

Fachbeitrag

Michel Bonvin und Andrea Giovannini

Passives Management des Klimas eines Archivlagers

Passive Management of the Climate of an Archive Storage Facility

Prinzipien und Fallbeispiel

Principles and Case Study

<https://doi.org/10.1515/abitech-2022-0032>

Zusammenfassung: Um das Klima eines Archivlagers passiv zu steuern, müssen die Innentemperatur und die Luftfeuchte je nach Jahreszeit variieren (z. B. 14 °C und 45 % im Winter, 22 °C und 55 % im Sommer). Eine mechanische Belüftung und eine minimale Heizung reichen dann aus, um die Raumfeuchte zu kontrollieren. Die Prinzipien des Low-Tech-Klimamanagements werden hier vorgestellt und mit Hilfe der Erfahrungen des Staatsarchivs Wallis in Sion illustriert.

Schlüsselwörter: Passives Archivlager, Klimasteuerung, Low-Tech

Abstract: To passively control the climate of an archive storage facility, the indoor temperature and humidity must vary with the seasons (for example 14 °C and 45 % in winter, 22 °C and 55 % in summer). Mechanical ventilation and a minimal heating system are then sufficient to control the room humidity. We present here the principles of low-tech climate management and illustrate them with the help of the experiences of the Valais State Archives in Sion.

Keywords: passive archive storage facility, climate control, low-tech

1 Spezifitäten eines Archivmagazins

Sicherheit der Kulturgüter: Ein Archivmagazin muss optimalen Schutz vor Risiken wie Erdbeben, Bränden, Überschwemmungen und Wasserunfällen, Diebstahl und Vandalismus bieten. Die Qualität der Konservierung ist auch von den klimatischen Werten in den Magazinen

stark abhängig. Diese müssen dauerhaft stabil, möglichst wenig durch Schwankungen des Außenklimas oder durch äußere Ereignisse beeinflusst sein. Eine geringe Abhängigkeit von der Energieversorgung ist dabei ein langfristiger Vorteil. Ohne diese Sicherheitsgarantien erfüllt ein Archivmagazin seine grundlegende Funktion, d. h. die Langzeitarchivierung von Dokumenten, nicht.

Nutzungsdauer: Die Nutzungsdauer eines Archivs übersteigt bei weitem die erwartete Lebensdauer moderner Gebäude. Diese lange Dauer stellt zusätzliche Anforderungen an die Qualität der verwendeten Materialien und Bautechniken. Alle verwendeten Materialien müssen dauerhaft ohne größere Schwierigkeiten und ohne Gefährdung der Dokumentensicherheit reparierbar sein (keine Arbeit in mit Dokumenten gefüllten Magazinen); dies betrifft insbesondere schwer zugängliche Gebäudeteile, etwa solche zur Abdichtung von Gebäudeteilen gegen außen. Die Anfangsleistung der Magazine muss über die gesamte Nutzungsdauer des Gebäudes stabil bleiben.

Wirtschaftlichkeit: Die Kosten für Bau und Betrieb eines Archivmagazins müssen sich in einem vertretbaren Rahmen halten, denn es ist offensichtlich, dass unsere Gesellschaft es sich nicht leisten kann, unbegrenzt in den Erhalt von Kulturgut zu investieren. Gebäude mit reduziertem technologischem Niveau haben damit gegenüber High-Tech-Gebäuden einen Vorteil: Letztere sind insbesondere unter Berücksichtigung der Betriebskosten deutlich teurer und weisen zusätzliche Schwächen im Zusammenhang mit ihrer technologischen Komplexität und ihrer Energieabhängigkeit auf.

Konzept von Low-Tech-Magazinen: Ein Low-Tech-Archivmagazin ist dadurch charakterisiert, dass die Sicherheit der Sammlungen und die gewünschten Klimawerte weitestgehend durch die spezifischen Qualitäten der Gebäudehülle erreicht werden, während die installierte Technik nur eine Nebenrolle spielt. Grundsätzlich bietet

ein Low-Tech-Magazin auch bei einem massiven Ausfall der installierten Technik oder der Energieversorgung zumindest akzeptable, wenn nicht sogar gute Konservierungsbedingungen.

Diese Grundidee umfasst die Prinzipien der Einfachheit und Solidität: Diese beiden Aspekte stehen in direktem Zusammenhang zueinander und sollen die Auswahl von Materialien und technischen Systemen ständig leiten.

Zielwerte für das Innenklima: Die Standards, die Zielwerte für Magazine von Archiven oder anderen Kulturgüterinstitutionen definieren, haben sich in den letzten Jahren stark entwickelt. Die Idee eines idealen Klimas, das ganzjährig praktisch konstant ist (z. B. Temperatur $(18 \pm 1)^\circ\text{C}$, relative Luftfeuchte $(50 \pm 5) \%$) wurde durch die Idee eines zwischen definierten saisonalen Werten oszillierenden Klimas ersetzt. Der Standard ASHRAE 2003 (Variationsfelder AA, A oder B für verschiedene Kulturgüter) definierte erstmals die Prinzipien. Die Zielwerte für die Winter- und Sommersaison unterscheiden sich erheblich in Bezug auf Temperatur und Luftfeuchte, während die Schwankung dieser Werte so definiert ist, dass kurzfristig ein stabiles Klima erreicht wird. Auf Basis dieser Norm können folgende Zielwerte für die Temperatur und die relative Feuchte von Archivmagazinen und für deren kurzfristige Schwankungen festgehalten werden:

- Winterklima: $(15 \pm 1)^\circ\text{C}$, $(45 \pm 5) \%$
- Sommerklima: $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$, $(50 \pm 5) \%$
- Tagesschwankung: $\pm 0,5^\circ\text{C}/24 \text{ h}$, $\pm 3 \%/24 \text{ h}$.¹

Die verschiedenen aktuellen Standards und Empfehlungen weisen einige Variationen dieser Prinzipien auf, die weiterhin etabliert sind. Zu beachten ist jedoch, dass bestimmte Arten von Kulturgütern besondere klimatische Werte erfordern. So benötigen audiovisuelle Träger grundsätzlich ein konstant kühles und trockenes Klima, Metalle ein konstant trockenes Klima usw. Diese besonderen Zielwerte können grundsätzlich nur durch ein herkömmliches Klimamanagementsystem mit Klimaanlage erreicht werden.

2 Klimakonzept eines Low-Tech-Magazins

Ein Low-Tech Magazin soll prinzipiell in der Lage sein, die Sollwerte für das Innenklima auf eine einfache, zuverlässige und kostengünstige Weise einzuhalten; deswegen soll

die installierte Technik minimiert werden, und die Zielwerte des Innenklimas sollen so gewählt werden, dass die Spannungen zwischen dem Außenklima und dem Raumklima so weit wie möglich reduziert werden, während die mit den konservatorischen Anforderungen vereinbaren Werte streng eingehalten werden.

Eine gute Kurzzeitstabilität (Tagesstabilität) der raumklimatischen Werte ist unerlässlich, unabhängig von der Art der konservierten Güter. Für die überwiegende Mehrheit der Objekte auf einem organischen Träger (z. B. Papier- oder Pergamentbücher und viele andere Kulturgüter) können aber langsame Temperatur- und Feuchteschwankungen ohne Unannehmlichkeiten in Kauf genommen werden. Gerade diese Freiheit in der Wahl der Winter- und Sommerklimawerte wird das Low-Tech-Magazin nutzen, um Spannungen zwischen Innen- und Außenklima so weit wie möglich zu reduzieren. Grundsätzlich gilt, dass der Wert des Wassergehalts der Raumluft ganzjährig dem der Außenluft möglichst nahekommen soll. Ein unkontrollierter Luftaustausch zwischen innen und außen hat dann nur geringe Auswirkungen auf die Stabilität des Raumklimas. Und sogar die natürlichen Schwankungen der Außenluftfeuchte, die je nach Wetterlage (sonnig und trocken oder bewölkt und regnerisch) erheblich sind, können genutzt werden, um das Raumklima zu trocknen oder zu befeuchten: Es genügt, rechtzeitig zu lüften.

Die gewünschte Nähe zwischen dem Wassergehalt (absolute Feuchte) der Außenluft und dem der Innenluft kann für fast alle europäischen Klimazonen erreicht werden, vorausgesetzt, dass eine gute Flexibilität bei der Wahl der Temperatur im Inneren des Magazins gegeben ist. Als Zielwerte für die relative Luftfeuchte im Winter und Sommer werden hier beispielsweise 42 % und 55 % genommen. Tabelle 1 zeigt die Größenordnungen der Innentemperaturen, damit die Kontrolle der Feuchte innerhalb des Magazins allein durch Belüftung erreicht werden kann. Es zeigt sich, dass dies für Paris, Bern, London oder Berlin durchaus mögliche Temperaturen sind, während sie für Stockholm oder Helsinki im Winter eher darunter und für Rom im Sommer deutlich darüber liegen dürften.

Abbildung 1 zeigt für Berlin die von der METEONORM-Datenbank² angegebene Jahres-Entwicklung der Außenluftfeuchte und die Werte der Innenluftfeuchte, die den in Tabelle 1 angegebenen Winter- und Sommertemperaturen und der Winter- und Sommerfeuchte von 42 % und 55 % entsprechen.

¹ Es sei darauf hingewiesen, dass die Archivschachteln diese Schwankungen immer noch stark dämpfen, ebenso wie die Einbände von Büchern.

² Meteotest AG, Bern, Schweiz. Siehe: <https://meteonorm.com> (30.05.2022).

Tab. 1: Optimale Werte der Winter- und Sommertemperaturen in Innenräumen, die zusammen mit relativen Luftfeuchte-Werten von 42 % im Winter und 55 % im Sommer eine Minimierung des Unterschieds zwischen den absoluten Luftfeuchten im Innen- und Außenbereich ermöglichen. In Sion befinden sich die Magazine des Walliser Staatsarchivs, die in diesem Artikel als Beispiel vorgestellt werden

	Rom	Paris	Bern	London	Berlin	Stockholm	Helsinki	Sion
T_Winter [°C]	19	18	15	18	14	11	9	14
T_Sommer [°C]	27	22	23	21	22	21	22	23

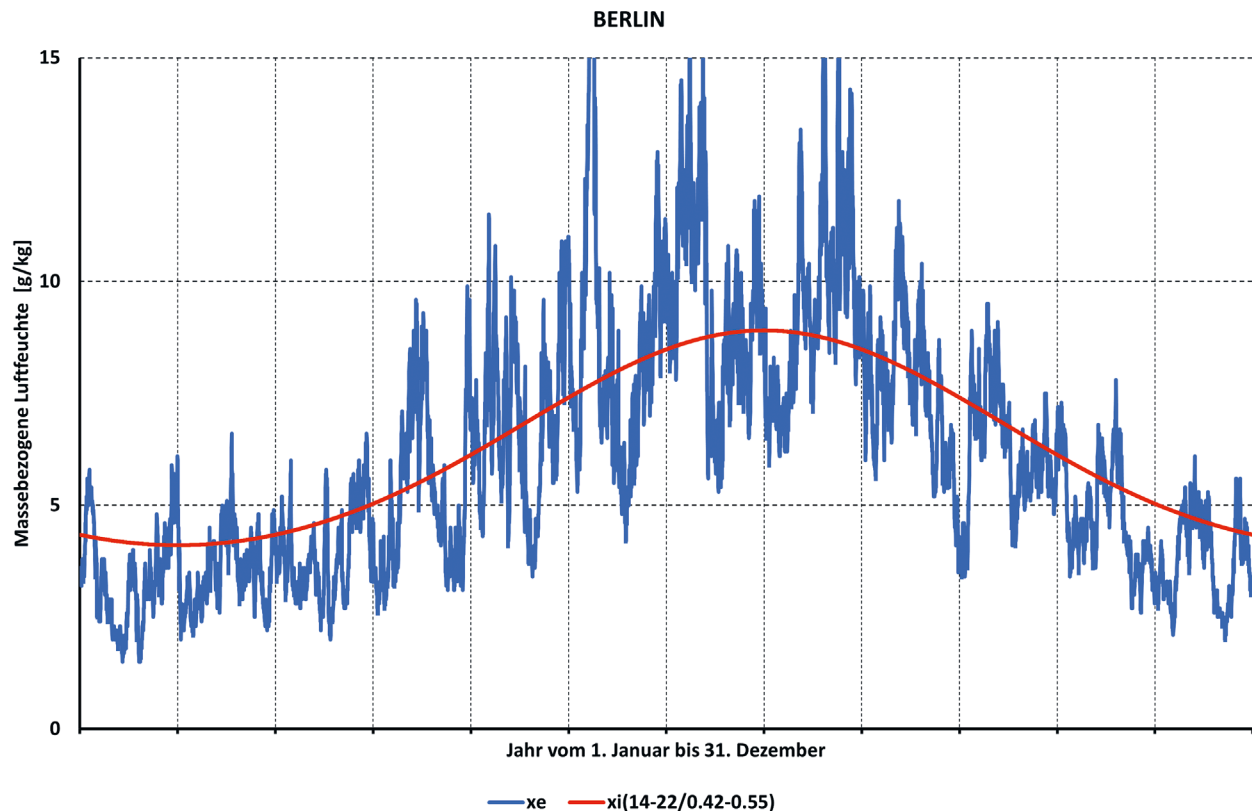


Abb. 1: Zeitliche Entwicklung der absoluten Feuchte x_e der Außenluft, wie sie von METEONORM für Berlin auf Stundenbasis angegeben wird, und der absoluten Feuchte x_i der Innenluft, die den winterlichen Sollwerten von 14 °C für die Temperatur und 42 % für die relative Luftfeuchte und Sommerwerten von 22 °C und 55 % entspricht. Für das Magazin erfolgt der Übergang von den Winterwerten zu den Sommerwerten sinusförmig

Es ist ersichtlich, dass es unabhängig vom betrachteten Monat Zeiträume gibt, in denen die Außenluftfeuchte höher als die gewünschte Innenluftfeuchte ist, und Zeiträume, in denen die Außenluftfeuchte niedriger als die Innenluftfeuchte ist. Genau das ist nötig, um die Raumluftfeuchte durch Lüftung regulieren zu können: Wenn die Raumluft im Vergleich zum Sollwert zu feucht und die Außenluft trockener (in absoluter Feuchte) ist, wird die Lüftung aktiviert. Dasselbe gilt, wenn die Innenluft zu trocken und die Außenluft feuchter ist. In allen anderen Fällen wird die Lüftung unterbrochen.

Damit das oben skizzierte Prinzip der Raumluftfeuchterege- lung funktionieren kann, ist es notwendig, auf ein elementares mechanisiertes Lüfterneuerungssystem mit geringer Flussmenge (Größenordnung 0.5 Volumen/Std) zu verfügen. Gleichzeitig muss die Raumheizung fähig sein, die Winterwerte der Innenraumtemperatur über dem Mindestwert (z. B. 14 °C für Berlin) zu halten und die Magazine wieder auf die gewünschten Sommertemperaturen zu bringen. Jegliches Befeuchtungs-, Entfeuchtungs- und Kühlungs- system ist damit überflüssig. Zuerst muss aber sichergestellt werden, dass der Raum ausreichend gegen

das unkontrollierte Eindringen von Außenluft abgedichtet ist, so dass das Magazin mehrere Tage ohne Lüfterneuerung überstehen kann, ohne dass die Raumluftheuchte zu stark vom Sollwert abweicht.³

3 Planung eines Low-Tech-Magazins

Mehr noch als bei einem traditionellen Projekt spielt beim Bau eines Low-Tech-Magazins die Reflexion in der Vorprojektphase eine zentrale Rolle. Eine reduzierte Technik schränkt die Korrekturmöglichkeiten des Magazin-Innenklimas ein. Dies bedeutet, dass die Faktoren, die dieses Klima beeinflussen und die während der Bauphase noch kontrolliert werden können, frühzeitig untersucht und optimal aufeinander abgestimmt werden müssen. Diese Arbeit ist multidisziplinär und kollegial, da alle Anforderungen, Sichtweisen und Fragestellungen integriert und zufriedenstellend beantwortet werden müssen. Architektinnen und Architekten, Bauingenieurinnen und -ingenieure, Bauphysiker und -physikerinnen, HKL-Ingenieurinnen und -Ingenieure sowie Konservierungsberater und -beraterinnen sind die Hauptpartner in dieser Phase des Projekts.

Eine zentrale Rolle spielt dabei die Modell-Bildung durch die Physik. Ziel ist es, unter Berücksichtigung aller Projektspezifika zu prüfen, ob es möglich ist, die raumklimatischen Parameter nur mit Hilfe von Low-Tech-Anlagen in den gewünschten Wertebereichen zu halten. Konkret geht es dabei um die stündliche Ermittlung der Wärmestrombilanz: Wärmestrom durch die Hülle des Magazins, interne Wärmelasten in Verbindung mit Anwesenheit von Personen, Beleuchtung, Aktivität des Zuluftventilators, Sonneneinstrahlung, Wärmeströme in Verbindung mit Wärmespeicherung und Ausspeicherung in der Masse des Gebäudes oder in der Masse des Archivmaterials. In ähnlicher Weise geht es darum, die Bilanz der Feuchteströme stundenweise zu ziehen: Wasserdampfströme, die mit der Austrocknung der Strukturen der Magazine, der Lüfterneuerung, der Anwesenheit von Menschen und der in der Masse des Gebäudes oder in derjenigen des gelagerten Archivmaterials in Form von

Wasserspeicherung und Ausspeicherung verbunden sind. Diese Bilanzen werden es ermöglichen, die Entwicklung der klimatischen Parameter innerhalb des Magazins als Funktion der klimatischen Parameter der Außenluft und der Betriebsbedingungen zu simulieren. Das wiederum wird ermöglichen, Szenarien zu vergleichen und das Potenzial von Low-Tech-Anlagen aufzuzeigen. Abbildung 2 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer solchen Simulation.

Die Regelmäßigkeit in der Entwicklung der im mittleren Diagramm von Abbildung 2 angezeigten simulierten Raumluftheuchte ist im Wesentlichen auf die erhebliche Hygroskopizität des Papiers zurückzuführen. Sobald eine Lagerstätte zu mehr als 20 % ihrer Kapazität gefüllt ist, ist die hygroskopische Kapazität des Papiers im Allgemeinen deutlich größer als die von üblichen Baumaterialien von Magazinen.

Bei einem Neubau mit überwiegendem Betonanteil muss die Wasserdampfabgabe während der Trocknungsphase berücksichtigt werden. Beton ist ein Material, das zum Zeitpunkt seiner Herstellung sehr reich an Wasser ist. Ein Teil dieses Wassers wird während des chemischen Stabilisierungsprozesses des Betons gebunden, ein anderer, signifikanter Teil wird jedoch während des Trocknungsprozesses freigesetzt. Die kleine Porosität des Betons verlangsamt den Trocknungsprozess; eine wirkliche Trocknung der Betonbauteile findet deshalb erst im Lauf von vielen Jahren statt. Daher ist es notwendig, bereits in der Bauphase für eine effektive Frühtrocknung zu sorgen. Diese Trocknung kann z. B. durch eine mechanische Entfeuchtungsanlage oder auch durch den gezielten Einsatz von (mobilen) Lüftungsanlagen in Zeiten mit ausreichend geringem Wassergehalt der Außenluft erreicht werden. Auf die eine oder andere Weise muss bei einem Gebäude, das hauptsächlich aus Stahlbeton besteht, zwischen dem Ausschalen des Betons und der Verwendung der Magazine eine Anfangstrocknungszeit liegen. Zudem ist es sinnvoll, für das erste oder die ersten Nutzungsjahre mobile Entfeuchtungsgeräte zur Verfügung zu haben, die im Bedarfsfall bei einer Raumluftheuchte von über 55 % eingesetzt werden können.

³ Dies ist grundsätzlich möglich, da ein Archivlager kein Ort ist, an dem regelmäßige, dauerhafte menschliche Aktivitäten stattfinden. Man kann daher mit einem sehr geringen durchschnittlichen Luftwechsel auskommen, womit Zeitspannen von etwa zehn Tagen oder sogar länger ohne Luftwechsel und ohne wesentliche Verschlechterung der Luftqualität möglich sind.

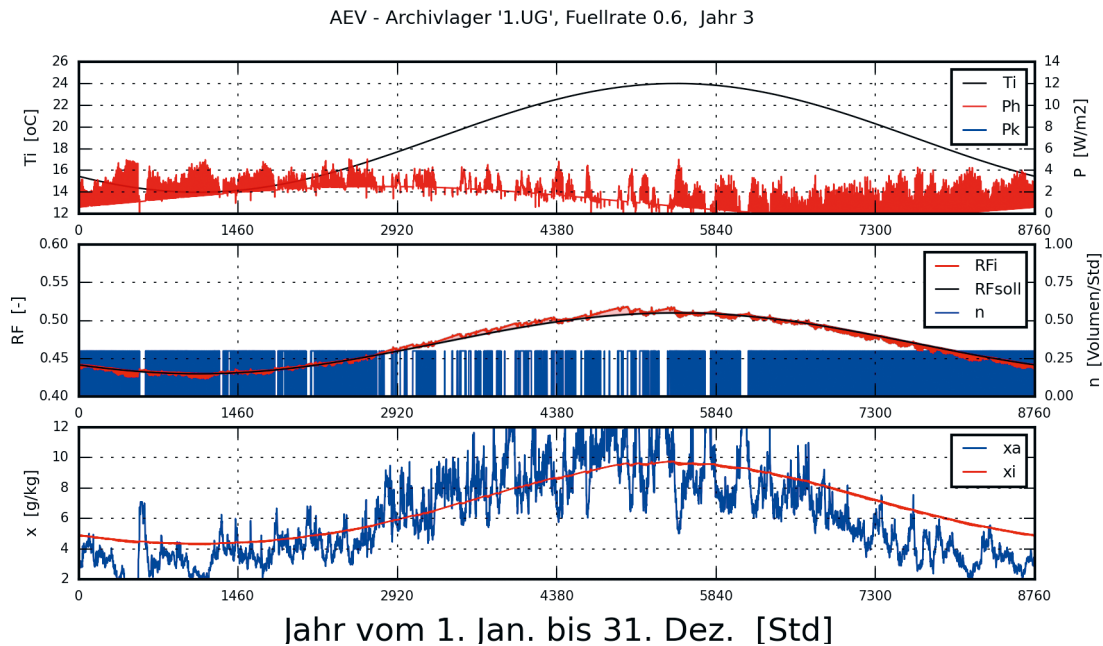


Abb. 2: Simulation für das 1. Untergeschoss des Walliser Staatsarchivs in Sion mit meteorologischen Daten, die von METEONORM synthetisiert wurden.

Oberes Diagramm: simulierte Innentemperatur (schwarz) und Heizleistung (rot, rechte Skala).

Mittleres Diagramm: Sollwert für die relative Luftfeuchte (schwarz), simulierte relative Luftfeuchte (rot) und Lüftererneuerung (blau, rechte Skala).

Unteres Diagramm: absolute Luftfeuchte der Außenluft (blau) und simulierte absolute Luftfeuchte in Innenräumen (rot)

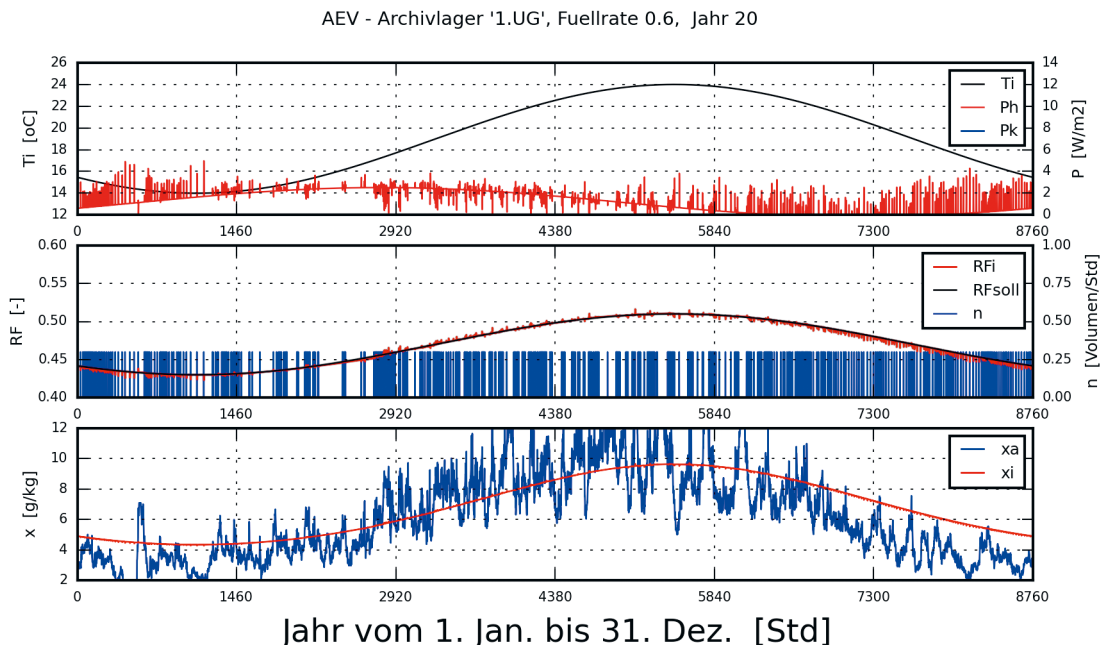


Abb. 3: Ähnlich der in Abbildung 2 dargestellten Simulation, jedoch für das 20. Nutzungsjahr der Magazine, nachdem sich der Beton weitgehend von der ursprünglich enthaltenen Feuchte befreit hat

4 Depot des Staatsarchivs Wallis in Sion

4.1 Die Magazine

4.1.1 Das Gebäude

Die Depots des Staatsarchivs Wallis (Archives de l'Etat du Valais – AEV) befinden sich an der Rue de Lausanne 45, im Zentrum der Stadt Sion. Sie wurden zwischen 2017 und 2019 gebaut und ab Herbst 2019 stufenweise in Betrieb genommen. Sie befinden sich in einem vollständig unterirdischen Gebäude auf drei Ebenen mit je ca. 1 000 m² Bruttogeschossfläche (70 m Länge Ost-West, 14 m Breite Nord-Süd mit einer Höhe von 3 m). Jede Ebene ist in drei Zellen ähnlicher Größe unterteilt.

Die Struktur besteht vollständig aus Stahlbeton. Sie ist außenseitig wärmedämmend, mit Ausnahme der Bodenplatte des Gebäudes, bei der die Wärmedämmung auf die Platte gelegt und mit einem Zementestrich bedeckt ist, dessen Bewehrung ausreichend ist, die Last der Regale tragen zu können. Die Werte der Wärmedämmung sind 0.19 W/m²K für die Bodenplatte, 0.30 W/m²K für die Wände und 0.15 W/m²K für das Dach. Die Dachplatte wird mit

80 cm Erde oder Kies bedeckt. Die Bodenplatte liegt etwa 8 m über dem Grundwasserspiegel. Im Westen befinden sich auf jeder der drei Ebenen Technikräume, Aufzug und Haupttreppe. Der Zugang zu den verschiedenen Lagerzellen erfolgt durch eine Luftschleuse mit gepanzerter Tür. So bleiben die Hauptquellen von Gefahren und klimatischen Störungen außerhalb der Magazinhülle. Nottreppen befinden sich in der mittleren Zelle.

Die Heizwärme wird auf jeder Ebene durch ein Metallrohr verteilt, das warmes Wasser am Fuß jeder Nord-, Ost- und Südwand hin- und herführt. Ventilatoren arbeiten im Ein-Aus-Modus und können einen nominalen Lüfterneuerungsstrom von 1 500 m³/Std auf jeder Etage liefern, was 0.5 Vol./Std entspricht. Bis Ende November 2021 war die Lüfterneuerungsrate maximal. Ab Dezember 2021 wurde sie auf 900 m³/Std oder auch 0.3 Vol./Std reduziert. Die Strategie für den Einsatz der Lüftung besteht darin, sie einzuschalten, wenn das Innenklima im Vergleich zum Sollwert zu trocken und die Außenluft feuchter ist oder wenn das Innenklima im Vergleich zum Sollwert zu feucht und die Außenluft trockener ist. Sonst bleibt die Anlage abgeschaltet. Das Lüftungssystem ist mit einer Wärmerückgewinnung mit Plattentaucher ausgestattet, die kurzgeschlossen werden kann, wenn die Innentemperatur höher als der Sollwert und die Außenluft kühler ist.

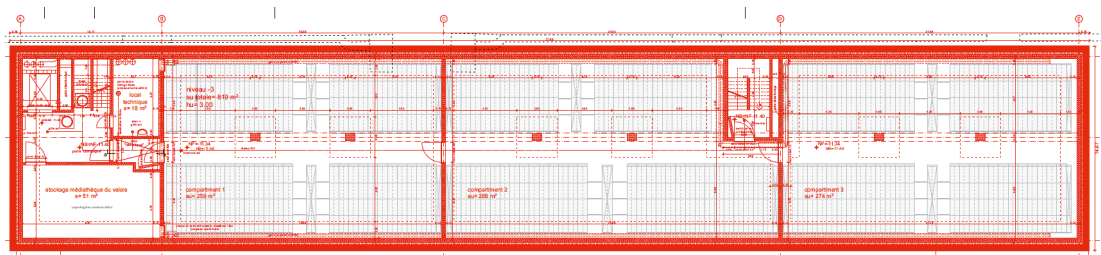


Abb. 4: AEV, Plan des 3. Untergeschosses

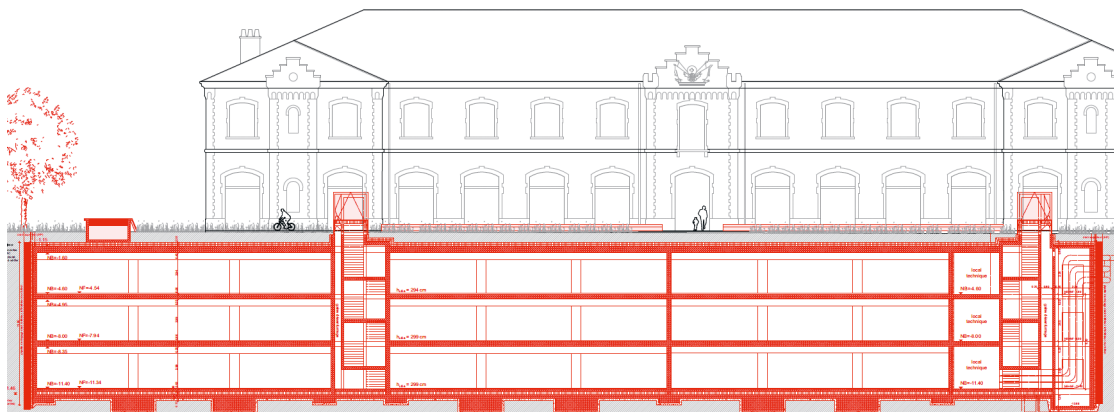


Abb. 5: AEV, Längsschnitt mit Blick auf die Nordfassade des Nachbargebäudes

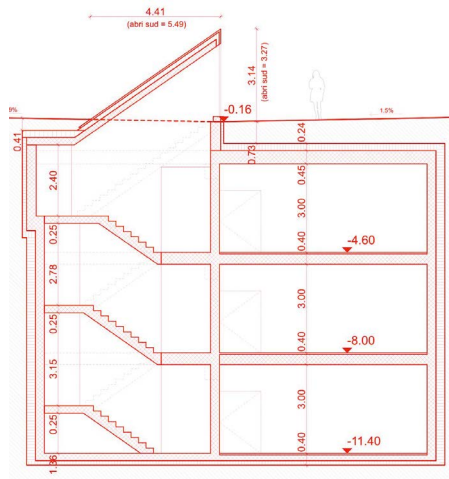


Abb. 6: AEV, Querschnitt

Im Jahr 2021 liegt der Füllungsgrad der verschiedenen Lagerebenen bei über 60 % und erreicht beim 3. Untergeschoss sogar 80 %.

4.1.2 Das Mess- und Datenerfassungssystem

Die Werte für Temperatur und relative Luftfeuchte werden alle 10 Minuten in der Mitte aller Zellen sowie in der Außenluft gemessen. Die Messgenauigkeit der verwendeten Rotronic-Fühler beträgt ± 0.1 K für die Temperatur und ± 0.8 % für die relative Feuchte. Das Messerfassungssystem war 2021 durchgehend in Betrieb, mit Ausnahme eines Stromausfalls an vier aufeinanderfolgenden Tagen im Monat Oktober. Damit steht unter dem oben genannten Vorbehalt ein kohärentes Messwertepaket für das gesamte Jahr 2021 zu Verfügung.

4.1.3 Betonvortrocknung in Sion

Die Trocknung des Betons erfordert eine aktive Begleitung, sobald die Baustelle wasserfrei ist, um die Inbetriebnahme der Magazine nicht zu verzögern. Letztere können nämlich nicht in Betrieb genommen werden, solange die von den Betonkonstruktionen abgegebene Wasserdampfmenge ein erhebliches Risiko darstellt, d. h., wenn die Feuchte der Magazine 60 % übersteigt. Aus diesem Grund wurden ein Luftentfeuchter und zwei Umluftventilatoren pro Stockwerk installiert. Dieses System wurde regelmäßig überwacht, nicht nur, um das Kondenswasser zu entleeren (was hätte automatisiert werden können), sondern auch, um zu überprüfen, ob es ordnungsgemäß funktionierte,



Abb. 7: AEV, Innenansicht (Foto: Michel Bonvin, Lausanne)

da es nicht ungewöhnlich war, dass es von Baustellenarbeitern bewegt oder außer Betrieb genommen wurde. Dieser Prozess dauerte von August 2018 bis Oktober 2019.

Gleichzeitig wurde die Überwachung der Trocknung des Betons auf drei Wandflächen von je 1 m^2 für jedes Stockwerk mit verschiedenen Messgeräten (kapazitiv, konduktiv, Mikrowellen) organisiert, auch mit dem Ziel, Daten über die Trocknung des Betons zu sammeln.

Als Belegungskriterium wurde ein Klimadrifttest mit ausgeschalteten Geräten und geschlossenen Magazinen über 72 Stunden gewählt. Während dieser Zeit konnte verifiziert werden, dass die Luftfeuchte, die zu Beginn des Tests bei knapp 50 % lag, den Wert von 60 % nicht überstieg. Dieses Zeitintervall von 72 Stunden stellt ein rechtzeitiges Eingreifen sicher, falls eine Störung die Entfeuchtung der Magazine durch Belüftung verhindert.

4.2 Klimaüberwachung 2021

4.2.1 Das meteorologische Jahr 2021

Das Jahr 2021 war im Wallis in Bezug auf Außentemperatur und Luftfeuchte ein Jahr mit normalem Wetter. Dies ist in Abbildung 7 dargestellt, die die monatlichen Mittelwerte der in Sion gemessenen und der in der Magazinplanungsphase verwendeten Außentemperatur vergleicht. Diese ist der repräsentative Wert der Temperatur in Sion im Zeitraum 1991–2010, erhöht um 0.7 K. In ähnlicher Weise zeigt Abbildung 8, dass 2021 ein typisches Jahr für die Luftfeuchte im Freien war.

Tabelle 2 stellt die Messwerte 2020 und 2021 den Planungswerten gegenüber. Es ist ersichtlich, dass das Jahr

Tab. 2: Durchschnitt, Maximum und Minimum der Stundenwerte der Temperatur und der absoluten Luftfeuchte. Vergleich der in der Planungsphase verwendeten Werte (repräsentatives Jahr im Zeitraum 1991–2010; was die Temperaturwerte betrifft, wurden diese um 0.7 K erhöht*) und der in den Jahren 2020 und 2021 gemessenen Werte

	Durchschnittswert	Höchster Wert	Mindestwert	Einheiten
Te_Planung	11.3	35	-9.4	°C
Te_2020	11.9	34.5	-4.5	°C
Te_2021	10.5	32.6	-8	°C
xe_Planung	6.1	15.4	1.3	g/kg
xe_2020	6.3	15.5	1.3	g/kg
xe_2021	6.3	15.6	1.1	g/kg

2020 im Jahresmittel um 0.6 K wärmer war als das Referenzjahr, das für die Bauplanung benutzt wurde, während das Jahr 2021 um 0.8 K kühler war.

4.2.2 Das Innenklima

Abbildung 10 zeigt für die drei Stockwerke die hervorragende Übereinstimmung zwischen den monatlichen Durchschnittswerten der gemessenen Innenraumtemperaturen und den Sollwerten. Die einzige geringfügige Abweichung findet sich im Winter (Januar, Februar und Dezember), wenn das 3. UG ca. 1 K wärmer als der eingestellte Wert ist. Für das 2. UG ist dieser Unterschied geringer (ca. 0.5 K), und für das 1. UG ist er Null.

Die stündlichen Temperaturänderungen für jede der drei Speicherzellen im 1. Untergeschoss sind in Abbildung 11 dargestellt. Die Heizperiode dauert ca. sechs Monate, von Februar bis Juli. Es entsteht ein Temperaturgradient zwischen Zelle 1c (kälter) und den Zellen 1b und 1a. Diese Anomalie war durch einen schlechten Abgleich des Wärmeverteilnetzes bedingt und wurde am 2. Juli mit dem Schließen der Heizungsversorgungsventile in den Zellen 1a und 1b behoben.

In Bezug auf die relative Luftfeuchte in Innenräumen zeigt Abbildung 12, dass die gemessenen Innenwerte bis einschließlich September geringfügig über den Sollwerten liegen (1 bis 2 %). Dies lässt sich im Wesentlichen dadurch erklären, dass sich die Lüftung erst einschaltet, wenn die Raumluftfeuchte mindestens 1.5 % über dem

Sollwert liegt. Dieser Effekt lässt im Herbst etwas nach, wenn der Bedarf an Frischluft zur Entfeuchtung reduziert wird. Diese Überschreitungen haben die Dokumente nie gefährdet und sollten in den nächsten Jahren mit der fortgesetzten Trocknung des Betons abnehmen.

Zusammenfassend ist zu betonen, dass die Temperatur im gesamten Jahr 2021 in keiner Lagerzelle 25 °C über- oder 13 °C unterschritten hat. Ebenso gab es keine Zeit, in der die relative Luftfeuchte über 60 % oder unter 40 % lag. Wir stellen jedoch fest, dass die Temperatur des 3. Untergeschosses und, in geringerem Maß, auch des 2. Untergeschosses nur mühsam auf ihren Winterwert von 14 °C zurückfällt. Allerdings ist dieser Umstand für die aufbewahrten Dokumente problemlos.

Hinsichtlich der Stabilität des Raumklimas ist das Verhalten bei der Temperatur vorbildlich, denn die maximale Temperaturschwankung über einen Zeitraum von einer Stunde hat nie 0.09 K überschritten. Die Schwankungen der relativen Luftfeuchte der Magazinzellen haben nie den Wert von 2.06 % in einer Stunde überschritten. Tabelle 3 zeigt für alle neun Magazinzellen die maximalen Spannen der stündlichen Schwankungen (nach unten und nach oben) der Temperatur und relativen Feuchte.

Hinsichtlich kurzzeitiger Schwankungen der relativen Luftfeuchte wurde außerdem festgestellt, dass die in einer Archivbox gemessenen Schwankungen mindestens 20-mal geringer sind als die in der Magazinluft (Abbildung 13). Daraus lässt sich schließen, dass die in Kartons gelagerten Dokumente und das Papier in den Buchblöcken kurzfristigen Schwankungen unterliegen, die minimal sind.

⁴ Der Wert von 0.7 K entspricht ungefähr den Auswirkungen der globalen Erwärmung in den letzten zwei Jahrzehnten.

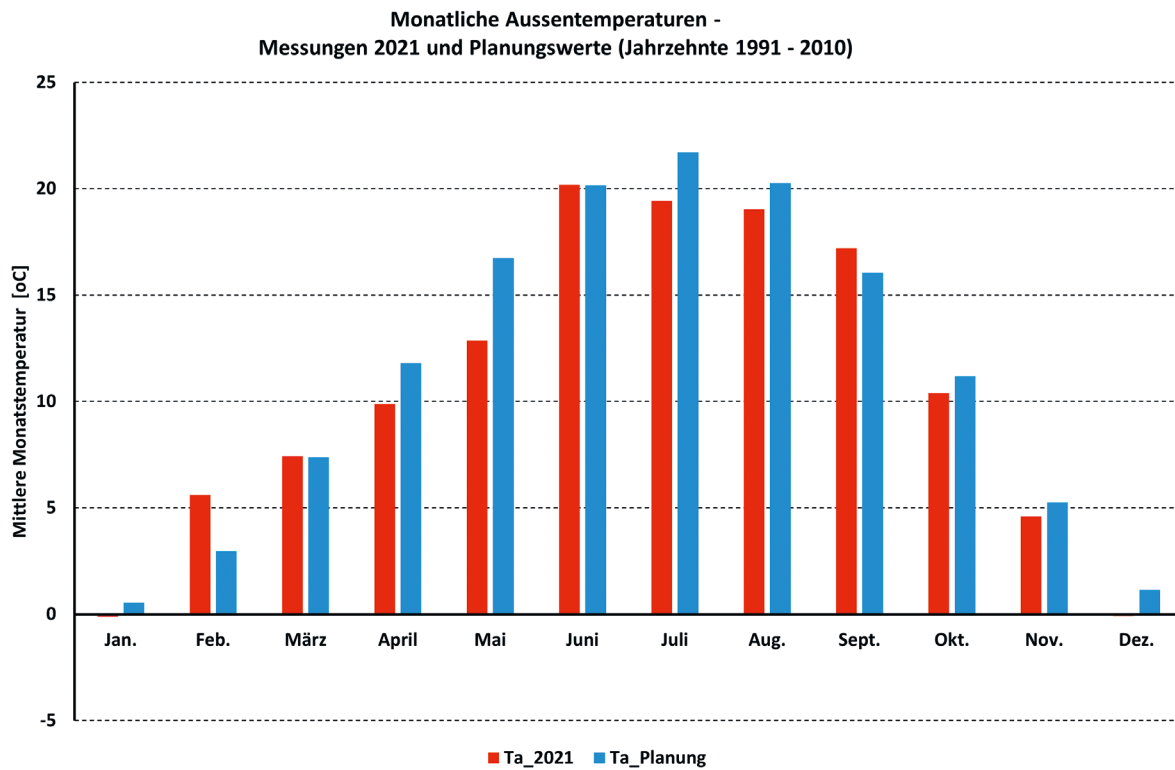


Abb. 8: Vergleich der im Jahr 2021 in Sion gemessenen durchschnittlichen monatlichen Temperaturwerte mit den in der Planungsphase des Bauwerks verwendeten Werten

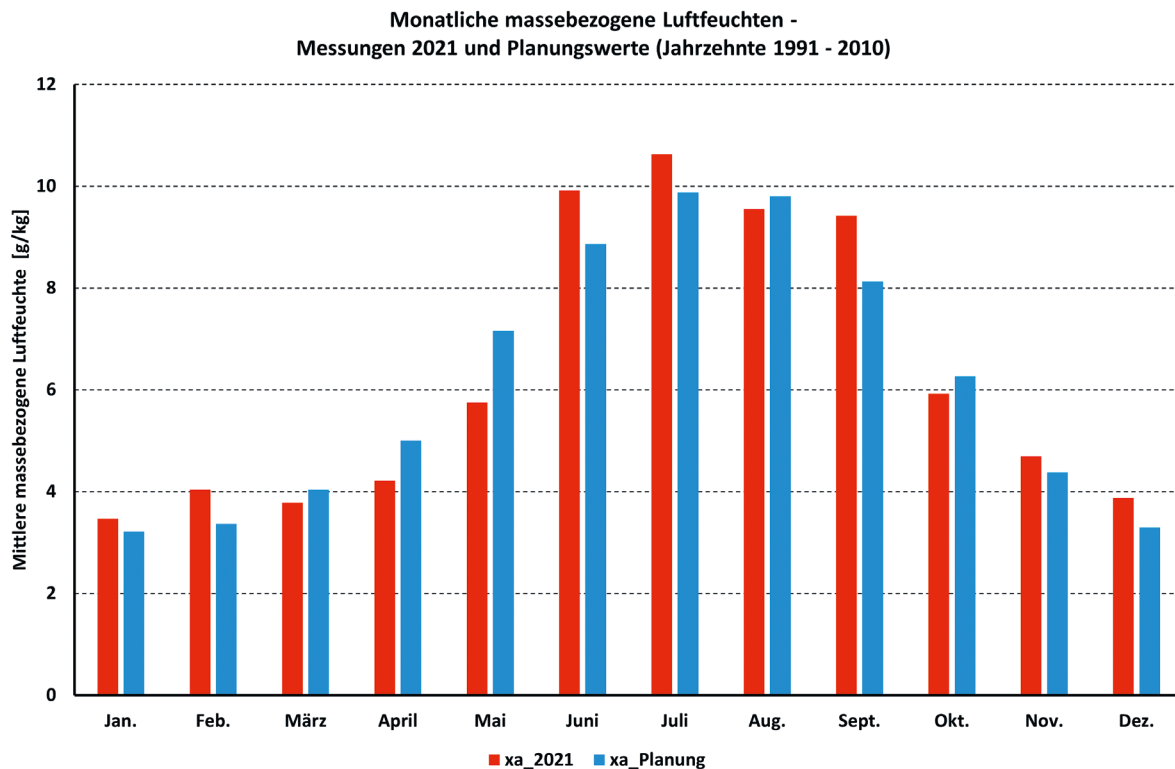


Abb. 9: Vergleich der im Jahr 2021 in Sion gemessenen mittleren monatlichen Werte für die absolute Feuchte mit den in der Planungsphase des Bauwerks verwendeten Werten

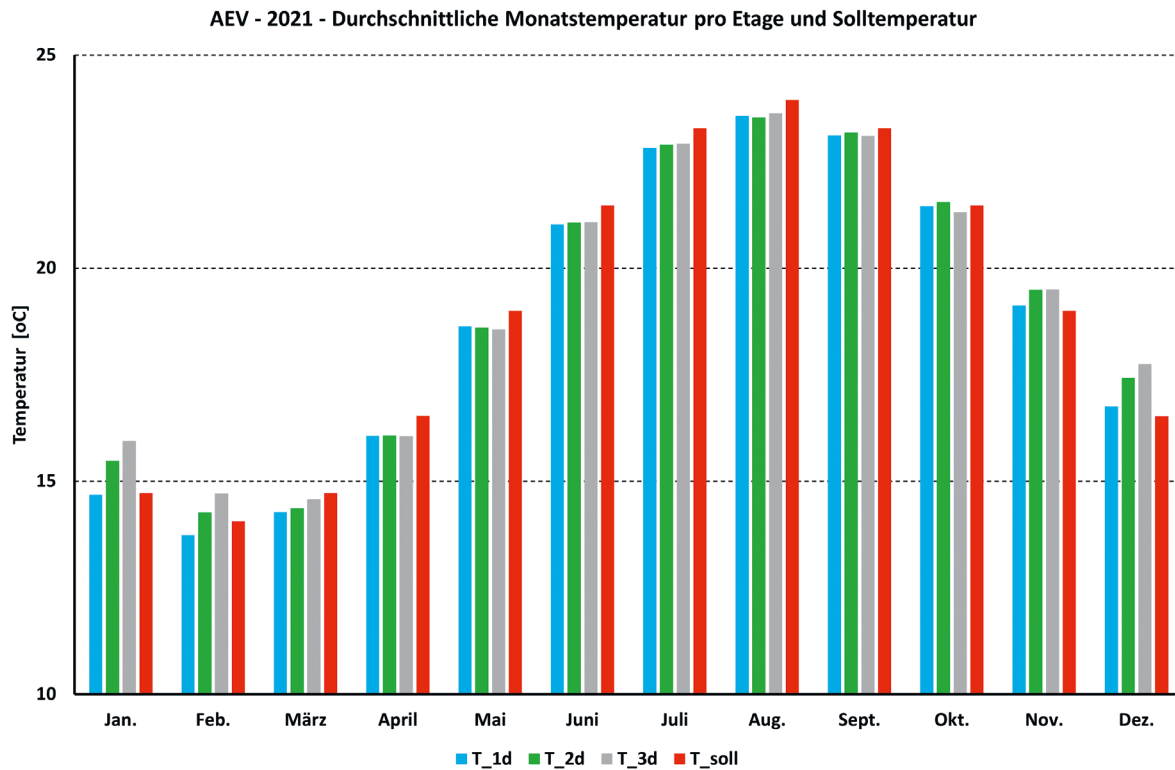


Abb. 10: Vergleich der monatlichen Durchschnittstemperaturen für die drei Stockwerke (zeitlicher Mittelwert des Durchschnitts der in den drei Zellen „a“, „b“ und „c“ gemessenen Temperaturen) mit den Sollwerten

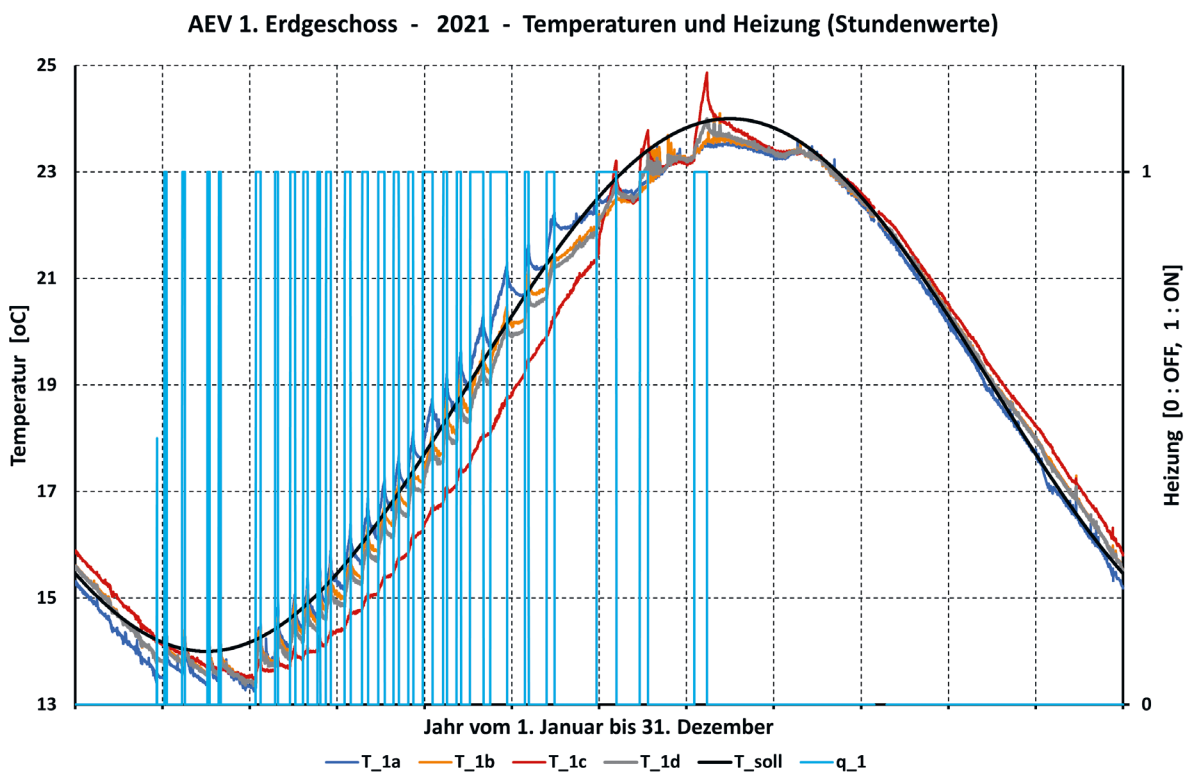


Abb. 11: Entwicklung der Temperaturen jeder Zelle des 1. Untergeschosses und Betriebszustand der Heizung

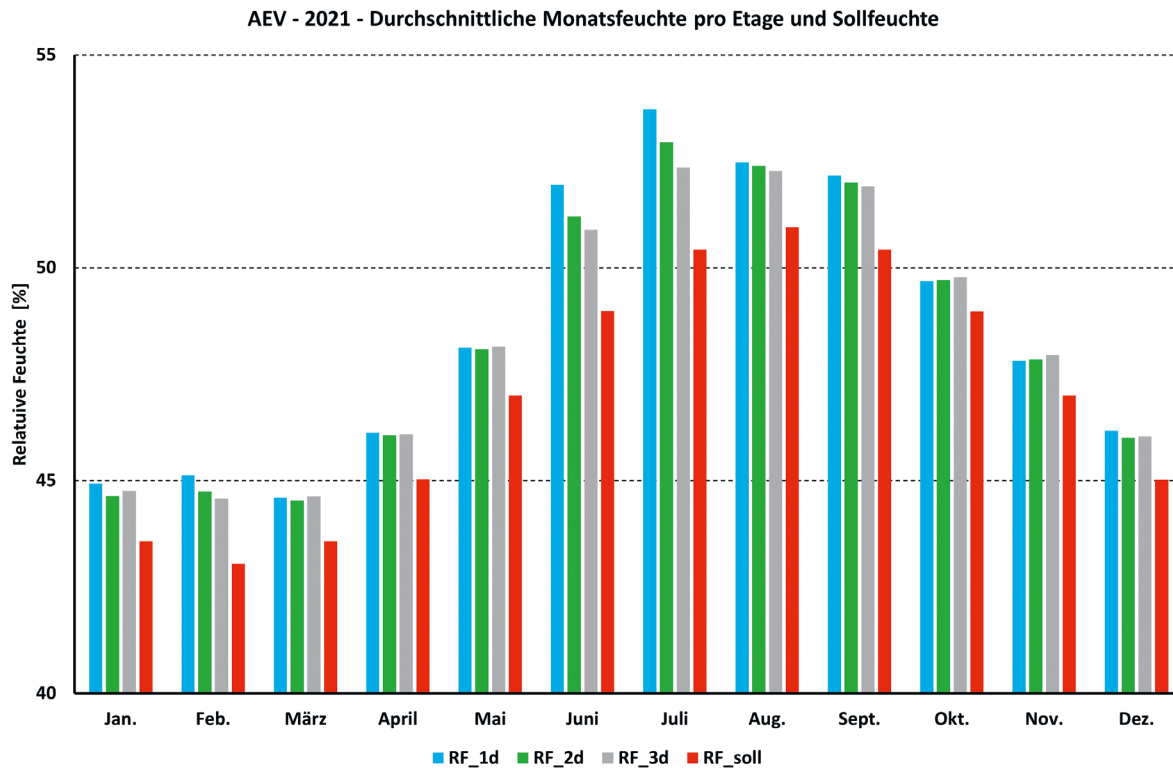


Abb. 12: Vergleich der durchschnittlichen monatlichen relativen Luftfeuchte für alle drei Stockwerke (zeitlicher Mittelwert des Durchschnitts der in jeder Zelle eines Stockwerks gemessenen Temperaturen) mit den Sollwerten

Tab. 3: Für jede der Speicherzellen Maximalwerte der Schwankungen, die in einer Stunde bei der Temperatur (T in K) und der relativen Feuchte (RF in %) gemessen wurden. Das Symbol $-0.04/0.03$ bedeutet beispielsweise, dass die maximale stündliche Temperaturabnahme der Zelle 1a 0.04 K und die maximale stündliche Zunahme 0.03 K beträgt

	ΔT_a	ΔT_b	ΔT_c	ΔRF_a	ΔRF_b	ΔRF_c
1. Untergeschoss	-0.04 / 0.03	-0.02 / 0.02	-0.03 / 0.02	-0.94 / 0.81	-1.79 / 1.42	-1.71 / 1.05
2. Untergeschoss	-0.10 / 0.08	-0.06 / 0.04	-0.04 / 0.03	-1.34 / 0.79	-1.48 / 0.86	-2.06 / 1.54
3. Untergeschoss	-0.09 / 0.06	-0.08 / 0.06	-0.04 / 0.03	-1.59 / 1.27	-1.98 / 1.41	-2.09 / 1.57

4.2.3 Betontrocknung

Anhand des Wassergehalts der Innenluft (ermittelt aus Messungen der Innentemperatur und der relativen Luftfeuchte), des Wassergehalts der Außenluft und der Lüftungsrate kann die Größenordnung der Wasserdampfmenge bestimmt werden, die das Lüftungssystem nach außen abführt. Die in Tabelle 4 dargestellten Werte beziehen sich auf einen etwa 30 Monate alten Beton, der deutlich geringere Wassermengen emittiert als in den ersten beiden Jahren.⁵

⁵ Die Phänomene der Austrocknung von Betonkonstruktionen sind

Die monatlichen Entwässerungsmengen für jedes der drei Stockwerke sind in Abbildung 14 dargestellt.

4.2.4 Validierung der in der Planungsphase durchgeführten Simulationen

In der Planungsphase des Staatsarchivs Wallis wurden verschiedene Simulationen durchgeführt, die es ermög-

kaum dokumentiert. Wir bereiten daher weitere Kommunikationen zu diesem Thema vor.

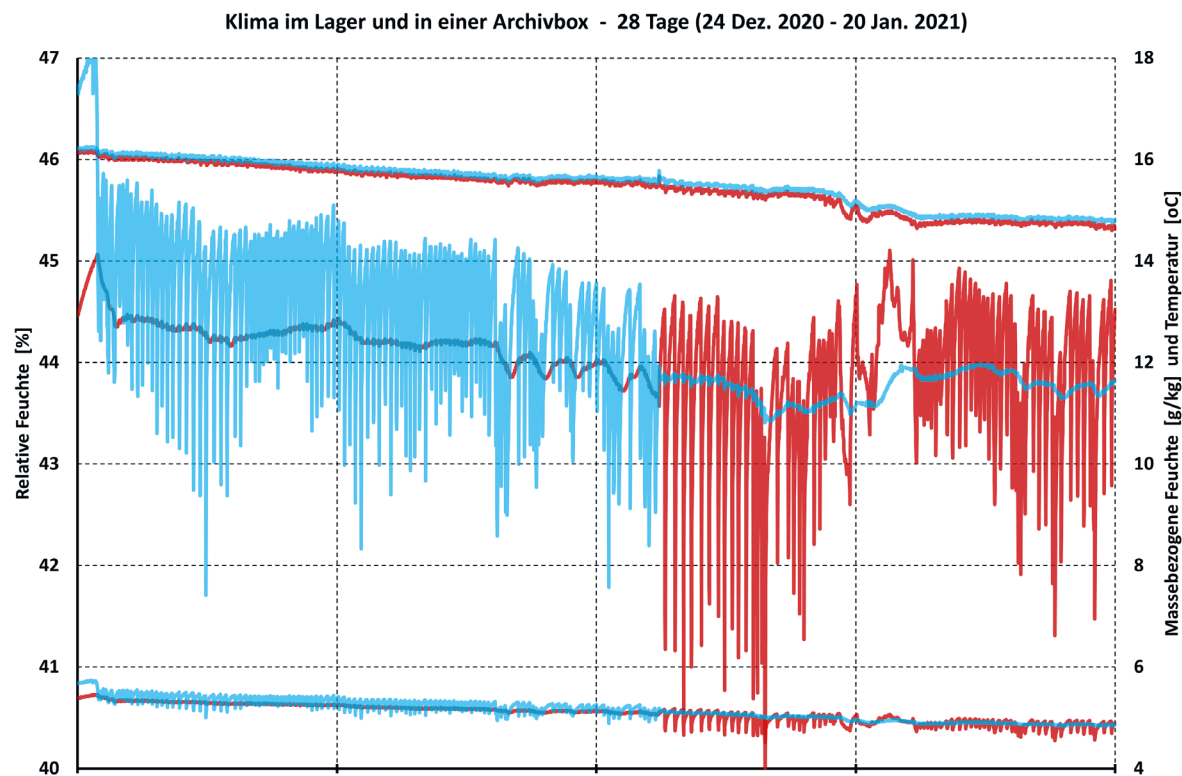


Abb. 13: Vergleich klimatischer Parameter im Magazin und in einer Archivbox. Messungen mit zwei Rotronic Hydrolog Datenloggern. Der erste, dessen Werte blau dargestellt sind, wird während des ersten Teils des Messzeitraums in den Raum und dann in die Archivbox gestellt. Der zweite, dessen Daten rot markiert sind, wird zuerst in die Box und dann in das Magazin gelegt

Tab. 4: Vom Lüftungssystem im Jahr 2021 abgeführte Wasserdampfmenge

	Masse des im Jahr 2021 entnommenen Wassers	Einheiten
1. Untergeschoss	2.7	kg/m ² Boden
2. Untergeschoss	2.1	kg/m ² Boden
3. Untergeschoss	1.8	kg/m ² Boden

lichten, die Eigenschaften der Gebäudehülle zu optimieren und das Potenzial von Low-Tech-Systemen für die Sicherstellung eines zufriedenstellenden Klimamanagements zu quantifizieren. Der Vergleich von Abbildung 11 mit der obersten Grafik von Abbildung 2 zeigt, dass die im 1. Untergeschoss im Jahr 2021 gemessenen Temperaturen mit den für das dritte Nutzungsjahr der Magazine simulierten Werten durchaus übereinstimmen. Dasselbe gilt für die Heizung, die hauptsächlich zwischen Februar und Juli aktiv ist. Was die Raumfeuchte betrifft, stimmen die in Abbildung 12 dargestellten Monatswerte für das erste Untergeschoss vollständig mit den simulierten Werten

überein, die in der Grafik in der Mitte von Abbildung 2 dargestellt sind. Der Unterschied von 1.5 % drückt aus, dass die Regelung der Raumfeuchte erst aktiviert wird, wenn die gemessene Feuchte um mehr als 1.5 % vom Sollwert abweicht.

5 Schlussfolgerung

Es ist möglich, das Klima eines Archivalagers passiv zu steuern, indem nur die Belüftung zur Regulierung der Raumfeuchte verwendet wird, mit einer ergänzenden

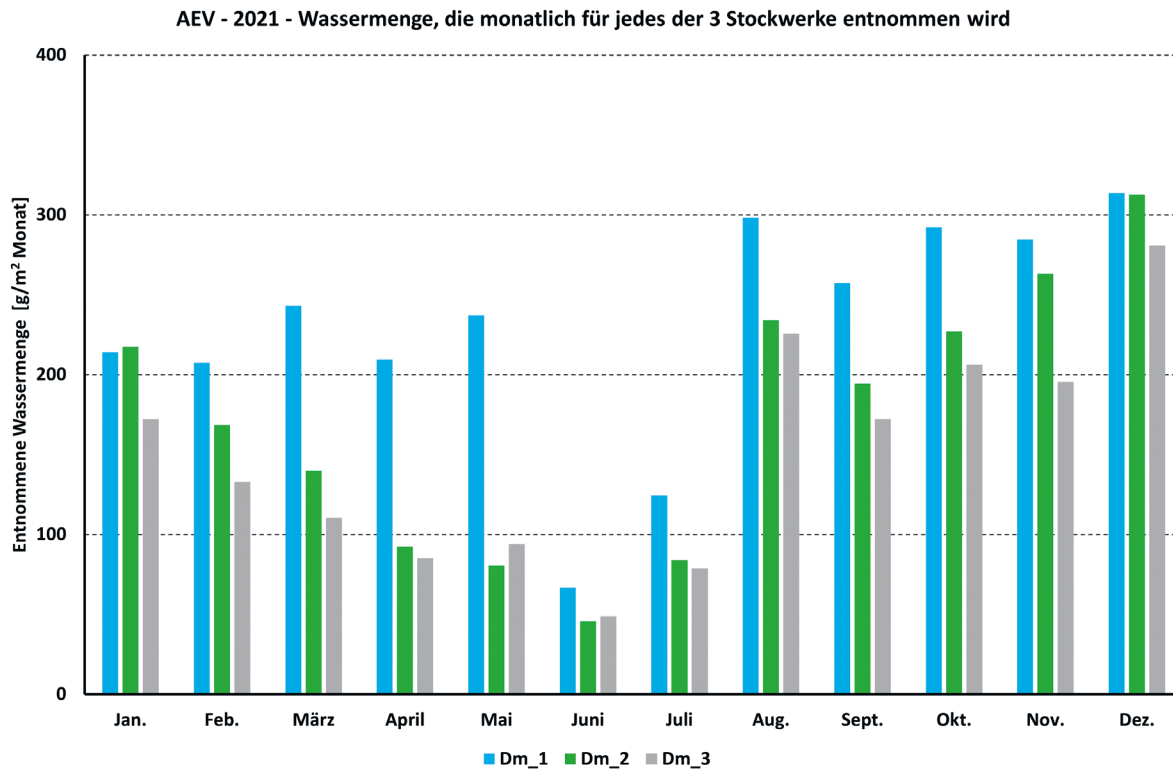
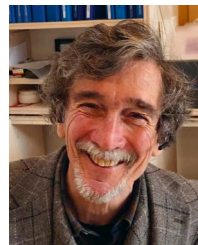


Abb. 14: Monatliche Wassermengen, die von der Belüftungsanlage für jedes der drei Stockwerke abgeführt werden

minimalen Heizung, um die Wintertemperatur auf dem gewünschten Niveau zu halten und den langsamen Übergang von den Wintertemperaturen zu den Sommertemperaturen zu gewährleisten. Dies ist durch das Verhalten des Klimas der Magazine des Walliser Staatsarchivs in Sion nachgewiesen. Auch wenn die Betonmasse dieses unterirdischen Gebäudes im dritten Nutzungsjahr noch eine nicht vernachlässigbare Wassermenge abgibt, ist das Innenraumklima durchaus zufriedenstellend: Die relative Feuchte der Innenluft schwankt langsam zwischen ihren Winter- und Sommerwerten von 42 % bis 51 %, wobei die täglichen Schwankungen ständig unter 3 % bleiben. Gleiches gilt für die Innentemperatur zwischen 14 °C im Winter und 24 °C im Sommer mit unwesentlichen täglichen Schwankungen.

Unter der Voraussetzung, dass die Gebäudehülle auf maximale Klimastabilität ausgelegt wird und die Wärmeaustausche mit der Umgebung gemäß den angestrebten Zielwerten optimiert werden, ist das in diesem Artikel vorgestellte passive Klimamanagement grundsätzlich bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen anwendbar. Für kälteres nördliches Klima müsste im Winter der Innentemperatursollwert der Magazine jedoch auf ca. 10 °C gesenkt werden.

Autoreninformationen



Andrea Giovannini
Berater für die Konservierung vom Schriftgut
Via Cantone 34
CH-6517 Arbedo
giovannini@adhoc.ch



Michel Bonvin
Physiker
Route du Poupet 19
CH-3978 Flanthey
bom@netplus.ch