

Untersuchung konduktiver Wärmestromdichten in den Felswänden der Schel- lenberger Eishöhle im Jahresverlauf vom 16.05.2022 bis zum 16.05.2023

Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Geowissenschaften
Geographisches Institut
Klimatologie extremer Standorte

Erstellt im Rahmen der Forschungswerkstatt von:

Andreas Dreker, B.A.
Prof. Dr. Andreas Pflitsch



Abstract (EN)

The present study deals with the thermophysical properties and heat flow dynamics in the Schellenberg Ice Cave over the period of one year from May 16, 2022, to May 16, 2023. The analysis focuses on the determination of heat flux densities and their directions in the rock walls at three sampled locations of the ice cave and their relationship to the altitude of air. The results primarily show a conductive heat flow from the rock walls towards the cave air, with the highest heat flux densities being detected in the layers of the rock near the surface. Furthermore, based on the entire data analyses of the study period, permafrost was not detected in the rock faces to a depth of 100 cm at any of the sites. Hypothesis I, which assumed a conductive heat flow from the rock faces to the cave air during the winter period, was confirmed at all measurement sites. Hypothesis II assumed an opposite effect in the form of a heat flow from the cave air to the rock walls during the summer period. However, this could only be proven in two of a total of 36 cases, so that the hypothesis turned out to be false. Hypothesis III, which looked at differences in heat flux densities between different locations, was again confirmed, as the results differed significantly between the respective locations. The highest average heat flux densities from the rock towards the cave air were calculated in the Fuggerhalle. Among other things, this can be attributed to the morphologically deeper location of the measuring point and the higher temperature differences between the surrounding rock and air. Furthermore, the results of the study show that the heat flow densities and their directions depend on the seasonality, the morphological properties and the investigated layer thicknesses. In summary, the findings contribute to a more profound understanding of thermophysical dynamics in ice caves, form the basis for future research and imply the detection of climate change-induced changes in a part of the cryosphere.

Abstract (DE)

Die vorliegende Untersuchung befasst sich mit den thermophysikalischen Eigenschaften und Wärmeflussdynamiken in der Schellenberger Eishöhle über den Zeitraum eines Jahres vom 16. Mai 2022 bis zum 16. Mai 2023. Dabei konzentriert sich die Arbeit auf die Ermittlung von Wärmestromdichten sowie deren Richtungen in den Felswänden an drei beprobten Standorten der Eishöhle und deren Beziehung zur Höhenluft. Primär zeigen die Ergebnisse einen konduktiven Wärmefluss von den Felswänden in Richtung Höhlenluft, wobei die höchsten Wärmestromdichten in den oberflächennahen Schichten des Gesteins nachgewiesen werden konnten. Überdies wurde basierend auf den gesamten Datenanalysen des Untersuchungszeitraums an keinem der Standorte Permafrost in den Felswänden bis in eine Tiefe von 100 cm festgestellt. Hypothese I, die einen konduktiven Wärmefluss von den Felswänden zur Höhlenluft in der Winterperiode annahm, wurde an allen Messstandorten bestätigt. Hypothese II nahm einen gegenteiligen Effekt in Form eines Wärmeflusses von der Höhlenluft zu den Felswänden während der Sommerperiode an. Dies konnte jedoch lediglich in zwei von insgesamt 36 Fällen nachgewiesen werden, sodass sich die Hypothese als falsch erwies. Hypothese III, die Unterschiede in den Wärmestromdichten zwischen verschiedenen Standorten betrachtete, konnte wiederum bestätigt werden, indem sich die Ergebnisse zwischen den jeweiligen Standorten deutlich voneinander unterschieden. Die höchsten gemittelten Wärmestromdichten aus dem Fels in Richtung Höhlenluft konnten hierzu in der Fuggerhalle berechnet werden. Dies kann unter anderem auf die morphologisch tiefere Lage des Messpunkts und durch höhere Temperaturunterschiede zwischen Umgebungsfels und Luft zurückgeführt werden. Somit verdeutlichen die Ergebnisse der Untersuchung, dass die Wärmestromdichten sowie ihre Richtungen sowohl von der Saisonalität, den morphologischen Eigenschaften als auch den untersuchten Schichtdicken abhängen. Zusammengefasst tragen die Erkenntnisse zum tieferen Verständnis von thermophysikalischen Dynamiken in Eishöhlen bei, bilden Grundlagen für zukünftige Forschungsarbeiten und implizieren die Erfassung von klimawandelbedingten Veränderungen eines Teilbereichs der Kryosphäre.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Forschungsstandort und Methodik.....	3
2.1 Untersberg und Schellenberger Eishöhle	3
2.2 Morphologische und klimatologische Eigenschaften der Schellenberger Eishöhle.....	6
2.3 Datenaufnahme	8
2.4 Thermophysikalische Grundlagen.....	9
2.5 Statistik und Modellierung	13
3. Ergebnisse.....	14
3.1. Jahresverlauf der Temperaturdaten am Messstandort der Angermayerhalle	14
3.2 Jahresverlauf der Temperaturdaten am Messstandort der Wasserstelle.....	16
3.3 Jahresverlauf der Temperaturdaten am Messstandort der Fuggerhalle	17
3.5 Monatlich mittlere Wärmestromdichten sowie deren Richtungen an den jeweiligen Messstandorten	18
3.5.1 Monatlich mittlere Wärmestromdichten sowie deren Richtungen an den Messpunkten der Angermayerhalle	18
3.5.2 Monatlich mittlere Wärmestromdichten sowie deren Richtungen an den Messpunkten der Wasserstelle.....	21
3.5.3 Monatlich mittlere Wärmestromdichten sowie deren Richtungen an den Messpunkten der Fuggerhalle.....	23
4. Diskussion.....	25
5. Schlussfolgerungen	31
Quellenverzeichnis.....	32

Abbildungsverzeichnis:

Abb. 1: Grundriss- (A) und Seitenansichtsplan (B) der Schellenberger Eishöhle mitsamt eingezeichneter Lage der Messstandorte für die Aufnahme von Luft- sowie Felstiefentemperaturen im unteren Teil der Angermayerhalle, der Wasserstelle und in der Fuggerhalle (verändert nach Meyer et al. 2016).....	5
Abb. 2: Schematische Luftzirkulation in statischen Eishöhlen während der Winterperiode A) und der Sommerperiode B) (Perşoiu 2018).....	6
Abb. 3: Wintersituation der Luftbewegungen in der Schellenberger Eishöhle (verändert nach Meyer et al. 2014).....	7
Abb. 4: Schematische Darstellung der Datenaufnahme an den Messstandorten in der Schellenberger Eishöhle.....	8
Abb. 5: Fotoaufnahmen von den in der Schellenberger Eishöhle ausgebrachten Pt1000 Temperatursensoren mitsamt der Datenlogger an den Messstellen der a) Wasserstelle und b) Fuggerhalle.....	9
Abb. 6: Schematische Darstellung der Wärmeleitung durch Konduktion (nach Pfiffner et al 2016; Herwig & Moschallski 2019; Stober & Bucher 2020).....	10
Abb.7: Luft- und Felstiefentemperaturdaten [°C] der Messpunkte Angermayerhalle Unten im Jahresverlauf der Zeitzone UTC+1 vom 16.05.2022 bis zum 16.05.2023.....	14
Abb. 8: Luft- und Felstiefentemperaturen [°C] der Messpunkte Wasserstelle im Jahresverlauf vom 16.05.2022 bis zum 16.05.2023.....	16
Abb. 9: Luft und Felstiefentemperaturen [°C] der Messpunkte Fuggerhalle im Jahresverlauf vom 16.05.2022 bis zum 16.05.2023.....	17
Abb. 10: Monatlich mittlere Wärmestromdichten sowie deren Richtungen an den Messpunkten der Angermayerhalle.....	20
Abb. 11: Monatlich mittlere Wärmestromdichten sowie deren Richtungen an den Messpunkten der Wasserstelle.....	22
Abb. 12: Monatlich mittlere Wärmestromdichten sowie deren Richtungen an den Messpunkten der Fuggerhalle.....	24

Tabellenverzeichnis:

Tab. 1: Deskriptive Statistik des Jahresverlaufs der Temperaturdaten am Messstandort der Angermayerhalle Unten.....	15
Tab. 2: Deskriptive Statistik des Jahresverlaufs an der Messstelle der Wasserstelle.....	16
Tab. 3: Deskriptive Statistik des Jahresverlaufs des Messpunkts der Fuggerhalle.....	18

QR-Code Verzeichnis:

QR-Code 1: Interaktive 3D Ansicht der Lage der Schellenberger Eishöhle im Untersberg inklusive einer in rot gefärbten Einzeichnung des herführenden Wanderwegs (Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung 2024).....	4
QR-Code 2: Interaktiver 360° VR-Rundgang durch die Schellenberger Eishöhle (Verein für Höhlenkunde Schellenberg e. V. 2024).....	4

1. Einleitung

Ganzjährige Eis- und Schneeakkumulationen in Felshohlräumen. Mehr notwendige Bedingungen braucht es definitionsgemäß nicht, um Naturerscheinungen zum Terminus einer Eishöhle zuordnen zu können (Filipponi 2004; Perşoiu & Lauritzen 2018). Doch so simpel dies auf den ersten Blick auch erscheinen mag, gelten Eishöhlen als der am wenigsten erforschte Teil der Kryosphäre, dem eisumfassendem Subsystem des globalen Klimasystems (Kuttler 2013; Perşoiu & Lauritzen 2018). Überdies stellen Eishöhlen ein global auftretendes Phänomen dar, weshalb diese als Bestandteil der Kryosphäre ebenfalls der allgegenwärtigen Veränderung durch den globalen Klimawandel unterliegen (Mavlyudov 2018; IPCC 2019).

Da die Temperaturen in Höhlen zwar, wie ein Tiefpassfilter, mit Zeitverzögerung reagieren, im Wesentlichen jedoch eng mit dem Außenklima verbunden sind, beeinflusst ein Temperaturanstieg der Außenluft somit auch das Klima von Höhlen (Badino 2004). Hierdurch steigt mit der globalen Erwärmung auch das permanente Risiko des Abschmelzens für Eishöhlen, wodurch der unverzügliche Forschungsbedarf in besonderer Art und Weise hervorgehoben wird (Perşoiu 2018).

Aufgrund des besonders hohen Einflusses des Klimawandels auf den Alpenraum richtet sich der Fokus dieser Arbeit auf die Schellenberger Eishöhle im Untersberg der Berchtesgadener Alpen (Haeberli & Beniston 1998; Verein für Höhlenkunde Schellenberg e. V. 2001). Die größte Eisschauhöhle Deutschlands kann dabei auf eine bis ins 19. Jahrhundert zurückreichende Forschungsgeschichte zurückblicken, wobei besonders detaillierte Untersuchungen zum Höhlenklima und Eisstandmessungen seit 2007 durchgeführt werden (Verein für Höhlenkunde Schellenberg e. V. 2001; Grebe et al. 2008; Ringeis et al. 2008; Meyer et al. 2016; Pflitsch 2019; Pflitsch 2020).

Innerhalb dieser Untersuchungen konnte durch Pflitsch (2019) festgestellt werden, dass in den vergangenen Jahren zwischen dem Umgebungsfels der Höhle und dem Eis eine Lücke entstand. Dies kann neben der Eisschmelze durch den Kontakt mit warmen Luftmassen und Schmelzwasser zu einer weiteren, inneren Wärmequelle durch fehlenden Permafrost in den Felswänden der Schellenberger Eishöhle hindeuten.

Auch Filipponi (2004) führt das Vorhandensein einer solchen Wärmequelle auf, beschreibt diese Wärmeströme weiterführend jedoch als nicht messbar. Bezierend auf diese Problematiken setzt die Aufgabe dieser Untersuchung mitsamt der grundlegenden Fragestellung an, ob wiederholt fehlender Permafrost im Fels bis in 100 cm Tiefe nachzuweisen ist und inwiefern über mögliche Temperaturdifferenzen Wärmeströme innerhalb des Felsens sowie zwischen Fels und Höhlenluft berechnet werden können. Räumlich und zeitlich werden dabei drei

verschiedene Messstandorte mit Temperatursensoren an der Luft sowie in verschiedenen Felstiefen hinsichtlich eines Jahresverlaufs vom 16.05.2022 bis zum 16.05.2023 untersucht. Hierauf basierend ergaben sich im Vorfeld der Arbeit folgende Untersuchungsthemen, welche der Analyse neben der grundlegenden Fragestellung als Leitfaden dienen sollen:

- I. In allen Monaten der Winterperiode (November bis April) bewegt sich ein gemittelter konduktiver Wärmestrom an allen Messstandorten durch signifikante Temperaturunterschiede aus den Felswänden in Richtung Höhlenluft.**
- II. In allen Monaten der Sommerperiode (Mai bis Oktober) bewegt sich ein gemittelter konduktiver Wärmestrom an allen drei Messstandorten von der Höhlenluft in Richtung der Felswände.**
- III. Aufgrund der morphologisch tieferen Lage innerhalb der Höhle lassen sich am Messstandort der Fuggerhalle durch höhere Temperaturdifferenzen zwischen Felstiefen und Luft auch höhere Wärmestromdichten als an den näher zum Eingang gelegenen Messstellen der Wasserstelle und der Angermayerhalle beobachten.**

Auf Grundlage der Untersuchungsfrage sowie der aufgestellten Hypothesen wird die Analyse mit einer fundamentalen Methodik, eines darstellenden Ergebnisteils, eines interpretierenden Diskussionsteils und einer abschließenden Schlussfolgerung strukturiert:

Der Methodikteil übernimmt dabei die Funktion zur Schaffung eines Überblicks in den Forschungsstandort, die Verortung der ausgewählten Messpunkte, eine detaillierte Darstellung zur Datenaufnahme sowie die Herstellung einer fragestellungselektiven, fachlichen Basis in höhlenklimatologische- als auch in notwendige thermophysikalische Grundlagen. Ferner wird in die Vorgehensweise der verwendeten Auswertungs- und Modellierungssoftware eingeführt, sodass im Ergebnisteil die generierten Datendarstellungen in Form von Abbildungen und Tabellen eine hinreichende Interpretationsgrundlage für den Diskussionsteil und die Schlussfolgerung der Untersuchung darstellen. In diesem Zug werden auch die aufgestellten Hypothesen veri- oder falsifiziert, sodass abschließend eine differenzierte Beantwortung der aufgestellten Untersuchungsfrage als Ergebnis der Arbeit präsentiert werden kann.

In Gesamtheit reiht sich diese Arbeit somit in die 2007 begonnene Forschungsserie zur Höhlenklimatologie der Schellenberger Eishöhle ein und soll dabei einen neuen Aspekt eines Einflusses von Felswärmeströmen auf das Höhlenklima betrachten und eine grundlegende Vorlage für weitere Untersuchungen dieses Themenfelds öffnen.

2. Forschungsstandort und Methodik

2.1 Untersberg und Schellenberger Eishöhle

Das Kalkgebirgsmassiv des Untersbergs liegt zwischen Salzburg, Bad Reichenhall, Berchtesgaden sowie Marktschellenberg und erreicht im Nordwesten, mit dem Berchtesgadener Hochthron, die höchste Stelle mit 1972 m über NN. Die Hochfläche des Massivs ist dabei großteils von Latschenfeldern bedeckt und weist zudem karstgebietstypische Merkmale wie Karrenfelder, Dolinen, Mulden, als auch Trichter auf. Dies ist auf eine etwa 500 m mächtige Schicht aus Dachsteinkalk des Obertrias zurückzuführen, welche von weiteren Schichten aus Dachsteindolomit, tonig-mergeligen Reibler-Schichten sowie Ramsaudolomit, einem eher harten und brüchigem Gestein unterlagert wird (Verein für Höhlenkunde Schellenberg e. V. 2001; Bayerisches Landesamt für Umwelt 2020). Unter Hinzunahme der Geologischen Karte Nr. 8244 Berchtesgaden Nord lässt sich die Schellenberger Eishöhle ebenfalls dem Dachsteinkalk und -dolomit der Nördlichen Kalkalpen zuordnen (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2023). Dies ist für den weiteren Verlauf der Arbeit von Relevanz, da keine eigenen thermophysikalischen Laboruntersuchungen durchgeführt werden konnten und demnach auf Literaturwerte für die Berechnung und Modellierung von Wärmeströmen in den Felswänden zurückgegriffen werden musste.

Indem durch Kalk, als Sedimentgestein aus Meeresablagerungen, auf eine ehemals horizontale Aufsichtung geschlossen werden kann, erfolgte durch tektonische Prozesse eine Auffaltung der Alpen, sodass das Massiv des Untersbergs einseitig gehoben wurde und die Schichtung heute mit ca. 60° in Richtung NNW verläuft. Hierdurch entstanden Klüfte und Brüche, was im Zusammenwirken mit der kalksteinspezifischen Kohlensäureverwitterung ideale Bedingungen zur Ausbildung von Karsthöhlen schafft. (Verein für Höhlenkunde Schellenberg e. V. 2001; Dikau et al. 2019; Zepp et al. 2024). So bildeten sich über geologische Zeiträume umfassende Höhlensysteme im Untersberg aus, zu denen auch die Schellenberger Eishöhle gehört. Politisch befindet sich diese im Schellenberger Forst des Landkreises Berchtesgadener in Bayern, stellt mit einer Gesamtlänge von 3621 m sowie Gesamttiefe von circa 260 m die größte erschlossene Eisschauhöhle Deutschlands dar und kann per Grundriss- und Seitenansichtsplan der Abb. 1 sowie des QR-Codes 1 mittels interaktiver Karte eingesehen und verortet werden (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2020; Verein für Höhlenkunde Schellenberg e. V. 2001).

Der Zugang zur Eishöhle liegt dabei auf 1570 m über NN am Fuß der Nordostwände des Untersbergs und ist per Wanderweg über die Toni-Lenz-Hütte erreichbar (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2020; Verein für Höhlenkunde Schellenberg e. V. 2001). Für einen umfassenden

Einblick in den eisführenden Teil der Höhle kann der QR-Code 2 genutzt werden, welcher einen interaktiven 360° Rundgang des Vereins für Höhlenkunde Schellenberg e. V. enthält.



QR-Code 2: Interaktive 3D Ansicht der Lage der Schellenberger Eishöhle im Untersberg inklusive einer in rot gefärbten Einzeichnung des herführenden Wanderwegs (Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung 2024).



QR-Code 2: Interaktiver 360° VR-Rundgang durch die Schellenberger Eishöhle (Verein für Höhlenkunde Schellenberg e.V. 2024).

Im Gegensatz zu Bezeichnungen wie Lavahöhlen, Karsthöhlen und tektonischen Höhlen etc. enthält die Begrifflichkeit der Eishöhlen keine Angabe über die Entstehungsgeschichte, sondern lediglich über den Inhalt der Hohlräume (Filipponi 2004). Angesichts dessen ist es an dieser Stelle notwendig, den Forschungsort der Schellenberger Eishöhle als den lediglich Schnee und Eis enthaltenen Teil des gesamten Schellenberger Karsthöhlensystems auszuweisen (Roter Rahmen in Abb. 1).

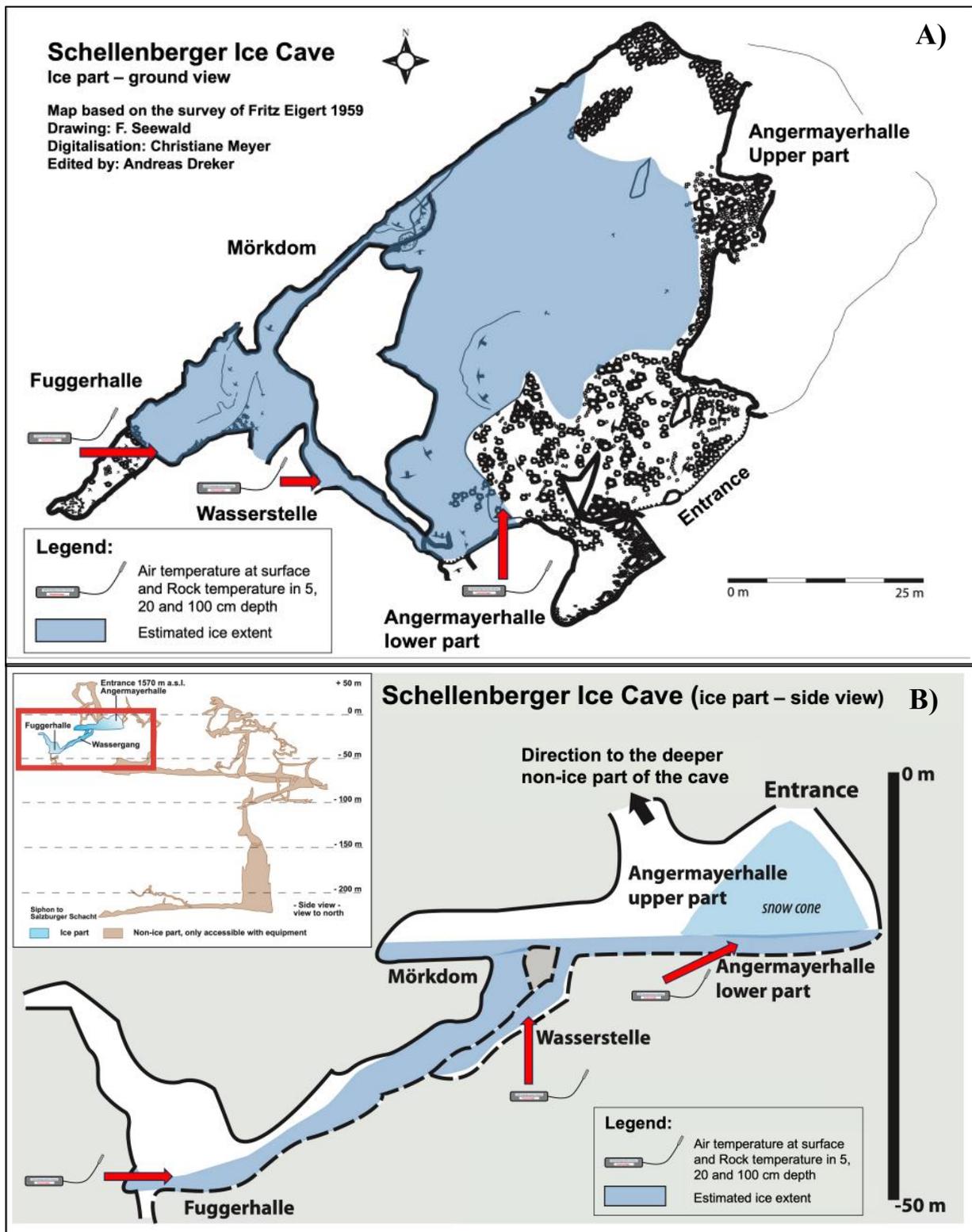


Abb. 2: Grundriss- (A) und Seitenansichtsplan (B) der Schellenberger Eishöhle mitsamt eingezeichneter Lage der Messstandorte für die Aufnahme von Luft- sowie Felstiefentemperaturen im unteren Teil der Angermayerhalle, der Wasserstelle und in der Fuggerhalle. Die Felstiefentemperaturen an den Messstandorten werden dabei jeweils in 5 cm, 20 cm und 100 cm Tiefe gemessen und wie die Lufttemperaturen mittels GeoPrecision Datenlogger aufgezeichnet. Die in B) implementierte Abbildung zeigt mithilfe der roten Umrandung die Verortung des für die Untersuchung relevanten schnee- und eisführenden Teils des gesamten Höhlensystems mit Blick in Richtung Norden im Gebirgsmassiv des Untersbergs. Dieser Teil weist dabei insgesamt eine Höhendifferenz von ca. 50 m auf, bei welcher sich die Messpunkte der Angermayerhalle und der Fuggerhalle etwa 30 m in der Höhe voneinander unterscheiden. (verändert nach Meyer et al. 2016).

2.2 Morphologische und klimatologische Eigenschaften der Schellenberger Eishöhle

Indem sich der Großteil aller Eishöhlen in Regionen mit einer mittleren Jahrestemperatur von $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ befindet, stellt die besondere Höhlenmorphologie die entscheidende Bedingung für die Höhlenklimatologie dar, die zur Entstehung, Ansammlung sowie Dynamik von Eis in Höhlen vonnöten ist (Perşoiu 2018). Dies trifft auch auf die Schellenberger Eishöhle zu. Auch wenn keine Datenaufnahme von Außentemperaturen in unmittelbarer Nähe zur Höhle für die Untersuchung zur Verfügung standen, können Temperaturdaten des ca. 9 km Luftlinie entfernten Aufzeichnungsstandort des Deutschen Wetterdiensts (DWD) Berchtesgaden KKST auf 550 m ü. NN herangezogen und aufgrund des Höhenunterschieds zwischen Klimastation und Eishöhle (1572 m) mithilfe des hypsometrischen Temperaturgradienten ($0,65\text{ K}/100\text{ m}$) nach Kuttler (2013) korrigiert werden (DWD 2024 a). Hierdurch ergibt sich bei einer Höhendifferenz von 1020 m ein Korrekturfaktor von 6,63 K, wodurch sich auf eine Jahresmitteltemperatur außerhalb der Schellenberger Eishöhle von $\approx 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ schließen lässt. Wenngleich es sich aufgrund dieser Methode lediglich um einen interpolierten Wert und somit um eine Annäherung handelt, kann mit großer Sicherheit auf eine Jahresmitteltemperatur am Untersuchungsstandort von $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ geschlossen werden, sodass gemäß Perşoiu (2018) die besondere Morphologie der Höhle für die Eisbildung ausschlaggebend sein muss. Für die notwendige Unterkühlung in den Wintermonaten sowie des Haltens von negativen Temperaturen während des Sommers lassen sich Eishöhlen dynamische sowie statisch bewetterte Systeme differenzieren (Verein für Höhlenkunde Schellenberg e. V. 2001; Perşoiu 2018). Durch das Vorhandensein eines Einzigen, im Verhältnis zum Höhlenvolumen, großen Eingangs im oberen Teil der Angermayerhalle und der sich hauptsächlich vertikalen Erstreckung von etwa 50 m zeigt die Schellenberger Eishöhle morphologisch typische Merkmale einer statischen Eishöhle (Abb. 2) auf.

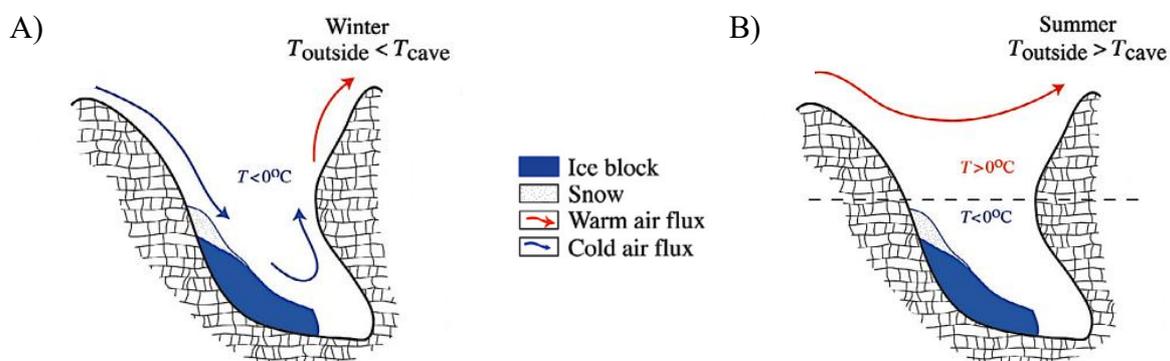


Abb. 2: Schematische Luftzirkulation in statischen Eishöhlen während der Winterperiode A) und der Sommerperiode B). Während der Winterperiode dringt die kalte Außenluft aufgrund der höheren Dichte bis an die tiefste Stelle der Höhle ein und verdrängt die wärmere Luft in Richtung Ausgang nach oben. Im Sommer verbleibt die kalte Luft in der Höhle, sodass die wärmere Außenluft durch die geringere Dichte über die kalten Luftpakete hinweg zieht (Perşoiu 2018).

Dies führt dazu, dass auch in der Schellenberger Eishöhle kalte Luftmassen während der Winterperiode von außen ins Innere der Höhle strömen, sich dort wie ein Kaltluftsee akkumulieren und der gleiche Dichteunterschied ein Eindringen von warmen Luftmassen verhindert (Perşoiu & Pazdur 2011; Bendix 2004). Auf den Jahresverlauf betrachtet, weist die Schellenberger Eishöhle drei Phasen des Luftaustauschs auf. Neben der in Abb. 3 aufgezeigten Wintersituation der Schellenberger Eishöhle, lässt sich nach Meyer et al. (2014) ebenfalls eine Sommersituation von Luftbewegungen, sowie mit den Monaten April und November jeweils Übergangszeiten zwischen den Extremen erkennen, welche für die Auswertung der Messdaten mit Bezug auf die Forschungsfrage ebenfalls berücksichtigt werden.

In der ab Mai beginnenden Sommerperiode ist der Luftaustausch stark eingeschränkt, da die vorhandene kalte Luft innerhalb der Höhle eine Inversion bildet und die wärmere Außenluft somit schlecht eindringen kann (Meyer et al. 2014; Abb. 2). Ganzjährig betrachtet kühlen sich demnach statische Eishöhle während der Winterperiode ab, halten die Temperaturen im Sommer und stehen somit als eine Art System im Gleichgewicht.

Indem durch Pflitsch (2019; 2020) jedoch eine vermehrte Eisschmelze innerhalb der Schellenberger Eishöhle festgestellt werden konnte, müssen somit weitere Faktoren für eine Erwärmung der inneren Luftmassen von statischen Eishöhlen in Betracht gezogen werden. Grundsätzlich

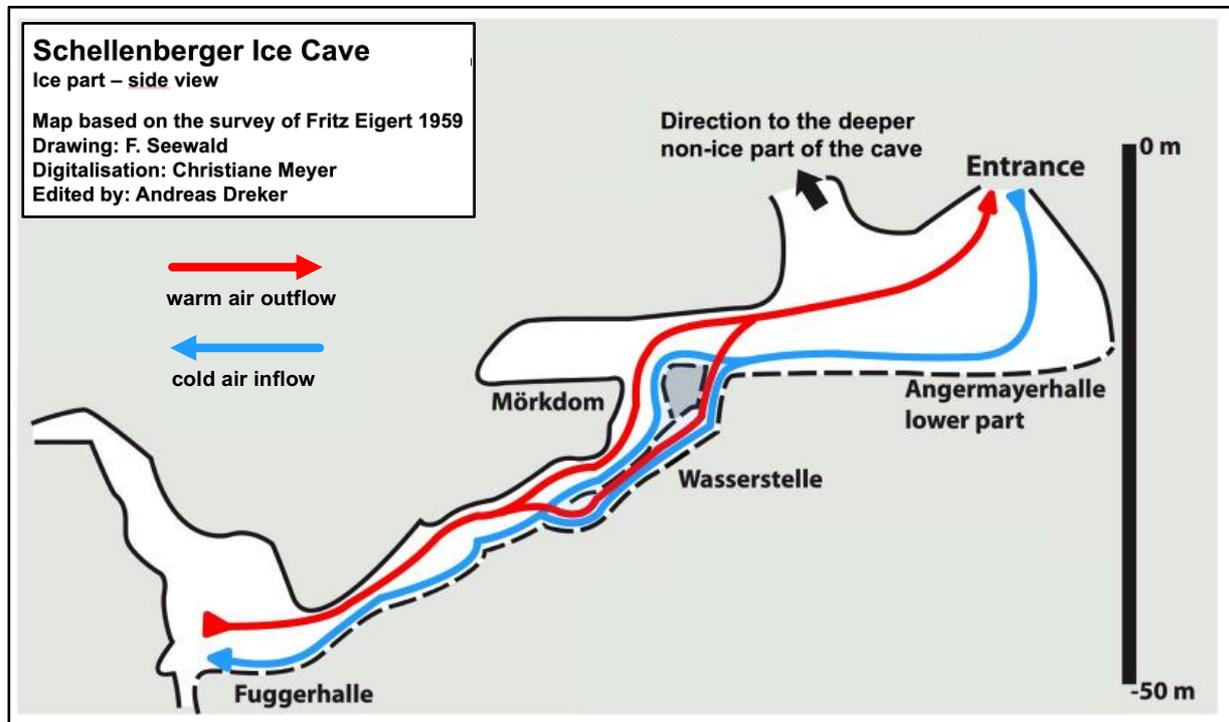


Abb. 3: Wintersituation der Luftbewegungen in der Schellenberger Eishöhle. Die kalte und dichte Außenluft unter 0 °C strömt während der Wintersituation (Dezember bis März) durch das Eingangsportal und teilt sich weiterführend in der Angermayerhalle zu zwei Strömen auf. Diese verlaufen separiert durch die Höhlenteile des Mörkdoms sowie der Wasserstelle, um sich an einer anschließenden Kreuzung der Gänge wiederzuvereinigen und gemeinsam die Fuggerhalle als tiefsten Punkt der Höhle erreichen. Diese einströmende, kältere Luft ersetzt die bereits vorhandene, wärmere Luft, sodass diese entlang der Höhlendecke über die Zugänge des Mörkdoms sowie der Wasserstelle in Richtung Angermayerhalle bis zum Eingang hinausströmt (verändert nach Meyer et al. 2014).

zählen hierzu die bei Phasenwechsel von Wasser absorbierte und freigesetzte latente Wärme, das bloße Vorhandensein von Eismassen als auch Wärmeströme der Felswände (Perşoiu 2018). Da der Eisrückgang besonders in der Nähe den Felswänden zu verzeichnen ist, wird mit Bezug auf die Forschungsfrage weiterführend die Richtung sowie der Betrag der Wärmeleitung im Felsen der Messpunkte Angermayerhalle, Wasserstelle und Fuggerhalle mit Berücksichtigung von Winter-, Sommer- und Übergangssituation untersucht. Hieran anschließend setzt das folgende Unterkapitel an, indem die Datenaufnahme in der Schellenberger Eishöhle über den Messzeitraum detailliert vorgestellt wird.

2.3 Datenaufnahme

Die Datenaufnahme erfolgt per M-Log5W Datenlogger mitsamt der zugehörigen Pt1000 Temperatursensoren des Herstellers GeoPrecision. Diese sind in besonderem Maße für eine Datenaufnahme an extremen Standorten wie Eishöhlen geeignet, da diese batteriebetrieben werden, die Daten kabellos via Dongle und 433 MHz Frequenz auslesbar sind und die Schutzart IP67 erreicht wird. IP67 gibt an, dass die Geräte vollständig gegen ein Eindringen von Staub geschützt sind und zudem einen Schutz gegen Wasser beim Eintauchen des Betriebsmittels unter Druck- und Zeitbedingungen aufweisen (GeoPrecision o.J.; Bartenschlager et al. 2008).

Hierzu kann ein detaillierter Überblick zum Betrieb der Sensorik an und in den Felswänden der Abb. 4 entnommen werden.

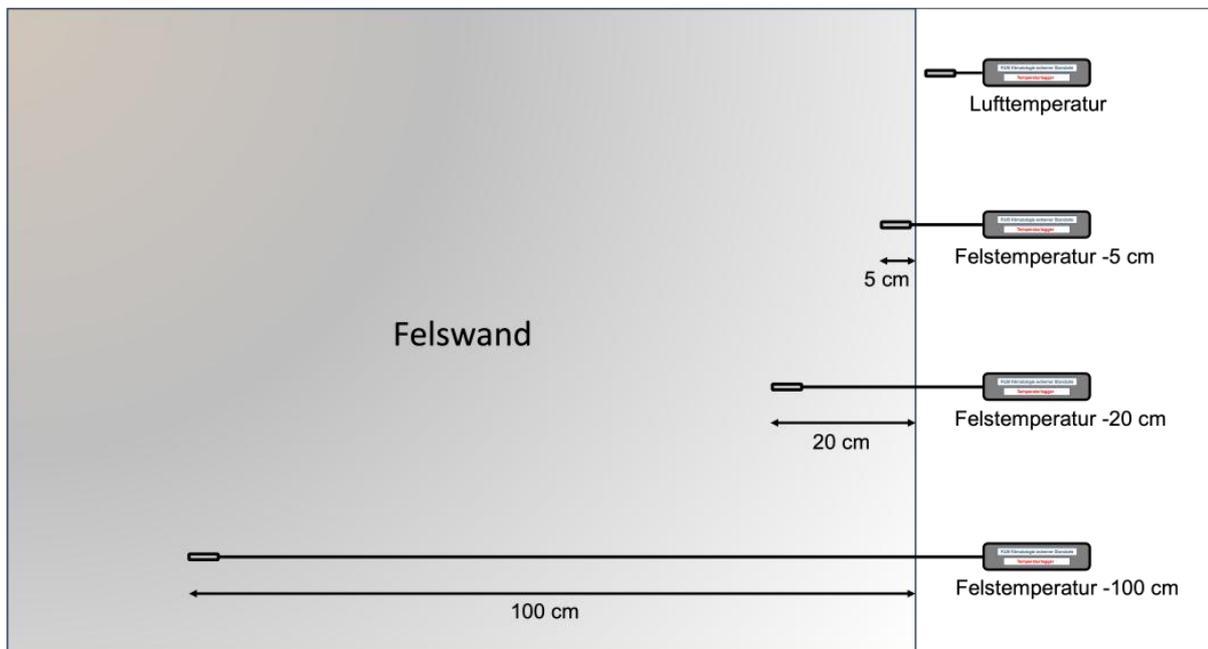


Abb. 4: Schematische Darstellung der Datenaufnahme an den Messstandorten in der Schellenberger Eishöhle. Die Pt1000 Temperatursensoren sind dabei, soweit es die Situation in der Praxis zulässt, horizontal in die Felswände eingesetzt. Für den weiteren Verlauf der Untersuchung ist zudem relevant, dass sich durch die unterschiedlichen Einsatztiefen theoretische Schichtdicken des Gesteins von 80 cm, 15 cm und 5 cm ergeben.



Abb. 5: Fotoaufnahmen von den in der Schellenberger Eishöhle ausgebrachten Pt1000 Temperatursensoren mitsamt der Datenlogger an den Messstellen der a) Wasserstelle und b) Fuggerhalle.

Bei der Ausbringung musste beachtet werden, dass die Durchmesser der Bohrlöcher so klein wie möglich, jedoch so groß wie nötig gewählt werden und nur minimale Hohlräume in den Bohrgängen verbleiben, welche die Daten beispielsweise über eindringende Feuchtigkeit beeinflussen und verfälschen können. Für eine weitere Vermeidung von Fehlern werden die Daten dabei ganzjährig in der gleichen Ortszeit (UTC+1) aufgenommen, welche der deutschen Winterzeit entspricht.

Für die Untersuchung ist zudem relevant, dass die eingesetzten Pt1000 Sensoren eine Messauflösung von $0,01\text{ °C}$ aufweisen und die Messgenauigkeit bei 0 °C , was in etwa der ganzjährigen Betriebstemperatur entspricht, $\pm 0,1\text{ °C}$ beträgt (GeoPrecision o.J.). Dies stellt den technisch bedingten Grund dar, weshalb die absolut aufgenommenen Temperaturwerte im weiteren Verlauf der Arbeit mit einer Nachkommastelle angegeben und die berechneten Mittelwerte sowie Standardabweichungen auf zwei Nachkommastellen gerundet werden.

Nachdem somit der Einblick zur Aufnahme von Fels- und Lufttemperaturen als Ausgangsdaten für die Untersuchung gegeben werden konnte, muss im Anschluss über eine Einführung in die thermophysikalischen Grundlagen das theoretische Prinzip der Auswertung entwickelt werden.

2.4 Thermophysikalische Grundlagen

Indem bereits in Unterkapitel 2.2 ein Einfluss von Wärme aus den Felswänden auf das Klima von Eishöhlen herausgestellt werden konnte, gilt es an dieser Stelle einen, für die Fragestellung relevanten, Einblick in die physikalischen Grundlagen zur Wärmeübertragung zu geben.

Hierzu wird als Erstes die zunächst die thermodynamische Zustandsgröße der Temperatur betrachtet, welche über ein vorliegendes, thermisches Gleich- oder Ungleichgewicht die zentrale Größe der Wärmelehre darstellt. Weisen zwei Orte eine unterschiedliche Temperatur auf, findet ein Wärmefluss statt, der sich nach dem Fourierschen Gesetz proportional zur

Temperaturdifferenz verhält (Hannoschöck 2018). Ergo bedeutet dies: Je größer die Temperaturdifferenz, desto größer auch der Wärmetransport. Dieser kann im Allgemeinen per Strahlung, Konvektion oder auch Konduktion stattfinden (Pfiffner et al. 2016; Haeckel 2021). Da für die Fragestellung der Arbeit die Wärmebewegungen innerhalb der Felswände betrachtet und diese wie Erdwärme nach Pfiffner et al. (2016) durch das Gestein selbst übertragen wird, rückt der thermophysikalische Prozess der Konduktion in den Vordergrund der Arbeit.

Bei der Konduktion, die auch als reine Wärmeleitung bezeichnet werden kann, wird Wärme mittels mechanischer Schwingungen der Atome im Kristallgitter eines Minerals weitergeleitet und erfolgt gemäß Herwig & Moschallski (2019) immer in Richtung abnehmender Temperatur, was mithilfe der Abb. 6 schematisch dargestellt wird.

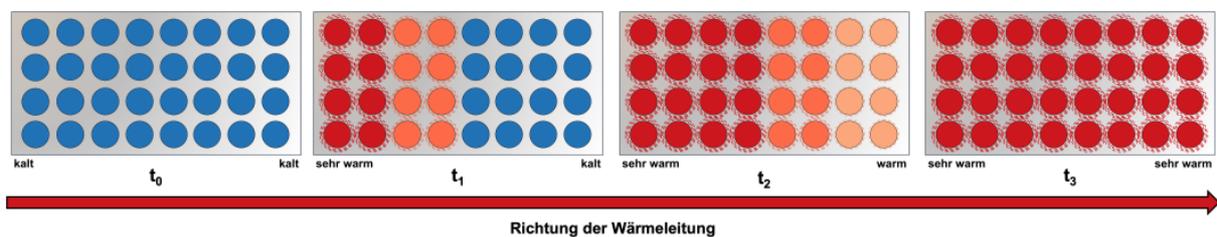


Abb. 6: Schematische Darstellung der Wärmeleitung durch Konduktion. Die Darstellung zeigt vier verschiedene Zeitpunkte, wobei t_0 den Zustand ohne angelegte Wärmequelle aufzeigt. Nach Anlegen einer Wärmequelle zeigen die Zeitpunkte t_1 , t_2 und t_3 die Dynamik sowie Richtung der Wärmeleitung von warm nach kalt (nach Pfiffner et al 2016; Herwig & Moschallski 2019; Stober & Bucher 2020).

Die Schwingungen regen dabei die benachbarten Atome an, sodass Wärme durch das Mineral Korn weitergeleitet wird (Pfiffner et al. 2016). Zumal die Temperatur vereinfacht den kinetischen Zustand von Atomen und deren Schwingungen angibt, hängt die Menge der transferierten Wärme somit, wie auch bei der geothermischen Energiegewinnung, von den Temperaturdifferenzen der verschiedenen Tiefen sowie von der Wärmeleitfähigkeit λ , der aus Kalkstein bestehenden Felswände der Schellenberger Eishöhle ab (Stober & Bucher 2020).

Die Wärmeleitfähigkeit λ wird dabei in der SI-Einheit $W/m \cdot K$ angegeben und weiterführend für die Berechnung des Wärmedurchlasswiderstands benötigt. In Gesteinen ist der λ -Wert von Faktoren wie Varianzen in der mineralogischen Zusammensetzung, einem unterschiedlichen Kompaktions- oder Alterationsgrad sowie von der Schichtung abhängig, sodass kleinräumig starke Variationen entstehen und die Wärmeleitfähigkeit auch für einzelne Gesteine sehr schwankend ist (Stober & Bucher 2020). Hierdurch bedingt ergeben sich auch in der Literatur starke Abweichungen in den Angaben für Kalkgestein, sodass für diese Untersuchung der Mittelwert von Mittelwerten aus 3 verschiedenen Untersuchungsreihen mit insgesamt 958 Proben herangezogen wurde und demnach ein Wert von $\lambda = 2,9 W/m \cdot K$ für die Berechnungen Anwendung findet (Schön 2011).

Hierdurch folgt die Berechnung der Wärmedurchlasswiderstände für die jeweiligen Schichten der beprobten Felswände mithilfe der folgenden Formel nach Willems et al. (2020):

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

Dabei sind:

R Wärmedurchlasswiderstand in (m²*K)/W

d Dicke der Körperschicht in m

λ Wärmeleitfähigkeit in W/(m*K)

Indem für die Untersuchung an der außen liegenden Schicht ein Übergang zwischen dem Festgestein und der Höhlenluft besteht, muss ergänzend ein Wärmeübergangswiderstand zur Luft berücksichtigt und mithilfe einer aufbauenden Formel, ebenfalls nach Willems et al. (2020), zur Ermittlung der Gesamtheit aller Wärmedurchlasswiderstände erweitert werden:

$$R_T = R_{si} + R + R_{se}$$

Dabei sind:

R_T Wärmedurchgangswiderstand des Körpers in (m²*K)/W

R_{si} Wärmeübergangswiderstand innen in (m²*K)/W

R Wärmedurchlasswiderstand des Körpers in (m²*K)/W

R_{se} Wärmeübergangswiderstand außen in (m²*K)/W

Da im Ergebnisteil die einzelnen Wärmestromdichten zwischen den aufgenommenen Messpunkten dargestellt werden sollen, muss für jede Schicht ein eigener Wärmedurchgangswiderstand R_T berechnet werden. Dadurch, dass in der Anwendung für die Schichten innerhalb der Felswände nur imaginäre und keine physikalischen Übergänge bestehen, gilt für die Schichten 100 cm bis 20 cm Tiefe eine Dicke von 0,8 m und für die Schicht von 20 cm bis 5 cm eine Dicke von 0,15 m R = R_T. Für die Übergangsschicht -5 cm bis Luft (0,05 m) ist der innere Wärmedurchgangswiderstand R_{si} aus demselben Grund zu vernachlässigen. Jedoch muss nach der oben aufgeführten Formel eine Addition zum bestehenden R-Wert mit dem äußeren Wärmeübergangswiderstand R_{se} erfolgen. Dieser wird von Willems et al. (2020) bei einem horizontal gerichteten Wärmestrom gemäß DIN EN ISO 6946 vom Festkörper zur Außenluft mit 0,04 K*m²/W angegeben.

Nachdem somit alle Voraussetzungen für die Berechnung der jeweiligen Wärmedurchgangswiderstände geklärt werden konnten, wird weiterführend der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) opaker, also undurchsichtiger Feststoffe, für die Ermittlung der Wärmestromdichten benötigt. Dieses erfolgt mit einer Bildung des Kehrwerts von den jeweiligen Wärmedurchgangswiderständen R_T , was ebenfalls nach Willems et al. (2020) mithilfe der nachfolgenden Formel dargestellt werden kann:

$$U = \frac{1}{R_T}$$

Dabei sind:

U Wärmedurchgangskoeffizient in $W/(m^2 \cdot K)$

R_T Wärmedurchgangswiderstand in $(m^2 \cdot K)/W$

Generell gilt für diesen: Je größer der U-Wert, desto besser sind auch die Eigenschaften zur Wärmeleitung. Hierzu muss ergänzend aufgeführt werden, dass im Falle von Feststoffen und Flüssigkeiten der Wärmedurchgangskoeffizient U ebenfalls von der Temperatur abhängig ist. Indem dieser Effekt von Hannoschöck (2018) jedoch als schwach bezeichnet wird und in Eishöhlen ganzjährig eher kleine Temperaturamplituden vorherrschen, wird dieser Aspekt für den weiteren Verlauf der Berechnungen vernachlässigt.

Im letzten Schritt zur Berechnung der Wärmestromdichten müssen lediglich noch die Temperaturdifferenzen ΔT der jeweiligen Messtiefen, mit den entsprechenden Wärmedurchgangskoeffizienten multipliziert werden. Dies kann gleichermaßen, wie bei den vorherigen Schritten, mithilfe einer Formel nach Willems et al. (2020) durchgeführt werden:

$$q = U * (T_1 - T_2)$$

Dabei sind:

q Wärmestromdichte in W/m^2

U Wärmedurchgangskoeffizient in $W/(m^2 \cdot K)$

T_1 monatlich mittlere Temperatur in einer der Felstiefen oder der Luft in $^{\circ}C$

T_2 monatlich mittlere Temperatur in einer der Felstiefen oder der Luft in $^{\circ}C$

Durch diese Berechnung ergibt sich auch die SI-Einheit der Wärmestromdichte mit W/m^2 , welche demnach einer Leistung pro Fläche entspricht. Mit Bezug die grundlegende Fragestellung samt Hypothesen kann diese Einheit als sehr aussagekräftig und passend für den Untersuchungsstandort identifiziert werden, indem die berechneten Wärmestromdichten jeweils eine

Wärmeenergie pro Zeiteinheit und pro Quadratmeter Fläche der Felswände an den aufgenommenen Messstellen in der Schellenberger Eishöhle angeben.

Somit kann dieses Unterkapitel mit Bezug auf die Fragestellung sowie der Hypothesen bereits herausstellen, dass Temperaturdifferenzen konduktive Wärmeströme in Festkörpern generieren und die Richtung dieser, aufgrund von mechanischen Schwingungen der Atome im Kristallgitter eines Minerals, immer von warm nach kalt erfolgt.

2.5 Statistik und Modellierung

Zur statistischen Untersuchung der aufgenommenen Temperaturen werden verschiedene Auswertungsverfahren herangezogen. Als Softwaregrundlage hierfür dient OriginPro 2023 (64-bit) in der Version 10.0.0.154.

Für die Auswertung und Modellierung der Daten ist zunächst eine grundlegende Strukturierung und Einbettung der Rohdaten in die Software vonnöten. Für einen Überblick des gesamten Jahresverlaufs werden die integrierten Datenreihen der verschiedenen Standorte und Messtiefen zunächst als Liniendiagramme mit einer zugehörigen deskriptiven Statistiktabelle dargestellt.

Mit Bezug auf die Untersuchungsthese rückt weiterführend das Verfahren einer ANOVA (Analysis of Variance) in den Vordergrund, durch welches signifikante Unterschiede von Mittelwerten herausgestellt werden können.

Hierzu wird aufgrund eines standortsinternen Vergleichs der Daten eine einfache ANOVA mit wiederholten Messungen angewendet, da die einzelnen Datenreihen voneinander abhängig sind. Zur Darstellung signifikanter Unterschiede der Mittelwerte werden weiterführend Buchstaben-gruppierungen benötigt, die mittels eines anschließenden Tukey-Tests erzeugt werden. Bei allen Ermittlungen dieser Arbeit wurde das Signifikanzniveau 0,05 angewendet.

Zur graphischen Darstellung der monatlichen Datenreihen wurden Violinendiagramme verwendet, sodass mittels dieser eine vereinigte Darstellung von Boxplotdiagrammen, symmetrischer Verteilungskurven mit Kernel-Glättung sowie die Ergebnisse der durch die Varianzanalysen ermittelten Gruppierungsbuchstaben zur Darstellung möglicher signifikanter Unterschiede auf einen Blick zusammengeführt werden können.

3. Ergebnisse

Nachdem das methodische Vorgehen der Untersuchung dargestellt wurde, müssen weiterführend, die dadurch entstandenen Ergebnisse erläutert werden. Diese werden aspektorientiert gegliedert, sodass im ersten Schritt der Jahresverlauf der Temperaturdaten an den jeweiligen Messstellen mitsamt einer deskriptiven Statistik dargestellt wird. Hierdurch wird zunächst ein Überblick sowie die Beantwortungsgrundlage zur Permafrostfrage generiert. Daran anschließend werden die Datensätze auf der monatlichen Ebene mit den berechneten Wärmestromdichten und deren Richtungen abgebildet, um eine differenzierte Diskussionsgrundlage zur Beantwortung von Fragestellung und Hypothesen für das anschließende Kapitel der Diskussion herzustellen.

3.1. Jahresverlauf der Temperaturdaten am Messstandort der Angermayerhalle

Demnach wird an erster Stelle der Jahresverlauf, des am höchsten und entsprechend am nächsten zum Eingang gelegenen Messpunkts, der Angermayerhalle Unten mithilfe der Abb. 7 sowie der deskriptiven Statistik aus Tab. 1 dargestellt:

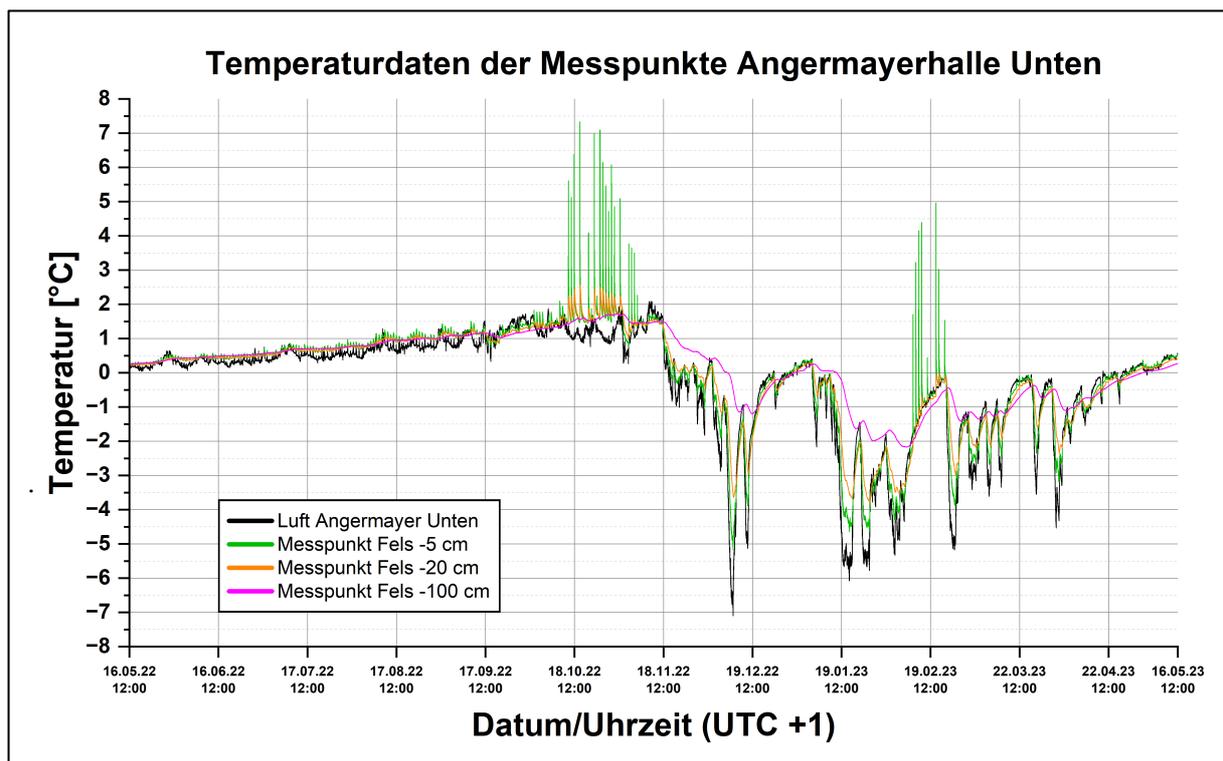


Abb.7: Luft- und Felstiefentemperaturdaten [°C] der Messpunkte Angermayerhalle Unten im Jahresverlauf der Zeitzone UTC+1 vom 16.05.2022 bis zum 16.05.2023.

Tab. 1: Deskriptive Statistik des Jahresverlaufs der Temperaturdaten am Messstandort der Angermayerhalle Unten.

Temperaturdaten Angermayerhalle	a. Mittelwert [°C]	Standardabweichung [K]	Minimum [°C]	Maximum [°C]	Spannweite (Maximum - Minimum) [K]
Luft Angermayer Unten	-0,23	1,55	-7,1	2,1	9,2
Messpunkt Fels -5 cm	-0,04	1,44	-5,2	7,3	12,5
Messpunkt Fels -20 cm	0,00	1,29	-3,8	2,6	6,4
Messpunkt Fels -100 cm	0,20	0,95	-2,2	1,7	3,9

Im Hinblick auf die Diskussion kann mithilfe der Abb.7 bereits eine graphische Unterscheidung zwischen der Winterperiode samt Übergangsmont (November bis April) und der Sommerperiode mit Übergang (Mai bis Oktober) festgestellt werden. Zudem sind hohe Temperaturspitzen der Felsmesspunkte -5 cm und -20 cm von Mitte Oktober bis Anfang November und im Februar auffällig. Darüber hinaus lassen sich kleinere Temperaturspitzen über das gesamte Jahr und besonders während der Sommerperiode erkennen, bei welchen jedoch mit zunehmender Tiefe der Temperatursensoren eine Glättung zu erkennen ist.

Wird ergänzend hierzu die deskriptive Statistik der Tab. 1 hinzugezogen, lassen sich die in der Abb. 7 vorgefundenen Besonderheiten auch mittels dieser Daten aufzeigen. So kann durch die Betrachtung der arithmetischen Mittelwerte konstatiert werden, dass die Luft mit $-0,23\text{ °C}$ den geringsten Wert aufweist, die Werte mit zunehmender Tiefe ansteigen und der Messpunkt Fels in -100 cm ein positives Mittel von $0,20\text{ °C}$ aufzeigt. Indem ebenfalls eine Buchstabengruppierung per ANOVA und Tukey-Test durchgeführt wurde, können die Unterschiede der Mittelwerte als signifikant herausgestellt werden.

Die zunehmende Glättung der dargestellten Verläufe der tiefer liegenden Pt1000 Sensoren lässt sich mithilfe der sich verringernden Standardabweichung als auch durch die Spannweite aufzeigen. Bei der Spannweite muss jedoch eine Ausnahme bei der 5 cm Messtiefe verzeichnet werden, welche auf die bereits erwähnten Temperaturspitzen zurückzuführen ist. Beim Minimum und Maximum der Temperaturdaten weist die Luft mit $-7,1\text{ °C}$ den geringsten Wert und der Sensor in 5 cm Tiefe den höchsten Wert mit $7,3\text{ °C}$ auf, welcher auch hier auf eine der Temperaturspitzen während des Frühjahrs zurückzuführen ist. Betrachtet man alle Sensoren bezüglich des Maximalwerts, lässt sich bezüglich zur Frage des Vorhandenseins von Permafrost aufführen, dass jede Felstiefe im Jahresverlauf Temperaturwerte von $>0\text{ °C}$ aufweist.

Insgesamt zeigen die Temperaturdaten der Angermayerhalle somit signifikanten Unterschiede in den Mittelwerten auf, bei denen die gemittelten Temperaturen mit zunehmender Tiefe im Felsen wärmer werden und mit Bezug zum Permafrost Temperaturen von über 0 °C zeigen.

3.2 Jahresverlauf der Temperaturdaten am Messstandort der Wasserstelle

Fortführend werden die Ergebnisse des Jahresverlaufs, der tiefer in der Schellenberger Eishöhle gelegenen Messstelle, der Wasserstelle anhand der Abb. 8 sowie der deskriptiven Statistik aus Tab. 2 dargestellt:

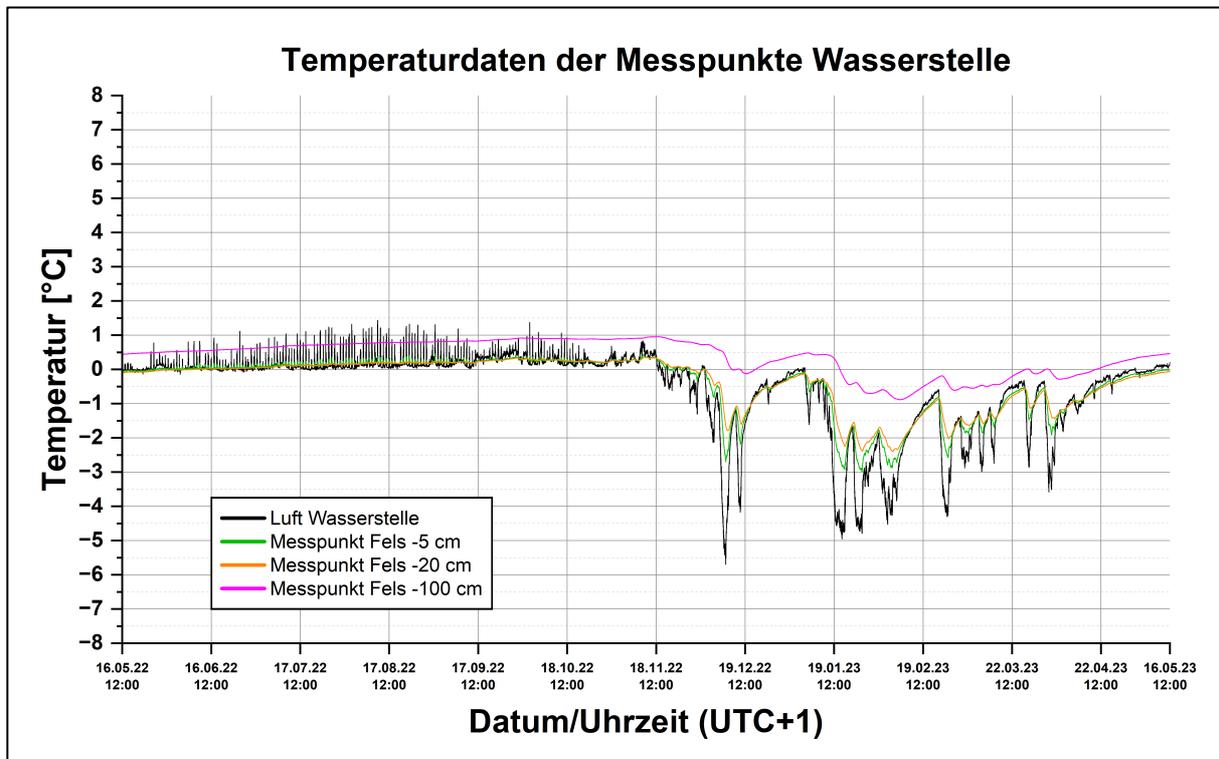


Abb. 8: Luft- und Felstieftemperaturen [°C] der Messpunkte Wasserstelle im Jahresverlauf vom 16.05.2022 bis zum 16.05.2023.

Tab. 2: Deskriptive Statistik des Jahresverlaufs an der Messstelle der Wasserstelle

Temperaturdaten Wasserstelle	a. Mittelwert [°C]	Standardabweichung [K]	Minimum [°C]	Maximum [°C]	Spannweite (Maximum - Minimum) [K]
Luft Wasserstelle	-0,53	1,15	-5,7	1,4	7,1
Wasserstelle Fels -5 cm	-0,39	0,81	-3,0	0,5	3,5
Wasserstelle Fels -20 cm	-0,35	0,71	-2,4	0,4	2,8
Wasserstelle Fels -100 cm	0,38	0,50	-0,9	1,0	1,9

Für die Wasserstelle fällt in Abb. 8 auf, dass keine besonders ausreißenden Temperaturspitzen zu erkennen sind und demnach der Temperaturverlauf aller Messpunkte über das ganze Jahr weniger ausschlagend verläuft. Trotzdem ist auch hier ein Unterschied zwischen einer Sommer- sowie einer Winterperiode erkennbar. Bei genauerer Betrachtung der Sommerperiode können jedoch auch hier einige kleine Peaks bei der Lufttemperatur und, mit der Tiefe abschwächend, bei dem 5 cm Felstempersensor verzeichnet werden. Grundsätzlich kann somit auch hier eine Glättung des Temperaturverlaufs mit zunehmender Tiefe festgestellt werden.

Bei den arithmetischen Mittelwerten an der Wasserstelle weist die Luft mit $-0,53\text{ }^{\circ}\text{C}$ den geringsten Wert auf, darauf folgt der Fels -5 cm mit $-0,39\text{ }^{\circ}\text{C}$, anschließend der Fels -20 cm mit $-0,35\text{ }^{\circ}\text{C}$ und zuletzt der Felsmesspunkt -100 cm mit $+0,38\text{ }^{\circ}\text{C}$. Somit kann an der Wasserstelle ein abnehmender Temperaturgradient der Mittelwerte vom Fels in Richtung Luft erkannt werden, bei welchem die Unterschiede ebenfalls als signifikant ausgewiesen wurden.

Weiterführend lässt sich auch bei der Standardabweichung ein Gradient erkennen, welcher mit zunehmender Tiefe kleiner wird und in Verbindung mit der Spannweite die, in Abb. 8 zu sehenden, Glättungen der Temperaturverläufe mit zunehmender Felstiefe bestätigt. Werden die Minimal und Maximalwerte betrachtet, liegen beide am Sensor der Lufttemperatur vor. Die tiefste aufgenommene Temperatur mit $-5,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ während des Dezembers und die höchste mit $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ im August. Unter Betrachtung des Permafrosts können auch an der Wasserstelle in allen Felstiefen aufgenommene Temperaturwerte von $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ verzeichnet werden, wobei der arithmetische Mittelwert in 100 cm Felstiefe mit $0,38\text{ }^{\circ}\text{C}$ sogar ein positives Vorzeichen aufweist.

Insgesamt ergeben sich demnach mithilfe von Abb. 8 und Tab. 2 ebenfalls signifikante Unterschiede in den arithmetischen Mittelwerten, ein mit der Messtiefe ansteigender Temperaturgradient sowie die Erkenntnis, dass alle Felstiefen zeitweise Temperaturen über $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ aufweisen.

3.3 Jahresverlauf der Temperaturdaten am Messstandort der Fuggerhalle

Weiter wird der Jahresverlauf, des am tiefsten in der Höhle gelegenen Messstandorts, der Fuggerhalle mithilfe der Abb. 9 sowie der Tab. 3 betrachtet und erläutert:

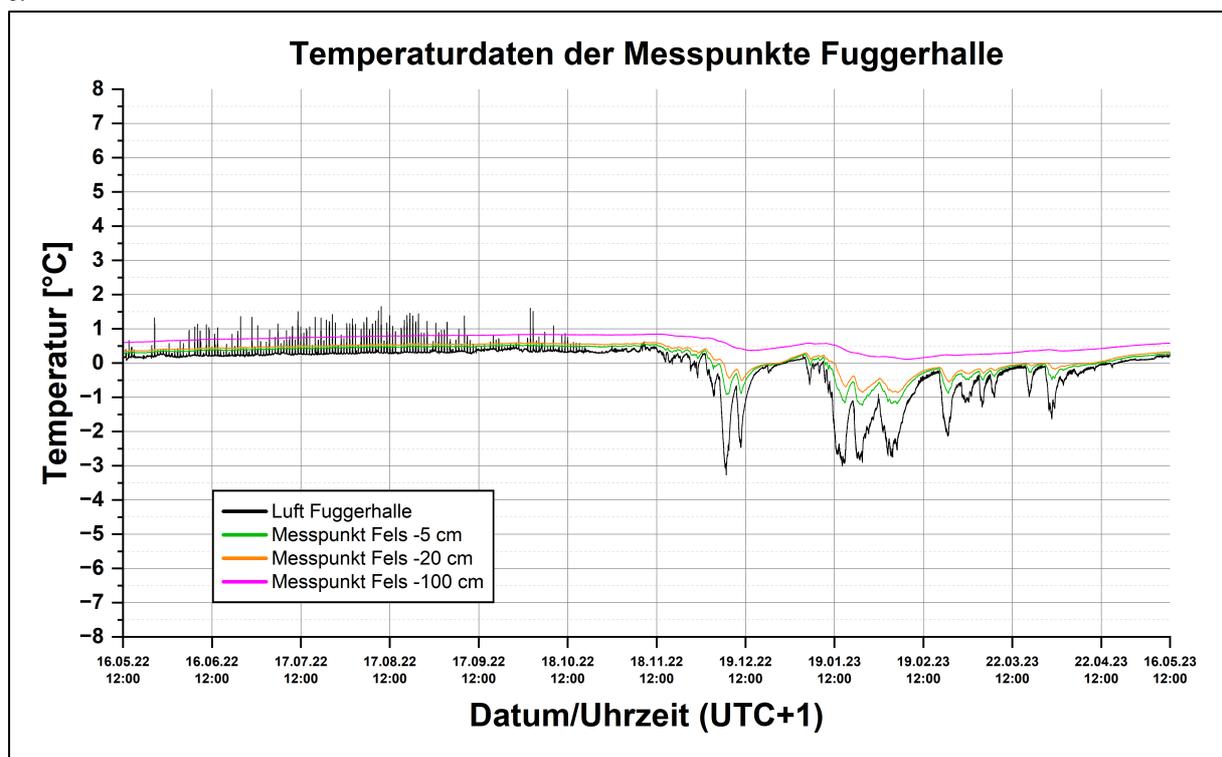


Abb. 9: Luft und Felstiefentemperaturen [$^{\circ}\text{C}$] der Messpunkte Fuggerhalle im Jahresverlauf vom 16.05.2022 bis zum 16.05.2023.

Tab. 3: Deskriptive Statistik des Jahresverlaufs des Messpunkts der Fuggerhalle.

Temperaturdaten Fuggerhalle	a. Mittelwert [°C]	Standardabweichung [K]	Minimum [°C]	Maximum [°C]	Spannweite (Maximum - Minimum) [K]
Luft Fuggerhalle [°C]	-0,13	0,72	-3,3	1,7	5
Messpunkt Fels -5 cm	0,14	0,42	-1,2	0,6	1,8
Messpunkt Fels -20 cm	0,23	0,37	-0,9	0,6	1,5
Messpunkt Fels -100 cm	0,60	0,22	0,1	0,9	0,8

Im Vergleich zur Angermayerhalle sowie zur Wasserstelle fällt bei der Fuggerhalle aufgrund der gleichen Y-Achsenkalierung eine weitere Glättung der Temperaturdatenlinien während des gesamten Jahresverlaufs auf. Ebenso kann, wie bei den anderen Standorten, ein Unterschied zwischen der Sommer- und der Winterperiode erkannt werden.

Dies wird ebenfalls mit den Werten der Standardabweichung sowie der Spannweite bestätigt, indem bei beiden abnehmende Werte mit zunehmender Felstiefe in den Daten der Tab. 3 zu verzeichnen sind.

Werden weiter die Minimum- und Maximumwerte der deskriptiven Statistik hinzugezogen, kann aufgezeigt werden, dass der Lufttemperatur der geringste sowie höchste Temperaturwert zuzuschreiben ist. Mit Bezug auf den Permafrost lässt sich auch hier für die Felstiefen feststellen, dass alle Sensoren zeitweise Temperaturwerte von >0 °C erreichen und im Gegensatz zu den anderen Standorten alle arithmetischen Mittel der Felstemperaturen oberhalb von 0 °C liegen. Somit ist auch in der Fuggerhalle ein Temperaturgradient erkennbar, welcher signifikant zunehmend mit der Felstiefe verläuft.

Bei genauerer Ansicht der Sommerperiode muss zusätzlich aufgeführt werden, dass in der Fuggerhalle einige Spitzen am Temperaturfühler der Luft von Mai bis Oktober aufgezeichnet wurden.

3.5 Monatlich mittlere Wärmestromdichten sowie deren Richtungen an den jeweiligen Messstandorten

Nachdem der Jahresverlauf über das Vorhandensein von Gradienten bereits eine Tendenz zur Richtung möglicher Wärmeströme herausstellen konnte, gilt es diese im für die Untersuchungsfrage und Hypothesen relevanten Maßstab der monatlichen Betrachtungsebene darzustellen:

3.5.1 Monatlich mittlere Wärmestromdichten sowie deren Richtungen an den Messpunkten der Angermayerhalle

Hierzu wird mit der gleichen Reihenfolge wie bisher vorgegangen, sodass als Erstes der Messstandort der Angermayerhalle mithilfe der Abb. 10 in den Fokus gerückt wird.

Beginnend mit den meteorologischen Wintermonaten kann konstatiert werden, dass sich die Richtungen der gemittelten Wärmestromdichten gleich verhalten, die Beträge jedoch voneinander abweichen und im Januar am höchsten ausfallen. Die höchste mittlere Wärmestromdichte des Winters konnte demnach im Januar aus der Tiefe von 5 cm in Richtung Luft mit $6,316 \text{ W/m}^2$ berechnet werden.

Wird weiterführend der meteorologische Frühling betrachtet, ist zu verzeichnen, dass die mittleren Richtungen im März und April mit denen des Winters übereinstimmen. Ab dem Übergangsmontat des Mai wird jedoch eine Veränderung aufgezeigt, sodass ein mittlerer Wärmefluss innerhalb des Felsens von 5 cm Tiefe in Richtung 20 cm Tiefe sowie von 20 cm weiter in Richtung 100 cm ermittelt wurde. Der höhlenklimatologisch relevanteste Wärmestrom aus 5 cm Tiefe ist jedoch weiterhin zur Luft gerichtet, fällt mit $0,702 \text{ W/m}^2$ jedoch eher gering aus. So kann insgesamt zu den Frühlingsmonaten ausgesagt werden, dass die berechneten mittleren Wärmestromdichten im Vergleich zum Winter kleiner ausfallen und der höchste Wert im März, von 5 cm Tiefe zur Luft, mit $1,053 \text{ W/m}^2$ verzeichnet wird.

Bei den meteorologischen Sommermonaten lassen sich diese alternierenden Wärmestromrichtungen innerhalb der Felswand fortführend beobachten. Jedoch haben auch diese gemeinsam, dass die Wärmestromdichten aus den 5 cm Tiefen allesamt in Richtung Höhlenluft verlaufen. Der höchste Wert konnte für den August mit $4,035 \text{ W/m}^2$ berechnet werden.

Die monatlichen Mittel des meteorologischen Herbsts verhalten sich in Bezug auf die Richtungen unterschiedlich. So sind im September und Oktober die Ströme eher mit den alternierenden Charakteristika des Sommers vergleichbar, indem diese klein ausfallende, interne Wärmestromdichten im Fels aufzeigen: Vergleichend dazu verlaufen aus 5 cm Tiefe zur Luft mit $4,035 \text{ W/m}^2$ im September und $7,719 \text{ W/m}^2$ im Oktober größere Wärmestromdichten. Der Oktober stellt gesamtüberblickend auch den höchsten Betrag des gesamten Jahres dar.

So kann insgesamt ein Unterschied zwischen der, in Kapitel 2.2 herausgestellten, Sommer- und Winterperiode für die Messpunkte der Angermayerhalle festgestellt werden. Explizit besteht dieser darin, dass in den Monaten von November bis April alle Wärmestromdichten aus dem Fels in Richtung Luft verlaufen, während die Wärmeströme der Sommersituation innerhalb des Felsens alternieren. Wichtig ist dabei, dass alle Wärmestromdichten aus der 5 cm Schicht in Richtung Höhlenluft verlaufen. Bei den Beträgen ist zudem auffallend, dass auch die höchsten Werte der 5 cm Schicht entstammen und der geringste Betrag im August mit $0,036 \text{ W/m}^2$ zwischen den Messpunkten -100 cm und -20 cm berechnet werden konnte.

Monatlich mittlere Wärmestromdichten sowie deren Richtungen an den Messpunkten der Angermayerhalle

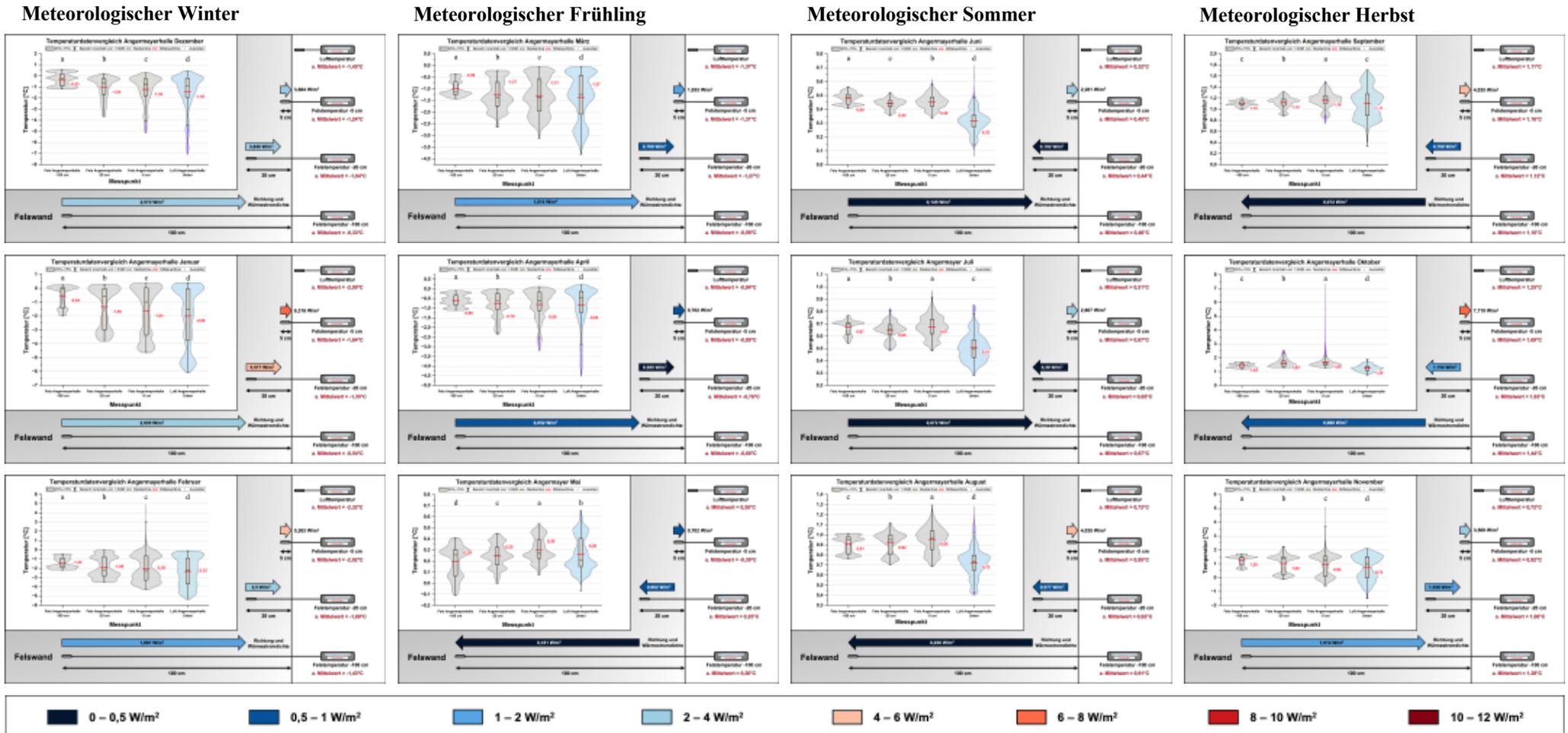


Abb. 10: Monatlich mittlere Wärmestromdichten sowie deren Richtungen an den Messpunkten der Angermayerhalle. Die Violinendiagramme der Abbildungen zeigen jeweils die aufgenommenen Temperaturdaten eines Monats in den verschiedenen Messstiefen und der Luft an der Messstelle Angermayerhalle als symmetrische Verteilungskurve mit Kernel-Glättung auf. Die zugehörigen Boxplots veranschaulichen graphisch den mittleren Datenbereich von 25 % bis 75 % mit einem Interquartilsabstand (IQR) von 1,5 sowie die Ausreißer, die Medianlinie und den arithmetischen Mittelwert (in Rot hervorgehoben). Für eine Vergleichbarkeit und zur Herausstellung von signifikanten Unterschieden der arithmetischen Mittelwerte sind die, über eine einfache ANOVA mit wiederholten Messungen und anschließendem Tukey-Test, bestimmten Kleinbuchstaben oberhalb der entsprechenden Temperaturdatensätze eingefügt. Die unter den monatlichen Grafiken positionierte Kategorisierung zeigt die farbliche Kennzeichnung zur Betraggröße der berechneten Wärmestromdichten. Darüber hinaus wurden die Abbildungen untereinander in den meteorologischen Jahreszeiten gemäß dem DWD (2024 b) gegliedert, um saisonale Differenzen oder auch Gemeinsamkeiten eingängiger erfassen zu können.

3.5.2 Monatlich mittlere Wärmestromdichten sowie deren Richtungen an den Messpunkten der Wasserstelle

Für die Ergebnisdarstellung der monatlich mittleren Wärmestromdichten und deren Richtungen an der Wasserstelle wird fortgehend die Abb. 11 herangezogen:

Beginnend mit den meteorologischen Wintermonaten wird verzeichnet, dass eine konstante Richtung der Wärmeströme aus dem Fels in Richtung Luft gegeben ist. Die Beträge weichen dabei ab, jedoch ist eine Tendenz erkennbar, dass auch hier die höchsten Werte von 5 cm Tiefe in Richtung Luft verlaufen. Dabei weist der Januar mit einer ermittelten Wärmestromdichte von $10,526 \text{ W/m}^2$ bereits den höchsten Wert des gesamten Jahres auf.

Wird weiter der meteorologische Frühling betrachtet, so fällt, wie schon bei der Angermayerhalle, ein Unterschied von März und April zu dem als Übergangsmontat ausgewiesenen Mai auf. Dieser besteht darin, dass die Richtungen der Wärmeströme im März und April allesamt, wie bei den Wintermonaten, von der tiefsten Messstelle des Felsens in Richtung Luft strömen, während im Mai alternierende Richtungen zu beobachten sind. Hier verläuft die relevanteste monatlich mittlere Wärmestromdichte von $1,228 \text{ W/m}^2$ aus der Luft in Richtung Felsen.

Bei den meteorologischen Sommermonaten Juni, Juli und August sind zusammenfassend die gleichen mittleren Richtungen der Wärmeströme zu verzeichnen. Diese verlaufen alle von 100 cm Tiefe in Richtung 20 cm und sowohl entgegengesetzt von 5 cm in Richtung 20 cm als auch von 5 zur Luft. Die Beträge der monatlich mittleren Wärmestromdichten fallen dabei besonders in den oberflächennahen Schichten gering aus. So konnte der höchste Betrag im August von 100 cm zu 20 cm Fels mit $2,174 \text{ W/m}^2$ berechnet werden.

Während der Monate des meteorologischen Herbsts unterscheidet sich der September bezüglich der mittleren Wärmestromrichtungen vom Oktober und November. Dies ist der Fall, da im Oktober und November ein aus der Tiefe des Felsens gerichteter Temperaturgradient die mittleren Wärmestromdichten in Richtung Höhlenluft verlaufen lässt, während im September ein durchgehender, mittlerer Strom aus der Luft bis in 20 cm Felstiefe verläuft.

Insgesamt konnten somit im Jahresverlauf zwei monatlich gemittelte Wärmestromdichten aus der Luft in Richtung Felswand berechnet werden, während bei 10 Monaten Wärme aus dem Fels an die Luft abgegeben wurde. Wird dies auf die Unterteilung zwischen Sommer- und Wintersituation bezogen, so lassen sich diese Stromrichtungen beide im Sommer respektive der Mai im Übergang einordnen. Demgemäß ist auch hier eine Differenzierung über den Jahresverlauf festzustellen.

Monatlich mittlere Wärmestromdichten sowie deren Richtungen an den Messpunkten der Wasserstelle

Meteorologischer Winter

Meteorologischer Frühling

Meteorologischer Sommer

Meteorologischer Herbst

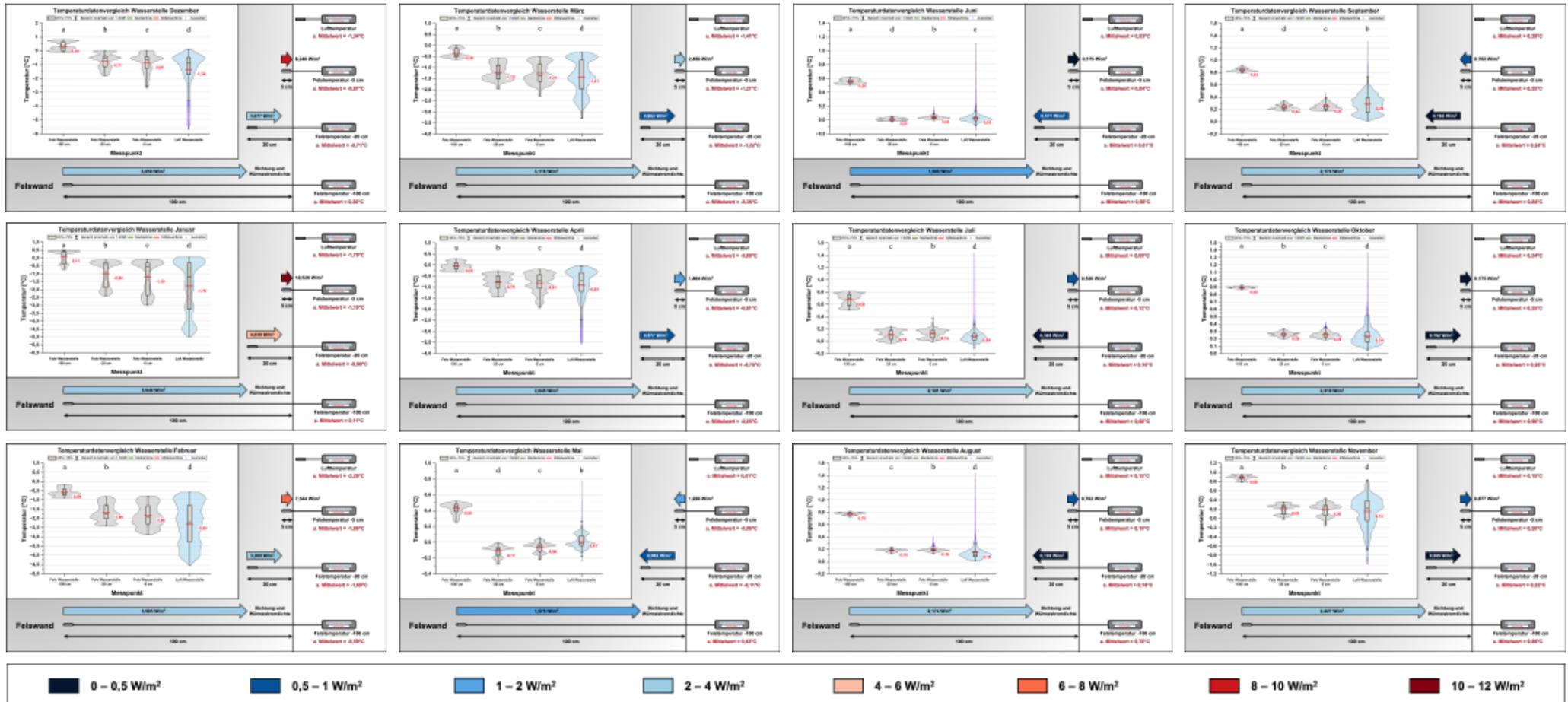


Abb. 11: Monatlich mittlere Wärmestromdichten sowie deren Richtungen an den Messpunkten der Wasserstelle. Die Violinendiagramme der Abbildungen zeigen jeweils die aufgenommenen Temperaturdaten eines Monats in den verschiedenen Messtiefen und der Luft am Messstandort der Wasserstelle als symmetrische Verteilungskurve mit Kernel-Glättung auf. Die zugehörigen Boxplots veranschaulichen graphisch den mittleren Datenbereich von 25 % bis 75 % mit einem Interquartilsabstand (IQR) von 1,5 sowie die Ausreißer, die Medianlinie und den arithmetischen Mittelwert (in Rot hervorgehoben). Für eine Vergleichbarkeit und zur Herausstellung von signifikanten Unterschieden der arithmetischen Mittelwerte sind die, über eine einfache ANOVA mit wiederholten Messungen und anschließendem Tukey-Test, bestimmten Kleinbuchstaben oberhalb der entsprechenden Temperaturdatensätze eingefügt. Die unter den monatlichen Grafiken positionierte Kategorisierung zeigt die farbliche Kennzeichnung zur Betragsgröße der berechneten Wärmestromdichten. Darüber hinaus wurden die Abbildungen untereinander in den meteorologischen Jahreszeiten gemäß dem DWD (2024 b) gegliedert, um saisonale Differenzen oder auch Gemeinsamkeiten eingängiger erfassen zu können.

3.5.3 Monatlich mittlere Wärmestromdichten sowie deren Richtungen an den Messpunkten der Fuggerhalle

Für die Ergebnisdarstellung von ermittelten Wärmestromdichten und deren Richtungen am Standort der Fuggerhalle wird die Abb. 12 herangezogen:

Hier kann für die meteorologischen Wintermonate eine durchgängige, mittlere Wärmestromrichtung aus dem Fels von 100 cm Tiefe bis zur Oberfläche festgestellt werden. Die Beträge der Wärmestromdichten fallen dabei, im Vergleich zu den bisherigen Standorten, besonders hoch aus. In der Fuggerhalle weisen die meteorologischen Wintermonate Januar und Februar mit $11,754 \text{ W/m}^2$ die höchsten mittleren Wärmestromdichten von 5 cm bis zur Luft des gesamten Jahres auf.

Indem die meteorologischen Frühlingsmonate in den Blickpunkt rücken, wird festgestellt, dass die Richtungen, gleich mit den Wintermonaten, vom tiefsten Messpunkt im Fels in Richtung Luft verlaufen. Auffallend ist hierbei der März, welcher über die höchste mittlere Wärmestromdichte mit $5,088 \text{ W/m}^2$ aller Standorte von 100 cm bis 20 cm Tiefe verfügt. Für die mittleren Beträge der Monate April und Mai ist eine zunehmende Abschwächung in Richtung Sommer zu verzeichnen.

Die mittleren Wärmeströme der meteorologischen Sommermonate verlaufen ebenfalls aus der Felstiefe zur Oberfläche gerichtet. Dabei fallen die Beträge im Gegensatz zum Winter geringer aus. Für den Sommer stellen die mittleren Wärmestromdichten aus 5 cm Tiefe in Richtung Luft der Monate Juli und August die höchsten Werte dar.

Auch beim meteorologischen Herbst verlaufen alle mittleren Wärmeströme gleich gerichtet aus dem Fels in Richtung Höhlenluft. Die Beträge fallen dabei im Vergleich zum Winter ebenfalls gering aus, sodass die mittleren Wärmestromdichten im Oktober und November von 5 cm bis zur Luft mit $2,632 \text{ W/m}^2$ die höchsten Werte des Quartals darstellen.

In Gesamtheit lässt sich somit für den, am tiefsten in der Höhle gelegenen, Messpunkt der Fuggerhalle ganzjährig das gleiche Muster in den mittleren Richtungen der gemittelten Wärmestromdichten verzeichnen. Diese verlaufen durchweg vom tiefsten Messpunkt in 100 cm Gesteinstiefe in Richtung Höhlenluft. Somit ist auch im Vergleich von klimatischer Winter- und Sommersituation der Schellenberger Eishöhle kein Unterschied für die Richtungen festzustellen. Lediglich die Berechnungen der Beträge konnten Abweichungen aufzeigen, sodass besonders die meteorologischen Wintermonate hohe Wärmestromdichten aus den 5 cm Tiefen in Richtung Luft aufweisen, während für die der höhlenklimatische Sommerperiode grundsätzlich geringere Beträge berechnet werden konnten.

Monatlich mittlere Wärmestromdichten sowie deren Richtungen an den Messpunkten der Fuggerhalle

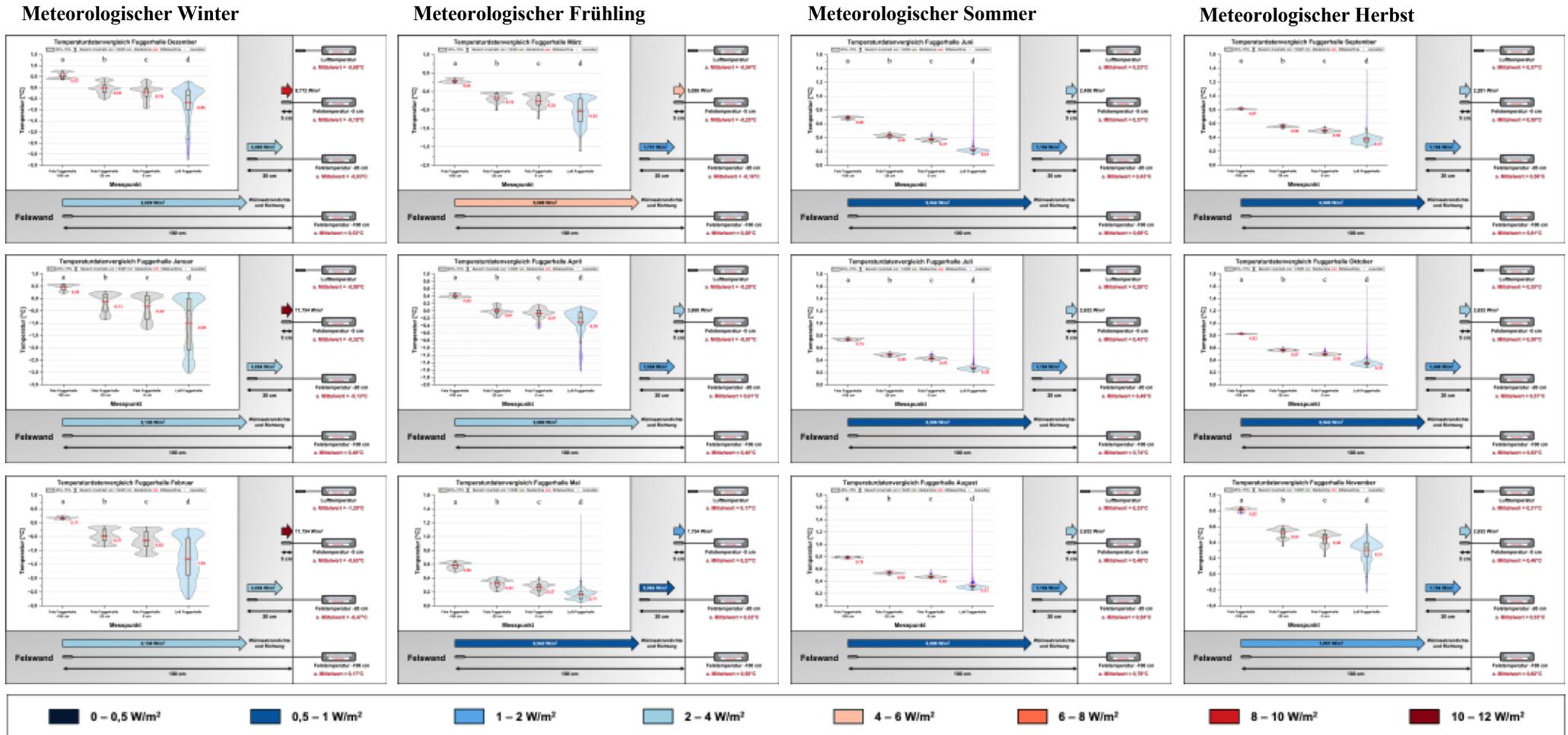


Abb. 12: Monatlich mittlere Wärmestromdichten sowie deren Richtungen an den Messpunkten der Fuggerhalle. Die Violinendiagramme der Abbildungen zeigen jeweils die aufgenommenen Temperaturdaten eines Monats in den verschiedenen Messtiefen und der Luft am Messstandort der Fuggerhalle als symmetrische Verteilungskurve mit Kernel-Glättung auf. Die zugehörigen Boxplots veranschaulichen graphisch den mittleren Datenbereich von 25 % bis 75 % mit einem Interquartilsabstand (IQR) von 1,5 sowie die Ausreißer, die Medianlinie und den arithmetischen Mittelwert (in Rot hervorgehoben). Für eine Vergleichbarkeit und zur Herausstellung von signifikanten Unterschieden der arithmetischen Mittelwerte sind die, über eine einfache ANOVA mit wiederholten Messungen und anschließendem Tukey-Test, bestimmten Kleinbuchstaben oberhalb der entsprechenden Temperaturdatensätze eingefügt. Die unter den monatlichen Grafiken positionierte Kategorisierung zeigt die farbliche Kennzeichnung zur Betragsgröße der berechneten Wärmestromdichten. Darüber hinaus wurden die Abbildungen untereinander in den meteorologischen Jahreszeiten gemäß dem DWD (2024 b) gegliedert, um saisonale Differenzen oder auch Gemeinsamkeiten eingängiger erfassen zu können.

4. Diskussion

Mithilfe des folgenden Diskussionskapitels können nun die im Ergebnisteil der Arbeit dargestellten Auswertungen mit Bezug auf die in der Einleitung aufgestellte Forschungsfrage und der zugehörigen Hypothesen analysiert werden. Hierzu wird die Gliederung des Ergebnisteils übernommen, sodass als Erstes der Blick auf die dargestellten Jahresverläufe mitsamt deren deskriptiven Statistiken gerichtet wird:

So kann im ersten Schritt die grundlegende Forschungsfrage zum Vorhandensein von Permafrost in den Felswänden bis in 100 cm Tiefe geprüft werden. Demnach wird Permafrost zunächst gemäß dem Permafrost Subcommittee der National Research Council of Canada (1988: 5) kurzgefasst und rein thermisch definiert, indem Felsen, Lockermaterialien oder auch Böden für mehr als zwei aufeinanderfolgende Jahre unabhängig vom Material oder Wassergehalt unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ verbleiben. Aufgrund der Tatsache, dass für diese Arbeit lediglich ein Untersuchungszeitraum von einem Jahr herangezogen werden konnte, muss die Definition auf diesen angepassten Zeitraum angewendet werden. Hierdurch wird bereits herausgestellt, dass diese erste Untersuchung zunächst nur einen begrenzten Zeitraum berücksichtigen konnte. Demnach müssen in der Zukunft noch größere Datenreihen analysiert werden, um eine höhere Genauigkeit für saisonale sowie langfristige Trends zu erfassen und weiterführend die Permafrostfrage der Definition entsprechend über den Zeitraum von 2 Jahren klären zu können.

Trotzdem war für den Standort der Angermayerhalle in dem Jahr festzustellen, dass zwar die ganzjährigen Mittelwerte in 5 cm Tiefe sowie in 20 cm Tiefe unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegen, gemäß der Definition die Standorte jedoch nur zeitweilig eine Temperatur von über $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ aufweisen müssen und demnach keine Permafrostbedingungen in diesen Tiefen erreicht werden. Überdies kommt hinzu, dass der tiefste Standort in 100 cm Felstiefe auch im Mittelwert mit $0,20\text{ }^{\circ}\text{C}$ über dem Schwellenwert zum Permafrost liegt und somit für die Beantwortung des Teilbereichs der Untersuchungsfragestellung kein vorhandener Permafrost im Fels bis 100 cm Tiefe an der Messstelle der Angermayerhalle Unten nachgewiesen werden kann.

Beim Standort der Wasserstelle verhalten sich die Ergebnisse ähnlich. Zwar liegen die Mittelwerte der Temperaturen von 5 cm und 20 cm Tiefe unterhalb von $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, die Maximalwerte überschreiten diese Schwelle jedoch und bei Betrachtung des Jahresverlaufs zeigt sich deutlich, dass die Temperaturen der Tiefen während der Sommerperiode zum großen Teil oberhalb von $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ aufgezeichnet wurden. Ergänzt werden muss dies noch mit dem tiefsten Messpunkt in 100 cm Tiefe, bei welchen sogar der arithmetische Mittelwert mit $0,38\text{ }^{\circ}\text{C}$ oberhalb der

Permafrostschwelle liegt. Dementsprechend konnte auch für die Wasserstelle fehlender Permafrost bis in 100 cm Felstiefe nachgewiesen werden.

Bei der Fuggerhalle ist dies noch eindeutiger festzustellen, indem alle arithmetischen Mittelwerte und Maximalwerte der aufgenommenen Felstemperaturdaten den Schwellenwert von 0 °C überschreiten. Hierdurch kann für die ausgehende Fragestellung konstatiert werden, dass an keinem der drei Messstandorte in der Schellenberger Eishöhle Permafrost während des Untersuchungszeitraums bis in 100 cm Felstiefe nachgewiesen werden konnte.

Weiter konnten in den Ergebnissen am Messstandort der Angermayerhalle besonders ausreißende Temperaturspitzen in den Felstemperaturen in 5 cm sowie 20 cm Tiefe während des Oktobers und Novembers sowie im Februar erkannt werden. Diese lassen sich auf eine jahreszeitlich bedingte, direkte Sonneneinstrahlung auf die beprobte Felswand zurückführen. Dies betrifft aufgrund der Nähe zum Eingangsbereich nur die Daten der Angermayerhalle. Indem der Lufttemperatursensor dieses Messstandorts nicht unmittelbar an der gleichen Stelle platziert ist, ergibt sich nach Pflitsch (2019) ein zeitlicher Versatz der Temperaturspitzen zwischen Luft und Felstemperatur, was er anhand eines Datensatzes vom 17.05.2017 bis zum 22.10.2018 ausführlich beweist.

Wird im Hinblick auf diese Problematik die Abb. 7 mitsamt dem zugehörigen Datensatz vom 16.05.2022 bis zum 16.05.2023 betrachtet, fällt jedoch auf, dass dieser zeitliche Versatz hier nicht erkennbar ist und die Spitzen in den Felstemperaturdaten der Tiefen von 5 cm und 20 cm, jedoch nicht an der Luft festgestellt werden können. Mit Bezug auf die Untersuchung von konduktiven Wärmeströmen sowie deren Richtungsverläufen stellt dieser Punkt dennoch einen beeinflussenden Faktor von einfallender Wärme durch Strahlung dar. Indem in den verwendeten Daten jedoch die vergleichbaren Spitzen an der Lufttemperatur fehlten, konnte dies hier nicht weiterführend berücksichtigt werden. Im Hinblick auf die Untersuchungen sowie auf weiterführende Arbeiten deckt der Verlauf jedoch auf, dass speziell für Analysen im kleineren zeitlichen Maßstab zusätzlich ein Pyranometer, an der beprobten Felswand installiert werden könnte. Dies würde die einfallende Solarstrahlung direkt in der SI-Einheit W/m^2 erfassen, sodass der in die Felswand hinein gerichtete Wärmestrom rechnerisch berücksichtigt werden kann.

Auch wenn für die tiefer gelegenen Messstandort der Wasserstelle und Fuggerhalle eine einfallende Sonnenstrahlung aufgrund der Morphologie ausgeschlossen werden kann, sind während der Sommermonate kleine Spitzen im Verlauf der Lufttemperatur und in 5 cm Tiefe zu erkennen. Diese können nach Pflitsch (2019) auf die touristischen Führungen und die damit eingetragene Körperwärme zurückzuführen sein. Zwar spielt dieser Faktor nach (Perşoiu 2018) eine

eher untergeordnete Rolle für das Höhlenklima, da jedoch ein Einfluss bis in den Fels festgestellt werden konnte, ist dies im Hinblick auf die Hypothesen dieser Arbeit sowie für aufbauende Untersuchungen sehr interessant. So wird nach Oke et al. (2017) die metabolische Wärme von Körpern zum größten Teil ($> 95\%$) in Wärme umgewandelt und an die Umgebung abgegeben. Die Höhe dieser Wärmeabgabe hängt dabei stark vom Grad der Anstrengung ab und kann bei intensiver körperlicher Aktivität bis zu 800 W betragen. Mithilfe solcher Informationen könnte etwa die Heizleistung von Führungsgruppen an den Stellen der Wasserstelle und Fuggerhalle mit einem Einfluss auf die gerichteten Wärmeströme ermittelt werden.

Für die Beantwortung des zweiten Teils der ausgehenden Forschungsfrage mitsamt deren Hypothesen können jetzt die thermophysikalischen Grundlagen in Verbindung mit den Berechneten Wärmestromdichten der Abb. 10, Abb. 11, sowie Abb. 12 gemeinsam die Antwort bilden:

So konnte zunächst herausgestellt werden, dass Wärme auf Grundlage von Temperaturdifferenzen mittels mechanischer Schwingungen der Atome im Kristallgitter eines Minerals weitergeleitet wird und dabei immer in Richtung abnehmender Temperatur verläuft. Infolgedessen wurden aufgrund der vier verschiedenen Temperaturmessstiefen jeweils drei Wärmestromdichten pro Monat und Standort berechnet, wobei jeder dieser gemittelten Wärmeströme eine andere Aussagekraft besitzt. Darüber hinaus muss an dieser Stelle aufgeführt werden, dass in den Ergebnissen dieser Arbeit monatlich gemittelte Richtungen als auch monatlich gemittelte Beträge der Wärmestromdichten berechnet wurden und aufgrund des komplexen thermophysikalischen Prozesses vereinfachte Annahmen in der Modellierung getroffen werden mussten. Hier könnten für exakte Modellierungen beispielsweise noch Messungen von Faktoren wie Feuchtigkeit und Wassersättigung weitere Aufschlüsse geben. Zudem ist es die Aufgabe dieser Untersuchung, eine hohe reale Dynamik physikalischer Prozesse für den Betrachtungszeitraum eines ganzen Jahres überschaubar darzustellen.

Eine weitere mögliche Fehlerquelle stellt der Dachsteinkalk als verkarstungsfähiges Gestein selbst dar. So können Klüfte oder Risse im Gestein die Wärmestromdichten zwischen einzelnen Punkten signifikant beeinflussen, indem Lufteinschlüsse in den Felswänden möglich sind. Dieses würde die angenommene spezifische Wärmeleitfähigkeit des Materials negativ beeinflussen. So weist Luft nach Schön (2011) eine mittlere Wärmeleitfähigkeit von $0,025 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ auf, was im Verhältnis zum verwendeten λ -Wert des Kalksteins in dieser Untersuchung $1:116$ entspricht.

Ohne die Berücksichtigung solcher Faktoren konnte dennoch festgestellt werden, dass die größten Wärmestromdichten von den 5 cm Messpunkten in Richtung Luft ausgehen. Dieses Erkenntnis kann jedoch nicht nur auf die dünne Schicht und die dadurch begünstigte Wärmeleitung zurückgeführt werden, da der U-Wert zwischen den 20 cm und 5 cm Messpunkten mit

19,231 W/m²*K höher liegt als 17,544 W/m²*K von der 5 cm Messtiefe bis zur Luft. Jenes ist auf den berücksichtigten Wärmeübergangswiderstand aus dem Fels zur Luft zurückzuführen, welcher in horizontaler Richtung mit einem Wert von 0,04 (m²*K)/W angenommen wurde. Die bestätigt, dass auch eine signifikant höhere Temperaturdifferenz vorliegen muss, um die höheren Wärmestromdichten zu erzeugen.

Da in diesem Fall der unmittelbare Einfluss auf die Höhlenluft untersucht wird, sind die ermittelten Wärmestromdichten zwischen 5 cm Tiefe und der Luft als die relevanteste Größe anzusehen. Die Wärmeströme zwischen 100 cm und 20 cm sowie von 20 cm bis 5 cm bieten dennoch zusätzliche Einblicke in die Wärme Flüsse innerhalb der Felswände. So geben diese Daten einen Einblick, wie viel Wärmeenergie aus den tieferen Schichten in die Oberen sowie auch entgegengerichtet transportiert wird. Denn diese bestimmen die entstehenden Temperaturänderungen in der Tiefe und infolgedessen die Wärmestromdichten in Richtung Höhlenluft mit.

Indem sich die Wärmeströme aus der Felswand proportional zur anliegenden Temperaturdifferenz verhalten, wird in Zukunft besonders die Rolle des Klimawandels zu beobachten sein.

Indem mit einer klimawandelbedingten Zunahme der Außenlufttemperatur auch die Höhlenluft erwärmt wird, verringern sich die Temperaturdifferenzen zwischen Luft und Fels, wodurch eine Abschwächung der Felswärmeströme in der Folgezeit erwartet werden kann.

Für die Hypothesen I und II am Standort der Angermayerhalle sagt die Abb. 10 aus, dass die Wärmestromdichten aus den 5 cm Schichten im monatlichen Mittel über das ganze Jahr keine Unterschiede in der Richtung aufweisen und zur Höhlenluft verlaufen. Abweichungen zwischen Winter- und Sommerperiode konnten jedoch in den tieferen Schichten des Felsens festgestellt werden. So verlaufen diese im Winter aufgrund des durchgängigen Temperaturgradienten durchweg aus dem Fels in Richtung Luft, während in der Sommerperiode die Richtungen mit Ausnahme im Juni durchweg aus 5 cm in Richtung Felstiefen verlaufen. Ergo bedeutet dies, dass die Felswand im Winter durchgängig Wärmeenergie aus der Tiefe von 100 cm abgibt und während der Sommerperiode Wärme aus der 5 cm Schicht in Richtung Luft, aber auch in Richtung Felstiefe transportiert wird. Somit bedeutet dies für die Untersuchung, dass an der Angermayerhalle die Hypothese I bestätigt werden kann, II jedoch nicht den erarbeiteten Ergebnissen entspricht und demnach für diesen Standort als falsch herausgestellt wird.

Fortsetzend kann per Abb. 11 die Wasserstelle diskutiert werden: Wird hier zwischen Winter- und Sommerperiode differenziert, lassen sich ebenfalls unterschiedliche Muster erkennen. Wie auch bei der Angermayerhalle sind für die Winterperiode Wärmestromdichten aufgrund des signifikanten Temperaturgradienten durchweg aus der tiefsten Felsmessstelle in Richtung Höhlenluft zu verzeichnen, was die Hypothese I bestätigt. Während der Sommerperiode sind

besonders in den tieferen Schichten alternierende Wärmestromrichtungen zu erkennen. Gerichtete Wärmeströme aus der Luft in Richtung Felswand konnten dabei nur für die Monate Mai und September ermittelt werden, weshalb sich auch an der Wasserstelle die Hypothese II als falsch herausstellt. Bestärkt wird dieses zudem, dass es sich beim Mai um einen Übergangsmonat handelt, wodurch die Aussagekraft des Monats zusätzlich reduziert wird.

Für die Fuggerhalle können die Hypothesen I und II sehr eindeutig beantwortet werden, indem mithilfe der Abb.12 keine Periodischen Unterschiede in den Richtungen der mittleren Wärmestromrichtungen festgestellt werden konnten. Demgemäß verlaufen alle monatlich mittleren Wärmeströme durch die mittleren Temperaturdifferenzen aus 100 cm Tiefe in Richtung Luft. Folglich kann für diesen Standort die Hypothese I bestätigt werden, dass sich in der Winterperiode ein gemittelter konduktiver Wärmestrom aus dem Fels in Richtung Höhlenluft bewegt. Die Hypothese II hingegen stellt sich auch bei der Fuggerhalle durch die gleichen Gründe als falsch heraus.

Somit kann in zusammengeführter Betrachtung aller Standorte konstatiert werden, dass die Hypothese I bestätigt wird, indem ein gemittelter, konduktiver Wärmestrom an allen Messstandorten durch signifikante Temperaturunterschiede aus den Felswänden in Richtung Höhlenluft, zumindest aus den 5 cm tiefen Schichten, nachgewiesen wurde.

Die Hypothese II hingegen konnte mithilfe aller Teilbereiche als falsche Annahme herausgestellt werden. So wurde lediglich für 2 von standortübergreifenden 36 Monatsbetrachtungen ein konduktiver Wärmestrom von der Höhlenluft in Richtung der Felswände festgestellt.

Werden mit Bezug auf die Hypothese III noch die ermittelten Beträge der jeweiligen Standorte verglichen, kann ausgesagt werden, dass aufgrund der höchsten Felstiefentemperaturen auch die höchsten mittleren Wärmestromdichten am Standort der Fuggerhalle berechnet wurden. Demgemäß weisen die Wintermonate Januar und Februar mit $11,745 \text{ W/m}^2$ die höchsten Werte der Fuggerhalle auf, der Januar mit $10,526 \text{ W/m}^2$ den höchsten Betrag an der Wasserstelle und der Oktober mit $7,719 \text{ W/m}^2$ die höchste mittlere Wärmestromdichte an der Felswand der Angermayerhalle. Werden die berechneten Werte von 5 cm bis zur Luft noch über das Jahr gemittelt, ergibt sich für die Angermayerhalle eine mittlere jährliche Wärmestromdichte von $3,509 \text{ W/m}^2$, für die Wasserstelle $2,880 \text{ W/m}^2$ und für die Fuggerhalle $4,854 \text{ W/m}^2$, welche in diesem Fall unabhängig von der Richtung sind. Wird diese einbezogen verändert sich an der Angermayerhalle und Fuggerhalle nichts, der mittlere jährliche Wärmestrom an der Wasserstelle würde sich jedoch aufgrund der zwei entgegengesetzten monatlichen Mittel verringern und beträgt unter dieser Berücksichtigung $2,719 \text{ W/m}^2$.

Auf dieser Grundlage kann demnach die Hypothese III als wahr herausgestellt werden, indem die Fuggerhalle als gemittelter Einzelmonat sowie gemittelt für das ganze Jahr im Vergleich zur Angermayerhalle und Wasserstelle die höchsten Wärmestromdichten aufweist. Dies kann jedoch nicht allein auf die statische Höhlenklimatologie zurückgeführt werden, weil die arithmetischen Jahresmittel der Lufttemperatur an den oberen zwei Messstellen geringer ausfallen als in der Fuggerhalle. Dementsprechend müssen die höchsten Temperaturdifferenzen und höchsten Wärmestromdichten der Fuggerhalle durch die höheren Felstemperaturen des Standorts begründet werden.

Diese sind nach Filipponi (2004) auf eine horizontale Temperaturschichtung innerhalb des Gebirgsmassivs zurückzuführen, welche durch die spezielle Lage von Höhlen im Inneren eines Bergs gestört wird. Indem die Fuggerhalle, als tiefster Standort der Höhle, auch von einer tieferen und wärmeren Temperaturschichtung des Untersbergs umgeben ist, können hierdurch auch die höchsten Felstemperaturdaten erklärt werden.

Im letzten Schritt des Kapitels muss fortführend noch die Größe der berechneten Wärmestromdichten diskutiert werden. Vergleicht man die Beträge der Wärmestromdichten der Schellenberger Eishöhle mit der sehr generellen Angabe von $0,1 \text{ W/m}^2$ durch Filipponi (2004), liegen die berechneten Werte der oberflächennahen 5 cm Schicht zum großen Teil deutlich darüber. Hierzu wird die aufgenommene Schichtdicke den signifikanten Unterschied bilden, welche von Filipponi (2004) in diesem Zusammenhang nicht aufgeführt wurde. Dies kann begründet, indem die Wärmestromdichte direkt von der beprobten Schichtdicke abhängt, was mithilfe aufgeführten Formel im Methodikteil aufgezeigt werden konnte. So sind in der Regel zwar die Temperaturdifferenzen von weiter entfernten Standorten höher, jedoch erhöht sich auch der Wärmedurchlasswiderstand proportional zur Schichtdicke.

Hierdurch wird aufgezeigt, dass dünnere und oberflächennahe Schichten auch einen erhöhten Wärmeaustausch mit sich bringen. Somit stellt sich rückblickend heraus, dass die Aufnahme von Temperaturdaten von mehr als nur einer Tiefe maßgeblich für eine differenzierte Interpretation des Sachverhalts ist und gegebenenfalls für zukünftige Untersuchungen mit Sensoren in weiteren Tiefen ergänzt werden sollte.

5. Schlussfolgerungen

Die Untersuchung der Wärmestromdichten in der Schellenberger Eishöhle von 16.05.2022 bis zum 16.05.2023 hat gezeigt, dass während dieses Zeitraums kein Permafrost in den Felswänden bis in eine Tiefe von 100 cm nachgewiesen werden konnte.

Weiter ergab die Untersuchung der Temperaturdaten, dass die Wärmestromrichtungen primär von den Felswänden zur Höhlenluft gerichtet sind und die höchsten Wärmestromdichten in den oberflächennahen Schichten des Felsens ermittelt werden konnten. Durch einen Vergleich der Standorte wurde zudem festgestellt, dass die gemittelten Wärmestromdichten an der Fuggerhalle am höchsten waren, was aufgrund der gleichen Wärmeleitfähigkeit des Materials auf die morphologisch tiefere Lage und damit einhergehenden höchsten Temperaturdifferenzen zurückzuführen ist. Hinsichtlich der Hypothesen kann abschließend festgehalten werden:

Hypothese I, welche einen konduktiven Wärmefluss aus den Felswänden in Richtung der Höhlenluft während der Winterperiode annahm, wurde an allen Messstandorten bestätigt.

Hypothese II hingegen, die einen Wärmefluss von der Höhlenluft in Richtung der Felswände während der Sommerperiode vermutete, konnte nicht bestätigt werden. Lediglich in zwei Fällen konnten Wärmeströme in diese Richtung herausgestellt werden.

Hypothese III, die Unterschiede in den Wärmestromdichten zwischen den verschiedenen Standorten betrachtete, wurde bestätigt. Die höchsten Wärmestromdichten wurden dabei für die Fuggerhalle berechnet, was auf die tiefere Lage und die damit einhergehenden größeren Temperaturunterschiede zurückzuführen ist.

In Gesamtheit konnte die Untersuchung somit verdeutlichen, dass die Beträge der Wärmestromdichten sowie deren Richtungen stark von der betrachteten zeitlichen Skala abhängen und von Faktoren wie Saisonalität, morphologische Eigenschaften sowie der aufgenommenen Schichtdicken beeinflusst werden.

Quellenverzeichnis

- Badino, G. (2004): Cave temperatures and global climatic change. In: International Journal of Speology 33 (1/4): 103-113.
- Bartenschlager, J.; Hebel, H.; Klatt, T.; Lämmlin, G.; Scheib, A. (2008): Fachkunde Mechatronik. 3. Auflage. Haan-Gruiten.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2020): Umweltatlas Bayern: Schellenberger Eishöhle. https://www.umweltatlas.bayern.de/standortauskunft/rest/reporting/sb_geotope/generate/Geotope.pdf?additionallayerfieldvalue=172H001 [24.08.2023].
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2023): Digitale Geologische Karte von Bayern 1:25000. 8244 Berchtesgaden Nord. Augsburg
- Bendix, J. (2004): Geländeklimatologie. Stuttgart.
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (2024 a) (Hg.): Lufttemperatur: vieljährige Mittelwerte 1990-2020. https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mittelwerte/temp_9120_SV_html.html;jsessionid=E6DB33D2DC3DA5EB861F3380243D9BF1.live21064?view=naPublica-tion&nn=16102 [07.03.2024].
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (2024 b) (Hg.): Jahreszeiten. <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=101324&lv2=101304> [03.04.2024].
- Dikau, R.; Eibisch, K.; Eichel, J.; Meßenzehl, K.; Schlummer-Held, M. (2019): Geomorphologie. Berlin.
- Filippino, M. (2004): Über das Wesen von Eishöhlen und Schneeschächten. Eine kurze Einführung. In AGS-Info 2004 (2): 35-41.
- GeoPrecision (Hg.) (o.J.): Wireless Temperature Minilogger Datasheet and Manual. Ettlingen.
- Grebe, C.; Ringeis, J.; Pflitsch, A. (2008): Study of Temperature and Airflow in the Schellenberger Ice Cave (Berchtesgadener, Limestone Alps, Germany). In: Proceedings of 3rd International Workshop on Ice Caves (IWIC-III), Kungur Ice Cave, Perm Region, Russia: 26-29.
- Hannoschöck, N. (2018): Wärmeleitung und -transport. Grundlagen der Wärme- und Stoffübertragung. Grabs.
- Häckel, H. (2021): Meteorologie. 9., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Stuttgart.

Herwig, H.; Moschallski A. (2019): Wärmeübertragung. Physikalische Grundlagen und ausführliche Anleitung zum Lösen von Aufgaben. 4. Auflage. Hamburg.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2019): The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (2024) (Hg.): Bayern Atlas. <https://geoportal.bayern.de/bayernatlas/index.html?lang=de&topic=ba&bgLayer=atkis&catalogNodes=11,12,121,1217,1217330,12173304&layers=luftbild,e528a2a8-44e7-46e9-9069-1a8295b113b5&lon=13.00775&lat=47.68966&elevation=2136&heading=357.508&pitch=-10.068> [05.04.2024].

Mavlyudov, B. (2018): Geography of Cave Glaciation. In: Perşoiu, A.; Lauritzen, S. (Hg.): Ice Caves, Amsterdam: 209-220.

Meyer, C.; Pflitsch, A.; Holmgren D.; Maggi, V. (2014): Schellenberger Ice Cave (Germany): A Conceptual Model of Temperature and Airflow. Conference Paper at 6th International Workshop on Ice Caves at Idaho Falls.

Meyer, C.; Meyer, U.; Pflitsch, A.; Maggi, V. (2016): Analyzing airflow in static ice caves by using the calcFLOW method. In: The Cryosphere (10): 879-894.

Oke, T.; Mills, G.; Christen, A.; Voogt, J. (2017): Urban Climates. Cambridge.

Permafrost Subcommittee of National Research Council of Canada (1988): Glossary of Permafrost and Related Ground Ice Terms. In: NRC Technical Memorandum (142): S. 1-156.

Perşoiu, A.; Pazdur, A. (2011): Ice genesis and its long-term mass balance and dynamics in Scărișoara Ice Cave, Romania. In: Cryosphere 5 (1), 45–53.

Perşoiu, A.; Lauritzen, S. (2018): Introduction. In: Perşoiu, A.; Lauritzen, S. (Hg.): Ice Caves, Amsterdam: 3-4.

Perşoiu, A. (2018): Ice Caves Climate. In: Perşoiu, A.; Lauritzen, S. (Hg.): Ice Caves, Amsterdam: 21-32.

Pfiffner, A.; Engi, M.; Schlunegger, F.; Mezger, K.; Diamond, L. (2016): Erdwissenschaften. 2., korrigierten und aktualisierte Auflage. Bern.

Pflitsch, A. (2019): Bericht zur Forschungstätigkeit in der Schellenberger Eishöhle für das Jahr 2018. Bochum.

Pflitsch, A. (2020): Bericht zur Forschungstätigkeit in der Schellenberger Eishöhle für das Jahr 2019. Bochum.

Ringeis, J.; Grebe, C.; Pflitsch, A. (2008): Analysis of Ice Measurements in the Schellenberger Ice Cave in the German Alps. In: Proceedings of 3rd International Workshop on Ice Caves (IWIC-III), Kungur Ice Cave, Perm Region, Russia: 48-52.

Schön, J. (2011): Physical Properties of Rocks. A Workbook. Oxford & Amsterdam (= Handbook of Petroleum Exploration and Production 8).

Stober, I.; Bucher, K. (2020): Geothermie. 3. Aufl. Berlin.

Verein für Höhlenkunde Schellenberg e. V. (o.J.): Schellenberger Eishöhle. <https://eis-hoehle.net> [24.08.2023].

Verein für Höhlenkunde Schellenberg (Hg.) (2001): Die Schellenberger Eishöhle im Untersberg. Berchtesgaden.

Willems, W.; Schild, K.; Stricker, D. (2020) Formeln und Tabellen Bauphysik. Wärmeschutz - Feuchteschutz - Klima - Akustik - Brandschutz. 6., aktualisierte Auflage. Wiesbaden.

Zepp, H.; Harnischmacher, S.; Herget, J.; Kasielke, T. (2023) Geomorphologie. 8. Aufl. Paderborn.