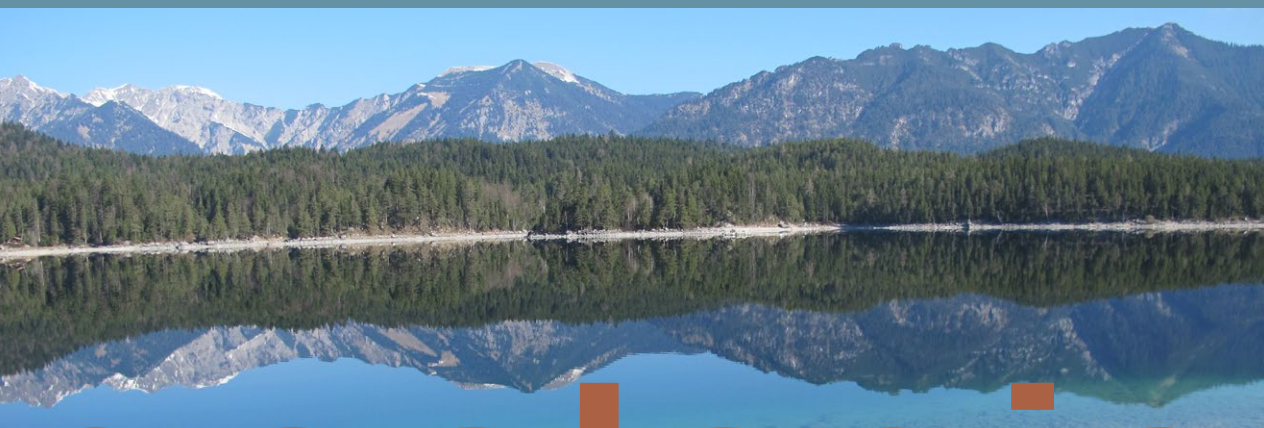




Der Eibsee – ein alpiner Grundwasser- und Wärmespeicher



geologie



Der Eibsee – ein alpiner Grundwasser- und Wärmespeicher

Günter Kus, Michael Stöckl, Timo Spörlein

41 Seiten, 19 Abbildungen, 5 Tabellen, Augsburg 2020

UmweltSpezial
Geologica Bavarica 117

Impressum

Der Eibsee – ein alpiner Grundwasser- und Wärmespeicher

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
Tel.: 0821 9071-0
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: www.lfu.bayern.de

Konzept/Text:

LfU: Kus, Günter; Spörlein, Timo
Stöckl, Michael, Böglstraße 5a, 81737 München

Redaktion:

LfU, Referat 104

Bildrechte:

Alle Bilder LfU außer:
Günter Kus, Ammerbergweg 19, 82398 Polling: Titelbild, Abb. 4, 5, 8, 10, 12, 13, 15
Michael Stöckl, Böglstraße 5a, 81737 München: Foto in Abb. 1

Stand:

September 2020

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die publizistische Verwertung der Veröffentlichung – auch von Teilen – wird jedoch ausdrücklich begrüßt. Bitte nehmen Sie Kontakt mit dem Herausgeber auf, der Sie – wenn möglich – mit digitalen Daten der Inhalte und bei der Beschaffung der Wiedergaberechte unterstützt.

Diese Publikation wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN|DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 122220 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
1 Einleitung	6
1.1 Erforschungsgeschichte	7
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	8
2 Geologisch-Hydrogeologischer Überblick	9
3 Wasserhaushalt Eibsee	12
3.1 Abgrenzung des Einzugsgebiets	12
3.2 Zu- und Abflüsse	15
3.2.1 Sichtbare Zuflüsse	16
3.2.2 Abfluss aus der Klimabilanz	17
3.2.3 Zu- und Abflussmengen aus Wasserstandsänderungen	17
4 Temperatur- und Leitfähigkeitsverhältnisse im See- und Grundwasser	20
4.1 Einzugsgebiet Eibsee	21
4.2 Einzugsgebiet Krepbach	24
5 Hydraulische Interaktion zwischen See und Bergsturzmasse	26
6 Stabile Isotope im See- und Grundwasser	29
7 Seewasseranteile im Grundwasser des Krepbacheinzugsgebietes	33
8 Fazit	37
Dank	39
Literaturverzeichnis	40

Kurzfassung

Der Eibsee liegt in einem großen Bergsturzgebiet unterhalb der Zugspitze. Der See besitzt keinen oberirdischen Ausfluss, steht aber in indirekter Verbindung mit in den Sturzmassen gespeicherten Grundwasservorkommen, die nordöstlich des Sees über Brunnen zur Trinkwasserversorgung von Grainau und Garmisch-Partenkirchen erschlossen werden.

Im Rahmen einer Studie des Geologischen Dienstes am Bayerischen Landesamt für Umwelt und des Instituts für Grundwasserökologie des Helmholtz-Zentrums Neuherberg konnten das Einzugsgebiet näher charakterisiert und wichtige Einflussfaktoren auf den Wasserhaushalt des Eibsees erkannt werden. Zentrale Bedeutung haben die unterirdischen Zu- und Abflüsse des Eibsees, die sich jedoch nach wie vor einer direkten Beobachtung weitestgehend entziehen. Die in der Literatur angegebene mittlere unterirdische Abflussmenge aus dem Eibsee von 450 l/s wurde näherungsweise mit verschiedenen Ansätzen nachvollzogen. Für den Winter 2013/2014 wurden auf diese Weise Mindestabflussmengen aus dem See von etwa 240 bis 270 l/s ermittelt, was mit dem in der Literatur genannten Niedrigwasserabfluss von 300 l/s in der Größenordnung gut übereinstimmt.

Durch Interpretation der jährlichen Seespiegel- und Volumenänderungen konnte die davon abhängige, wechselnde hydraulische Interaktion zwischen Seekörper und dem Grundwasservorkommen in den Bergsturzmassen prinzipiell geklärt werden. Der See wirkt dabei nicht nur hinsichtlich der Wassermengen als Speicher und Puffer auf den Grundwasserkörper. See- und Grundwasserkörper bilden über den Austausch ein sich wechselseitig beeinflussendes hydraulisch-thermisches System, durch dessen Verständnis thermische Phänomene wie die lokale Eisfreiheit im Winter und der signifikante Einfluss auf die Grundwassertemperaturen im angrenzenden Krepbach-Einzugsgebiet erklärt werden können. Die Temperaturen der vom See beeinflussten Grundwässer liegen gegenüber dem klimatischen Erwartungswert etwa um 2 bis 4 K höher. Reihenuntersuchungen der Temperaturen, Leitfähigkeiten und stabilen Isotope Sauerstoff-18 und Deuterium im Grund- und Seewasser zeigen auffällige Korrelationen, die Aussagen zur Grundwasserherkunft und zu den möglichen Teileinzugsgebieten zulassen. Der aus den stabilen Isotopen ableitbare Deuterium-Exzess verweist mit Werten zwischen 6 und 8 ‰ auf signifikante Anteile von Eibseewasser in einigen Grundwässern. Über verschiedene Mischungsbetrachtungen lassen sich überschlägig erhebliche Eibseewasseranteile z. B. von etwa 70 bis 80 % in den Krepbachquellen und 50 bis 90 % in den Grainauer Brunnen berechnen.

1 Einleitung

Der Landkreis Garmisch-Partenkirchen wird seit 2012 im Rahmen der Geowissenschaftlichen Landesaufnahme hydrogeologisch bearbeitet. Neben den bedeutenden Grundwassermengen im glazial übertieften Talraum der Oberen Loisach stand insbesondere der abflusslose Eibsee im Blickfeld der näheren Untersuchungen.

Grimminger (1982) bezeichnet den etwa 1,77 km² großen und maximal 36 m tiefen Eibsee als einen der hydrologisch und limnologisch forschungswürdigsten Alpenseen in Bayern. Bemerkenswert sind seiner Auffassung nach insbesondere die ungewöhnlich starken Spiegelschwankungen und die regelmäßig ablaufenden Durchmischungen des Sees. So entwickelt sich im Sommer eine ausgeprägte thermische Schichtung, im Winter auch eine inverse Schichtung im Eibsee, die jeweils im Frühjahr und Herbst durch Durchmischung komplett aufgelöst werden (frdl. mündl. Mitteilung Herr Robert Kapa, WWA Weilheim, Nixdorf et al. 2004). Diese besondere Hydrologie des Sees ist eng an die topographischen und geologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet geknüpft. Markant ist der relativ abrupte Wechsel von den mittelgebirgsartigen Rahmenhöhen des Eibseebeckens hin zum Hochgebirgsmassiv des Wettersteins (Abb. 1). Diese landschaftlich spektakuläre Kulisse weist, ausgehend vom Niveau des Eibsees (970 m ü. NHN) bis zur Zugspitze (2.962 m ü. NHN), mit rund 2.000 m Höhendifferenz eine enorme Reliefenergie und entsprechend starke klimatische Unterschiede auf. Die vom Gebirgsrelief abhängigen, für die Nordalpen typischen Stauwetterlagen sind eine Ursache der allgemein hohen Niederschlagsmengen im Jahr, die unter Einbeziehung der Niederschlagsstationen Grainau, Eibsee und Zugspitze durchschnittlich etwa 1.600 mm im Gebiet betragen. Dabei wirkt das in seiner Umgebung stark eingetiefte Eibseebecken als zentrale Kaltluftsenke und der See als Vorflut für die unter- und oberirdischen Abflüsse.

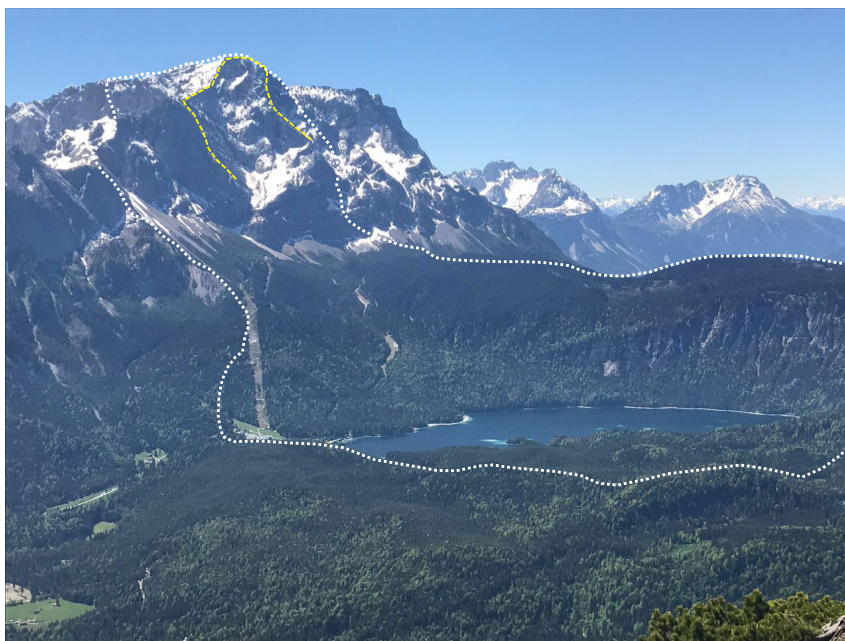


Abb. 1:
Blick auf Eibsee und Zugspitze vom Hoher Ziegspitz mit dem ungefähren Verlauf der oberirdischen Einzugsgebietsgrenze des Sees (weiß gepunktete Linie) und der vermuteten Ausbruchsnische des Eibsee-Bergsturzes (gelb gestrichelte Linie).

Die extreme Topographie im Gebiet war eine entscheidende Voraussetzung für den sogenannten Eibsee-Bergsturz. Nach Datierungen von Jerz, H. & Poschinger, A. (1995) brach der Bergsturz etwa 3.750 Jahre vor heute aus dem Wetterstein und überformte massiv dessen Vorland. Besonders davon betroffen waren die orographischen Einzugsgebiete des Eibsees und des in östlicher Nachbarschaft liegenden Krepbachs. Die Kubatur des Bergsturzes wurde von den Autoren seinerzeit auf

300 bis 400 Mio. m³ veranschlagt, neuere Schätzungen gehen heute eher von 150 bis 200 Mio. m³ aus (Haas et al. 2014). Die wenige Meter bis über 100 m mächtigen Sturzmassen (Knauer 1933, Jerz, H. & Poschinger, A. 1995, IKG 2001) überdecken vor allem nördlich und östlich des Sees weite Flächen und sind für das ortsprägende, unruhige, in zahlreiche Hügel und Senken gegliederte Kleinrelief verantwortlich (Orth 2003).

Trotz des hohen Niederschlagsdargebots fehlt dem Gebiet in weiten Teilen eine permanente Oberflächenentwässerung. Aufgrund des hoch permeablen Bergsturz- und Schuttmaterials sind viele oberirdischen Gerinne nur episodisch unter Hochwasserbedingungen aktiv. Im Gesamtsystem ist deshalb der Anteil des unterirdischen Abflusses vorherrschend. Die stärker schüttenden Quellaustritte und Grundwasservorkommen im Einzugsgebiet des Krepbachs (Krepbach-Ursprung, Baderseequellen, Brücklbach-Ursprung) lassen dabei auf zusammenhängende Becken- und Rinnenstrukturen im Untergrund schließen, in denen sich die unterirdischen Abflüsse zu ergiebigen Grundwasservorkommen vereinen. Zwischen Eibsee und Grainau weisen diese mit 9 bis 11 °C relativ hohe, über den regionalen Erwartungswerten liegende Wassertemperaturen auf. Über Reihen- und zahlreiche Einzelmessungen sind z. B. am Krepbach-Ursprung ganzjährig hohe Umsatzmengen von wärmerem Grundwasser nachgewiesen (Märkl & Huber 2006, Kus 2012–2019).

Seit etwa einem Jahrzehnt wird das Grundwasser auch in bedeutenden Mengen durch vier leistungsstarke Bohrbrunnen für die Trinkwassergewinnung von Grainau und Garmisch-Partenkirchen erschlossen. Die Grundwasserherkunft wurde im Zusammenhang mit den vermeintlichen Abflüssen aus dem Eibsee bislang zum Teil unterschiedlich interpretiert. Eine Beteiligung von Eibseewasser erscheint aufgrund der Lage, Ergiebigkeit und physiko-chemischen Beschaffenheit (geringe Mineralisierung, erhöhte Temperaturen) der vorkommenden Grundwässer nachvollziehbar.

1.1 Erforschungsgeschichte

Dem Eibsee und seinen unterirdischen Abflüssen haben sich in den letzten etwa 110 Jahren verschiedene Autoren gewidmet. Wissenschaftliche Interpretationen der Eibseeabflüsse und des Krepbachursprungs als mögliche Austrittsstelle werden erstmals in Reis (1910) angestellt. Sie beruhen vor allem auf hydrochemischen Ähnlichkeiten der See- und Quellwässer sowie auf einem Mengenvergleich der Quellabflüsse mit überschlägig aus Seewasserspiegeländerungen berechneten Seeabflüssen. Bedauerlicherweise sind die dort angekündigten Messdaten nach derzeitigem Recherchezustand offenbar nicht in einer Folgepublikation veröffentlicht worden. Hibler (1918) mutmaßt hingegen zu Tage tretendes Eibseewasser auch östlich des Sees, vielmehr aber an der bei ihm genannten Oberen Krepbachquelle, die seiner Ortsbeschreibung folgend, mit der heute als Christl-Hütt'n-Quelle bezeichneten Wasserfassung übereinstimmt. Schumann (1965) hält beide Varianten für wissenschaftlich nicht überzeugend und erwägt daher die Möglichkeit eines unterirdischen Ablaufs direkt ins Loisachtal über einen stärker schüttenden Quellbereich am Gschwandack nördlich des Sees (Abb. 2, Quelle pk5).

Neuere Untersuchungen zur Trinkwassererschließung in Grainau halten aufgrund der beobachteten Grundwassertemperaturen und -mengen einen erheblichen Anteil von Eibseewasser in den Krepbachquellen und den zwischen diesen und dem Eibsee liegenden Bohrbrunnen für wahrscheinlich (IKG 2001). Für Orth (2004) kommen ohne weitere Begründung als Wiederaustritt des Seeabflusses nur die rund 1,7 km nordöstlich des Untersees gelegenen Krepbachquellen in Frage. Im Rahmen weiterer Untersuchungen an den Trinkwasserbrunnen erfolgten Stichbeprobungen zur Analyse des radiogenen Tritiums und der stabilen Wasserisotope Sauerstoff-18 und Deuterium, die aufgrund des geringen Probenumfangs jedoch nicht abschließend von den Gutachtern interpretiert wurden (Hydroisotop 2003). Die gemessenen Tritiumgehalte von 10,8 bis 11,4 TU werden im Fir-

menbericht als Beleg für ein jüngerer Grundwasser gesehen. Mit dieser Vorarbeit und neueren Stichproben auch vom Seewasser hält Isodetect (2008) es für unwahrscheinlich, dass im Grundwasser der Grainauer Brunnen größere Mengen Eibseewasser enthalten sind. Gemessene Verdunstungseffekte an den stabilen Wasserisotopen im Brunnenwasser werden auf Einflüsse bei der Schneeschmelze zurückgeführt. Im Wasserrechtsantrag zu den Grainauer Brunnen (IKG 2009) wird abschließend aufgeführt, dass für die erhöhten Temperaturen im Grundwasser die mächtige Überdeckung (geothermischer Gradient) und der Eibseeabfluss verantwortlich sind.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die hohen Mengen und die Temperaturanomalie der östlich des Eibsees im Einzugsgebiet des Krepbachs vorkommenden Grundwässer sind Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit. Als Grundthese wird davon ausgegangen, dass der Temperatur- und Wasserhaushalt dieses Grundwasserreservoirs entscheidend über den Eibsee als funktionellen Zwischenspeicher reguliert wird. Zur Vergegenwärtigung der Wasserumsatzmengen bzw. zur Überprüfung der von oben genannten Autoren zum Teil pauschal behandelten Abflusssituation am Eibsee soll eine überschlägige Klimabilanzierung für das abzugrenzende Einzugsgebiet erfolgen. Des Weiteren sind die in der Literatur angegeben unterirdischen Abflussmengen anhand eigener Berechnungen nachzuvollziehen. Hierbei stellt sich unter anderem die Frage, wie ein vergleichsweise stabiles Grundwassersystem mit einer saisonal stark schwankenden Zusp eisung via Eibsee in Übereinstimmung zu bringen ist. Diese Problematik verdeutlicht sich vor allem durch die unterschiedlichen Temperaturgänge im See- und Grundwasser: Den 9 bis 11 °C im Grundwasser steht ein Jahresgang von etwa 0 bis 20 °C im Seewasser gegenüber. In diesen Zusammenhang können auch die thermischen Phänomene in der nördlichen Umrahmung des Eibsees und den darin befindlichen kleinen Nebenseen einbezogen werden. Auffällig sind dort insbesondere die auch im strengen Hochwinter eisfrei bleibenden Wasserflächen. Des Weiteren trifft es sicherlich nicht zu, dass für das Grundwasservorkommen ausschließlich Eibseewasser als Neubildungskomponente in Frage kommt, da aufgrund der hohen Niederschlagsmengen entsprechend hohe Sickerwasserraten in den Bergsturzmassen zur Neubildung beitragen. Gleichfalls muss ein Randzufluss aus den Hangschuttmassen des angrenzenden Hochgebirges berücksichtigt werden. Beide Komponenten müssen aufgrund der fehlenden Vorflut direkt in das Grundwasser einspeisen. Neben dem rein qualitativen Nachweis von Eibseewasser ergibt sich daher zwangsläufig auch die Frage nach den Mischungsverhältnissen der potenziellen „Neubildungskomponenten“ im Grundwasser. Abschließend soll zudem eine Vorstellung der vom Seewasserkörper induzierten Wärmemenge im Grundwasser abgeleitet werden.

Zur Bearbeitung der Problemstellung wurde die routinemäßige Vorgehensweise der Hydrogeologischen Landesaufnahme sowohl analytisch ergänzt als auch zeitlich ausgedehnt. Ziel war es jedoch mit möglichst vertretbarem Aufwand die gestellten Fragen zu beantworten. So sollten die relevanten Messstellen zwar nur monatlich, aber mindestens über ein hydrologisches Jahr hinweg gemessen und beprobt werden. Neben der Messung von Quellschüttungen, Wasserständen und den klassischen physiko-chemischen Vorortparametern Leitfähigkeit, pH-Wert und Temperatur wurde dabei auch die analytische Bestimmung der stabilen Wasserisotope Sauerstoff-18 und Deuterium vorgesehen. Die aufgrund der Verdunstung über dem Seewasser von der Niederschlagsgeraden abweichende $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ -Relation ist vielfach belegt (Moser & Rauert 1980). Dieser Verdunstungseffekt, der auf einer Anreicherung schwerer Sauerstoffisotope beruht, lässt sich im Allgemeinen zur Identifizierung von Seewasser bzw. Seewasseranteilen im Grundwasser heranziehen. Ein zu Beginn in seiner fachlichen Relevanz unterschätzter Aspekt waren die monatlich einhergehenden Geländebeobachtungen des Gesamtgebietes im Rhythmus der Jahreszeiten sowie eine damit verbundene Fotodokumentation der zum hydro(geo)logischen Verständnis beitragenden Phänomene.

2 Geologisch-Hydrogeologischer Überblick

Der Untersuchungsbereich umfasst im Wesentlichen die Niederschlagsinzugsgebiete des Eibsees und des Krepbachs und schließt als Südostbegrenzung die markante Kammlinie Waxenstein–Zugspitze ein (Abb. 2 und Abb. 3). Mit Ausnahme des SW-Rands liegt er vollständig auf bayerischem Terrain. Geologisch gehört das Gebiet zum Kalkalpin. Die mesozoische Schichtfolge reicht stratigraphisch von der Trias des Alpinen Muschelkalk (Virgloria-, Steinalm-, Reifling-Formation) bis zur kreidezeitlichen Schrambach-Formation. Die Festgesteinsformationen enthalten mit marinen Kalk-, Dolomit- und Mergelsteinablagerungen überwiegend Karst- und Kluftwasserleiter bzw. -geringleiter. Der stark reliefierte Festgesteinssockel wird flächenhaft von quartären Lockergesteinsdecken verhüllt, die entlang glazialer Übertiefungen, an Talflanken und im Bergsturzgebiet mit mehreren Dekametern relativ mächtig werden.

Den tektonischen Rahmen bildet die kalkalpine Lechtaldecke. Sie ist vor allem durch großräumig angelegte W–E-streichenden Syn- und Antiklinalen gekennzeichnet, die in gewisser Weise den hydrogeologischen Bau strukturell vorgeben. So ist mit dem Streichen fallweise eine prägnante Richtung der unterirdischen Entwässerung festzustellen. Als Beispiel hierfür stehen die ergiebigen Karstwassermengen in der südöstlich an den Untersuchungsbereich angrenzenden **Wetterstein-Synklinale** (Abb. 2). Sie fließen größtenteils entlang der nach Osten abtauchenden Muldenstruktur ins Höllental ab. Gleichzeitig laufen nur geringe Mengen randlich zum Eibsee- bzw. Krepbach über. Der strukturelle Einfluss findet sich ebenfalls im Eibseebecken. Dessen morphologische Beckenachse ist mit der geologischen **Eibsee-Synklinale** tektonisch vorgezeichnet. Die vielfach auch als **Eibseemulde** bezeichnete Struktur ist geometrisch in etwa konform zur heutigen Beckenlage (Vidal 1953). Das Eibseebecken darf daher in erster Näherung als tektonisch angelegt betrachtet werden, auch wenn seine Ausräumung und das heutige Erscheinungsbild hauptsächlich auf glaziale und postglaziale Prozesse zurückgehen. Im Plattenkalkzug des hohen Seebergs bieten aufgrund des begrenzten Einzugsgebiets wahrscheinlich nur streichparallele und damit vorwiegend W–E-ausgerichtete Karst- und Kluftstrukturen ausreichend Speichervolumen um die Eibsee tributären Quellen ganzjährig zu speisen. Zusammenfassend betrachtet enthält die mesozoische Schichtfolge im Gebiet eine in Menge und Qualität uneinheitliche Kluft- und Karstwasserführung. Zusammenhängende Grundwasservorkommen in größerer Menge sind im Festgestein sicher die Ausnahme. Vielfache Beobachtungen bestätigen, dass der Hauptanteil des unterirdischen Abflusses in den aus gut durchlässigen Sturz- und Hangschuttmassen bestehenden Lockergesteinsdecken umgesetzt wird.

Im **Niederschlagsinzugsgebiet** des Eibsees fungiert der See als Hauptvorflut. Seine Beckensohle wird von gering durchlässigen Diamikten (v. a. Moränenablagerungen, Geschiebemergel) sowie überwiegend mergeligen Gesteinseinheiten im Untergrund (Kössen-, Ammergau-, Schrambach-Formation) abgedichtet. Einen bedeutenden Anteil seiner unterirdischen Zuflüsse erhält der Eibsee aus den umrahmenden Hangschutt- und Bergsturmassen, die einen Großteil der Niederschläge und aus dem Festgesteinsrahmen stammenden Abflüsse aufnehmen. Ein vergleichsweise geringer, jedoch stabiler Zustrom erfolgt aus dem weitverbreiteten Hauptdolomit, der sein Kluftwasser über einige Quellgerinne oberirdisch oder in den Hangschuttflächen des Uferbereichs verdeckt unterirdisch an den See abgibt. An den sichtbaren Zuläufen sind Wassermengen in der Größenordnung von 10 bis 15 l/s zu beobachten (ohne Kotbach). Eine beständige direkte Zuspeisung von Kluft- und schnell abfließendem Karstwasser erfolgt zudem über den im NW an den See grenzenden Plattenkalkzug des Hohen Seebergs. Über die anzunehmende Karstwasserführung des Plattenkalks der Törlen-Schubmasse im SW des Sees liegen keine Informationen vor. Vermutlich fließt ein wesentlicher Teil der gebildeten Abflüsse ins österreichische Gebiet ab. Nennenswerte Karstwassermengen aus der Wetterstein-Formation des Zugspitzmassivs ins Eibseebecken sind nach bisherigen Beob-

achtungen nicht vorstellbar. Eine Besonderheit sind die über unterschiedlich dynamische See- und Grundwasserstände kontrollierten Infiltrationen von Seewasser in die angrenzende Bergsturzmasse und deren verzögerte Rückspeisung in den See (Kap. 5). Das Eibseewasser fließt über den Untersee unterirdisch ab.

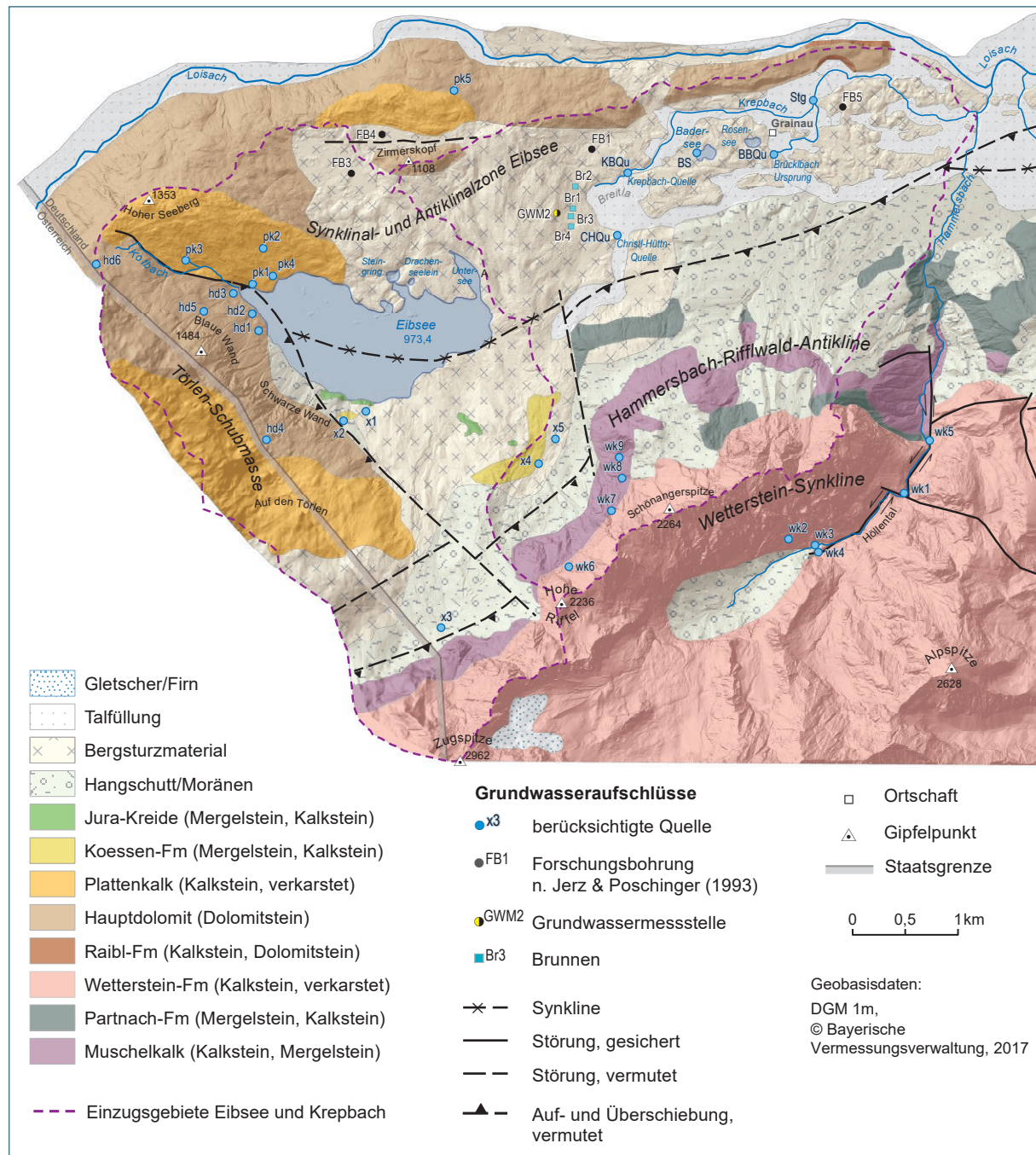


Abb. 2: Geologisch-hydrogeologische Übersichtskarte. Geologische Grundlagen aus LfU (2017a und b), Vidal (1953) und Miller (1961) modifiziert nach Kus (2012–2019).

Im **Krepbacheinzugsgebiet** dominierenden quartäre Lockergesteine. Die teilweise hoch permeablen Bergsturz-, Schutt-, Schwemm- und Wildbachablagerungen leiten den Niederschlag und entstehende Abflüsse größtenteils schnell unterirdisch ab. Durch zwischengelagerte Staubeckensedimente, in den Bergsturz- und Hangschuttmassen auch durch verlagerte und akkumulierte Feinfraktion, bilden sich an lokalen Stauhorizonten teilweise recht beständige Quellwasseraustritte aus. Bedeutende Beispiele hierfür sind die Quellen des Badersees mit gemessenen Schüttungen bei Niedrigwasser von etwa 60 l/s und die ehemals für die kommunale Wasserversorgung erschlossene „Christl-Hütt'n-Quelle“ mit Schüttungen von etwa 7 bis maximal 80 l/s. Während die Abflüsse aus dem Badersee ausschließlich unterirdisch erfolgen, versickern die Überlaufmengen der Christl-Hütt'n-Quelle in anhaltenden Phasen ergiebiger Niederschläge infolge hoher Grundwasserstände und nahezu wassergesättigter Deckschichten nur teilweise. Die Kluftwasserabflüsse aus dem Hauptdolomit sowie aus den Kalksteinen der Alpine-Muschelkalk-Formationen und der Partnach-Formation sind im Allgemeinen von geringerer Bedeutung. Letztere neigen zwar zu Verkarstung, die aber im Gebiet nur sehr flachgründig entwickelt ist. Das große Karstwasserareal des Wettersteinmassivs spielt für das Einzugsgebiet des Krepbachs nur eine untergeordnete Rolle. Nach Beobachtungen von Kus (2012–2019) liefern die sichtbaren Karstwasserüberläufe (Abb. 2, wk6 bis wk9) im Grenzbereich zwischen der Wetterstein-Formation und der liegenden Partnach-Formation bzw. Reifling-Formation zwischen Schönangerspitze und Hohe Riffel durchschnittlich nur 20 bis 30 l/s. Der Grundwasseraustausch mit dem Festgesteinsrahmen ist insgesamt als gering anzusehen. Der Hauptanteil des Niederschlags versickert generell rasch im Untergrund und speist den Zwischen- und Grundwasserabfluss. An den Ursprüngen des Krepbachs und Brücklbachs verengen sich die hydraulischen Querschnitte im Grundwasserleiter, so dass ab dort bedeutende Grundwassermengen oberirdisch aus dem Einzugsgebiet abfließen.

3 Wasserhaushalt Eibsee

Der Eibsee ist in seiner Art der größte deutsche Bergsturzsee und nach Schumann (1955) unter den großen Alpenseen der einzige „Hochalpensee“. Wegen seiner fehlenden Oberflächenabflüsse kann er als geschlossener End- oder Blindsee typisiert werden (Grimminger 1982). Der Eibsee ist in zwei Becken gegliedert: Der größere Weitsee und der über eine Schwelle mit ihm verbundene, wesentlich kleinere Untersee. Der Mittelwasserstand des Sees liegt nach den Jahresreihen 2011 bis 2019 etwa bei 973,4 m ü. NHN. Bemerkenswert sind die zum Teil extremen Wasserspiegelschwankungen. Sie erreichen im Mittel bis 1,8 m, können aber in Ausnahmefällen, wie in den Jahren 1910 und 1965 (Streil 1978), auch bis über 4 m hinausreichen. Im niederschlagsreichen Jahr 1999 lag der Hochwasserstand etwa 2,5 m über dem Mittelwasser (Orth 2003). Nach längeren Niederschlagspausen fallen die Wasserstände relativ schnell wieder. Diese spezielle Charakteristik des Sees legt damit sowohl größere Zufluss- als auch Abflussmengen nahe, wobei Grimminger (1982) letztere dabei als relativ gleichmäßig einschätzt und erstere deshalb als meteorisch bedingte Hauptursache für die starken Spiegelschwankungen folgert. Für den in Abb. 6 dargestellten Zeitraum 2012 bis 2014 kann die starke Abhängigkeit der Wasserhochstände von den sommerlichen Niederschlägen anhand der monatlichen Niederschlagssummen gut nachvollzogen werden. So gehen den jeweiligen Wasserhochständen entsprechende Maxima im Niederschlag voraus. Die zeitliche Verzögerung kann dabei überschlüssig mit einem Monat angegeben werden, was auf einen schnellen unterirdischen Abfluss im hochdurchlässigen Hangschutt und Karstgerinne schließen lässt.

Aus Sicht der Hydrogeologie ist im Zusammenhang mit den ergiebigen Grundwasservorkommen östlich des Sees vor allem der Seeabfluss von Interesse: Zunächst strömt das Wasser aus dem Weitsee über eine Gesteinsschwelle in den Untersee, wenngleich auch kurzzeitig einsetzende vermutlich durch Luftdruckunterschiede und Winde hervorgerufene gegenläufige Strömungsrichtungen – erkennbar an der Auslenkung der Unterwasserflora – an der Schwelle beobachtet werden können. Bei Niedrigwasserständen ist das Abfließen in den Untersee über die Schwelle jedoch gut zu sehen (Abb. 8). Seeschwinden im blockreichen Bergsturzmateriel beobachtete Schumann (1965) hauptsächlich am Südost-Ufer des Untersees. Nach seinen Angaben fallen sie bei Niedrigwasser aber trocken. Der Hauptanteil des Seewassers soll nach seinen vergleichenden Temperaturmessungen zwischen Weitsee und Untersee an der tiefsten Stelle des Untersees (947 m ü. NHN) abfließen. Im Weitsee hingegen sind bisher keine unterirdischen Abflüsse bekannt oder dokumentiert. Die unterirdischen Abflussmengen bewegen sich nach Angaben von Streil (1978) und weiteren Ausführungen von Grimminger (1982) in einer Spanne von etwa 300 l/s bei Niedrigwasser bis zu 800 l/s bei Hochwasser. Aus ihren Beobachtungen und Messungen schätzen sie einen durchschnittlichen Abfluss von etwa 450 l/s.

3.1 Abgrenzung des Einzugsgebiets

Mit dem Einzugsgebiet des Eibsees hat sich Streil (1978) fachlich auseinandergesetzt und festgestellt, dass der orographisch ermittelten Fläche mit etwa 13,94 km² weitere Bereiche angrenzen, die aufgrund der Höhenlage ihrer tiefsten Punkte theoretisch hinzugerechnet werden könnten. In dieser Arbeit orientiert sich die Abgrenzung in erster Linie an der Orographie wie bei Streil (1978), in zweiter Linie an den geologischen und tektonischen Gegebenheiten. Wie bereits im Kap. 2 erläutert ist grundsätzlich vom Hauptwasserumsatz in der quartären Überdeckung auszugehen. Ausgenommen davon sind der Plattenkalk am Hohen Seeberg und auf dem Törlen-Plateau, sowie die Wetterstein-Formation des Zugspitzmassivs, bei denen relevante Kluft- und Karstwasserabflüsse zu hinterfragen sind. Der in weiten Teilen um den See ausstreichende kompakte Hauptdolomit fungiert, mit wenigen Ausnahmen (Kap. 2), als wirksamer „Stauer“ für angrenzende Grundwasserleiter (Plattenkalk, Hangschutt und Sturzmassen). Als Sohlfläche und zur Definition möglicher unterirdischer

Grenzen des Einzugsgebiets dienen demnach die Grenzflächen Hauptdolomit oder bindige Moräne zu Hangschutt bzw. Bergsturzmaterial oder Plattenkalk. Da weder das präquartäre Relief (Felsoberkante) noch die Verbreitung und Mächtigkeit bindiger Moränen unter den Bergsturzmassen in der Fläche bekannt sind, ist die Abgrenzung des Einzugsgebiets vor allem nördlich des Eibsees mit einigen Unsicherheiten behaftet. Insgesamt ergeben sich die in Abb. 3 dargestellten und im Folgenden näher beschriebenen fünf Teileinzugsgebiete, aus denen sich schließlich eine Gesamtfläche des Einzugsgebiets von etwa 15,55 km² ermittelt.

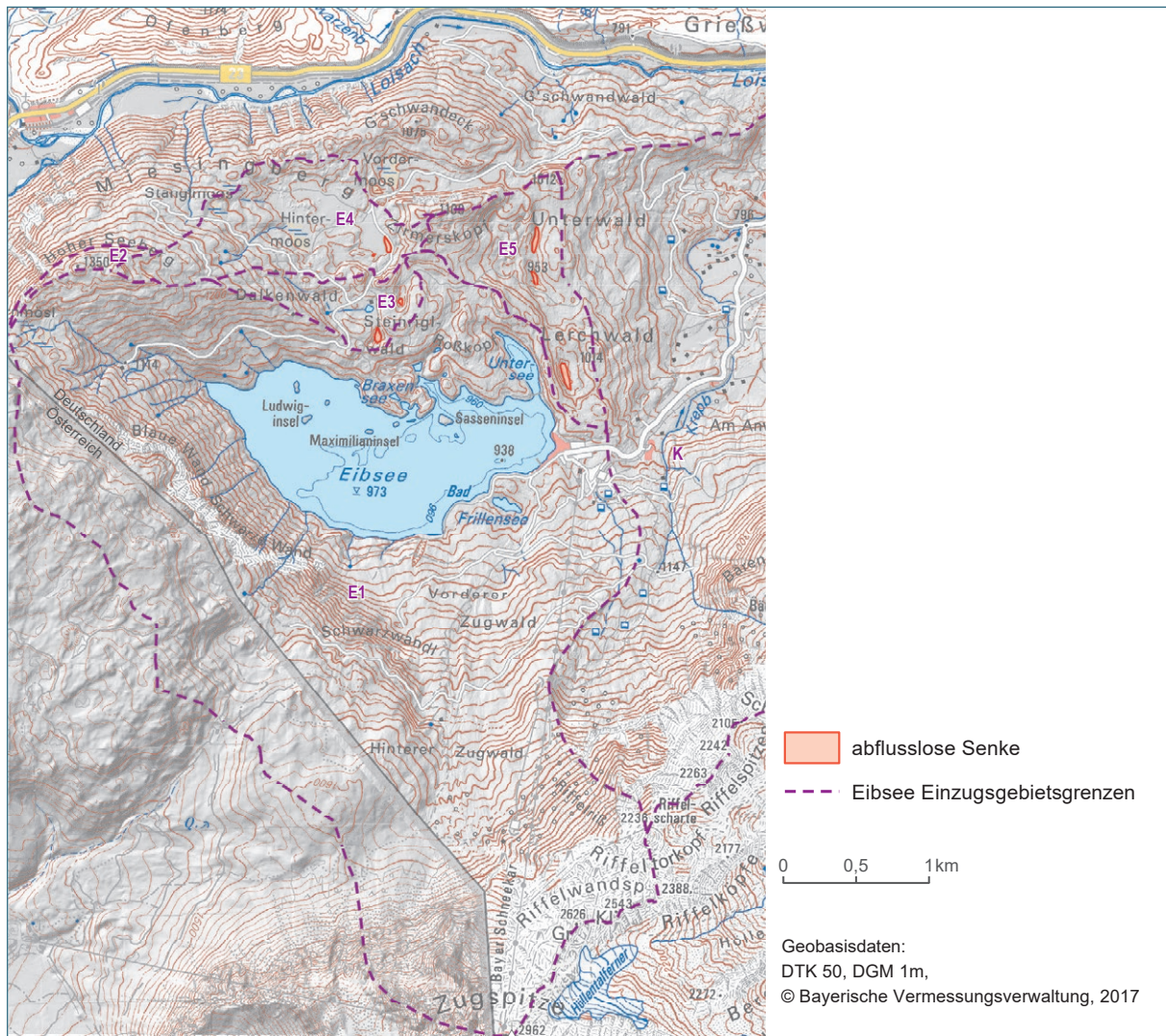


Abb. 3: Übersicht der Teileinzugsgebiete E1 bis E5 des Eibsees mit Darstellung abflussloser Senken (rot umrandete Flächen) und dem Anschluss an das Einzugsgebiet Krepbach (K) im Osten

Das **Teileinzugsgebiet E1** umfasst die Fläche des orographischen Einzugsgebiets. Entgegen der Aussage von Grimminger (1982) dürfte sich der Hochgebirgsanteil (Zugspitzmassiv) darin sehr wohl in der Bilanz niederschlagen, auch wenn hierzu keine eingehenderen Untersuchungen vorliegen. Im Bereich des Bayerischen Schneekars muss z. B. davon ausgegangen werden, dass sich vor allem Direktabflüsse nach stärkeren Niederschlagsereignissen im Schutt des Kars sammeln, leicht verzögert über eine offene Spalte (Abb. 4) abfließen und in den zum Einzugsgebiet gehörenden Schuttmassen am Fuß der Riffelwände versickern. Während des Baus der Zugspitzbahn hat Knauer (1933) bereits auf diesen Umstand hingewiesen. Von dort gelangen sie überwiegend un-

terirdisch auf unbekanntem Weg in den Eibsee. In der Abb. 4 sind die Verhältnisse unter normalen Wetterbedingungen festgehalten. Der Effekt sturzbachartiger Direktabflüsse auf verkarstetem Wettersteinkalk konnte im Juli 2017 unterhalb der Schönangerspitze in Echtzeit beobachtet werden (Abb. 4). Der spontane Direktabfluss eines wenige Minuten dauernden Hagelschauers war überraschend. Das Niederschlagswasser lief bevorzugt auf glatten Harnischflächen und entlang von Bankungsfugen ab. In weiterer Folge sammelten sich etwa 100 l/s Niederschlagswasser in einem Schuttgerinne. Über eine Felsstufe an der Bärenfalle fiel das Wasser in einer steilen Kaskade ab und versickerte gänzlich in der Schutthalde. Auf ähnlichen Wegen, jedoch in einem unvergleichbar langsameren Prozess, speisen die Schmelzwässer aus den Altschneefeldern nahezu das ganze Jahr über in das System ein.



Abb. 4: Links: Bayerisches Schneekar im Juli 2015; Mitte: Ereignisabfluss in einer Schutttrinne unterhalb der Schönangerspitze im Juli 2017; Rechts: Ereignisabfluss auf glatten Harnischflächen, N-Wand Schönangerspitze im Juli 2017 (Aufnahmen aus Kus 2012–2019).

Die SW-Grenze in diesem Teileinzugsgebiet durchschneidet die vorwiegend aus Plattenkalk bestehende Törlenebene. Zahlreiche Senkungsstrukturen und quasi fehlende oberirdische Entwässerung belegen eine intensive Verkarstung des Plattenkalks. Nach Begutachtung einzelner, meist über einen Ponor drainierter Senkungsfelder im deutsch-österreichischen Grenzgebiet kann angenommen werden, dass die Verkarstungsbasis bis in den Übergangsbereich zum Hauptdolomit reicht. Der Schichtübergang definiert damit eine charakteristische hydraulische Grenzfläche, an der sich die Hauptentwässerung des Plateaus orientiert. Die heute sichtbaren, auf Verkarstung zurückführbaren Senken und Entwässerungsstrukturen kennzeichnen daher in etwa den Verlauf der unterirdischen Wasserscheide. Sie ist mehr oder weniger lagegleich mit der orographischen Einzugsgebietsgrenze.

Das **Teileinzugsgebiet E2** beinhaltet im Wesentlichen die Kammlagen des Hohen Seebergs. Der dort ausstreichende Plattenkalkzug mit dem liegenden Hauptdolomit als Sohlfläche wird komplett dem Eibsee zugeschlagen, da sich die Kluftwässer in den Kalksteinbänken bevorzugt entlang der Schichtfugen und damit dem Schichteinfallen folgend zum Eibsee bewegen (Kus 2012–2019). Die Karstwässer fließen letztendlich parallel zum Kluftwasserabfluss ebenfalls in Richtung See ab. Dies war insbesondere an den Seebergquellen unter Hochwasserabfluss gut zu beobachten (Abb. 5). Am NW-Saum des Hohen Seebergs wurden keine größeren Abflüsse aus dem Plattenkalk, die direkt dem Loisachtal zugehen, beobachtet oder sind anderweitig bekannt. Damit vergrößert sich das Einzugsgebiet im NW um etwa 0,1 km².

Das **Teileinzugsgebiet E3** weist an den Rändern der größeren Senken zum See gewandte, um etwa 5 bis 15 m eingetiefte abflusslose Hohlformen auf, über die vor allem nach stärkeren Niederschlagsereignissen anfallende Direkt- und Zwischenabflüsse dem Eibsee vermutlich unterirdisch zugeleitet werden. Es ist möglich, dass die Eintiefungen unter Mitwirkung subrosiver Prozesse entstanden, die sich ihrerseits bevorzugt entlang unterirdischer Abflusslinien entwickeln. Für die westliche Hohlform könnte sogar eine Karststruktur im liegenden Plattenkalk die Ursache sein. Das Einzugsgebiet dehnt sich hierdurch um etwa 0,38 km² weiter nach Norden aus.

Das an E3 nördlich anschließende **Teileinzugsgebiet E4** wird hier, wie von Streil (1978) erwogen, hinzugerechnet. Es liegt nach den Angaben von Miller (1961) noch innerhalb der Eibseesynklina mit nach S und SW einfallender Schichtlagerung. Die in den Profilen nach Vidal (1953: Abb. 6) und LfU (2017a: Profil F) zwischen Zirmerskopf und Miesingberg angedeutete „Aufsattelung“ im Hauptdolomit ist nach den publizierten Schichtlagerungswerten in LfU (2017a) und Vidal (1953: Abb. 7) nicht ausgeprägt. Sie wird deshalb nicht als unterirdische Wasserscheide in Betracht gezogen, so dass die Abgrenzung nach orographischen Gesichtspunkten erfolgen muss. Das Hauptaugenmerk liegt hier auf den verbreiteten Hochmoorflächen (z. B. Hintermoos, Rottaschenmoos), die sich in einer weiten Senke zusammenschließen. Nach den Ergebnissen von zwei Forschungsbohrungen (FB2 und FB3, Abb. 2) werden sie von bindiger Moräne unterlagert, die auch am Nordrand der Senke ansteht. Dieser Zusammenhang bedingt, dass der Senke ein Großteil der Niederschläge relativ schnell als Direkt- oder Zwischenabflüsse zugehen, was während oder nach stärkeren Niederschlagsereignissen unmittelbar beobachtet werden kann. Die Senke ihrerseits dürfte im Wesentlichen am Südrand entwässern, wo sich nach dem hochauflösenden DGM der Bayerischen Vermessungsverwaltung die tiefsten Stellen befinden. Die angrenzende Bergsturzmasse fungiert dabei als wirksame Drainage und leitet die Abflüsse ungehindert in das Teileinzugsgebiet E2 ab. Es wird zudem angenommen, dass die in Klüfte des liegenden Hauptdolomits infiltrierenden Niederschläge, der Schichtneigung folgend, hauptsächlich in südliche Richtungen abziehen und damit letztendlich dem Eibsee unterirdisch zufließen. Die Wassermengen sind aufgrund der allgemein geringen Bergsdurchlässigkeiten im kompakten Hauptdolomit wahrscheinlich vernachlässigbar. Das Einzugsgebiet vergrößert sich um rund 0,96 km².

Das **Teileinzugsgebiet E5** ist durch zwei größere, NS-gestreckte Senken gekennzeichnet, die mit ihren tiefsten Stellen bereits deutlich unter den Seewasserspiegel und sogar teilweise unter die Beckensohle des Eibsees reichen. Daher ist es unwahrscheinlich, dass von E5 größere Abflussmengen ober- oder unterirdisch in den See gelangen. E5 ist damit Teil des östlich anschließenden **Krepbach-Einzugsgebiets**.

3.2 Zu- und Abflüsse

Zur Überprüfung der angegebenen Wassermengen bzw. zur Bestimmung plausibler Vergleichswerte wurden im Folgenden die sichtbaren Zuflüsse näher betrachtet. Zusammen mit dem Einzugsgebiet des Eibsees dienen sie als Grundlage zur überschlägigen Berechnung der Abflussspenden und Grundwasserneubildung. Zum Vergleich werden die Zu- und Abflüsse des Sees auch über die aus der Spiegeländerung ablesbaren Volumenänderungen für bestimmte Zeitfenster näherungsweise ermittelt.

3.2.1 Sichtbare Zuflüsse

Die sichtbaren Zuflüsse des Eibsees erfolgen im Weitsee (Eibsee ohne den Untersee). Mehrere kleine ganzjährig aktive Quellgerinne und der Kotbach fließen dem Eibsee zwischen seinem Südwest- und Nordwestrand oberirdisch zu (Abb. 2). Die ebenfalls ganzjährig aktiven Quellen am Südrand versetzen meist im ufernahen Geröllschutt und gelangen unterirdisch in den See. Alle sichtbaren Zuflüsse gehören zum Teileinzugsgebiet E1. Zur Bilanzierung wurden an den Quellgerinnen in den Beobachtungsjahren 2013 bis 2014 monatliche oder sporadische Messungen und Schätzungen der Abflussmengen durchgeführt.

Tab. 1: Messungen und Schätzungen der Eibseezuflüsse in den Jahren 2012 bis 2014. Die Kurzbezeichnungen entsprechen der Abb. 2.

Name	Grundwasserleiter (GWL) bzw. angeschlossener GWL	Anzahl Messungen	$Q_{\min}$ [l/s]	Q_M [l/s] (ohne QHW)	$Q_{\max}$ [l/s]	Q_{HW} [l/s] (11.07.2014)
x1	Hauptdolomit/Schutt	12	0,3	1,1	2,0	3,0
x2	Hauptdolomit/Schutt	13	0,5	2,4	6,0	10,0
hd1	Hauptdolomit	12	0,8	3,0	5,5	6,0
hd2	Hauptdolomit	7	0,4	2,0	4,5	10,0
hd3	Hauptdolomit	5	1,0	3,7	5,0	17,0
Kotbach	Hauptdolomit/Plattenkalk	7	3,0	13,8	27,0	150,0
pk1	Plattenkalk	7	0,5	2,9	7,5	50,0-60,0
pk2	Plattenkalk	7	0,2	1,7	5,0	10,0
pk3	Plattenkalk	7	2,5	3,0	3,5	k. A.
pk4	Plattenkalk	3	0,1	1,2	2,5	4,0
Summen ohne pk3			9,3	34,8	68,5	260,0

Die Quellzuflüsse des Sees erreichen, ohne Berücksichtigung der Hochwasserabflüsse, zusammen eine mittlere Schüttung von etwa 35 l/s. Der Kotbach als bedeutendstes Quellsammelgerinne liefert mit durchschnittlich 14 l/s den Hauptanteil. Anfang Juli 2014 konnte ein Hochwasserereignis beobachtet werden (Abb. 5). Die Gesamtmenge der geschätzten sichtbaren Zuflüsse zum See von rund 260 l/s übersteigt dabei die durchschnittlichen Mengen unter normalen Bedingungen um mindestens das Siebenfache. Ähnliche Niederschlagsereignisse mit vergleichbaren Niederschlagsmengen traten im Sommerhalbjahr 2014 mehrfach auf, so dass mit dem angegebenen mittleren Wert von 35 l/s die durchschnittlichen Zuflüsse zumindest für die Sommermonate deutlich unterschätzt werden dürften. Unter Hochwasserbedingungen fällt auf, dass die Gerinne im Hauptdolomit einen nicht unerheblichen Anteil des Abflusses direkt abführen, wohingegen im Plattenkalk der unterirdische Abflussanteil mit bedeutenden Karstwassermengen überwiegt. Das andere Extrem findet meist im Hochwinter statt. Vor allem in den Monaten Januar und Februar kommen die sichtbaren Zuflüsse aufgrund der geringeren und meist als Schnee fallenden Niederschläge fast zum Erliegen. Mit Ausnahme der Quelle pk3, für die keine zeitlich entsprechende Wintermessung verfügbar ist, liegen die einzelnen Quellzuflüsse alle unter einem Sekundenliter. Aus den nachfolgenden Bilanzbetrachtungen ist zu schließen, dass der Eibsee – zumindest saisonal – noch mit erheblichen Wassermengen aus unbekannten randlichen oder unterirdischen Zuflüssen gespeist werden muss. Mit ihren Beobachtungen und Interpretationen vertreten Streil (1978) und Grimminger (1982) eine ähnliche Ansicht über einen unterirdischen Zufluss zum See. Bis auf wenige einspeisende Grundwässer aus dem Bergsturz am Nordrand des Seebeckens können bislang allerdings keine konkreten randlichen bzw. subaquatischen Zuflussstellen festgestellt werden. Somit entziehen sich die tatsächlichen Zuflüsse einer direkten Beobachtung.



Abb. 5:
Hochwasserabfluss an den Seeberg-
quellen am 11. Juli 2014 mit einer
Gesamtschüttung von 50 bis 60 l/s.

3.2.2 Abfluss aus der Klimabilanz

Für die Bilanz wurde die oben abgegrenzte Fläche des Einzugsgebiets von 15,55 km² angesetzt. Der Anteil der Seefläche beträgt etwa 1,774 km². Für die weiteren Berechnungen wurden die langjährigen Messungen der nächstgelegenen Klimastation in Griesen herangezogen. Die mittlere Niederschlagsmenge für die Jahre 2004 bis 2014 beträgt dort 1.380 mm/a. Bei einer mittleren jährlichen Verdunstung von 450 bis 550 mm (Baumgartner et al. 1983) ergibt sich damit eine Gesamtabflussmenge von 830 bis 930 mm/a. Einen ähnlichen Wert für das Einzugsgebiet des Eibsees gibt auch Keller et al. (1979) an mit einer mittleren Abflusshöhe von 1.000 mm/a. Pro Quadratkilometer berechnet sich damit eine Abflussspende von etwa 26 bis 32 l/s. Unter der berechtigten Annahme, dass alle gebildeten Abflüsse im Einzugsgebiet zum Eibsee gelangen, ergibt sich bei einer gemittelten Abflussspende von 29 l/s*km² und einer Einzugsgebietsgröße von 13,77 km² (ohne Seefläche) ein durchschnittlicher Gesamtzufluss von etwa 400 l/s zum See. Bei gleichem durchschnittlichen Jahresniederschlag und einer jährlichen Verdunstungshöhe von 550 mm bilanziert sich für die Seefläche zusätzlich ein durchschnittlicher Überschuss von etwa 46 l/s. Insgesamt berechnen sich 446 l/s, die über den See aus dem Gebiet zum Abfluss kommen. Der nach Streil (1978) angegebene Durchschnittswert von 450 l/s lässt sich somit gut über die Klimabilanz reproduzieren.

3.2.3 Zu- und Abflussmengen aus Wasserstandsänderungen

Die höchsten Wasserstände des Eibsees treten im Zeitraum von Juli bis Oktober auf. Danach fällt der Wasserspiegel und erreicht von Februar bis April die niedrigsten Stände. Über die Volumenänderungen des Seewasserkörpers über die Zeit können die Zu- und Abflüsse des Sees näherungsweise berechnet werden.

Zur Berechnung der Zuflüsse wurden drei Zeitfenster im Sommerhalbjahr 2012 und 2013 innerhalb der Monate mit steigendem Wasserspiegel gewählt (Tab. 2). Die gewählten Zeitabschnitte repräsentieren durchschnittliche, hohe und starke Niederschlagssummen. Der jeweils für die Zeitabschnitte mittlere Wasserspiegelanstieg pro Tag variiert dabei zwischen 0,01 m bei durchschnittlichen und maximal 0,05 m bei Starkniederschlägen. Unter Verwendung einer mittleren Verdunstungshöhe von 500 mm/a über dem Seewasser liegen die zur Volumenänderung des Seekörpers notwendigen Mindestzuflussmengen zwischen 128 und 237 l/s. Im Hinblick auf die zum Betrachtungszeitpunkt herrschenden Wasserhaushaltsbedingungen (MW-HW-Bedingungen) wären dabei für den Abfluss aus

dem See nach der von Streil (1978) angegebenen Abflussspanne etwa 500 bis 700 l/s anzusetzen. Daraus ergeben sich dann Zuflussmengen aus dem Einzugsgebiet von 528 bis 937 l/s, die saisonal bedingt (hohe Niederschlagsmengen und Schneeschmelze im Einzugsgebiet) und folgerichtig deutlich über dem aus der Klimabilanz ermittelten Durchschnittswert von 442 l/s liegen.

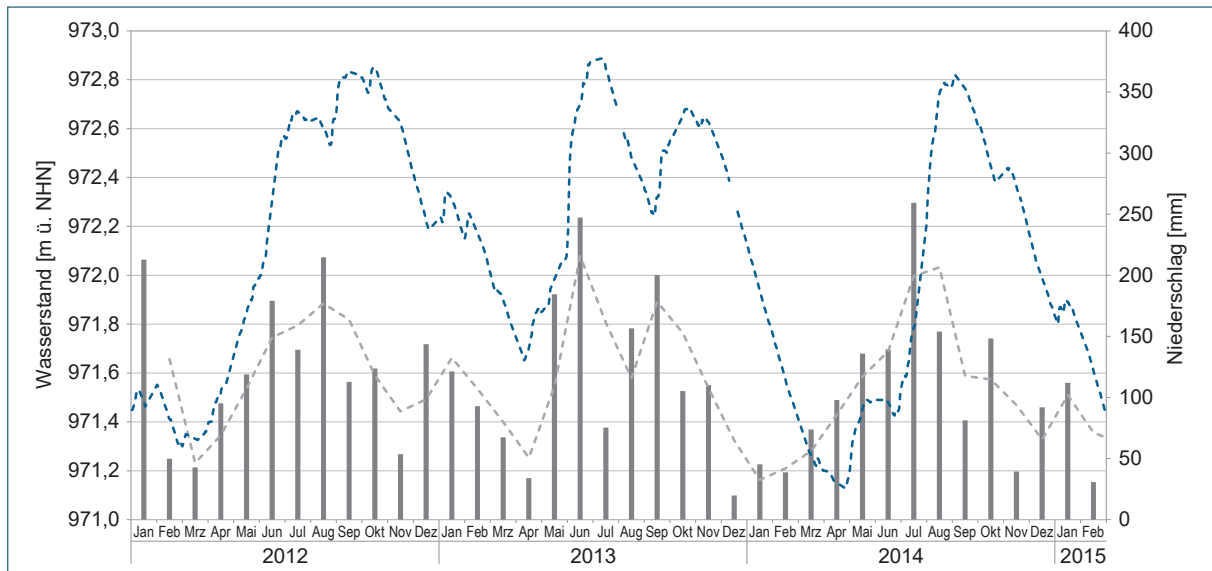


Abb. 6: Hydrograph des Eibsees (blau gestrichelt) und Monatssummen der Gebietsniederschläge (graue Balken) mit gleitendem Durchschnitt (grau gestrichelt) der Niederschlagsmessstelle Griesen im Zeitraum 2012 bis 2015.

Tab. 2: Berechnungsmatrix der Zu- und Abflüsse aus der Volumenänderung des Seewasserkörpers.
Schätzung, Annahme; bei Niedrigwasser Winter 2014

	ø Nieder- schlags- verhältnisse	Hohe Niederschläge	Stark- Niederschläge	kein Nieder- schlag bzw. Schnee	wenig Nieder- schlag, teilwei- se Schnee
Zeitfenster	von 06.05.12 bis 08.06.12	von 28.05.13 bis 12.07.13	von 31.05.13 bis 02.06.13	von 20.01.14 bis 23.02.14	von 19.12.13 bis 06.01.14
Anzahl Tage	34	46	3	34	18
An(ab)stieg Seespiegel Summe [m]	0,34	0,83	0,15	0,391	0,217
An(ab)stieg Seespiegel [m/d]	0,01	0,02	0,05	0,01	0,01
Verdunstungshöhe über See [m/d]	0,0014	0,0014	0	0	0
Niederschlagssumme [m]	0,1757	0,3639	0,123	0	0,0182
Bilanz [m]	0,2119	0,5305	0,027	0,391	0,2352
Seefläche [m²]	1.774.000	1.774.000	1.774.000	1.774.000	1.774.000
Volumendifferenz Seewasser [m³/d]	11.056	20.459	15.966	20.401	23.180
Mindest-Zu(ab)fluss [l/s]	128	237	185	236	268
See-Abfluss [l/s]	450	700	600		
See-Zufluss [l/s]	578	937	785		

Zur Berechnung der Abflüsse aus dem See wurden zwei Zeitfenster im Winterhalbjahr 2013/2014 gewählt (Tab. 2). Die in der Summe geringen Niederschläge fielen im Einzugsgebiet meist als Schnee. Der durchschnittliche Rückgang des Seewasserspiegels liegt bei 0,01 m/d. Unter Vernachlässigung der saisonal ausbleibenden bzw. geringen Verdunstung über dem Seewasser müssen zur Änderung des Wasserkörpervolumens ohne Berücksichtigung von Zuflüssen mindestens 236 bis 268 l/s abfließen. Die sichtbaren Zuflüsse betrugen im Dezember 2014 etwa 12 l/s und dürften

im weiteren Verlauf des Winters noch auf unter 10 l/s zurückgegangen sein. In diesen Größenordnungen sind auch alle weiteren möglichen Randzuflüsse zu sehen, die sich zumindest im Winter entlang der nordöstlichen Umrandung des Sees durch kleinere eis- oder schneefreie Uferstreifen andeuten (Abb. 12). Da nur für die Quellzuflüsse messbare Mengen ermittelt werden können, lässt sich an dieser Stelle lediglich eine Mindestabflussmenge aus dem See von etwa 240 bis 270 l/s bei Niedrigwasser angeben. Diese Werte bestätigen in der Größenordnung zwar die Angaben aus der Literatur, sie können jedoch aufgrund der folgenden Zusammenhänge nur als Näherung für die tatsächlichen Gegebenheiten herangezogen werden: Bei der Betrachtung der Wasserstandsganglinien fällt auf, dass trotz des hochdynamischen Wettergeschehens im Einzugsgebiet der Rückgang des Seewasserspiegels im Winterhalbjahr stets linear und in annähernd gleichen Beträgen erfolgt. Die Rückgangsrate liegt quasi konstant bei etwa 0,01 m/d. Demgegenüber bilden sich die dynamischen Wetterbedingungen im Sommerhalbjahr sehr wohl in der Ganglinie ab, wobei sich auch hier erkennbare Zeitabschnitte mit einer konstanten Anstiegsrate von etwa 0,01 m/d zeigen. Dies mag in erster Linie ein Artefakt sein, da die Messwertauflösung etwa 0,01 m entspricht. Auf das zugehörige Volumen umgerechnet bedeutet das eine Messtoleranz von 17.740 m³ Wasser welches zu- oder abfließen müsste um eine Änderung bei der Messwertaufzeichnung des Wasserstandes zu bewirken. Über den Zeitraum eines Tages würde das einer zusätzlich dauerhaft ab- oder zufließenden Wassermenge (ohne Niederschlag und Verdunstung) von mindestens 205 l/s entsprechen. Bei der Volumenbetrachtung bleiben zudem mehrere in ihrer Menge unbekannte Bilanzglieder unberücksichtigt. Vernachlässigt wird z. B. die sich mit den Wasserständen verändernde Beckengeometrie, aus der sich allein aufgrund geneigter Uferböschungen eine Volumenänderung des Seekörpers ergäbe. Dies bedingt aber selbst bei starkem Seespiegelanstieg von 0,05 m/d und einer Böschungseigung von 26° nur eine Menge von etwa 426 m³/d respektive 5 l/s. Ebenso unberücksichtigt bleiben die Austauschmengen zwischen der aus gut durchlässigem Sturzmaterial bestehenden Einrahmung entlang der nordöstlichen Uferlinie und dem See.

4 Temperatur- und Leitfähigkeitsverhältnisse im See- und Grundwasser

In den Einzugsgebieten des Eibsees und Krepbachs können anhand der Temperatur- und Leitfähigkeitsverhältnisse tendenziell zwei Gruppen von Quell- und Grundwässern differenziert werden (Abb. 7).

Die erste Gruppe umfasst Quell- und Grundwässer, die nicht vom See beeinflusst sind. Die aus Mehrfach- bzw. Messreihen gemittelten Werte der Temperatur und Leitfähigkeit korrelieren positiv und weisen mit einem Bestimmtheitsmaß von 87 % einen hohen linearen Zusammenhang auf. Die Durchschnittstemperaturen liegen zwischen kalten 4 und moderaten 7 °C bei Leitfähigkeiten zwischen geringen 140 und relativ hohen 370 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (bei 25 °C). Diese Verhältnisse sind aufgrund der komplexen Speicherstrukturen mit wechselnden Mischungen zwischen Kluft- und Hangschuttwasser an einer Messstelle, und klimatischer Extrema (z. B. Starkregen, Schneeschmelze) mitunter ereignissensitiv oder saisonal schwankend. Einzelmessungen können daher auch von diesem Trend stärker abweichen.

Die zweite Gruppe umfasst vom See beeinflusste Grundwässer. Bei ihnen drehen sich die Verhältnisse um, so dass eine negative Korrelation zwischen Temperatur und Leitfähigkeit vorliegt. Auch hier ist mit einem Bestimmtheitsmaß von 74 % ein relativ hoher linearer Zusammenhang festzustellen. Die Temperaturmittelwerte liegen zwischen 8,9 und 11 °C. Die Spanne der durchschnittlichen Leitfähigkeiten ist mit 243 bis 322 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dabei deutlich enger als bei der ersten Gruppe. Größere Abweichungen von diesem Trend wurden bislang nicht beobachtet.

Gegenüber den Quell- und Grundwässern weist der Untersee an seinem Zuflussrand (Schwelle) mit 1 bis 20 °C eine sehr weite Temperaturspanne auf, die auch die Extrema im Gebiet beinhaltet. Die Mineralisierung unterliegt mit 219 bis 238 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (bei 25 °C) dabei nur verhältnismäßig geringen Schwankungen, was für eine stabile Stoffpufferung des Seekörpers im Weitsee spricht. Temperatur und Leitfähigkeit des Seewassers korrelieren negativ und zeigen mit einem Bestimmtheitsmaß von 74 % einen moderaten bis hohen linearen Zusammenhang (Abb. 7).

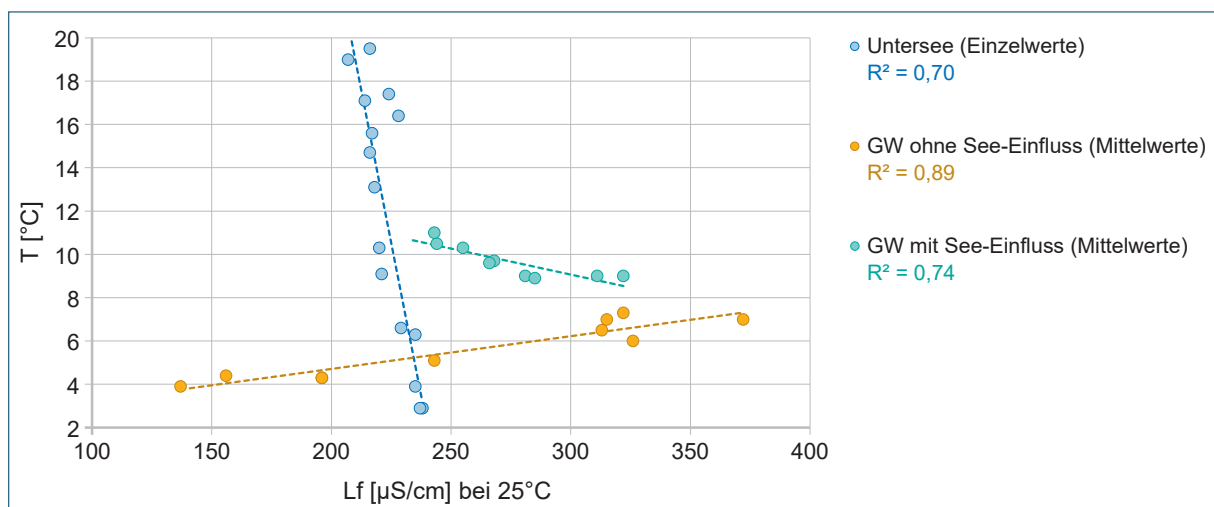


Abb. 7: Beziehung zwischen Temperatur (T) und Leitfähigkeit (Lf) von Seewasser und verschiedenen Grund- bzw. Quellwässern im Eibseegebiet dargestellt an den Mittelwerten von Mehrfach- bzw. Reihenmessungen und Einzelwerten.

Für die vorliegende Betrachtung von besonderer Bedeutung ist der Wärmehaushalt des vom Eibsee beeinflussten Grundwassers und in diesem Kontext der Wärmeaustausch zwischen Wasser und Gestein. Die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Medien bestimmt dabei die Richtung und Intensität des Energieflusses. So gibt beispielsweise wärmeres Seewasser im Sommer Wärme (Energie) an das kältere Gestein ab. Dieser Wärmetransport lässt sich vereinfacht durch die folgende Beziehung physikalisch beschreiben:

$$W = v \cdot c_w \cdot \rho_w \cdot \Delta T$$

(v = Fließgeschwindigkeit des Grundwassers; c_w = spezifische Wärmekapazität Wassers; ρ_w = Dichte des Wassers; ΔT = Temperaturdifferenz Grundwasser – Gestein).

Da aufgrund der hohen sommerlichen Füllstände des Seekörpers auch höhere Mengen wärmeren Seewassers in den Untergrund infiltrieren (Kap. 5), muss dieser thermische Effekt im Sommerhalbjahr besonders ausgeprägt sein. Liegt die Wassertemperatur des unterirdisch abfließenden Seewassers über der des durchströmten Gesteins, beginnt das Wasser Energie an das Gestein abzugeben. Je länger diese Bedingung erfüllt ist desto weiter reicht der Einfluss. Unterschreitet das zirkulierende Wasser die Temperatur des Gesteins dreht sich der Prozess um, und das Gestein gibt Wärme an das fließende Grundwasser zurück.

4.1 Einzugsgebiet Eibsee

Die Wassertemperatur des Eibsees weist im Jahresverlauf große Schwankungen auf. Schumann (1965) gibt mit über 300 Temperaturmessungen zwar weit zurückliegende, jedoch umfangreiche Informationen zu Temperaturverlauf und Temperaturschichtung im Eibsee. In normalen Sommern herrschen trotz der Höhenlage des Sees Wassertemperaturen an der Oberfläche zwischen 19 °C und 20 °C vor. Im Winter ist der See durchschnittlich an 50 Tagen zugefroren. Im Untersee ist nach den Messungen von Schumann (1965) eine völlig andere Temperaturschichtung als im Weitsee anzutreffen. Da nach derzeitigem Kenntnisstand im Bereich des Untersees größere Mengen des Seewassers unterirdisch abfließen, muss diesbezüglich eine dauerhafte Strömung vom Weitsee in den Untersee und damit letztendlich auch ein permanenter Wärmefluss in die gleiche Richtung vorausgesetzt werden. Dieser Zusammenhang kann an der Schwelle des Überlaufs vom Weitsee in den Untersee gut beobachtet werden (Abb. 8). Dort herrscht eine relativ geringe Wassertiefe, bei Mittelwasser etwa 0,6 m (Grimminger 1982), so dass überwiegend oberflächennahes und vor allem im Sommer warmes Wasser des Weitsees in den Untersee abfließt.



Abb. 8: Links: Eisfreie Überlaufschwelle Weitsee-Untersee vom 09.02.2015;
Rechts: Erkennbare Strömung (Pfeil) vom Weitsee in den Untersee bei Niedrigwasser am 02.04.2014.

Im Winter, bei zugefrorenem Weitsee, steigt dann geringfügig wärmeres Tiefenwasser mit 1,5 bis 2,9 °C (eigene Messungen) durch die anhaltende Strömung auf. So friert an der Schwelle ein Streifen von etwa 2 bis 3 Meter Breite auch in strengen Hochwintern nicht zu (Abb. 8). Wenn der Seewasserspiegel von seinem Tiefstand Anfang des Jahres zu steigen beginnt und in den Sommermonaten den Höchststand erreicht, infiltriert das warme Seewasser in die Hohlräume, Klüfte und Poren des Gesteins, was den oben genannten thermischen Effekt zur Folge hat. Bei sinkendem Seewasserspiegel fließt im Winterhalbjahr warmes Wasser aus den Klüften und Hohlräumen in den See zurück. Dieses Phänomen war besonders in der Steingrinzbucht des Eibsees deutlich zu beobachten. An einer eisfreien Stelle am Ufer (Abb. 12) wurden z. B. am 08.12.2014 Wassertemperaturen von 8,9 bis 12,1 °C und Leitfähigkeiten um 275 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (bei 25 °C) gemessen.

Tab. 3: Minima (min), Mittelwert (M) und Maxima (max) der Leitfähigkeiten (Lf) und Temperaturen (T) von Grund- und Oberflächenwasser im Einzugsgebiet Eibsee; Reihenmessungen aus 2014, zum Teil ergänzt durch Einzelmessungen aus 2015 bis 2018. Bezeichnung der Messstellen siehe Abb. 2, Diagrammdarstellung der Messwerte siehe Abb. 9.

Quellen und Oberflächengewässer	n	Lf _{min} [$\mu\text{S}/\text{cm}$] 25 °C	Lf _M [$\mu\text{S}/\text{cm}$] 25 °C	Lf _{max} [$\mu\text{S}/\text{cm}$] 25 °C	T _{min} [°C]	T _M [°C]	T _{max} [°C]
x1, x2	26	278	313	360	4,7	6,5	7,8
x3 (Hang-Schutt Riffirib)	2	134	-	140	3,8	-	4,0
hd1, hd2, hd3	24	257	315	343	5,3	7,0	8,6
hd4, hd5, hd6 (Törlen)	3	333	326	344	5,6	6,0	6,4
Kotbach	8	242	322	365	3,1	7,7	11,0
pk1, pk2, pk3, pk4	13	288	372	411	4,8	7,0	7,4
Steingrinpriel N-Ufer	8	262	328	360	5,6	8,3	14,3
Drachenseealein O-Ufer	14	230	243	264	5,4	11,0	17,7
Untersee (Schwelle)	12	214	226	238	1,5	10,8	19,5

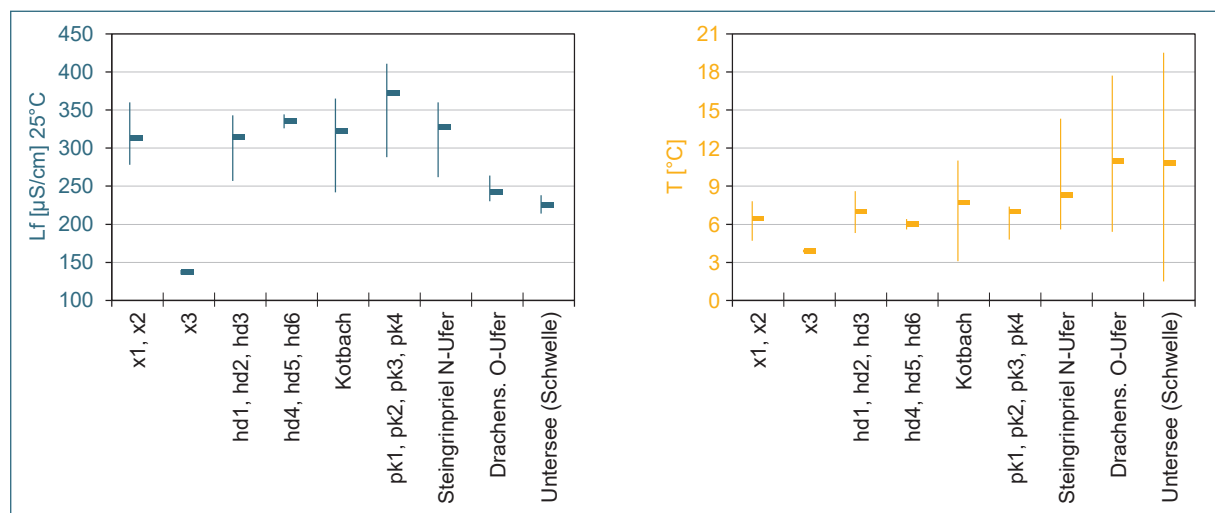


Abb. 9: Spannweiten der Leitfähigkeiten (Lf) und Temperaturen (T) von Grund- und Oberflächenwasser im Einzugsgebiet Eibsee; Bezeichnung der Messstellen siehe Abb. 2, Tabellendarstellung der Messwerte siehe Tab. 3.

Diese erhöhten Temperaturen und Leitfähigkeiten wurden an gleicher Stelle im schneereichen Winter 2019 (07.02.2019) bei schwachem Rückfluss in den See mit einer Temperaturspanne von 10,8 bis 11,2 °C und Leitfähigkeiten um 290 µS/cm (bei 25 °C) bestätigt (Kus 2012–2019). Die gegenüber dem See um etwa 60 bis 80 µS/cm erhöhte Leitfähigkeit ist auf lokale Grundwasserneubildung und Randzufluss zurückzuführen. Bei dem im Winter teilweise eisfreien Steingringpriel hingegen muss zeitweise aufgrund der deutlich kühleren und höher mineralisierten Zuflüsse eine Einspeisung aus der Bergsturzmasse und dem vermutlich hydraulisch angekoppelten Plattenkalkzug des Hohen Seebergs dominieren, wenngleich auch bei ihm die sommerlichen Infiltrationen des Eibsees an den Messwerten erkennbar sind. Der vom winterlichen Tiefstand des Eibsees erzwungene Rückfluss von Grundwasser wird demnach auch über den Steingringpriel erfolgen, wobei seine mit durchschnittlich 5 bis 6 °C kühlen und durch relativ hohe Leitfähigkeiten von 340 bis 360 µS/cm (bei 25 °C) gekennzeichneten Zuflüsse in erster Linie die Speicherentleerung der angrenzenden Hochgebiete belegen. Die Menge und Temperatur des einströmenden Grundwassers reichen aus, um das kleine Nebenbecken an dessen Nordufer im Winter eisfrei zu halten (Abb. 13). Am überwiegend eisfreien Drachenseelein wurden im November und Dezember 2014 an Stellen Wasserzutritte von etwa 11 °C gemessen, die ebenso die Zirkulation bzw. den Rückfluss von erwärmtem Grundwasser anzeigen. Die jüngsten in dieser Arbeit berücksichtigten Wintermessungen am Uferand zeigen über eine lineare Trendmodellierung ein deutliches Temperaturgefälle im Wasserkörper, das sich von NE nach SW erstreckt (Abb.10). Da das Grundwasser im Winter über die Seeoberfläche abkühlt, kann nur eine Strömung vom warmen zum kalten Seerand erfolgen. Der Trend der Grundwasserfließrichtung lässt sich dadurch mit dem modellierten Temperaturgefälle gleichsetzen. Damit bestätigt sich auch die im Kapitel 5 zu Grunde gelegte hydraulische Vorstellung.

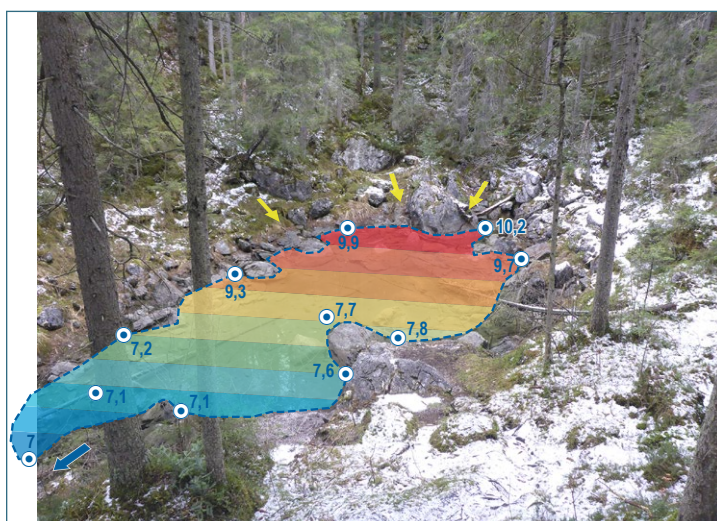


Abb. 10:
Lineare Trendmodellierung (ArcGIS 10.6.1, 1. Polynom-Ordnung) der winterlichen Temperaturverhältnisse am Drachenseelein (Messung vom 21.02.2020) mit Angabe der Einzelmessungen in [°C]; Grundwasser fließt in Richtung Temperaturgefälle

Gelbe Pfeile: warmer Grundwasserzufluss
Blauer Pfeil: abgekühlter Abfluss in Richtung Eibsee.

Die Quellabflüsse im Einzugsgebiet des Eibsees zeigen entsprechend ihrer Neubildungsgebiete mit durchschnittlich 6 bis 7 °C relativ kühle Wässer. Sie sind mit über 300 µS/cm (bei 25 °C) deutlich höher mineralisiert als das Seewasser. Die aus dem Bayerischen Schneekar gespeiste Schuttquelle an der Haltestelle Riffliß (x3, Abb. 2) weist mit einem Quellwasser von 3,8 bis 4 °C und sehr geringen Leitfähigkeiten von etwa 140 µS/cm (bei 25 °C) auf das hochalpine Neubildungsgebiet hin. Diese schwach mineralisierten Schuttwässer dürften neben dem direkten Niederschlag für die relativ geringe Mineralisierung des Seewassers mit verantwortlich sein. Dies vorausgesetzt, müssen sie dem Eibsee an dessen Südost-Ufer in größeren Mengen auch zufließen.

4.2 Einzugsgebiet Krepbach

Der thermische Effekt des erwärmten Seewassers hat einen weitreichenden Einfluss auf die Temperaturen des Grundwassers im Krepbach-Einzugsgebiet. Wie bereits erläutert gelangen größere Mengen Seewasser über den Untersee unterirdisch in das Krepbachgebiet. Umfangreiche Temperaturmessungen an Brunnen und Quellen zeigen dabei gegenüber dem zu erwartenden Jahresmittel von etwa 7 °C eine um durchschnittlich 2 bis 3 K erhöhte Grundwassertemperatur (Tab. 4 und Abb. 15). Die dauerhaft überdurchschnittlichen Temperaturen im Grundwasserabstrom des Sees können zwanglos auf den wechselseitigen Wärmeaustausch zwischen Grundwasser und Gestein zurückgeführt werden. Die kalten Temperaturen des im Winter infiltrierenden Seewassers werden dabei weitestgehend im Reservoir kompensiert, was sicher auch den im Sommerhalbjahr bis um das 3-fach höheren Abflussmengen von wärmerem Seewasser geschuldet ist. So bleibt über das ganze Jahr eine ausreichende Wärmemenge im Reservoir (Grundwasser und Gestein) erhalten. Der warme Grundwasserstrom, der sich vom Untersee zu den Grainauer Brunnen erstreckt, setzt sich mindestens bis östlich der Ortschaft Grainau fort. Der vom See am weitesten entfernte, in dieser Arbeit jedoch nur sporadisch beobachtete Grundwassermesspunkt ist die sogenannte Steiggumpe (Stg), ein Quellaufstoss am Ostrand von Grainau (Abb. 2). Nach Aufzeichnungen von Märkl & Huber (2006) weist er eine über drei Jahre monatlich gemessene mittlere Grundwassertemperatur von 9,0 °C auf (Tab. 4) und liegt damit noch etwa 1,5 bis 2 K über dem klimatischen Erwartungswert.

Tab. 4: Minima (min), Mittelwert (M) und Maxima (max) der Leitfähigkeiten (Lf) und Temperaturen (T) von Grund- und Seewasser im Einzugsgebiet Krepbach. Lage und Bezeichnung der Messstellen siehe Abb. 2, Diagrammdarstellung der Messwerte siehe Abb. 11.

Brunnen und Quellen	n	Lf _{min} [μS/cm] 25 °C	Lf _M [μS/cm] 25 °C	Lf _{max} [μS/cm] 25 °C	T _{min} [°C]	T _M [°C]	T _{max} [°C]
Christl-Hütt'n-Quelle ¹⁾	12	304	322	349	7,1	7,3	7,6
wk6 bis wk9 ³⁾	4	152	156	161	3,4	4,4	5,7
x4 ³⁾	3	188	196	207	3,9	4,3	4,6
x5 ³⁾	2	231	243	255	5,1	5,1	5,1
Brunnen 1 ¹⁾	12	241	244	247	10,3	10,5	10,8
Brunnen 2 ¹⁾	12	266	268	272	9,4	9,7	10,2
Brunnen 3 ¹⁾	12	263	266	272	9,2	9,6	10,2
Brunnen 4 ¹⁾	12	274	281	288	8,8	9,0	9,2
Krepbach-Qu ¹⁾	12	247	255	267	9,3	10,3	11,2
Badersee-Qu ¹⁾	12	272	285	324	8,5	8,9	9,3
Brücklbach-Qu ²⁾	47	291	311	337	7,1	9,0	10,1
Steiggumpe ²⁾ (Stg)	47	307	322	340	8,8	9,0	9,3
Untersee (Schwelle) ¹⁾	12	214	226	238	2,9	10,8	19,5

¹⁾ Eigene Messungen aus 2014

²⁾ Messungen 2002 bis 2006 von Märkl & Huber (2006), bestätigt durch Messungen in Kus (2012–2019)

³⁾ Messungen in Kus (2012–2019)

Die Leitfähigkeiten kovariieren überraschend gut mit den Grundwassertemperaturen. Die geringeren Mineralisierungen werden bei den durchschnittlich wärmeren, die höheren Mineralisierungen bei den kälteren Grundwässern verzeichnet. Dieser Umstand deutet stark auf Mischprozesse im Grundwasserreservoir hin (Kap. 7). Dabei weisen die höheren Spannbreiten der Baderseequellen, des Brücklbach-Ursprungs und der Steiggumpe auf eine andere Mischungsdynamik als bei den Brunnen und den Krepbachquellen hin. Das Quellwasser der Christl-Hütt'n-Quelle widerspricht mit ihren Messwerten zwar nicht diesem grundlegenden Prinzip, es gehört jedoch als Randzufluss dem südlich angrenzenden heterogenen Reservoir der Wetterstein-Schutt-und Felsmasse an. Die darin be-

obachteten Quellwässer zeigen vielmehr einen gegenteiligen Effekt: je kälter desto geringer mineralisiert. Das ist auch zu erwarten, da sich die chemisch-physikalische Beschaffenheit systematisch an die alpine Höhenlage – und damit vor allem klimatisch – orientiert. Gleichzeitig sind bei fehlenden Deckschichten die Verweilzeiten kurz und die Säureeinträge weitgehend auf den Niederschlagsinput reduziert. So erklären sich die mit 3,4 bis 5,7 °C tiefen Temperaturen und mit 152 bis 207 $\mu\text{S/cm}$ (bei 25 °C) geringen Leitfähigkeiten einiger Kluft- und Hangschuttwässer. Demgegenüber können im Sommer einige Wässer geringer schüttender Quellen etwas höhere Temperaturen (6,0 bis 8,0 °C) und höhere Leitfähigkeiten (297 bis 408 $\mu\text{S/cm}$) aufweisen. Dies lässt sich auf lokal enger begrenzte Einzugsgebiete und einer Neubildung über bindige Deckschichten zurückführen. Auf verwitterten Mergeln der Partnach- und Kössen-Formation entwickelte Feuchtgebiete im Umfeld dieser Quellen zeigen diesen Effekt an. Für den Wasserhaushalt des Krepbach-Einzugsgebietes sind diese Quellwasservorkommen sowohl in quantitativer als auch qualitativer Hinsicht unbedeutend.

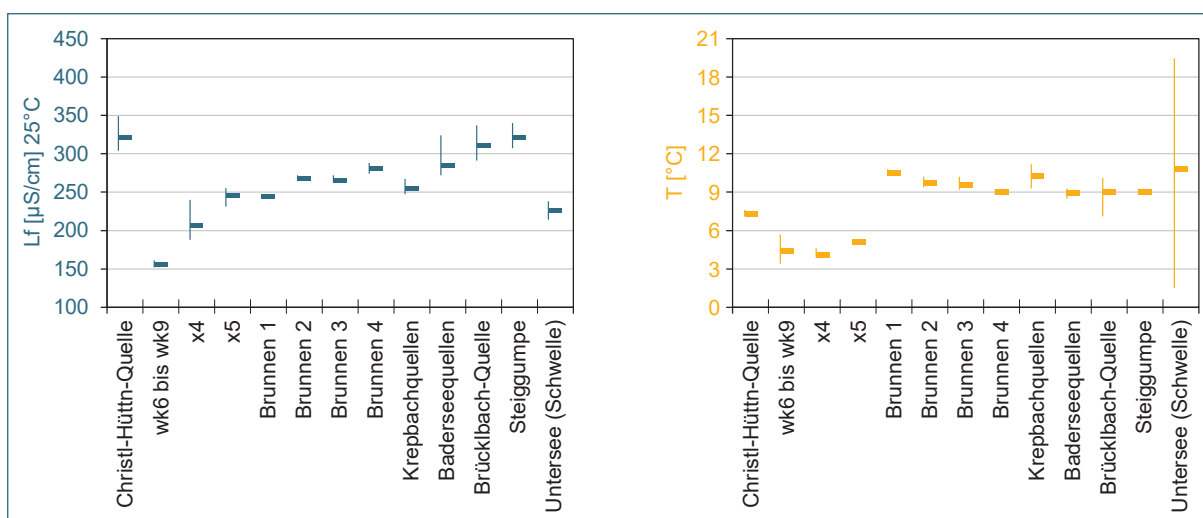


Abb. 11: Spannweiten der Leitfähigkeiten (Lf) und Temperaturen (T) von Grund- und Seewasser im Einzugsgebiet Krepbach. Lage und Bezeichnung der Messstellen siehe Abb. 2, Tabellendarstellung der Messwerte siehe Tab. 4.

5 Hydraulische Interaktion zwischen See und Bergsturzmasse

Die nördlich des Eibsees in der Bergsturzmasse eingebetteten kleinen Nebenseen Steingringpriel und Drachenseelein wurden bereits im Vorfeld der monatlichen Messkampagnen als Grundwasserblänken interpretiert. In diesem Zusammenhang wurden im Mai 2013 die Höhen der Wasserspiegel grob nivelliert und festgestellt, dass zu diesem Zeitpunkt diese am Steingringpriel in etwa gleich (+0,05 m) und am Drachenseelein geringfügig niedriger (-0,2 bis -0,1 m) als am Eibsee lagen. Im beginnenden Winter 2013 kehrten sich die Verhältnisse zwischen Eibsee und Drachenseelein um, so dass sich ein leichtes Grundwassergefälle zum Eibsee einstellte. Das leichte Gefälle vom Steingringpriel zum Eibsee bleibt in etwa erhalten. Die Messungen weisen damit auf eine hydraulische Verbindung zwischen den Seen hin. In der Folge konnten bei der Aufnahme der Eisverhältnisse im Hochwinter sicht- und messbare Effekte einer hydraulischen Interaktion zwischen See und Bergsturzmasse direkt beobachtet werden. Am nördlichen Eibseeufer wurde an wenigen eisfreien Stellen der Steingringbucht zulaufendes, 9 bis 11 °C temperiertes Grundwasser gemessen (Abb. 12). Ähnliche Temperaturen zeigten die Randzuflüsse des eisfreien Drachenseeleins (Abb. 12). Eisfreie Stellen wurden auch am Nordufer des Steingringpriels festgestellt, die allerdings mit 5 bis 6 °C auf deutlich kältere Zuflüsse zurückgehen (Abb. 13). Unter den ausgeprägten Niedrigwasserbedingungen ließ sich neben den eisfreien Zulaufstellen auch die am Südrand zum Eibsee hin gewandte Ablaufstelle des Steingringpriels erkennen (Abb. 13).



Abb. 12: Winteraufnahmen Februar 2015; Links: eisfreier Uferand des Eibsees mit Zufluss von relativ wärmeren Grundwasser (9 bis 11 °C); Rechts: Eisfreies Drachenseelein mit randlichen Wassertemperaturen zwischen 7 und 11 °C.



Abb. 13: Winteraufnahme Februar 2015; Links: Zu- und Ablauf des Steingringpriels; Rechts: Steingringpriels Nordufer mit randlichen Zuflusstemperaturen von 5 bis 6 °C.

Diese außergewöhnlichen Temperaturverhältnisse können mit dem thermischen und hydrologischen Verhalten des Eibsees und einer hydraulisch gut durchlässigen Bergsturzmasse erklärt werden. Um das Grundwasser 3 bis 4 K gegenüber dem lokalen Erwartungswert von etwa 7 °C zu erwärmen, muss wärmeres Seewasser in die Bergsturzmasse infiltrieren.

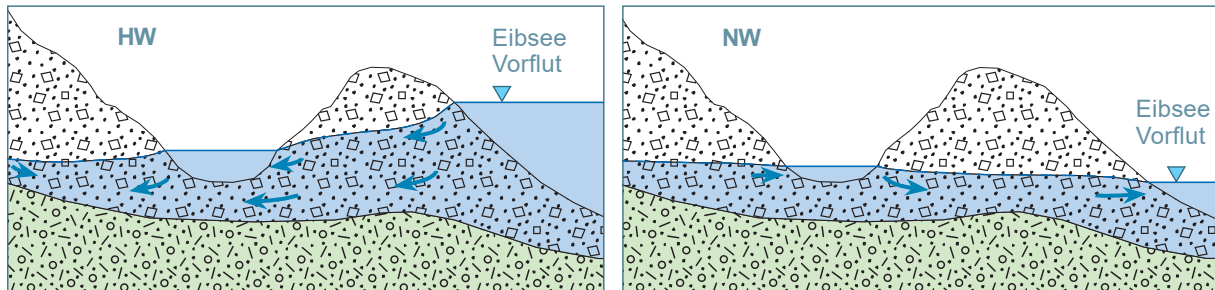


Abb. 14: Schemaprofil hydraulische Interaktion Eibsee, Bergsturzmasse und Nebensee (Drachenseeelin);
 Links: sommerlicher Hochwasserstand (HW) mit influenten Bedingungen;
 Rechts: winterlicher Niedrigwasserstand (NW) mit effluenten Bedingungen (überhöht, kein Massstab);
 grün: Diamikt.

Hydraulisch kann das mit einem schnell ansteigenden Seewasserspiegel und einer zeitlich nachlaufenden Grundwasserneubildung begründet werden. See- und neugebildetes Grundwasser mischen sich im Laufe des Sommerhalbjahres, geben einen Teil der thermischen Energie an das Gestein ab und fließen bei sinkendem Wasserspiegel vor allem im Winterhalbjahr wieder zum See zurück. Angaben zu den zwischengespeicherten Wasser- und Energiemengen sind dabei kaum möglich, da für die Grundwasserstände und -temperaturen in der Sturzmasse keine Aufzeichnungen vorliegen. Letztendlich ist es ein komplexes, saisonal und episodisch geprägtes Zusammenspiel zwischen diversen Zu- und Abflüssen zum und aus dem See und der lokalen Grundwasserneubildung. Es ist zu vermuten, dass sich beim Einsetzen der Schneeschmelze und rasch ansteigendem Seewasserspiegel ein hydraulisches Gefälle vom See in den im Winter stark entleerten Zwischenspeicher der Sturzmasse ausbildet, welches dann in der Phase steigender Wasserspiegel bis in den Herbst mehr oder weniger erhalten bleibt und sich dann bei sinkendem Wasserspiegel spätestens während der Wintermonate umkehrt (Abb. 14). Zwischen dem Eibsee, der als lokale Vorflut wirkt, und dem angrenzenden Grundwasserleiter (Bergsturzmasse) wechseln sich, reguliert durch die Dynamik der Füll- und Entleerungsvorgänge des Seekörpers, influente und effluente Verhältnisse ab (Abb. 14). Dieser hydraulische Effekt korreliert jedoch sehr stark mit den sommerlichen Niederschlagsmengen. Bleiben diese wie im Extremjahr 2018 weitgehend aus, bildet sich auch kein sommerlicher Hochwasserstand im See und es infiltrieren entsprechend geringe oder keine nennenswerten Mengen wärmeren Seewassers in die angrenzende Bergsturzmasse. Der Grundwasserspeicher füllt sich dann lediglich über kältere Sickerwässer und diffuse Randzuläufe aus den umliegenden Hochgebieten. In der Folge sank während der winterlichen Speicherentleerung in 2018/2019 das Grundwasserniveau offensichtlich unter einen kritischen Wert, so dass – erstmalig im Februar 2019 beobachtet – das Drachenseeelin fast trockenfiel und aufgrund des ausbleibenden Durchflusses von wärmerem Grundwasser schließlich vereiste (Abb. 15).

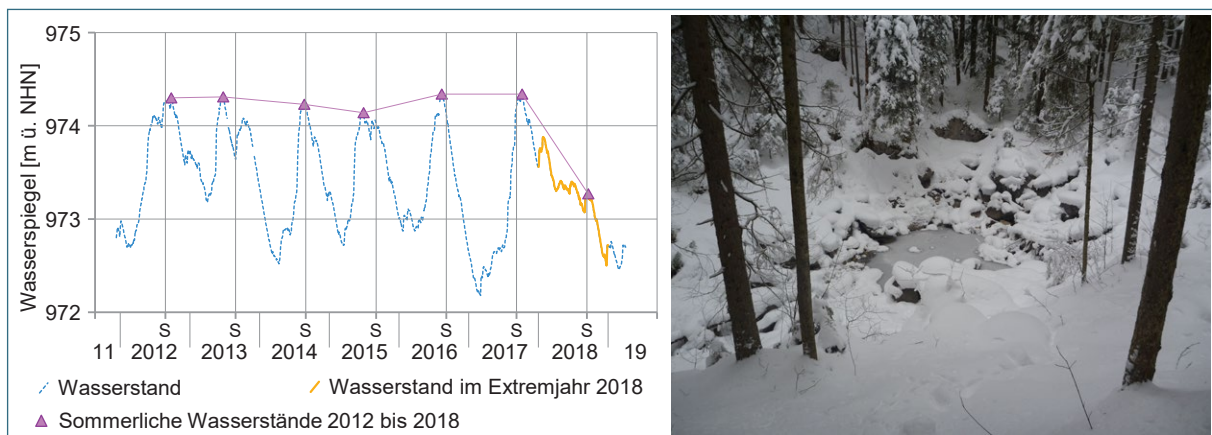


Abb. 15: Links: Hydrograph des Eibsees für den Zeitraum 2012 bis 2018 mit Darstellung der sommerlichen Höchstwasserstände und farblicher Heraushebung des niederschlagsarmen Extremjahres 2018; Rechts: erstmalig beobachtete Vereisung des Drachenseeins im Februar 2019 als Folge der geringen Sommerniederschläge in 2018.

In der am Südrand an den Eibsee reichenden Bergsturmzone ist der kleine und relativ flache Frillensee eingebettet. Er ist durch eine Schwelle aus Sturzmaterial vom Eibsee getrennt. Einzelbeobachtungen zeigen, dass dieses Nebengewässer offensichtlich mehr vom aktuellen Wettergeschehen abhängt: Er friert von allen Gewässern als erstes zu und erwärmt sich im Sommer bis auf 30 °C, infolge dessen sich auch breite Algenteppeiche ausbilden. Deshalb liegt die Vermutung nahe, dass weder Grundwasser noch Eibseewasser in größeren Mengen permanent über ihn zirkulieren. Somit liegt der Frillensee in einem von der Grundwasserzirkulation geringer beeinflussten, wahrscheinlich teilkolmatierten Nebenbecken. Sein Wasserstand wird stärker durch Niederschlag und Verdunstung mitreguliert. Da am gesamten südlichen Uferabschnitt keine zum Nordrand vergleichbaren hydraulischen Phänomene im Winter beobachtet wurden, kann in diesem Randbereich des Eibsees ganzjährig von effluenten Verhältnissen ausgegangen werden. So gelangen im Hinblick auf das alpine Einzugsgebiet und die Messungen der Quellwässer relativ kalte, mineralarme Grundwässer in den See.

6 Stabile Isotope im See- und Grundwasser

Im Zeitraum Januar bis Dezember 2014 wurden an ausgewählten Messstellen die stabilen Isotope Sauerstoff-18 und Deuterium im monatlichen Rhythmus gemessen. Im Vordergrund stand die Be-
probung des Untersees und der östlich gelegenen Trinkwasserbrunnen der Gemeinde Grainau so-
wie der Christl-Hütt'n-Quelle, Krepbachquelle und des Badersees. Zur näheren Charakterisierung
der Randzuflüsse wurden zudem einige Quellgerinne sowie die beiden am Nordufer des Eibsees
in der Bergsturzmasse gelegenen Nebenseen Steingring und Drachensee einbezogen. Ver-
einzelt – sofern vorliegend – wurden auch Isotopenwerte aus angrenzenden Zeiträumen in die Box-
plotstatistik der Abb. 17 eingebunden.

Die Probennahme und Aufbewahrung der Grund- und Quellwässer bis zur Analyse erfolgte in 20 ml
Glasbehältern. Die stabilen Wasserisotope wurden mit einem Laserabsorptionsgerät (PICARRO
L2130-iδD/δ¹⁸O Ultra High-Precision) bestimmt. Die Messwerte der Proben (jeweils 10 Einzelmess-
ungen) wurden mit internationalen Standards (SLAP, SMOW, GISP) kalibriert und um eventuel-
le Drift- oder Memory-Effekte korrigiert. Im Vorfeld der Messung wurden jeweils die Leitungen mit
dem Probenmaterial gespült. Die durchschnittliche Standardabweichung betrug ±0,1 ‰ bei Sauer-
stoff-18 und ±0,5 ‰ bei Deuterium bezogen auf VSMOW. Alle Auswertungen erfolgten mit den aus
zehn Einzelmessungen berechneten Mittelwerten.

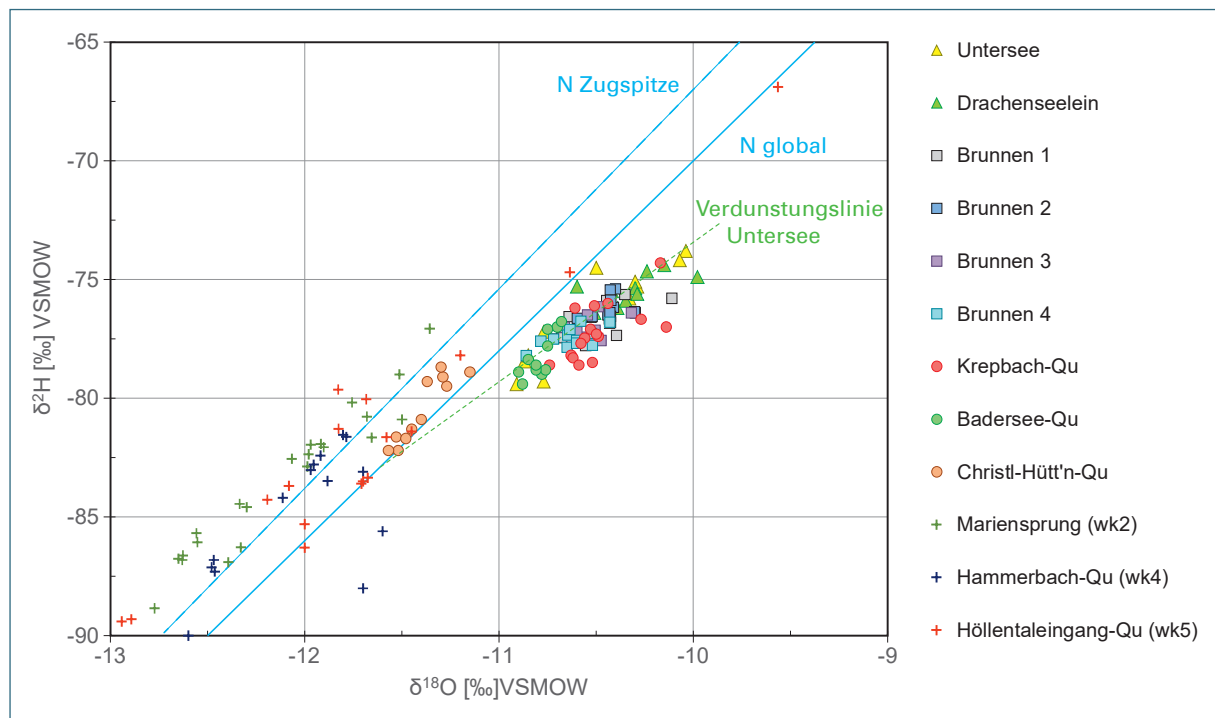


Abb. 16: $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ -Beziehung ausgewählter Grund- und Oberflächenwässer in den Einzugsgebieten Eibsee und Krepbach sowie ausgewählter Karstwässer des Wettersteins (wk2, wk4, wk5); N: Niederschlagsgerade.

Was sich aus nicht publizierten, auf frühere Jahre zurückgehende Einzelmessungen der stabilen Isotope angedeutet hat, lässt sich durch die vorliegenden Reihenmessungen nun näher klären. Mit der Jahresreihe der Isotopen aus dem Untersee (USee) ermittelt sich die in Abb. 16 dargestellte Verdunstungsregression. Die isotopisch abgereicherten Winter- und Frühjahrswässer konzentrieren sich dabei tendenziell im unteren Drittel, die angereicherten, stärker vom Niederschlag geprägten Sommer- und Herbstwässer tendenziell im oberen Drittel der Regression. Die Isotopenwerte der öst-

lich des Eibsees auftretenden Grundwässer scharen sich weitgehend um diese Verdunstungsgerade. Diese speziellen Isotopenverhältnisse sprechen, analog zu den erhöhten Temperaturen, für signifikante Seewasseranteile im Grundwasser. Einige Isotopenpaare weisen dabei auf einen stärkeren Deuterium-Exzess hin als es die Zeitreihe des Untersees vermittelt (Abb. 17). Dies wird vor allem auf den Abfluss von Tiefenwasser des Sees zurückgeführt, die in den monatlichen Stichproben des Untersees nicht hinreichend repräsentiert sind. In diesem Kontext wurden im Mai 2013 und 2014 anhand mehrerer Seewasserproben aus Tiefen von überwiegend 10 m bis nahe Seegrund (14 bis ≤ 35 m) geringe und in Einzelfällen sogar mit kleiner 0 ‰ extrem niedrige Werte für den Deuterium-Exzess festgestellt. Da im hydrologischen Jahr eine relativ gute Durchmischung des Eibsees stattfindet (frdl. mündl. Mitteilung Herr Robert Kapa, WWA Weilheim, Nixdorf et al. 2004) ist anzunehmen, dass die tieferen, stärker fraktionierten Wässer im Jahresverlauf anteilig zum Abfluss kommen und die Mischung der Grundwässer und damit die isotopische Zusammensetzung beeinflussen.

Die leichteren Isotopensignaturen der Christl-Hütt'n-Quelle (CHQu), die ebenfalls östlich des Eibsees liegt, weisen auf ein anderes Einzugsgebiet ihres Quellwassers hin. Es zeigt mit einem durchschnittlichen Exzess von 10,4 ‰ keine Verdunstungseffekte und belegt letztendlich ein Einzugsgebiet in den Schuttmassen des südlich angrenzenden Wettersteinmassivs. Mit Deuterium-Werten von -80,9 bis -81,7 ‰ erweisen sich die Quellwässer im Zeitraum November 2013 bis Juli 2014 dabei isotopisch deutlich leichter als im Zeitraum August bis Dezember 2014, indem die $\delta^2\text{H}$ -Werte um etwa 3 ‰ höher sind. Ab August pausen sich die ergiebigen Sommerniederschläge isotopisch mit schwereren Signaturen im Quellwasser durch und sind auf diese Weise bis in den Spätherbst nachweisbar.

Wesentlich anders als mit den östlich des Eibsees auftretenden Grundwässern verhält es sich bei den sichtbaren Randzuflüssen des Eibsees. Sie weisen im Hinblick auf die jeweiligen Grundwasserleiter und topographischen Einzugsgebiete charakteristische Verteilungen der stabilen Isotope auf. Die Werte liegen weitestgehend auf der globalen Niederschlagsgerade und deuten keine ausgeprägten Verdunstungseffekte an. Die Isotopen der Zuflüsse am Südrand streuen über das Beobachtungsjahr hinweg insgesamt wenig, was einen relativ stabilen Grundwasserspeicher vermuten lässt. Die Quellzuflüsse hd1 und hd2 repräsentieren dabei vorwiegend Kluftwässer aus dem Hauptdolomit mit Neubildung in den Hochlagen der Blauen und Schwarzen Wand. Die Zuflüsse x1 und x2 belegen mit isotopisch etwas schwereren Wässern den Einfluss der hydraulisch direkt angekoppelten, neubildungswirksamen Bergsturz- und Schuttmassen. Die Isotopenwerte der Quellzuflüsse pk1 bis pk3 aus dem Plattenkalkzug am Nordwestrand des Eibsees sind im Durchschnitt isotopisch schwerer und streuen aufgrund der Neubildungs- und Abflussdynamik im Karstgrundwasserleiter wesentlich breiter, wobei sie das im Vergleich zu hd1, hd2, x1 und x2 topographisch niedrigere Einzugsgebiet verdeutlichen. Diese Kluft- und Karstwässer zeigen zumindest im Hinblick auf ihre Medianwerte noch die größte Ähnlichkeit mit dem Seewasser und den davon beeinflussten Grundwässern. Ihre $\delta^{18}\text{O}$ -Werte übersteigen dabei sichtbar die -11 ‰-Marke. Es scheint, dass dem Eibsee bedeutendere Randzuflüsse aus diesem Kluft-Karstwasserspeicher zugehen. Die Bedeutung eines schnellen Karstwasserabflusses im Einzugsgebiet des Eibsees wurde bereits im Zusammenhang mit dem verzögert auf Niederschlag reagierenden Seewasserstand angedeutet (Kap. 3 und Abb. 6).

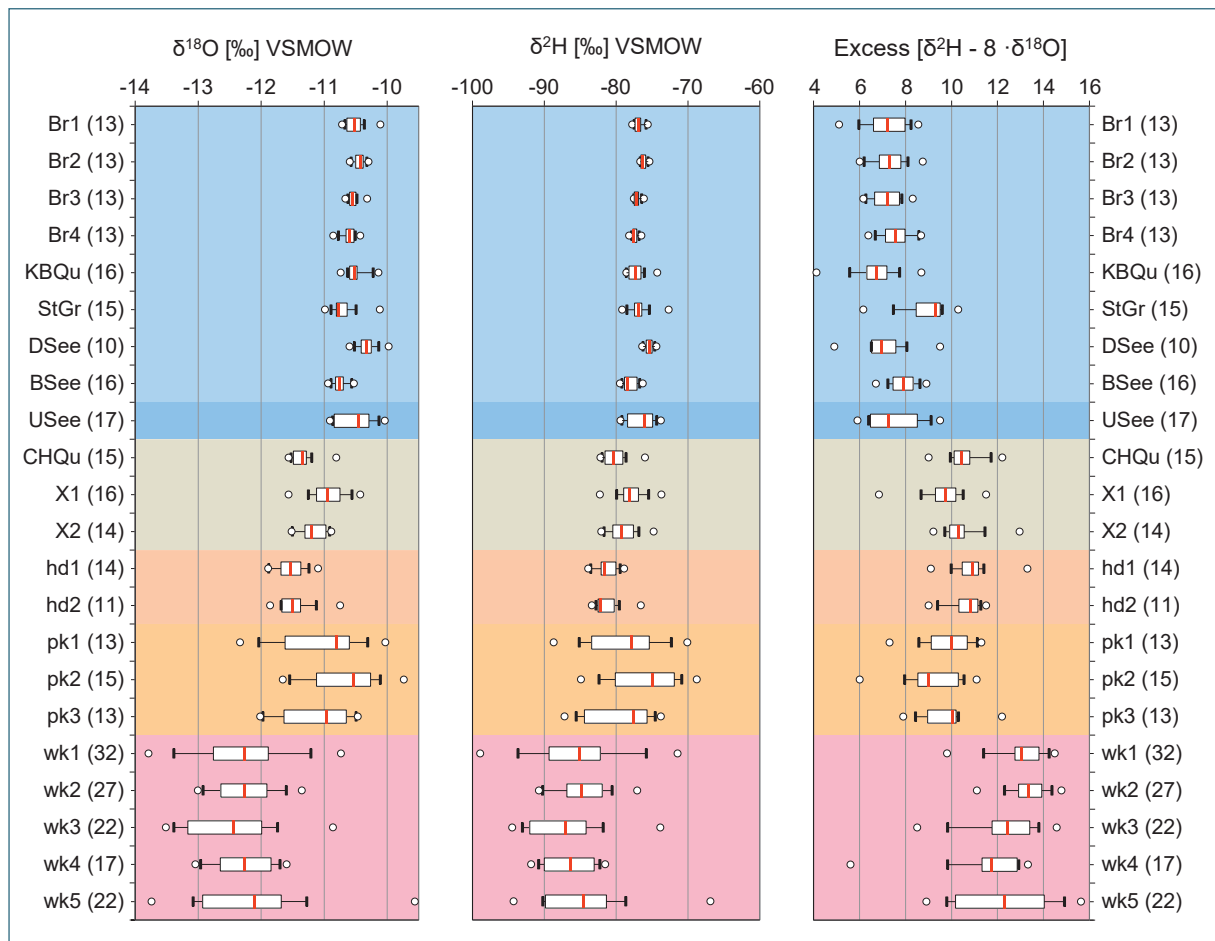


Abb. 17: Boxplotdarstellung der $\delta^{18}\text{O}$ - und $\delta^2\text{H}$ -Werte sowie des nach angegebener Gleichung berechneten Deuterium-Excess. Kurzbezeichnungen siehe Abb. 2 und Text. Die Grundwässer mit Eibsee Einfluss sind hellblau hinterlegt. Das Boxplot stellt von links nach rechts dar: Minima (Kreis) / 10%-Perzentil / 25%-Perzentil / Median (roter Balken) / 75%-Perzentil / 90%-Perzentil / Maxima (Kreis).

Mit seiner Isotopenzusammensetzung kann das Wasser des Steingringpriels (StGr) als Mischung aus Randzufluss, der aus der Bergsturzmasse und dem angekoppelten Plattenkalkzug erfolgt, und Eibseewasser interpretiert werden, da sich nur zeitweise ein signifikanter Deuterium-Exzess berechnet. Das Wasser des Drachenseeels (DSee) hingegen trägt eindeutig die Isotopensignatur des Eibseewassers, wenngleich auch die Streubreiten der $\delta^{18}\text{O}$ - und $\delta^2\text{H}$ -Werte aufgrund der stabileren Mischung des aus Niederschlag und Seewasser neugebildeten Grundwassers sichtbar geringer sind als beim Untersee (Abb. 17). Die isotopische Verwandtschaft mit den Grundwässern der Krepbachquelle (KBQu) und der Grainauer Brunnen (Br1 bis Br4) ist naheliegend. Die Quellen des Badersees (BSee) weisen ähnliche Isotopensignaturen wie die Krepbachquelle und die Brunnen auf, wobei der mit durchschnittlich 8‰ etwas abgeschwächte Excess bereits höhere Mischanteile aus randlichen Zuflüssen andeutet.

Zur Einschätzung eventueller Zuflüsse aus dem Wettersteinmassiv wurden zum Vergleich Isotopendaten der Karstwässer aus der Wetterstein-Formation herangezogen. Die Daten entstammen überwiegend aus Lauber (2014) und spiegeln die Isotopensignaturen der Abflüsse im Sommerhalbjahr 2011 und 2012 wider, ergänzt durch eigene Messungen der Sommerhalbjahre 2014, 2015 und 2016 aus dem Höllental (Kus 2012–2019). Die Mehrzahl der Isotopenpaare $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ scharft sich entlang der Niederschlagsgeraden der Zugspitze und belegt das hochalpine Einzugsgebiet der

Karstwässer. Abweichende, näher an der globalen Niederschlagsgeraden liegende Werte, die vermehrt an den Quellen am Höllentaleingang (wk5) auftreten, werden auf den Einfluss lokaler, topographisch tieferer Neubildungsbereiche, die sich bei stärkeren bzw. längeren Niederschlägen auswirken, oder auf Mischungseffekte mit zeitweise infiltrierendem Wasser des Hammerbachs zurückgeführt. Am Ursprung des Hammerbachs (wk3 und wk4) treten vereinzelt Extremwerte auf, deren Verdunstungseffekte als höherer Schmelzwasseranteil und/oder versickernder Oberflächenabfluss im Höllentalkar interpretiert werden können. Von der Nordwestflanke der Wettersteinsynkline (Hohe Riffel bis Schönangerspitze, siehe wk6 bis wk9 in Abb. 2) liegen aufgrund des schwierigen Geländes nur vier Einzelmessungen aus dem Sommerhalbjahr 2015 und 2017 vor. Die vom Sommer-niederschlag geprägten Werte zeigen sich mit -11,29 bis -12,12 ‰ für $\delta^{18}\text{O}$ und -80,75 bis -85,57 ‰ für $\delta^2\text{H}$ isotopisch etwas schwerer als die Karstwässer innerhalb der Wetterstein-Synkline. Dies spricht für ein unabhängiges Einzugsgebiet am NW-Rand der Synkline (Kus 2012–2019). Alle Karstwässer des Wettersteins tragen deutlich leichtere Isotopensignaturen als die messbaren Eibseezuflüsse. Die geringe Bedeutung der Karstwässer aus dem Wetterstein für den Wasserhaushalt des Eibsees erscheint damit auch isotopisch begründbar.

7 Seewasseranteile im Grundwasser des Krepbacheinzugsgebietes

Im vermuteten Abstrom des Eibsees liegen die Grundwasser-Förderbrunnen (Br1 bis Br4) und die ehemalige Quellwasserversorgung der Gemeinde Grainau (Krepbachquellen) sowie die gleichfalls ehemals zur Wasserversorgung genutzte Christl-Hütt'n-Quelle. Die oben dargestellten und erläuterten Messergebnisse belegen höhere Seewasseranteile in den erschlossenen Grundwässern der Krepbachquellen und Grainauer Brunnen und etwas geringere Anteile in den Baderseequellen. Das Quellwasser der Christl-Hütt'n-Quelle hingegen führt auf Grundlage dieser Messreihen nachweislich keine Seewasseranteile. Augenfällig ist, dass die Mittelwerte von Temperatur und Leitfähigkeit des Brunnen 1 denen des Untersees sehr nahekommen, was auf den höchsten Seewasseranteil im Grundwasser am Brunnen 1 schließen lässt. Die Grundwassertemperaturen der anderen Brunnen sind mit bis zu 1,5 °C Differenz deutlich niedriger, die Leitfähigkeiten jedoch um durchschnittlich 30 bis 40 µS/cm höher. Geht man nun davon aus, dass Brunnen 1 im Hauptabstrom des Untersees liegt, mischt sich in den drei anderen Brunnen Grundwasser aus dem umgebenden Einzugsgebiet mit niedrigeren Grundwassertemperaturen respektive höheren Leitfähigkeiten zu.

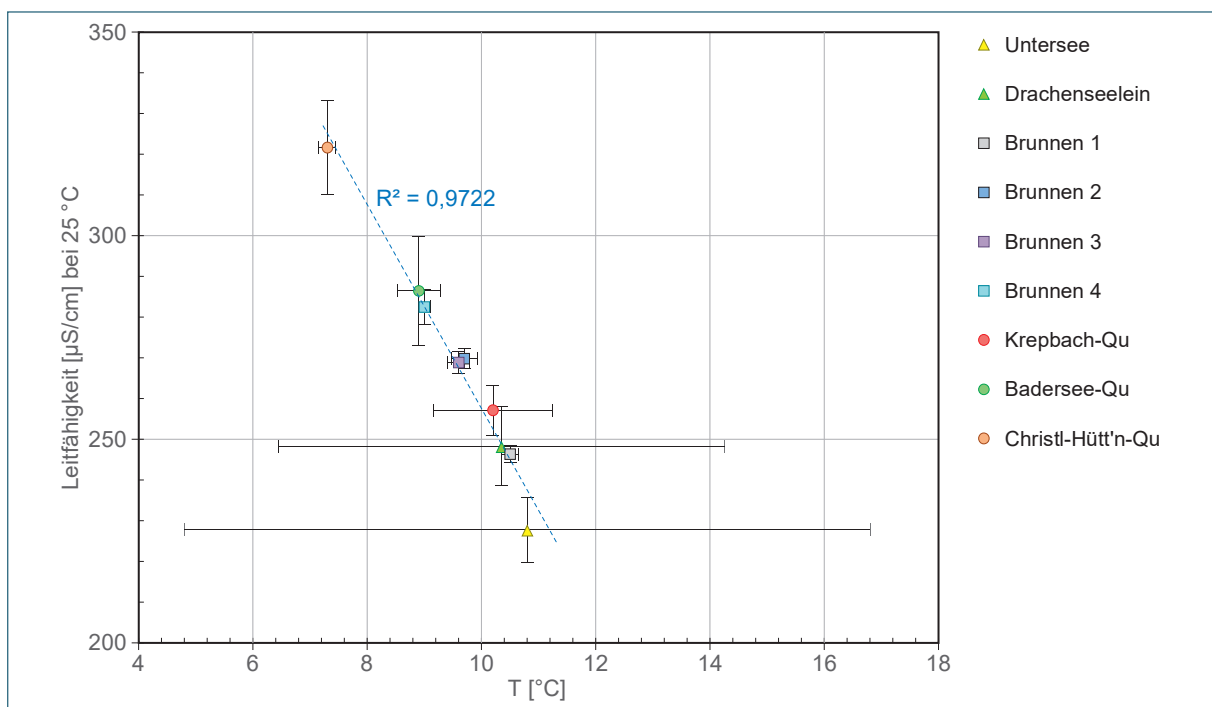


Abb. 18: Leitfähigkeit-Temperatur-Beziehung ausgewählter Grund- und Oberflächenwässer, dargestellt an den Mittelwerten und Standardabweichungen der Reihenmessungen.

Die in einem Leitfähigkeits-Temperatur-Diagramm aufgetragenen Mittelwerte (Abb. 18) ergeben trotz der höheren Temperatur-Spannweiten einzelner Messreihen eine Regressionsgerade mit einem sehr hohen Bestimmtheitsmaß. Die Linearität der Mittelwerte legitimiert eine Mischungsbeurteilung mit der Regression als Mischungslinie und dem Untersee und der Christl-Hütt'n-Quelle als Mischungsendglieder, wobei das Unterseewasser den unterirdischen Abfluss des Eibsees und die Quellwässer den Randzufluss aus der Schuttmassse des Wettersteins inklusive der Grundwasserneubildung über den Flächen der Schutt- und Bergsturmassen repräsentieren. Über die Dis-

tanz zu den jeweiligen Endgliedern können die Mischungsverhältnisse M_x für die einzelnen Messstellen mit der folgenden Beziehung näherungsweise berechnet werden:

$$M_x = \frac{\sqrt{(L_{f1} - L_{fx})^2 + (T_1 - T_x)^2}}{\sqrt{(L_{f1} - L_{f2})^2 + (T_1 - T_2)^2}} \cdot 100$$

(M_x : Mischungsanteil x [%]; L_{f1} , L_{f2} : Leitfähigkeiten Mischungsendglieder;

T_1 , T_2 : Temperaturen Mischungsendglieder; L_{fx} , T_x : Leitfähigkeit und Temperatur Messpunkt)

Tab. 5: Berechnung der Mischungsanteile unter Verwendung der Mittelwerte in Tab. 2

Mischungsendglieder	T [°C]	Leitfähigkeit [µS/cm] bei 25 °C	Messpunkt	Anteil Seewasser [%]	Anteil Randzufluss [%]
Untersee	10,8	226	Brunnen 1	80	20
Christl-Hütt'n-Qu	7,3	322	Brunnen 2	55	45
			Brunnen 3	56	44
			Brunnen 4	42	58
			Krepbach-Qu	69	31
			Badersee-Qu	38	62

Aufgrund der dimensionslosen Betrachtung fallen die Temperaturen gegenüber den Leitfähigkeiten zahlenmäßig kaum ins Gewicht, so dass sich die berechneten Mischungsanteile sehr stark an den Leitfähigkeiten orientieren. Die Berechnung der Anteile nur mit den Leitfähigkeiten über ein Mischungskreuz (Andreaskreuz) erbringen nahezu identische Mischungsverhältnisse.

Die stark vereinfachte, konservative Betrachtung der Mischungsanteile wird den realen hydraulischen Bedingungen vermutlich nicht gerecht, zumal mit den angesetzten Mischungsendglieder sicher nicht alle möglichen Mischungskomponenten hinreichend erfasst sind. Unklar und nicht berücksichtigt bleiben z.B. die neugebildeten Grundwassermengen in der Bergsturzmasse aus dem westlichen und nördlichen Einzugsgebiet der Brunnen oder eventuelle Kluftwasserzuflüsse aus der in der Grundwassermessstelle 2 (GWM 2) erbohrten, aus Hauptdolomit bestehenden Felsschwelle des Eibsees. Erstere dürften vor allem im am nördlichsten gelegenen Brunnen 2 eine Rolle spielen. Dennoch zeigen die Ergebnisse eindrücklich, dass es im Grundwasser keine komplette Durchmischung aller Komponenten gibt und deshalb mit zunehmender Distanz vom angenommenen Hauptabstrom des Eibsees die Temperaturen im Grundwasser sinken und die Leitfähigkeiten ansteigen. Den Hauptabstrom erfassen vor allem Brunnen 1 und die Krepbachquellen, wobei Letztere deutlich machen, dass mit zunehmender Entfernung vom Eibsee dessen Einfluss naturgemäß schwindet und die Grundwässer wegen Austausch und weiteren Zumischungen langsam kälter werden und stärker abweichende Mineralisierungen aufweisen.

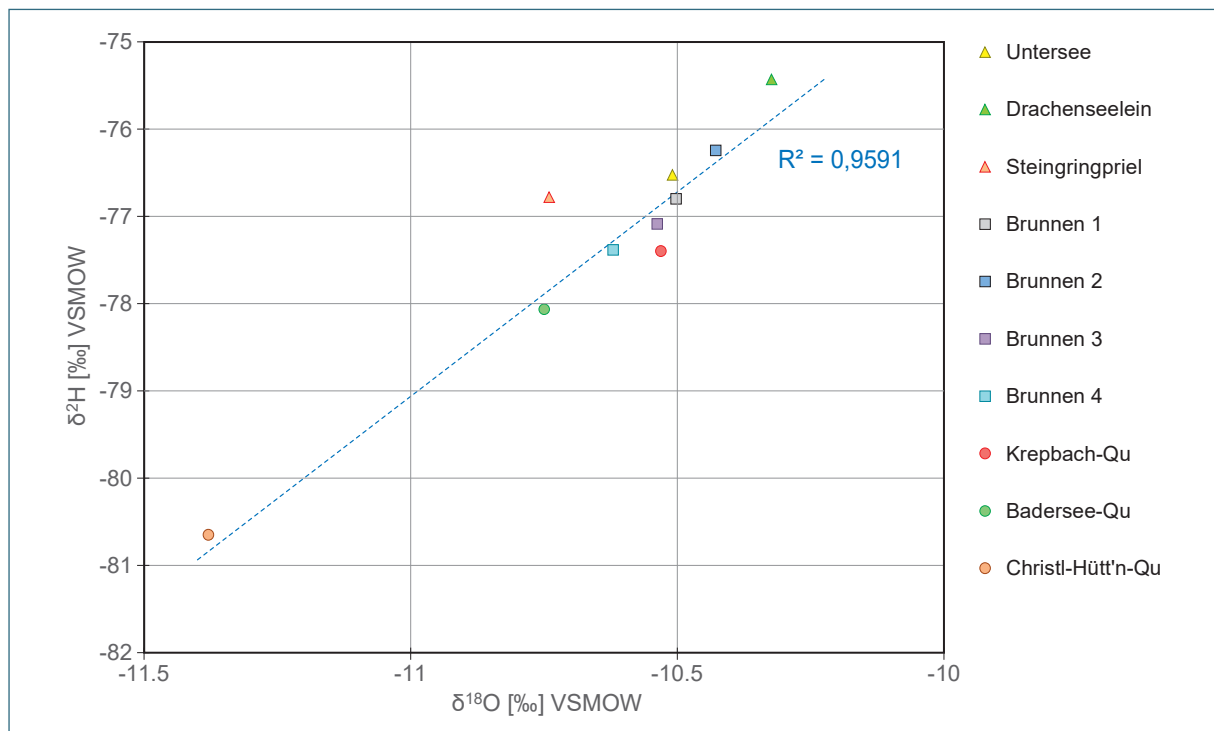


Abb. 19: $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ -Beziehung ausgewählter Grund- und Oberflächenwässer dargestellt an den Mittelwerten der Reihenmessungen. Zur Berechnung der Regression wurden die Werte des Steingringpriels nicht berücksichtigt.

Zum Vergleich wurden die Mittelwerte der stabilen Isotope ins Verhältnis gesetzt. In der Abb. 19 zeigt die Regression ebenso einen auffälligen linearen Zusammenhang zwischen den gemittelten Isotopen der einzelnen Messpunkte wie bei den Temperaturen und Leitfähigkeiten. Allerdings wird vor allem am Brunnen 2 erkennbar, dass es eine weitere Mischungskomponente geben muss. Als einzige verfügbare Vergleichsmöglichkeit bietet sich hierfür das Wasser des Drachenseeeins an. Es ist im Durchschnitt das isotopisch schwerste Wasser und repräsentiert eine Mischung aus Sommerwässern des Eibsees und aus lokaler Neubildung in der Bergsturzmasse.

Mit dem Wasser aus dem Untersee als Hauptmischungskomponente und dem Quellwasser der Christl-Hütt'n-Quelle sowie dem Wasser des Drachenseeeins als Nebenkomponten lässt sich keine einfache Mischungsbetrachtung mehr durchführen. Im Diagramm der Abb. 19 geben die entlang der Regressionsgeraden aufgereihten Mischsignaturen der stabilen Wasserisotope jedoch überraschend gut die geographische Lage der Brunnen zueinander wieder. So vermittelt der südlichste Brunnen 4 den stärksten Einfluss des südlichen Randzuflusses während der nördlichste Brunnen 2 im Hinblick auf sein vermutetes Einzugsgebiet erwartungsgemäß eine höhere Neubildungskomponente aus der Bergsturzmasse enthält. Wie bereits aus der Mineralisierung und Temperatur zu interpretieren war, ist bei den Baderseequellen der Randzufluss aus dem Süden am markantesten ausgeprägt. Die Mischsignatur der Krepbachquellen unterscheidet sich etwas von den Signaturen der Brunnen, da sie sich am hydraulisch tiefsten Punkt des Grundwasserkörpers befinden und neben dem Hauptabstrom des Eibsees alle möglichen Randzuflüsse erfassen. Zum Vergleich liegt der Mittelwert des Steingringpriels wegen seiner dominanten Randzuflüsse erwartungsgemäß abseits der Regression und vermittelt damit ein von den anderen Messstellen abweichendes Einzugsgebiet bzw. einen geringeren Seewassereinfluss. Setzt man die Regression als Mischungslinie ein, so lassen sich mit Lage der Mischsignaturen auf der Geraden für die Krepbachquellen und Grainauer Brunnen etwa 80 bis 90 % sowie für die Baderseequellen etwa 60 bis 70 %

Eibseewasseranteile abschätzen. Wegen den zeitlich, örtlich und in der jeweiligen Menge im Detail unbekannten Mischungskomponenten sind diese Berechnungen bzw. Abschätzungen nur als Trend aufzufassen, der allerdings betont, dass die isotopisch schwereren Grund- und Quellwässer im Krepbach-Einzugsgebiet vom Eibsee beeinflusst sind, die isotopisch leichteren hingegen keine Beeinflussung von Seewasser anzeigen.

8 Fazit

Der Eibsee erfüllt eine wichtige Funktion für den Grundwasserhaushalt im nördlichen Vorland des Wettersteinmassivs. Im Hinblick auf die hohen, im Jahresdurchschnitt bei etwa 1.600 mm liegenden Niederschlagsmengen wirkt sich der See als Zwischenspeicher sowohl quantitativ als auch qualitativ ausgleichend auf das wasserwirtschaftlich wichtige Grundwasserreservoir im Krepbach-Einzugsgebiet aus.

Bei Niedrigwasserständen, die vorwiegend im Spätwinter und angehenden Frühjahr auftreten, kann mit einer stabilen Einspeisung von 200 bis 300 l/s ins Reservoir gerechnet werden. Interessant erscheint dieser Speichereffekt in trockenen Hitzesommern wie beispielsweise in 2018. In diesem Zeitraum wurde der Mittelwasserstand des Sees von 973,4 m ü. NHN bereits Ende August - also gut 80 bis 120 Tage früher als üblich - unterschritten. Bezogen auf die dokumentierten Wasserstände und der davon abhängigen unterirdischen Abflussmenge des Eibsees dürfte vom Sommer bis in den Herbst hinein eine mit 300 bis 400 l/s jedoch noch relativ stabile Einspeisung ins Einzugsgebiet des Krepbachs erfolgt sein. Für die Aufrechterhaltung dieses hydraulischen Systems kann derzeit kein kritischer Wasserstand des Eibsees benannt werden, da die Abflusssituation im Untersee nicht genau genug bekannt bzw. belegt ist. Existiert beispielsweise eine unterirdische Überlaufschwelle, so würde ihre Höhenlage sicher ein solch hydraulisch kritisches Niveau definieren. Gleiches gilt für die möglichen subaquatischen Auslaufstellen, deren Tiefenlagen ebenso ein kritisches Wasserstands-Niveau des Sees markieren. Wenn der entscheidende Abfluss tatsächlich nur aus dem Untersee erfolgt, muss bei diesem Aspekt auch die hydraulische Beschaffenheit der Schwelle zwischen ihm und dem Weitsee bedacht werden. Die Durchlässigkeit der Schwelle in der Tiefe ist nicht bekannt. Bei extremen Niedrigwasserverhältnissen kann es zur hydraulischen Entkopplung der beiden Seebecken kommen, wodurch nur noch der Untersee als Speicherbecken für das Grundwasserreservoir zur Verfügung steht. Mit dem Annähern an das kritische Niveau müsste sich die am Wasserstand orientierende Auslaufkurve entsprechend der hydraulischen Gesetzmäßigkeiten abflachen. Theoretische Grundlage hierzu liefert das Ausflussgesetz von Toricelli (z. B. in Freimann 2014). Der Hydrograph der Jahresreihen 2011 bis 2018 zeigt eine relativ konstante, quasi lineare Auslaufcharakteristik des Sees. Nur im Frühjahr 2014 schwächt sich die Steigung der Auslaufkurve zunehmend ab, was aber mit den einsetzenden Niederschlägen im gleichen Zeitraum begründet werden kann. Eine Annäherung an ein kritisches Niveau lässt sich daher bislang nicht beobachten.

Eine systemrelevante Änderung im Grundwasserreservoir sollte sich auch in qualitativer Hinsicht ankündigen, da über das klimatisch „normale“ Jahr hinweg vergleichsweise stabile Mischungsverhältnisse in den einzelnen Brunnen vorliegen. Diese qualitative Eigenschaft ist eng mit der stofflichen Dynamik im Seewasser verknüpft. So treten im Einzugsgebiet des Eibsees Grund- und Quellwässer mit Leitfähigkeiten von etwa 130 bis 410 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (bei 25 °C) auf. Bei Hinzurechnung des Niederschlags, der über die Seefläche Ereignis bedingt und saisonal hohe Mengen direkt in das System speisen kann, verschiebt sich die untere Grenze der relevanten Leitfähigkeiten auf etwa 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Mittelwert Freilandniederschlag in einem kalkalpinen Einzugsgebiet bei Mittenwald nach Schott 1989). Die vorliegende Messreihe des Seewassers (Schwelle Weitsee-Untersee) variiert lediglich um 25 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (bei 25 °C), was bezogen auf die in seinem Einzugsgebiet beobachtete Variationsbreite von 390 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (bei 25 °C) auf eine sehr geringe Schwankung und gleichzeitig auf die stoffsenkende Wirkung und gute Durchmischung des Sees hinweist. Damit ist eine qualitativ stabile Mischung im Seeabfluss und in der Folge auch im Grundwasserreservoir gewährleistet. Eine kritische Entwicklung oder Änderung des hydraulischen Systems könnte sich somit auch qualitativ über angestiegene Leitfähigkeiten bei gleichzeitig abnehmenden Temperaturen im Grundwasser andeuten, was nach den Ergebnissen dieser Arbeit im Grunde genommen eine Verschiebung der

Mischungsverhältnisse und damit einen stärkeren Rückgang der Zuflüsse aus dem Eibsee signalisiert. Zusammenfassend lässt sich der Eibsee unter den gegenwärtigen klimatischen Verhältnissen als ein für das Grundwasser stabiler Vorratsspeicher bezeichnen, der die wesentlichen Abflüsse in seinem alpinen Einzugsgebiet zurückhält und in gedrosselten sowie qualitativ ausgeglichenen Mengen unterirdisch abgibt. Die natürliche Schwankung der Wassermenge im Vorrat ist zwar für einen See hoch, aber für einen Speicher im Hinblick auf das durchschnittliche Gesamtvolumen relativ gering.

Aufgrund der über 100 Tage anhaltenden Eisbedeckung des Eibsees und der Tatsache, dass er in einer ausgesprochenen Kaltluftsenke liegt, erscheint es zunächst paradox, den Seekörper als Wärmespeicher zu bezeichnen. Genau betrachtet ist es ein gekoppeltes System zwischen See und der hydraulisch angebundenen Bergsturzmasse, wobei das gut durchlässige Lockergestein einerseits das See- und Grundwasser leitet und speichert, andererseits als großdimensionaler Wärmetauscher zwischen wärmeren und kälteren Seeabflüssen fungiert. Die von der Porenraumgeometrie abhängigen Austauschflächen und die von der Fließgeschwindigkeit geregelten Kontaktzeiten zwischen zirkulierendem Grundwasser und Gestein tarieren das System soweit aus, dass trotz der extremen Temperaturschwankungen des infiltrierenden Seewassers von bis zu 20 °C relativ ausgeglichene Temperaturen im Grundwasser herrschen (Tab. 4 und Abb. 11). Die daraus hervorgehende dauerhafte Temperaturerhöhung des Grundwassers von 2 bis 3 K ist vielerorts messbar. Somit geht vom Eibsee eine zusätzliche Wärmemenge im Grundwasser aus, die sich vereinfacht durch folgende Gleichung bestimmen lässt:

$$Q = m \cdot c_W \cdot \Delta T$$

(Q = Wärmeenergie [J oder Ws]; m = Masse [kg];

c_W = spezifische Wärmekapazität Wasser [4.190 J/kg·K]; ΔT = Temperaturdifferenz [K])

Am Beispiel der Krepbachquellen ergibt sich bei einer durchschnittlichen Gesamtschüttung des Quellbereichs von 100 l/s und einer Temperaturerhöhung von 3 K eine Wärmeenergie von 1.257 kJ respektive 1.257 kWs oder 0,35 kWh. An den Quellen bedeutet dies eine zusätzliche Wärmemenge von etwa 11 GWh im Jahr, die letztendlich über den Seekörper produziert wird. Es erscheint daher gerechtfertigt den Eibsee und die angrenzenden Grundwasserleiter als alpines Wärmespeichersystem zu charakterisieren.

Methodisch hat sich gezeigt, dass die physiko-chemischen Parameter Leitfähigkeit und Temperatur ein hohes Aussagepotenzial besitzen, wenn ein gewisses Prozess- und Systemverständnis des Betrachteten vorausgesetzt werden kann. Dies ist insbesondere bei alpinen Speicherkaskaden, innerhalb derer geringer mineralisierte Wässer zirkulieren, von Bedeutung, da die Variationsbreite der Absolutwerte einzelner Messstellen mit weniger als 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ oder 1 K vermeintlich gering ausfallen und wichtige Messsignale übersehen werden können. Unabdingbar sind dabei Reihen- oder zumindest Mehrfachmessungen an relevanten Messstellen, die erst eine Vorstellung der Grundwasserdynamik in einem alpinen Einzugsgebiet ermöglichen. Darunter sind insbesondere die Beobachtungen im Winterhalbjahr wesentlich, da in dieser Zeit sukzessive die Speicherentleerung erfolgt.

Dank

Für die jeweils kurzfristig angefragte logistische Unterstützung während der Messungen und Probenahmen an den Brunnen der Wassergewinnungsanlage Unterwald geht ein besonderer Dank an den Wassermeister der Gemeinde Grainau Herrn Huber und seinen Mitarbeiter Herrn Kirchdorfer.

Literaturverzeichnis

- Baumgartner, A., Reichelt, E., Weber, G. (1983): Der Wasserhaushalt der Alpen. Niederschlag, Verdunstung, Abfluß und Gletscherspende im Gesamtgebiet der Alpen im Jahresdurchschnitt für die Normalperiode 1931–1960, 343 S., Oldenbourg, München.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2017a): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt 8531/8631 Zugspitze. – Bearbeiter: Thomas Hornung, Ulrich Haas – Augsburg.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2017b): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Blatt 8532/8632 Garmisch-Partenkirchen. – Bearbeiter: Thomas Hornung, Ulrich Haas – Augsburg.
- Freimann, R. (2014): Hydraulik für Bauingenieure – Grundlagen und Anwendungen, Hanser Verlag: 244 S., München.
- Grimminger, H. (1982): Verzeichnis der Seen in Bayern. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft [Hrsg.], München.
- Haas, U., Ostermann, M., Sanders, D., Hornung, T. (2014): Quaternary sediments in the Werdenfels region (Bavaria, southern Germany), Excursion B. – In: Kerschner, H., Krainer, K. & Spötl, C. [Hrsg.]: From the foreland to the Central Alps – Excursion guide of the field trips of the Deuqua Congress in Innsbruck, Austria, 24.–29. September 2014, S. 18–30, Berlin (Geozon).
- Hibler, J. J. (1918): Der Eibsee und der Badersee, eine kultur- und wirtschaftsgeschichtliche Studie. Verlag Michael Müller, München.
- Hydroisotop (2003): Ergebnisse der hydrochemischen und isopenhydrologischen Untersuchungen der Bohrungen VB1, VB2 und VB3 sowie einer Quelle bei Grainau. – Firmenbericht Schweitenkirchen (unveröff.).
- IKG – Ingenieurbüro Dr. Knorr GmbH (2001): Brunnenanlage der WV Grainau, Hydrogeologisches Basisgutachten. – Firmenbericht Neubiberg (unveröff.).
- IKG – Ingenieurbüro Dr. Knorr GmbH (2009): Wasserrechtlicher Genehmigungsantrag, Brunnen HB 1 bis HB 4 der Gemeindewerke Garmisch-Partenkirchen und der Gemeinde Grainau im Erschließungsgebiet Unterwald. – Firmenbericht Neubiberg (unveröff.).
- Isodetect (2008): Ergebnisse der isopenhydrologischen Untersuchungen am Grundwasser während des Pumpversuchs 2008 Wassererschließungsgebiet Unterwald, Wasserversorgung Garmisch-Partenkirchen und Grainau. – Firmenbericht München (unveröff.).
- Jerz, H. & Poschinger, A. (1995): Neuere Ergebnisse zum Bergsturz Eibsee-Grainau. – Geologica Bavarica 99: 383–398, Bayerisches Geologisches Landesamt [Hrsg.], München.
- Keller, R., de Haar, U., Liebscher, H.-J., Richter, W. Schirmer, H. [Hrsg.] (1979): Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland. – Atlas mit 103 Karten und Textband zur regionalen Hydrologie, 101 Abb., 388 S., Boppard (Boldt).

- Knauer, J. (1933): Die geologischen Ergebnisse beim Bau der Bayerischen Zugspitzbahn. – Abhandlungen der Geologischen Landesuntersuchung am Bayerischen Oberbergamt [Hrsg.], Heft 10, S. 23–50, München 1933.
- Kus, G. (2012–2019): Kartierbücher Hydrogeologische Landesaufnahme der Jahre 2012 bis 2019, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hof (unveröff.).
- Lauber, U. (2014): Drainage structures and transit-time distributions in conduit-dominated and fissured karst aquifer systems. – Diss. Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) 2014.
- LfU: siehe Bayerisches Landesamt für Umwelt
- Märkl, J. & Huber, A. (2006): Datentabellen zu den Messungen am Badersee, Brücklbach und der Steiggumpe in Grainau (unveröff.).
- Miller, H. (1961): Der Bau des westlichen Wettersteingebirges. – Z. deutsch. Geol. Ges., Bd. 113, S. 409–426, Hannover.
- Moser, H. & Rauert, W. (1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie. – Lehrbuch in der Hydrogeologie Bd. 8, 400 S., 227 Abb., 32 Tab., Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- Nixdorf, B., Hemm, M., Hoffmann, A., Richter, P. (2004): Dokumentation von Zustand und Entwicklung der wichtigsten Seen Deutschlands – Teil 11 Bayern. – Abschlussbericht FKA 29924274 Umweltbundesamt UBA.
- Orth, J.-P. (2003): Zur Entstehung, Hydrologie und Historie des Badersees. – Groana, Heft 18, Verein Bär und Lilie, Grainau.
- Orth, J.-P. (2004): Geologischer Wanderführer Grainau. – Gemeinde Grainau [Hrsg.], Grainau.
- Reis, O. M. (1910): Erläuterungen zur Geologischen Karte des Wettersteingebirges I. Teil. Kurze Formationsbeschreibung, allgemeine tektonische und orogenetische Übersicht. – Geogn. Jh. 23, S. 61–114, Piloty & Loehle, München.
- Schumann, W. (1955): Wasserstandschwankungen der oberbayerischen Seen. – Abhandlungen der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Heft 72, München.
- Schumann, W. (1965): Physikalische Untersuchungen am Eibsee bei Garmisch-Partenkirchen. – Mitt. Geogr. Ges. München, 50, S. 77–108, München.
- Schott, T. (1989): Stoffumsätze in den Deckschichten eines kalkalpinen Kleinzugsgebietes unter Einbeziehung ausgewählter Schwermetalle. – Diss. TU München.
- Streil, J. (1971): Die Wasserstände des Eibsees. – Dt. Gewässerkundliche Mitteilungen 22, H 4, S. 101–106, Sonderdruck.
- Vidal, H. (1953): Neue Ergebnisse zur Stratigraphie und Tektonik des nordwestlichen Wettersteingebirges und seines nördlichen Vorlandes. – Geol. Bav. 17, S. 56–88, München.



Eine Behörde im Geschäftsbereich
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz

