächtigkeit der Deckschichten gegenüber dem westlichen Anschlussgebiet möglich.

Das vom zentralen Albvorland aus nach Norden abströmende Tiefengrundwasser gelangt entweder über den Fildergraben in das im Stuttgarter Neckartal liegende Cannstatter Becken oder anteilmäßig auch zum Unterlauf der Rems. In beiden Gebieten entlastet der dort artesisch hoch gespannte Obere Muschelkalk über Störungen in die Talniederung bzw. direkt in die Oberflächengewässer. Unabhängig vom „südlichen Zustrom“ aus dem Fildergraben wird der wesentliche Anteil der im Cannstatter Becken mit etwa 500 l/s austretenden Stuttgarter

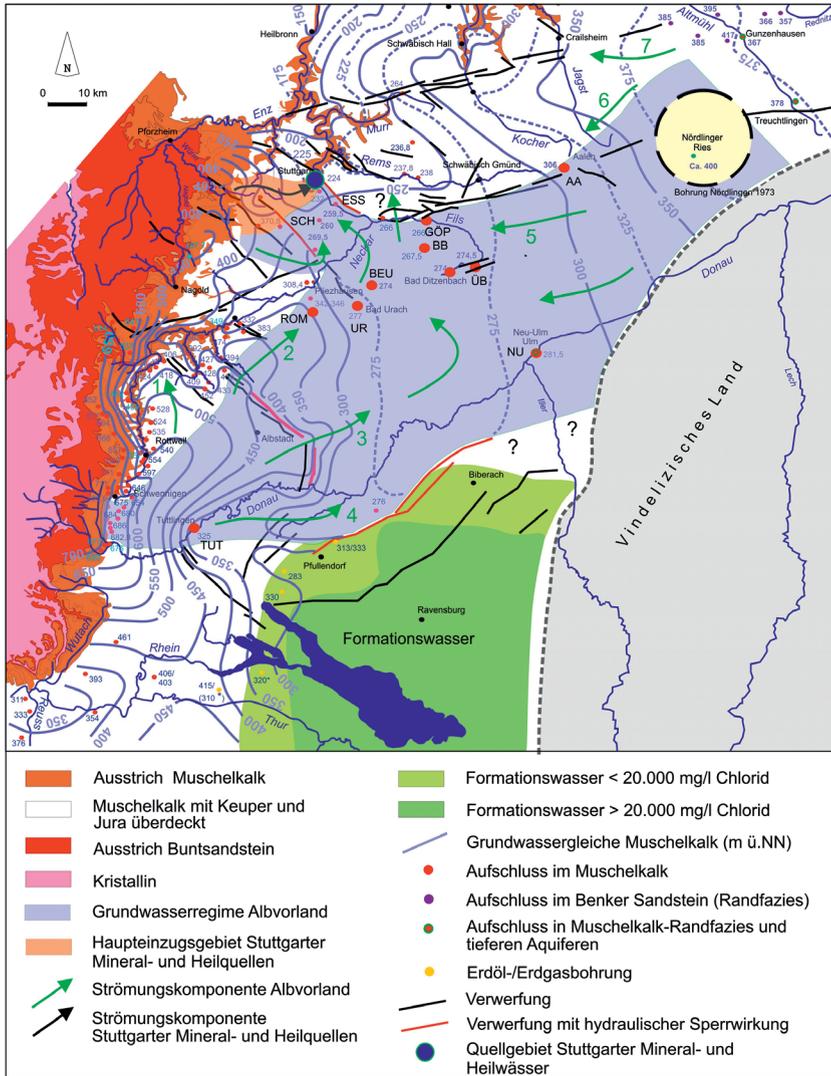


Abb. 3: Grundwasserströmungsbild für den Oberen Muschelkalk. Das Strömungsregime „Albvorland“ ist blau hinterlegt. Grundwasserstandsdaten der Tiefbohrungen sind zahlreichen Veröffentlichungen entnommen, die in UFRUCHT (2018) detailliert aufgeführt sind. Der Verlauf der Grundwassergleichen im Bereich des Hohenzollern- und Lauchertgrabens ist hypothetisch und berücksichtigt dessen partielle Staufunktion, die aus den Versatzbeträgen der Störungen geschlossen wird. Abkürzungen der Brunnenbezeichnungen siehe Tab. 1.

Heil- und Mineralquellen westlich von Stuttgart im Oberen Gäu um Sindelfingen neugebildet. Dieser strömt von dort aus quer zu den Fildergraben-Störungen bis in das Cannstatter Becken (PLÜMACHER 1999; UFRICHT 1994).

Der Buntsandstein zeigt mit einem generellen Abstrom von der Ausstrichsfläche nach Osten und Nordosten ein ähnliches Bild der Grundwasserströmung wie der Muschelkalk. Nahe den Neubildungsflächen besteht zwischen Muschelkalk und Buntsandstein noch eine hohe Druckdifferenz mit nach unten gerichtetem Druckgradienten. Im Bildungsraum der hochkonzentrierten Muschelkalkwässer ist mit zwei Bohrungen im Fildergraben eine Druckumkehr und mit einer Bohrung im östlichen Albvorland ein Druckausgleich festzustellen.

Die genannten Grundwasserfließkomponenten in den Teilbereichen unterscheiden sich in ihrer Altersstruktur. Abgeleitet aus Edelgasgehalten und Sauerstoffisotopenwerten des Wassers, ausgedrückt als sogenannte  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte, enthalten die Tiefengrundwässer im westlichen Strömungsregime eine kaltzeitliche Komponente, die sehr wahrscheinlich in der ausgehenden Würm-Eiszeit nach dem Hochglazial, das heißt vor weniger als 17.000 Jahren, neugebildet wurde (UFRICHT 2018). In der Spätphase des Pleistozäns setzte mit der Klimaerwärmung und der Begünstigung der Neubildungsbedingungen längs des Muschelkalkausstrichs eine bedeutende Auffüllung des Grundwasserkörpers ein. Seither erfolgt ein umfangreicher Nachstrom jüngerer Grundwassers. Die Wässer im östlichen Albvorland sind insgesamt älter. Sie enthalten neben einer pleistozän-kaltzeitlichen Komponente zwar ebenfalls eine „warmzeitliche“ Komponente. Diese ist aber in Anbetracht der komplexen Alimentation voraussichtlich in einem prä-würmzeitlichen Interglazial entstanden und ist damit deutlich älter als die des westlichen Albvorlands.

#### 2.4 Beschaffenheit des Grundwassers

In den Neubildungsräumen des Oberen Muschelkalks treten geringmineralisierte Karstwässer auf, die allenfalls durch gelösten Keupergips beeinflusst sind. Demgegenüber kommen im Cannstatter Becken (Stuttgarter Mineral- und Heilquellen), im nach Süden anschließenden Fildergraben sowie im Albvorland hochmineralisierte und zum Teil kohlensäureführende Mineralthermen mit gelösten Feststoffgehalten bis 8,5 g/l vor, die vor allem durch die Evaporitminerale Calciumsulfat und Natriumchlorid geprägt sind. Gemessen an der Chloridkonzentration ist der hydrochemische Kontrast zwischen den gering- und hochmineralisierten Wässern sehr groß und verändert sich stark auf kurzer Distanz. Die Wässer im westlichen Albvorland sowie im Fildergraben und Cannstatter Becken (überwiegend  $\text{Na-Ca-Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$ ) weisen mit einem  $\text{Na/Cl}$ -Verhältnis von 1 auf den Kontakt mit Steinsalz hin. Ein Ungleichgewicht zugunsten von Natrium ( $\text{Na/Cl}$ : 1,4 bis 3,3) ist in den Wässern im östlichen Albvorland feststellbar (ohne Bad Ditzgenbach; überwiegend  $\text{Na-Ca-SO}_4\text{-Cl}$  bis  $\text{Ca-Na-SO}_4$ ). Gegenüber den Wässern im westlichen und zentralen Albvorland sind die Chloridgehalte deutlich verringert. Ihnen fehlt die originäre Salinarkomponente.

In Ergänzung zur räumlichen Verteilung der Chloridkonzentration im Oberen Muschelkalk (Abb. 4) wird in Abb. 5 die hydrochemische und isotopische Entwicklung des Wassers im Muschelkalk des Albvorlands entlang einer Transekte dargestellt. Die hydrochemischen Parameter Chlorid und Sulfat zeigen vor allem im westlichen Zustrom eine sprunghafte Aufkonzentrierung, die entlang der Schnittspur im zentralen Albvorland zwischen Bad Urach und Bad Boll ihr Maximum erreicht. Ein darüber hinausgehender Anstieg der Werte erfolgt im Fildergraben in Strömungsrichtung längs der Talwegzone, das heißt quer zur Schnittspur in Abb. 5. Die Sulfatkonzentration verbleibt im östlichen Albvorland auf hohem Niveau und verringert sich erst nach Oberstrom im Gebiet des

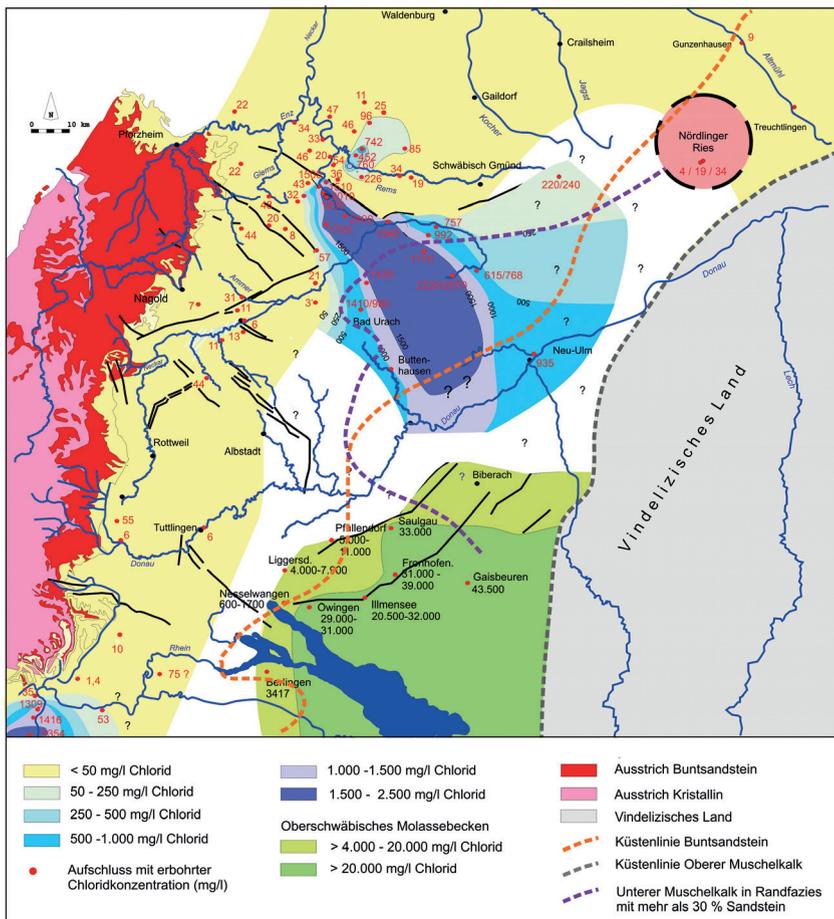


Abb. 4: Chlorid-Verteilung im Oberen Muschelkalk im Fildergraben, Albvorland und unter der Schwäbischen Alb. Formationswasser im oberschwäbischen Molassebecken nach BERTLEFF et al. (1988), STÖBER et al. (2013) und STÖBER (2014).

Nördlinger Rieses (Gunzenhausen). Die Chloridkonzentration nimmt bis dorthin signifikant ab. Auch das Edelgasisotop Helium-4 (<sup>4</sup>He) sowie das Strontiumisotopenverhältnis <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr zeigen eine analoge Entwicklung (vgl. Kap. 2.5).

### 2.5 Stockwerksverbindungen und Mineralisierungsprozess

Die für die Aufkonzentrierung verantwortlichen Evaporitminerale Natriumchlorid und Calciumsulfat stammen nicht aus dem Oberen Muschelkalk. Sofern die

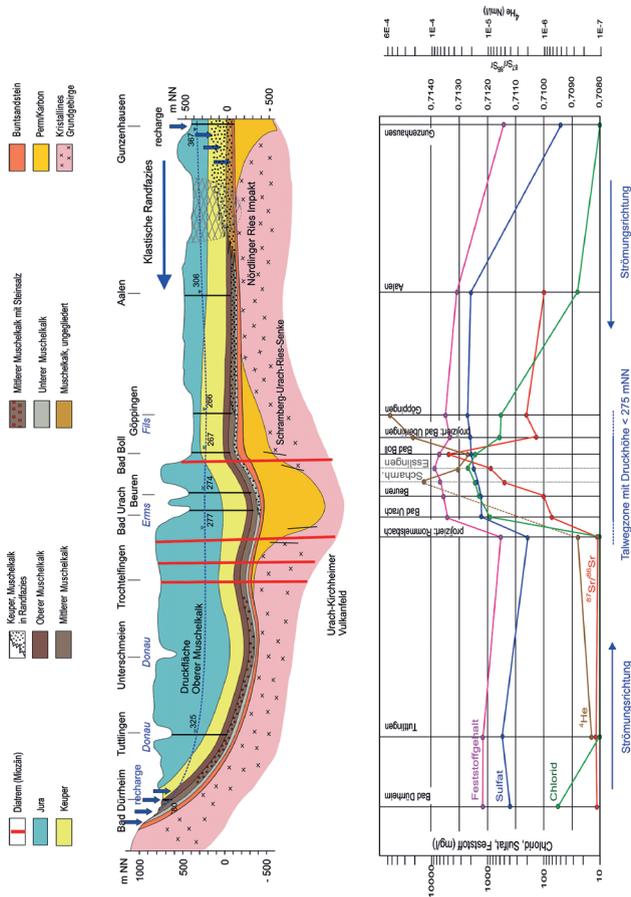
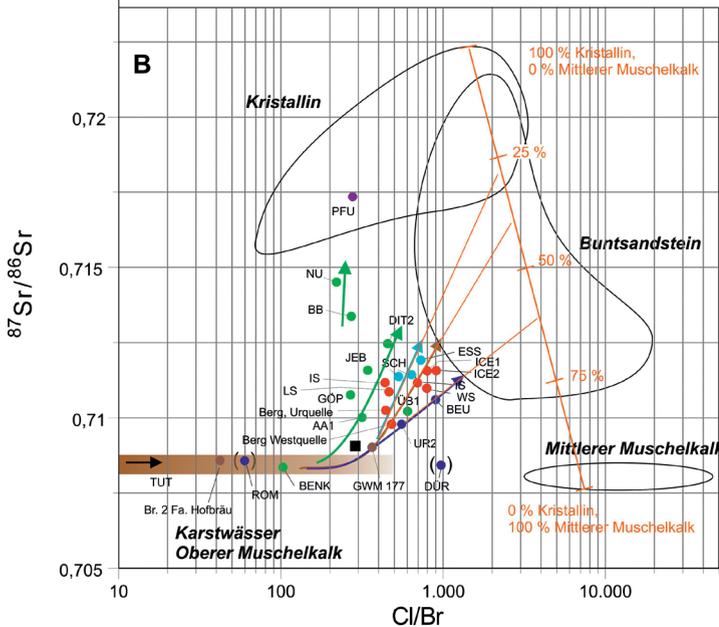
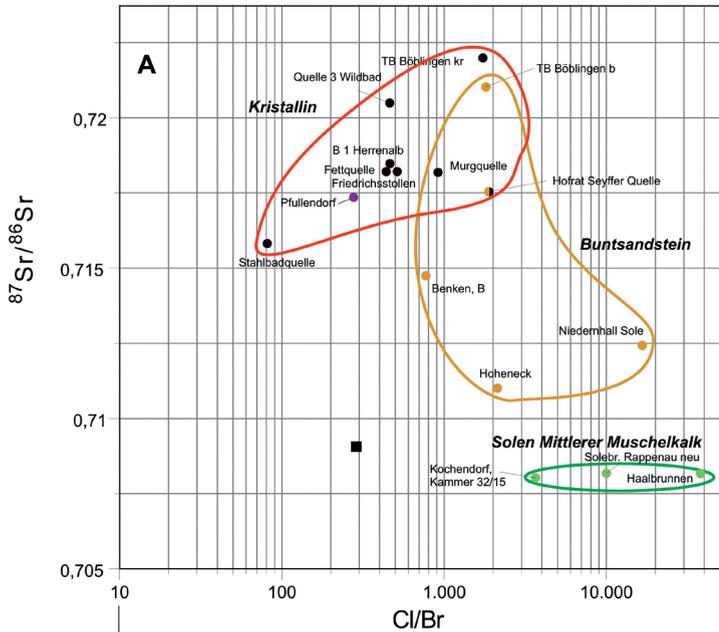


Abb. 5: Geologischer Längsschnitt vom Muschelkalk-Austrich bis östlich des Nördlinger Rieses mit Informationen zur Hydrochemie und Isotopie des Tiefen Grundwassers im Oberen Muschelkalk. Die Schnittspur ist jeweils in Richtung der Grundwasserströmung angelegt (beachte gegenläufige GW-Strömung im westlichen und östlichen Albvorland). Außerhalb der Schnittspur liegende Aufschlüsse (TB Scharnhausen, Br. Merkel-Bad) sind in den Schnitt hineinprojiziert (grau markiert).

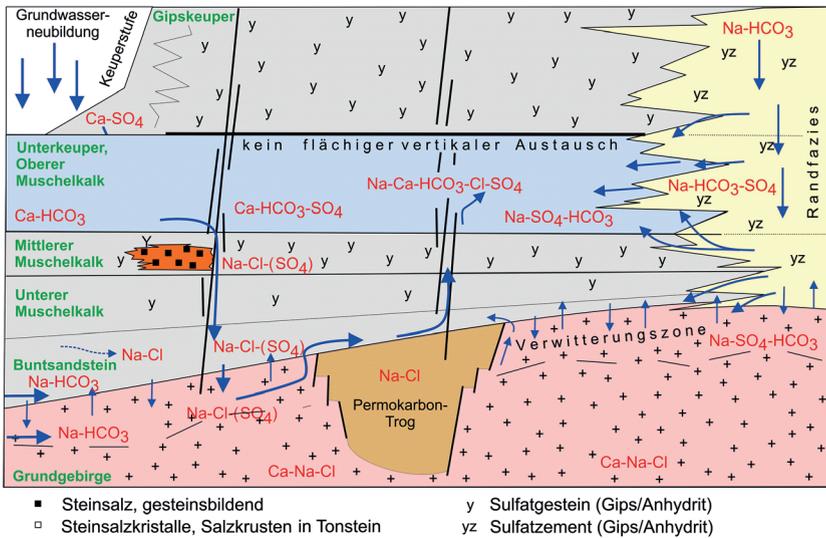
stratigraphische Herkunft dieser ortsfremden Evaporitminerale eruierbar ist, kann auf Stockwerksinteraktionen geschlossen werden. Daraus sind wiederum Druckgradienten ableitbar, die für den Transport des gelösten Stoffbestands in den Oberen Muschelkalk vorauszusetzen sind. Diese hydraulischen Daten fehlen mangels Aufschlüssen. In grober Auflösung ist erkennbar, dass nahe der Neubildungsflächen zwischen Muschelkalk und Buntsandstein noch eine hohe Druckdifferenz mit nach unten gerichtetem Druckgradienten besteht. Für den Bildungsraum der hochkonzentrierten Muschelkalkwässer deuten zwei Bohrungen im Fildergraben eine Druckumkehr an (mit nach oben gerichteten Druckgradienten) und eine Bohrung im östlichen Albvorland einen Druckausgleich.

Um Austauschvorgänge zu erkennen und konkret auf die Herkunft der zugemischten Komponenten zu schließen, helfen formationspezifische Tracer (hier  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Isotope des gelösten Strontiums sowie Elementverhältnisse Cl/Br) weiter, die beim Kontakt des Wassers mit Mineralen in Lösung gehen und so das an der Untergrundpassage teilhabende Wasser markieren. Sie hinterlassen dadurch einen auswertbaren „Fingerabdruck“ ihrer Herkunft. Kristallin- und Salinargesteine und die mit diesen in Kontakt stehenden Wässer unterscheiden sich sowohl im Cl/Br-Verhältnis als auch in der Sr-Isotopensignatur (UFRECHT & HÖLZL 2006) signifikant. Die Kombination von Hydrochemie (Cl/Br-Verhältnis) und Isotopie ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) erzeugt im Cross-Plot in Abb. 6 das Bild, dass die Stuttgarter Heilquellen samt den im Süden folgenden Tiefengrundwässern dem Einfluss des Steinsalzes aus dem Mittleren Muschelkalk unterliegen. Daraus ist zu folgern, dass oberstromig der salinar geprägten Mineralthermen nach der Tiefe gerichtete Druckgradienten vorherrschen müssen, um eine Verlagerung von gelöstem Steinsalz bis in den Buntsandstein bzw. das Kristallin zuzulassen. Unter den gegebenen Überdeckungen ist eine Ablaugung allenfalls an den Rändern der Salzverbreitung denkbar, sowie an Kontaktbereichen von Verwerfungen mit Steinsalz. Im Hohenzollern-Lauchertgraben-System steht durch den vertikalen Versatz bereichsweise Mittlerer Muschelkalk mit Steinsalz (Hochscholle) neben wasserführendem Oberem Muschelkalk (Graben-Tiefscholle). Das über diesen zugeführte Wasser kann in diesen Bereichen Steinsalz lösen und bei nach unten gerichtetem Druckgradienten entlang der Störung in das Liegende abführen (Abb. 7). Diese Salinarkomponente ist zweifellos ein wichtiges Glied für die Entwicklung des Gesamtlösungsinhalts und des hydrochemischen Charakters dieser hochmineralisierten Wässer. Darüber hinaus zeigt der Cross-Plot aber auch

**Abb. 6:** Cross-Plot von  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Isotopendaten und Chlorid/Bromid-(Cl/Br)-Verhältnissen. A: Wässer aus dem Kristallin, Buntsandstein und Mittleren Muschelkalk. B: Wässer Oberer Muschelkalk (Stuttgart und Umgebung, westliches und östliches Albvorland, Fildergraben). In orange sind potenzielle Mischungslinien dargestellt zwischen den tiefen Aquiferen unterhalb des Oberen Muschelkalks sowie zwischen den tiefen Aquiferen und dem Oberen Muschelkalk. Aufschluss-Abkürzungen vgl. Tab. 1.



- Kristallin
- Buntsandstein
- Mittlerer Muschelkalk
- Wertebereich Karstwässer Oberer Muschelkalk
- mo: Östliches Albvorland
- mo: westliches Albvorland
- mo: Stuttgart und Umgebung
- mo: Fildergraben
- mo: Heilquellen Stuttgart und hochkonz. Wässer
- mo: Molassebecken
- Meerwasser
- ( ) Cl/Br-Verhältnis unsicher



**Abb. 7:** Hydrochemische Entwicklung der hochkonzentrierten Tiefengrundwässer im Oberen Muschelkalk des westlichen und östlichen Albvorlands (Prinzipschnitt). Die Schnittachse ist in W-E-Richtung orientiert, der geologische Aufbau ist stark schematisiert. WA: Muschelkalk-Tiefengrundwässer im westlichen Albvorland; ÖA: Muschelkalk-Tiefengrundwässer im östlichen Albvorland.

klar die Mitwirkung einer kristallinen Komponente, da die hohen Sr-Isotopenwerte der Muschelkalkwässer nur aus Reaktionen mit  $^{87}\text{Sr}$ -reichen Mineralspezies im Kristallin ableitbar sind. Somit sind für alle hochkonzentrierten Wässer im Oberen Muschelkalk Komponenten aus Aquiferen im Liegenden nachweisbar. Daraus ist zu schließen, dass im Bildungsraum der hochkonzentrierten Wässer eine Druckumkehr bestehen muss, um damit einen Aufstieg der Wässer aus den Liegendaquiferen bis in den Oberen Muschelkalk als *cross formation flow* zu ermöglichen (UFRECHT & HÖLZL 2006). Dabei ist der Ort des Austausches unbekannt. Das Gebiet mit Druckumkehr dürfte am ehesten mit der sich im Muschelkalk-Grundwassergleichenplan abbildenden Talwegzone konvergieren. Hier liegt die Druckhöhe im Oberen Muschelkalk tief, wodurch es zu einer Unterschneidung der Druckhöhen der tieferen Stockwerke kommen kann. Aufgrund des hohen hydrochemischen Kontrasts zwischen den tiefen Stockwerken und dem Oberen Muschelkalk ist zu erwarten, dass der Zustrom aus dem Liegenden gegenüber dem Umsatz im Oberen Muschelkalk insgesamt klein ist. Die hoch mineralisierten Na-Cl-Wässer im Buntsandstein erreichen bis 30 g/l Lösungsinhalt.

Wie bei den Tiefengrundwässern im Albvorland ist auch bei den Stuttgarter Heilquellen die Aufkonzentrierung dem Prozess des *cross formation flow* unterworfen, der aber in beiden Gebieten unabhängig voneinander stattfindet. Die

Bildungsbedingungen der Stuttgarter Heilquellen und dortigen hochkonzentrierten und gasreichen Wässer sind nicht an den Zustrom hochmineralisierten Wassers aus dem Albvorland gebunden.

Auch der Bildungsort der in den hochmineralisierten Muschelkalkwässern eingelösten Gase (Kohlensäure, Spurengase wie zum Beispiel Helium, He), der anhand der spezifischen Isotopenverhältnisse  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  und  $^3\text{He}/^4\text{He}$  größtenteils im Oberen Erdmantel lokalisiert wird (GRIESSHABER 1990; GRIESSHABER et al. 1992; UFRICHT 2006b), liefern Hinweise auf tiefreichende Migrationspfade mit örtlich für Gas und Wasser durchlässigen vertikalen Wegsamkeiten. Als linear oder punktuell hydraulisch wirksame Strukturen kommen sowohl die zum Teil seismotektonisch aktiven sinistralen Scherflächen als auch die ca. 360 Schlotte des Urach-Kirchheimer Vulkangebiets in Frage. Ungeachtet dessen verhindert bzw. limitiert die sehr geringdurchlässige Ton-Anhydrit-Fazies im Unteren und Mittleren Muschelkalk den vertikalen Austausch in der Fläche. Er ist erst im Verbreitungsraum der Sandstein-Tonstein-Randfazies (Benk-Formation) möglich, die sich im Unteren und Mittleren Muschelkalk vom Vindelizischen Hochland nach Westen und Nordwesten bis in das Albvorland erstreckt.

### 3. NUMERISCHE MODELLIERUNG

Mit dem vorliegenden Hydrogeologischen Modell ist trotz der zu berücksichtigenden beachtlichen Raum- und Zeitskala und der unterschiedlichen Datenqualität eine in sich konsistente System- und Prozessvorstellung für das Gebiet zwischen Stuttgart und dem oberschwäbischen Molassebecken entwickelt worden. Mit dem numerischen Grundwassermodell erfolgt nun der zweite Schritt im Modellbildungsprozess. Er konzentriert sich auf die quantitative Umsetzung des Hydrogeologischen Modells und kann so für die Berechnung der Grundwasserströmung, des Wasser- und Stoffaustauschs zwischen den Grundwasserstockwerken sowie für die Bilanzierung des Grundwasserhaushalts eingesetzt werden. Im numerischen Modell muss eine weitere Abstrahierung der tatsächlichen komplexen hydrogeologischen Prozesse erfolgen. Hier spielen Skaleneffekte und die Interpretation von gemessenen Punktinformationen eine wichtige Rolle. Gerade bei überregionalen Betrachtungen in tiefen Aquifersystemen muss eine individuelle Bewertung der einzelnen Messwerte, die naturgemäß nur spärlich verteilt sind, erfolgen. So können einzelne Messwerte, wie zum Beispiel Piezometerhöhen, die Größenordnung der Strömungsverhältnisse anzeigen. Die genaue Abbildung der Messwerte im numerischen Modell ist dagegen nicht notwendig. Hier sind Toleranzen zulässig, die von der Betrachtungsskala und der Datenart abhängen.

Nach seinem Aufbau wird das numerische Modell unter Berücksichtigung der oben genannten Faktoren einer Modellkalibrierung unterzogen und mit zusätzlichen Informationen getestet. Im vorliegenden Fall werden Strömungsinformationen in Form von gemessenen Piezometerhöhen und Transportdaten als gemessene Chloridwerte verwendet. Im Rahmen der Modellkalibrierung und Modelltestung wurden folgende Abweichungen zwischen Messung und Rechnung als tolerabel angesehen:

- mittlere Abweichung der Piezometerhöhen entsprechend einem Prozent des Piezometerhöhenunterschieds im Betrachtungsraum,
- Abweichung der gemessenen von den berechneten Chloridkonzentrationen, so dass die berechneten Werte zum Beispiel innerhalb der jeweils gemessenen Zehnerpotenzen liegen und zusätzlich die gemessene Struktur der Chloridverteilung im Modell abgebildet wird.

Damit werden zur Steigerung der Aussagenschärfe und Prognosefähigkeit des numerischen Modells Strömungs- und Transportinformationen ganzheitlich berücksichtigt, so dass sich eine konsistente Interpretation der regionalen Grundwasserströmung ergibt.

Im Jahr 1999 wurde von PLÜMACHER (1999) erstmals ein numerisches Grundwassermodell vorgelegt, das die großräumige Grundwasserströmung im Oberen Muschelkalk im Großraum Stuttgart beschreibt. In den Folgejahren wurden unter räumlicher Ausdehnung nach Süden und Osten ergänzende hydrogeologische Untersuchungen durchgeführt (UFRECHT 2006a) und die numerische Modellierung fortgeschrieben (HANAUER & SÖLL 2006). Mit der Erweiterung des Modells auf tiefere Grundwassersysteme konnten fortan mit Fokus auf den Buntsandstein vertikale Vorgänge des Wasseraustauschs beschrieben werden. Das nunmehr aktuelle numerische Modell (JUSTIZ & LANG 2018) beruht auf einem kombinierten Strömungs- und Transportansatz, bei dem die Grundwasserströmung und der vertikale Grundwasseraustausch zwischen Buntsandstein und Oberem Muschelkalk mittels Transportbetrachtungen des Parameters Chlorid überprüft werden.

Das Grundwassermodell berücksichtigt die beiden hydrogeologischen Einheiten des Muschelkalk-Aquifers und des Buntsandsteins. Letzterer steht als „Tiefes System“ stellvertretend für den Buntsandstein und das daran angebundene kristalline Grundgebirge. Insgesamt lässt sich das Fließsystem im Oberen Muschelkalk durch geologische und hydraulische Ränder, das heißt vorflutwirksame Oberflächengewässer, Begrenzungslinien der Schichtausbisse, Küstenlinie zum Vindelizischen Land, „dichte“ Verwerfungen mit hohem Fließwiderstand, begrenzen. Diese Modellausdehnung ist in Abb. 8 dargestellt. Die Modellränder sind wie folgt definiert:

Westen	natürliche Verbreitung des Oberen Muschelkalks (westliche Begrenzung des Schichtausbisses) >> undurchlässige Ränder ( <i>no flow</i> ),
Südwesten	Grundwasserscheide südlich Schwenningen – Tuttlingen >> undurchlässiger Rand ( <i>no flow</i> ),
Süden	lateral dichte Verwerfungen (Saulgauer und Hochbühl-Fronhofer Verwerfung) >> undurchlässiger Rand ( <i>no flow</i> ),
Südosten	Küstenlinie des Vindelizischen Landes entspricht südöstlicher Verbreitungsgrenze des Muschelkalks >> undurchlässiger Rand ( <i>no flow</i> ),
Osten	Grundwasserscheide in der Benk-Formation im Gebiet Treuchtlingen – Gunzenhausen >> undurchlässiger Rand ( <i>no flow</i> ),



Norden Verlauf von Enz, Neckar und Rems als Vorfluter für den Oberen Muschelkalk. Norden westlich des Neckars: Die Enz bildet in diesem Raum den Modellrand. Hier wurde eine Leakage-Randbedingung angesetzt. Damit wird im Muschelkalk der Abfluss in die Enz und im Buntsandstein der unterirdische Abfluss nach Norden simuliert. Im Norden östlich des Neckars: Zwischen Backnang und Neckar findet im Buntsandstein ein unterirdischer Abstrom nach Norden statt. Dieser wird ebenfalls über eine Leakage-Randbedingung simuliert. Westlich von Backnang folgt der Modellrand einer angenommenen unterirdischen Wasserscheide >> undurchlässiger Rand (*no flow*).

Neben den Randbedingungen an den Modellrändern sind für die Strömungsmodellierung noch folgende Randbedingungen im Modellgebiet definiert:

- Im Ausstrichbereich des Muschelkalks und des Buntsandsteins ist eine Grundwasserneubildung aus Niederschlag als flächige Randbedingung implementiert. Im östlichen Modellraum findet eine geringe Zusickerung aus den hangenden Stockwerken statt. Diese ist mit 0,2 mm/a anhand einer abgeschätzten Durchlässigkeit von ca.  $10^{-9}$  l/s für die Überdeckung und einem Gradienten in der Größenordnung von 0,5 ermittelt.
- In der instationären Strömungsmodellierung sind die Grundwasserentnahmen aus 17 Tiefbrunnen berücksichtigt, die zwischen 1970 und 2007 in Betrieb genommen wurden. Dadurch ist es möglich, die langfristige Ausbreitung der Absenkungsvorgänge des Grundwasserspiegels im Modell zu berücksichtigen.

Die Ausdehnung der zweiten Modellschicht wurde im Osten identisch mit der im Muschelkalk-Aquifer und im Westen entsprechend dem Buntsandsteinausstrich angesetzt. Im Osten ist zwar der Buntsandstein nicht abgelagert worden, dafür übernimmt dort das Kristallin (mit dessen oberem aufgewitterten bzw. aufgelockerten Bereich) die Aquiferfunktion. Der vertikale Austausch zwischen beiden Modellschichten wird über einen Leakage-Ansatz simuliert.

### 3.1 Strömungsmodellierung

Für die numerische Modellbetrachtung wurde das vom United States Geological Survey entwickelte Programmsystem MODFLOW verwendet. Die Modellbetrachtung für Muschelkalk und Buntsandstein wurde unter der Annahme konstanter Temperatur und Dichte – und folglich auch konstanter Viskosität des Wassers – durchgeführt. Die Temperaturunterschiede betragen 24 bis 54 °C im Modellgebiet. Bei 54 °C ist die Viskosität in etwa halb so groß und damit die Durchlässigkeit doppelt so groß wie bei 24 °C. In einer Sensitivitätsbetrachtung konnte aufgezeigt werden, dass diese Unterschiede jedoch nur einen geringen Einfluss auf die Piezometerhöhen haben.

Das bestehende stationäre Strömungsmodell von HANAUER & SÖLL (2006) wurde überarbeitet und hinsichtlich instationärer Prozesse infolge der Grundwasser-

entnahmen im Albvorland erweitert. Durch kontinuierliche Entnahmen nimmt die Ausdehnung der Absenkungstrichter langsam zu und führt im gespannten Aquifer zu einem Absinken der Piezometerhöhen bis stationäre Verhältnisse erreicht werden. Es ist davon auszugehen, dass diese auch nach mehreren Jahren nicht erreicht sind. Für den Vergleich der gemessenen mit den berechneten Piezometerhöhen muss mit einer instationären Berechnung die gegenseitige Beeinflussung berücksichtigt und das gemessene Ruhewasserpotenzial kurz vor Beginn der Inbetriebnahme im Modell ausgewertet werden. Die in Abb. 9 beispielhaft dargestellten, berechneten Ganglinien an den Brunnen im Muschelkalk zeigen, dass die Entnahmen eine deutliche Veränderung der Piezometerhöhen im Aquifer bewirken und es zu Absenkungen von bis zu 10 Metern im Zeitraum der anthropogenen Beeinflussung kommt. Die Potentiale der stationären Berechnung, die für die Situation vor dem Beginn der Entnahmen steht und die Startverteilung darstellt, sind teilweise deutlich höher als zum Zeitpunkt der Messung. Die instationäre Strömungssimulation wurde für die Kalibrierung der Piezometerhöhenverhältnisse verwendet. Da der Transport von Chlorid auf Zeitskalen abläuft, die mehrere tausend Jahre oder mehrere zehntausend Jahre betragen, ist die stationäre Lösung der Piezometerhöhen ohne Entnahme im Albvorland die Basis für die Betrachtungen des Chloridtransports.

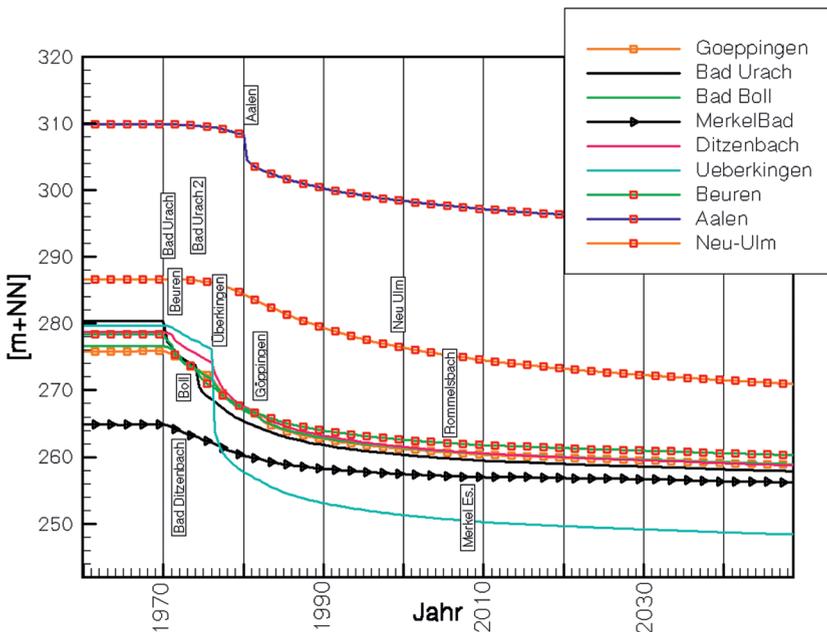


Abb. 9: Instationär berechnete Ganglinien der Piezometerhöhen an den Brunnen im Muschelkalk des Albvorlands.

### 3.1.1 Horizontale Durchlässigkeit

Gegenüber dem früheren Modell (HANAUER & SÖLL 2006) mussten bei der kombinierten Kalibrierung von Chloridtransport und instationärer Strömung auch die Durchlässigkeitsverteilung und die Verteilung des Leakagekoeffizienten zwischen den beiden Modellschichten modifiziert werden, um sowohl die gemessenen Piezometerhöhen als auch die Chloridkonzentrationen im Modell abbilden zu können. In der unteren Modellschicht hat sich die Bandbreite der Transmissivitäten generell etwas verringert. In der oberen Modellschicht wurden die Bereiche mit geringen Transmissivitäten zwischen der Donau bei Sigmaringen/Albstadt und Reutlingen/Urach entfernt. Die im Stadtgebiet Stuttgart im Zuge der Modellierungen für MAGPlan entwickelte Transmissivitätsstruktur (SPITZBERG & UFRECHT 2015; LANG & SCHÄFER 2015) wurde in das regionale Modell übertragen. Im Fildergraben sind höhere Durchlässigkeiten am östlichen Rand angesetzt worden. Dadurch ergeben sich durch die etwas tieferen Piezometerhöhen im Muschelkalk größere Aufstiege aus der unteren Modellschicht, die eine Erhöhung der Chloridkonzentration bewirken.

Mit der Neukalibrierung der horizontalen Transmissivität (Abb.10) ergibt sich eine Piezometerhöhenverteilung in den beiden Modellschichten, welche die gemessenen Piezometerhöhen adäquat abbildet.

### 3.1.2 Leakagekoeffizient und vertikaler Austausch

Um den vertikalen Austausch und damit den Aufstieg von chloridhaltigem Wasser im Modell nachbilden zu können, wurde der Leakagekoeffizient – definiert als Koeffizient aus vertikaler Durchlässigkeit und Schichtmächtigkeit – im Rahmen der weitergehenden Kalibrierung des Chloridtransports bestimmt. Der Aufstieg chloridhaltiger Wässer erfolgt an diskreten Strukturen. Dafür kommen Schlotte des Urach-Kirchheimer-Vulkangebietes sowie tektonische Scherzonen in Betracht. Die rund 360 Vulkanschlote werden nicht als Einzelelemente modelliert. Vielmehr wird die Umhüllende um den Schwerpunkt der Vulkanschlote als Zone erhöhter vertikaler Wegsamkeit betrachtet (sog. „Vulkanzone“, vgl. Abb.11 links). Den Scherzonen wird die Eigenschaft einer hohen Vertikaldurchlässigkeit und einer bis ins Kristallin reichenden Gebirgsdurchtrennung zugeschrieben. Wie die weitergehende Chloridkalibrierung gezeigt hat, führt die Kombination beider Strukturen zu einer Chloridverteilung im Muschelkalk, die der gemessenen entspricht. Die Verteilung des Leakagekoeffizienten als Ergebnis der Kalibrierung ist in Abb.11 (rechts) dargestellt.

### 3.1.3 Berechnung der Grundwasserströmung

Die berechneten Piezometerhöhenverteilungen für stationäre Strömungsverhältnisse und ohne Grundwasserentnahmen im Albvorland, welche die Basis für die Chloridtransportmodellierung darstellen, sind in Abb.12 links für den Buntsandstein bzw. das „Tiefe System“ und in Abb.12 rechts für den Muschelkalk-Aquifer dargestellt. In starker Vereinfachung verläuft die Grundwasserströmung im Muschelkalk einerseits von Südwesten in einem Bogen nach Norden

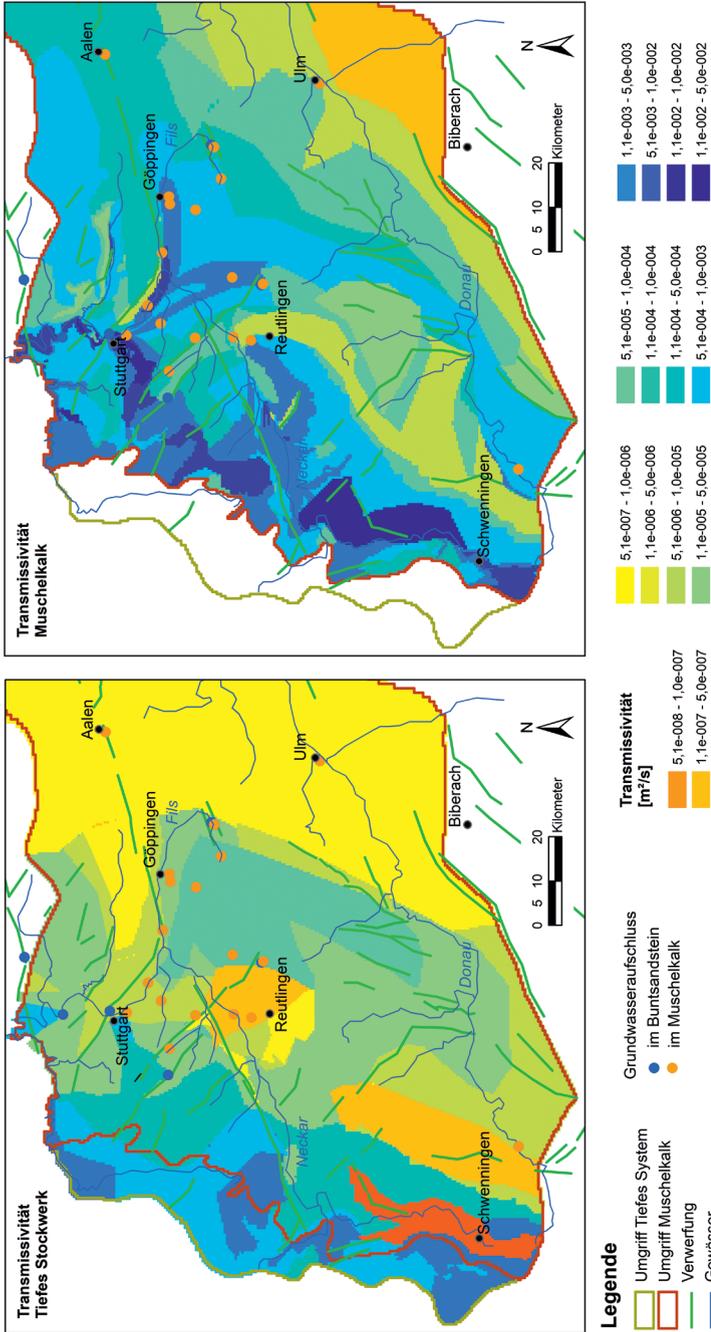


Abb. 10: Transmissivitätsverteilung nach erfolgter Strömungs- und Transportkalibrierung für die untere Modellschicht (links) und obere Modellschicht (rechts).

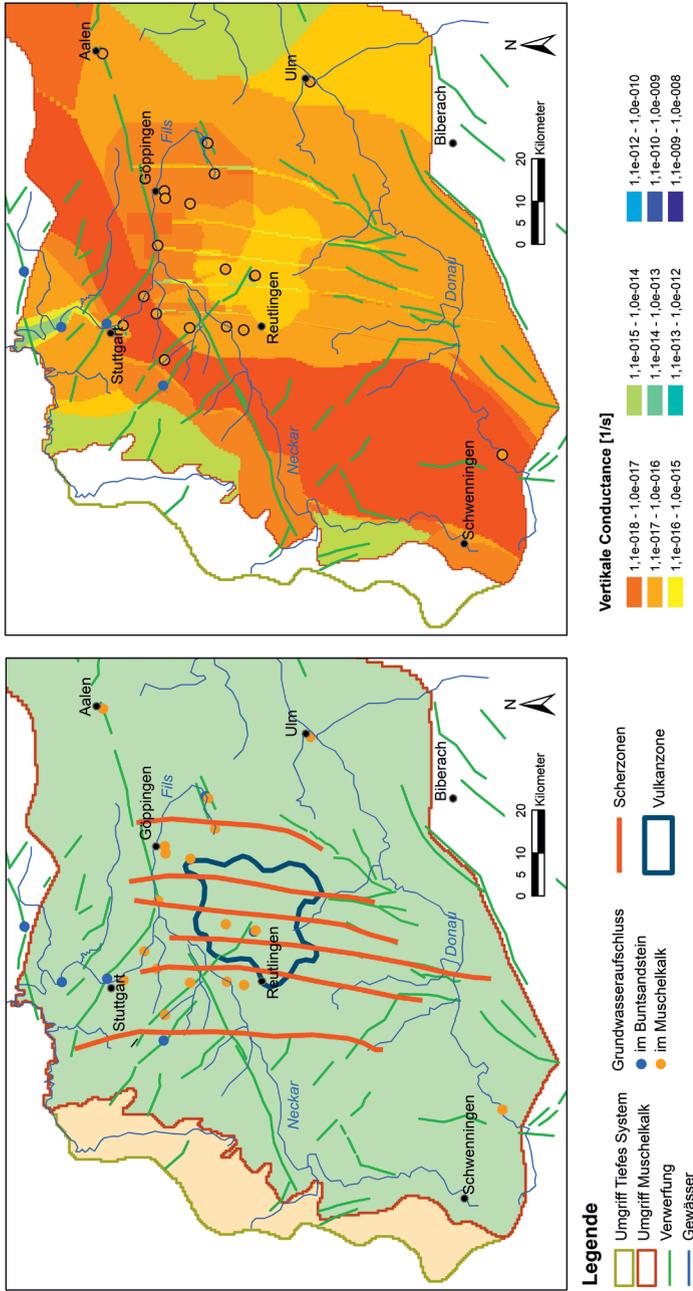


Abb. 11: Darstellung bevorzugter Vertikalverbindungen zwischen den Modellschichten über Scherzonen und die Vulkanzone (links) und Parametrisierung des vertikalen Austauschkoeffizienten (vertikale Conductance) in der Fläche (rechts) als Ergebnis der erneuten Strömungs- und Transportkalibrierung.

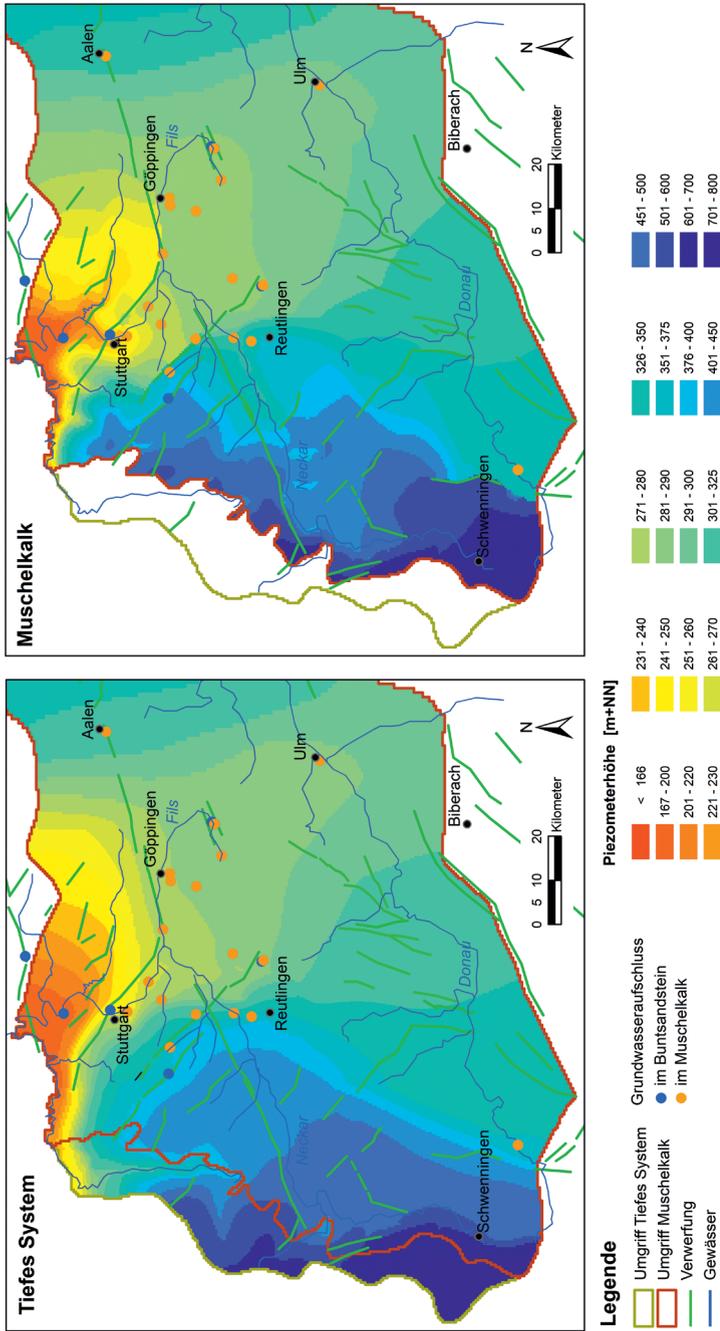


Abb.12: Stationär berechnete Piezometerhöhenverteilung (ohne Grundwasserentnahmen) im Tiefen System (untere Modellschicht, links) und Oberen Muschelkalk (obere Modellschicht, rechts).

und andererseits aus dem östlichen Modellraum nach Westen, dann ebenfalls in einem Bogen nach Norden auf den Fildergraben zu. Die höchsten Potenziale liegen am südwestlichen Modellrand im Raum Donaueschingen – Schwenningen vor und setzen sich längs des Muschelkalkausstrichs fort. Der südliche Modellrand ist eine Randstromlinie und somit undurchlässig. Die berechnete Piezometerhöhenverteilung zeigt ebenso wie die Interpretation von händisch konstruierten Grundwassergleichen, dass das Neubildungswasser aus dem südwestlichen Ausstrichgebiet einerseits zum Neckar im Raum Tübingen strömt und andererseits im Süden unter der Schwäbischen Alb in Richtung Fildergraben fließt. Eine zweite Fließkomponente gelangt von Nordosten kommend ebenfalls zum Fildergraben. Die Mineralquellen von Stuttgart-Bad Cannstatt erhalten damit einen südlichen Zustrom über den Fildergraben und einen westlichen, der aus dem nahegelegenen Muschelkalkausstrich zwischen Sindelfingen und Renningen stammt. Die hydrogeologische Interpretation der Fließkomponenten wird damit auch durch das Grundwassermodell bestätigt.

In Abb. 13 links sind die Differenzen der Piezometerhöhen zwischen Muschelkalk und Buntsandstein für stationäre Verhältnisse ohne Entnahmen dargestellt. In den gelbrot markierten Bereichen ergeben sich Differenzen mit prinzipiell nach oben gerichteten Druckgradienten, das heißt mit potenziellem Grundwasseraufstieg vom tieferen Stockwerk in das höhere. In blauen Bereichen ist die vertikale Piezometerhöhendifferenz so gerichtet, dass die Gradienten nach unten zeigen, das heißt Grundwasserabstiege möglich sind. Allerdings wird die Größe der Auf- und Abstiege vor allem durch den Leakagekoeffizienten bestimmt. Im Gebiet der Steinsalzverbreitung im Mittleren Muschelkalk steigt quasi kein Grundwasser auf, da hier der Leakagekoeffizient sehr klein ist. Die Bereiche mit aufsteigenden Verhältnissen liegen östlich Tuttlingen sowie östlich des Hohenzollern-Grabens und erstrecken sich über das zentrale Albvorland bis in den Fildergraben bei Stuttgart. Auch der Neckar Richtung Tübingen ist ein Bereich mit potenziellem Aufstieg von Grundwasser. Weiße Bereiche weisen eine sehr geringe vertikale Piezometerhöhendifferenz kleiner als 2,5 m auf. Bei Bad Urach ist ein Rücksprung der Piezometerhöhen im Buntsandstein aufgrund der nach Norden zunehmenden und nach Westen sehr geringen Transmissivitäten zu erkennen. In Abb. 13 rechts sind die vertikalen Austauschraten zwischen Muschelkalk und Buntsandstein dargestellt. Sie ergeben sich aus der Kombination der Piezometerhöhendifferenz zwischen den beiden Modellschichten und dem Leakagekoeffizienten. Westlich des Gebiets mit Steinsalz im Mittleren Muschelkalk ist die Piezometerhöhe im Buntsandstein tiefer als im Muschelkalk. Hier sinkt Grundwasser ab und fließt im Buntsandstein nach Osten, wo es im Bereich der angedeuteten Talwegscheide wieder in den Oberen Muschelkalk aufsteigt. Kleinere Bereiche mit Aufstiegen westlich der Salinarzone finden sich im Bereich des Neckars westlich Tübingen und im Stadtbereich von Stuttgart, das heißt in der Verlängerung des Fildergrabens. Der Raum zwischen Tuttlingen und Esslingen bietet generell höhere Piezometerhöhen im tiefen Stockwerk und damit die Möglichkeit für Grundwasseraufstiege. Da die Umsätze im Tiefen Stockwerk al-

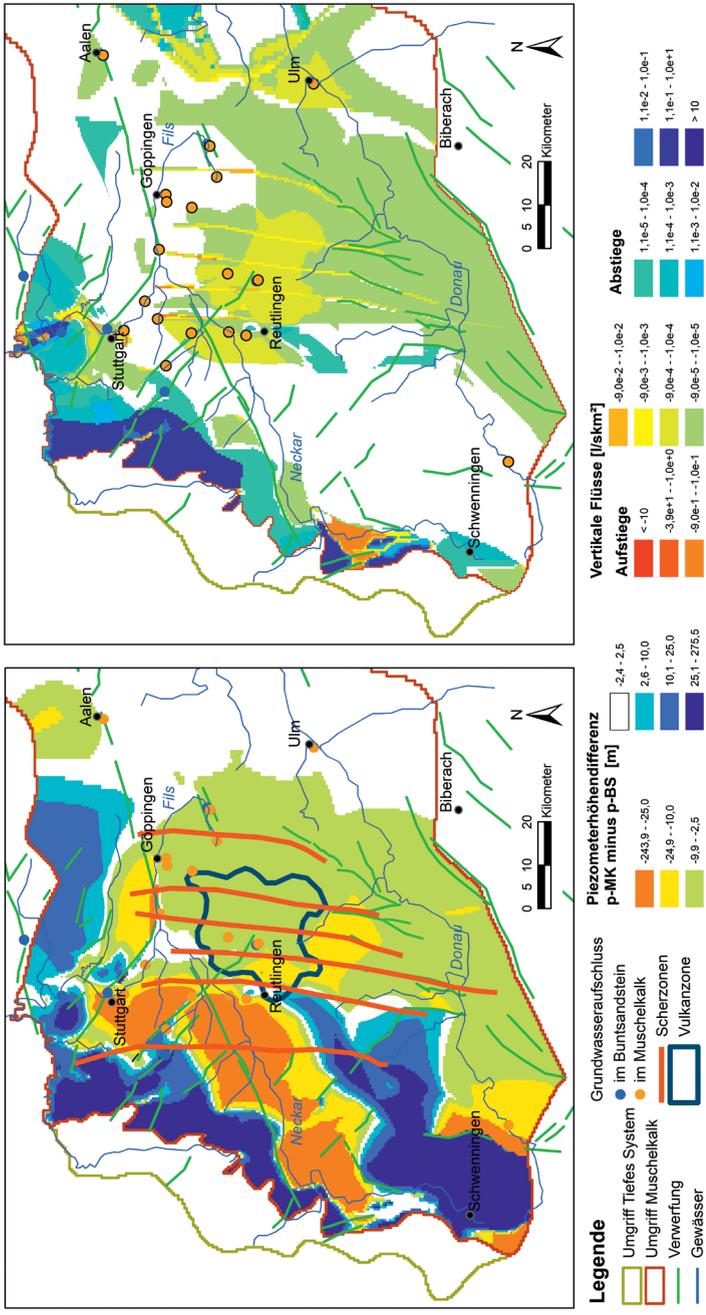


Abb. 13: Stationär berechnete Piezometerhöhendifferenzen zwischen Muschelkalk und „Tiefem System“ ohne Grundwasserentnahmen (links) und stationär berechnete vertikale Austauschraten zwischen „Tiefem System“ und Muschelkalk-Aquifer (rechts).

lerdings relativ gering sind, konzentrieren sich die Aufstiege an den höher durchlässigen, gestörten Bereichen. Diese Zonen sind in Abb. 13 rechts als Linien gemäß der Lage der Scherzonen und als Umhüllende um die Vulkanschlote (Abb. 13 links) zu erkennen.

### 3.1.4 Grundwasserbilanz

Mit Hilfe des Modells lässt sich für die Aquifersysteme im Untersuchungsraum eine Grundwasserbilanz aufstellen. Daraus wurden in Tab. 2 die das System bestimmenden Bilanzglieder bei stationärer Strömung ohne Grundwasserentnahmen im Albvorland zusammengestellt. Die wesentliche Eintragskomponente ist die Grundwasserneubildung. Sie beträgt fast  $21 \text{ m}^3/\text{s}$ . Davon erhält der Muschelkalkausstrich  $14,9 \text{ m}^3/\text{s}$  und der Buntsandsteinausstrich  $6,0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Der hauptsächliche Abfluss erfolgt über die Oberflächengewässer und den unterirdischen nördlichen Abstrom. Eine gute Möglichkeit der Bilanzkontrolle besteht über die Schüttung der gefassten Stuttgarter Heil- und Mineralquellen, die im Modell mit  $223 \text{ l/s}$  abgebildet wird. Die zur Quellschüttung hinzuzurechnenden „wilden Austritte“ in den Neckar sind als „Neckar-Anomalien“ (ARMBRUSTER et al. 1998) bezeichnet.

**Tab. 2:** Zu- und Abflüsse im Bilanzraum des Cannstatter Beckens für den Muschelkalkaquifer, erstellt mit dem numerischen Grundwassermodell (Angaben in  $\text{l/s}$ ).

Bilanzkomponente [ $\text{l/s}$ ]	Zufluss	Abfluss
Muschelkalk:		
Neubildung	128	
Abstrom (Nord-Ost)		97
Zustrom (Nord-West)	388	
Zustrom Fildergrabenrandverwerfung	9	
Zustrom über Fildergraben (Süd)	25	
Neckar-Anomalien		249
Mineralquellen (Bad Cannstatt), gefasst		223
Austausch mit Buntsandstein:	19	
Summe:	569	569

Interessant ist die Bilanz für den Detailbereich des Cannstatter Beckens (siehe Tab. 2). Die Abgrenzung dieses Bilanzbereichs ist in Abb. 14 dargestellt. Die Grundwasserneubildung aus Niederschlag auf den Muschelkalk bzw. das im Stuttgarter Talkessel aus dem Hangenden zusickernde Grundwasser beträgt  $128 \text{ l/s}$ . Die berechnete Schüttung an den gefassten Quellen beläuft sich auf  $223 \text{ l/s}$ . Zusätzlich besteht ein Abstrom von  $249 \text{ l/s}$  in den Neckar. Dieser liegt in der Größenordnung der in den Neckar-Anomalien gemessenen Mineralwasseraufstiege (ARMBRUS-

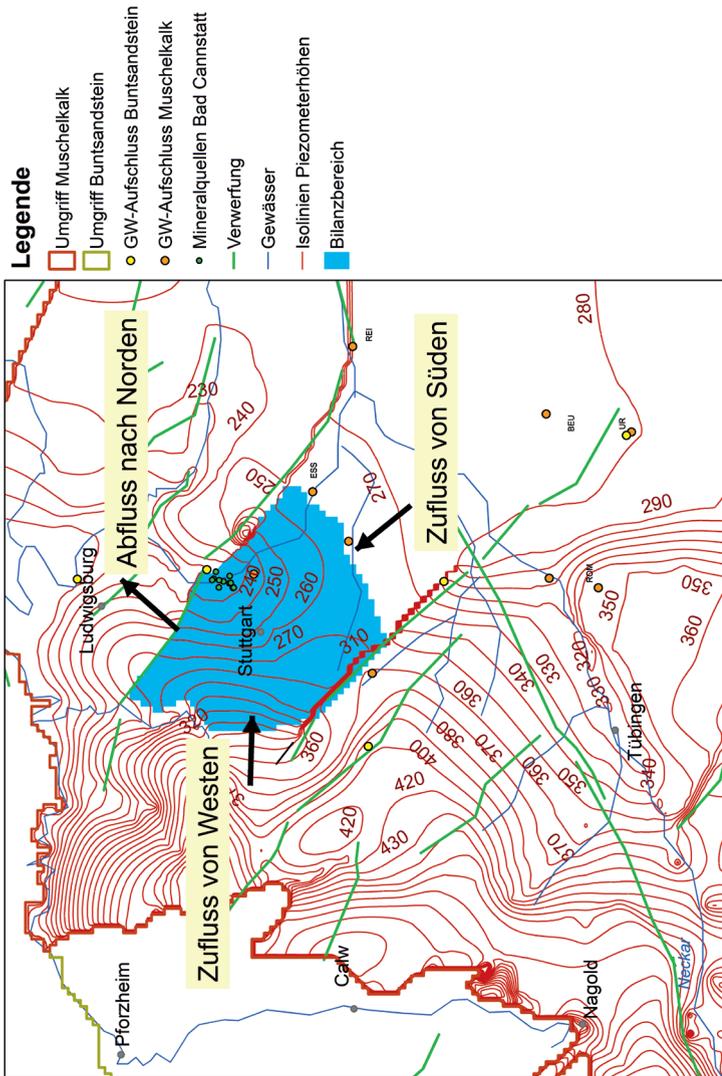


Abb. 14: Abgrenzung des Bilanzbereichs im Cannstatter Becken mit berechneten Grundwassergleichen im Muschelkalkaquifer.

TER et al. 1998). Der horizontale Zustrom von insgesamt 422 l/s in den Bilanzraum des Cannstatter Beckens erfolgt mit 388 l/s im Wesentlichen von Westen. Zusätzlich gelangen 9 l/s über die örtlich durchlässige Fildergrabenrandverwerfung in den Fildergraben. Die aus dem Albvorland zuströmende südliche Komponente im Fildergraben beläuft sich auf 25 l/s. Damit fließen insgesamt etwa 35 l/s über den Fildergraben bis ins Cannstatter Becken, unter der Annahme, dass keine Entnahmen im Albvorland erfolgen.

Der vertikale Zustrom aus dem Buntsandstein in den Muschelkalk beträgt im Stadtgebiet nur 19 l/s. Dieser reicht aber nach der Transportberechnung und ei-

ner händischen Mischungsrechnung (UFRECHT 2018) aus, um die Chloridkonzentration und damit die hydrochemische Charakteristik der Stuttgarter Heilquellen mit Wasser aus der unteren Modellschicht zu generieren.

### 3.2 Transportmodellierung

Das stationäre Strömungsmodell ohne Entnahmen im Albvorland wurde für den Chloridtransport mit einem Transportmodell ergänzt. Die Implementierung des Chloridtransports ist eine wesentliche Weiterentwicklung der bisherigen Modellbetrachtung, um eine konsistente Modellbeschreibung der Strömung und des Transports von Wasserinhaltsstoffen zu erhalten. Für die Herkunft des Chlorids im Oberen Muschelkalk wurden zwei Quellen identifiziert, nämlich einerseits stark chloridhaltige Wässer im Buntsandstein, die letztlich aus dem Kontakt mit Steinsalz im Mittleren Muschelkalk resultieren und in den Buntsandstein und tiefer abgesunken sind, sowie andererseits moderat chloridhaltige Wässer im gekoppelten Muschelkalk-Kristallinsystem (östliches Albvorland), deren gelöster Mineralstoffbestand überwiegend aus der Reaktion des Wassers mit Kristallin-Mineralien resultiert.

Zur Transportmodellierung wurde die Dispersion mit Null angenommen. Da allerdings durch die numerische Approximation eine numerische Dispersion entsteht, ist davon auszugehen, dass diese hier in der Größenordnung der Modelldiskretisierung liegt und damit bis zu 500 m beträgt. Die Porosität als zweiter relevanter Transportparameter spielt bei der räumlichen Ausdehnung einer stationären Chloridfahne keine Rolle.

Die Modellierung von Chloridaufstiegen entlang vertikal wegsamer Strukturen ist gebunden an:

- eine höhere Piezometerhöhe im unteren Aquifer (damit verbunden ist die Möglichkeit zum Abstrom in den oberen Aquifer),
- einen ausreichend hohen Leakagekoeffizienten,
- ausreichend hohe Durchlässigkeiten und Strömungsgeschwindigkeiten im Buntsandstein, um einen gewissen Grundwasserumsatz zu gewährleisten,
- hohe Chloridkonzentrationen im unteren Aquifer mit einem großen Konzentrationsgradienten gegenüber dem oberen Aquifer.

Unter Berücksichtigung dieser Zusammenhänge erfolgt die Kalibrierung und damit die Identifizierung von Aufstiegsbereichen. Dies führt zu einer Chloridverteilung im Muschelkalk, die den in den Brunnen gemessenen Chloridkonzentrationen bestmöglich entspricht.

Zur Definition der für den Transport erforderlichen Randbedingungen wurden für den Buntsandstein und Oberen Muschelkalk Verteilungskarten der Chloridkonzentration entwickelt (UFRECHT 2018). Die Verteilung für den Buntsandstein ist in Abb.15 links dargestellt. Abb.15 rechts zeigt die Konzentrationsverteilung in der oberen Modellschicht im östlichen Albvorland, die als konstante Größe im Modell angesetzt wurde. Im östlichen Modellgebiet (Abb.15 rechts), wo der

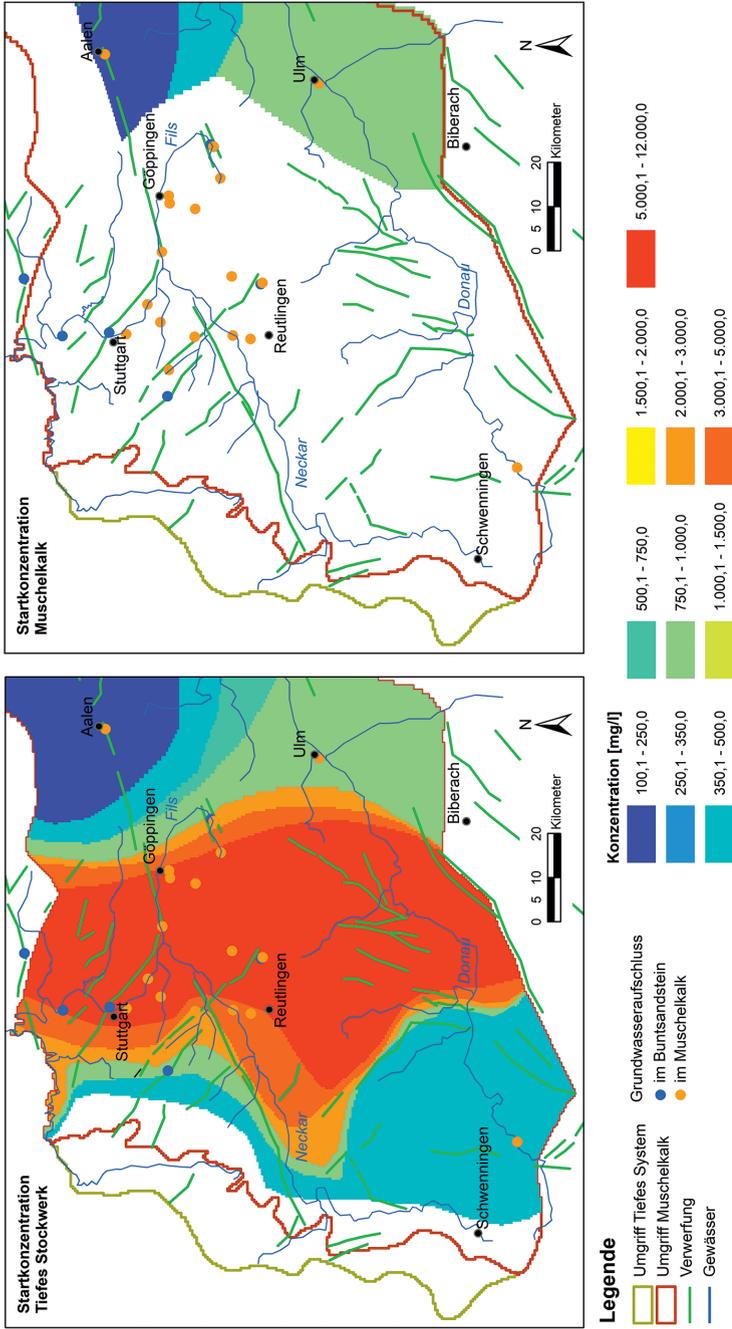


Abb. 15: Verteilung der Chloridkonzentration im Buntsandstein bzw. Tiefen System (links) und im Oberen Muschelkalk (östliches Alvorland, rechts) zur Festlegung der Festkonzentrations-Randbedingungen im Grundwassermodell.

Buntsandstein auskeilt und der Untere und Mittlere Muschelkalk in sandiger Randfazies ausgebildet sind, gibt es keine signifikante Trennung zwischen dem Oberen Muschelkalk und dem Tiefen System. Nach vorliegenden Messwerten ist ein Zustrom von Chlorid aus dem Kristallin in einer Konzentration von bis zu 900 mg/l (TB Neu-Ulm) möglich. Nördlich davon, wo der Buntsandstein wieder zwischengeschaltet ist, wurden die Konzentrationen im Zustrom auf das Albvorland in zwei Zonen abgestuft und bis auf die Größenordnung der Chloridkonzentration in TB Aalen ( $< 250$  mg/l) gesetzt.

Die Chloridverteilung im Buntsandstein wird als stationäre Ausgangssituation angenommen und modelltechnisch als Festkonzentration im Modell implementiert. Dieselbe Vorgehensweise wird im Osten des Modellgebiets vorgenommen. Im übrigen Modellgebiet des Muschelkalks ist von keinen weiteren Chloridquellen auszugehen. Dies bedeutet, dass das im Muschelkalk im Albvorland, im Fildergraben und in den Heil- und Mineralquellen anzutreffende Chlorid aus dem Buntsandstein oder dem Kristallin im östlichen Modellgebiet stammen muss. Ziel der Modellierung ist es, diesen Transportweg nachzuvollziehen und damit die Grundwasserströmung und die in der Kalibrierung ermittelten Durchlässigkeitsstrukturen zu überprüfen bzw. weiter zu entwickeln, sowie die Aufstiegsraten aus dem Buntsandstein in den Muschelkalk zu ermitteln. Zur Erzeugung der gemessenen Konzentrationen im Oberen Muschelkalk steigen im Cannstatter Becken knapp 20 l/s (Heilquellen Stuttgart), in den Bereichen des Albvorlands und im Fildergraben zusammen nur 3 l/s auf. Dieser geringe Volumenstrom reicht dennoch zur Bildung der Chloridkonzentrationen im Muschelkalk aus, da im Fildergraben und Albvorland gegenüber dem Cannstatter Becken auch die Durchflussraten im Muschelkalk gering sind. Im Übergang vom Fildergraben zum Cannstatter Becken betragen sie im Oberen Muschelkalk lediglich 25 l/s. Der prozentuale Anteil des aufsteigenden Wassers im Verhältnis zum Grundwasserumsatz im Muschelkalk ist in beiden Gebieten ähnlich und beträgt um 10 %.

In Abb.16 sind die Chloridkonzentrationen dargestellt, die sich nach einer Transportberechnung von mehreren tausend Jahren ergeben. Diese Verteilung ist quasi stationär; die Konzentrationen im Muschelkalk steigen nicht mehr weiter an. Die sehr gute Abbildung der gemessenen Chloridkonzentrationen geht auch aus der Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Chloridkonzentrationen gemäß Abb.17 (Streudiagramm) hervor. Die Punkte liegen näherungsweise auf der Winkelhalbierenden bzw. streuen eng um diese. Gegenüber einer Transportsimulation mit der Parametrisierung der Strömung gemäß dem früheren Modell konnte ein wesentlich besseres Abbild der gemessenen Chloridkonzentrationen erzeugt werden.

In Szenarien wurde die Bedeutung der Scherzone bzw. Vulkanzone in ihrer Wirkung als Aufstiegsweg gegeneinander abgewogen. Daraus lässt sich ableiten, dass nur beide Aufstiegskomponenten zusammen das gemessene Bild der Chloridkonzentrationen im Muschelkalk bewirken. Allerdings sind die Aufstiege in den Scherzonen insgesamt größer als diejenigen in der Vulkanzone. Nach Aufstieg an den Scherstrukturen und in der Vulkanzone werden die größten

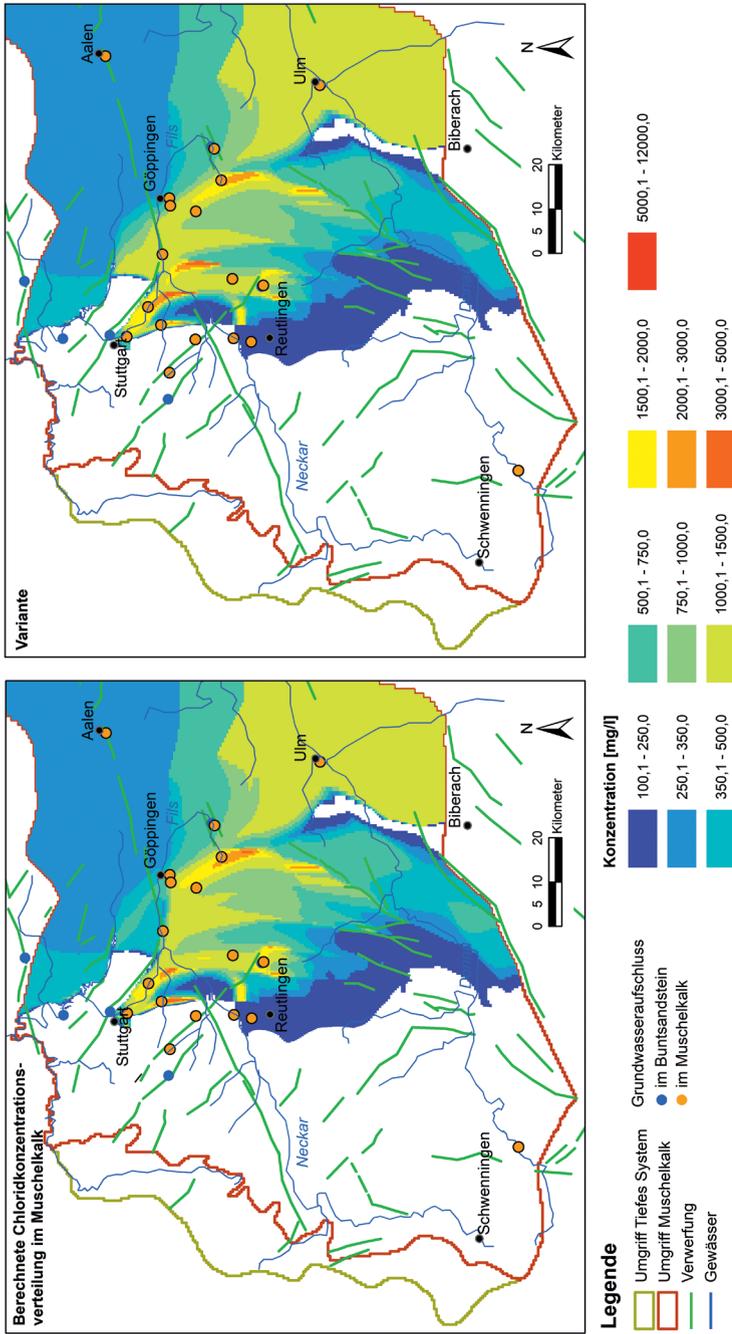


Abb. 16: Berechnete Chlorid-Konzentrationsverteilung im Muschelkalk aus Überlagerung der Aufstiege aus dem Tiefen System und östlichen Zustrom. Variante rechts: Das Öffnen des Schwäbischen Lineaments östlich Plochingen ermöglicht einen Abstrom aus dem Albvorland zur Rems.

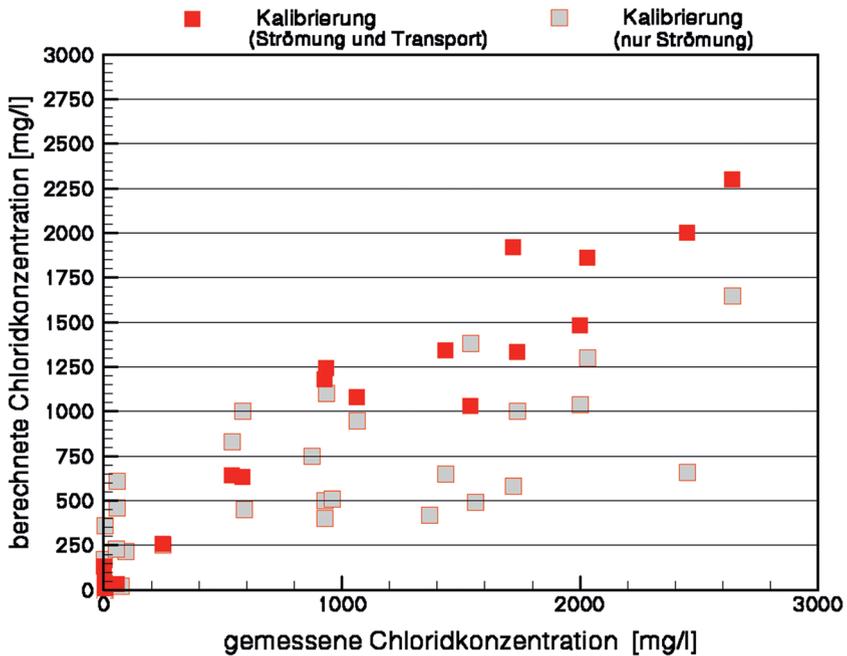


Abb. 17: Streudiagramm der gemessenen und berechneten Chloridkonzentrationen im Vergleich zwischen ursprünglichem Modell und nach der weitergehenden Kalibrierung.

Aufstiege in den Muschelkalk des Albvorlandes im Vorfeld der Mineralbrunnen simuliert. Die durch den Aufstieg erzeugten Fahnen breiten sich dann mit zunehmendem Transportweg aus und werden verdünnt. In den Fildergraben schwenkt eine breite Fahne mit höher konzentriertem Mineralwasser ein. Auch noch nordwestlich des Neckars gibt es an den Scherzonen (Scharnhäuser, Wendlingen) Aufstiege, die im Vorfeld vom Merkel-Bad und der Bohrung Scharnhäuser für eine weitere Erhöhung der Chloridkonzentrationen sorgen. Die bis ins Cannstatter Becken weiter nordwärts ziehende Chloridfahne ist jedoch nicht für die Chloridbefruchtung der Stuttgarter Heilquellen verantwortlich. Wie bereits aufgezeigt, reicht hier die örtlich aufsteigende tiefe Komponente in der Größenordnung von 20 l/s aus, um das von Westen zuströmende Karstgrundwasser aufzukonzentrieren. Diese modelltechnisch abgeleiteten Befunde (siehe dazu auch weitere Szenarienbetrachtungen in JUSTIZ & LANG 2018) werden durch umfangreiche Isotopenuntersuchungen am Wasser und an gelösten Feststoffen bestätigt (UFRICHT & HÖLZL 2006; UFRICHT 2018).

#### 4. ERGEBNISSE

Für die Aquifersysteme Buntsandstein/Kristallin und Oberer Muschelkalk wird für das Gebiet zwischen Stuttgart und südlich der Donau ein Hydrogeologisches Modell und darauf basierend ein dreidimensionales Strömungs- und Transportmodell aufgebaut. Der Modellbildungsprozess beruht unter Einbeziehung moderner hydrogeologischer Methoden auf umfangreichen Vorarbeiten, die seitens der Landeshauptstadt Stuttgart nunmehr seit mehr als zwei Jahrzehnten in diesem Raum durchgeführt werden. Dabei haben insbesondere Isotopeninformationen wesentlich zur Verbesserung der Aussagequalität beigetragen und die Modellfortschreibung vorangebracht.

Mit dem vorliegenden konzeptionellen Hydrogeologischen Modell ist trotz der zu berücksichtigenden beachtlichen Raum- und Zeitskala für den Oberen Muschelkalk eine in sich konsistente System- und Prozessvorstellung entwickelt worden, welche im Gebiet zwischen Stuttgart und dem Südrand der Schwäbischen Alb die Fließdynamik, die Grundwasseralimentation nach Zeit und Ort der Grundwasserneubildung und insbesondere die Mechanismen der Aufkonzentrierung der Tiefengrundwässer im Oberen Muschelkalk unter Einbeziehung der Aquifere im Liegenden und Hangenden plausibel beschreibt. Das darauf aufbauende dreidimensionale numerische Modell berücksichtigt zur Steigerung der Aussagenschärfe und Prognosefähigkeit Strömungs- und Transportinformationen. Daraus ergeben sich konsistentere Interpretationen der regionalen Grundwasserströmung als ohne numerisches Modell. Die Erweiterung des numerischen Modells um den Chloridtransport macht es erstmals möglich, wichtige, im Feld nicht messbare Größen des Grundwasserhaushalts, insbesondere den vertikalen Grundwasseraustausch, belastbar zu quantifizieren. Es kann gezeigt werden, dass die Stuttgarter Heilquellen und die Tiefengrundwässer im Fildergraben und Albvorland zwar hydrochemisch eng miteinander verwandt sind, sich daraus jedoch keine hydraulische „Abhängigkeit“ ergibt. Vielmehr unterliegt die Mineralisierung dem gleichen Prozess des *cross formation flow*, der aber in beiden Gebieten unabhängig voneinander stattfindet. Die Bildungsbedingungen der Stuttgarter Heilquellen und dortigen hochkonzentrierten und gasreichen Wässer sind also nicht an den Zustrom hochmineralisierten Wassers aus dem Albvorland gebunden, der in Anbetracht des sehr geringen hydraulischen Gradienten und der erheblichen Durchlässigkeitskontraste im Fildergraben und südlich anschließenden Albvorland ohnehin sehr klein ist. Mit etwa 35 l/s beträgt dieser Zustrom in das Cannstatter Becken etwa 5 % der gesamten dortigen Quellschüttung. Wesentlich für die Aufmineralisierung der Wässer in Stuttgart und im Albvorland ist eine Tiefenkomponente aus den Stockwerken unterhalb des Muschelkalk-Aquifers, insbesondere aus dem Kristallin und dem Buntsandstein. Der Anteil des hochmineralisierten Tiefengrundwassers, der im Cannstatter Becken an Störungen bis in den Oberen Muschelkalk aufsteigt, liegt bei ca. 20 l/s. Aufgrund des großen Konzentrationsunterschieds zwischen den Wässern im Muschelkalk und Buntsandstein reicht dieser jedoch aus, um den gering mineralisierten Karstwasserzustrom aus dem Oberen Gäu entsprechend aufzukon-

zentrieren. Für die Aufkonzentrierung des Muschelkalkwassers im Fildergraben und Albvorland reichen weniger als 5 l/s aus, da dort gegenüber dem Cannstatter Becken auch die Durchflussraten im Muschelkalk viel geringer sind. Der *cross formation flow* im Albvorland ist an tiefreichende Scherflächen als auch an Diatreme des Urach-Kirchheimer Vulkanfelds (zusammengefasst als „Vulkanzone“) gebunden. Es werden modelltechnisch beide Strukturelemente zum Aufstieg des Tiefengrundwassers benötigt, um die Chloridverteilung und -konzentration im Albvorland abbilden zu können.

Mit der numerischen Modellbetrachtung ist ein guter Kenntnisstand erreicht, der auch durch methodisch moderne Untersuchungen gut abgesichert ist. So kann das numerische Grundwassermodell zukünftig in der wasserwirtschaftlichen Praxis als Bewirtschaftungs- und Prognosewerkzeug eingesetzt werden. Betrachtungen in Hinblick auf Bewirtschaftung im Albvorland und Auswirkungen auf Stuttgarter Heilquellen sind nun abgesichert möglich.

#### SCHRIFTENVERZEICHNIS

**AK Hydrogeologische Modelle** (2010): Hydrogeologische Modelle – Bedeutung des Hydrogeologischen a priori-Wissens. – Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, **70**: 68 S. – Hannover.

**ALESÍ, E.J.** (1984). Der Trigonodus-Dolomit im Oberen Muschelkalk von SW-Deutschland. – Arb. Inst. Geol. Paläont. Univ. Stuttgart, **79**: 1–53; Stuttgart.

**ARMBRUSTER, H., DORNSTÄDTER, J., KAPPELMEYER, O. & W. UFRECHT** (1998): Thermische Untersuchungen im Neckar zwischen Stuttgart-Bad Cannstatt und -Münster zum Nachweis von Mineralwasseraustritten. – Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, **42(1)**: 9–14; Koblenz.

**BACHMANN, G. H., BEUTLER, G., HAGDORN, H. & N. HAUSCHKE** (1999): Stratigraphie der Germanischen Trias. – In: **HAUSCHKE, N. & V. WILDE** (Hrsg.): Trias – eine ganze andere Welt; S. 81–104. – München (Pfeil).

**BERTLEFF, B., JOACHIM, H., KOZIOROWSKI, G., LEIBER, J., OHMERT, W., PRESTEL, R., STOBER, I., STRAYLE, G., VILLINGER, E. & J. WERNER** (1988): Ergebnisse der Hydrogeothermiebohrungen in Baden-Württemberg. – Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, **30**: 27–116; Freiburg.

**BEUTLER, G., HAUSCHKE, N. & E. NITSCH** (1999): Faziesentwicklung des Keupers im Germanischen Becken. – In: **HAUSCHKE, N. & V. WILDE** (Hrsg.): Trias – eine ganze andere Welt; S. 129–174. – München (Pfeil).

**CARLÉ, W.** (1955): Bau und Entwicklung der Süddeutschen Großscholle. – Beihefte zum Geologischen Jahrbuch, **16**: 272 S.; Hannover.

**CARLÉ, W.** (1971): Das Süßwasser-Mineralwasser-System im Muschelkalk des Mittleren Neckarlandes. – Heilbad und Kurort, **71(12)**: 352–358; Gütersloh.

**CARLÉ, W.** (1982): Geologie und Hydrogeologie der Mineral- und Thermalwässer von Bad Überkingen, Landkreis Göppingen, Baden-Württemberg (II). – Mit Beiträgen von H. J. BAYER & G. BLOOS. – Geol. Jb., **C 31**: 3–72; Hannover.

**GEYER, M., NITSCH, E. & T. SIMON** (2011): Geologie von Baden-Württemberg. 5. neu bearbeitete Aufl.; 627 S. – Stuttgart.

- GRIESSHABER, E. (1990): Helium and carbon isotope systematics in groundwater from W. Germany and E. Africa. 211 S. – Cambridge (Diss. Univ. Cambridge).
- GRIESSHABER, E., O'NIONS, R.K. & E.R. OXBURGH (1992): Helium and carbon isotope systematics in crustal fluids from the Eifel, the Rhine Graben and Black Forest, F.R.G. – Chem. Geol., **99**: 213–235; Amsterdam.
- HANAUER, B. & T. SÖLL (1996): Grundwasserbilanzmodell Benker Sandstein in Mittelfranken/Bayern. – Grundwasser, **1** (3/4): 113–120; Hannover.
- HANAUER, B. & T. SÖLL (2006): Fortentwicklung des numerischen Grundwasserströmungsmodells Oberer Muschelkalk – Stuttgarter Mineralquellen: Modellanwendung und Szenarien. – Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, **3/2006**: 69–78; Stuttgart.
- ILLIES, J.H. (1978): Neotektonik, geothermale Anomalie und Seismizität im Vorfeld der Alpen. – Oberrhein. geol. Abh., **27**: 11–31; Karlsruhe.
- JUSTIZ, J. & U. LANG (2018): Ein numerisches Modell für das Aquifersystem Oberer Muschelkalk zwischen Albvorland und oberschwäbischem Molassebecken. – Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, Heft **1/2018**: 159–204; Stuttgart.
- KRONBERG, P. (1977): Die regionale und überregionale Bruchtektonik Mitteleuropas, Bestandsaufnahme und Interpretation. – Geotekt. Forsch., **53**: 7–41; Stuttgart.
- LANG, U. & W. SCHÄFER (2015): Numerisches Grundwasserströmungs- und Transportmodell. – In: KIRCHHOLTES, H. & W. UFRECHT (Hrsg.): Chlorierte Kohlenwasserstoffe im Grundwasser – Untersuchungsmethoden, Modelle und ein Managementplan für Stuttgart. S. 159–204. – Wiesbaden (Springer-Vieweg).
- PLÜMACHER, J. (1999): Kalibrierung eines regionalen Grundwasserströmungsmodells mit Hilfe von Umweltisotopeninformationen. – Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, **1/1999**: 160 S.; Stuttgart.
- PRESTEL, R. & W. SCHLOZ (2009): Die hydrogeologischen Ergebnisse der Thermalwasserbohrung in den Oberen Muschelkalk für das Merkel'sche Bad in Esslingen am Neckar. – Jh. Ges. Naturkde. Württemberg, **165**: 13–39; Stuttgart.
- SCHLÖSER, H. (1994): Lösungsgleichgewichte im Mineralwasser des überdeckten Muschelkalks in Mittel-Württemberg. – Tüb. Geowiss. Arb., **C 20**: 76 S.; Tübingen.
- SCHNEIDER, G. (1993): Beziehungen zwischen Erdbeben und Strukturen der Süddeutschen Großscholle. – N. Jb. Geol. Paläont. Abh., **189**(1-3): 275–288; Stuttgart.
- SIMON, T. (1995): Salz und Salzgewinnung im nördlichen Baden-Württemberg. 441 S. – Sigmaringen (Thorbecke).
- SIMON, T. (2003): Natürliche Auslaugung von Steinsalzlagerstätten. – In: HANSCH, W. & T. SIMON (Hrsg.): Das Steinsalz aus dem Mittleren Muschelkalk Südwestdeutschlands. S. 152–159. – Heilbronn.
- SPITZBERG, S. & W. UFRECHT (2015): Konzeptionelles Aquifermodell. – In: KIRCHHOLTES, H. & W. UFRECHT (Hrsg.): Chlorierte Kohlenwasserstoffe im Grundwasser – Untersuchungsmethoden, Modelle und ein Managementplan für Stuttgart. S. 69–92. – Wiesbaden (Springer-Vieweg).
- STOBER, I. (2014): Hydrochemical properties of deep carbonate aquifers in the SW German Molasse basin. – Geothermal Energy, **2014**: 1–20.
- STOBER, I., JODOCY, M., BURISCH, M. & R. PERSON (2013): Tiefenwässer im Oberen Mu-

schelkalk-Aquifer des Oberrheingrabens und des Südwestdeutschen Molassebeckens. – Grundwasser, **18**: 117–127; Berlin-Heidelberg.

STOBER, I. & E. VILLINGER (1997): Hydraulisches Potential und Durchlässigkeit des höheren Oberjura und des Oberen Muschelkalks unter dem baden-württembergischen Molassebecken. – Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, **37**: 77–96; Freiburg.

UFRECHT, W. (1994): Das Mineral- und Heilwasser von Stuttgart-Bad Cannstatt und -Berg – eine Einführung in die Geologie, Geohydraulik und Hydrochemie des Systems. – Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, **2/1994**: 13–48; Stuttgart.

UFRECHT, W. (2006a): Zur Hydrogeologie der Aquifersysteme Buntsandstein und Muschelkalk zwischen Neckar und Donau. – Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, **3/2006**: 19–48; Stuttgart.

UFRECHT, W. (2006b): Zusammensetzung und Herkunft der Gase in den Sauerlingen von Stuttgart-Bad Cannstatt und -Berg. – Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, **3/2006**: 103–114; Stuttgart.

UFRECHT, W. (2018): Die Tiefengrundwässer im Oberen Muschelkalk zwischen Albvorland und oberschwäbischem Molassebecken – ein Hydrogeologisches Modell. – Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, **1/2018**: 7–158; Stuttgart.

UFRECHT, W. & S. HÖLZL (2006a): Salinare Mineral- und Thermalwässer im Oberen Muschelkalk (Trias) im Großraum Stuttgart – Rückschlüsse auf Herkunft und Entstehung mit Hilfe der  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Strontium-Isotopie. – Z. dt. Ges. Geowiss., **157(2)**: 299–316; Stuttgart.

UFRECHT, W. & G. WOLFF (2014): Das Stuttgarter Heilquellenschutzgebiet. – Jh. Ges. Naturkde. Württemberg, Sonderband, **3**: 37–65; Stuttgart.

VILLINGER, E. (1982): Hydrogeologische Aspekte zur geothermischen Anomalie im Gebiet Urach-Boll am Nordrand der Schwäbischen Alb (SW-Deutschland). – Geol. Jb., **C 32**: 64 S.; Hannover.

WETZEL, H. & H.J. FRANZKE (2003): Lassen sich über die Fernerkundung erweiterte Kenntnisse zur seismogenen Zone Bodensee-Stuttgart (9° Ost) gewinnen? – 23. Jahrestagung DGPF, Sept. 2003 Bochum, S. 339–347; Bochum.

#### Anschriften der Verfasser:

Prof. Dr. WOLFGANG UFRECHT  
Amt für Umweltschutz der Landeshauptstadt Stuttgart  
Gaisburgstraße 4  
70182 Stuttgart  
Email: wolfgang.ufrecht@stuttgart.de

Dr. Ing. ULRICH LANG und Dipl. Ing. JUTTA JUSTIZ  
Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus & Partner GmbH  
Heßbrühlstraße 21  
70565 Stuttgart