

Wasser und Salz

Klimamessungen im prähistorischen Salzbergwerk Hallstatt und Herausforderungen für die Konservierung

Water and salt: Climate measurements in the Hallstatt Prehistoric Salt Mine and challenges for conservation

The Hallstatt Prehistoric Salt Mine is a very special landscape for findings. Through the salt-laden environment and the lack of oxygen and UV radiation, all the objects the miners left behind in the last millennium have been perfectly preserved and lend themselves well to analysis. At the same time, however, this means great challenges in restoration and conservation. In the mine, the findings and features are exposed to the pit climate, which is primarily influenced by humidity—the most important factor connected with salt. In addition, the climate is changed by the presence of humans during research work or tours. In 2021, extensive climate monitoring began in the mine to study the influence of the pit climate on the archaeological sites. The article describes the method and presents the initial results of the investigations.

Die prähistorischen Salzbergwerke von Hallstatt stellen in vielerlei Hinsicht eine sehr besondere Fundlandschaft dar. Durch den Bergbau der letzten 300 Jahre konnten über 100 archäologische Fundstellen im Bergwerk entdeckt werden. Diese stellen Teile großer Salzabbaukammern dar, welche nur dort sichtbar werden, wo sich neuzeitliches und prähistorisches Grubengebäude¹ zufällig miteinander verschneiden. Die ältesten Funde datieren ins späte Neolithikum, ca. 7000 Jahre vor heute, womit Hallstatt das älteste Salzbergwerk der Welt ist, in dem immer noch produziert wird. In der späten Bronze- und in der Eisenzeit nimmt der Salzabbau riesige Dimensionen an und erlangt überregionale Bedeutung. Die Schächte der Spätbronzezeit reichen bis in über 215 m Teufe. In der Hallstattzeit entstehen Abbaukammern mit über 20 m Höhe, bis zu 30 m Breite und einer Länge von über 300 m. Der durch den Salzhandel erwirtschaftete Reichtum wird im weltberühmten Gräberfeld, dem Bestattungsort der ältereisenzeitlichen Bergbaugemeinschaft, sichtbar. In der Urgeschichte erfolgt der Abbau des Steinsalzes stets „trocken“, im Gegensatz zum „nassen“ Lösungsabbau, wie er seit dem Mittelalter praktiziert wird.²



Abb. 1: Grabungsarbeiten unter Tage, Anlage eines Forschungsstollens in einer eisenzeitlichen Abbaukammer

Durch das Salz, den Luftabschluss und Schutz vor UV-Strahlung liegen im Bergwerk hervorragende Erhaltungsbedingungen für organische Funde vor. Deshalb sind alle Gegenstände, welche von den prähistorischen Bergleuten am Boden der Abbaukammern zurückgelassen wurden, außergewöhnlich gut erhalten und ermögli-

¹ Darunter versteht man die Gesamtheit der unterirdischen Hohlräume eines Bergwerkes, z. B. Stollen, Schächte, Schürfe, Laugwerke.

² F. E. Barth / H. Reschreiter, Prähistorische Bergbauspuren im Kernverwässerungswerk des Salzbergwerkes Hallstatt. Archon1, 2019, S. 6–11.



Abb. 2: links - Forschungs-
tollen durch bronzezeitliches
„Heidengebirge“, rechts –
eisenzeitliche Abbauspuren
an der Fundstelle Stüger-Werk

chen detaillierte Einblicke in prähistorische Lebens- und Arbeitswelten, wie sie nur an wenigen anderen Orten weltweit möglich sind. Seit 1960 erforscht und vermittelt das Naturhistorische Museum Wien in Kooperation mit der Salinen Austria AG und den Salzwelten diese besondere Fundlandschaft unter Tage. Ausgehend von den Zufallsfundstellen, wurden hunderte Meter an Forschungsstollen in die prähistorischen Abbaukammern vorgetrieben (Abb. 1), Erkundungsbohrungen durchgeführt und interdisziplinäre Untersuchungen vorgenommen. Das große Analysepotenzial durch die besonderen Erhaltungsbedingungen im Berg birgt auch eine große Verantwortung im Umgang mit den speziellen und oft einmaligen Fundgattungen. Gemeinsam mit Restaurator:innen wurden maßgeschneiderte Lösungen für die Restaurierung und Konservierung der großen Menge an organischen Funden entwickelt.³ Die herausragenden Erhaltungsbedingungen im Salzbergwerk und die damit verbundenen Erkenntnismöglichkeiten waren immerhin einer der ausschlaggebenden Gründe, welche zur Ernennung der Region Hallstatt-Dachstein/Salzkammergut zum UNESCO-Welterbe beigetragen haben.⁴

Aufgrund der Dimension der prähistorischen Abbaukammern kann nur ein kleiner Teil derselben ausgegraben werden. Der weitaus größte Teil bleibt *in situ*, zugänglich für weitere Erforschung, Beprobung mit immer neuen Methoden und zugänglich für Spezialführungen mit internationalem Publikum. Die aufgeschlossenen Bereiche umfassen Profile durch den prähistorischen Betriebsabfall, das sogenannte Heidengebirge, bereits in der Urgeschichte von der Oberfläche eingedrungenes „Tagmaterial“ sowie Originaloberflächen mit bronze- bzw. eisenzeitlichen Abbauspuren im Kernsalz. Letztgenannte sind von besonderer Bedeutung zur Erforschung der prähistorischen Abbautechnik (Abb. 2).

Für die Erhaltung dieser offenstehenden Bereiche stellen die klimatischen Bedingungen einen bedeutenden Faktor dar, für deren Untersuchung ein flächendeckendes Klima-Monitoring⁵ installiert wurde. Dadurch kann erfasst werden, inwiefern Luftbewegungen und klimatische Veränderungen durch Forschende und Besucher:innen die Fundstellen beeinflussen. Die Aufschlüsse der prähistorischen Salzbergwerke sind Teil des aktuellen Grubengebäudes und damit auch dem

3 Hans Reschreiter / Dorothea v. Miller / Carine Gengler / Silvia Kalabis / Nina Zangerl / Robert Fürhacker / Michael Grabner, Aus dem Salz ins Depot. Organische Funde aus den prähistorischen Bergwerken von Hallstatt, in: Österreichische Zeitschrift für Kunst- und Denkmalpflege 68, Heft 3/4, 2014, S. 354–367 (Reschreiter et al. 2014).

4 Daniel Brandner / Kerstin Kowarik / Hans Reschreiter / Johann Rudorfer / Georg Tiefengraber, 7000 Jahre Salz – Erforschung und Vermittlung des UNESCO-Welterbes Hallstatt-Dachstein/Salzkammergut, in: Mitteilungen der Anthropologischen Gesellschaft Wien 151/152, 2022, S. 71 f.

5 Reschreiter et al. 2014, S. 363.



Abb. 3: Trocknergebäude für einziehende Wetter vor dem Kaiser-Josef-Stollen

dort vorherrschenden Grubenklima unterworfen. Die klimatischen Verhältnisse in Grubenbauen werden in der Hauptsache von der Temperatur und vom Feuchtigkeitsgehalt der einströmenden Luft bestimmt. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der absoluten

Werte und deren Schwankungen sehr wesentlich von der Temperatur und vom Feuchtigkeitsgehalt der atmosphärischen Luft.⁶ Grundsätzlich herrscht im Salzbergwerk Hallstatt ganzjährig eine Temperatur von 7–8 °C vor. Ein großes Thema für Funde und Befunde stellt, wie später genauer ausgeführt wird, die relative Luftfeuchtigkeit dar.

Aufgrund der für den aktiven Bergbau sowie für die touristische Nutzung benötigten Frischluftzufuhr ist das Grubengebäude anstatt eines natürlichen Wetterzuges⁷ mit einer künstlichen Bewetterung⁸ versehen. Das heißt, die Frischluft wird von der Oberfläche mittels Ventilatoren ins Grubengebäude geleitet und wieder kontrolliert abgeführt. Zur Optimierung der einziehenden Wetter wurde 2021 durch die Salinen Austria AG ein Trocknergebäude installiert (Abb. 3). Auf Basis eines 3D-Scans aller für die prähistorischen Fundstellen relevanten Stollen, Schächte und Schürfe wurde zunächst der vorherrschende Wetterzug kartiert und aussagekräftige Plätze für die Positionierung der Klimamessgeräte definiert (Abb. 4).

Wie an der Beschreibung des Wetterstromes ersichtlich ist, stellt ein Bergwerk, insbesondere ein Salzberg-

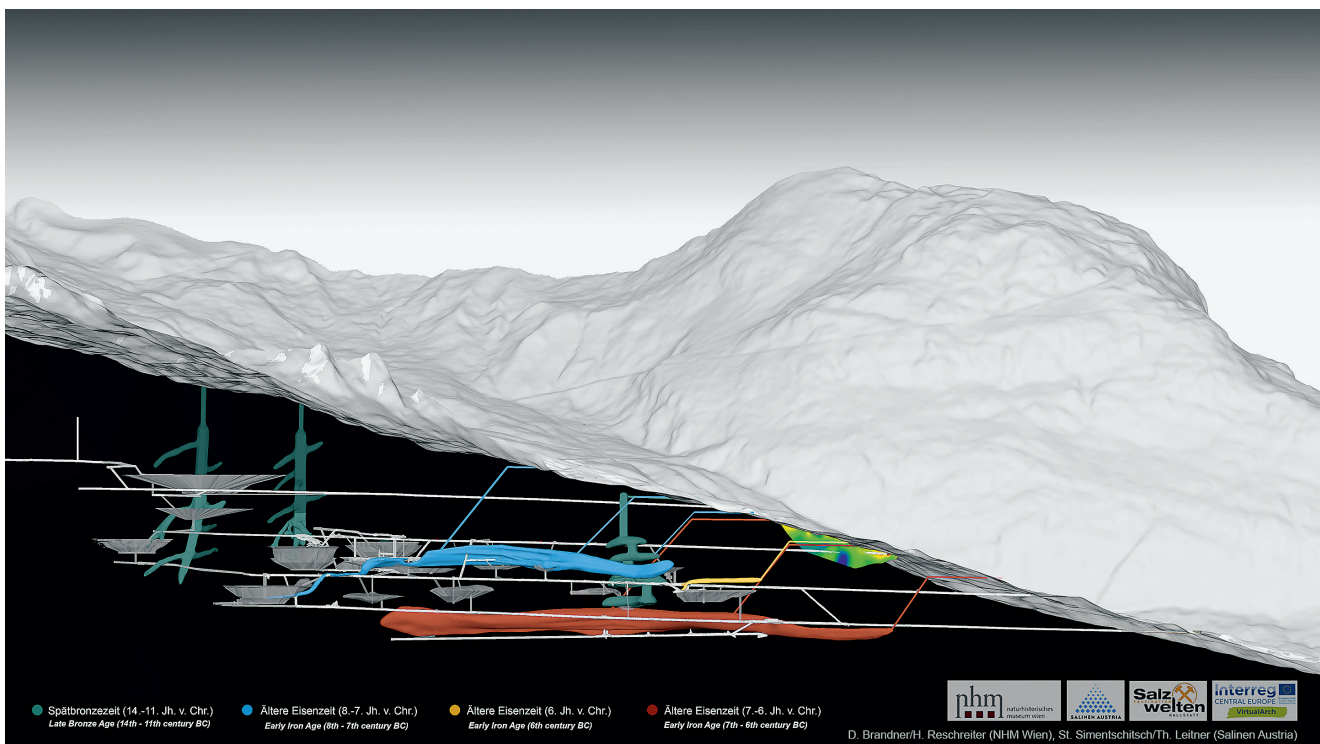


Abb. 4: Rekonstruktion der prähistorischen Abbaukammern im Salzbergwerk Hallstatt.

⁶ Alexander Alexandrowitsch Skotschinski / W. B. Komarow, Grubenbewetterung. Berlin 1956, S. 148 (Skotschinski / Komarow 1956).

⁷ Ludwig Janiss, Technisches Hilfsbuch für den österreichischen Salzbergbaubetrieb unter besonderer Berücksichtigung der Wässerungskunst und deren Kontrolle, Wien 1934, S. 244 f.

⁸ Skotschinski / Komarow 1956, S. 171.

werk, climatechnisch eine besondere Herausforderung dar, die sich von den üblichen Klimabewertungen im Rahmen der präventiven Konservierung unterscheidet. Dies ist vor allem auch auf die Bestandteile des Bergwerkes selbst zurückzuführen. Das Salz, das einen zentralen Anteil an der Gesteinsmatrix vor Ort ausmacht, ist prinzipiell hygroskopisch. Liegt hohe Luftfeuchtigkeit vor, muss insbesondere die Deliqueszenz beachtet werden. Deliqueszenz ist der *„Vorgang, der eintritt, wenn der Dampfdruck der gesättigten wässrigen Lösung eines Stoffes geringer ist als der Dampfdruck des Wassers in der Umgebungsluft. Wenn der Wasserdampf von der reinen festen Verbindung aufgefangen wird, bildet sich ein Gemisch aus dem Feststoff und der Flüssigkeit oder eine wässrige Lösung der Verbindung, bis der Stoff aufgelöst ist und sich im Gleichgewicht mit seiner Umgebung befindet; zu diesem Zeitpunkt entspricht der Dampfdruck des Wassers über der wässrigen Lösung dem Partialdruck des Wassers in der mit ihr in Kontakt stehenden Atmosphäre. Ein kristallines Salz Aerosol zerfließt in der Atmosphäre, wenn die relative Luftfeuchtigkeit einen charakteristischen Wert, den sogenannten Deliqueszenzpunkt, überschreitet.“*⁹ Das bedeutet vereinfacht ausgedrückt: *„Wird ein Kristall eines reinen Salzes, das keinen Hydratationsprozessen unterliegt, einer steigenden relativen Luftfeuchtigkeit ausgesetzt, so nimmt er ab einer für dieses Salz charakteristischen Luftfeuchtigkeit, der Deliqueszenzfeuchtigkeit (DRH), Wasserdampf auf und bildet eine Lösung. Bei weiterer Erhöhung der Luftfeuchtigkeit wird mehr Wasser aufgenommen und die Lösung verdünnt sich stark. Die Deliqueszenzfeuchtigkeit beschreibt also das Phasengleichgewicht zwischen einem Salz in festem, kristallinem Zustand und einer Salzlösung, gleichzeitig auch das Gleichgewicht zwischen flüssigem Wasser und Wasserdampf.“*¹⁰

Für das Salzbergwerk wichtig ist der Umstand, dass oberhalb der Deliqueszenzfeuchte das Salz in kristalliner Form nicht existieren kann bzw. dass bei hohen Luftfeuchtigkeitswerten Deliqueszenz auftritt. Die Deliqueszenzfeuchte von NaCl bei der Durchschnittstemperatur im Bergwerk liegt bei etwa 75,6 % rF.¹¹

Hierzu ist allerdings anzumerken, dass dieser Wert nur modellhaft verstanden werden kann, da vor Ort eine Mischung unterschiedlicher Salze mit unterschiedlichen Deliqueszenzfeuchten vorliegt. Oberhalb der Deliqueszenzfeuchte ist demnach mit einer Durchfeuchtung sowohl der salzhaltigen Gesteinsoberfläche als auch naturgemäß der eingeschlossenen archäologischen Funde zu rechnen.

Dabei lassen sich primär zwei Bereiche abgrenzen, wo dieses Phänomen aus konservatorischer Sicht einen Schadensfaktor darstellt: erstens bei der Gesteinsoberfläche mit prähistorischen Abbauspuren und zweitens bei freiliegenden bzw. oberflächennahen Funden aus organischem Material.

Die größte Gefahr bei Letztgenanntem geht dabei von biologischem Befall aus. Speziell zelluloseabbauende Pilze stellen bei Holzfunden eine ernstzunehmende Gefahr dar. Ein Befall mit diesen Pilzen kann auftreten, wenn ausreichend verfügbares Wasser vorhanden respektive die Luftfeuchtigkeit hoch genug ist. Für das Salzbergwerk Hallstatt liegt eine konkrete Untersuchung zur potentiell schädlichen Mikroflora vor. Anlassfall der Untersuchung war der Transport einer bronzezeitlichen Stiege, bei dem Spuren von Pilzmycel entdeckt wurden.¹² Durch genetische Analysen konnten dabei unter anderem 26 Pilzarten nachgewiesen werden.¹³ Aus konservatorischer Sicht muss besonders den salztoleranten und zelluloseabbauenden Pilzarten das größte Gefährdungspotential zugeschrieben werden. Die Kontrolle des Befalls der bisher aufgetretenen Pilze konnte mithilfe von gesättigten Salzlösungen (NaCl in Wasser) erfolgreich durchgeführt werden. Somit ist eine einfache Bekämpfung ohne das Einbringen von Fremdstoffen möglich. Der zweite Bereich, in dem die Deliqueszenz einen bedeutenden Schadensfaktor darstellt, ist wie bereits erwähnt die potentielle Auswirkung derselben auf die Gesteinsoberfläche mit prähistorischen Abbauspuren, wie etwa in der sog. Herzenkammer der Fundstelle Stügerwerk. Hier würde eine Verflüssigung der Salzkristalle an der Oberfläche zur graduellen Auflösung ihrer charakteristischen Merkmale bzw. zum fortschreitenden Informationsverlust führen.

9 „deliquescence“, in: IUPAC Compendium of Chemical Terminology, 3rd ed. International Union of Pure and Applied Chemistry; 2006. Online version 3.0.1, 2019. <https://doi.org/10.1351/goldbook.D01582> (18.12.2024).

10 Michael Steiger, Deliqueszenzfeuchte, in: Salzwiki, <https://www.salzwiki.de/index.php/Deliqueszenzfeuchte> (18.12.2024).

11 Lewis Greenspan, Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions, in: JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards – A. Physics and Chemistry, Vol. 81 A, No.1, 1977, S. 92.

12 Guadalupe Piñar / Dennis Dalnodar / Christian Voith / Hans Reschreiter / Katja Sterflinger, Biodeterioration Risk Threatens the 3100 Year Old Staircase of Hallstatt (Austria): Possible Involvement of Halophilic Microorganisms, 2016, PLOS ONE 11(2): e0148279. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0148279>.

13 Ebenda.

Zusammenfassend betrachtet, stellt Wasser in Form von Luftfeuchtigkeit beziehungsweise in Form von (hierdurch) biologisch verfügbarem Wasser die größte konservatorische Herausforderung im prähistorischen Salzbergwerk dar.

Um Konzepte zur präventiven Konservierung im Bergwerk zu erstellen, ist daher ein belastbarer Überblick über die Klimasituation essentiell. Aus diesem Grund sind nach Initiative des damaligen Grabungsleiters Johann Reschreiter im Jahr 2021 Datenlogger an ausgewählten Punkten im Bergwerk installiert worden. Aufgrund der chloridreichen Umgebung und erwartbarer hoher Luftfeuchtigkeit mussten für diese technisch herausfordernde Umgebung entsprechend geeignete Geräte ausgewählt werden. Eine essentielle Zielsetzung bestand darin, mit insgesamt acht Geräten den Luftstrom bzw. die Bewetterung nachzuverfolgen. Im Vorfeld wurden die Datenlogger so programmiert, dass alle fünf Minuten die zwei Messwerte Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit aufgezeichnet werden. Das erlaubt es, noch gut einzelne Ereignisse abzubilden, und ermöglicht hinsichtlich der Speicher- und Akkukapazität gleichsam eine ausreichend lange Standzeit. Um repräsentative Ergebnisse zu erhalten, sah der Plan eine mindestens einjährige Messreihe vor. Diese konnte nach einem Jahr erfolgreich fortgeführt werden, wobei bestimmte Standorte zur besseren Aufklärung gewechselt wurden. Nach der ersten konkreten Analyse der Daten dienen die Datenlogger weiterhin als Instrumente zum fast lückenlosen Monitoring der Klimasituation im Bergwerk. Da insbesondere bei der

Messung von Luftfeuchtigkeit technisch bedingte Abweichungen der Messwerte zu erwarten sind, erfolgen in bestimmten Zeitabständen Überprüfungen der Werte in kontrollierter Atmosphäre. Hierbei wird das Prinzip der Delinquenz genutzt, um in einem atmosphärisch versiegelten Luftvolumen über einer gesättigten Lösung eines Salzes Messungen durchzuführen. Die Verwendung unterschiedlicher Salze mit unterschiedlichen Deliqueszenzfeuchten erlaubt eine sehr zuverlässige Einschätzung der Messungenauigkeit. Diese Kontrolle ist speziell aufgrund der beschriebenen Umgebung im Salzbergwerk wichtig.

Eine drei Jahre umfassende Messreihe konnte erfolgreich zur Analyse des Wetterstromes herangezogen werden. Bedeutend ist die verhältnismäßig konstante Klimasituation in den Bereichen des prähistorischen Bergwerkes wie etwa in der beispielhaft hier angeführten Fundstelle Stügerwerk (siehe Abb. 5). Die Temperatur im Berg bewegt sich ganzjährig zwischen ca. 6,5 und 8 Grad mit einem Mittel bei etwa 7 °C. Anhand der Analyse des Wetterstromes kann nachvollzogen werden, dass sich die sehr hohe Luftfeuchtigkeit direkt nach dem Wettertrocknergebäude im Verlauf des Wetterstromes senkt und in den Bereichen des prähistorischen Bergwerkes niedrigere und konstantere Werte annimmt. Bemerkenswert ist, dass sich in diesen konstanten Werten punktuell bestimmte Muster abzeichnen. Bei genauerer Betrachtung dieser Schwankungen ist ein kurzzeitiger Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit, gefolgt von einem ebenso kurzzeitigen Fall unter den sonst relativ konstanten Wert zu

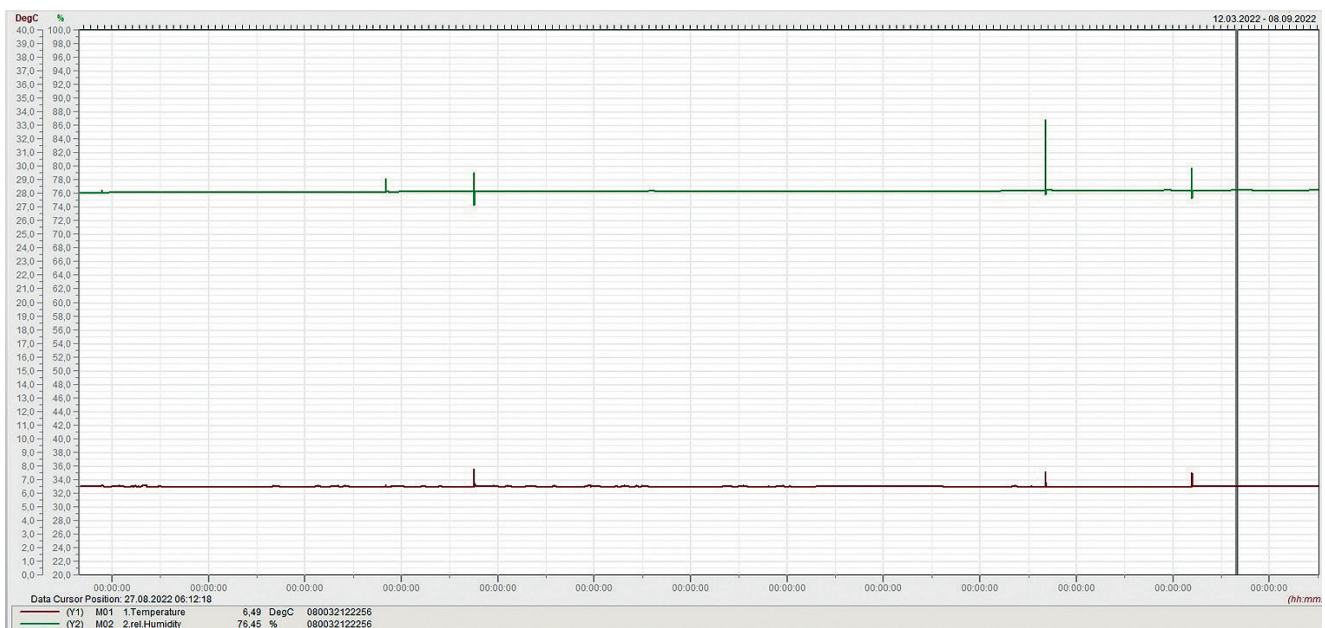


Abb. 5: Auszug aus dem Klimadiagramm des Stüger-Werkes

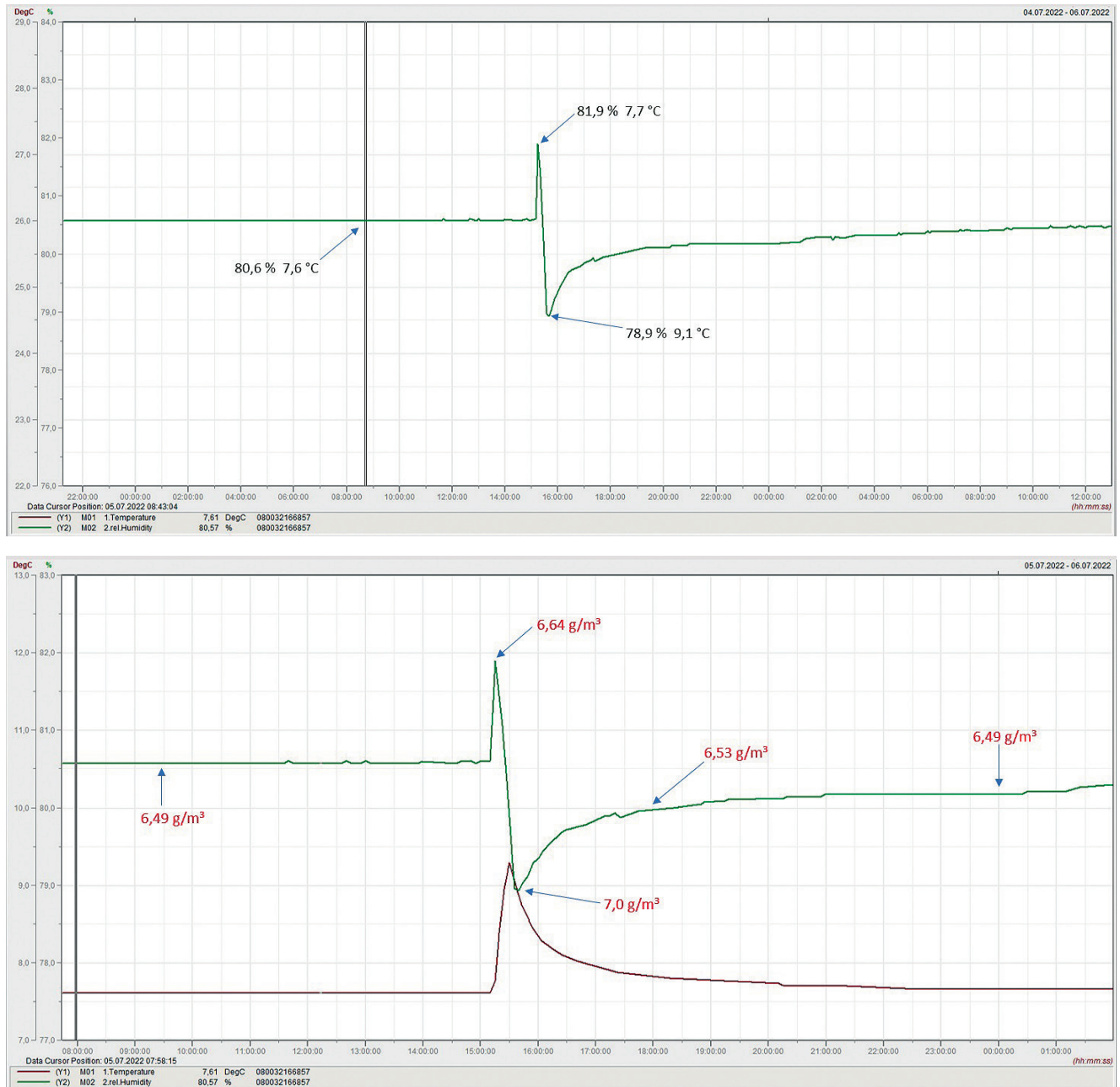


Abb. 6a und b: Darstellung einer charakteristischen Klimaschwankung im prähistorischen Salzbergwerk

verzeichnen. Im gezeigten Beispiel (Abb. 6a und b) findet der Vorgang innerhalb einer Stunde statt. Wird die Temperatur miteinbezogen, ergibt sich ein eher ungewöhnliches, aber aussagekräftiges Bild. Im Falle einer natürlichen Schwankung wäre zu erwarten, dass der Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit mit einer sinkenden Temperatur korreliert. Da hier sowohl die Temperatur als auch die Luftfeuchtigkeit steigen, kann davon ausgegangen werden, dass sich Personen im betreffenden Bereich aufgehalten haben. Um dieses Bild

besser zu verstehen, hilft es, die absolute Luftfeuchtigkeit, also die tatsächliche stoffliche Menge von Wasser im Raum, auszurechnen. Hierdurch zeigt sich, dass die Erhöhung der Temperatur ungefähr zeitgleich mit dem Wassereintrag stattfindet. Die Wärme- und Wasserdampf-abgabe pro Person bei langsamem Gehen beträgt bei 18 °C etwa 190 Watt und 95 g/h.¹⁴ Für die Situation im Bergwerk können diese Werte nicht ohne Weiteres bestimmt oder übertragen werden, da sie neben der mittleren Raumlufttemperatur und dem Aktivitätsgrad

14 Günter S. Hilbert, Samlungsgut in Sicherheit, 3., vollst. überarb. und erw. Aufl., Berlin 2002, S. 142.



Abb. 7: Bronzezeitliche Holzstiege in diffusionsdichter Großraumvitrine in der Fremdenbefahrung

auch unter anderem von der relativen Luftfeuchtigkeit an der Person und dem Bekleidungsgrad abhängen.¹⁵ Die Aufzeichnungen der Datenlogger erlauben es aber, den Einfluss von Personen auf die Klimasituation im Berg bzw. den Wärme- und Luftfeuchtigkeitseintrag grob einzuschätzen. Durch die Dokumentation der Tätigkeiten im Bergwerk können Ereignisse wie Führungen etc. mit den Daten der Datenlogger abgeglichen und zur Auswertung herangezogen werden.

Im gezeigten Beispiel ist sehr gut zu erkennen, wie sich die Temperatur und Luftfeuchtigkeit wieder den sehr konstanten Werten annähern. Das zeigt auch die Bedeutung der Luftwechselrate bzw. der Bewetterung. Sofern nun archäologische Funde im Bergwerk exponiert sind und gleichzeitig mit einem großen Durchsatz an Besucher:innen zu rechnen ist, müssen hinsichtlich der Klimasituation entsprechende Maßnahmen getroffen werden.

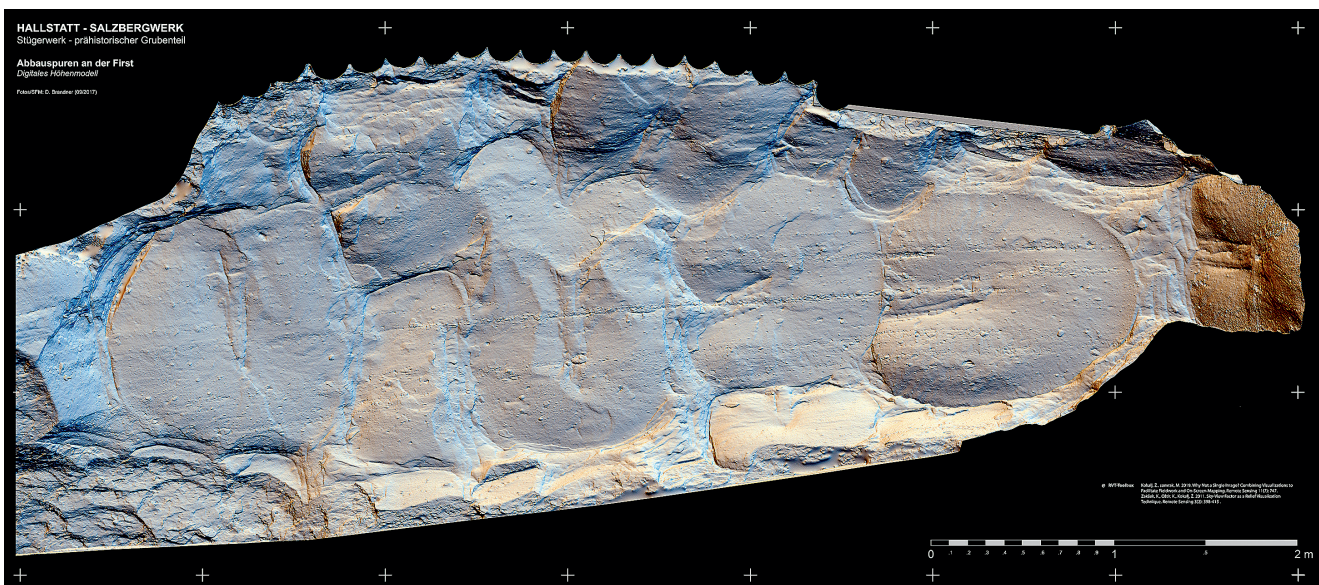


Abb. 8: Hochauflösende Dokumentation der eisenzeitlichen Abbauspuren im Stüger-Werk

¹⁵ Norbert Nadler, Zur Personenwärme bei der Kühllastberechnung nach VDI 2078, in: HLH, Bd. 56, Nr. 7, 2005, S. 2.

Das betrifft im Hallstätter Salzbergwerk jenen Bereich, in dem die bronzezeitliche Stiege ausgestellt ist. Als eine der Hauptattraktionen ist sie Bestandteil der regulären Führungen und muss dementsprechend geschützt werden.

Die Stiege befindet sich daher in einer quasi versiegelten Großraumvitrine (Abb. 7), die, wie auch der Besucherraum davor, permanent mittels mehrerer Datenlogger überwacht wird. Diese Datenlogger sind über ein Computersystem miteinander vernetzt. Steigt die relative Luftfeuchtigkeit über die festgelegte Grenze von 74 %, werden Alarm-SMS an die verantwortlichen Personen ausgesendet.

Sofern eine Isolierung wie im Falle der Stiege nicht möglich ist, muss die gesamte Bewetterung analysiert werden. Auf diese Weise können gegebenenfalls Anpassungen getroffen werden, bevor kritische Bereiche, d. h. Luftfeuchtigkeitswerte, die zu nahe an der Deliquescenzfeuchte liegen, erreicht werden. Neben der konsequenten Aufzeichnung der Klimadaten ist es dabei wichtig, auch visuelle Begutachtungen wie etwa der Bereiche mit prähistorischen Abbauspuren in das Monitoring miteinzubeziehen. Darüber hinaus erfolgt ein Monitoring der prähistorischen Oberflächen über hochauflösende, fotogrammetrische Dokumentationen (Abb. 8). Die gesammelten Daten aus dem Bereich des prähistorischen Bergwerkes werden als Bewertungsgrundlage der Salinen Austria AG zur Verfügung gestellt, die für die Bewetterung des Bergwerkes



Abb. 9: Auslesen der Datenlogger im prähistorischen Bergwerk

verantwortlich ist. Das Monitoring der klimatischen Bedingungen ist damit einer der vielen Bausteine, die notwendig sind, um gemeinsam mit der Salinen Austria AG den speziellen Herausforderungen der Erhaltung des prähistorischen Bergwerkes gerecht zu werden.