

Der Weißensee im Wandel der Zeit - Eine Sediment-hydrogeochemische Analyse

Von Lucia MIESEBNER, Martin DIETZEL & Dorothee HIPPLER

Zusammenfassung

Im Zeitraum von Dezember 2020 bis November 2021 wurden regelmäßig Beprobungen und Analysen des Wassers und des Sediments in den ufernahen Flachwasserbereichen als auch der Seemitte des Weißensees durchgeführt, um den Einfluss des Klimawandels auf die Wasserchemie und die für die Farbgebung des Sees kennzeichnenden Kalkabscheidungen zu untersuchen. Letztere waren dabei von besonderem wissenschaftlichen Interesse, da sie eine wichtige lokale Senke für CO₂ darstellen. Die gewonnenen Monitoring-Daten weisen auf saisonale und standortspezifische Effekte hin. Ferner zeigen Langzeitdaten (1970 bis 2021) des Kärntner Instituts für Seenforschung eine Zunahme der Oberflächenwassertemperatur, vor allem in den Herbst- und Wintermonaten und auch steigende Konzentrationen spezifischer gelöster Komponenten wie Na, Mg und Ca Ionen. Hinweise auf eine zunehmende Süßwasserversauerung als Folge erhöhter atmosphärischer CO₂ Konzentrationen ließen sich jedoch nicht identifizieren. Im Sediment lassen sich drei Karbonatmineralphasen, Calcit, Aragonit und Dolomit, und untergeordnet Quarz, Illit und Chlorit sowie auch eine Vielzahl biogener Komponenten bestimmen. Die Kalkabscheidung in Form von Calcit und Aragonit ist dabei auf zwei Phänomene zurückzuführen, die räumlich und zeitlich unabhängig voneinander ablaufen: So wird die Bildung von nano- bis mikrokristallinem Calcit an der Wasser-Sediment-Grenzfläche durch das Vorhandensein einer organischen Matrix bestimmt, wohingegen es sich beim Aragonit um eine früh-sommerliche Bildung aus der Wassersäule handelt. Der vor allem im Westteil des Sees auftretende feinkörnige Dolomit geht auf die Verwitterung und Erosion der den See umgebenden triassischen Sedimentgesteine zurück.

Abstract

In the period from December 2020 to November 2021, regular sampling and analysis of surface waters and sediments were carried out in the marginal shallow water areas as well as in the middle of the lake in order to investigate the influence of climate change on water chemistry and chalk deposition; the latter is responsible for the characteristic coloring of the lake. The carbonate deposits are of particular scientific interest, as they represent an important local sink for CO₂. The monitoring data obtained by the study indicate seasonal and site-specific effects. In addition, long-term data (1970 to 2021) of the Kärntner Institut für Seenforschung show a rising trend of surface water temperature, especially in autumn and winter months, as well as increasing concentrations of certain dissolved components such as Na, Mg and Ca ions. Evidence of freshwater acidification as a result of increased atmospheric CO₂ concentrations could not be identified. In the sediment, three carbonate mineral phases, calcite, aragonite and dolomite, and subordinately quartz, illite and chlorite, as well as a variety of biogenic components were detected. Chalk deposition in the form of calcite and aragonite can be ascribed to two phenomena, which occur spatially and temporally, independent of each other: The formation of nano- to microcrystalline calcite at the water-sediment interface is determined by the presence of an organic matrix, whereas aragonite precipitates from the water column in early summer. The fine-grained dolomite is mainly found in the western part of the lake and occurs due to weathering and erosion of the surrounding Triassic sedimentary rocks.

Schlüsselwörter

Klimawandel, Monitoring, Zeitreihen, Langzeittrend, Karbonatbildung, lakustrine Mikrobialite

Keywords

climate change, monitoring, time series, long-term trend, carbonate formation, lacustrine microbialites

Einleitung

Die Auswirkungen des Klimawandels werden vielfältig erforscht und zeigen sich vor allem in steigenden CO₂ Konzentrationen, der stetigen Temperaturerhöhung, aber auch an Effekten wie der Ozeanversauerung (SABINE et al. 2004, ORR et al. 2005, FABRY et al. 2008). Auch im österreichischen Alpenraum kann ein deutlicher Anstieg der Temperatur und des CO₂-Gehalts über die letzten Dekaden hinweg beobachtet werden (z. B. ZAMG-Daten, Sonnblick Observatorium). Derartige physikochemische Veränderungen beeinflussen jedoch Wasser- und Stoffkreisläufe, Wechselwirkungen zwischen Hydro- und Geosphäre (z. B. Mineralbildung) sowie das Leben vieler aquatischer Organismen. Auch in Süßwassersystemen können bereits sensible Veränderungen aufgrund einer zunehmenden Versauerung beobachtet werden (MUNIZ 1990, WEISS et al. 2018, HASLER et al. 2018). So kann z. B. für bestimmte Primärproduzenten, wie Makrophyten, eine Beeinträchtigung ihres Reproduktionsvermögens beobachtet werden (HASLER et al. 2018). Wie aber wirken sich die steigenden CO₂-Gehalte und klimatischen Veränderungen auf einen klar umgrenzten alpinen Raum, wie das Weißenseegebiet, aus, wo Quellen, Bäche und der See selbst ein wichtiges Wasserreservoir und potentiell vulnerables Ökosystem darstellen?

Um diese Frage zu klären und damit die Effekte des Klimawandels erfassen und bewerten zu können, wurden am Weißensee zwischen Dezember 2020 und November 2021 Beprobungen von Wasser und Sediment an ausgewählten Standorten in und um den See durchgeführt und mit hydrologischen Messungen (wie Wassertemperatur, elektrische Leitfähigkeit, pH und O₂-Sättigung) kombiniert. Darüber hinaus sind die in der Geländestudie gewonnenen Daten den Langzeitdaten (1970–2021) zur Wasserchemie des Kärntner Instituts für Seenforschung (KIS) gegenübergestellt worden. Die ufernahen Flachwasserbereiche im Ostteil sowie die relativ flachen Bereiche des Westteils des Sees, dem sogenannten Gatschacher Becken, zeichnen sich durch ihre grünliche, türkise bis weißliche Farbe aus (Abb. 1, a-d). Die Sedimente in diesen Bereichen werden auch als Seekreide bezeichnet, die im Wesentlichen Seenablagerungen mit organischen Substanzen und hohen Kalkgehalten entspricht (CHMIELESKI 2006). Besonders beachtenswert ist der sehr feinkörnige Kalkschlamm des West- und Ostteils, der von mikroskopisch kleinen Calcitkristallen (CaCO₃) aufgebaut wird. Wie und wann im Jahr der Calcit gebildet wird und welche Mikrostruktur er aufweist, ist allerdings noch nicht vollständig geklärt und auch ob eine saisonale Eisbedeckung diese Bildung beeinflusst. Darüber hinaus ist der Calcit von großer Relevanz, da er als Archiv verwendet werden kann, um die Wassertemperatur bei seiner Bildung mittels der Sauerstoff-Isotopen-Fraktionierung (¹⁸O/¹⁶O) zwischen Calcit und Wasser zu rekonstruieren.

Geologisch-geografischer Überblick

Der Weißensee liegt im Zentrum der Gailtaler Alpen auf 929 m Seehöhe und erstreckt sich von West nach Ost auf eine Länge von etwa 11,4 km. Die Wassertiefe des alpinen Sees variiert von 5 m im westlichen Becken bis 99 m im östlichen Bereich. Ein mittlerer Abfluss von circa 0,78 m³/s kann für den Weißenbach, im Osten des Weißensees, angenom-



men werden (SCHULZ et al. 2007). Das Einzugsgebiet des Weißensees ist etwa 50 km² groß und umfasst mehrere geologische Einheiten. Bei diesen handelt es sich vor allem um geologische Einheiten triassischen Ursprungs. In Abbildung 2 ist die geologische Karte mit dem Einzugsgebiet des Weißensees zu sehen. Die verschiedenen Farben stellen dabei unterschiedliche geologische Einheiten dar. Nördlich des Sees stehen Sedimentgesteine der Wetterstein-Formation (hellblau, Karnium), bestehend aus Kalk- und Dolomitgesteinen, und der Cardita-Formation (braun, ebenfalls Karnium), zusammengesetzt aus Tonschiefern, Kalk- und Dolomitgesteinen, an. Außerdem ist ein kleiner Teil im Norden von Dolomitbrekzien der Hauptdolomit-Formation (grau, Norium) geprägt. Im Nordosten treten darüber hinaus Plattenkalke der Partnach-Formation (grün, Ladinium) auf. Südlich des Weißensees kommen Cardita-, Hauptdolomit- und Partnach-Formation vor sowie die Kössen-Formation (violett, Rhaetium), die aus Kalken, Mergeln und Tonschieferlagen besteht und die Muschelkalk-Formation (dunkelblau, Anisium), zusammengesetzt aus Zwischendolomit und vereinzelt Kalkgestein.

Methoden

Am Weißensee wurden etwa alle zwei Monate, an maximal 16 Standorten (Abb. 2), Temperatur, pH-Wert, Leitfähigkeit und Sauerstoffsättigung des Wassers vor Ort gemessen sowie Wasser- und Sedimentproben entnommen. Im Februar wurden beispielsweise nur neun Standorte beprobt, E1-E6 und E12-E14, da die Geländearbeit durch die geschlossene Eisbedeckung erschwert war. Der Zugriff auf das darunter liegende Oberflächenwasser bzw. dessen Beprobung erfolgte mit Hilfe eines Eisbohrers.

Abb. 1: Drohnenaufnahmen des Weißensees zeigen die Unterschiede zwischen West- und Ostteil. a: Westteil am Standort E15, der Farbton des Sees ist hier deutlich grüner. b: Ostteil, E2, die Farbe des Sees variiert hier von blaugrün bis dunkelblau, die Sedimentbank im Randbereich des Sees ist deutlich zu sehen. c: Ostteil, E4, hier wirkt der See bläulich bis türkis. d: Ostteil, E7, der Farbton des Sees ist blau bis türkis. Aufnahmen von weissenseefoto.at.

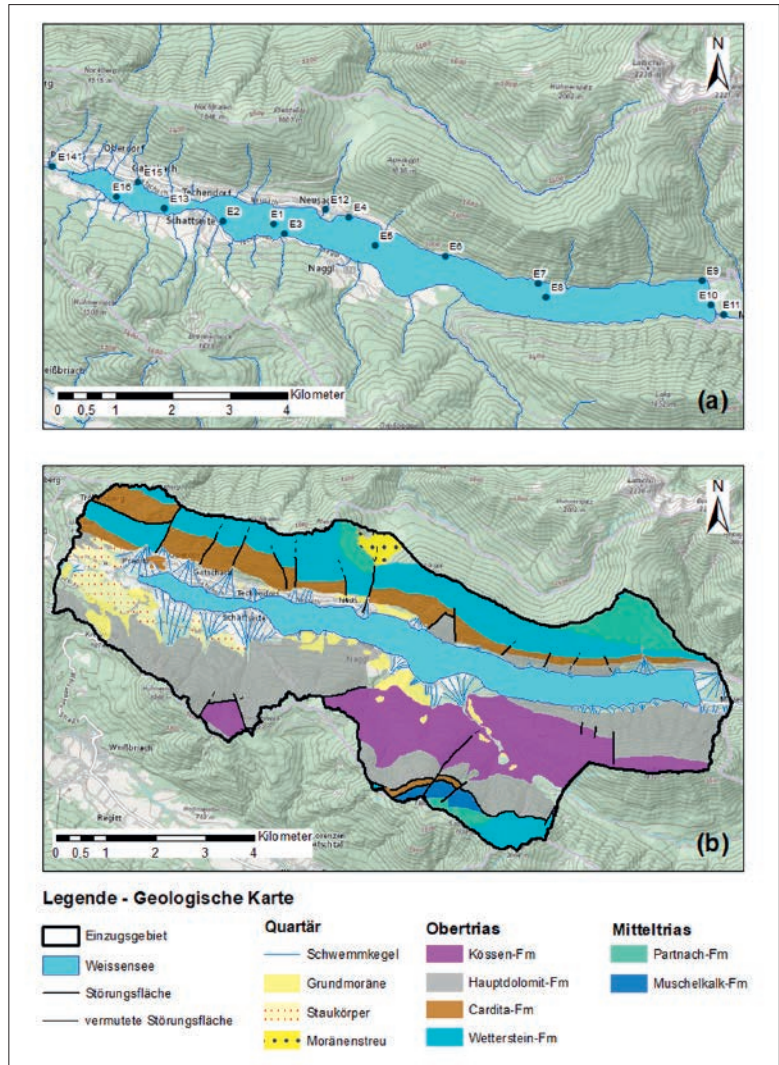


Abb. 2:
 (a): Ausgewählte Standorte am Weißensee (E1-E16). Sedimentproben wurden nur von den ufernahen Punkten genommen. Von E1, E5, E8, E11, E12 und E14 wurden jeweils nur Wasserproben entnommen.
 (b): Geologische Karte mit Einzugsgebiet des Weißensees.

Alle Karten in Abbildung 2 wurden mit ArcGIS Version 10.7.1, Höhenmodell (JARVIS et al. 2008), Hintergrund von basemap.at, Flussnetzwerk Land Kärnten von data.gv.at und Geologische Karte nach den Blättern 198 und 199, herausgegeben von der Geologischen Bundesanstalt, erstellt.

Die Wasserproben, allesamt aus maximal 50 bis 70 cm Wassertiefe, wurden im Labor des Instituts für Angewandte Geowissenschaften (IAG) der TU Graz auf ihre Zusammensetzung untersucht. Die Alkalinität wurde mittels Titration und 10 mM HCl ermittelt. Die Analyse der Haupt- und Spurenelemente erfolgte durch Ionenchromatografie und optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma. Anhand dieser Daten wurden hydrochemische Modellierungen mit der Software PHREEQC 3.6.2 (PARKHURST & APPELO 2013) durchgeführt.

Im Labor des IAG wurden die Sedimentproben des Sees gefriergetrocknet, danach im Achatmörser zerkleinert und mittels Röntgendiffraktometer (Panalytical XPert Diffraktometer) auf die Mineralphasen hin analysiert. Mit dem Rasterelektronenmikroskop (Zeiss Gemini DSM 982) des Instituts für Erdwissenschaften der KFU Graz konnten zusätzlich hochauflösende Sekundärelektronen-Aufnahmen der Proben gemacht und mit Hilfe der energiedispersiven Röntgen-Mikroanalyse die chemische Zusammensetzung der abgebildeten Phasen bestimmt werden.

Ergebnisse

Langzeitdaten und Zeitreihenanalysen

Seit 1936 wurden vom Kärntner Institut für Seenforschung regelmäßige Parameter, wie Temperatur, Leitfähigkeit, pH-Wert, Alkalinität und Elementzusammensetzungen, über das Jahr hinweg bestimmt. Es gibt nur wenige Jahre, in denen die Messungen unvollständig sind bzw. ausgesetzt wurden. Die Zeitreihenanalyse der Parameter mittels Python-Skript, Mann-Kendall Trend Test und normaler Linear-Regression (HAUSLEBER 2020) ergab für den untersuchten Zeitraum (1970–2021) bzw. die untersuchten Monate April, Juni, September und Dezember folgende Erkenntnisse:

- Die Wassertemperatur zeigt einen signifikanten Anstieg für die September- und Dezember-Zeitreihen insbesondere ab dem Jahr 2004. Eine größere Schwankungsbreite ist im April und Juni zu verzeichnen, weswegen hier kein Trend ermittelt werden kann.
- Die elektrische Leitfähigkeit – als Parameter für die gelösten ionischen Inhaltstoffe – vermittelt einen signifikanten Anstieg, außer für Dezember.
- Der pH-Wert zeigt keinen signifikanten Trend in den untersuchten Zeitreihen.
- Die Alkalinität weist nur für die Zeitreihen der Monate Juni und September auf einen signifikanten Anstieg hin.
- In der Elementzusammensetzung ergeben sich Unterschiede zwischen den untersuchten Elementen, auch in Bezug auf die monatlichen Zeitreihen. So steigt der Na-Gehalt in allen Monaten über den gesamten Zeitraum hinweg signifikant an. Mg und Ca stellen die Hauptelemente und beide zeigen einen deutlichen Konzentrationsanstieg, außer im September (Mg) und Dezember (Ca). Die Sulfatkonzentration variiert für die jeweiligen Monate und nimmt schließlich im Dezember deutlich ab.

Jährliche Variation der Hydrologie und Wasserchemie des Sees sowie der Zuflüsse

Durch die regelmäßige Beprobung des Seewassers und der Zuflüsse (westlich Praditzbach E14 und nördlich Mühlbach E12) von Dezember 2020 bis November 2021 ergibt sich ein umfassendes Bild der jährlichen Variation der hydrologischen Parameter und auch der Wasserchemie (Abb. 3), wobei saisonale Gemeinsamkeiten und Unterschiede sichtbar werden. Die Proben von Februar 2021 konnten unter der geschlossenen Eisdecke mit Hilfe eines Eisbohrgerätes genommen werden.

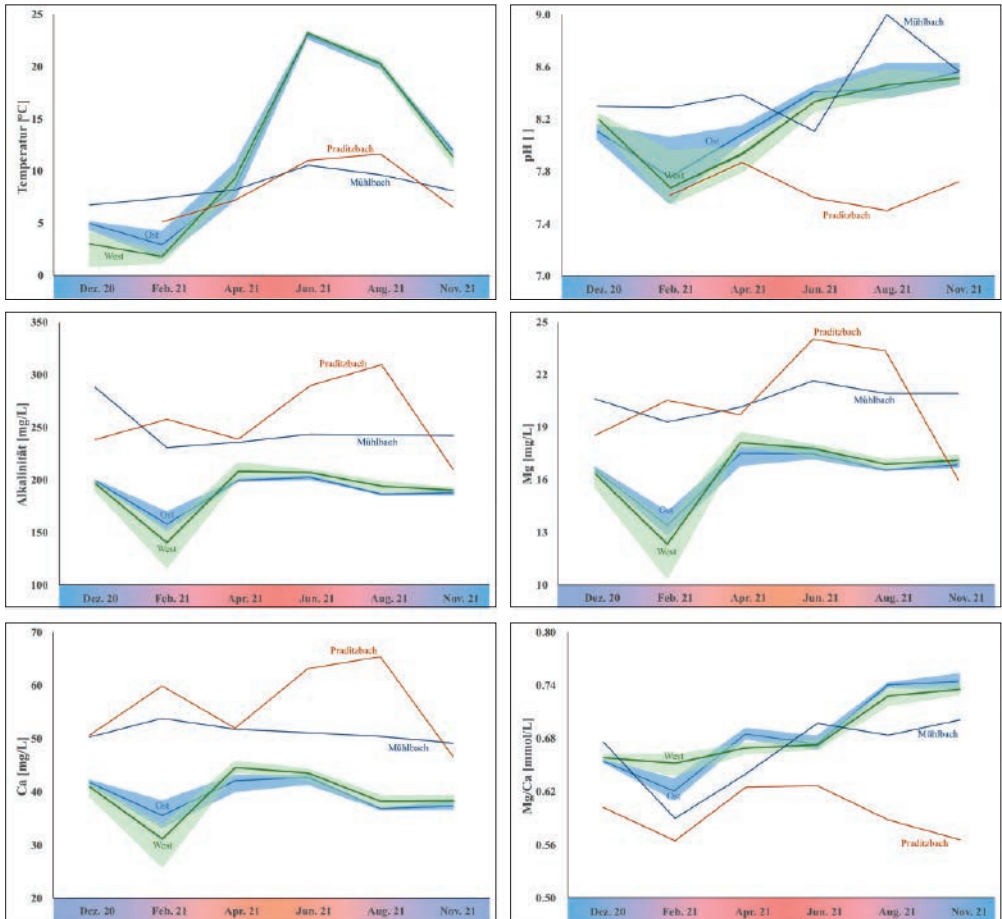
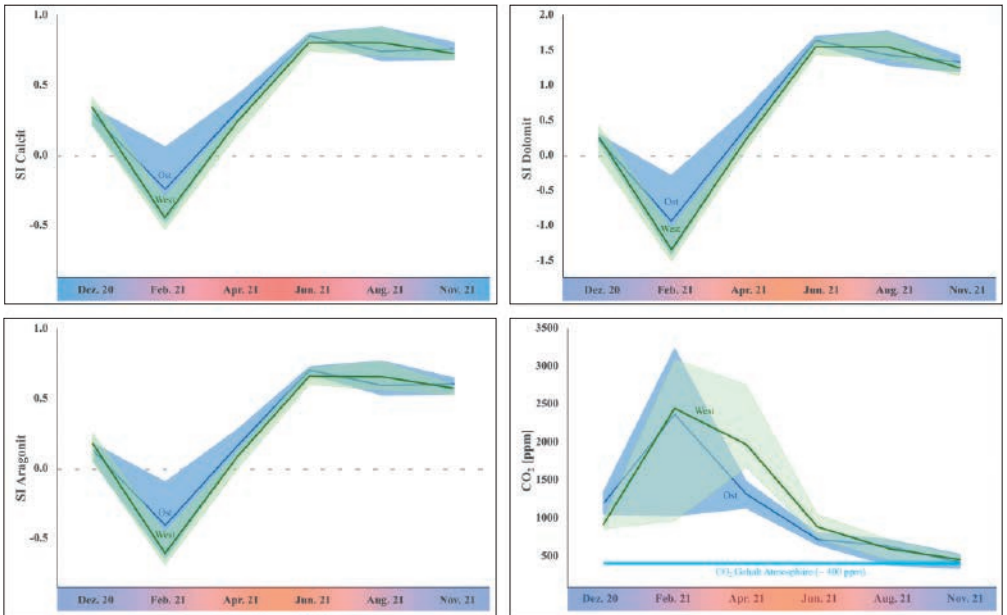


Abb. 3: Hydrologische Parameter und Wasserchemie vom Zeitraum Dezember 2020 bis November 2021. In dunkelgrün werden die gemittelten Werte der West-Proben und in blau die der Ost-Proben dargestellt. Die helleren, farblich gekennzeichneten Flächen stellen den Bereich zwischen Maxima und Minima zum jeweiligen Zeitpunkt dar. Zusätzlich werden die gemessenen Daten der zufließenden Bäche, Praditzbach und Mühlbach, dargestellt.

- Die Wassertemperatur im See folgt einem deutlichen saisonalen Verlauf mit Minimaltemperaturen von 0,8 °C in den Wintermonaten und Maximaltemperaturen von 23,4 °C im Sommer. Die Zuflüsse zeigen hingegen nur einen schwachen saisonalen Effekt in der Wassertemperatur.
- Die elektrische Leitfähigkeit des Sees beträgt im Durchschnitt 322 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und zeigt ebenfalls einen saisonalen Effekt mit etwas niedrigeren Werten im August und November und höheren Werten im Dezember, Februar, April und Juni.
- Der pH-Wert liegt zwischen 7,55 und 8,63 und vermittelt einen saisonalen Verlauf mit höheren pH-Werten im Spätsommer und Herbst. Unter den Seeproben zeigen sich für die Beprobung im Februar 2021 markante Unterschiede im pH-Wert, mit den geringsten pH-Werten an Probenlokalität E1, E3 und E6. Die beiden Zuflüsse weisen keine einheitliche zeitliche Entwicklung des pH-Wertes auf.



- Die Alkalinität schwankt um einen Mittelwert von 192 mg/L, mit etwas geringeren Werten im Winter sowie auch deutlich geringeren Werten im Februar 2021. Die Alkalinität der Zuflüsse ist über das gesamte Jahr mit leichten Schwankungen deutlich höher.
- Die Mg- und Ca-Konzentrationen der Seewässer korrelieren, wobei die Ca-Konzentrationen im Zeitraum von August bis November 2021 stärker abnehmen als die Mg-Konzentrationen. Dies spiegelt sich in den höheren Mg/Ca-Verhältnissen dieser Monate wieder. Die geringsten Werte treten für beide Elemente im Februar 2021 auf. Die Mg- und Ca-Konzentrationen der Zuflüsse sind höher und variieren unterschiedlich gegenüber den Seewässern.
- Der modellierte Sättigungsindex für Calcit und Aragonit (SI_{C_c} und SI_{Arag}) liegt für alle Seewässer und Zuflüsse, mit Ausnahme der See-Proben von Februar 2021, über 0, d. h. eine Übersättigung in Bezug auf Calcit und Aragonit ist nahezu das gesamte Jahr gegeben und somit auch das Potential zur Bildung von Calcit bzw. Aragonit (Abb. 4). Von Juni bis August 2021 liegen die SI_{C_c} - und teilweise SI_{Arag} -Werte zudem $> 0,7$, was eine spontane sogenannte homogene Nukleation von Calcit bzw. Aragonit in der Wassersäule ermöglichen kann.
- Die für die Seewässer und Zuflüsse berechneten internen CO_2 -Partialdrücke (pCO_2) liegen fast das ganze Jahr über dem atmosphärischen pCO_2 , nur im Zeitraum von August bis November 2021 stehen diese im Gleichgewicht mit dem pCO_2 der Erdatmosphäre. Das bedeutet, dass die Wässer mit Ausnahme von August bis November 2021 CO_2 an die Erdatmosphäre abgeben und somit eine Verschiebung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts zu Gunsten der Karbonatbildung induziert werden kann.

Abb. 4: Modellierungsdaten der Wasserproben. Sättigungsindizes wie SI Calcit, SI Dolomit, SI Aragonit und pCO_2 wurden mittels PHREEQC modelliert.

Mineralogische Sedimentzusammensetzung und Mikrotexturen

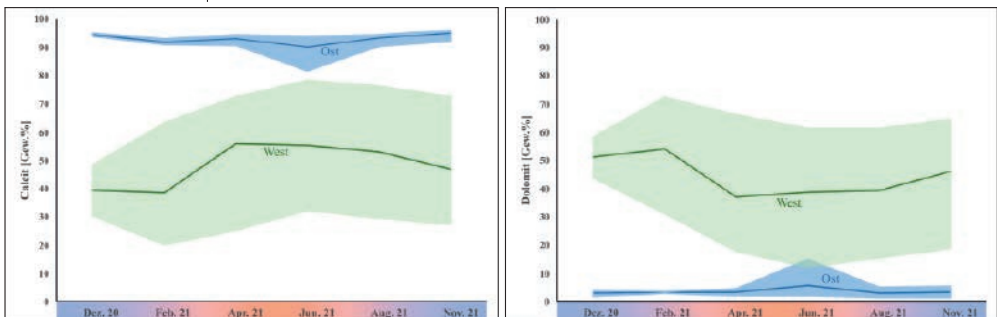
Die Hauptmineralphase der Flachwassersedimente des Weißensees ist zumeist Calcit (CaCO_3 , bis zu 96 Gewichtsprozent), wobei die westlichen Probenlokalitäten (E2, E3, E13, E15, E16) im Gegensatz zum Gesamtprobensatz einen erheblichen Anteil Dolomit von bis zu 72 Gewichtsprozent ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) enthalten können (Abb. 5). Mit geringen Anteilen von hauptsächlich < 3 Gewichtsprozent treten außerdem Aragonit (CaCO_3), Quarz (SiO_2), Albit ($\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$), Illit ($(\text{K},\text{H}_3\text{O})\text{Al}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{H}_2\text{O},\text{OH})_2$) und Chlorit ($(\text{Fe},\text{Mg},\text{Al})_6(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$) auf. Bei Calcit handelt es sich um Niedrig-Mg Calcit mit einem Mg-Gehalt kleiner 4 mol-%. Im November 2021 lässt sich jedoch auch Mg Calcit mit Mg-Gehalten von bis zu 4,6 mol-% an den Probenlokalitäten E6, E9 und E10 finden. Beim Dolomit deuten die XRD-Analysen auf einen nahezu stochiometrischen Dolomit mit hohem Ordnungsgrad hin. Der Anteil an Dolomit in den westlichen Probenlokalitäten lässt allerdings kein vorherrschendes räumliches Verteilungsmuster erkennen, zeigt jedoch eine geringe saisonale Variation, mit höheren Anteilen im Juni 2021.

Die Kristall-/Wuchsformen der unterschiedlichen Mineralphasen und auch die Mikrotexturen des Sediments ergeben sich anhand räumlich hochauflösender REM-Aufnahmen (Abb. 6, a-f). Allen Sedimentproben gemein ist die nano- bis mikrokristalline Ausprägung des Calcits. Die für Calcit typischen Kristallformen, wie z. B. die rhomboedrische Gestalt, werden dabei von epitaxial angeordneten, nanokristallinen, calcitischen Subeinheiten aufgebaut (Abb. 6, a-d); es sind aber auch calcitische Polykristalle mit komplexer Gestalt möglich (Abb. 6, e und f). Diese Wuchsformen und auch Varianten davon, zeigen eine hohe interkristalline Porosität, teils unregelmäßige, kolloidale Formen, aber auch gut ausgebildete, planare Kristallflächen sowie treppen- und säulenförmig/prismatisches Kristallwachstum.

Der nano- bis mikrokristalline Calcit scheint dabei generell in einer haut- und fadenförmigen organischen Matrix eingebettet zu sein, die als extrazelluläre polymere Substanz (EPS) bezeichnet wird (Abb. 7, a, b). Darüber hinaus konnte in einigen Sedimentproben framboidaler Pyrit (Abb. 7, c, d) gefunden werden, ein Anzeichen für bakterielle Sulfatreduktion (DUVERGER et al. 2020).

Die treppen- und säulenförmigen Wuchsformen des Calcits treten ganzjährig über den gesamten See verteilt auf. Von April bis November

Abb. 5: Anteil der mittels XRD bestimmten Hauptmineralphasen Calcit und Dolomit (in Gewichtsprozent) unter Berücksichtigung der räumlichen Verteilung und des Zeitpunktes im Zuge der Beprobungen am Weißensee. In dunkelgrün und blau wieder die gemittelten Werte der West- und Ost-Proben mit den jeweiligen Maxima und Minima.



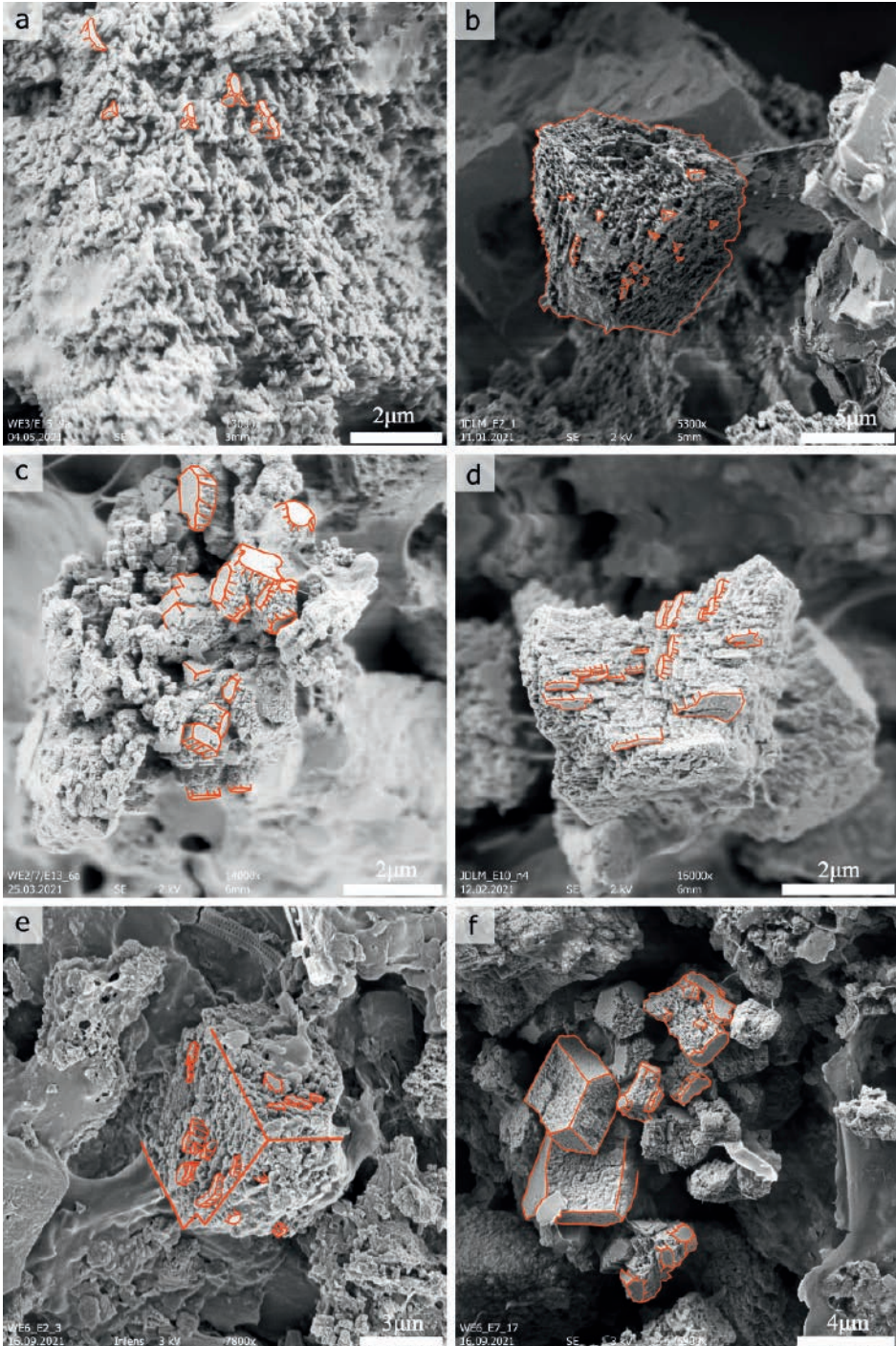
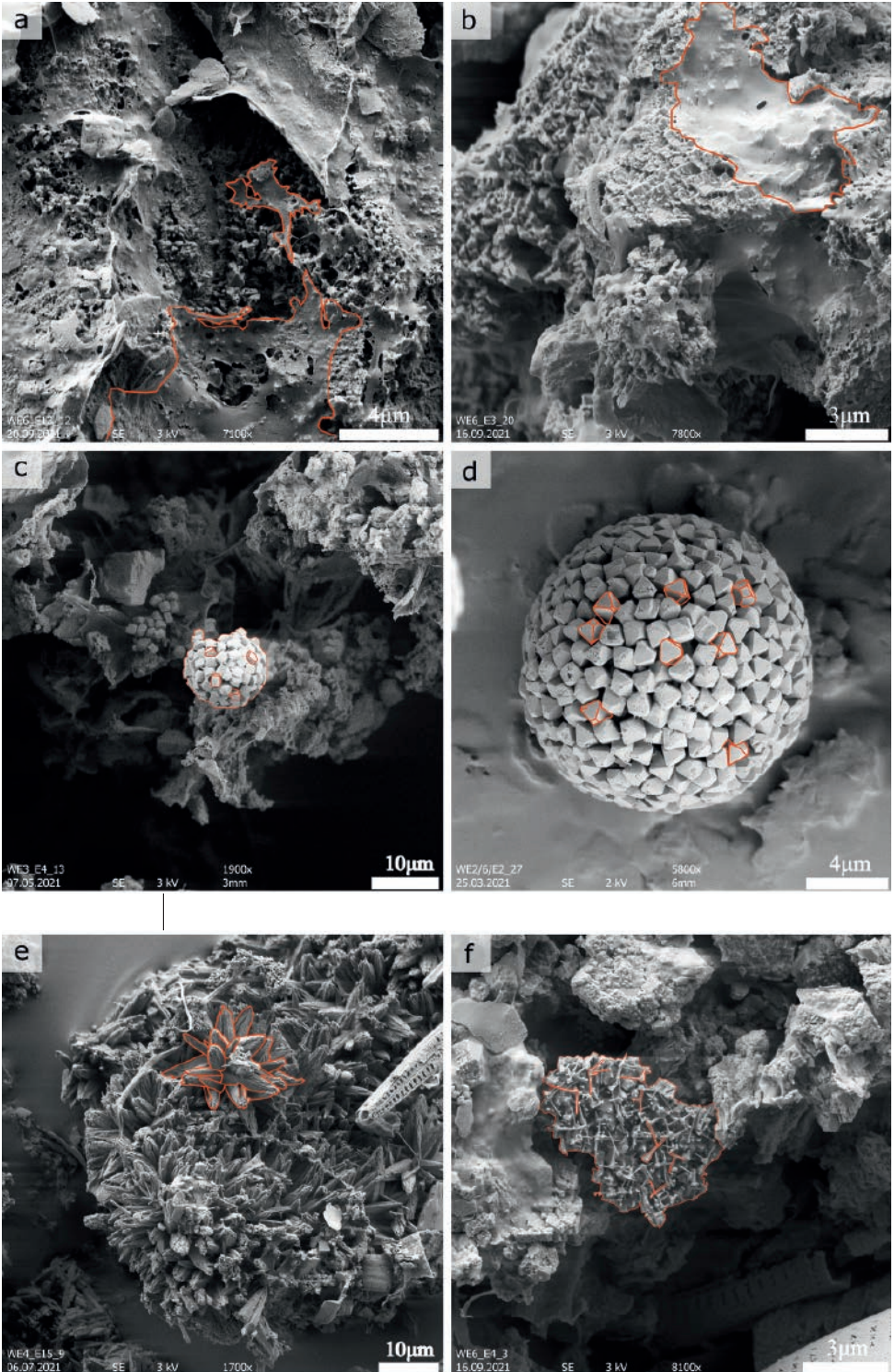
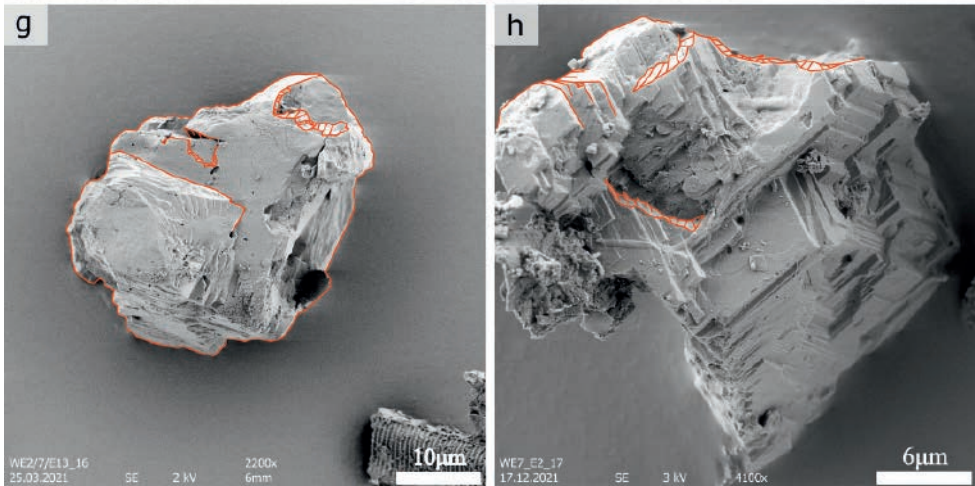


Abb. 6: REM Aufnahmen unterschiedlicher Calcit Wuchsformen. a: Nanokristalle mit regelmäßiger Anordnung; b: Nanokristalle mit regelmäßiger Anordnung zu einer annähernd rhomboedrischen Wuchsform; c: säulenförmiges Wachstum von Nanokristallen und Ausbildung glatter Kristallflächen; d: treppenförmige Anordnung der Nanokristalle; e: annähernd rhomboedrische Wuchsform zeigt hohe interkristalline Porosität; f: Calcit Rhomboeder mit gereiften, glatten Kristallflächen.





2021 scheinen diese Wuchsformen jedoch etwas größer zu sein. Im Ostteil ist eine Reifung des Calcits hin zu rhomboedrischen Formen mit teilweise glatten Kristallflächen im Dezember 2020, April, August und November 2021 zu beobachten. Im westlichen Teil des Weißensees scheint diese Form im Februar und Juni 2021 ausgeprägt zu sein. Aragonit, eine metastabile CaCO_3 Modifikation, wurde nur äußerst selten in den Proben gefunden (Abb. 7, e und f). Sehr kleine Aragonit Nadeln mit einer Kantenlänge von ungefähr $1 \mu\text{m}$ ließen sich an den Probenlokalitäten E2 im Dezember 2020 und E4 im August 2021 finden. Besonders sind deshalb die etwa $10 \mu\text{m}$ großen, sphärolithischen Aragonit Aggregate, die nur im Juni 2021 am Probenstandort E15 im Westteil des Sees beobachtet werden konnten.

Abgesehen von den Beobachtungen zu den Karbonatphasen Calcit und Aragonit wurde auch der Dolomit rasterelektronenmikroskopisch untersucht (Abb. 7, g, h). Der feinkörnige Dolomit im Sediment weist eine Größe von 4 bis $140 \mu\text{m}$ auf, wirkt kompakt mit nur wenigen nanometerkleinen Fensterporen und zeigt teilweise die für Dolomit typischen rhomboedrischen Spaltflächen. Angerundete Kanten sind jedoch auch sichtbar, die auf erosive Prozesse während eines fluviatilen Transports der Dolomitpartikel schließen lassen.

Diskussion

Die Gegenüberstellung der analysierten Langzeitdaten (1970–2021) des Weißensees mit den von Dezember 2020 bis November 2021 erfassten Daten zur Hydrologie, Wasserchemie und mineralogischen Sedimentzusammensetzung zeigen deutliche physikochemische Veränderungen, die auf den klimatischen Wandel im alpinen Raum zurückzuführen sind und Wasser- und Stoffkreisläufe, wie auch Wechselwirkungen zwischen Hydro- und Geosphäre beeinflussen.

Tabellarisch kann folgendes für die Langzeitdaten festgehalten werden:

- Da kein signifikanter Trend in den Aufzeichnungen des pH-Wertes von 1970 bis heute auftritt, kann eine Süßwasserversauerung derzeit nicht nachgewiesen werden.

Abb. 7: REM-Aufnahmen der Extrazellulären Polymeren Substanz (EPS) und weiterer Mineralphasen aus den Flachwassersedimenten des Weißensees. a und b: Hüllenartiges EPS umgibt den nano- bis mikrokristallinen Calcit; c und d: framboidaler Pyrit; e: sphärolithisches Aragonit Aggregat; f: nadeliger Aragonit; g und h: Dolomitklaster mit Anzeichen für erosiven Transport.

- Die Herbst- und Wintersaisonen sind seit Beginn der Aufzeichnungen deutlich wärmer geworden. Die Temperaturdifferenz zwischen Sommer und Winter nimmt ab.
- Der steigende Trend der Konzentration bestimmter gelöster Alkali- und Erdalkali Ionen ist vermutlich das Resultat eines erhöhten Verwitterungseintrages und könnte mit den beobachteten klimatischen Veränderungen verbunden sein, da die chemische Verwitterung stark von klimatischen Faktoren abhängt.

Anhand der hydrologischen und wasserchemischen Daten, die im Rahmen dieser Studie aufgenommen wurden, konnten außerdem folgende Besonderheiten ausgemacht werden:

- Im Februar ist ein Abfall der Konzentrationen fast aller gelösten Komponenten und der Sättigungsindizes bezüglich der vorgefundenen Karbonatminerale zu beobachten. Modellierungen legen nahe, dass der steuernde Prozess dieses Rückgangs eine Verdünnung darstellt. Die Ursache letzterer ist noch zu evaluieren.
- Der Anstieg des Mg/Ca Verhältnisses im Juni und August 2021 könnte darauf hinweisen, dass Aragonit als metastabile Phase aus dem Seewasser durch homogene Nukleation gebildet wird. Dadurch wird gelöstes Calcium im Karbonat gebunden, wohingegen relativ dazu Magnesium gelöst im Seewasser zurückbleibt und somit das Mg/Ca-Verhältnis ansteigen lässt. Die homogene Nukleation aus dem Seewasser könnte eine leichte Eintrübung des Wassers verursachen. Verschiedene Studien (z. B. PROCHING 2021) postulieren, dass die Trübung im Sommer im Westbecken etwas zugenommen hat, wobei die Ursache der Trübung bisher nicht bekannt ist. Ein direkter Zusammenhang mit der Schifffahrt konnte nicht belegt werden.

Aus den Untersuchungen der mineralogischen Sedimentzusammensetzung und den hydrogeochemischen Modellierungen lässt sich schließen, dass es sich beim Calcit um eine authigene Bildung im Beisein Extrazellulärer Polymerer Substanzen (EPS) handelt. EPS ist eine von Mikroorganismen abgegebene Substanz, bestehend aus verschiedenen Polysacchariden, Proteinen, Lipiden und Nukleinsäuren, die in Verbindung mit Wasser Hydrogele bilden können, wodurch eine stabile Matrix an der Sediment-Wasser-Grenzfläche entsteht (YIN et al. 2020). Diese Matrix begünstigt die initiale Bildung von nano- bis mikrokristallinem Calcit. Erste orientierende DNA-Untersuchungen der Sedimentorganik des Weißensees am Institut für Mikrobiologie der Karl-Franzens-Universität Graz ergaben, dass der Großteil der im Sediment vorhandenen aktiven DNA von Cyanobakterien stammt. Somit können die kalkhaltigen Sedimente des Weißensees als lakustrine Mikrobialite bezeichnet werden (DREMEL 2021), die saisonal um die Karbonatphasen Aragonit, als Bildung aus der Wassersäule, und Dolomit, als detritärer Eintrag aus der eingeschwemmten Suspensionsfracht, ergänzt werden. Das Auftreten der zuletzt genannten Mineralphase, Aragonit, als ebenfalls authigene Bildung, erfordert noch weitere Untersuchungen.

Ausblick

Um im weiteren Verlauf der Studie herauszufinden, zu welcher Jahreszeit die Calcit Bildung an der Sediment-Wasser Grenzfläche stattgefunden hat, kann auf dessen Sauerstoff-Isotopie zurückgegriffen werden. Strontium Isotope können zudem als Tracer für die im Februar beobachteten Verdünnungseffekte herangezogen werden, um so deren Ursache zu ermitteln.

Zu bedenken ist, dass die vorliegenden Daten an nur sechs Tagen in einem Zeitraum von etwa einem Jahr aufgenommen wurden. Um eine höhere Auflösung der monatlichen Schwankungen und der Saisonalität zu bekommen und mögliche Extreme zu erkennen, wäre es sinnvoll, zeitlich hochaufgelöste Untersuchungen mittels on-site Messsystemen und Daten-Logger durchzuführen.

Das Institut für Angewandte Geowissenschaften der TU Graz beschäftigt sich weiterhin mit den klimatischen und geogenen Einflüssen auf den Weißensee in Form von Qualifizierungsarbeiten. Im Dezember 2021 wurde diesbezüglich ein Daten-Logger zur Erfassung von in situ Parametern, wie Temperatur und pH, am See installiert.

LITERATURVERZEICHNIS

- CHMIELESKI J. (2006): Zwischen Niedermoor und Boden: Pedogenetische Untersuchungen und Klassifikation von mitteleuropäischen Mudden. – Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin, 2, 116 S.
- DREMEL J. (2021): Die Seekreidebänke des Weißensees (Kärnten) - Sedimentcharakteristik und potentielle Bildungsmechanismen, Bachelorarbeit, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Technische Universität Graz
- DUVERGER A., BERG J. S., BUSIGNY V., GUYOT F., BERNARD S. & MIOT J. (2020): Mechanisms of pyrite formation promoted by sulfate-reducing bacteria in pure culture. – *Frontiers in Earth Science*, Volume 8: 1–12.
- FABRY V. J., SEIBEL B. A., FEELY R. A. & ORR J. C. (2008): Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. – *ICES Journal of Marine Science*, 65 (3): 414–432.
- HASLER C. T., JEFFREY J. D., SCHNEIDER E. V. C., HANNAN K. D., TIX J. A. & SUSKI C. D. (2018): Biological consequences of weak acidification caused by elevated carbon dioxide in freshwater ecosystems. – *Hydrobiologia*, 806: 1–12.
- HAUSLEBER M. (2020): Die Entwässerungsdynamik von Quellen - „Fill-spill“-Hypothese, Bachelorarbeit, Institut für Erdwissenschaften, Universität Graz
- JARVIS A., REUTER H. I., NELSON A. & GUEVARA E. (2008): Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT) - available from <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- MUNIZ I. P. (1990): Freshwater acidification: its effects on species and communities of freshwater microbes, plants and animals. – *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, Section B: Biological Sciences* 97: 227–254.
- ORR J. C., FABRY V. J., AUMONT O., BOPP L., DONEY S. C., FEELY R. A., GNANADESIKAN A., GRUBER N., ISHIDA A., JOOS F., KEY R. M., LINDSAY K., MAIER-REIMER E., MATEAR R., MONFRAY P., MOUCHET A., NAJJAR R. G., PLATTNER G.-K., RODGERS K. B., SABINE C. L., SARMIENTO J. L., SCHLITZER R., SLATER R. D., TOTTERDELL I. J., WEIRIG M.-F., YAMANAKA Y. & YOOL A. (2005): Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. – *Nature*, 437: 681–686.
- PARKHURST D. L. & APPELO C. A. J. (2013): Description of input and examples for PHREEQC version 3—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. – *U.S. Geological Survey Techniques and Methods*, book 6, chap. A43, 497 p., <https://doi.org/10.3133/tm6A43>

- PROCHING U. (2021): Veränderung der Wasserpflanzenbestände im Weißensee (Kärnten). Ein Vergleich der Erhebungen von 2003 mit den Erhebungen von 2016–2018. – *Carinthia II*, 211./131.: 135–148.
- SABINE C. L., FEELY R. A., GRUBER N., KEY R. M., LEE K., BULLISTER J. L., WANNINKHOF R., WONG C. S., WALLACE D. W. R., TILBROOK B., MILLERO F. J., PENG T. H., KOZYR A., ONO T. & RIOS A. F. (2004): The oceanic sink for anthropogenic CO₂. – *Science*, 305: 367–371.
- SCHULZ L., RAUTER A., FRESNER R., AMBROS M., MILDNER J., REICHMANN M., SANTNER G., HONSIG-ERLENBURG W., PETUTSCHNIG J., WEISSEL G. & HUMMITZSCH B. (2007): Der Weißensee Kärnten Österreich - Limnologische Langzeitentwicklung 1972 - 2003. – Publikationen des Kärntner Instituts für Seenforschung: 5–6.
- WEISS L. C., PÖTTER L., STEIGER A., KRUPPERT S., FROST U. & TOLLRIAN R. (2018): Rising pCO₂ in freshwater ecosystems has the potential to negatively affect predator-induced defenses in *Daphnia*. – *Current Biology*, 28: 327–332.
- YIN X., WEITZEL F., Jimenez-Lopez C., Griesshaber E., Fernandez-Diaz L., Rodriguez-Navarro A., ZIEGLER A. & SCHMAHL W. W. (2020): Directing Effect of Bacterial Extracellular Polymeric Substances (EPS) on Calcite Organization and EPS–Carbonate Composite Aggregate. – *Crystal Growth & Design*, 20(3): 1467–1484.

Weblinks

ZAMG - SONNBLICK OBSERVATORIUM (16.01.2022): Zeitreihen - CO₂ und CH₄ Messung: <https://www.sonnblick.net/de/daten/zeitreihen/messung-co2/>

Dank

Unser Dank gilt dem Naturwissenschaftlichen Verein für Kärnten für die finanzielle Unterstützung und J. Schlamberger für das Korrekturlesen sowie A. Kleewein für die redaktionelle Arbeit. Ein großes Dankeschön gebührt M. Müller, H. Stanitzer und B. Jank für die Unterstützung bei den Geländearbeiten vor Ort sowie C. Strasser (weissenseefoto.at) für die sehr gelungenen Aufnahmen vom Weißensee. Danke auch an M. Friedl und das Kärntner Institut für Seenforschung für die Bereitstellung der Daten-Zeitreihen sowie an die Österreichischen Bundesforste für die Erlaubnis das Seegrundstück zu beproben. Weiters bedanken wir uns für die Unterstützung bei (alphabetisch gereiht nach Institut): G. Auer, K. Ettinger, M. Hausleber, T. Wagner und G. Winkler vom Institut für Erdwissenschaften und G. Koraimann vom Institut für Mikrobiologie an der Karl-Franzens-Universität Graz sowie bei A. Baldermann, J.-M. Brazier, T.E. Eder, S. Eichinger, K. Götschl, M. Hierz, J. Jernej, S. Perchthold, M. Wedenig und A. Wolf vom Institut für Angewandte Geowissenschaften an der TU Graz. Ein herzliches Dankeschön gilt auch J. Dremel für die Mitarbeit an diesem Projekt.

Anschriften der Autor*innen

Lucia Miese bner,
BSc, Institut für
Angewandte
Geowissenschaften,
Rechbauerstraße 12,
8010 Graz
E-Mail: lucia.
miese bner@student.
tugraz.at

Univ.-Prof. Dipl.-Min.
Dr. rer. nat. habil.
Martin Dietzel,
Institut für Ange-
wandte Geowissen-
schaften, Rech-
bauerstraße 12,
8010 Graz
E-Mail: martin.
dietzel@tugraz.at

Assoc. Prof. Dipl.-
Geol. Dr. phil.-nat.
Dorothee Hippler,
Institut für Ange-
wandte Geowissen-
schaften,
Rechbauerstraße 12,
8010 Graz
E-Mail: dorothee.
hippler@tugraz.at

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Carinthia II](#)

Jahr/Year: 2022

Band/Volume: [212_132_2](#)

Autor(en)/Author(s): Mieseбner Lucia, Dietzel Martin, Hippler Dorothee

Artikel/Article: [Der Weißensee im Wandel der Zeit - Eine Sediment-hydrogeochemische Analyse 143-156](#)