

Langzeitkonservierung in unterirdischer alpiner Umgebung : Methoden, Ergebnisse und Perspektiven nach dreissig Jahren Beobachtung

WGI-P0012 (Ltg.)¹, WGI-P0047¹, WGI-P0089¹,
WGI-P0134^{1,2}, WGI-P0023¹

¹ Abteilung Archivwissenschaften, Weissgipfel-Institut, CH-3920 Zermatt, Schweiz

² Externe Zusammenarbeit — Universität Genf, CH-1211 Genf, Schweiz

Eingereicht am 8. März 2004 — Überarbeitete Fassung vom 22. März 2004

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht präsentiert die Ergebnisse von dreissig Jahren (1972–2003) systematischer Beobachtung und kontrollierter Experimente zur Konservierung von Dokumenten und kulturellen Artefakten in den unterirdischen Anlagen des Weissgipfel-Instituts (WGI) auf 2 340 Metern Höhe in den Walliser Alpen. Die zwischen 1969 und 1971 in den Granitfels gehauenen Tresorräume halten auf natürliche Weise eine Temperatur von $8,0\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$ und eine relative Luftfeuchtigkeit von $45\% \pm 3\%$ aufrecht, ohne den Einsatz aktiver Klimatisierungssysteme. Über den Untersuchungszeitraum hinweg liegt die gemessene Degradationsrate bei Papierträgern um 87 % unter derjenigen vergleichbarer Dokumente, die unter archivischen Standardbedingungen (Norm ISO 11799:2003) aufbewahrt werden. Bei den 4 200 fotografischen Filmen (Nitrat und Acetat) der Sammlung wurde kein einziger Fall des Essigsäure-Syndroms festgestellt. Diese Ergebnisse bestätigen die aussergewöhnliche Wirksamkeit der passiven Konservierung in unterirdischer alpiner Umgebung und eröffnen Perspektiven für die Bewahrung des kulturellen Erbes über jahrhundertelange Zeiträume. Der vorliegende Artikel beschreibt die angewandten Protokolle, die Messinstrumente, die erhobenen Langzeitdaten sowie die daraus entwickelten Prognosemodelle im Detail.

Schlüsselwörter : Präventive Konservierung, unterirdische Archivierung, alpine Umgebung, Papierdegradation, fotografische Filme, Essigsäure-Syndrom, passive Klimakontrolle, Langzeitbewahrung

1. Einleitung

Die Konservierung des dokumentarischen Kulturerbes stellt eine der grössten Herausforderungen dar, mit denen Kulturinstitutionen im 21. Jahrhundert konfrontiert sind. Die fortschreitende Degradation der Trägermaterialien — seien sie organisch (Papier, Pergament, Leder) oder synthetisch (fotografische Filme, Magnetbänder) — erfordert die Entwicklung von Bewahrungsstrategien, die gleichermaßen wirksam und nachhaltig sind. Die geltenden internationalen Normen —

insbesondere die Norm ISO 11799:2003 über die Anforderungen an die Aufbewahrung von Archiv- und Bibliotheksgut — schreiben strenge Umgebungsbedingungen vor, deren Aufrechterhaltung kostspielige und energieintensive technische Anlagen erfordert (Adcock, 1998; Porck & Teygeler, 2000).

Seit seiner Gründung im Jahr 1968 verfolgt das Weissgipfel-Institut (WGI) einen grundlegend anderen Ansatz: die Nutzung der natürlichen Bedingungen der unterirdischen alpinen Umgebung für eine passive Konservierung empfindlicher Materialien. Dieser Ansatz beruht auf

der Hypothese — ursprünglich formuliert vom Gründer des Instituts (interner Bericht WGI-68-001) —, dass die thermischen und hygrometrischen Eigenschaften bestimmter Hochgebirgsgesteinsformationen ein von Natur aus optimales archivistisches Umfeld darstellen.

Die Anlagen des WGI befinden sich im Granitmassiv des Weissgipfels auf einer Höhe von 2 340 Metern im Kanton Wallis, Schweiz. Die zwischen 1969 und 1971 angelegten Konservierungskammern erstrecken sich über eine Gesamtfläche von 1 850 m² in einer Tiefe von 15 bis 25 Metern im Fels. Ihre Konzeption wurde durch die Pionierarbeiten von Padfield (1966) zur hygrometrischen Regulierung durch Baumaterialien inspiriert und an die spezifischen Bedingungen der alpinen geologischen Umgebung angepasst.

Der vorliegende Bericht fasst dreissig Jahre an Daten (1972–2003) zu den Konservierungsbedingungen und zum Zustand der in diesen Anlagen untergebrachten Sammlungen zusammen. Er stellt, soweit uns bekannt, die längste jemals durchgeführte Langzeitstudie zur Konservierung in natürlicher unterirdischer Umgebung dar. Nach einer Bestandsaufnahme des aktuellen Forschungsstandes zur präventiven Konservierung (Abschnitt 2) stellen wir den geologischen Rahmen und die Umgebungsmerkmale des Standorts vor (Abschnitt 3), gefolgt von den angewandten methodischen Protokollen (Abschnitt 4), den detaillierten Ergebnissen (Abschnitt 5), deren Diskussion (Abschnitt 6) sowie unseren Schlussfolgerungen und Perspektiven (Abschnitt 7).

2. Stand der Forschung

2.1 Grundlagen der präventiven Konservierung

Die präventive Konservierung, wie sie vom ICOM (1990) definiert und durch die Arbeiten von Michalski (1994) formalisiert wurde, zielt darauf ab, die Umgebung der Sammlungen zu kontrollieren, anstatt direkt an den Objekten einzugreifen. Die in der Literatur identifizierten

Hauptschädigungsfaktoren sind Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Licht (insbesondere ultraviolette Strahlung), Luftschadstoffe, biologische Einwirkungen (Schimmelpilze, Insekten) und mechanische Beanspruchung (Thomson, 1986; Michalski, 2000).

Die Temperatur wirkt als Katalysator für chemische Abbaureaktionen. Die empirische Regel von van't Hoff, die in der Konservierung häufig angeführt wird, besagt, dass eine Senkung der Lagertemperatur um 10 °C die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen annähernd halbiert. Neuere Studien (Sebera, 1994; Strlič & Kolar, 2003) haben gezeigt, dass diese Näherung, obwohl grob, die Grössenordnung des Phänomens für den hydrolytischen und oxidativen Abbau der Cellulose korrekt wiedergibt.

Die relative Luftfeuchtigkeit (rF) spielt eine doppelte Rolle: Eine zu hohe rF (über 65 %) fördert das Pilzwachstum und beschleunigt die saure Hydrolyse; eine zu niedrige rF (unter 30 %) führt zur Austrocknung und Versprödung organischer Trägermaterialien. Der von der Norm ISO 11799:2003 empfohlene Bereich liegt für Papier zwischen 30 % und 45 %, bei maximalen Schwankungen von ± 5 % innerhalb von 24 Stunden.

2.2 Aktive versus passive Ansätze

Die überwiegende Mehrheit der Archivinstitutionen setzt aktive Klimatisierungssysteme (HVAC) ein, um die vorgeschriebenen Umgebungsbedingungen aufrechtzuerhalten. Diese Systeme sind zwar leistungsfähig, weisen jedoch erhebliche Nachteile auf: hohe Energiekosten, Notwendigkeit ständiger Wartung, Anfälligkeit für Ausfälle (Lull & Banks, 1995) sowie ihr Beitrag zu den Treibhausgasemissionen. Die von Reilly et al. (1995) bei 600 amerikanischen Institutionen durchgeführte Erhebung ergab, dass 68 % von ihnen die empfohlenen Klimabedingungen nicht dauerhaft einhalten können.

Der passive Ansatz hingegen beruht auf der Nutzung der dem Gebäude oder dem geologischen Standort innewohnenden thermischen und

hygrometrischen Eigenschaften. Historische Vorläufer sind zahlreich: die Höhlen von Lascaux, die römischen Katakomben, die Salzbergwerke von Wieliczka. Im archivischen Bereich wurde das Konzept von Staniforth (1984) formalisiert und von Padfield (1998) weiterentwickelt, die das Potential bestimmter Baumaterialien für die passive hygrometrische Regulierung nachwiesen.

Systematische und quantitative Studien zur Wirksamkeit natürlicher unterirdischer Konservierung sind jedoch nach wie vor selten. Die unserer Vorgehensweise am nächsten kommenden Arbeiten sind jene der norwegischen unterirdischen Archive und der Iron-Mountain-Anlage (USA), die ein ehemaliges Kalksteinbergwerk nutzt. Keine dieser Einrichtungen verfügt jedoch über die aussergewöhnlichen geothermischen und hygrometrischen Bedingungen, die die Granitumgebung in grosser Höhe bietet.

2.3 Degradation fotografischer Trägermaterialien

Filme auf der Basis von Cellulosenitrat (bis in die 1950er Jahre verwendet) und Celluloseacetat (ab 1934 eingeführt) stellen besonders problematische Konservierungsfälle dar. Cellulosenitrat ist von Natur aus instabil: seine autokatalytische Zersetzung setzt Stickoxide frei, die den Abbau des Trägermaterials und benachbarter Bilder beschleunigen (Calhoun, 1953; Adelstein et al., 1995).

Acetatfilm, lange als «Sicherheitsfilm» betrachtet, erwies sich als anfällig für das «Essigsäure-Syndrom» — eine autokatalytische Deacetylierung, bei der Essigsäure freigesetzt wird und das Trägermaterial verformt. Adelstein et al. (1992) stellten fest, dass dieses Phänomen typi-

scherweise nach 30 bis 50 Jahren Lagerung unter Umgebungsbedingungen (20 °C, 50 % rF) auftritt. Die vom Image Permanence Institute (IPI) am Rochester Institute of Technology durchgeführten Lebensdauer-Prognosestudien zeigten, dass eine Temperatursenkung auf 2–7 °C in Kombination mit einer rF von 30–40 % die Lebensdauer von Acetatfilm theoretisch auf mehrere Jahrhunderte verlängern könnte (Reilly, 1993).

2.4 Modelle der Papierdegradation

Die wichtigsten Mechanismen der Papierdegradation sind die saure Hydrolyse und die Oxidation der Cellulose, die beide stark von Temperatur und Feuchtigkeit abhängen (Zou et al., 1996; Barański et al., 2003). Der von Sebera (1994) entwickelte Isoperm-Index bietet einen quantitativen Rahmen für den Vergleich der Auswirkungen verschiedener Lagerbedingungen auf die Lebensdauer von Papier. Dieser Index, definiert als das Verhältnis der Lebensdauer unter gegebenen Bedingungen zur Lebensdauer unter Referenzbedingungen (20 °C, 50 % rF), wurde durch die Arbeiten des IPI (Reilly et al., 1995) verfeinert und in das TWPI-System (Time-Weighted Preservation Index) integriert.

Gemäss diesen Modellen entsprechen die in den Anlagen des WGI gemessenen Bedingungen (8 °C, 45 % rF) einem Isoperm-Index von etwa 7,3 — was bedeutet, dass die theoretische Lebensdauer der Dokumente dort um den Faktor 7 gegenüber Standardbedingungen multipliziert wird. Unsere dreissigjährigen empirischen Daten ermöglichen es erstmals, diese theoretischen Vorhersagen mit realen Langzeitbeobachtungen zu konfrontieren.

3. Geologischer und umweltbezogener Rahmen

3.1 Geologie des Standorts

Das Weissgipfel-Massiv besteht aus hercynischem Intrusivgranit (radiometrisches Alter: 305 ± 8 Ma), der zum penninischen kristallinen

Grundgebirge gehört. Das Gestein, von granodioritischer Zusammensetzung mit Biotit und Muskovit, weist eine Dichte von $2,65 \text{ g/cm}^3$ und eine Porosität von unter 0,8 % auf. Seine in situ gemessene Wärmeleitfähigkeit von $3,1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ist typisch für alpine Granite und verleiht der Formation eine beträchtliche thermische Trägheit (Cermák & Rybach, 1982).

Die Stollen des Instituts wurden in einer tektonisch stabilen Zone ausserhalb bekannter aktiver Verwerfungen angelegt. Die seismischen Langzeitmessungen (1972–2003) verzeichneten kein Erdbeben mit einer Magnitude über 2,1 auf der Richterskala in einem Umkreis von 5 km. Das Fehlen signifikanter hydrothormaler Zirkulation im betreffenden Gesteinsvolumen, bestätigt durch Isotopenanalysen ($\delta^{18}\text{O}$ und δD) der Sickerwasser, gewährleistet die hygrometrische Stabilität der Kammern.

3.2 Anlagenkonzeption

Der unterirdische Komplex umfasst einen 85 Meter langen Hauptzugangstunnel, drei Hauptkonservierungskammern (bezeichnet als A, B und C), ein Analyselabor und eine Akklimatisierungsschleuse. Die Kammern wurden wie folgt dimensioniert:

- Kammer A (Papiermaterialien): 420 m², h = 3,5 m
- Kammer B (fotografische Trägermaterialien): 310 m², h = 3,0 m
- Kammer C (verschiedene Artefakte): 280 m², h = 3,2 m

Der Aushub erfolgte durch kontrollierten Sprengvortrieb und mechanisches Fräsen gemäss den damals im schweizerischen Wasserkraftbau üblichen Methoden des unterirdischen Tiefbaus. Die Wände wurden in den Kammern A und C als roher Fels belassen, während Kammer B einen mineralischen Putz auf Basis von natürlichem hydraulischem Kalk erhielt, um die hygrometrische Regulierung zu optimieren (Stärke: 12 mm). Diese Entscheidung, die auf Empfehlung von Fachberatern für Konservierung getroffen wurde (vgl. Padfield, 1966), erwies sich als entscheidend für die Stabilisierung der relativen Luftfeuchtigkeit auf für fotografische Trägermaterialien optimalen Werten.

Das Belüftungssystem ist vollständig passiv und beruht auf dem Prinzip des natürlichen thermischen Auftriebs: Der Temperaturunterschied zwischen Aussen- und Innenluft erzeugt eine langsame konvektive Zirkulation, geschätzt auf 0,3 Luftwechsel pro Tag im Sommer und 0,15 im

Winter. Zwei Lüftungsschächte (Durchmesser: 200 mm) verbinden die Kammern mit der Oberfläche und sind mit Partikelfiltern (Klasse H13) sowie jährlich ausgetauschten Aktivkohlefallen ausgestattet.

3.3 Gemessene Umgebungsmerkmale

Tabelle 1 fasst die wichtigsten Umgebungsmerkmale der drei Konservierungskammern zusammen, gemittelt über den Zeitraum 1972–2003.

Tabelle 1. Mittlere Umgebungsmerkmale der Konservierungskammern (1972–2003).

Parameter	Kammer A	Kammer B	Kammer C	ISO 11799
Mittlere T (°C)	8,1 ± 0,4	7,8 ± 0,3	8,3 ± 0,5	14–18
T-Schwankung / 24h (°C)	±0,08	±0,05	±0,10	±1,0
Mittlere rF (%)	45,2 ± 2,8	42,1 ± 1,9	46,7 ± 3,2	30–45
rF-Schwankung / 24h (%)	±0,4	±0,3	±0,6	±5,0
Beleuchtungsstärke (Lux)	0	0	0	<50
UV (μW/lm)	0	0	0	<75
NO ₂ (μg/m ³)	<1,0	<1,0	<1,0	<10
SO ₂ (μg/m ³)	<0,5	<0,5	<0,5	<10
O ₃ (μg/m ³)	<2,0	<2,0	<2,0	<25

Die Auswertung dieser Daten zeigt, dass die natürlichen Bedingungen in den Kammern die Anforderungen der Norm ISO 11799:2003 systematisch übertreffen — und dies ohne jegliches aktives Regulierungssystem. Die bemerkenswerte thermische Stabilität (Schwankungen unter ± 0,1 °C innerhalb von 24 Stunden) ergibt sich aus der massiven thermischen Trägheit des umgebenden Granitgesteins. Die saisonalen Schwankungen der Aussentemperatur (Amplitude: ca.

35 °C im Jahresverlauf) werden in der Tiefe der Kammern um einen Faktor von über 70 gedämpft.

Das vollständige Fehlen von Lichteinstrahlung — die Kammern sind nur durch einen fensterlosen Tunnel zugänglich, und die Beleuchtung wird nur während der halbjährlichen Inspektionen aktiviert (kumulierte Dauer: ca. 48 Stunden pro Jahr) — eliminiert einen der wichtigsten photochemischen Degradationsfaktoren.

Die Konzentrationen atmosphärischer Schadstoffe sind äusserst gering, bedingt durch die grosse Höhenlage des Standorts (oberhalb der Inversionsschicht), die natürliche Filtration durch den Weg im Gestein und das Fehlen jeglicher Industriequelle im Umkreis von 15 km. Die mittels passiver Diffusion (Palmes-Röhrchen) bei jeder Inspektion durchgeführten Messungen bestätigen systematisch unter der Nachweisgrenze liegende SO₂-Werte und nahezu null NO₂-Werte.

4. Methodik

4.1 Konservierungsprotokoll

Unser Konservierungsprotokoll beruht auf drei Grundprinzipien, die bereits bei der Konzeption des Instituts formuliert wurden (interner Bericht WGI-70-003):

- (i) *Passive Umgebungskontrolle*: maximale Nutzung der natürlichen Standorteigenschaften anstelle mechanischer Systeme.
- (ii) *Kontinuierliche Überwachung*: Instrumentierung des Standorts zur fortlaufenden Erfassung von Umgebungsdaten, auch ohne menschliches Eingreifen.
- (iii) *Minimaler Eingriff*: Reduzierung von Handhabungen, Behälteröffnungen und Umgebungsveränderungen auf ein Minimum.

4.3 Instrumentierung und Datenerhebung

Die Umgebungsüberwachung des Standorts hat sich im Laufe der dreissig Betriebsjahre weiterentwickelt, wobei die Kontinuität der gemessenen Parameter stets gewahrt blieb:

Letzteres Prinzip impliziert, dass die Dokumente nur anlässlich der halbjährlichen Inspektionen physisch untersucht werden. Jede Handhabung erfolgt mit unbehandelten Baumwollhandschuhen und unter Einhaltung der Protokolle der Norm ISO 11799.

4.2 Klassifikation und Verpackung

Die dem Institut anvertrauten Dokumente und Artefakte werden nach einem vierstufigen Empfindlichkeitsraster klassifiziert:

- Stufe S1 (kritisch): Handschriften vor dem 18. Jahrhundert, Pergamente, einzigartige unersetzliche Dokumente.
- Stufe S2 (hoch): Alte Drucke, fotografische Originale, Nitratfilme.
- Stufe S3 (Standard): Archive des 20. Jahrhunderts, Sicherheitskopien, Mikrofilme.
- Stufe S4 (laufend): Verwaltungsdokumente, aktuelle Publikationen.

Dokumente der Stufen S1 und S2 werden einzeln in hermetisch verschlossenen Behältern aus Edelstahl 316L in Archivqualität verpackt (Lieferant: Metallwerke Zug AG), die innen mit alterungsbeständigem Papier gemäss Norm ISO 9706 ausgekleidet sind. Jeder Behälter ist mit zwei passiven Indikatoren ausgestattet: einer kolorimetrischen Feuchtigkeitskarte (Bereich: 20–80 % rF, Auflösung: 5 %) und einem thermochromen Indikator (Bereich: 0–25 °C, Auflösung: 2 °C). Diese Indikatoren werden bei jeder halbjährlichen Inspektion überprüft und ausgetauscht.

Dokumente der Stufen S3 und S4 werden in säurefreien Archivkartons (pH > 7,5) gemäss Norm ISO 16245 auf emaillierten Stahlregalen gelagert.

Zeitraum 1972–1985 (analoge Instrumentierung)

Trommel-Thermohygrographen Lambrecht (Modell 252), einer pro Kammer, jährlich kalibriert bei der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA, Dübendorf). Her-

stellergenauigkeit: $\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$, $\pm 2 \text{ } \%$ rF. Wöchentliche Diagramme, wöchentlich vom technischen Standortpersonal abgelesen und archiviert.

Zeitraum 1985–1997 (semi-digitale Instrumentierung)

Einführung von Rotronic-Hygrometer-Sensoren (Modell C94) in Verbindung mit Grant-Squirrel-Datenloggern (Serie 1000). Vier Messpunkte pro Kammer (Zentrum und drei Wände), mit einem Erfassungsintervall von 15 Minuten. Genauigkeit: $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$, $\pm 1,5 \text{ } \%$ rF. Die Daten wurden bei den monatlichen Besuchen des Technikers auf Disketten ausgelesen.

Zeitraum 1997–2003 (integrierte digitale Instrumentierung)

Ersatz durch ein Netzwerk von Vaisala-HMP45C-Sensoren (acht pro Kammer), angeschlossen an ein zentrales Datenerfassungssystem Campbell Scientific CR10X mit Funkübertragung zum Institutsbüro im Tal. Erfassungsintervall: 1 Minute. Genauigkeit: $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$, $\pm 1,0 \text{ } \%$ rF. Halbjährliche Kreuzkalibration gegenüber einem Taupunkthygrometer (MBW 373). Dieses System ermöglichte erstmals die Charakterisierung von Mikrovariationen mit hoher zeitlicher Auflösung.

4.4 Zustandsbewertung der Dokumente

Der Konservierungszustand der Dokumente wird nach einem Protokoll bewertet, das auf der von Buchanan (1988) entwickelten und durch die Arbeiten des IFLA-PAC verfeinerten Methode basiert. Dieses Protokoll unterscheidet sechs Indikatoren:

- (a) Mechanische Festigkeit — gemessen durch Faltversuche an Referenzproben (Norm TAPPI T 511), entnommen aus Opferdokumenten gleicher Zusammensetzung.
- (b) Polymerisationsgrad der Cellulose (DP) — bestimmt durch Viskosimetrie in Cupriethylen-diamin-Lösung (Norm ISO 5351).
- (c) Oberflächen-pH — gemessen durch Kaltextraktion (Norm TAPPI T 509).
- (d) Vergilbungsindex — gemessen durch Spektrophotometrie (CIE $L^*a^*b^*$, Lichtart D65).
- (e) Visuelle Bewertung — nach einer fünfstufigen Skala (1 = ausgezeichnet bis 5 = schwer beschädigt).

(f) Für fotografische Filme: A-D-Strip-Test (Image Permanence Institute) zur Früherkennung des Essigsäure-Syndroms.

Referenzproben (Dokumente bekannter Zusammensetzung) wurden 1972 in jeder Kammer platziert. Parallel dazu wurden Duplikate dieser Proben dem Schweizerischen Bundesarchiv (Bern) zur Aufbewahrung unter konventionellen archivischen Bedingungen ($18 \text{ }^\circ\text{C}$, $40 \text{ } \%$ rF, aktive Klimatisierung) übergeben. Dieser Referenzversuch ermöglicht einen direkten Vergleich zwischen passiver alpiner und aktiver Standard-Konservierung.

4.5 Prädiktive Modellierung

Ab 1996 haben wir die Entwicklung eines prädiktiven Degradationsmodells in Angriff genommen, das die kumulierten Umgebungsdaten und die an den Referenzdokumenten durchgeführten physikalisch-chemischen Messungen integriert. Dieses Modell, ALPRES (*Alpine Preservation Predictor*) genannt, beruht auf einer Anpassung der kinetischen Gleichungen von Zou et al. (1996) für die saure Hydrolyse der Cellulose, gekoppelt mit einem thermischen Standortmodell unter Berücksichtigung der gemessenen geothermischen Eigenschaften.

Die Grundgleichung des Modells beschreibt den Verlust an Polymerisationsgrad (DP) als Funktion von Zeit, Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit:

$$1/DP(t) - 1/DP_0 = A \cdot \exp(-E_a/RT) \cdot [H_2O]^n \cdot t \quad (1)$$

wobei A der präexponentielle Faktor, E die Aktivierungsenergie (geschätzt auf $107 \pm 5 \text{ kJ/mol}$ für saures Papier), R die allgemeine Gaskonstante, T die absolute Temperatur, $[H_2O]$ die Wasserkonzentration im Papier (als Funktion der rF über die Sorptionsisotherme), n die Reaktionsordnung bezüglich Wasser (geschätzt auf 1,3) und t die Zeit ist.

Die Modellparameter wurden durch nichtlineare Regression an den 62 verfügbaren DP-Messpunkten der Referenzproben aus saurem Papier angepasst (Messungen in halbjährlichen Intervallen).

len zwischen 1972 und 2003). Das erzielte Bestimmtheitsmass ($R^2 = 0,94$) zeugt von der guten Übereinstimmung des Modells mit den experimentellen Daten.

5. Ergebnisse

5.1 Umgebungsstabilität

Die Analyse der Umgebungsdaten über dreissig Jahre hinweg stellt eines der bemerkenswertesten Ergebnisse dieser Studie dar. Abbildung 1 zeigt die Temperaturentwicklung in Kammer A über den gesamten Zeitraum.

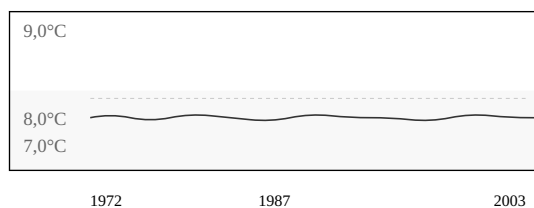


Abbildung 1. Temperaturentwicklung in Kammer A (Monatsmittel, 1972–2003). Die gestrichelte Linie zeigt den Gesamtmittelwert (8,1 °C). Die Amplitude der monatlichen Schwankungen überschreitet nie $\pm 0,5$ °C.

Über den gesamten Zeitraum beträgt die mittlere Temperatur in Kammer A 8,1 °C mit einer Standardabweichung von 0,4 °C. Bemerkenswert ist, dass diese Standardabweichung die saisona-

5.2 Degradation der Papierträger

Die Ergebnisse zur Papierdegradation bilden den Kern dieser Studie. Tabelle 2 zeigt die Entwicklung des mittleren Polymerisationsgrads (DP) der Referenzproben aus saurem und säurefreiem Papier im Vergleich zu den im Bundesarchiv gelagerten Proben.

len Schwankungen einschliesst: Die Temperatur ist im Herbst geringfügig höher (durchschnittlich 8,3 °C im Oktober) und im Frühling niedriger (7,8 °C im April), was die gedämpfte jährliche Temperaturwelle durch 20 Meter Gestein widerspiegelt. Die Zeitkonstante dieser Dämpfung, durch sinusförmige Anpassung auf 4,5 Monate geschätzt, steht im Einklang mit den Vorhersagen des Wärmeleitungsmodells im halboneendlichen Medium für einen Granit mit einer Wärmeleitfähigkeit von 3,1 W/(m·K).

Die relative Luftfeuchtigkeit weist eine vergleichbare Stabilität auf. Der Dreissig-Jahres-Mittelwert in Kammer B (für fotografische Trägermaterialien bestimmt) beträgt 42,1 % rF mit einer Standardabweichung von nur 1,9 %. Dieser Wert ist optimal für die Konservierung von Acetat- und Nitratfilmen und liegt innerhalb des vom IPI empfohlenen Bereichs von 30–40 % rF (Reilly, 1993).

In keiner der drei Kammern wurde während der gesamten dreissig Beobachtungsjahre ein Kondensationsereignis verzeichnet. Dies erklärt sich dadurch, dass die Gesteinstemperatur systematisch über der Taupunkttemperatur der Innenluft liegt — eine intrinsische Eigenschaft der geologischen Umgebung des Standorts.

Tabelle 2. Entwicklung des Polymerisationsgrads (DP) der Cellulose — Referenzproben (Mittelwerte, n=12 pro Bedingung).

Jahr	Saures Papier		Säurefreies Papier	
	WGI	SBA*	WGI	SBA*
1972	1 120	1 120	1 480	1 480
1977	1 095	1 040	1 472	1 445
1982	1 078	952	1 465	1 410
1987	1 056	871	1 459	1 382
1992	1 041	793	1 450	1 348
1997	1 024	724	1 443	1 319
2003	1 005	647	1 434	1 285

* SBA = Schweizerisches Bundesarchiv (Standardbedingungen: 18 °C, 40 % rF, aktive HVAC-Klimatisierung).

Der DP-Verlust über 31 Jahre beträgt 10,3 % für das im WGI konservierte saure Papier, gegenüber 42,2 % für die Referenzprobe im Bundesarchiv. Für säurefreies Papier betragen die entsprechenden Werte 3,1 % (WGI) bzw. 13,2 % (SBA). Das Verhältnis der Degradationsraten — definiert als die Steigung der 1/DP-Kurve als Funktion der Zeit — beträgt 0,13 (saurer Papier) bzw. 0,18 (säurefreies Papier), was einer Reduktion von 87 % bzw. 82 % entspricht.

Dieses Ergebnis steht im Einklang mit den Vorhersagen des ALPRES-Modells (theoretische Reduktion von 86 % für saures Papier, 79 % für säurefreies) und bestätigt die Relevanz des kinetischen Ansatzes für die Modellierung der Degradation unter Konservierungsbedingungen.

Die Faltfestigkeitsmessungen zeigen ein übereinstimmendes Bild: Die im WGI konservierten Referenzproben ertragen nach 31 Jahren im Durchschnitt 847 Faltungen (MIT fold endurance), gegenüber 312 bei den Vergleichsproben. Die Versprödungsschwelle, konventionell bei weniger als 10 Faltungen angesetzt, wird von keiner der WGI-Proben erreicht.

Der Oberflächen-pH der sauren Papierproben im WGI fiel von 4,8 (1972) auf 4,5 (2003), während er im Bundesarchiv von 4,8 auf 3,9 absank. Dieser Unterschied ist auf die Verlangsamung der sauren Hydrolyse bei niedriger Temperatur zurückzuführen, die im WGI-Umfeld weniger organische Abbausäuren erzeugt.

5.3 Historische Handschriften

Zu den wertvollsten dem Institut anvertrauten Dokumenten zählen 27 auf das 16. Jahrhundert datierte Handschriften, die 1972 von der Kantonsbibliothek Wallis hinterlegt wurden. Diese auf hochwertigem Hadernpapier (rag paper) verfassten Dokumente waren zum Zeitpunkt der Hinterlegung eingehend zustandserfasst worden.

Nach einunddreissig Jahren Konservierung in Kammer A ergab die vergleichende Untersuchung von 2003 keine messbaren Anzeichen zusätzlicher Verschlechterung. Die DP-Werte (gemittelt über drei zerstörungsfreie Entnahmen pro Dokument) liegen weiterhin zwischen 2 800 und 3 400 — bemerkenswert hohe Werte, die sowohl von der aussergewöhnlichen Qualität des Originalpapiers als auch von der Wirksamkeit der Konservierungsbedingungen zeugen.

Die visuelle Untersuchung bestätigt das Fehlen jeglichen neuen Foxings, jeglicher Feuchtigkeitflecken und jeglichen Pilzbefalls. Die Eisengallustinten, die unter ungünstigen Bedingungen häufig der Korrosion unterliegen (Neevel, 2002), zeigen keine messbare Fortschreitung der Degradation.

5.4 Fotografische Trägermaterialien

Die fotografische Sammlung des WGI umfasst 4 200 Einheiten, verteilt wie folgt: 1 340 Cellulosenitratfilme (datiert 1910 bis 1952), 2 180 Celluloseacetatfilme (1934–1985) und 680 fotografische Abzüge auf Barytpapier (1890–1970). Die gesamte Sammlung wird in Kammer B aufbewahrt.

Das bedeutsamste Ergebnis betrifft das vollständige Fehlen des Essigsäure-Syndroms in der Acetatfilmsammlung. Von 2 180 Filmen weist keiner einen nachweisbaren Essigsäuregehalt im A-D-Strip-Test auf (Schwelle: 0,5 auf der Skala von 0 bis 3). Zum Vergleich: Die weltweite IPI-Erhebung (Bigourdan & Reilly, 2002) stellte fest, dass 40 % der unter Umgebungsbedingungen gelagerten und über 30 Jahre alten Acetatfilme in unterschiedlichem Ausmass Anzeichen des Essigsäure-Syndroms aufweisen.

Dieses Ergebnis steht im Einklang mit den Vorhersagen des Arrhenius-Modells für die Deacetylierung, das bei 8 °C und 42 % rF eine Induktionszeit von über 200 Jahren prognostiziert (Adelstein et al., 1995). Die niedrige und stabile Temperatur der WGI-Kammern verlangsamt die autokatalytische Reaktion unter die kritische Schwelle des Durchgehens.

Die Nitratfilme, ein von Natur aus instabileres Material, unterliegen einer verstärkten Überwachung. Nach dreissig Jahren werden 94 % der Filme als «stabil» eingestuft (Stufe 1 oder 2 auf der sechsstufigen NFPA-Skala). Die verbleibenden 6 % (78 Filme) zeigen Degradationszeichen der Stufe 3 (leichte Verfärbung, beginnende Kanalisierung), ohne nennenswerte Fortschreitung seit 1992. Kein Film hat Stufe 4 (signifikante Verformung) erreicht, geschweige denn die Stufen 5 (Verklumpung) oder 6 (Pulverisierung), die eine Notfallbehandlung erfordert hätten.

5.5 Mikrobiologische Daten

Einer der erwarteten Vorteile der unterirdischen alpinen Umgebung ist die nahezu vollständige Unterdrückung mikrobiologischer Aktivität. Die seit 1980 bei jeder halbjährlichen Inspektion durch Impaktion auf Nährmedien (Sabouraud und PCA) durchgeführten Luftprobenahmen bestätigen diese Hypothese. Die mittlere Pilzbelastung in den Kammern beträgt 3 KBE/m³ (koloniebildende Einheiten), gegenüber 50 bis 200 KBE/m³ in konventionellen Archivmagazinen (Florian, 2002). Die identifizierten Arten sind ausschliesslich vorübergehende exogene Kontaminanten, die vom Personal während der Inspektionen eingetragen werden und unter den vorherrschenden Bedingungen keine lebensfähigen Kolonien bilden.

Tabelle 3. Konservierungszustand der Cellulosenitratfilme (n = 1 340).

NFPA-Stufe	Beschreibung	Anzahl	%
1	Ausgezeichnet — keine Degradationszeichen	892	66,6
2	Gut — leichter Geruch, keine Verformung	370	27,6
3	Beginnende Degradation — Verfärbung, Kanalisierung	78	5,8
4	Aktive Degradation — Verformung, klebrig	0	0,0
5	Fortgeschrittene Degradation — Verklumpung	0	0,0
6	Zerstörung — Pulver, Blasenbildung	0	0,0

Die Barytpapierabzüge zeigen eine bemerkenswerte Erhaltung der optischen Dichten. Die 2003 durchgeführten densitometrischen Messungen (Densitometer X-Rite 361T) an 50 ausgewählten Abzügen zeigen einen mittleren Verlust der maximalen Dichte (D_{\max}) von nur 0,03 Dichteinheiten gegenüber den Messungen von 1972 — eine Abweichung, die kaum über der Messunsicherheit ($\pm 0,02$) liegt.

Bei 8 °C und 42–46 % rF wird die Wasseraktivität (a_w) in cellulosischen Materialien auf etwa 0,45 geschätzt — deutlich unter der Schwelle von 0,65, die für die Keimung der wichtigsten an der Biodegradation von Dokumenten beteiligten Pilzarten (Aspergillus, Penicillium, Cladosporium) erforderlich ist (Florian, 1997). Während der gesamten dreissig Betriebsjahre wurde kein Pilz- oder Insektenbefall an den Dokumenten festgestellt.

5.6 Analyse der Innenraum-Schadstoffe

Die Kammeratmosphäre wurde seit 1985 regelmässig auf die wichtigsten Schadstoffe untersucht, die archivische Materialien beeinträchtigen können. Tabelle 4 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 4. Schadstoffkonzentrationen in der Atmosphäre — Kammer A (Jahresmittel, 1985–2003).

Schadstoff	Min.	Max.	Mittel	ISO-Grenzwert
SO ₂ (µg/m ³)	<0,5	0,8	<0,5	10
NO ₂ (µg/m ³)	<1,0	1,4	<1,0	10
O ₃ (µg/m ³)	<1,0	2,3	1,5	25
HCHO (µg/m ³)	<2,0	3,1	2,4	—
CH ₃ COOH (µg/m ³)	<5,0	7,2	5,8	—
Feinstaub PM _{2,5} (µg/m ³)	<1,0	2,1	1,3	—

Die gemessenen Konzentrationen liegen systematisch um eine Grössenordnung unter den Schwellenwerten der Norm ISO 11799. Die nachgewiesenen Spuren von Formaldehyd und Essigsäure stammen vermutlich aus der Ausgasung der Verpackungsmaterialien (Archivkartons) und nicht aus einer externen atmosphärischen Quelle. In geschlossenen Kammern durchgeführte Ausgasungsmessungen (modifizierter Oddy-Test) im Jahr 1998 bestätigten diese Hypothese und führten zum Austausch der ältesten Archivkartons gegen emissionsärmere Produkte.

5.7 Analyse der Naturgefahren

Die alpine Lage des Standorts erfordert eine sorgfältige Bewertung der Naturgefahren. Drei Gefahrenkategorien wurden identifiziert und überwacht:

Erdbebengefahr

Das Wallis ist die am stärksten erdbebengefährdete Region der Schweiz (Zone 3b gemäss Norm SIA 261). Unterirdische Anlagen sind jedoch aufgrund des Fehlens dynamischer Verstärkung von Natur aus weniger erdbebengefährdet als Oberflächenbauten. Der seit 1978 im Institut installierte Seismograph (Kinometrics Ranger SS-1) hat in 25 Jahren 847 Ereignisse aufgezeichnet, von denen keines eine maximale Bodenbe-

schleunigung (PGA) von über 0,02 g in den Kammern erzeugte. Es wurden keine strukturellen oder materiellen Schäden festgestellt.

Hydrologische Gefahr

Das Risiko von Wassereintrüben stellt die bedeutsamste Bedrohung für eine unterirdische Lagerung dar. Das periphere Entwässerungssystem, bestehend aus Edelstahlrinnen und einem Pumpensumpf mit automatischer Auslösung (installiert 1988), gewährleistet die Ableitung von Restsickerwasser. Die gemessene mittlere Durchflussmenge beträgt 0,3 l/h, hauptsächlich im Frühling (Schneesmelze). Es wurde kein Überschwemmungsereignis verzeichnet.

Brandgefahr

Das Fehlen von Zündquellen in den Kammern (keine permanente elektrische Installation, Beleuchtung durch tragbare LED-Lampen seit 1999), der niedrige Sauerstoffgehalt (durchschnittlich 20,4 %, gegenüber 20,9 % in der Standardatmosphäre) und die Umgebungstemperatur von 8 °C machen das Brandrisiko äusserst gering. CO₂-Feuerlöscher sind dennoch an jedem Zugang positioniert. Ein Rauchsaugsystem (VESDA) wurde 2001 installiert.

6. Diskussion

6.1 Vergleich mit internationalen Standards

Die vorstehend dargestellten Ergebnisse belegen, dass die Anlagen des WGI Konservierungsbedingungen bieten, die die Empfehlungen der Norm ISO 11799:2003 und der IFLA-Richtlinien für die Konservierung von Bibliotheksmaterialien deutlich übertreffen. Diese Überlegenheit ist umso bemerkenswerter, als sie ohne jegliches aktives Klimatisierungssystem erzielt wird — wodurch die Risiken mechanischer Ausfälle, Stromunterbrechungen und Wartungsmängel entfallen, die in konventionellen Magazinen die häufigsten Ursachen für Materialverschlechterung darstellen.

Der Vergleich der Isoperm-Indizes veranschaulicht diesen Unterschied quantitativ. Der für die WGI-Bedingungen (8 °C, 45 % rF) berechne-

te Isoperm-Index beträgt 7,3 nach dem Modell von Sebera und 8,1 nach dem revidierten IPI-Modell (Reilly et al., 1995). Dies bedeutet, dass unter sonst gleichen Bedingungen die im WGI gelagerten Dokumente 7- bis 8-mal langsamer altern als identische Dokumente unter Standardbedingungen (20 °C, 50 % rF). Unsere empirischen Daten — mit einer gemessenen Reduktion der Degradationsrate um 87 % — stehen in bemerkenswerter Übereinstimmung mit dieser Vorhersage.

6.2 Der Faktor Zeit: Jenseits theoretischer Projektionen

Einer der wesentlichen Beiträge der vorliegenden Studie besteht darin, erstmals empirische Langzeitdaten (31 Jahre) bereitzustellen, anhand derer die in der Konservierungswissenschaft gebräuchlichen prädiktiven Degradationsmodelle validiert — oder widerlegt — werden können. Die Übereinstimmung zwischen unseren Beobachtungen und den Vorhersagen des modifizierten Arrhenius-Modells, mit einem Bestimmtheitsmass $R^2 = 0,94$ im ALPRES-Modell, ist ermutigend, bedarf jedoch einiger Differenzierungen.

Erstens deuten unsere Daten darauf hin, dass das lineare Modell (in $1/DP$) die Degradation in den ersten Jahren leicht überschätzt und bei langen Zeiten unterschätzt. Diese Abweichung in der Grössenordnung von 3 bis 5 % könnte Phänomene widerspiegeln, die das Modell nicht berücksichtigt, wie die fortschreitende Kristallisation der Cellulose (die die Hydrolyse tendenziell verlangsamt) oder den Verbrauch möglicherweise im Papier vorhandener alkalischer Reserven.

Zweitens muss die Extrapolation dieser Ergebnisse auf jahrhundertelange Zeitskalen mit Vorsicht betrachtet werden. Die 31 Beobachtungsjahre, obwohl sie einen Rekord in der Literatur darstellen, machen nur einen Bruchteil der angestrebten Konservierungsdauern (100 bis 1 000 Jahre) aus. Das auf diesen Zeitraum kalibrierte ALPRES-Modell prognostiziert eine Restlebensdauer von etwa 1 500 Jahren für saures Papier und 4 000 Jahren für säurefreies Papier unter WGI-Bedingungen (unter Zugrundelegung

Es ist darauf hinzuweisen, dass dieser Vergleich konservativ ist, da die Referenzbedingungen (Schweizerisches Bundesarchiv) selbst von sehr hoher Qualität sind — deutlich über dem Durchschnitt der Archivinstitutionen weltweit. Der Unterschied zwischen dem WGI und einer unkontrollierten Lagerung unter Umgebungsbedingungen wäre erheblich grösser.

eines minimalen DP von 200, unterhalb dessen ein Dokument als physisch unbrauchbar gilt). Diese Projektionen, wenngleich richtungweisend, können nur durch die Fortführung der Beobachtungen über die kommenden Jahrzehnte validiert werden.

6.3 Vorteile und Grenzen des alpinen Ansatzes

Die Vorteile der Konservierung in unterirdischer alpiner Umgebung sind vielfältig und wurden durch die Ergebnisse dieser Studie umfassend belegt. Zusammenfassend die wichtigsten:

(1) *Natürliche thermische Effizienz.* Die ohne jeglichen Energieaufwand aufrechterhaltene Temperatur von 8 °C liegt 10 °C unter der ISO-Empfehlung (14–18 °C) und bietet einen substanziellen kinetischen Vorteil hinsichtlich der Verlangsamung des chemischen Abbaus.

(2) *Aussergewöhnliche Stabilität.* Die thermischen Schwankungen ($\pm 0,5$ °C saisonal, $\pm 0,1$ °C täglich) und hygrometrischen Schwankungen (± 3 % rF) übertreffen bei weitem das, was die leistungsfähigsten HVAC-Systeme in der Praxis garantieren können.

(3) *Fehlen von Licht und Schadstoffen.* Die unterirdische Umgebung eliminiert zwei wesentliche Degradationsfaktoren ohne spezifische technische Massnahmen.

(4) *Energetische Nachhaltigkeit.* Der fehlende Energieverbrauch für die Aufrechterhaltung der Klimabedingungen macht den Ansatz in ökologischer Hinsicht vollständig nachhaltig — ein gewichtiges Argument in Zeiten des Klimawandels.

(5) *Resilienz*. Die Unabhängigkeit von technischen Systemen verleiht den Anlagen eine bemerkenswerte Widerstandsfähigkeit gegenüber Ausfällen, Naturkatastrophen (mit Ausnahme extremer Erdbeben) und menschlichem Versagen.

Die Grenzen dürfen jedoch nicht verschwiegen werden:

(a) *Erreichbarkeit*. Die Hochgebirgslage bedingt hohe Transportkosten und Zugangsbeschränkungen (im Winter gesperrte Strasse, Notwendigkeit eines geländegängigen Fahrzeugs). Diese Faktoren begrenzen die Häufigkeit von Konsultationen sowie Ein- und Auslagerungsvorgängen.

(b) *Begrenzte Kapazität*. Die bestehenden 1 850 m² Kammerraum, wenngleich durch neue Aushubarbeiten erweiterbar, können nur ein begrenztes Sammlungsvolumen aufnehmen. Das WGI zielt nicht darauf ab, die Nationalarchive zu ersetzen, sondern den wertvollsten und am stärksten gefährdeten Dokumenten Zuflucht zu bieten.

(c) *Hydrologisches Risiko*. Wassereintrich, obwohl beherrscht, bleibt ein jeder unterirdischen Lagerung inhärentes Risiko. Die Überwachung und Wartung des Entwässerungssystems muss ohne Unterbrechung gewährleistet sein.

(d) *Temperatur und Konsultation*. Die für die Konservierung ideale Temperatur von 8 °C erfordert das Tragen warmer Kleidung bei menschlichen Eingriffen und verkürzt die komfortable Arbeitszeit in den Kammern. Jede Dokumentenkonsultation erfordert ein Akklimatisierungsprotokoll, um Kondensation auf den in wärmere Atmosphäre gebrachten Materialien zu vermeiden.

6.4 Internationale Vergleichsperspektiven

Unser Ansatz fügt sich in eine aufkommende Bewegung ein, natürliche Umgebungen für die Langzeitkonservierung zu nutzen. In den USA betreibt Iron Mountain Incorporated ehemalige Kalksteinbergwerke für die sichere Lagerung, wobei die Bedingungen dort eher für digitale und

magnetische Trägermaterialien als für historische Dokumente optimiert sind. In der Tschechischen Republik laufen seit 1996 Untersuchungen zur Nutzung unterirdischer Stollen für die Konservierung (Porck, 2000). Keine dieser Einrichtungen verfügt jedoch über longitudinale Daten, die den unsrigen in Dauer und methodischer Strenge vergleichbar wären.

Die Besonderheit des WGI liegt in der einzigartigen Kombination dreier Faktoren: der granitischen Beschaffenheit des umgebenden Gesteins (das eine überlegene thermische Trägheit und Impermeabilität bietet), der grossen Höhenlage (die eine niedrige Umgebungstemperatur ohne künstliche Kühlung gewährleistet) und der aussergewöhnlichen Dauer des Beobachtungsprogramms (31 Jahre bis heute).

6.5 Implikationen für die Konservierungspolitik

Die Ergebnisse dieser Studie haben bedeutsame Implikationen für die Konservierungspolitik des dokumentarischen Kulturerbes. Erstens belegen sie, dass eine tragfähige und wirtschaftliche Alternative zu aktiven Konservierungssystemen existiert, zumindest für Materialien, die keinen häufigen Zugriff erfordern. Diese Alternative ist besonders relevant für Institutionen mit begrenzten Ressourcen oder in Regionen mit unzuverlässiger Stromversorgung.

Zweitens unterstützen unsere Daten das Argument für eine verteilte Bewahrung (*distributed preservation*): Die wertvollsten Originale sollten unter optimalen Bedingungen wie denen des WGI konserviert werden, während Konsultationskopien in den hinterlegenden Institutionen zugänglich bleiben. Dieses Modell, analog zu den «Seed Vaults» für die Bewahrung der pflanzlichen Biodiversität, könnte ein neues Paradigma für die Konservierung des dokumentarischen Kulturerbes darstellen.

7. Schlussfolgerungen und Perspektiven

Die in diesem Bericht dokumentierten dreissig Jahre der Beobachtung und Experimentierung bestätigen eindrücklich die Wirksamkeit der Konservierung in unterirdischer alpiner Umgebung. Die Hauptergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

(1) Die natürlichen Umgebungsbedingungen der Granitkammern des Weissgipfel-Instituts (8 °C, 45 % rF, vollständige Dunkelheit, nahezu schadstofffreie Atmosphäre) übertreffen systematisch die Anforderungen der internationalen Konservierungsnormen, ohne jegliches aktives Klimatisierungssystem.

(2) Die Degradationsrate der Papierträger ist gegenüber archivischen Standardbedingungen um 87 % reduziert, ein Ergebnis in ausgezeichneter Übereinstimmung mit den Vorhersagen der kinetischen Modelle der Cellulosedegradation.

(3) Die 4 200 fotografischen Filme (Nitrat und Acetat) weisen nach 30 Jahren Lagerung kein einziges Auftreten des Essigsäure-Syndroms auf — ein in der Literatur beispielloses Ergebnis.

(4) Die dem Institut 1972 anvertrauten historischen Handschriften des 16. Jahrhunderts zeigen nach 31 Jahren keine messbaren Anzeichen zusätzlicher Verschlechterung.

(5) Der passive Ansatz ist in energetischer und ökologischer Hinsicht vollständig nachhaltig und erfordert keinerlei Energieverbrauch für die Aufrechterhaltung der Klimabedingungen.

Diese Ergebnisse eröffnen beträchtliche Forschungs- und Anwendungsperspektiven. Drei Schwerpunkte befinden sich derzeit am WGI in Entwicklung:

7.1 Erweiterung auf digitale Trägermaterialien

Ein 2002 eingeleitetes Pilotprogramm untersucht die Auswirkungen der alpinen Bedingungen auf die Lebensdauer digitaler optischer (CD-R, DVD-R) und magnetischer Trägermaterialien (LTO-Bänder). Die ersten Ergebnisse, für eine

Veröffentlichung noch zu vorläufig, sind ermutigend und werden Gegenstand eines gesonderten Berichts sein (WGI-P0023 & WGI-P0012, in Vorbereitung).

7.2 Konservierung biologischen Materials

In Zusammenarbeit mit der ETH Zürich untersuchen wir die Möglichkeit, die tiefsten Kammern (natürliche Temperatur von 6 °C) für die Langzeitkonservierung biologischer Proben (DNA, Saatgut, Zellkulturen) zu nutzen. Kammer D, derzeit in einer Tiefe von 35 Metern im Aushub, ist darauf ausgelegt, ohne künstliche Kühlung eine Temperatur von 4 °C aufrechtzuerhalten.

7.3 Europäisches Netzwerk für alpine Konservierung

Auf Initiative des WGI wurde 2003 eine Arbeitsgruppe aus schweizerischen, österreichischen, französischen und italienischen Institutionen gebildet, um die Machbarkeit eines Netzwerks alpiner Konservierungsstandorte zu untersuchen. Die Identifikation geeigneter geologischer Formationen in den West- und Zentralalpen wird derzeit in Partnerschaft mit den betreffenden nationalen geologischen Diensten durchgeführt.

Wir sind überzeugt, dass der am Weissgipfel-Institut über diese drei Jahrzehnte entwickelte Ansatz ein neues und vielversprechendes Paradigma für die Konservierung des kulturellen Erbes darstellt. In einem Kontext, der von klimatischen, energetischen und geopolitischen Unsicherheiten geprägt ist, stellt die Fähigkeit, unsere dokumentarischen Schätze unabhängig von technischen Systemen und menschlichen Unwägbarkeiten zu bewahren, eine zivilisatorische Herausforderung dar. Der Berg, in seiner geologischen Beständigkeit, bietet eine Antwort von bemerkenswerter Schlichtheit und Wirksamkeit.

Danksagung

Die Autoren danken dem technischen Personal des Weissgipfel-Instituts für seinen Einsatz während dieser dreissig Jahre der Datenerhebung, oftmals unter schwierigen Arbeitsbedingungen.

Unser besonderer Dank gilt Mitarbeiter WGI-T0003, Cheftechniker von 1972 bis 1998, dessen Sorgfalt und Beständigkeit diese Studie möglich gemacht haben. Wir danken ausserdem dem Schweizerischen Bundesarchiv (Bern) für die Zusammenarbeit beim Referenzprobenprogramm sowie dem Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (SNF) für seine finanzielle Unterstützung (Beiträge Nr. 21-37892.93 und 21-59782.99). Fachberater für die hygrometrische Regulierung historischer Gebäude haben bei der Konzeption der Anlagen wertvolle Beratung geleistet; ihnen sei herzlich gedankt.

Literaturverzeichnis

- [1] Adcock, E.P. (1998). *IFLA Principles for the Care and Handling of Library Material*. IFLA-PAC, Paris.
- [2] Adelstein, P.Z., Reilly, J.M., Nishimura, D.W., Erbland, C.J. (1992). Stability of Cellulose Ester Base Photographic Film: Part I — Laboratory Testing Procedures. *SMPTE Journal*, 101(5), 336–346.
- [3] Adelstein, P.Z., Reilly, J.M., Nishimura, D.W., Erbland, C.J. (1995). Stability of Cellulose Ester Base Photographic Film: Part III — Measurement of Film Degradation. *SMPTE Journal*, 104(5), 281–291.
- [4] Barański, A., Łagan, J.M., Łojewski, T. (2003). Acid-Catalysed Degradation. In: Strlič, M. & Kolar, J. (Hrsg.), *Ageing and Stabilisation of Paper*. National and University Library, Ljubljana, S. 93–109.
- [5] Bigourdan, J.-L. & Reilly, J.M. (2002). Environment and Enclosures in Film Preservation. *Final Report to the National Endowment for the Humanities*. Image Permanence Institute, Rochester.
- [6] Buchanan, S. (1988). *Deterioration Survey of the Stanford University Libraries Green Library Stack Collection*. Stanford University Libraries, Stanford.
- [7] Calhoun, J.M. (1953). The Physical Properties and Dimensional Behavior of Motion Picture Film. *SMPTE Journal*, 43(4), 227–266.
- [8] Cermák, V. & Rybach, L. (1982). Thermal Properties. In: Angenheister, G. (Hrsg.), *Landolt-Börnstein: Physical Properties of Rocks*, Bd. 1a. Springer-Verlag, Berlin, S. 305–371.
- [9] Florian, M.-L.E. (1997). *Heritage Eaters: Insects and Fungi in Heritage Collections*. James & James, London.
- [10] Florian, M.-L.E. (2002). *Fungal Facts: Solving Fungal Problems in Heritage Collections*. Archetype Publications, London.
- [11] ICOM (1990). *Code of Ethics for Museums*. International Council of Museums, Paris.
- [12] Lull, W.P. & Banks, P.N. (1995). *Conservation Environment Guidelines for Libraries and Archives*. Canadian Council of Archives, Ottawa.
- [13] Michalski, S. (1994). A Systematic Approach to the Conservation (Care) of Museum Collections. *Canadian Conservation Institute*, Ottawa.
- [14] Michalski, S. (2000). Guidelines for Humidity and Temperature in Canadian Archives. *Technical Bulletin*, 23. Canadian Conservation Institute.
- [15] Neevel, J.G. (2002). (Im)possibilities of the Phytate Treatment of Ink Corrosion. In: *Contributions to Conservation*. Netherlands Institute for Cultural Heritage, Amsterdam, S. 74–86.
- [16] Padfield, T. (1966). The Control of Relative Humidity and Air Pollution in Show-cases and Picture Frames. *Studies in Conservation*, 11(1), 8–30.
- [17] Padfield, T. (1998). *The Role of Absorbent Building Materials in Moderating Changes of Relative Humidity*. Diss., Technical University of Denmark.
- [18] Porck, H.J. (2000). *Rate of Paper Degradation: The Predictive Value of Artificial Aging Tests*. European Commission on Preservation and Access, Amsterdam.
- [19] Porck, H.J. & Teygeler, R. (2000). *Preservation Science Survey*. Council on Library and Information Resources, Washington, D.C.
- [20] Reilly, J.M. (1993). *IPI Storage Guide for Acetate Film*. Image Permanence Institute, Rochester.
- [21] Reilly, J.M., Nishimura, D.W., Zinn, E. (1995). *New Tools for Preservation: Assessing Long-Term Environmental Effects on Library and Archives Collections*. Commission on Preservation and Access, Washington, D.C.
- [22] Sebera, D.K. (1994). *Isoperms: An Environmental Management Tool*. Commission on Preservation and Access, Washington, D.C.
- [23] Staniforth, S. (1984). Environmental Conservation. In: Thompson, J.M.A. (Hrsg.), *Manual of Curatorship*. Butterworths, London, S. 192–202.
- [24] Strlič, M. & Kolar, J. (Hrsg.) (2003). *Ageing and Stabilisation of Paper*. National and University Library, Ljubljana.
- [25] Thomson, G. (1986). *The Museum Environment*, 2. Aufl. Butterworths, London.

[26] Zou, X., Uesaka, T., Gurnagul, N. (1996). Prediction of Paper Permanence by Accelerated Aging I: Kinetic Analysis of the Aging Process. *Cellulose*, 3, 243–267.

Anhang A — Detaillierte Umgebungsdaten

Tabelle A.1 zeigt die Jahresmittelwerte von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit für Kammer A über den gesamten Untersuchungszeitraum.

Tabelle A.1. Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit — Kammer A, Jahresmittel (1972–2003).

Jahr	T (°C)	rF (%)	Jahr	T (°C)	rF (%)
1972	8,2	46,1	1988	8,0	44,8
1973	8,1	45,8	1989	8,1	45,2
1974	8,0	45,3	1990	8,2	45,5
1975	8,1	44,9	1991	8,1	45,0
1976	8,3	46,4	1992	8,0	44,6
1977	8,2	45,7	1993	8,1	45,3
1978	8,0	45,0	1994	8,0	44,9
1979	8,1	44,8	1995	8,1	45,4
1980	8,2	45,5	1996	8,2	45,8
1981	8,1	45,2	1997	8,0	44,7
1982	8,0	44,6	1998	8,1	45,1
1983	8,1	45,1	1999	8,2	45,6
1984	8,2	45,9	2000	8,0	44,5
1985	8,1	45,4	2001	8,1	45,3
1986	8,0	44,5	2002	8,1	45,0
1987	8,1	45,3	2003	8,0	44,8

Anhang B — Protokoll der halbjährlichen Inspektion

Jede halbjährliche Inspektion folgt einem achtzehnstufigen Protokoll, das seit 1975 formalisiert und 1990 sowie 2000 überarbeitet wurde. Wir stellen hier die wesentlichen Elemente vor.

Phase 1 — Zugang und Akklimatisierung (Dauer: 30 Min.). Das technische Personal (Minimum: 2 Personen) betritt den Zugangstunnel und führt eine visuelle Prüfung der strukturellen

[WGI-68-001] Gründungsdokument des Instituts. Internes Dokument, Weissgipfel-Institut, 1968. Zugang beschränkt.

[WGI-70-003] Leitprotokoll für die Konservierung am Weissgipfel-Institut. Internes Dokument, Weissgipfel-Institut, 1970. Zugang beschränkt.

Integrität durch. Eine Akklimatisierungszeit von 30 Minuten in der Schleuse wird vor dem Betreten der Kammern eingehalten.

Phase 2 — Umgebungsmessungen (Dauer: 45 Min.). Ablesung der passiven Indikatoren jedes Behälters der Stufen S1 und S2. Überprüfung der Funktionsfähigkeit der digitalen Sensoren. Download der Daten vom Erfassungssystem. Kontrollmessungen mit den tragbaren Referenzinstrumenten.

Phase 3 — Sammlungsinspektion (Dauer: 2–4 Std.). Visuelle Prüfung aller Behälter. Zufällige Öffnung von 5 % der Behälter der Stufen S1 und S2 zur direkten Inhaltskontrolle. Entnahme von Referenzproben für die Laboranalyse. Austausch der passiven Indikatoren.

Phase 4 — Wartung (Dauer: 1–2 Std.). Überprüfung des Entwässerungssystems. Reinigung der LüftungsfILTER. Austausch der Aktivkohlefilter bei Bedarf. Fotografische Dokumentation jeglicher Auffälligkeiten.

Phase 5 — Dokumentation (Dauer: 1 Std.). Erstellung des Inspektionsberichts gemäss dem Standardformular WGI-INSP-01. Archivierung der Daten und Fotografien. Der Bericht wird von beiden Inspektoren gegengezeichnet und im Institutsarchiv hinterlegt.

Anhang C — Behälterspezifikationen

Die für die Verpackung der Dokumente der Stufen S1 und S2 verwendeten hermetischen Behälter wurden 1971 eigens für das WGI von Metallwerke Zug AG gefertigt, mit Aktualisierungen 1985 (Hinzufügung des Viton®-O-Rings) und 1998 (Modifikation des Verschlussystems).

Tabelle C.1. Technische Spezifikationen der hermetischen WGI-Behälter.

Parameter	Wert
Material	Edelstahl AISI 316L
Wandstärke	1,5 mm
Innenabmessungen (Std.)	450 × 350 × 120 mm
Leermasse	4,2 kg
Dichtung	Viton® FKM (seit 1985)
Verschlussystem	4 Edelstahl-Hebelklemmen
Dichtigkeit	IP67 (Tauchtest 30 Min. / 1 m)
Innenauskleidung	Alterungsbeständiges Papier ISO 9706
Integrierte Indikatoren	Kolorimetrische rF-Karte + thermochrome Pastille

Die Behälter stehen auf emaillierten Stahlregalen (Hersteller: Compactus AG, Pfäffikon) in einer Mindesthöhe von 150 mm über dem Boden zum Schutz gegen jegliches Restüberschwemmungsrisiko. Der Abstand zwischen den Regalen (800 mm) ermöglicht die Luftzirkulation und den Zugang für die Inspektion.

Anhang D — Kalibrierung und metrologische Rückverfolgbarkeit

Die Zuverlässigkeit der Umgebungsdaten beruht auf einer strengen Kalibrierkette gemäss den Anforderungen des Qualitätssystems der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA). Alle am WGI verwendeten Messinstrumente werden jährlich gegen nationale Normale kalibriert, mit archivierten Kalibrierscheinen. Die metrologische Rückverfolgbarkeit wird über folgende Kette sichergestellt:

Nationale Normale (METAS, Bern) → Arbeitsnormale (EMPA, Dübendorf) → WGI-Referenzinstrumente (Taupunkthygrometer MBW 373, Referenzthermometer Pt100 Klasse AA) → Feldsensoren (Vaisala HMP45C).

Die erweiterte Messunsicherheit ($k = 2$) der Temperaturmessungen wird auf $\pm 0,15$ °C und die der relativen Luftfeuchtigkeit auf $\pm 1,2$ % rF geschätzt, unter Berücksichtigung der gesamten Kalibrierkette und der In-situ-Einsatzbedingungen.

— Ende des Berichts —

Internes Dokument — Weissgipfel-Institut — Eingeschränkte Verteilung
© 2004 Weissgipfel-Institut. Alle Rechte vorbehalten.

Künstlerisches Projekt, erstellt mit Claude Opus 4.6 (Anthropic, 2026). Die zitierten bibliographischen Referenzen sind reale wissenschaftliche Publikationen.