



# Isotopenhydrogeologische Untersuchungen im südlichen Salzburger Becken (Golling, Kuchl, Vigaun, Hallein), Österreich

Giorgio Höfer-Öllinger<sup>1,2</sup>

Eingegangen: 12. April 2020 / Überarbeitet: 16. November 2020 / Angenommen: 7. Januar 2021 / Online publiziert: 22. Januar 2021  
© Der/die Autor(en) 2021

## Zusammenfassung

Trotz seiner Bedeutung in der Trinkwasserversorgung ist die Herkunft des Grundwassers des Gamper Brunnenfelds (GBF) im Südlichen Salzburger Becken (SSB) ungeklärt. Eine 2014 bis 2016 durchgeführte Studie unter Verwendung von stabilen Isotopen und einer numerischen 2D-Modellierung führte zu wichtigen Erkenntnissen, aber auch zu widersprüchlichen Schlussfolgerungen: Die dabei numerisch nachgewiesene Anspeisung des GBF durch die nahe Salzach ist aus Sicht der stabilen Isotope nicht möglich.

Im Zeitraum 2017 bis 2019 wurden in einer weiteren Studie an 17 Messstellen Proben zur Analytik stabiler Isotope entnommen und anstatt einer numerischen Modellierung eine umfassende Betrachtung der Aquifergenese auf Basis der aktuellen Literatur und moderner Ansätze geomorphologischer Entwicklung alpiner Täler durchgeführt. In die Betrachtungen wurden hydraulische, hydrochemische und physikalische Eigenschaften des Grundwassers einbezogen.

Als Ergebnis liegt ein Konzeptmodell vor, das für alle Eigenschaften der betroffenen Grundwasservorkommen eine schlüssige Erklärung darstellt. Von Bedeutung ist dabei, dass die instationäre Versickerung der Tauogl zu einer partiellen Fraktionierung stabiler Isotope führt.

**Schlüsselwörter** Aquifergenese · Stabile Isotope · Alpine Täler · Gletscherrückzug · Delta · Salzburger Becken

## Isotope hydrogeological investigations in the Southern Salzburg Basin, Austria

### Abstract

Despite its importance as a drinking water supply, the origin of groundwater at the Gamp Wellfield (GBF) in the Southern Salzburg Basin (SSB) is still unclear. A study performed between 2014 and 2016 using stable isotopes and numerical 2D groundwater flow modelling led on one hand, to important insights into groundwater recharge, but on the other hand led to contradictions: The model simulations showing groundwater flow to the GBF from the nearby Salzach river is not possible considering the stable isotopes.

Therefore, between 2017 and 2019 another study was performed, including 17 additional monitoring points for stable isotopes. Instead of numerical modelling, the focus was put on a comprehensive understanding of aquifer genesis on the basis of recent literature and applying a modern approach to understand geomorphological development of alpine valleys. Hydraulic, hydro-chemical and physical properties of the groundwater were also considered.

A conceptual model is developed from the results which permits a coherent explanation of all properties of the regional aquifers. One of the most interesting results of this conceptual model is a fractionation of stable isotopes governed by dynamic seepage of the Tauogl creek.

**Zusatzmaterial online** In der Online-Version dieses Artikels (<https://doi.org/10.1007/s00767-021-00474-2>) sind als weiterführende Unterlagen die „Water Lines“ der beprobten Quellen, Brunnen und Oberflächengewässer beigelegt sowie die „Meteoric Water Lines“ der täglichen Niederschlagsisotopen von Isolab in Wals bei Salzburg und vom Sonnblick-Observatorium. In beiden Diagrammreihen ist für Vergleichszwecke die „Global Meteoric Water Line“ (GMWL) eingetragen.

✉ Giorgio Höfer-Öllinger  
[giorgio.hoefer-oellinger@geoconsult.eu](mailto:giorgio.hoefer-oellinger@geoconsult.eu)

<sup>1</sup> Fachbereich Geowissenschaften, Freie Universität Berlin, Malteser Straße 74–100, 12249 Berlin, Deutschland

<sup>2</sup> Geoconsult ZT GmbH, Urstein Süd 13, 5412 Puch bei Hallein, Österreich

**Keywords** Aquifer genesis · Stable isotopes · Alpine valley · Glacier retreat · Delta · Salzburg Basin

## Einführung

Das Salzburger Becken erstreckt sich über eine Länge von 50 km in Nord-Süd-Richtung zwischen Oberndorf (Österreich) bzw. Laufen (Bayern) im Norden und Golling (Österreich) im Süden. Seine Breite umfasst zwischen 2 und 5 km und erweitert sich auf halber Länge – im Bereich der Stadt Salzburg – auf etwa 10 km. Die Umrahmung des Beckens durch Festgestein ist zwischen Salzburg und Oberndorf von Gesteinen des Rhenodanubischen Flysches aufgebaut. Zwischen Golling und Salzburg bilden Gesteine der Nördlichen Kalkalpen den Rahmen (Plöchinger 1983, 1987).

Der gegenständliche Aufsatz behandelt den südlichsten Abschnitt mit den Gemeinden Golling, Kuchl, Vigaun und Hallein. Hier erreicht das Becken bei Vigaun eine bohrtechnisch nachgewiesene Tiefe von 312 m gegenüber der aktuellen Geländeoberfläche (van Husen 1979), aufgrund von seismischen Daten wird eine maximale Tiefe von 415 m angenommen (Pomper et al. 2017). Das Becken war im Laufe des Quartärs mehrfach durch einen See („Salzburger See“) gefüllt, der durchwegs nur kurze Lebensdauer aufwies und sehr rasch verfüllt wurde (Pomper et al. 2017; Prey 1959, 1969; Seefeldner 1954, 1961; Starnberger et al. 2014; Stummer 1947; van Husen 1979).

Quartäre Übertiefung und sedimentäre Füllung des Beckens wurde erstmalig von van Husen (1979), später von Brandecker (1994) bzw. Brandecker and Maurin (1982) und zuletzt von Pomper et al. (2017) vorgestellt. All diesen Publikationen lagen der Stand der Wissenschaft hinsichtlich der Verfüllung von glazialen Seen bei und nach dem Gletscherrückzug zugrunde, dazu kamen im Laufe der letzten Jahrzehnte sukzessiv mehrere künstliche Aufschlüsse. Parallel zu den wissenschaftlichen Publikationen erfolgten Erkundungen für ingenieurgeologische Zwecke bzw. für die Trinkwasserversorgung, wie z. B. Färbeversuche (Leditzky 1987).

## Problemstellung

Grund dieser Studie ist eine gegenüber früheren Annahmen vorliegende Neuinterpretation der Herkunft des Grundwassers des Gamper Brunnenfelds (GBF).

Das SSB wird von Süd nach Nord von der Salzach durchströmt, die Vorflutfunktion hat und seitlich von Flüssen bzw. Bächen Torren, Schwarzenbach und Weißenbach (linksufrig) und Lammer, Tauogl und Alm (rechtsufrig) alimentiert wird (Abb. 1). Obgleich das Delta der Salzach und Lammer (die in unmittelbarer Nähe zueinander in das Becken eintreten) einen äußerst ergiebigen Grundwasserkörper darstel-

len, erfolgt – von Süd aus gesehen – die erste überregionale Nutzung des Grundwassers für Zwecke der Trinkwassergewinnung im Bereich des Tauogl-Deltas (TD). Hier liegen mehrere Brunnenanlagen vor: Brunnen Vigaun, Brunnen Tauogl, Brunnen Bahnhof Vigaun rechtsufrig und linksufrig – jenseits der Salzach – die zwei Brunnen „Gamp 1“ und „Gamp 2“ des GBF (Abb. 1).

Die Tauogl, ein alpiner Bach mit einem Einzugsgebiet von 51 km<sup>2</sup> in der Osterhorngruppe, versickert im eigenen Schwemmfächer bis zu einer Wasserführung von etwa 3 m<sup>3</sup> (Harum et al. 2016). Übersteigt die Abflussmenge diese Zahl, ist das Gewässer durchgehend bis zur Mündung in die Salzach wasserführend. In wasserwirtschaftlichen Erwägungen wurde bis 2016 davon ausgegangen, dass das Grundwasser des GBF von der Tauogl alimentiert wird. Letztendlich wurde in einer neuen Studie (Harum et al. 2016) die Unterströmung der Salzach durch das Grundwasser verworfen. Anstatt dessen wurde für die Herkunft des Grundwassers im GBF auf Basis von stabilen Isotopen und einer numerischen Modellierung (instationär in Tagesschritten über 10 Jahre, 2D) davon ausgegangen, dass es sich großteils um Uferfiltrat der nahen Salzach handelt, vermischt mit einer kleineren Menge an lokalem Niederschlag.

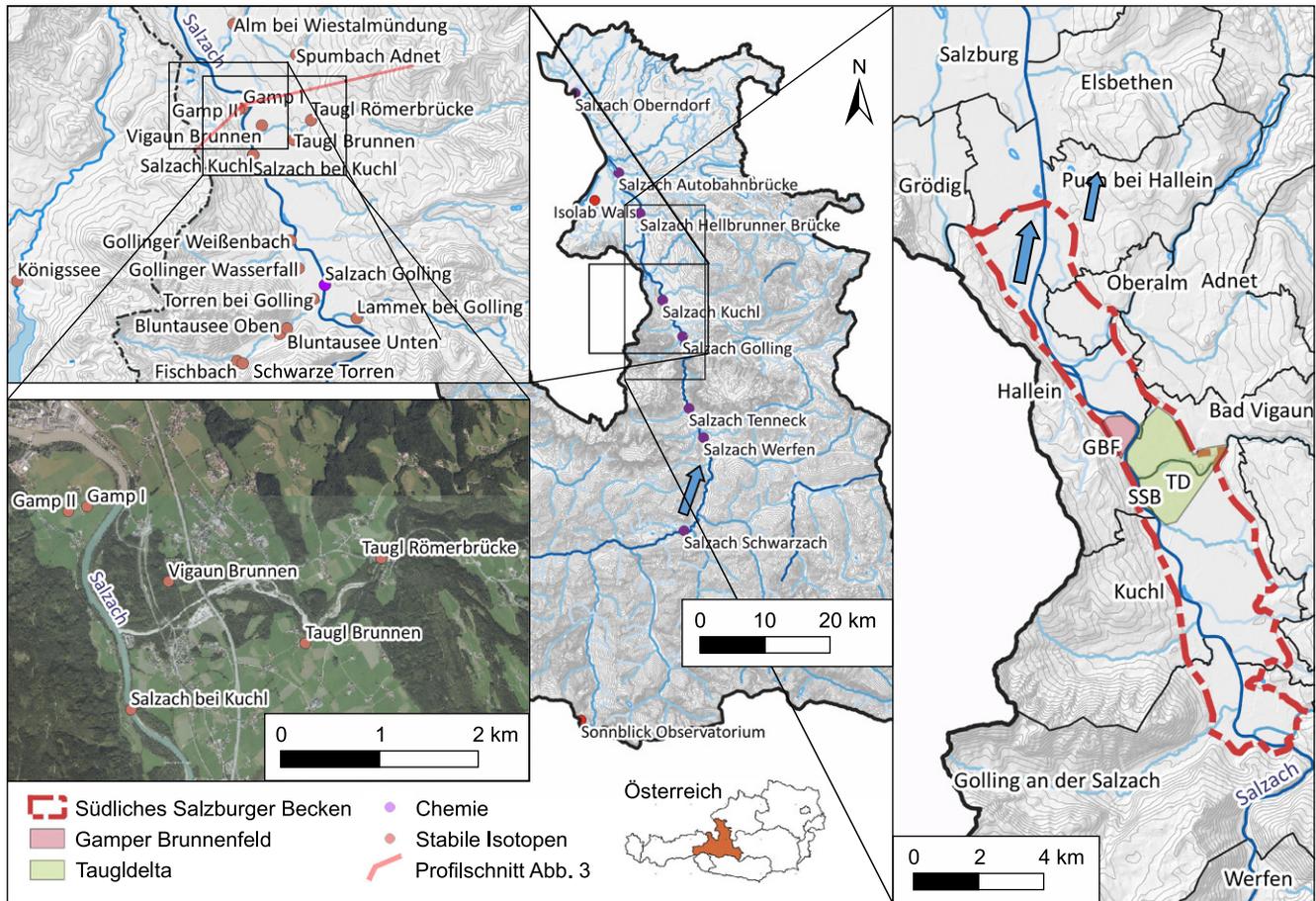
Diese Neuinterpretation würde beinhalten, dass Wasser der Vorflut Salzach nach wenigen Tagen Fließzeit in den Brunnenanlagen des GBF auftreten. Dies erfordert eine Neueinschätzung des Gefährdungspotenzials für das GBF, aus dem aus mehreren Brunnen durchschnittlich etwa 40 l/s für Trinkwasserzwecke entnommen werden.

In drei Tranchen wurden Mittel des Landes Salzburg, des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Stadtgemeinde Hallein aufgebracht, um die gegenständliche Studie zu erstellen. Ergänzend konnte auf Daten laufender Forschungsprojekte im Großraum des SSB sowie im Bundesland Salzburg zurückgegriffen werden (Höfer-Öllinger et al. 2018).

## Methodik

Inhalt der Untersuchungen sind die Betrachtung der zur Verfügung stehenden Wasseranalysen, ein Messprogramm stabiler Isotope (2-jährige Messreihe, Beprobung an 17 Messstellen), sowie eine Betrachtung der Landschaftsgeschichte und die damit einhergehende Aquifergenese.

Im Zeitraum 2016–2019 wurden im SSB isotopenhydrologische Studien für verschiedene Fragestellungen durchgeführt. Dazu gehören das Forschungsprojekt „Hydrogeologie der Torrener Joch Störungszone“ (Höfer-Öllinger et al. 2018) sowie ein erweitertes Probenprogramm



**Abb. 1** Lage des Untersuchungsgebietes sowie des Taugl-Deltas im Land Salzburg, der Messstellen entlang der Salzach und der Messstellen (Quellen, Oberflächengewässer, Brunnen) für stabile Isotope und des Profilschnittes in Abb. 3. (Quelle Orthofoto: geoland.at)

**Fig. 1** Position of the zone of interest and the Taugl Delta in Salzburg Province, of the monitoring points along Salzach River and for stable isotopes (springs, rivers, lakes and wells) and of the profile in Fig. 3. Source of orthophoto: geoland.at

zur Ermittlung der Herkunft des Grundwassers im GBF. Das Programm sah eine wöchentliche Beprobung von elf Oberflächengewässern (OG), zwei Quellen sowie monatlich von vier Brunnen vor (Tab. 1). Die Probennahme bei OG erfolgte mittels Schöpfproben, wobei bei den Flüssen bis zu vier Proben entlang des Querprofils gezogen und daraus der Durchschnitt ermittelt wurde. An den bis zu 50m tiefen Brunnen wurden die Proben vom dafür vorgesehenen Hahn gezogen – keiner der Brunnen erschließt tiefere Grundwasservorkommen. Als Vor-Ort-Parameter wurden Temperatur und Leitfähigkeit ermittelt, und die Laboranalytik beinhaltet  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{17}\text{O}$  und  $\delta^2\text{H}$  (Deuterium) gegenüber dem Standard Mean Ocean Water (SMOW). Die Vor-Ort-Parameter wurden mit WTW-Handgeräten ermittelt. Für die chemischen Daten wurde auf Daten der Wassergütererhebung (WGEV-Messstellen, Umweltbundesamt GmbH) zurückgegriffen. Die Isotopendaten wurden gegen IAEA-Standards mit einem LGR OA-ICOS-Analysegerät ermittelt. Als Ergebnis liegen 1593 Analysen vor, deren wichtigste Statistika in Tab. 2 zusammengefasst sind.

Den Beprobungen stehen Zeitreihen von Temperatur- und Niederschlagsisotopen gegenüber, die wie folgt zusammengefasst werden können (Datenquellen: Auer et al. 2007; Höfer-Öllinger et al. 2019, 2020; Umweltbundesamt GmbH 2020):

- Salzburg: Freisaal (503 Monatsproben von Isotopen 1972–2019), Flughafen (Temperatur seit 1842) und Isolab in Wals bei Salzburg (täglich stabile Isotope seit 07/2016)
- Golling: 507 Monatsproben von Isotopen 1972–2019
- Hoher Sonnblick: Temperatur seit 1886, täglich stabile Isotope seit 07/2016

Diese Grundlagendaten sind in Abb. 2 zusammengefasst. Bei der statistischen Zusammenführung von Isotopendaten wurde überall dort, wo dies möglich war, von der reinen Bildung eines Durchschnittswertes abgesehen und die Menge (Niederschlag, Abfluss) in die Betrachtung mit einbezogen, d. h., dass Isotopen stärkerer Ereignisse proportional stärker gewichtet sind.

**Tab. 1** Bezeichnung und Art der Probennahmestellen, Anzahl der Probennahmen und Vor-Ort-Parameter  
**Table 1** Name and type of sampling points, quantity of samples and in-situ-parameters

Bezeichnung	Art	Intervall vor Ort Parameter	Intervall stabile Isotopen	Anzahl Proben	T min	T max	T avg	Lf		Quelle	
								min	max		
Schwarze Torren Quelle	Karstquelle	Abfluss, Temperatur, Leitfähigkeit; 15 min, Fernübertragung; WGEV Messstelle	Wöchentlich	121	5,6	6,8	6,1	119,0	1169,0	265,0	Amt der Salzburger Landesregierung, Abteilung 7, Wasser <sup>a</sup>
Königssee	Oberflächen-gewässer	Pegel: stündlich mit Fernübertragung	Wöchentlich	110	2,9	20,1	10,1	156,0	163,0	159,0	Hochwassernachrichtendienst Bayern <sup>b</sup>
Fischbach	Oberflächen-gewässer	Temperatur, Leitfähigkeit, wöchentlich	Wöchentlich	119	1,8	19,0	9,3	178,0	288,0	258,0	–
Bluntausee oben	Oberflächen-gewässer	Temperatur, Leitfähigkeit, wöchentlich	Wöchentlich	118	5,9	8,8	7,4	216,0	346,0	268,0	–
Bluntausee unten	Oberflächen-gewässer	Temperatur, Leitfähigkeit, wöchentlich	Wöchentlich	119	4,4	11,5	8,1	215,0	310,0	247,0	–
Salzach bei Kuchl	Oberflächen-gewässer	Abfluss, Pegel: 15 min, Fernübertragung; WGEV Messstelle	Wöchentlich	109	0,9	16,9	8,4	131,2	367,0	236,4	Amt der Salzburger Landesregierung, Abteilung 7, Wasser <sup>c</sup>
Lammer bei Golling	Oberflächen-gewässer	Abfluss, Pegel: 15 min, Fernübertragung; WGEV Messstelle	Wöchentlich	108	1,0	19,7	9,0	213,0	501,0	364,9	Amt der Salzburger Landesregierung, Abteilung 7, Wasser <sup>c</sup>
Torrerer Bach bei Pegel	Oberflächen-gewässer	Abfluss, Pegel mit Dauerregistrierung; Temperatur, Leitfähigkeit, wöchentlich	Wöchentlich	109	4,6	11,5	7,3	134,0	456,0	243,6	Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus <sup>c</sup>
Gollinger Wasserfall	Karstquelle	Abfluss, Temperatur, Leitfähigkeit; 15 min, Fernübertragung; WGEV Messstelle	Wöchentlich	108	5,3	6,6	6,0	138,0	225,0	183,5	Amt der Salzburger Landesregierung, Abteilung 7, Wasser <sup>d</sup>
Gollinger Weißenbach	Oberflächen-gewässer	Abfluss, Pegel mit Dauerregistrierung; Temperatur, Leitfähigkeit, wöchentlich	Wöchentlich	108	2,1	15,3	8,4	187,0	343,0	286,6	–
Taugl Römerbrücke	Oberflächen-gewässer	Temperatur, Leitfähigkeit, wöchentlich; WGEV Messstelle	Wöchentlich	108	0,1	17,5	8,2	165,1	341,0	255,7	Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus <sup>e</sup>
Spurbach Adnet	Oberflächen-gewässer	Temperatur, Leitfähigkeit, wöchentlich; WGEV Messstelle	Wöchentlich	103	0,0	28,8	9,8	286,0	455,0	350,4	Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus <sup>e</sup>
Alm Wiesalmündung	Oberflächen-gewässer	Temperatur, Leitfähigkeit, wöchentlich; WGEV Messstelle	Wöchentlich	91	1,5	20,0	10,6	253,0	399,0	317,5	Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus <sup>e</sup>
Taugl Brunnen	Vertikalfilterbrunnen	Temperatur, Leitfähigkeit, wöchentlich; WGEV Messstelle	Wöchentlich	91	7,9	11,2	9,1	246,0	270,0	257,6	Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus <sup>e</sup>

Tab. 1 (Fortsetzung)  
Table 1 (Continued)

Bezeichnung	Art	Intervall vor Ort	Parameter	Intervall stabile Isotopen	Anzahl Proben	T min	T max	T avg	Lf min	Lf max	Lf avg	Quelle
Vigaun Brunnen	Vertikalfilterbrunnen	Temperatur, Leitfähigkeit, monatlich; WGEV Messstelle	Monatlich	22	7,1	12,3	8,6	237,0	284,0	262,6	Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus <sup>e</sup>	
Brunnen Gamp 1	Vertikalfilterbrunnen	Temperatur, Leitfähigkeit, monatlich	Monatlich	25	9,7	11,9	10,8	310,0	365,0	316,1	–	
Brunnen Gamp 2	Horizontalfilterbrunnen	Temperatur, Leitfähigkeit, monatlich; WGEV Messstelle	Monatlich	23	8,1	11,8	9,5	272,0	284,0	278,7	Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus <sup>e</sup>	

<sup>a</sup> URL: <https://www.salzburg.gv.at/wasser/hydro/#/Quellen>

<sup>b</sup> URL: <https://www.lhd.bayern.de/pegel/inm/koenigssee-18624806?>

<sup>c</sup> URL: <https://ehyd.gv.at/>

<sup>d</sup> URL: <https://www.salzburg.gv.at/wasser/hydro/#/Fluessgew%C3%A4sser>

<sup>e</sup> URL: <https://wasser.umweltbundesamt.at/h2odb/fivestep/abfrageQdPublic.xhtml>

Hinsichtlich der Talgenese wurden – im Zusammenhang mit dem GBF – die vorliegenden Varianten weiteren denkbaren Szenarien gegenübergestellt und bewertet: (1) Bisherige Variante – vom TD und Unterströmung der Salzach. (2) Variante neu (Harum et al. 2016) – Uferfiltration der Salzach und Niederschlag auf der Halbinsel von Gamp. (3) Alternative 3: Östlich Vigaun wurde ein durch einen etwa 100m oberhalb des Talbodens liegenden Konglomeratrücken verdecktes, mehrere 100m tiefes Tal, das Brandecker (1994) bereits konzeptionell andeutete, durch eine moderne Studie der Geologischen Bundesanstalt wiederentdeckt (unveröffentlicht, Projekt SC27) und als mögliche Herkunft für das Grundwasser im GBF erwogen. (4) Eine bislang unentdeckte talrandnahe Grobschüttung westlich entlang des SSB bringt gering mineralisierte Karstwässer zum GBF. (5) Das Delta des Almbaches aus dem Wiestal nordöstlich von Hallein reicht bis zum GBF und das Grundwasser kommt von dort.

## Geologie und Aquifergenese

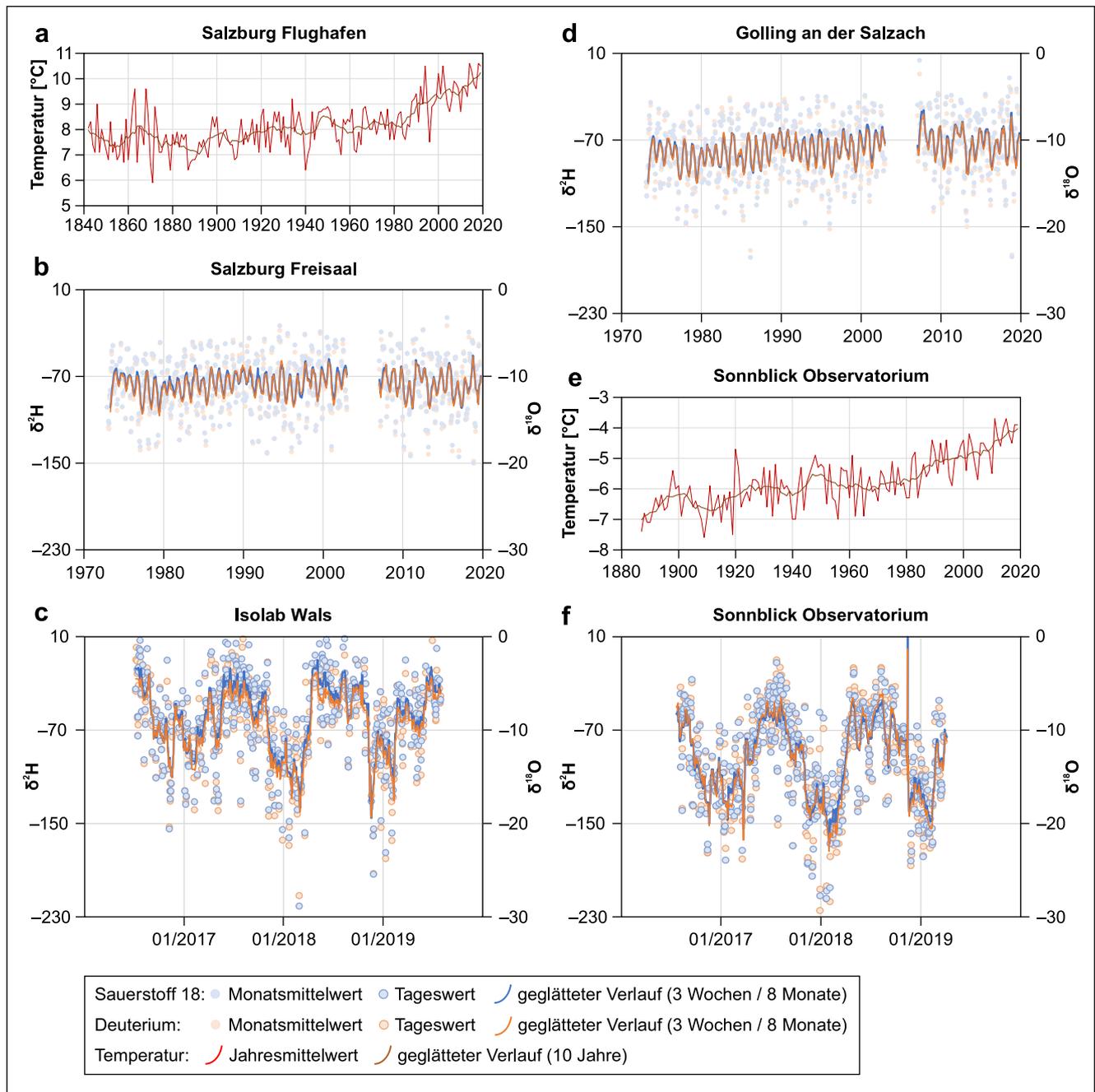
Die Salzach hat ein Einzugsgebiet von 4400 km<sup>2</sup> im Tauernfenster und in den Nördlichen Kalkalpen, sowie in der Grauwackenzone. Im Oberlauf folgt die Salzach einem West-Ost gerichteten Störungssystem, der Tauernnordrandstörung als Teil des SEMP Lineaments (Ratschbacher et al. 1991a, b). 60km südlich der Stadt Salzburg biegt der Fluss abrupt nach Nord. Die letzten 25km des Verlaufes im Gebirge sind vom SSB charakterisiert, wo sich die Gemeinden Golling, Kuchl, Vigaun, Hallein, Oberalm, Puch und Elsbethen befinden. Nach dem Durchbruch der Salzach südlich Golling weitet sich das Tal auf etwa 4km Breite. An dieser Stelle quert das WSW-ENE-streichende Königssee-Lammertal-Traunsee-Störungssystem (Decker et al. 1994) das Salzachtal, dem das Bluntautal und das untere Lammertal angehören. Damit münden bei Golling drei Flüsse in das SSB: Lammer, Salzach und Torren. Weitere wichtige Zubringer sind Taugl (Kuchl bzw. Vigaun) und Alm (Hallein) rechtsufrig sowie die Königsseeache (Hallein bzw. Anif) linksufrig (Abb. 1).

Die tektonische Anlage des SSB ist nicht eindeutig geklärt (Decker et al. 1994). Östlich des Tales stehen Formationen der Tirolischen Decke an, während im Westen Juvavikum aufgeschlossen ist. Eine treppenartige Folge von Abschiebungen der tirolischen Schichtfolge zum SSB im Osten steht eine N-S-streichende Antiklinale mit steilen Flanken, die unter der Talfüllung abtauchen, und ebenfalls Abschiebungen im Westen gegenüber (Abb. 3, Plöchinger et al. 1990).

Während des Quartärs war das SSB mehrfach eisbedeckt, wobei die Gletscheroberfläche beim letzten Maximalstand (LGM) zwischen 1000 und 1600m ü. A. (bezogen

**Tab. 2** Zusammenfassung der Isotopenwerte ( $\delta$  SMOW in ‰, siehe auch Abb. 5 und 6)  
**Table 2** Summary of results of stable isotopes measurements ( $\delta$  SMOW in ‰, see Fig. 5 and 6)

	$\delta^{18}\text{O}$			$\delta^{17}\text{O}$			$\delta^2\text{H}$			$\delta^2\text{H excess}$			$\delta^{17}\text{O excess}$			Gewichteter Durchschnitt				
	Min	Max	Avg	Min	Max	Avg	Min	Max	Avg	Min	Max	Avg	Min	Max	Avg	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{17}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^2\text{H excess}$	$\delta^{17}\text{O excess}$
Schwarze Torren Quelle	-15,41	-9,15	-12,44	-8,16	-4,84	-6,57	-110,63	-60,77	-86,94	9,22	16,10	12,55	-0,38	0,86	0	-12,62	-6,67	-88,41	12,52	0,01
Königssee	-13,79	-11,33	-12,31	-7,35	-5,68	-6,46	-96,81	-78,48	-85,99	9,56	16,37	12,47	-0,61	0,43	-0,04	-12,45	-6,53	-87,09	12,49	-0,04
Fischbach	-13,42	-9,23	-11,82	-7,05	-4,82	-6,25	-96,61	-63,58	-83,26	8,38	15,35	11,29	-0,42	0,63	0	-11,83	-6,25	-83,56	11,08	0
Bluntausee Oben	-13,95	-10,54	-12,31	-7,49	-4,13	-6,48	-98,74	-72,90	-86,43	9,00	16,62	12,04	-1,44	0,66	-0,02	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Bluntausee Unten	-13,53	-10,91	-12,28	-7,32	-5,76	-6,48	-94,93	-77,81	-86,29	6,61	16,02	11,99	-0,55	0,38	0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Salzach bei Kuchl	-14,52	-11,37	-12,79	-7,62	-5,98	-6,73	-102,58	-77,91	-90,34	8,20	14,67	11,99	-0,43	0,42	-0,02	-13,02	-6,85	-92,10	12,09	-0,03
Lammer bei Golling	-13,88	-10,22	-12,01	-7,36	-5,43	-6,34	-98,51	-69,29	-83,80	8,75	16,17	12,27	-0,46	0,49	0	-12,27	-6,48	-85,81	12,39	0
Torrener Bach bei Pegel	-14,68	-10,05	-12,31	-7,77	-5,25	-6,48	-104,33	-67,50	-85,90	9,82	16,31	12,60	-0,62	0,49	-0,02	-13,00	-6,84	-91,15	12,81	-0,02
Gollinger Wasserfall	-15,01	-9,83	-12,13	-7,62	-5,14	-6,39	-102,42	-64,28	-83,73	8,51	20,65	13,31	-0,60	0,59	-0,02	-12,66	-6,65	-87,65	13,65	-0,04
Gollinger Weißenbach	-13,18	-9,93	-11,41	-6,69	-5,28	-6,01	-89,52	-68,18	-80,28	5,03	16,96	11,03	-0,61	0,40	-0,01	-11,50	-6,05	-80,81	11,18	-0,02
Taugl Römerbrücke	-13,59	-9,15	-11,37	-7,18	-4,76	-6,02	-96,11	-59,83	-78,85	7,30	14,48	12,14	-0,46	0,69	0,01	-11,64	-6,16	-80,78	12,34	0,01
Spumbach Adnet	-12,56	-9,25	-10,94	-6,63	-4,98	-5,77	-89,88	-64,13	-76,45	8,82	13,91	11,09	-0,34	0,42	-0,01	-11,17	-5,88	-78,21	11,14	-0,02
Alm Wiestalmündung	-12,62	-9,96	-11,05	-6,55	-5,00	-5,83	-88,41	-67,27	-76,77	7,91	14,91	11,67	-0,30	0,50	0	-11,14	-5,87	-77,18	11,98	-0,01
Taugl Brunnen	-12,17	-10,46	-11,28	-6,64	-5,32	-5,94	-84,24	-72,64	-78,40	4,52	16,51	11,83	-0,29	0,55	-0,01	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Vigaun Brunnen	-12,56	-10,39	-11,60	-6,56	-5,27	-6,08	-88,23	-70,83	-80,24	11,12	14,78	12,52	-0,36	0,18	-0,04	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Brunnen Gamp 1	-12,00	-11,05	-11,58	-6,41	-5,78	-6,14	-82,34	-79,15	-80,42	9,24	15,96	12,22	-0,55	0,36	0,02	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Brunnen Gamp 2	-12,18	-11,00	-11,71	-6,58	-5,92	-6,21	-84,54	-78,96	-81,61	8,90	15,06	12,10	-0,40	0,35	0,03	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a

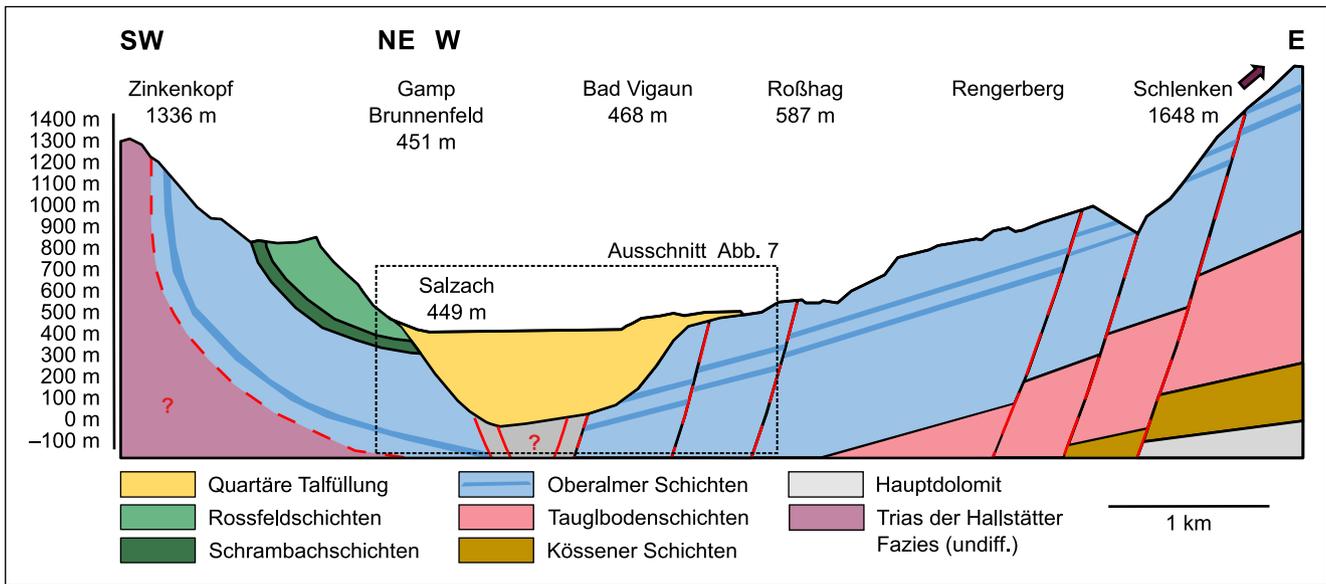


**Abb. 2** Temperatur Jahresmittel (a) und (e) und Isotopenwerte der Stationen Salzburg Flughafen (a), Salzburg Freisaal (b), Salzburg Wals (c), Golling (d), sowie Hoher Sonnblick (e und f). c und f tagesaktuelle Einzelmessungen (transparent) und drei-wöchiges Mittel; b und d Monatsmittel (transparent) und 8-monatiges Mittel. (Datengrundlage: Auer et al. (2007), Höfer-Öllinger et al. (2019), Umweltbundesamt GmbH (2020))

**Fig. 2** Annual average temperature (a) and (e) and stable isotopes from Salzburg airport (a), Salzburg Freisaal (b), Salzburg Wals (c), Golling (d) and Sonnblick Observatory (e and f). c and f daily measurements (transparent) and three weeks average; b and d monthly average (transparent) and eight months average. Data basis: Auer et al. (2007), Höfer-Öllinger et al. (2019), Umweltbundesamt GmbH (2020)

auf den heutigen Meeresspiegel) lag (Pomper et al. 2017). Mindestens vier große Vergletscherungen wurden durch Penck und Brückner (1909) anhand der glazialgeomorphologischen Formen im Alpenvorland nachgewiesen, deren Ausmaß sukzessive kleiner wurde. Erste Beschreibungen der pleistozänen Talfüllung des SSB geben Brandecker

(1974, 1994), Brandecker und Maurin (1982), van Husen (1979) und zuletzt Pomper et al. (2017). Generell ist davon auszugehen, dass entweder Moränen oder lakustrine Abfolgen dominieren, zu denen sich Einschaltungen von Bergsturzmaterial gesellen und schlussendlich – im Zuge der Tieferlegung des Erosionsniveaus – fluviatile



**Abb. 3** Schematischer geologischer Profilschnitt SW-NE (Zinkenkopf bis GBF) bzw. W-E, 2-fach überhöht, Lage siehe Abb. 1

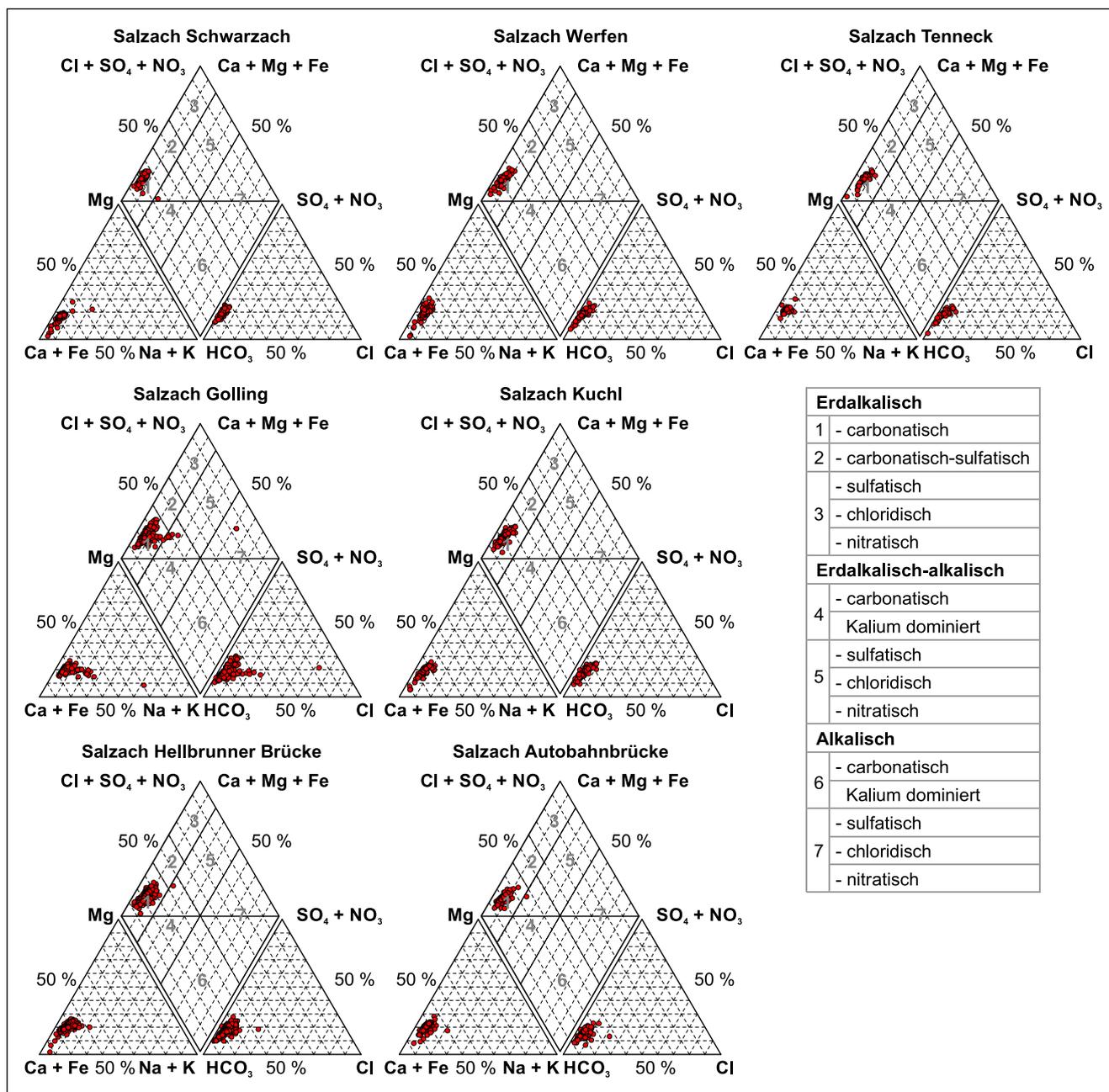
**Fig. 3** Schematic geological profile SW-NE (Zinkenkopf to Gamp Well Field) and W-E, 2-times vertical exaggeration, position see Fig. 1

Ablagerungen den oberflächennahen Bereich charakterisieren. Die lakustrinen Abfolgen starten durchwegs proximal grobklastisch mit einer Deltaschüttung und gehen distal in feinkörnige Stillwasserablagerungen über. Für den geologischen Aufbau der Deltaschüttung sind verschiedene Szenarien denkbar, die vom lokalen Setting abhängen. Zum einen erfolgt proximal eine sehr rasche Verfüllung im südlichsten Abschnitt des Beckens bei Golling, wo die Salzach grobklastisches Material anliefert. Dieses Delta hat einen sehr niedrigen Feinkorngehalt (Brandecker und Maurin 1982) und steht damit im Kontrast zu jenen der Zuflüsse im weiteren Talverlauf, insbesondere der Taugl und der Alm. Die Königsseeache wiederum ist ein Spezialfall, der Großteil des Deltas befindet sich am Nordrand des Untersberg-Massivs und damit an einer Stelle, wo der Fluss heute nicht mehr fließt (Donadel et al. 2014; Wessely et al. 2016).

Um die Ablagerung dieser Form des Deltas charakterisieren zu können, wird auf die Erkenntnisse des dreidimensionalen Aufschlusses eines in Teilen vergleichbaren Settings im Tiroler Inntal zurückgegriffen, auf den Vomperbach. Der Aufschluss erfolgte in den Jahren 1999/2000 durch den Erkundungsstollen „Vomp Ost“ für die später errichtete und heute in Betrieb befindliche Hochleistungsstrecke der Zulaufstrecke Nord zum Brennerbasistunnel. Das Delta des Vomperbaches wurde im Spät- bzw. Postglazial von Nord in das West-Ost verlaufende Inntal geschüttet, das zu jener Zeit ähnlich dem gegenständlichen Fall von einem See charakterisiert war (Köhler et al. 2005). Im Vergleich zu den alpinen Flüssen hat der Vomperbach eine relativ geringe Schüttung. Bei Hochwasserereignissen werden

kurzfristig große Mengen klastischen Materials in den See verfrachtet und es kommt sofort zu einer Fraktionierung: Grobklastika kommt proximal zur Ablagerung („fore-set“) und es erfolgt distal eine Kornverkleinerung. Das Feinkorn, hingegen, kommt dauerhaft zur Ablagerung („bottom-set“). Im See ist durch die Fracht der alpinen Flüsse ausreichend davon vorhanden. Die grobklastischen Schüttungen kreiern Loben auf einen Schwemmkegel unter Wasser, die mit typischerweise 23° in das Becken einfallen, seitlich auskeilen und sich wie bei einem Murschuttkegel immer auf den nächstniedrigen Bereich des Untergrunds konzentrieren. Die Stillwasserablagerungen trennen die an Hochwasserereignisse gebundenen Grobschüttungen. Beide Ablagerungen, also an kurzfristige Ereignisse gebundene Einschaltungen von Grobklastika als auch die dauerhaften Stillwassersedimente, erreichen Mächtigkeiten im einstelligen Meterbereich und werden schlussendlich im Zuge der Verlandung des Sees von fluviatilen Kiesen („top-set“) überlagert.

Das TD hat als lokales Setting ein Einzugsgebiet (EZG) von 51 km<sup>2</sup> am Talrand. Im starken Kontrast zur Salzach liegt das EZG mit 500 bis 1757 m (Trattberg) deutlich niedriger und war im LGM nur teilweise vergletschert; umgekehrt sind die allogenen Gletscher der Salzach (EZG Hohe Tauern) und Lammer (EZG Tennengebirge, Dachstein, Salzburger Ennstal, Radstädter Tauern) in die relativ niedrige Mittelgebirgslandschaft des Taugl EZG vorgerückt. Für die Taugl ist einerseits davon auszugehen, dass sie im Vergleich mehr Material relativ kontinuierlicher in das Becken schüttete als der Vomperbach, andererseits aber keinesfalls genug Material anlieferte, um eine rein von Grobklastika dominierte Schüttung zu produzieren, und es ist auch hier



**Abb. 4** Zusammensetzung und Charakterisierung der Salzach (8 Messstellen) und Taugl, sowie der Brunnen „Taugl“, „Vigaun“, „Bahnhof Vigaun“, „Gamp 1“ und „Gamp 2“  
**Fig. 4** Chemical composition and characterization of Salzach (8 monitoring points) and Taugl rivers and “Taugl”, “Vigaun”, “Bahnhof Vigaun”, “Gamp 1” and “Gamp 2” wells

von Einschaltungen von Stillwasserablagerungen zwischen den Loben der Deltaschüttungen auszugehen. Darüber hinaus ist zu beachten, dass – im Gegensatz zum Inntal – die Tiefe des Sees im Bereich der Tauglmündung relativ genau bekannt ist, das Beckentiefste beträgt gemäß Abb. 8 in Pomper et al. (2017) 425 m unter dem heutigen Gelände bzw. 35 m ü. A. bei einer Breite von ca. 4 km im Bereich des rezenten Talbodens. Da im SSB nur selten Grundmo-

räne erbohrt wurde, ist davon auszugehen, dass in diesem Bereich der Großteil des Beckens von Sedimenten des TD und der Stillwassereinschaltungen angefüllt ist.

Zudem ist bekannt, dass das TD nicht der letzten, sondern – zumindest – der vorletzten Eiszeit bzw. dem darauffolgenden Interglazial (Eem) zuzuordnen ist. Pomper et al. (2017) zeigen für das Untersuchungsgebiet in Analogie zu Penck und Brückner (1909), dass das Riss-Glazial mit ei-

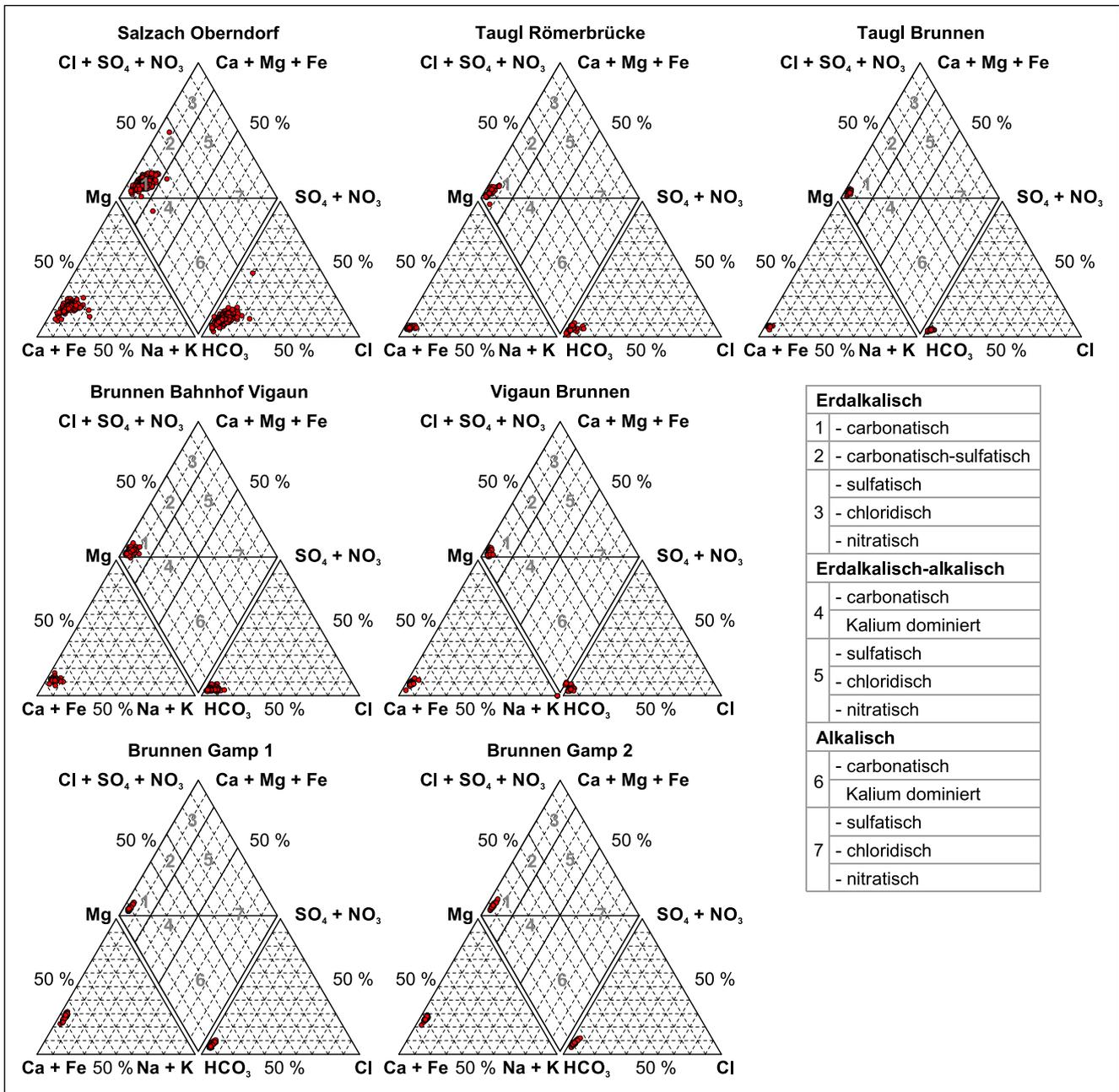


Abb. 4 (Fortsetzung)

Fig. 4 (Continued)

ner deutlich stärkeren und zeitlich längeren Eisbedeckung verbunden war. Dies impliziert auch eine höhere Verfügbarkeit von Sedimenten und es ist davon auszugehen, dass im Bereich des Taugl EZG zumindest Kargletscher vorhanden waren, sofern nicht ohnedies der Großteil des EZG von den o. g. allogenen Gletschern bedeckt war.

Die Vergletscherung der letzten Würm-Eiszeit mit dem LGM vor ca. 20.000 Jahren hatte nicht mehr die erosive Kraft, um die Sedimente früherer Eiszeiten zu erodieren (van Husen und Reitner 2011; Pomper et al. 2017; Herbst

und Riepler 2006). An der Oberfläche sichtbare Beispiele sind die Konglomerate ausgewählter Salzburger Stadtberge, in Vigaun und um Golling an der Salzach. Im Untergrund blieb ein Großteil des TD erhalten bzw. es ist nicht bekannt, wieviel davon im Verlauf der Würm-Eiszeit erodiert wurde.

Aus Sicht der Landschaftsentwicklung sind – in Zusammenhang mit der gegenständlichen Fragestellung – weitere Fakten von Relevanz: (1) Wie die meisten Deltaschüttungen gehen auch jene der Taugl distal in sukzessiv dünnere, flachere und stärker von Feinkorn dominierte Schichten über

und – umgekehrt – nimmt die Mächtigkeit der feinklastischen Stillwasserablagerungen dazwischen zu. So liegen im südlichen Siedlungsraum der Stadt Hallein kaum Grobschüttungen mehr vor, die unmittelbar mit dem TD verbunden sind und es dominieren Stillwasserablagerungen, die mit einer erosiven Winkeldiskordanz von jungen fluviatilen Kiesen der Salzach überlagert werden (Datenquelle: Baugrundkataster des Landesgeologischen Dienstes (2000), Salzburg). (2) Die heutige Landschaft wird vom aktuellen Erosionsniveau geprägt und ist deutlich niedriger als der ehemalige Wasserspiegel des „Salzburger Sees“. Verborgen unter den rezenten Ablagerungen der alpinen Flüsse (fluviatile Sande und Kiese, Hochflutsande, Füllungen von Altarmen, Torf), die meist 5–10 m betragen und häufig in postglaziale Terrassen unterteilt sind, befindet sich – erosiv und diskordant abgeschnitten – das Spektrum der alten, oben beschriebenen lakustrinen Sedimente (Czernin-Chudenitz et al. 1978; Höfer-Öllinger 2016). (3) Die Rolle der aktuellen Vorflut unterliegt diesem Zusammenspiel. Die Kommunikation zwischen dem Grundwasser, das sich in seinem Abflussgeschehen der geologischen Entwicklung der lakustrinen Sedimente bedient, und der Vorflut ist zum einen von der zufälligen Situation, wo und wie sich die Vorflut in die älteren Sedimente eingeschnitten hat, abhängig. Zum anderen steht sie in Zusammenhang mit der Kolmatierung der Flusssohle selbst (Kessler et al. *in press*). Ein weiterer Faktor ist in diesem Zusammenhang ein nicht zu unterschätzender Anteil eines Grundwasser-Begleitstroms der Vorflut in den oberflächennahen fluviatilen Sanden und Kiesen. Dieser Begleitstrom kann punktuell bzw. linienförmig mit jenem Grundwasser, das sich der mehrere hundert Meter mächtigen Deltasedimente bedient, kommunizieren. (4) Die Halbinsel von Gamp spielt für die gegenständliche Studie eine wesentliche Rolle. Bei den Brunnenbauarbeiten wurde eine Abfolge von Kies und Konglomerat angetroffen (Datenquelle: Baugrundkataster des Landesgeologischen Dienstes (2000), Salzburg). Für die Anlage der Insel gibt es keinen augenscheinlichen Anhaltspunkt – die Schlingen der alpinen Flüsse sind stets von den Schüttungen der Seitentäler charakterisiert oder von Bergstürzen. Weder der nahe Bergsturz von Vigaun (Uhlir und Schramm 2003) noch ein Murschuttkegel südlich davon vermochten, die Salzach in Richtung des TD zu drängen. Die Halbinsel von Gamp drängt sehr wohl und deutlich die Salzach ab, ohne Anzeichen eines geomorphologischen Prozesses. Die Schleife ist hingegen aufgrund anstehender Konglomerate schlüssig erklärbar.

Aus Sicht der Hydrogeologie ist zu betonen, dass die hydraulische Leitfähigkeit parallel der Loben im Delta, beim Typus Taugl, um 3 bis 5 Größenordnungen höher ist, als perpendicular dazu, da die Durchlässigkeit im sandigen Kies der Deltaschüttungen um  $E-03$  m/s und im Feinsand/Schluff der Stillwasserablagerungen um  $E-07$  m/s liegt.

Der Grundwasserfluss stagniert distal in den Sandschichten, wenn diese nicht irgendwo durch andere Prozesse oder künstlich angeschnitten sind (beide Phänomene sind im Bereich der Stadt Salzburg zu beobachten; Höfer-Öllinger 2016). Im Falle des TD ist nicht bekannt, ob und, falls ja, wo ein Abstrom in den Deltaloben stattfindet. Im GBF liegt lokal begrenzt ein quantitativ bedeutender Grundwasseraufbruch vor. So wird nördlich des GBF auf der gleichnamigen Halbinsel ein Gerinne ausschließlich von Grundwasser gespeist und fließt der Vorflut zu. Zudem gibt es ein oberflächennahes Grundwasservorkommen, das einem Begleitstrom der Salzach gleichzusetzen ist und von den jeweiligen lokalen Gegebenheiten charakterisiert ist. Wie sich bei Betrachtung von physikalischen, chemischen und isopenhydrologischen Eigenschaften zeigt, gibt es auch eine Komponente tiefen Grundwassers.

Die Taugl versickert zum Großteil des Jahres und mit Schüttungen von bis zu ca.  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  in ihrem Flussbett komplett. Übersteigt die Abflussmenge den o.g. Betrag, erreicht das OG die Salzach. Die aktuell zur Versickerung kommende Menge wurde durch Harum et al. (2016) über einen Zeitraum von 12 Jahren im Tagesgang numerisch modelliert, demzufolge beträgt die Menge der Anreicherung des Grundwassers aus dieser Versickerung 55 bis maximal 4200, durchschnittlich 1170 l/s. Eine Wasserbilanz für das TD zeigt, dass ein Großteil des zur Versickerung kommenden Grundwassers relativ nah in die Salzach filtrierte bzw. im Grundwasser-Begleitstrom Richtung Hallein fließt, dort teilweise durch Brunnen gefördert wird, teilweise in Salzach und Alm exfiltriert (Harum et al. 2016). Ob ein kleiner Teil hingegen gegen die Tiefe zu abfließt und andernorts wiederauftaucht, zeigt sich bei Betrachtung von Chemie und Isotopie.

## Physikalische und Chemische Eigenschaften von Grund- und Oberflächenwasser

Aus Sicht der hydrochemischen Beschaffenheit zeichnet sich eine starke Diversifizierung ab. Messstellen mit gleichförmiger Mineralisierung (Taugl, Gamp) stehen den starken Schwankungen des Lösungsinhalts der Salzach gegenüber (Abb. 4).

Bei der detaillierten Betrachtung zeigt sich, dass die Taugl (48 chemische Analysen) praktisch frei von Sulfat und Chlorid ist und ein sehr hohes Ca-Mg-Verhältnis um 12 aufweist. Die Taugl präsentiert damit ein stark von alpinem Karst geprägtes EZG, das von jurassischen Schichtfolgen aufgebaut ist (insbesondere Tauglbodenschichten, Oberalmer- und Barmsteinkalke; Braunstingl and Pestal 2005). Die Brunnen im TD spiegeln dies wider.

Die Salzach stellt mit ihrem relativ großen EZG ein zeitliches und räumliches Integral aller Mineralisierungen dar.

Hinsichtlich ihrer Funktion als Vorflut bietet sich an, ein Längsprofil zu betrachten. Für die gegenständliche Fragestellung werden die Messstellen Schwarzach (109 chemische Analysen), Werfen (109), Tenneck (48), Golling (162), Kuchl (145), Stadt Salzburg Süd (Hellbrunner Brücke, 259) und Nord (Autobahnbrücke, 109) sowie Oberndorf (479) in Betracht gezogen (Abb. 1 und 4). Dabei zeigt sich, dass die Mineralisierung ab Golling einer periodischen Zufuhr von Natriumchlorid unterliegt, was sich mit dem Zufluss aus der Schwarzen Torren Quelle über den Torrener Bach erklären lässt (Höfer-Öllinger et al. 2018).

Die Grundwasserchemie im TD unterstreicht die Beobachtungen an der Oberfläche und die numerischen Modelle. Anhand von Taugl-Brunnen (33 chemische Analysen), Vigaun Brunnen (82) und Brunnen Bahnhof Vigaun (24) lässt sich eine große Ähnlichkeit zur Taugl selbst darstellen. Geringe Gehalte von  $\text{CaSO}_4$  und  $\text{NaCl}$  sowie ein  $\text{Ca/Mg}$ -Verhältnis zwischen 10 und 12 ergänzen diese Annahmen.

Das in den Brunnen Gamp 1 und Gamp 2 geförderte Grundwasser zeigt eine zwar leichte aber stets erkennbare Mineralisierung von  $\text{CaSO}_4$  und  $\text{NaCl}$ , die vorweg wenig über deren Herkunft aussagt. Die Gehalte von Chlorid sind leicht, von Sulfat deutlich niedriger als in der Salzach. Das  $\text{Ca-Mg}$ -Verhältnis liegt bei 2,3 bzw. 2,5. Die Vor-Ort-Parameter zeigen eine Temperatur, die mit rund  $10\text{--}11^\circ\text{C}$   $2^\circ\text{C}$  höher ist als die Brunnen im TD (ca.  $8\text{--}9^\circ\text{C}$ ) und – insbesondere im Falle von Gamp 1 – mit  $3\text{--}6\text{mg/l}$   $\text{O}_2$  nicht komplett oxidierte Verhältnisse. In einer ersten Annäherung erscheint keines der Grundwasservorkommen im SSB und auch keines der OG als geeignet für eine potenzielle Herkunft für das Grundwasser im GBF.

## Chemie und chemische Modellierung

Bei Betrachtung der chemischen Charakteristik in Abb. 4 zeigt sich für die Salzach, dass sich in Abhängigkeit von Abfluss und Gewichtung der Zubringer eine Schwankung im  $\text{Ca/Mg}$ - und im Anionen-Verhältnis ergibt. Entlang der Fließstrecke von Schwarzach nach Oberndorf geht das durchschnittliche  $\text{Ca/Mg}$ -Verhältnis von 4,6 auf 2,9 zurück, während Sulfat (um etwa  $20\text{mg/l}$ ) stabil bleibt. Der Chloridgehalt vervierfacht sich entlang dieser Strecke von 2 auf  $8\text{mg/l}$ .

Charakteristisch für die Chemie von Grund- und Oberflächenwässer im TD und GBF ist der Plot aller Wasseranalysen im erdalkalisch-karbonatischen Feld (Abb. 4), bei insgesamt niedriger Mineralisierung (elektrische Leitfähigkeit um  $200\mu\text{S/cm}$  im TD und um  $330\mu\text{S/cm}$  im GBF). Das  $\text{Ca/Mg}$ -Verhältnis ist um 10 im TD und um 2,5 im GBF. Der Brunnen beim Bahnhof Vigaun zeigt darüber hinaus geringe Gehalte von  $\text{NaCl}$ . Die Brunnen im GBF weisen zudem geringe Mengen von  $\text{NaCl}$  und  $\text{CaSO}_4$  auf.

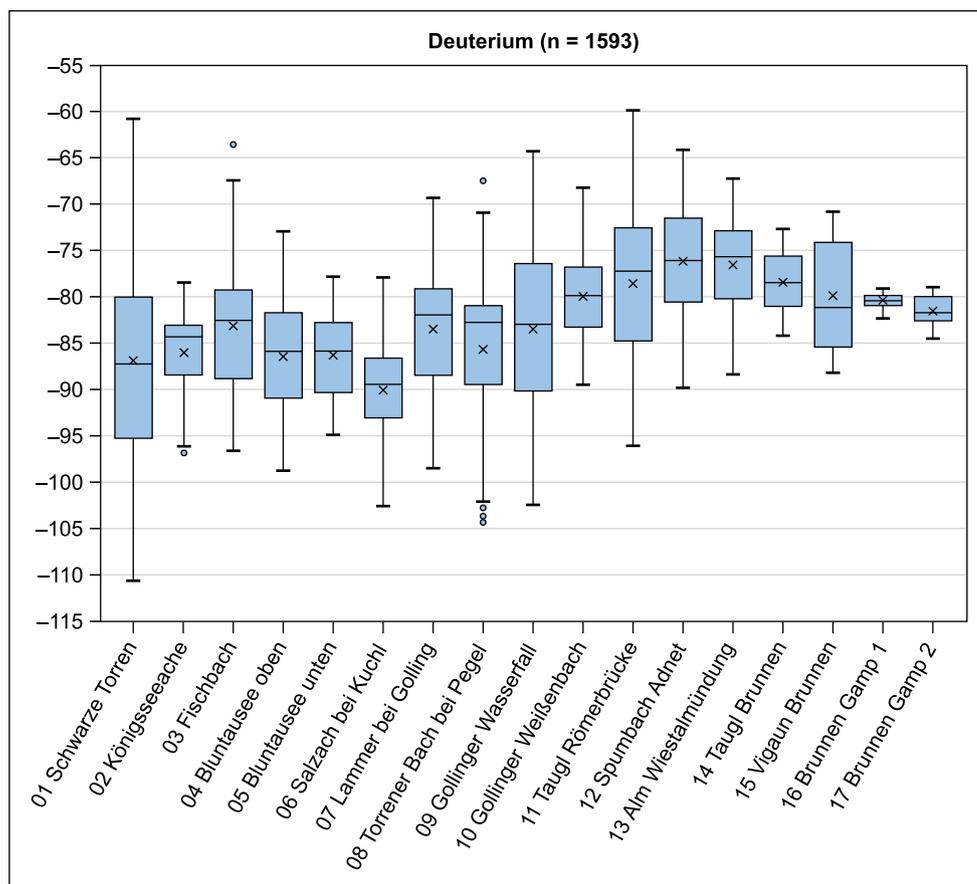
Bereits Leditzky (1987) stellt in seinen Betrachtungen dar, dass thermodynamische Gleichgewichte die scheinbaren Widersprüche hinsichtlich der Herkunft des Grundwassers des GBF erklären können. Dieser Ansatz wird auf Basis einer breiteren Datenbasis erneut verfolgt. Zu diesem Zweck wurde mithilfe des Softwarepaktes PHREEQC das Grundwasser des TD, der Salzach, sowie der Karstquellen im Umfeld des SSB mit verschiedenen Verhältnissen mit dem Grundwasser, das von Süd das SSB durchströmt, gemischt und die resultierende Gleichgewichtsbildung errechnet. Konkret wurde für das TD ein Mischwasser der Brunnen von Taugl und Vigaun verwendet und für das Talgrundwasser des SSB ein Durchschnittswert dreier repräsentativer WGEV-Messstellen (Umweltbundesamt GmbH) im Gemeindegebiet von Kuchl herangezogen. Bei einem Verhältnis von 80 % TD und 20 % Talgrundwasser des SSB lassen sich die um ca.  $1\text{--}2^\circ\text{K}$  erhöhte Temperatur, die niedrige Leitfähigkeit um  $330\mu\text{S/cm}$  und das beobachtete  $\text{Ca/Mg}$ -Verhältnis um 2,5 herleiten. Die gegenüber dem TD etwas erhöhten Gehalte von Sulfat und Natriumchlorid ergeben sich stöchiometrisch allein durch die Mischung selbst.

## Isotopenhydrologie

Als Grundlage stehen von den Stationen Golling und Salzburg (Freisaal) über Monate gemittelte Niederschlagsisotope über etwa 50 Jahre zur Verfügung (Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (2020) – Sauerstoff 18, Deuterium und Tritium; Abb. 2). Darüber hinaus wurden im Zeitraum 07/2016 bis 06/2020 tägliche Niederschlagsisotope in Wals bei Salzburg und auf dem Sonnblick durchgeführt (Höfer-Öllinger und Ludewig (2018); Sauerstoff 17, Sauerstoff 18 und Deuterium; Abb. 2). Aktuelle Betrachtungen zum Höheneffekt stabiler Isotope finden sich in Höfer-Öllinger (2020), Reischer et al. (2015) und Lechner et al. (2016).

Bei der Betrachtung der Niederschlagsisotopen fällt auf, dass langfristig ein Anstieg der Werte zu verzeichnen ist. Diese auf den Temperatureffekt zurückzuführende Entwicklung schlägt sich an der Station Freisaal in Salzburg (Abb. 1) im Zeitraum 1970–2020 in den Monatsmittelwerten mit einem Anstieg von  $0,007\text{‰}$  pro Jahr zu Buche. In Golling ist der Anstieg  $0,04\text{‰}$  pro Jahr (beides bezogen auf Sauerstoff 18) fast  $6\times$  so hoch. So beträgt der gewichtete Durchschnitt in Salzburg (487 Messungen im Zeitraum von 50 Jahren von 1970 bis 2020) bei  $\delta^{18}\text{O}$   $-10,08\text{‰}$  (SMOW), während er im 4-jährigen Zeitraum 1996–2020 und auf Basis täglicher Messungen bei  $-9,14\text{‰}$  (SMOW) liegt. In Golling ist der Durchschnitt (468 Messungen im o.g. Zeitraum) bei  $\delta^{18}\text{O}$   $-10,21\text{‰}$  (SMOW), wobei auch hier der gleitende Durchschnitt im Jahr 2020 bereits über  $-10\text{‰}$  liegt (Abb. 2). Dies geht mit den Beobachtungen in

**Abb. 5** Streubreite der stabilen Isotope, dargestellt anhand  $\delta$ -Deuterium vom SMOW in ‰  
**Fig. 5** Spread of stable isotopes measurements depicted based on  $\delta$  deuterium from SMOW in ‰



Kralik et al. (2018) einher, wo der mit dem Klimawandel einhergehende Temperaturanstieg im Alpenraum auch in den Signaturen der stabilen Isotope ersichtlich ist.

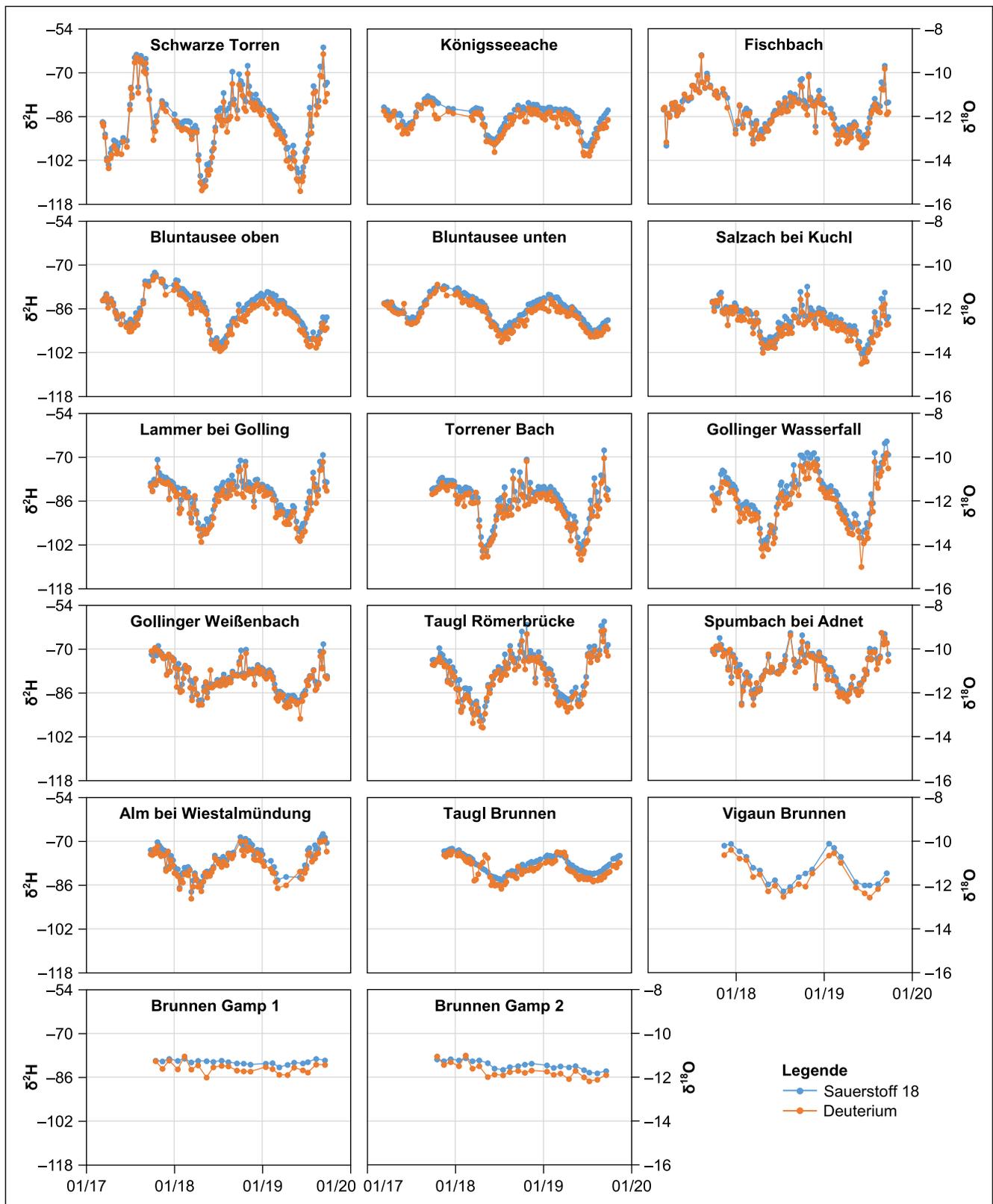
Die Bandbreite der stabilen Isotope ist in Abb. 5 anhand des Beispiels Deuterium dargestellt – die Isotope Sauerstoff 17 und Sauerstoff 18 sehen mit veränderter Skalierung deckungsgleich aus. Hier zeigen sich hinsichtlich ihrer Reife junge Abflüsse, die das Niederschlagsgeschehen mit kurzer Verzögerung (Verweildauer in Schneedecke) abbilden (Schwarze Torren Quelle, Gollinger Wasserfall, Taugl bei der Römerbrücke). Die ebenfalls hohe Amplitude des Brunnen Vigaun wird in der Interpretation beleuchtet. Größere Flüsse wie Salzach, Alm und Königsseeache zeigen eine deutliche Pufferung durch ihr Einzugsgebiet und die hydraulischen Verhältnisse (Stauseen und Seen im EZG). Die Brunnen von Gamp im GBF fallen mit der geringen Schwankungsbreite auf.

Für die statistische Auswertung wurden zwei Verfahren angewandt: Statistik der Werte und – bei Flüssen und Quellen – über die Abflussmenge gewichtete Statistik. Für viele OG und Quellen liegen seitens des Hydrographischen Dienstes des Landes Salzburg kontinuierliche Aufzeichnungen über den Abfluss vor, für die verbleibenden wurden die

naheliegendsten und hinsichtlich des EZG vergleichbarsten OG verwendet.

Betrachtet man die 17 Messstellen aus Sicht der stabilen Isotope, so lohnt sich ein Blick auf die einzelnen Plots in Abb. 6. Die bereits in Abb. 5 anhand des Deuteriums dargestellte Streubreite ist hier zeitlich aufgelöst. Alle Achsen wurden gleich gelassen, um eine Vergleichbarkeit zu garantieren, und alle Achsen wurden so dargestellt, dass sie einen Vergleich mit der GMWL ( $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$ ; Craig 1961) erlauben (auch in Abb. 2). Die WL der einzelnen Messstellen befinden sich im Zusatzmaterial der Online-Ausgabe dieses Beitrags. Dabei zeigt sich, dass der Großteil des Niederschlags auf der GMWL liegt – lediglich Niederschlagsereignisse kleiner 3 mm pro Tag zeigen Verdunstungseffekte und liegen durchwegs darunter (Höfer-Öllinger und Ludwig 2018). Sie sind für die Betrachtung der Grundwasserneubildung unerheblich. Alle 17 untersuchten Messstellen von Grund- und Oberflächenwasser plotten großteils oberhalb der GMWL, mit teils beharrlicher Persistenz, die um 2 bis 4 Zählerpunkte über der „10“ in Craig's Formel liegt. Die Steigung bleibt mit „8“ unangetastet.

Die  $\delta^{17}\text{O}$ -Ergebnisse zeigen ein sehr ähnliches Verhalten wie  $\delta^{18}\text{O}$  und es ist kein Unterschied zwischen Quellen,



**Abb. 6** Zeitreihendarstellung von Deuterium in der linken und Sauerstoff 18, jeweils  $\delta$  SMOW in ‰, in der rechten Ordinate. Daten – soweit vorhanden – der Jahre 2017, 2018 und 2019, in Summe 1593 Analysen

**Fig. 6** Time series plot of deuterium in the left and oxygen 18 in the right ordinate. Data – as far as available – from the years 2017, 2018 and 2019, in total 1593 analysis

Flüssen und Seen bzw. Flüssen aus Seen feststellbar: Der durchschnittliche  $\delta^{17}\text{O}$ -Exzess geht, über zahlreiche Proben gemittelt, stets gegen Null (Tab. 2).

Vom GBF liegt mit Datum 07.05.2008 eine einzige Tritiumanalyse vor ( $< 1,3$  TU; Umweltbundesamt GmbH 2020).

## Interpretation

Im alpinen Raum zeigen stabile Isotope mit Mittelwert bzw. Median – idealerweise mit der Abflussmenge gewichtet – die durchschnittliche Einzugsgebietshöhe und mit der Streubreite die Reife des Wassers. So zeigen die Messstellen Schwarze Torren, Fischbach, Gollinger Wasserfall und Taugl eine sehr hohe Streubreite, die auch einen typischen Jahresgang darstellen. Jahresgang und Streubreite des Abflusses des Königssees und der Salzach sind aufgrund des deutlich größeren Einzugsgebietes bzw. der Pufferwirkung des Sees gedämpft. Die Brunnen von Gamp zeigen wenig Streuung und es ist kein Jahresgang auszumachen, das Durchschnittsalter dieser Wässer liegt damit aufgrund des horizontalen Verlaufs der stabilen Isotope, in denen kein Jahresgang mehr ersichtlich ist, in Zusammenschau mit der Tritiumanalyse vom Mai 2008 ( $< 1,3$  TU) im Bereich mehrerer Jahrzehnte (Abb. 5 und 6). Ein Zusammenhang mit der Salzach kann auch aufgrund der absoluten Werte ausgeschlossen werden – das gewichtete Mittel der Salzach liegt bei  $-13,02\text{‰}$ , in Gamp I bei  $-11,58\text{‰}$  und in Gamp II bei  $-11,71\text{‰}$ .

Direkte Vergleiche, z. B. der jeweilige Abfluss von Bluntausee („Bluntausee unten“) und Königssee („Königsseeache“), geben teils unerwartete Aufschlüsse. So zeigt sich am Königssee trotz der etwa 2000-fachen Wassermenge ein deutlich kurzfristigeres Anspringen des Jahresganges als im Bluntausee. Hintergrund ist, das Zweiterer ausschließlich durch Grundwasser gespeist wird: Die Fließzeit des Grundwassers durch den Bergsturz im Bluntatal beträgt zwei Monate (Höfer-Öllinger et al. 2018).

Die Unabhängigkeit des  $\delta^{17}\text{O}$ -Exzesses gegenüber der Art der Messstellen (Quelle, Fließgewässer, See) zeigt, dass diese Methode sehr gut als Parameter zur Qualitätssicherung geeignet ist, aber in der gegenständlichen Fragestellung keine über auf  $\delta^{18}\text{O}$  und Deuterium hinausgehende Schlussfolgerungen zulässt.

Harum et al. (2016) schließen im Gegensatz zu früheren Untersuchungen eine Herkunft des Grundwassers im GBF vom TD aus und leiten anstatt dessen eine Alimentation von der Salzach her. Diese Vermutung gibt Anlass für eine unbefangene Neubetrachtung der in der Methodik dargestellten Szenarien: (1) Bisherige Variante – vom TD und Unterströmung der Salzach. (2) Variante neu (Harum et al. 2016) – Uferfiltration der Salzach und Niederschlag auf der Halbinsel von Gamp. (3) Alternative 3: Östlich Vigaun

wurde ein durch einen etwa 100m oberhalb des Talbodens liegenden Konglomeratrücken verdecktes, mehrere 100m tiefes Tal, das Brandecker (1994) bereits konzeptionell andeutete, durch eine moderne Studie der Geologischen Bundesanstalt wiederentdeckt (unveröffentlicht, Projekt SC27) und als mögliche Herkunft für das Grundwasser im GBF erwogen. (4) Eine bislang unentdeckte talrandnahe Grobschüttung westlich entlang des SSB bringt gering mineralisierte Karstwässer zum GBF. (5) Das Delta des Almbaches aus dem Wiestal nordöstlich von Hallein reicht bis zum GBF und das Grundwasser kommt von dort. Die wichtigsten Eckdaten, die zum gegenständlichen Lösungsvorschlag führen, sind wie folgt:

- Im Raum Hallein unmittelbar nördlich des GBF ist die Beckenfüllung durch Stillwassersedimente gekennzeichnet und Kies liegt lediglich oberflächennah als Träger eines oberflächennahen Grundwasser-Begleitstroms im Salzachtal vor (Datenquelle: Baugrunderkater des Landesgeologischen Dienstes (2000) in Salzburg).
- Das TD wurde im Würm nur teilweise erodiert (Herbst und Riepler 2006; Pomper et al. 2017).
- Die Verweildauer des Grundwassers im GBF über mehrere Jahrzehnte eingebettet in einer Region, die ansonsten von sehr jungen und unmittelbaren Abflüssen gekennzeichnet ist.
- Die geometrische Eigenschaft, dass das GBF schlussendlich die einzige Möglichkeit für das Tiefengrundwasser bildet, aufzusteigen (tiefster Punkt). Dort folgt eine Fällungsreaktion mit Konglomeratbildung und der morphologischen Ausprägung der Halbinsel – eine Nachrechnung der Wasseranalytik mit PHREEQC bestätigte die Übersättigung. Im Norden des GBF tritt Grundwasser kontinuierlich zutage und mündet in einem Graben in die Salzach.
- Aus isotopenhydrogeologischer und hydrochemischer Sicht ist ein maßgeblicher Anteil durch die Salzach auszuschließen. Vielmehr wird von einem geringeren Beitrag (gemäß hydrochemischer Modellierung ca. 20%) aus dem südlichen Zustrom aus dem SSB ausgegangen.

Betrachtet man die Entwicklung des Tales in diesem Bereich in Form eines schematischen Querschnittes, muss man – um das hydrogeologische Abflussgeschehen richtig beurteilen zu können – zumindest bis in das letzte Hochglazial der Riss-Eiszeit zurückgehen (Abb. 7).

1. Riss-Hochglazial: Das Salzachtal ist komplett vergletschert, ebenso wesentliche Teile des Taugl EZG durch allogene Gletscher, die sich mit lokalen Kargletschern vereinen.
2. Riss-Würm-Interglazial: Eine frühere und höhere Form des „Salzburger Sees“ entsteht gleichzeitig mit dem Eisrückzug, rasch kommt es zum Kollaps der isolierten Glet-



- schierzunge, isolierte Eiskörper kalben bzw. schwimmen auf, Toteiskörper werden eingeschüttet und schwimmen bei unterirdischer Erosion auf oder schmelzen nur langsam; randlich beginnt die Entstehung des TD.
3. Das Becken wird – teilweise schon gleichzeitig mit dem Eisrückzug und jedenfalls unmittelbar danach – sehr rasch verfüllt. Das TD schiebt sich in kürzester Zeit in das Becken vor und die Deltaloben der Grobschüttungen werden vom kontinuierlichen „Bottom Set“, von Stillwasserablagerungen unterbrochen.
  4. Nach der Verlandung im Interglazial und einer relativ langen Periode der Kaltzeit kommt es gegen Ende des Würm zur erneuten Vereisung und teilweisen Erosion des TD. Eventuell bleiben auf der Erosionsdiskordanz Reste von Grundmoräne.
  5. Nach dem LGM, etwa 20.000 bis 19.000 Jahre vor heute, zieht sich das Eis zurück und der letzte „Salzburger See“ entsteht, Zerfall der Gletscherzunge ähnlich Punkt 2 oben.
  6. Es kommt zur erneuten sehr raschen Verfüllung des Beckens. Die Taugl bildet ein viel kleineres Delta an jenen Stellen aus, wo das Ursprüngliche nicht im LGM ausgeräumt wurde.
  7. Das heutige Erosionsniveau schneidet die alte Talfüllung in einer etwa 1,75‰ gegen Nord geneigten Fläche und bringt darauf die jüngsten Erscheinungen zu Tage: Zwei Terrassen mit den Lokalbezeichnungen „Friedhofs“- und „Hammerauterrasse“ (Pippan 1967) sowie Austufe mit Kies und Hochflutsanden; der Bergsturz von Vigaun und Murschuttkegel bilden sich aus. Das GBF wird von der Salzach in einer Schleife umflossen, weil es der fluviatilen Erosion einen relativ größeren Widerstand bietet.
  8. Der Grundwasserabfluss im TD ist im Beckentiefsten nach wie vor aktiv und alimentiert das GBF. Die Herkunft ist der proximalste Abschnitt des TD; damit kommt es lediglich zu einer leichten Fraktionierung der Isotopen, denn es handelt sich um jenen Abschnitt, in dem *immer* Versickerung stattfindet. Die Fließzeit beträgt mehrere Jahrzehnte, was durch Dispersion zu einer Auslöschung der jahreszeitlichen Signale der stabilen Isotope führt. Der Taugl-Brunnen hingegen bezieht sein Grundwasser aus dem mittleren Abschnitt des TD, der insbesondere durch sommerliche Niederschlagswässer gekennzeichnet ist, entsprechend ist die Signatur relativ weniger abgereichert (Abb. 5). Der Brunnen von Vigaun liegt in dieser Reihe im distalsten beobachteten Abschnitt und zeigt die größte Amplitude (Abb. 5 und 6). Das liegt daran, dass er von jenem Teil des TD gespeist wird, wo die Extremereignisse zur Versickerung kommen: Stark abgereichertes Wasser der Schneeschmelze im Frühjahr und relativ wenig abgereichertes Wasser sommerlicher Starkniederschläge.

## Diskussion

Die instationäre Betrachtung des Isotopeneintrags ins Grundwasser wurde möglich durch die detaillierte Bearbeitung durch Harum et al. (2016), aus der hervorgeht, dass die Taugl je nach Wasserstand unterschiedlich weit vordringt – diese Daten können für die Modellierung des Isotopeneintrags verwendet werden. Dabei erfolgt eine Fraktionierung der stabilen Isotope, die schlussendlich zum beobachteten Ergebnis führt. Es ist davon auszugehen, dass an anderen Stellen im TD wieder andere Isotopenverhältnisse vorkommen und die in Abb. 7-8 eingezeichneten Brunnen förmlich Nadelstiche in einer hochkomplexen dreidimensionalen Abfolge aus Kies und Geringleitern darstellen.

Das vorliegende Konzeptmodell kann zwar die hydrogeologische Situation im SSB im Detailgebiet TD und GBF widerspruchsfrei aufklären, erhebt aber keinesfalls den Anspruch auf die alleinige Wahrheit. Viele Details sind noch nicht bekannt und können nur durch direkte Aufschlüsse erkundet werden bzw. bleiben für immer verborgen. Die Situation in Abb. 7 ist vereinfacht und stellt sich in der Realität deutlich komplexer dar, so sind Wasserwege früherer Eiszeiten, mächtigere Einschaltungen von Moränen sowie die Interstadiale der Riss- und Würm-Eiszeiten, subaquatische Gleitungen und Verzahnungen mit den Deltas von Alm (Hallein) und Salzach (Golling) nicht dargestellt, ebenso wenig die postglaziale Entwicklung der Terrassenlandschaft. Auch die in unmittelbarer Nähe der Römerbrücke (Abb. 1) im Gelände aufgeschlossenen Stillwassersedimente und das verdeckte Tal östlich von Vigaun, das weit in das Gemeindegebiet von Adnet reicht, wurden hier zum Zwecke der Vereinfachung nicht im Detail bearbeitet.

Die wichtigste Erkenntnis ist die Tatsache, dass die Salzach als wesentliche Quelle für das Grundwasser im GBF ausgeschlossen werden kann. Aus Sicht des Grundwasserschutzes für die Trinkwasserversorgung ist – wie ursprünglich vermutet – das Einzugsgebiet der Taugl zu schützen, wobei – im Gegensatz zum Tauglbrunnen – das Grundwasser im GBF ein Alter von mehreren Jahrzehnten aufweist. Um das Alter genau zu bestimmen empfehlen sich hier  $^3\text{H}/^3\text{He}$ -Bestimmungen.

Die Bearbeitung lässt generelle Schlussfolgerungen zu. Zum einen sind hydrogeologische Modelle auf Basis einer schlüssigen Vorstellung der Aquifergenese zu erstellen, ansonsten sind falsche Resultate zu erwarten. Im gegenständlichen Beispiel spielt die Vorflut ihre Rolle lediglich und genau im Sinne des Wortes, sie bestimmt das Druckniveau und ist der finale Entlaster, mehr nicht: Sie hat sich diskordant in die Sedimente des „Salzburger Sees“ eingeschnitten.

Zum anderen ist die Verwendung von 2D-Grundwassermodellen in alpinen Tälern nur dann sinnvoll, wenn es sich

um sehr kleine, lokal begrenzte Fragestellungen handelt. Für regional-hydrogeologische Aussagen oder wasserwirtschaftliche Festlegungen sind 3D-Modelle unter Einbeziehung der Aquifergenese notwendig.

Der Einfluss der Gewichtung der Abfluss- bzw. Niederschlagsmenge bei der Betrachtung der stabilen Isotope ist beachtlich, so betragen die Unterschiede zwischen Mittel und gewichtetem Mittel bis zu 0,5‰ bei  $\delta^{18}\text{O}$  und 5‰ bei  $\delta\text{D}$  bei Quellen und OG, bei Niederschlag das Doppelte davon.

**Danksagung** Auch wenn nicht in allen Punkten Einigkeit herrscht, ist die akribische und großteils exzellente Vorarbeit durch das Team um Till Harum ein wesentlicher Eckpfeiler der gegenständlichen Bearbeitung – Dank nicht zuletzt auch für die aufrichtige Diskussion.

Die Erkenntnisse über Talgeometrie und -genese, quartäre (nicht-) Erosionen, Aufbau der Deltasequenzen basieren neben eigenen Erfahrungen auf publizierten Erkenntnissen von Hermann Brandecker, Paul Herbst, Dirk van Husen, Therese Pippan, Johannes Pomper, Jürgen Reitner, Bernhard Salcher, Erich Seefeldner, denen Dank und Hochachtung gilt.

Für die Bereitstellung von Daten und großartige, befruchtende Diskussionen sei dem Team des Landes Salzburg, insbesondere Rainer Braunstingl, Margot Geiger, Harald Huemer und Theodor Steidl gedankt.

Großer Dank gilt all jenen, die bei den Probennahmen geholfen haben, sei es seitens der Betreiber in den Brunnenanlagen, sei es durch das eigene Team im Gelände, sowie natürlich dem Laborteam.

Dank gilt Markus Keuschnig und Josef Lintschinger sowie zwei anonymen Reviewern für die Durchsicht des Manuskripts sowie für die konstruktiven Ratschläge.

**Funding** Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

**Interessenkonflikt** G. Höfer-Öllinger gibt an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

**Open Access** Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

## Literatur

- Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R.: HISTALP—historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *Int. J. Climatol.* **27**(1), 17–46 (2007). <https://doi.org/10.1002/joc.1377>
- Baugrunderkataster des Landes Salzburg: Archiv des Geologischen Dienstes des Landes Salzburg (2000)
- Brandecker, H.: Hydrogeologie des Salzburger Beckens. *Steir. Beitr. Hydrogeol.* **26**, 5–39 (1974)
- Brandecker, H.: Abflussverhältnisse. In: Gesamtuntersuchung Salzach (GUS), Teiluntersuchung 1.1 Gewässercharakteristik und Abflussverhältnisse 1–183, Teil 2, S. 127–183. (1994)
- Brandecker, H., Maurin, V.: Die Trinkwasserressourcen des südlichen Salzburger Beckens und seiner Umrahmung. *Österr. Wasserwirtsch.* **34**, 105–122 (1982)
- Braunstingl, R., Pestal, G.: Geologische Karte von Salzburg. Geologie d. österr. Bundesländer. Geologische Bundesanstalt, Wien (2005)
- Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus.: <https://ehyd.gv.at/>, Zugegriffen: 24. Juli 2020
- Craig, H.: Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science* **133**(3465), 1702 (1961). <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>
- Czernin-Chudenitz, C., Hitsch, E., Kirchner, E., Proding, F., Schmidt, G., Üblagger, G.: Umweltschutzprogramm. Leopoldskron Moos Gneis, Untersuchungen zu Fragen der Wasserentsorgung. Magistrat der Stadt Salzburg, Salzburg (1978)
- Decker, K., Peresson, H., Faupl, P.: Die miozäne Tektonik der östlichen Kalkalpen: Kinematik, Paläospannungen und Deformationsaufteilung während der „lateralen Extrusion“ der Zentralalpen. *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt* **137**, Wien (1994). [https://www.zobodat.at/pdf/JbGeolReichsanst\\_137\\_0005-0018.pdf](https://www.zobodat.at/pdf/JbGeolReichsanst_137_0005-0018.pdf). Zugegriffen: 31. Jan. 2020
- Donadel, A., Höfer-Öllinger, G., Frimmel, H., Schrott, L.: Evolution of Late- to Postglacial River Confluences in Overdeepened Alpine Valleys—Saalach and Königsseeache (Austria). *Austrian J. Earth Sci.* **107**, 60–73 (2014)
- Harum, T., Dalla-Via, A., Reszler, Ch.: Grundwassermodell Salzachtal Abschnitt Königsseeache – Kuchl Endbericht. Joanneum Research, Graz (2016). 114 S
- Herbst, P., Riepler, F.: 14C evidence for an Early to Pre-Würmian age for parts of the Salzburger Seeton, Urstein, Salzach Valley, Austria. *Austrian J. Earth. Sci.* **99**(1), 57–61 (2006). <http://www.geol-ges.at/mitt-99.html>
- Höfer-Öllinger, G.: Die Terrassenkanten der Stadt Salzburg und deren Auswirkungen auf das Grundwasser-Abflussgeschehen. *Beitr. Hydrogeol.* **60**, 61–72 (2016)
- Höfer-Öllinger, G.: Untersuchungen der Karsthydrogeologie im Land Salzburg, Österreich. *Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* **25**(1), 15–29 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00767-019-00439-6>
- Höfer-Öllinger, G., Muggenburger, K., Ludwig, E.: Stable isotopes of daily precipitation sampling: 3 years of observation at Wals and Sonnblick Observatorium Salzburg, Austria. In: Spötl, C. (Hrsg.) 17th stable isotope network Austria (SINA) meeting. Program and abstracts. 17th stable isotope network Austria (SINA) meeting Innsbruck, 08.11.-9.11.. Bd. 15. (2019)
- Höfer-Öllinger, G., Muggenburger, K., Ludwig, E., Boch, R.: NISBO – stabile isotope in Regen & Schnee. NISBO – stable isotopes in meteoric precipitation. In: Ludwig, E. (Hrsg.) Sonnblick Observatorium – Wissenschaftliche Aktivitäten. Sonnblick observatory – scientific activities, S. 30–31. ZAMG, Vienna (2020)
- Höfer-Öllinger, G., Schneider, M., Buske, E., Volkmer, F., Schöne, T., Kessler, T.: Hydrogeology of the Torrenser Joch fault zone, Salzburg, Austria. In: Mattes, J., Christian, E., Plan, L. (Hrsg.) Proceedings of the 12th EuroSpeleo Forum 124 Ebensee (2018) <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33927.24484>

- Höfer-Öllinger, G., Ludewig, E.: Variability of stable isotopes in precipitation at Sonnblick observatory (3.106 m asl) in comparison with Wals Isolab (446 m asl) (2018). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23033.77920>
- van Husen, D.: Verbreitung, Ursachen und Füllung glazial übertiefter Talabschnitte an Beispielen in den Ostalpen. *Eiszeitalt. Gegenwart* **29**, 9–22 (1979)
- van Husen, D., Reitner, J.M.: An Outline of the Quaternary Stratigraphy of Austria. *Eiszeitalt. Gegenwart* **60**, 366–387 (2011)
- Kessler, T., Marschallinger, R., Höfer-Öllinger, G.: Steigende Grundwasserspiegel als Herausforderung für zukünftiges Grundwassermanagement in alpinen Flusstälern. Manuskript in Begutachtung (2021)
- Köhler, M., Eder, S., Scholz, M., Poscher, G.: Tunnel Vomp-Terfens – from investigations of alternatives to construction phase. *Felsbau* **23**, 83–89 (2005)
- Kralik, M., Wyhlidal, S., Brielmann, H.: Long-term  $18\text{O}$ -records in precipitation and global warming. 20th EGU General Assembly, EGU2018, Proceedings from the conference held 4–13 April, 2018 in Vienna, Austria, S. 8485. *Geophys. Res. Abstr.* (2018). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018EGUGA..20.8485K/abstract>
- Lechner, K., Spötl, C., Höfer-Öllinger, G.: Karsthydrogeologie des Kitzsteinhorn-Massivs (Hohe Tauern, Salzburg). *Höhle* **67**, 65–76 (2016)
- Leditzky, H.P.: Hydrogeologisches Gutachten über Detailfragen der Grundwasserverhältnisse im Gamper Brunnenfeld. *Joanneum Research, Graz* (1987). 48 S.
- Penck, A., Brückner, E.: Die Eiszeiten in den nördlichen Ostalpen. *Die Alpen im Eiszeitalter*, Bd. 1. Tauchnitz, Leipzig (1909). 393 S.
- Pippan, Th.: Die Stadterrassen von Salzburg. *Mitt. Österr. Geogr. Ges.* **109**, 115–128 (1967)
- Plöschinger, B.: Salzburger Kalkalpen. *Sammlung geologischer Führer*, Bd. 73. Borntraeger, Berlin (1983). 144 S.
- Plöschinger, B.: Geologische Karte der Republik Österreich 1:50.000 Blatt 94 Hallein (1987)
- Plöschinger, B., Brandecker, H., Leditzky, H.P., Maurin, V., Tichy, G., van Husen, D.: Erläuterungen zu Blatt 94 Hallein. *Geologische Karte der Republik Österreich 1:50.000* (1990)
- Pomper, J., Salcher, B.C., Eichkitz, C., Prasicek, G., Lang, A., Lindner, M., Götz, J.: The glacially overdeepened trough of the Salzach Valley, Austria: Bedrock geometry and sedimentary fill of a major Alpine subglacial basin. *Geomorphology* **295**, 147–158 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.07.009>
- Prey, S.: Geologische Karte der Umgebung der Stadt Salzburg. *Geol. B.-A., Wien* (1969)
- Prey, S.: Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt; 1959. In: *Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt*, S. 216–224. *Geol. B.-A., Wien* (1959)
- Ratschbacher, L., Frisch, W., Linzer, H.G., Merle, O.: Lateral extrusion in the eastern Alps, Part 2. Structural analysis. *Tectonics* **10**(2), 257–271 (1991b). <https://doi.org/10.1029/90TC02623>
- Ratschbacher, L., Merle, O., Davy, Ph., Cobbold, P.: Lateral extrusion in the eastern Alps, Part 1. Boundary conditions and experiments scaled for gravity. *Tectonics* **10**(2), 245–256 (1991a). <https://doi.org/10.1029/90TC02622>
- Reischer, M., Bichler, B., Spötl, C., Höfer-Öllinger, G., Wyhlidal, S.: Karst hydrogeology of the Untersberg massif and its interaction with the porous aquifer in the adjacent Salzburg Basin. *Austrian J. Earth Sci.* (2015). <https://doi.org/10.17738/ajes.2015.0014>
- Seefeldner, E.: Entstehung und Alter der Salzburger Ebene. *Mitt. Ges. Salzburger Landeskd* **94**, 202–208 (1954)
- Seefeldner, E.: Salzburg und seine Landschaften: Eine geographische Landeskunde. *Bergland-Buch, Salzburg* (1961). 573 S.
- Starnberger, R., Draxler, I., Höfer-Öllinger, G., Reitner, J.M.: Der Beginn des Spätglazials im Nördlichen Alpenvorland – Lumineszenzdatierung und Pollenanalysen an Sedimenten des Salzburger Beckens. In: *DEUQUA 2014: 37. Hauptversammlung der deutschen Quartärvereinigung Innsbruck*, 24. bis 29. September. (2014). Abstractband, 129
- Stummer, E.: Der Aufbau des Salzburger Zungenbeckens. *Mitt. Ges. Salz. Landesk.* **86–87**, 91–92 (1947)
- Uhlir, C.F., Schramm, J.M.: Zur Kinematik des Bergsturzes von Vignau (Salzburg). *Mitt. Österr. Geol. Ges.* **93**, 161–173 (2003)
- Umweltbundesamt GmbH.: <https://wasser.umweltbundesamt.at/h2odb/index.xhtml>, Zugegriffen: 24. Juli 2020
- Wessely, G., Neubauer, F., Salcher, B., Wagreich, M.: A geological snapshot from the front of the Northern Calcareous Alps. *Well Obermoos TH-1, Salzburg, Austria. Austrian J. Earth Sci.* **109**(2), 189–202 (2016)

**Hinweis des Verlags** Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.