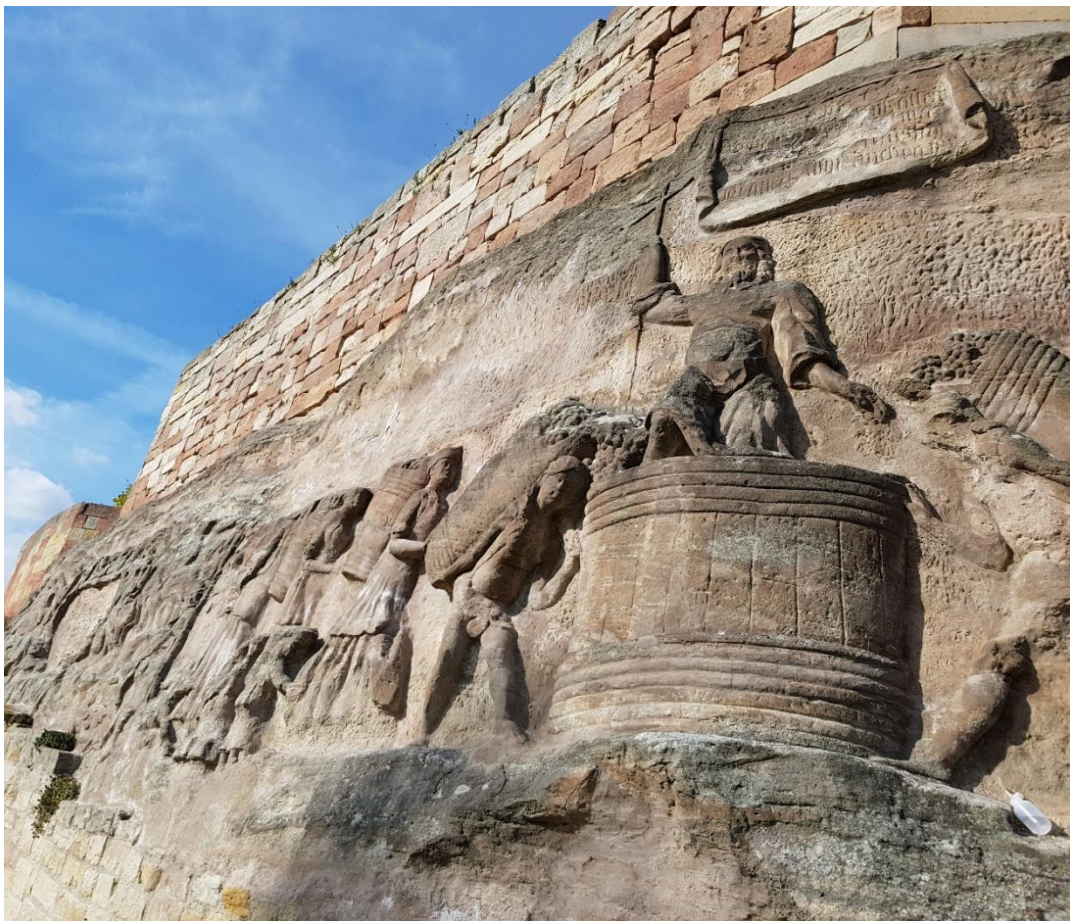


DBU-Fördervorhaben AZ 33821/01-45

„Pflege und Erhaltung von anthropogen geschädigten und bereits restaurierten Natursteinobjekten im anstehenden Gestein bzw. im Mauerwerksverbund vor dem besonderen Hintergrund ihrer Einbindung in umgebende Feuchte- und Salztransportprozesse am Beispiel des Steinernen Albums in Großjena“

„Das Steinerne Album in Großjena“



Prof. Dr. Jeannine Meinhardt
Studiengang Konservierung und Restaurierung
Fachrichtung Stein
Fachhochschule Potsdam

Inhaltsverzeichnis

Dank	4
1. Einleitung	5
2. Aufgabenbereiche der Kooperationspartner	6
3. Charakterisierung und historischer Abriss des Steinernen Albums	7
3.1 Kunsthistorische Einordnung des Steinernen Albums	8
3.2 Restaurierungsgeschichte	9
3.3 Durchführung und Erfolg des ursprünglich gefassten Pflegekonzeptes	10
4. Geologische und petrographische Beschreibung des Mittleren Buntsandsteins am Steinernen Album	12
5. Aktueller Erhaltungszustand	16
6. Bewertung der Schadensdynamik an den Reliefs	17
6.1 Vergleichende Betrachtung von Aufnahmen unterschiedlicher Zeitschnitte	17
6.2 Anwendung der Risikoziffer zur Zustandsbewertung	27
7. Themenbereiche des optimierten Pflegekonzeptes	37
7.1 Langzeitmonitoring der Situation der Feuchte- und Salzbelastung	37
7.1.1 Durchgeführte Untersuchungen	37
7.1.2 Ergebnisse	39
7.1.3 Ergänzende Untersuchungen (IDK, FH Potsdam)	42
7.2 Umgang mit löslichen Salzen	46
7.2.1 Untersuchung der vorliegenden Salzbelastung am Steinernen Album	46
7.2.2 Qualitative Salzanalyse von Ausblühsalzen mittels Röntgendiffraktometrie (RDA)	46
7.2.3 Quantitative Salzanalyse mittels Ionenaustauschchromatografie	47
7.2.4 Analyse der oberflächennahen Salzbelastung mittels Cellulose-Kompressen	50
7.2.6 Analyse des Salzspeichermörtels	52
7.2.7 Zusammenfassung zur vorliegenden Salzbelastung am Steinernen Album	55
7.3. Umgang mit der biogenen Besiedelung	60
7.3.1 Flechten	60
7.3.2 Vegetationsaufnahme der Flechtenflora am Steinernen Album	62
7.3.3 Maßnahmen zum Umgang mit der massiven Flechtenbesiedelung	71
7.4 Umgang mit den vergipsten Oberflächen	84
7.4.1 Ergebnisse der Materialuntersuchung der MPA Bremen	86
7.4.2 Musterflächen zur Reduktion der gipsbelasteten Oberflächen	87

7.5 Strukturelle Festigung	95
7.5.1 Bewertung der Altkonservierung unter Beachtung einer möglichen Frühhydrolyse	95
7.5.2 Wiederbehandlung mittels einer angepassten Injektionstränkung	101
7.6 Steiner Ergänzung und Steininjektion	111
7.6.1 Aktueller Zustand der Steiner Ergänzungsmassen	111
7.6.2 Überlegungen zur Anpassung der Steiner Ergänzungsmassen an die Objektsituation	112
7.6.3 Maßnahmeempfehlung zur Sicherung von Hohlstellen	115
8. Öffentlichkeitsarbeit	118
8.1 Optimierung der Präsentation der Reliefs vor Ort	118
8.1.1 Beweggründe	118
8.1.2. Praktische Umsetzung	119
8.2 Publikationen im Rahmen des Projekts	127
9. Schlussfolgerungen bezogen auf den zu optimierenden Pflegeplan	129
10. Ausblick	137
11. Literaturverzeichnis	138
12. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	141

Dank

Zunächst gilt mein großer Dank der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, die an diesem herausragenden Objekt, das es verdienen würde, „Denkmal nationaler Bedeutung“ zu werden, bereits zum wiederholten Male den Erkenntnisgewinn und damit die Chance auf einen langfristigen Erhalt gefördert hat.

Weiterhin möchte ich den Kooperationspartner*innen danken, die über weite Strecken dem Projekt und ihren Aufgaben darin treu geblieben sind, selbst, wenn die Coronakrise auch auf unser Vorhaben und die Möglichkeiten der inhaltlichen Arbeit in den einzelnen Institutionen, so wie auch an der Fachhochschule, negativ eingewirkt hat.

Ein extra großes Dankeschön möchte ich an zahlreiche Studierende des Studiengang Konservierung und Restaurierung, Fachrichtung Stein, der FH Potsdam und an unsere Werkstatteleiterin, Katja Schmeikal, richten. Für manche*n war das Projekt aufgrund der langen Laufzeit dauerhafter Begleiter durch Praxisprojekte und Qualifikationsarbeiten. Gemeinsam haben wir größter Hitze und manch anderen widrigen Umständen als eingeschworenes Team getrotzt. Wir haben gemessen, gebastelt, konserviert und gegrübelt, immer fest die Erhaltung der Reliefs des Steinernen Albums im Blick.



Vollgepackt und coronakonform geht es auf nach Großjena!

Darüber hinaus danke ich von ganzem Herzen meinem Mentor und Lehrer Prof. Dr. Rolf Snethlage für alles was er mir beigebracht hat.

1. Einleitung

Wesentlicher Anlass des vorliegenden Forschungsvorhabens war die Optimierung des Pflegekonzeptes für das Steinernes Album, der Tatsache zum Trotz, dass immer geringer werdende finanziellen Mittel den restauratorischen Handlungsspielraum zunehmend einschränken werden. Daher widmete sich das Projekt neben den konkreten Erhaltungsmaßnahmen auch der Optimierung des touristischen Präsentationskonzeptes des Steinernen Albums, da nur über Information eine Sensibilisierung der Öffentlichkeit erreicht werden kann. Man engagiert sich eher für den Erhalt einer Sache, wenn man sie kennt. Trotz regelmäßig durchgeführter Pflegeprozesse, die auf eine umfassende Maßnahme aufbauen, wie es am Steinernen Album der Fall war und ist, konnte die fortschreitende Verwitterung bislang nicht aufgehalten bzw. hinreichend verlangsamt werden. Dafür gibt es, wie so oft, verschiedene Gründe, die mehr oder weniger komplex miteinander wirken. Die Tatsache, dass das Steinernes Album barockzeitlich in das anstehende Gestein geschlagen wurde und es nun schon seit 300 Jahren ungeschützt der Witterung ausgesetzt ist und auch DDR-zeitliche industrielle Kontamination über sich ergehen lassen musste, spielt in dem Zusammenhang eine wichtige Rolle. Aber auch der Wegfall der schwefelsauren Niederschläge und die Verbesserung der Luftgüte bleiben nicht ohne Einfluss auf das Objekt. Der biogene Bewuchs, der seit ungefähr 12-15 Jahren einige Reliefs in besonderem Maße besiedelt, hat nachweislich eine erhebliche Gefügelockerung zur Folge. Aber auch die Erkennbarkeit der reliefierten Oberflächen ist gravierend dadurch beeinträchtigt. Über die Kombination aus Reinigung und dem Auftrag verschiedener Schlämmen sind diesbezüglich im Projekt die Möglichkeiten der Vergrämung der Flechtenbesiedlung, auch mit Hinblick auf die damit einhergehende ästhetische Beeinträchtigung der frei exponierten Reliefs, untersucht worden. Im Rahmen des bearbeiteten DBU-Projekts sollten weiterhin die Einflussfaktoren der fortschreitenden Verwitterung konkret ermittelt und ihre tatsächliche Wirkmächtigkeit auf den aktuellen Zustand bzw. den Erhalt der Reliefs eingeschätzt werden. In dem Zusammenhang galt es auch, die Wirksamkeit und den perspektivischen Umgang mit der Altkonservierung, einer massiv ausgeführten Injektionsfestigung mit KSE, in ein natürliches Felsgefüge hinein, zu prüfen. Auf der Grundlage all der Erkenntnisse stand zum Ziel, ein optimiertes Pflegekonzept zu erarbeiten. Der schon weiter oben angemerkte perspektivisch immer kleiner werdende Geldtopf für den Kulturgütererhalt, aber auch der Wunsch, soviel Originalsubstanz wie möglich zu erhalten, zeigen, wie notwendig langfristige Monitoring- und Pflegekonzepte sind. Große und teure Restaurierungskampagnen lassen sich so vermeiden. Um für das Steinernes Album diese Kontinuität auch weiterhin auf lange Sicht zu gewährleisten, und auch vor dem Hintergrund der allmählich versiegenden Zinserträge, mit denen die Deutsche Stiftung Denkmalschutz seit dem Abschluss der großen Restaurierungskampagne Ende der 1990er Jahre dankenswerter Weise die Pflege und das Monitoring der Reliefs auf relativ kleiner Flamme finanziert, wird den Verantwortlichen der staatlichen Denkmalpflege und auch den Eigentümern dringend empfohlen, für dieses herausragende Objekt einen Antrag auf „Denkmal nationaler Bedeutung“ zu stellen.

Zunächst erfolgten der Antrag und die Bewilligung des Vorhabens mit dem Schwerpunkt auf der Reduktion der löslichen Salze. Bereits im ersten Jahr des Projekts stellte sich jedoch heraus, dass die Belastung mit dem leichtlöslichen Magnesiumsulfat, wie es noch im DBU-Vorhaben 2008-2010 festgestellt worden war, nicht mehr in relevantem Ausmaß vorliegt. Daher ergab sich eine inhaltliche Verschiebung hin zur Berücksichtigung des Einflusses des massiven Flechtenbewuchses auf den Fortbestand der davon betroffenen Reliefs bzw. hin zur Vergrämung des biogenen Bewuchses. Dabei wurde ein innovatives Vorgehen für freibewitterten Objekte, die dem anstehenden Gestein verbunden sind, gewählt, das im Bericht vorgestellt wird. Die ursprüngliche Projektlaufzeit wäre zum Jahresende 2019 geendet. Coronabedingt hatte es zweimal eine 12monatige kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit, bis Ende 2021, gegeben.

2. Aufgabenbereiche der Kooperationspartner

Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK)

Das IDK ist schon seit der großen Restaurierungskampagne, ab 1995, immer wieder am Steinernen Album tätig und hat über die Zeit eine langjährige Objekterfahrung erarbeitet. Im Projekt ist das IDK, u.a. begleitend zu den Aufgaben der MPA Stuttgart, für die Diagnostik der Salz- und Feuchtesituation an den Reliefs tätig gewesen.

MPA Universität Stuttgart

Dr. Frank Lehmann hat sich federführend seitens der MPA mit dem Projekt beschäftigt. Dabei ging es um die Erfassung der tatsächlichen Salz- und Feuchtetransportvorgänge im anstehenden Gestein an zwei unterschiedlichen Reliefs mittels drahtlosem Sensorsystem zur Ermittlung der Feuchte und der elektrischen Impedanz. Auch Dr. Jürgen Frick war bei den Projekttreffen anwesend.

Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt

Die Abteilung Restaurierung des Landesamts unterstützte das Projekt ebenfalls mit ihrer Objekterfahrung (restaurierungsspezifisch und kunsthistorisch). Vor allem auch mit Hinblick auf die Schlämmaufträge, die im Zusammenhang mit den Versuchen zur Vergrämung der biogenen Besiedelung aufgetragen worden sind, halfen die Kollegen bei der Reflektion zu restaurierungsethischen Fragestellungen. Perspektivisch wird das Landesamt auch unterstützen bei der Übertragung der erzielten positiven Projektergebnisse in die Denkmalpflegepraxis.

Fokus GmbH

Im Rahmen des aktuellen DBU-Projekts wurde auch die fokus GmbH Leipzig integriert, da Sie bereits Aufnahmen der Reliefs vor und nach der großen Restaurierungskampagne Ende der 1990er Jahre gemacht hat. Neue photogrammetrische Aufnahmen konnten nun auf dieser Grundlage abgeglichen werden. Das hauptsächliche Tätigkeitsgebiet der Firma lag im Projekt einerseits in der hochauflösenden photographischen und geometrischen Zustandsdokumentation, die einerseits für aktuelle Zustandskartierungen und auch zur Weiterführung des Monitorings dienen. Für eine optimale Abbildung der Reliefs wurden die digitalen hochauflösenden Orthophotos auf der Basis von 3D-Oberflächenmodellen aus Laserscan-Daten berechnet, die ebenfalls vor Ort aufgenommen worden sind. Bereits 1995 hatte die Firma Fokus analoge s/w-Aufnahmen aller Reliefs angefertigt. Auf die aktuell erstellten Oberflächenmodelle wurden die Aufnahmen aus dem Jahr 1995 deckungsgleich gerechnet, um auf dieser Grundlage objektiver die Schadensdynamik bewerten zu können. Es wurden abschließend folgende Bildpläne der verschiedenen Zeitschichten durch die Firma zur Verfügung gestellt - vor 1945¹ und 1995² bzw. 1999³. Zusätzlich sind von allen Reliefs (2-12)⁴ die 2017 erstellten Photogrammetrien und zusätzlich die gerechneten 3D-Modell dem Projekt übergeben worden.

Restaurator Peter Fiedler

Peter Fiedler war federführend als Restaurator in der Restaurierungskampagne Ende der 1990er Jahre tätig und führt seitdem das regelmäßige Monitoring und die Pflegemaßnahmen durch. Daher verfügt er

¹ nur Reliefs 2, 3, 6, 8, 11

² alle Reliefs

³ nur Reliefs 2, 3, 4, 5, 8

⁴ Relief 1 liegt auf dem Nachbargrundstück und war für die Aufnahmen nicht zugänglich.

über eine langjährige und tiefgreifende Objekterfahrung, mit der er das Objekt unterstützt hat (Erstellung von Monitoringberichten).

Frau Prof Karin Petersen HAWK Hildesheim und ihre Arbeitsgruppe

Ein großes Thema im Zusammenhang mit der Lesbarkeit und dem langfristigen Erhalt der Steinernen Albums ist der biogene Bewuchs, von dem einige Reliefs massiv betroffen sind. Um dieses Thema grundsätzlich für das Steinerner Album anzugehen, wurde im Rahmen des vorliegenden DBU-Projekts die Arbeitsgruppe von Frau Prof. Karin Petersen, HAWK Hildesheim, beauftragt, die Vegetationsaufnahme der Flechtenflora durchzuführen. Frau Dr. Cornelia Gehrman-Janßen hat Entsprechendes im Juli 2018 durchgeführt. Auch die Möglichkeit der Diskussion des Vorhabens, unterschiedliche Schlämmen zur perspektivischen Vergrümpfung der biogenen Besiedelung der Reliefs zu applizieren, wurde mit Frau Prof. Petersen wiederholt diskutiert.

3. Charakterisierung und historischer Abriss des Steinernen Albums⁵

Das gesamte Bildwerk des Steinernen Albums umfasst zwölf Einzeldarstellungen, welche sich über den gesamten geologischen Aufschluss des Weinberges verteilen. Die Dimensionierung und die Art und Weise der in das anstehende Gestein gehauenen Reliefs machen dieses Bilderprogramm zu einem bedeutenden Kunstwerk von überregionaler Bedeutung. Der Bilderzyklus, nah am Unstrutufer gelegen, gehört zu der weitläufigen Terrassenweinanlage des „Steinauer Weinbergs“. Die für den Weinanbau genutzte Fläche umrahmt die gestaltete Sandsteinstufe. Oberhalb der plastisch ausgestalteten Felswand sorgt eine Natursteinmauer für die benötigten Anbauflächen des heute wieder aufgerebten Weinbergs. Die terrassenförmige Anlage ist über Natursteintreppen begehbar. Diese führen über mehrere Ebenen hinauf bis zur Villa des ehemaligen Gutsbesitzers. Das Anwesen dient gegenwärtig als Wohnsitz des heutigen Grundstückseigners. Der anstehende Fels ist für den Weinanbau günstig nach Süden hin gelegen. Somit steht die gesamte Terrassenanlage unter dem ständigen Einfluss direkter Sonneneinstrahlung. Ein weiterer klimarelevanter Faktor ist, dass der Weinberg in Hauptwindrichtung an einer Biegung des Saale-Unstrut-Tales liegt und somit direkter Schlagregenbelastung ausgesetzt ist.⁶ Das anstehende Gestein ist geologisch dem Mittleren Buntsandstein (Übergangsbereich zwischen der Hardegsen- und der Solling Formation) zuzuordnen.⁷ Die dargestellten Bildmotive erstrecken sich über eine Länge von ca. 180 m und reichen vom Boden stellenweise bis zu 6 m auf. Dabei folgen die meisten Reliefdarstellungen dem Verlauf des anstehenden Gesteins. Die Darstellungen sind wechselnd als Flach-, Halb- oder Hochrelief ausgearbeitet.⁸ Die Bildmotive zitieren vornehmlich der Bibel entstammende Motive, die im engen Bezug zum Weinanbau stehen. Zu den dargestellten Motiven zählt das *Quellwunder Moses*, der *Puttentanz mit dem Harfenspieler David*, die *Hochzeit zu Kana*, *Lot und seine Töchter* bzw. *Lots Berauschung*⁹, die *Verkündigung an die Hirten*, *Christus in der Kelter*, die *Arbeiter im Weinberg*, *Noah als Janus* bzw. *Noah als erster Weinbauer*, *Josua und Kaleb* sowie *Moses und Aron* bzw. *Moses im gelobten Land*. Die Ausnahme bilden zwei Reliefdarstellungen, welche sich dem biblischen Bilderprogramm nicht unterordnen. So zeigt die Darstellung die *Fuchsjagd* eine für die Zeit übliche Jagdszenarie. Eine weitere, in direkter Nachbarschaft zu dieser Jagdszene stehende Darstellung, zeigt das Reiterstandbild des *Herzogs Christian*

⁵ Die intensive Recherche zur Geschichte des Steinernen Albums wurde durch Benjamin Hübner im Rahmen seiner Masterthesis am Studiengang Konservierung und Restaurierung der FH Potsdam durchgeführt.

⁶ Jedoch gehört die Region, im Regenschatten des Harzes, mit zu den regenärmeren der Republik.

⁷ Siedel, 1998

⁸ Bergner, 1905

⁹ Benachbart (westlich) ist auch das „brennende Sodom“ zu erkennen.

von Sachsen-Weißenfels. Stilistisch wird die Darstellung von der sehr herrschaftlichen Form des Reiterstandbildes und der stolzen Haltung des Herzogs geprägt. In der technischen Umsetzung fällt auf, dass dieses Relief als einziges senkrecht vorgearbeitet wurde. Der damals investierte Mehraufwand zur Begradigung der Fläche zeigt, neben dem Inhalt und der Darstellungsart, die besondere Stellung des Reliefs innerhalb des gesamten Bildzyklus.

3.1 Kunsthistorische Einordnung des Steinernen Albums

Das Steinerne Album entstand 1722 zum Anlass des 10jährigen Herrschaftsjubiläums des Herzogs Christian von Sachsen-Weißenfels.¹⁰ Der Weinbergbesitzer, Johann Christian Steinauer, ließ damals zu Ehren seines Fürsten den Bilderzyklus von ortsansässigen Bildhauern anfertigen.¹¹ Die Fertigstellung aller Reliefdarstellungen dauerte bis in das Jahr 1726 an.¹² Die Arbeiten wurden zum größten Teil durch den gut situierten Gutsbesitzer, Kammerherr und Hofjuwelier selbst finanziert. Für einige ausgesuchte Bildmotive fanden sich Stifter aus dem direkten Umfeld von Johann Christian Steinhauer. So spendete Herr August Wilhelm Roder, vormals Handelsmann in Augsburg, das Bildmotiv der *Hochzeit zu Kana*.¹³ Der Stifterkreis reicht über die Gilde befreundeter Kaufleute hinaus. Neben Handelsleuten beteiligten sich auch ranghohe Geistliche an der Umsetzung des theologischen Programms am Steinernen Album. So lässt sich die „wohldurchdachte Komposition“ der biblischen Motivauswahl auf den Oberhofprediger und Generalsuperintendent des Herzogs, Johann Basilius Fleuter, zurückführen.¹⁴ Neben der theologischen Begleitung der Gesamtkomposition tritt er ebenfalls als klerikaler Stifter für das Relief *Christus in der Kelter* auf.¹⁵ Dieses Relief zeigt deutliche stilistische Bezüge des damals geschaffenen Reiterstandbilds, welches ursprünglich für die Neuenburg angefertigt und letztlich auf dem Marktplatz in Freyburg aufgestellt wurde.¹⁶ Nach dem neusten Forschungsstand ist die Reliefdarstellung des reitenden Herzogs am Steinernen Album, wie auch die meisten anderen Reliefs, nicht dem Schöpfer des Reiterstandbildes aus Freyburg, Joseph Blühme, zuzuordnen. Es wird vermutet, dass die Reliefdarstellungen wahrscheinlich der Werkstatt des damaligen Hofbildhauers Johann Gottfried Griebenstein zuzuordnen sind.¹⁷ Die plastische Ausgestaltung der einzelnen Bildmotive sind eher in großzügiger Manier angelegt. Die Verhältnisse der Figuren untereinander sind zum Teil fehlerhaft. Die Bewegungen der dargestellten Figuren wirken nach Bergners Beschreibung hölzern und grob.¹⁸ Dennoch ist den ausgeführten Arbeiten ein hoher dekorativer Wert zuzusprechen. In einer Abschrift Anfang des 20. Jahrhunderts wird das barocke Bilderprogramm als „volkstümliche Erzählung, die sich eng an die Bilderbibel jener Zeit anschließt“ bewertet.¹⁹ Der Autor Heinrich Bergner ordnet zudem der Bildsprache des Steinernen Albums einen gewissen „schalkhafte[n] Humor“ zu.²⁰ Das Steinerne Album stellt auf Grundlage der in das anstehende Gestein gehauene Reliefdarstellungen eine kunsthistorische Seltenheit dar. Es ist in seiner Ausführung mit der ältesten Felsenreliefdarstellung nördlich der Alpen, der Kreuzabnahme an den Externsteinen (Teutoburger Wald) vergleichbar. Das Steinerne Album trägt dabei weniger durch sein Alter, jedoch durch den barocken Bilderreichtum und seiner Dimensionierung zu einem Alleinstellungsmerkmal in Europa bei.

¹⁰ Hofestädt, 2011

¹¹ ebd.

¹² DBU-Abschlussbericht, 1999

¹³ Bergner 1905

¹⁴ DBU-Abschlussbericht, 1999

¹⁵ Bergner, 1905

¹⁶ Hofestädt, 2011

¹⁷ ebd.

¹⁸ Bergner, 1905

¹⁹ ebd.

²⁰ ebd.

Bis heute existieren verschiedene Synonyme für die Felsenreliefs. Am bekanntesten sind die Reliefs wohl unter dem Namen Steinernes Album,²¹ aber auch Bezeichnungen wie das Steinernes Festbuch, Steinauerisches Festbuch, Steinernes Fries und Steinernes Bibel werden umgangssprachlich synonym verwendet.²²

3.2 Restaurierungsgeschichte

Nachdem das Steinernes Album lange Zeit in Vergessenheit geraten war, wurde es in den 1990er Jahren aus seinem bis dahin liegenden Dornröschenschlaf geholt. Zu den ersten Maßnahmen zählte die Beseitigung von Büschen, die schon weit in die Bilddarstellungen hineingewachsen waren. Des Weiteren mussten einige Bildwerke zunächst freigegeben werden, da sich das Bodenniveau zum Teil bis zu einem Meter über das ursprünglichen Niveau mit Mutterboden angefüllt hatte (Relief 2, 3, 4 & 5).²³ Nach den ersten groben Freilegungsmaßnahmen wurde der damalige Zustand durch photogrammetrische Aufnahmen festgehalten. Diese dienten neben der photographischen Abbildung des Ist-Zustandes auch als Vorlage für eine stratigraphische Kartierung, für die Zustandskartierung sowie für die Dokumentation der durchgeführten Maßnahmen. Die Aufnahmen sowie die Kartierungen liegen noch heute u.a. im Archiv des Instituts für Diagnostik und Konservierung (IDK) in Halle vor.²⁴ Nach der Dokumentation wurden, in einer der ersten Phasen, zunächst Reinigungsmaßnahmen durchgeführt. Die aufliegenden Flechten und Moose sowie die durch das abfließende Regenwasser verursachten „angebackenen Sandablagerungen“²⁵ wurden mittels Metallbürsten, Spachtel und Skalpell entfernt. Im Rahmen notwendig gewordener Notsicherungen wurden einige Reliefs (Nr. 6-12) mit Lithofin Duro® gefestigt. Bei dem verwendeten Produkt handelt es sich um einen Kieselsäureethylester mit einer Abscheidungsrate von 30% SiO₂.²⁶ Ebenso wurden ein nicht weiter spezifizierter Restauriermörtel der Firma Mineros für erste Ergänzungen verwendet, welcher später aufgrund von zu hoher Festigkeitswerte ausgetauscht werden mussten. In einer zweiten Phase (ab 1996) wurden Spalten und Klüfte aus statischen Gründen mit Sandsteinen und trasshaltigem „Steinverlegemörtel“ (quick-mix Trass NVL) vermauert. Zudem wurden erste Modellversuche zu möglichen Festigungsmethoden²⁷ durchgeführt.²⁸ Hierbei wurde damals nur die Infusionsmethode bezüglich ihrer Tiefenwirkung als effizient erachtet. Mit der Bewilligung des Förderantrags seitens der Deutschen Bundesstiftung für Umwelt (DBU) konnten damals umfangreichere restauratorische Maßnahmen umgesetzt werden.²⁹ Die zuvor erprobte Infusionsmethode kam zunächst an fünf Reliefdarstellungen versuchsweise zum Einsatz. Später wurde die Infusionsmethode für alle Bildfelder adaptiv angewendet. Methodisch wurde diese folgendermaßen umgesetzt: Zunächst wurden 20-30 cm tiefe Bohrlöcher von 1 cm Durchmesser schräg in den Stein hineingebohrt. Zur Vorfestigung wurde mittels Trichter der Steinfestiger Funcosil 100 der Firma Remmers in die Bohrlöcher eingelassen. Der Verbrauch lag dabei für die ersten fünf Reliefs bei ca. 420 Litern. Nach der Vorfestigung wurden die Bohrlöcher mit Funcosil 300 (Remmers) getränkt. Die benötigte Menge an Festigungsmittel mit der höheren Gelabscheidungsrate für diese fünf Reliefs betrug ca. 900 Liter. Insgesamt wurden für das Steinernes Album über 3000 Liter Festigungsmittel verbraucht. In Folge der damals groß angelegten Konsolidierungsmaßnahmen wurden im Rahmen des Erhaltungskonzeptes und der darin periodisch

²¹ Bergner, 1905, Hofestädt 2011 und Meinhardt, Arnold, Böhm, 2016

²² DBU-Abschlussbericht, 1999

²³ ebd.

²⁴ Zu einem großen Teil sind Unterlagen digital auch an der FH Potsdam, Prof. Meinhardt, archiviert.

²⁵ Sneathlage, 1997

²⁶ „Lithofin duro“ (2017)

²⁷ Es wurden die Verfahren Kompressenfestigung, Flutverfahren und Infusionstränkung getestet

²⁸ Fiedler, 1997

²⁹ 1997-1999

vorgesehenen Pflegemaßnahmen immer wieder kleine Bereiche nachgefestigt. Bei einer späteren, etwas umfangreicheren Restaurierungsmaßnahme 2013-14 wurden an allen Reliefs nochmals 87 Liter KSE 300 eingebracht. Am Beispiel des Reliefs *Hochzeit zu Kana* lässt sich die Entwicklung des eingebrachten Festigungsmittels für ein Relief über die vergangenen 20 Jahre annähernd nachvollziehen. In den 1990er Jahren sind in das Relief mittels Infusionstränkung 181 Liter KSE eingebracht worden. Bereits 2001 erfolgte im Rahmen einer Nachbehandlung eine weitere Tränkung mit 8 Litern KSE 300. In den Jahren 2006, 2013 und 2015 wurde das Festigungsmittel im Flutverfahren auf der Oberfläche angewendet. Der Verbrauch der ab 2006 durchgeführten Maßnahmen ist in den vorliegenden Unterlagen nicht dokumentiert. Neben der Festigung mittels Infusion erfolgte in den 1990er Jahren ein mehrschichtiger Aufbau größerer Fehlstellen, untersetzt mit einem Salzspeichermörtel (Remmers). Diese Auskofferungen sowie kleinere Fehlstellen und die entstandenen Tränklöcher wurden mit einem modifizierten Steinerzergänzungsmörtel (Remmers SEM weich) in einer Schichtdicke von 5 bis 20 mm bis auf das Niveau der originalen Oberfläche verschlossen. Für sehr dünne Anstragungen entschied man sich für eine Verwendung des damals neu entwickelten, auf Kieselsäureester basierenden Steinerzergänzungsmörtels.³⁰ Anschließend wurden diese mittels in Wasser gelösten Pigmenten in Ausführung einer Vollretusche an die Farbigkeit des anstehenden Gesteins angepasst. Neben den Ergänzungsmaßnahmen erfolgten begleitende bauliche Maßnahmen zur Instandsetzung der oberhalb verlaufenden Trockenmauer der Terrassierung. Im Anschluss der durchgeführten Maßnahmen wurde ein Pflegekonzept erarbeitet. Die Schwerpunkte lagen dabei auf der Reduzierung des Einflusses des biogenen Bewuchs³¹ und angrenzender Vegetation. Des Weiteren stand die Prüfung der Festigkeit und die partielle Nachfestigung im Vordergrund. Ebenso wurde die Kontrolle und Pflege der Mörtelantragungen bereits damals im Pflegekonzept verankert.³² Die Finanzierung der Pflegemaßnahmen erfolgt aus den Zinserträgen der treuhänderischen Stiftung „Steinauerscher Weinberg“ unter dem Dach der Deutschen Stiftung Denkmalschutz.

3.3 Durchführung und Erfolg des ursprünglich gefassten Pflegekonzeptes

Auf Grundlage des seit Jahren von der Europäischen Zentralbank auferlegten niedrigen Leitzins' sind die Beträge für die notwendigen Erhaltungsmaßnahmen des Steinernen Albums nur sehr gering. Die im Pflegeplan verankerten Maßnahmen zur Reduzierung biogener Auflagen, zum Teil mit Spachtel und Bürste, teilweise mit „Klorix“ und Wasserstoffperoxid, führten nicht im ausreichendem Maße zu einer wirklichen Eindämmung bzw. besseren Lesbarkeit der Reliefdarstellungen.³³ Auf der Oberkante der Reliefs ist zudem bereits erneut der Bewuchs höherer Pflanzen zu beobachten. Auch die immer wieder durchgeführten Nachfestigungen können offensichtlich das Auftreten von sandenden und schalenden Schadensphänomenen nicht eindämmen.³⁴ Im Hinblick auf die bereits in den 1990er Jahren eingebrachten Mengen an Festigungsmittel und der Beobachtung des ausführenden Restaurators Peter Fiedler, dass der Naturstein zum gegenwärtigen Zeitpunkt kaum noch in der Lage ist, Festigungsmittel über die Oberfläche aufzunehmen, wird deutlich, dass weitere Festigungsmaßnahmen über die Reliefoberfläche keine adäquate Antwort auf die fortschreitende Verwitterung sein können (siehe Kap. 7.5). Auch die Pflege der Mörtelantragungen ist aufgrund der gegenwärtig sichtbaren Flankenabriss und Hohlstellen als unzureichend zu bewerten. Zum Teil sorgen kleinere Reparaturen für ein fleckiges Erscheinungsbild. Das bisherige Monitoringkonzept scheint hier unzureichend auf die aktuellen

³⁰ DBU-Abschlussbericht, 1999

³¹ Gemeint sind hier höhere Pflanzen.

³² Meinhardt, 2010

³³ Klorix führt wohl auch eher zum ungewünschten Eintrag löslicher Bestandteile. In den Dokumentationen ist nicht einmal dokumentiert, dass H₂O₂ im Pflegeprozess eingesetzt worden ist.

³⁴ bzw. kann eine Überfestigung riskiert werden (siehe Kap. 7.4)

Bedürfnisse am Steinernen Album einzugehen. Auf Grundlage der dargestellten Beobachtungen und der zukünftig eher eingeschränkt zu erwartenden Finanzierungsmöglichkeit für eine dauerhaft betreute Pflege, gilt es, das derzeitige Pflegekonzept zu evaluieren und zu modifizieren bzw. über eine generelle Neukonzeption nachzudenken. Es sollte das unbedingte Ziel sein, das Steinerner Album in seiner Einzigartigkeit längerfristig auch für nachkommende Generationen zu bewahren und den überkommenden Zustand soweit wie möglich zu stabilisieren

Im Zeitraum 2008-2010 gab es ein bundesweit angelegtes Förderprojekt der DBU zur Nachhaltigkeit von Konservierungsmaßnahmen. In dem Zusammenhang wurden auch die Maßnahmen am Steinernen Album nachuntersucht.³⁵ Es wurde festgestellt, dass die Verwitterung trotz der intensiven Festigungsmaßnahmen (1998/99) an den Reliefs voranschreitet und auch weiterhin die Belastung mit Gips und auch Magnesiumsulfat zum Schadensfortschritt führt. Ergebnis des bundesweit angelegten DBU-Forschungsvorhabens zur Nachhaltigkeit von Konservierungsmaßnahmen und deren Bewertung ist die Publikation „Leitfaden Naturstein-Monitoring. Nachkontrolle und Wartung als zukunftsweisende Erhaltungsstrategien“.³⁶

³⁵ Meinhardt, J. (2010)

³⁶ Auras, M, Meinhardt, J., Snethlage, R. (Hrsg.) (2010): Leitfaden Naturstein-Monitoring. Nachkontrolle und Wartung als zukunftsweisende Erhaltungsstrategien. Fraunhofer IRB-Verlag.

4. Geologische und petrographische Beschreibung des Mittleren Buntsandsteins am Steinernen Album

Das Steinerner Album ist geologisch dem Mittleren Buntsandstein im Saale-Unstrut-Tal zuzuordnen. Zeitlich wurde dieser im Mesozoikum, innerhalb der Trias gebildet.³⁷ An der Entwicklung waren maßgeblich „verwilderte Flüsse mit ihren verflochtenen und ständig wechselnden Armen“ beteiligt.³⁸ Die entstehenden Flussverläufe „führten im ariden Umfeld mehr oder weniger periodisch Wasser, trockneten einerseits oft aus, konnten andererseits, nach heftigen Regenfällen, auch starke Hochwasser führen. Manchmal kam es auch zu katastrophalen Schichtfluten.“ „Der Buntsandstein besteht aus zyklischen Sedimentationsereignissen (Sequenzen). Sie bilden die Basis der lithostratigraphischen Gliederung in Formationen“.³⁹ Dem Mittleren Buntsandstein sind vier Formationen untergeordnet: Solling-Formation, Hardegsen-Formation, Dethfurt-Formation und die Volpriehausen-Formation.⁴⁰ Bei dem anstehenden Gestein am Steinauer Weinberg handelt es sich stratigraphisch um einen Übergangsbereich zwischen der Hardegsen- und Solling-Formation.⁴¹ Die Hardegsen-Formation besteht aus vier Sohlbank-Zyklen, deren Basis mit kräftigen roten Sandsteinbänken beginnt.⁴² Als hardegsentypisch wird der Farbwechsel von rotbraunen und grauen Schichten beschrieben.⁴³ Diese Art der Stratigraphie ist am Steinernen Album deutlich erkennbar. Die Varietäten wechseln zwischen einem feinkörnigen Rot und Grau.⁴⁴ Neben hardegsentypischen Eigenschaften finden sich am Steinernen Album ebenfalls Merkmale des Chiroterien-Sandsteins aus der Solling-Formation. Eine Abgrenzung ist auf alten Landoberflächen, wie dem Aufschluss in Großjena, verwitterungsbedingt schwierig und macht eine genaue stratigraphische Zuordnung problematisch.⁴⁵ Am Steinernen Album sind vier Varietäten anhand ihrer Farbigkeit und Gefüge zu unterscheiden: eine rote feinkörnige Varietät, zwei grau-ockerfarbene mittelkörnige Varietäten und eine hellgrau-ockerfarbene grobkörnige Varietät. Innerhalb der feinkörnigen Varietät lassen sich große zuckerförmige Quarzminerale identifizieren. Die Schichtung verläuft schräg zum Hang hin abfallend. Genauere petrographische Untersuchungen, welche 1998 von Heiner Siedel an Dünnschliffen der roten, feinkörnigen Varietät und der ockerfarbenen, grobkörnigen Varietät durchgeführt wurden, ergaben den im Folgenden beschriebenen Mineralbestand am Steinernen Album.⁴⁶ Der überwiegende Teil besteht, wie für Sandsteine üblich, aus Quarzmineralen. In der Probe der feinkörnigen Varietät sind wenig Feldspat- und Glimmeranteile vorhanden. Innerhalb der grobkörnigen Varietät fällt der Feldspatanteil höher aus. Auffällig ist, dass die Feldspäte sehr starke Korrosionserscheinungen zeigen. Zusätzlich zu den höheren Feldspatanteilen lässt sich im Dünnschliff dieser Varietät ungleichmäßig verteiltes dolomitisches Bindemittel ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) um die Quarz- und Feldspatkörner erkennen. Im Allgemeinen aber bestimmen die Korn-zu-Korn-Kontakte die übliche Bindungsform. Wie schon die Feldspäte, zeigt auch der Anteil des dolomitischen Bindemittels den Einfluss starker Anlösungsprozesse. Der Dünnschliff der roten, feinkörnigen Varietät weist ebenfalls sandsteintypische Korn-zu-Korn-Kontakte auf. Diese sind häufig mit feinen Tonhäutchen überzogen. In den Kornzwischenräumen haben sich Ablagerungen des tonigen Bindemittels akkumuliert. In gleicher Art und Weise, als Häutchen und Porenausfüllung, tritt das Mineral Hämatit auf.

³⁷ vor 251-200 Millionen Jahren

³⁸ Müller, Beutler & Siegesmund, 2014

³⁹ ebd.

⁴⁰ ebd.

⁴¹ Siedel, 1998

⁴² Müller, Beutler & Siegesmund, 2014

⁴³ Radzinski, 1995

⁴⁴ ebd.

⁴⁵ Radzinski, 1995

⁴⁶ Siedel, 1998

Dieses ferritische Mineral gibt der feinen roten Varietät am Steinernen Album ihre typische Rotfärbung.⁴⁷ Offen bleibt die mineralische Zusammensetzung der mittelkörnigen Varietäten. Hinsichtlich des Gehaltes an karbonatisch gebundenen Dolomit kann aufgrund fehlender Analyse keine Aussagen getroffen werden. Im Hinblick auf die Lithologie zeigt eine entsprechende Kartierung, dass unter dem anstehenden Buntsandstein die lithostratigraphische Gruppe des Zechsteins vorliegt. Diese sind für ihre Stein- und Kalisalz-Lagerstätten bekannt. Ebenso können mächtige Anhydritvorkommen im Zechstein vorhanden sein. Durch Feuchtetransportprozesse und Klüfte ist die Kontaminierung höher liegender Buntsandsteinschicht theoretisch möglich. Allerdings zeigten in den neunziger Jahren durchgeführte Isotopenuntersuchungen, dass es sich bei den vorgefundenen Salzen um anthropogen gebildete Minerale handelt.⁴⁸ Eine Beeinflussung des Zechsteins auf das Steinerner Album ist daher zu vernachlässigen

Materialkennwerte

Die gesteintechnischen Kennwerte der Rohdichte (2 g/cm^3) und der Porosität (bis zu 24 Vol%) liegen im typischen Bereich verwitterter Buntsandsteine.⁴⁹ Der Hauptanteil der Porenradien liegt zwischen 10 und $100 \mu\text{m}$. Auffällig sind die großen Unterschiede der Wasseraufnahmekapazität (4-11%). Wobei der höchste gemessene Wert als überdurchschnittlich zu bewerten ist. Der vorliegende Mittlere Buntsandstein ist hauptsächlich silikatisch gebunden. Zusätzlich sind die Quarzkörner teilweise von dolomitischen und tonigen Mineralen umschlossen. Dabei zeigt sich, dass der ursprünglich ausgebildete dolomitische Porenzement aufgrund chemischer Verwitterung angelöst wurde bzw. nur noch reduziert im Porenraum vorliegt. Aufgrund dieser Auflösung und weiterer Verwitterungsprozesse ist der Porenraum z.T. stark vergrößert. Die am Steinernen Album direkt gemessene kapillare Wasseraufnahme zeigt eine ähnlich hohe Varianz. Die ermittelten Wasseraufnahmekoeffizienten liegen zwischen 1 und $9 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$. Vergleichende Messungen vergangener Jahre zeigen, dass Spitzenwerte von bis zu $16,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ möglich sind. Zusammengefasst lässt sich für das aktuell zu detektierende Saugverhalten am Steinernen Album konstatieren, dass von wasserabweisenden bis zu stark saugenden Bereichen eine sehr inhomogene kapillare Wasseraufnahme vorliegt. Zum Teil liegen schwach und stark saugende Bereiche in unmittelbarer Nachbarschaft. Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass am Steinernen Album weiterhin eine hohe Calciumsulfatanreicherung nahe der Oberfläche (1 cm) vorliegt. Neben der Gipsbelastung sind an einzelnen Reliefdarstellungen untergeordnet Natriumsulfat, Natriumnitrat, Magnesiumsulfat und Syngenit detektiert worden. Vereinzelt konnten oberflächlich hohe Chloridbelastungen gemessen werden. Unter Beachtung der hohen Schadstoffbelastung vor 1990 und des petrografischen Aufbaus des vorliegenden Buntsandsteins erscheint eine oberflächennahe Gipsbelastung nur folgerichtig. Wie die starke Reduzierung des dolomitischen Bindemittels und die geringen Magnesiumsulfatbelastungen am Relief *Hochzeit zu Kana* zeigten, ist der Prozess der Neubildung größtenteils abgeschlossen. Die nähere Untersuchung der Oberfläche hinsichtlich einer Belastung leichtlösliche Salze am Steinernen Album zeigten, dass nur wenige Reliefdarstellungen von einer derartigen Salzbelastung betroffen sind. Gips liegt jedoch weiterhin in zum Teil massiver Weise vor (siehe Kap. 7.2 und 7.4.1).

⁴⁷ Siedel, 1998

⁴⁸ Siedel & Klemm, 2001

⁴⁹ Hübner, 2018

Ergebnisse aus der Quecksilberporosimetrie

Die Analyse der Quecksilberporosimetrie⁵⁰ ergab für die grobe Varietät am Relief *Hochzeit zu Kana* eine Rohdichte von 2 g/cm³. Die ermittelte Reindichte beträgt 2,7 g/cm³. Die Porosität der Probe liegt laut Messergebnis bei 24 Vol%. Der Hauptanteil der Poren (71%) liegt zwischen 10-100 µm. Lediglich 3 % der Poren sind größer als 100 µm angelegt. Der Median der Porengröße liegt für die grobe Varietät bei 67 µm. Im Vergleich zur groben Varietät zeigt die optisch sehr viel feiner wirkende Varietät, welche exemplarisch aus dem Relief *Christus in der Kelter* entnommen wurde, geringere Unterschiede als zunächst vermutet. Die Rohdichte und Reindichte sind mit den Werten der groben Varietät vergleichbar. Selbst die Porosität ist mit einem Anteil von 23 Vol% annähernd mit der grobkörnigen Varietät gleichzusetzen. Lediglich die Porenradienverteilung innerhalb der Gesamtprobe unterscheidet sich. Dabei liegt der Hauptanteil der vorkommenden Porenradien ebenso im Bereich von 10-100 µm. Dieser ist aber mit fast 92 % wesentlich dominanter ausgeprägt. Der Anteil größerer Poren hingegen liegt bei der feinkörnigen Varietät bei 0,4 %. Ebenso ist der Bereich unterhalb von 10 µm hinsichtlich der Gesamtverteilung geringer ausgeprägt. Aus den genannten Verteilungen ergibt sich ein geringerer Median von 48 µm. Die Unterschiede in der Porenradienverteilung tragen zu den visuell eingeschätzten Unterschieden zwischen feinkörniger und grobkörniger Varietät bei. Die Datenlage aus den Daten der 1990er Jahren lässt einen direkten Vergleich der Gesteinskennwerte mit den aus der Gegenwart ermittelten Kennwerten zu. Vergleicht man die Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie mit den ermittelten Kennwerten vor der Festigungsmaßnahme aus dem Jahr 1997, ist festzustellen, dass sich die Roh- und Reindichte nicht geändert haben. Die Gesamtporosität ist heute annähernd mit der vor dem Einbringen des Festigungsmittels vergleichbar. Der Vergleich zeigt, dass die Ergebnisse der gemessenen Porositäten für beide Varietäten auf einem Niveau liegt. In den neunziger Jahren zeigten die Porositätswerte zwischen der feinkörnigen (27 %) und der grobkörnigen Varietät (23 %) größere Unterschiede.⁵¹ Unklar ist, ob die Festigungsmaßnahmen zur Homogenisierung der Porosität führten oder ob die gemessenen Porositätswerte allgemein, je nach Entnahmestelle, einer solchen Varianz im anstehenden Gestein unterliegen.

Die Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie-Untersuchung zeigen⁵², dass die optischen Unterschiede, wie auch die etwas unterschiedlichen Anteile der Porenradien im Bereich von 10-100 µm der beiden Varietäten (Buntsandstein fein, Relief *Christus in der Kelter* und Buntsandstein grob Relief *Hochzeit zu Kana*) kaum einen Einfluss auf die sich sehr ähnelnden bauphysikalischen Kennwerte haben. Das wird durch die unterschiedlichen, jedoch nicht varietätsabhängigen, gemessenen kapillaren Wasseraufnahmen bestätigt.⁵³ Die Kennwerte der Rohdichte von 2 g/cm³ und der gemessenen Porosität von 24 Vol% können, wie ein Vergleich zu einem anderen verwitterten Buntsandstein zeigt, als typisch angenommen werden.⁵⁴ Auch der Vergleich zu anderen Sandsteinen zeigt, dass sich die gemessenen Werte innerhalb der üblichen Baustoffkennwerte bewegen.⁵⁵ Auffällig ist die sehr unterschiedliche Wasseraufnahmekapazität von 4 bis 11%. Die gemessenen Werte der kapillaren Wasseraufnahme fallen für das gesamte Steinerner Album sehr unterschiedlich aus. Dabei unterscheiden sich weniger die Bildteile untereinander, als vielmehr die Messstellen innerhalb eines Bildfeldes. So treten zum Teil hydrophobe, wasserhemmende bzw. gering kapillar saugende Bereiche im direkten Übergang zu stark saugenden Bereichen auf. Möglicherweise ist

⁵⁰ TU Dresden, Bericht zur Bestimmung der Porenradienverteilung und Porosität an Sandsteinproben, AZ 5.5.1-47/2017

⁵¹ Lindner 1997

⁵² TU Dresden, Bericht zur Bestimmung der Porenradienverteilung und Porosität an Sandsteinproben, AZ 5.5.1-47/2017

⁵³ Hübner, 2018, S. 48

⁵⁴ DO 2000

⁵⁵ Terheiden 2007

das ein Effekt der mehrfach durchgeführten Festigungsmaßnahmen der letzten 20 Jahre. Des Weiteren sind durch mögliche Salzbelastungen Verdichtungen des oberflächennahen Porenraums denkbar. Um diesen Effekt und die allgemeine Belastung von Salzen am Steinernen Album näher zu bestimmen, wurden die im Kapitel 7.2 beschriebenen Untersuchungen zur Salzbelastung durchgeführt.

5. Aktueller Erhaltungszustand

Der aktuelle Zustand des Steinernen Albums ist stark durch Verwitterungsprozesse geprägt. Die starke Rückwitterung der Reliefdarstellungen äußert sich durch das zugerundete Erscheinungsbild der plastisch ausgestalteten Bildzitate. Das wurde bereits in der Literatur 1905 durch den Pfarrer Heinrich Bergner für das Steinernes Album konstatiert. So gilt heute wie damals: Die Verwitterung hat den Skulpturen mal mehr, mal weniger geschadet.⁵⁶ Im Vergleich zum damaligen Zustand hat sich der Informationsgehalt jedoch zu heute deutlich reduziert. Oft sind die damals zitierten Inschriften heute nicht mehr lesbar. Für das gesamte Steinernes Album lassen sich die folgenden Phänomene in verschiedenen Ausprägungen festhalten: Neben sehr stabilen Oberflächen finden sich immer wieder Bereiche, in denen ein starkes Absanden der Oberfläche zu verzeichnen ist. Je nach Klimabedingungen sind Salzeffloreszenzen sichtbar. Gehäuft treten diese in Bereichen auf, die in Regenschattenbereichen liegen. Das ist auch bereits bei den vermerkten Salzausblühungen der in den 1990er Jahren erstellten Kartierung ablesbar. An abgeplatzten Bereichen und Vertiefungen sind Subfloreszenzen zu sehen. In den Randzonen der Subfloreszenzen tritt verstärkt die Bildung von kleinen Schalen auf. Diese sind meist kleinteilig und schuppenartig über die Oberfläche verteilt. Diese Schuppenbildung variiert in ihrem Aussehen etwas, je nach Korngröße der betroffenen Varietät. An den Horizontalflächen, welche aufgrund ihrer Lage einem größeren Feuchteinfluss unterliegen, haben sich dichte Flechten und Moose angesiedelt. Im Vergleich mit den beobachteten Phänomenen aus den 1990er Jahren ist festzuhalten, dass es seit der Entfernung der aufliegenden Krusten keine nennenswerte Neubildung gegeben hat. Der Zustand der in den 1990er Jahren in großem Maße angetragenen Steinerneergänzungsmörtel ist von unterschiedlicher Qualität. Einige zeigen starke Flankenabriss und Hohlstellen. Teilweise sandet die Oberfläche der großflächigen Ergänzungen ab. Durch später hinzugefügte, kleinere Reparaturen an den großflächigen Auskofferungen der Salzspeichermörtel, wirkt die Oberfläche inhomogen und fleckig. Generell liegt der Eindruck nah, dass die eingebrachten Salzspeichermörtel in weiten Bereichen ihre Aufnahmekapazität erreicht haben könnten.

Nachfolgend werden die Projektinhalte an den Aufgaben orientiert dargestellt, die im Sinne einer optimierten Pflege der Reliefs erforderlich erscheinen. Dem sind auch die Ergebnisse der Untersuchungen der Kooperationspartner im Projekt in den verschiedenen Kapiteln zugeordnet.

⁵⁶ Bergner, 1905

6. Bewertung der Schadensdynamik an den Reliefs

6.1 Vergleichende Betrachtung von Aufnahmen unterschiedlicher Zeitschnitte

Insbesondere um die Schadensdynamik an den verschiedenen Reliefs des Steinernen Albums objektiv zu bewerten, wurde die fokus GmbH mit in das Projektteam aufgenommen. Über die photogrammetrischen Aufnahmen (bzw. Orthophotos) unterschiedlicher Zeitschichten des 20. und 21. Jahrhunderts kann ein direkter Vergleich angestellt werden. Abhängig von der Tageszeit und den entsprechenden Lichtverhältnissen sind selbst heute noch in manchen stark eingeebneten bzw. zurückgewitterten Reliefs Details gut erkennbar. Diese Tatsache erschwert allerdings eine objektive Einschätzung der tatsächlichen Schadensdynamik. Nachfolgend sind beispielhaft Zustände⁵⁷ bzw. die Entwicklung der reliefierten Oberflächen dargestellt, die zum Teil sehr eindrucksvoll nachvollziehen lassen, dass einerseits die Schadensdynamik und andererseits auch die biogene Besiedelung zugenommen haben.⁵⁸

Zunächst ist das Relief *Fuchsjagd* im Zustand 1945 dargestellt (siehe Abb. 1). Abgesehen von den vielen erkennbaren Details, bis hin zu Blattwerk, Wappendetails (gekreuzte Schwerter), Rippen bei dem linken vorderen Hund oder Faltenwürfen usw., fällt der große Hohlraum an der Unterseite des Reliefs auf, der im Rahmen der Maßnahme in den 1990er Jahren zugesetzt worden ist.



Abb. 1: Aufnahme vor 1945 (genaues Jahr nicht gewiss), Relief *Fuchsjagd*

50 Jahre später (siehe Abb. 2) ist beispielsweise das Wappen oben links stark verflacht, obgleich die überkreuzten Schwerter noch immer darauf zu erkennen sind. Die Reliefformen wirken stark vereinfacht bzw. erodiert. Auch zu dieser Zeit lag bereits stellenweise ein biogener Bewuchs vor.

⁵⁷ Aus Platzgründen wird im Bericht nur eine Auswahl an Reliefs gezeigt. Die einzelnen Aufnahmen der unterschiedlichen Zeitschichten sind nahezu für alle Reliefs an der FH Potsdam vorliegend. Bei berechtigtem Interesse können diese für weitergehende Vergleiche dort eingesehen werden.

⁵⁸ Alle Aufnahmen sind im Maßstab 1:10.

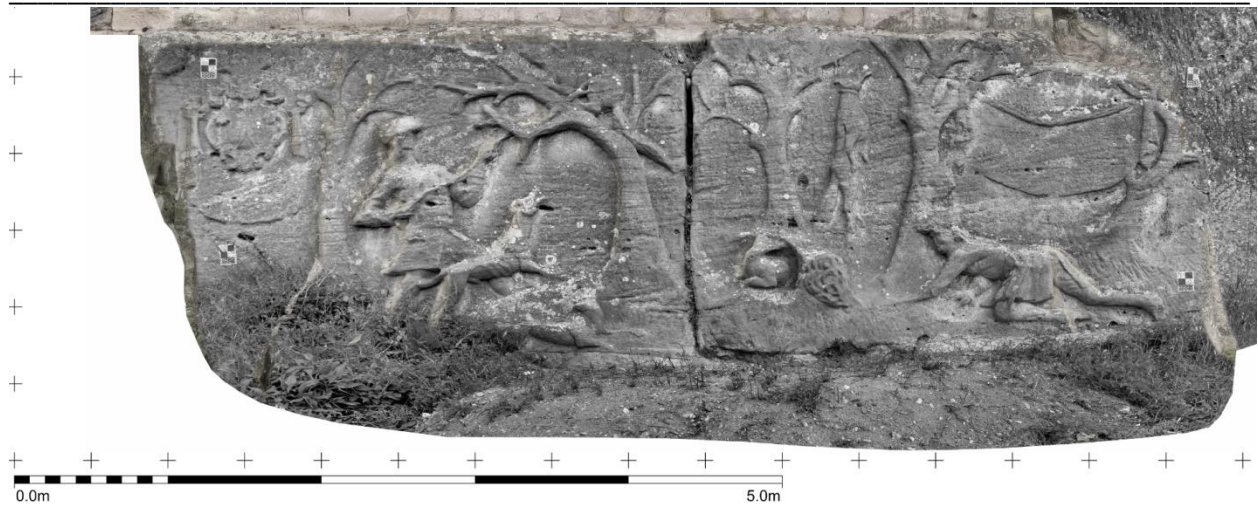


Abb. 2: Aufnahme 1995, vor der Restaurierungskampagne. Das Erdniveau vor dem Relief war extrem angewachsen. Relief *Herzog Christian*.

Im Rahmen der Restaurierungskampagne 1998/99 ist das Relief u.a. gereinigt worden. Beispielsweise im Bereich des Wappens oben links ist wieder deutlich mehr Volumen zu erkennen (siehe Abb. 3), weswegen davon ausgegangen werden muss, dass die Lichtverhältnisse bei der Aufnahme 1995 die tatsächlichen Verhältnisse etwas schlechter bzw. verfälscht darstellen. Die Freilegung und Sicherung des unteren Reliefbereichs fällt als deutliche Veränderung ins Auge.

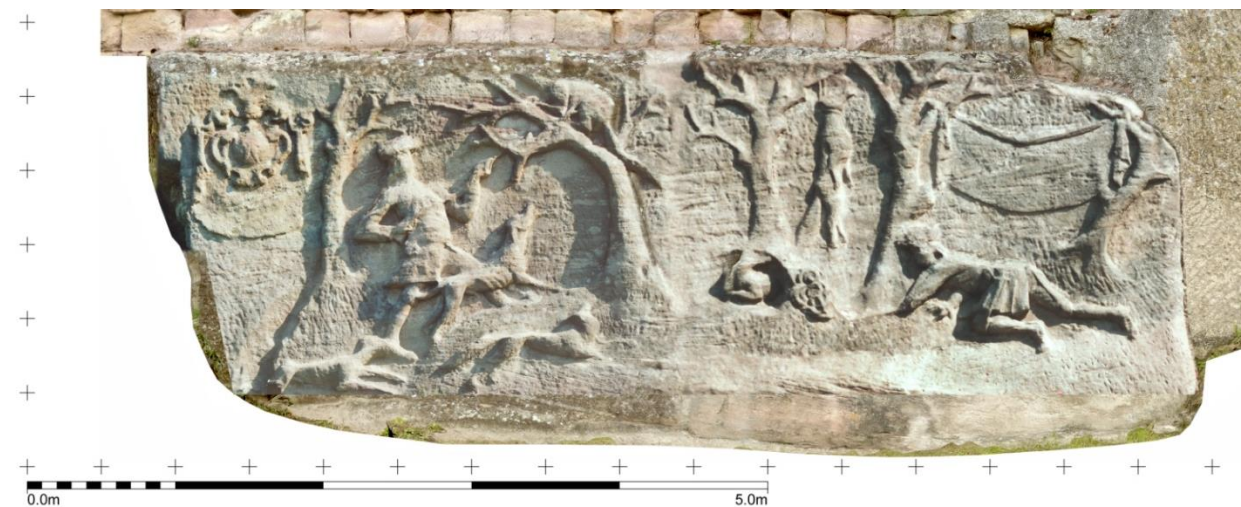


Abb. 3: Zustand 1999, nach der Restaurierungskampagne, Relief *Fuchsjagd*

Der Zustand des Reliefs hat sich nach der Restaurierungskampagne 1999 bis zur neuerlichen Aufnahmen 2017 (siehe Abb. 4), also in weniger als 20 Jahren, noch einmal deutlich verflacht. Natürlich auch durch den massiven biogenen Bewuchs, aber auch durch Verluste in der Morphologie sind die verschiedenen Füchse und Hunde z.T. nur noch schwer auszumachen. Auch das Wappen oben links wirkt sehr stark zurückgewittert. Die Schadensdynamik ist daher als erheblich zu charakterisieren.

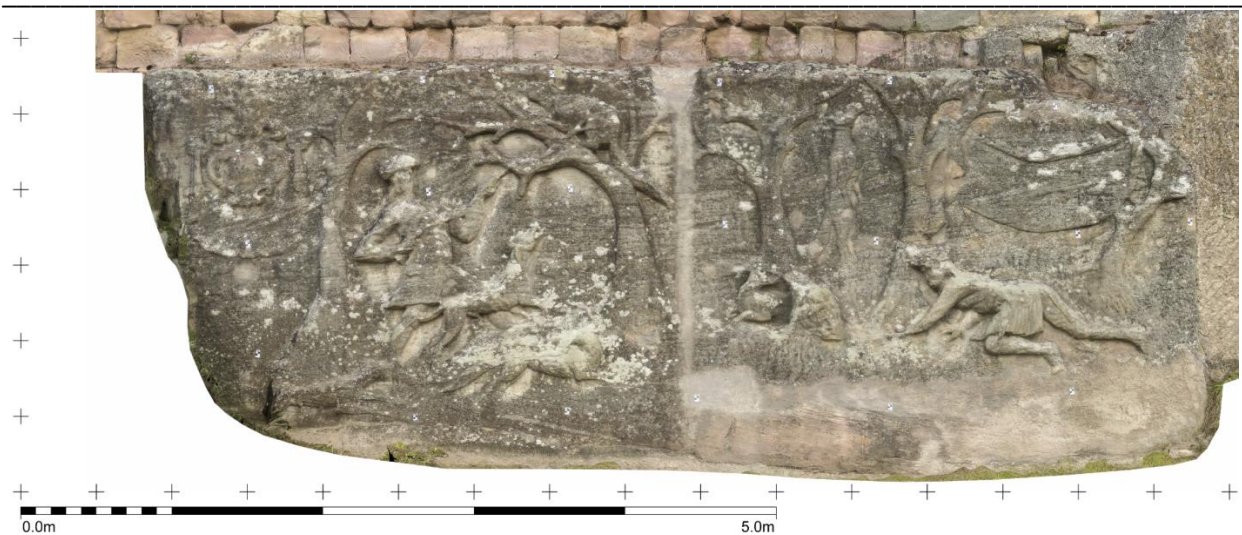


Abb. 4: Zustand 2017, vor der Anlage der Musterflächen zur Vergrämung der biogenen Besiedelung, die im Rahmen des Vorhabens erfolgte. Relief *Fuchsjagd*.

Ein weiteres im Rahmen des Vorhabens stark beachtetes Relief ist das des *Herzog Christian*. In der Aufnahme vor 1945 sind sehr viele Details von Gewand des Herzogs bzw. der Mähne und dem Gesicht des Pferdes auszumachen. Auf der Decke, auf der der Herzog sitzt, sind sogar Ornamente erkennbar. Der Schweif des Pferdes ist in einzelnen Strähnen wahrnehmbar. Links des Pferdes sind die Darstellung des Baumes mit den Wappen unter der Baumkrone ebenfalls sehr scharfkantig und präzise. Selbst die Inschrift auf der Draperie ist lesbar.



Abb. 5: Zustand vor 1945, Relief *Herzog Christian*

Im Archiv Schloss Neuenburg⁵⁹ konnten noch weitere historische Photos von einigen Reliefs aufgespürt werden, so auch von *Herzog Christian*. Der genaue Zeitpunkt der Aufnahme kann nicht mit Sicherheit angegeben werden. Es wird vermutet, dass das Photo 1898 aufgenommen worden ist. Dann wären es ca. 50 Jahre vor dem Bild um 1945 (siehe Abb. 5). Das Relief wirkt ganz frisch (siehe Abb. 6). So viel mehr ist erkennbar als heute. Auch aus dieser Zeitspanne wird ein massiver Detailverlust sichtbar, der sich trotz Monitoring und Pflege in die Zukunft fortsetzt, wie die weiteren Bilder zeigen werden.

⁵⁹ Zur Verfügung gestellt von Dr. W. Wedekind.



Abb. 6: Aufnahme eventuell aus dem Jahr 1898. In beiden Draperien sind noch die Inschriften deutlich erkennbar. Selbst die Fransen rings um die Satteldecke sind deutlich.

Mitte der 1990er Jahre wirkte das Pferd nicht mehr so ausdrucksstark, was an der teilweisen Erosion der Beine und der Mähne liegt (siehe Abb. 7). Auch der Schweif wirkt kürzer. Das Gewand des Herzogs ist deutlich weniger detailreich. Die Decke auf dem Pferderücken ist ebenfalls erodiert. Im linken Bereich des Reliefs wirkt die stilisierte Baumkrone um die stark zurückgewitterten Wappen weniger „organisch“, sondern eher wie Brocken. Haarpracht und Kopfbedeckung des Herzogs sind zur Unkenntlichkeit verwittert.



Abb. 7: Zustand 1995, vor der Restaurierungskampagne, Relief *Herzog Christian*

Der Zustand nach der Restaurierungskampagne ist leider nicht in den projektbezogenen Unterlagen der fokus GmbH enthalten gewesen. Offensichtlich wird jedoch, dass die Haare des Herzogs im Rahmen der Kampagne überarbeitet worden sein müssen. Hier ist auch heute noch eine Anmutung von Locken erkennbar (siehe Abb. 8). Der Baum im linken Reliefbereich hat sich seit Mitte der 1990er Jahre extrem eingeebnet, ebenso das linke Hinterbein des Pferdes. Auch die Draperie links im Relief, auf der rudimentär 1995 noch Schriftzeichen erkennbar waren, zeigt 2017 nichts mehr davon. Die Draperie selbst und die Wappen, an denen der Stoff befestigt ist, sind stärker erodiert und auch mit Krusten belegt. Trotz der regelmäßigen Pflegemaßnahmen wird der enorme Verwitterungsfortschritt sehr deutlich. Obwohl das

Relief nicht flächig von biogener Besiedelung betroffen ist und lösliche Salze wie in Kapitel 7.2 geschildert auch keine große Rolle im gesamten Relief mehr spielen (nur an einzelnen Punkten), schreitet der Verlust der Bilddetails mit erheblicher Geschwindigkeit voran.



Abb. 8: Zustand 2017, Relief *Herzog Christian*

Ebenso fand das Relief *Hochzeit zu Kana* aufgrund der Schadensbilder im Rahmen des Projekts intensive Berücksichtigung. Daher soll es ebenso mit seinen verschiedenen Zeitebenen an dieser Stelle dargestellt werden.

Im Archiv Schloss Neuenburg⁶⁰ wurde auch für dieses Relief ein historisches Photo gefunden (siehe Abb. 9). Eventuell ist diese, wie auch schon das vom Relief *Herzog Christian*, auf 1898 zu datieren.⁶¹



Abb. 9: Historische Aufnahme des Reliefs *Hochzeit zu Kana*. Das Erdreich ist niedrig und alle Details sind sehr gut erkennbar. Sogar die Inschrift auf der Tafel über dem Relief ist lesbar. Jesus Christus ist deutlich an der linken Stirnseite des Tisches an dem Strahlenkranz erkennbar. Einige Gesichter sind klar erkennbar, auch der Faltenwurf von Kleidungsstücken und der Verlauf der Tischdecke. Weiterhin ist ein Hund o.ä. zu Füßen der Frau am rechten Bildrand zu erkennen

Es ist erstaunlich, welche Details zu dieser Zeit noch erkennbar waren. Die Aufnahme aus dem Jahr 1995 (siehe Abb. 10) zeigt zunächst einmal ein stark angewachsenes Erdreich, das vermutlich für tieferliegende Bereiche, zumindest zeitweise, als eine Art Feuchtekompresse negativen Einfluss auf die Substanz hatte.

⁶⁰ Zur Verfügung gestellt von Dr. W. Wedekind.

⁶¹ Dieses Photo stammt nicht von der fokus GmbH Leipzig.

Das Relief wirkt weiterhin sehr dunkel, was die Erkennbarkeit von Details erschwert, so z.B. die Zelte. Nur zwei oder drei Gesichter sind detaillierter auszumachen. Gewandfalten sind nicht zu erkennen. Alles wirkt stark reduziert. Daher ist auch der Strahlenkranz von Jesus Christus nicht zu erkennen.

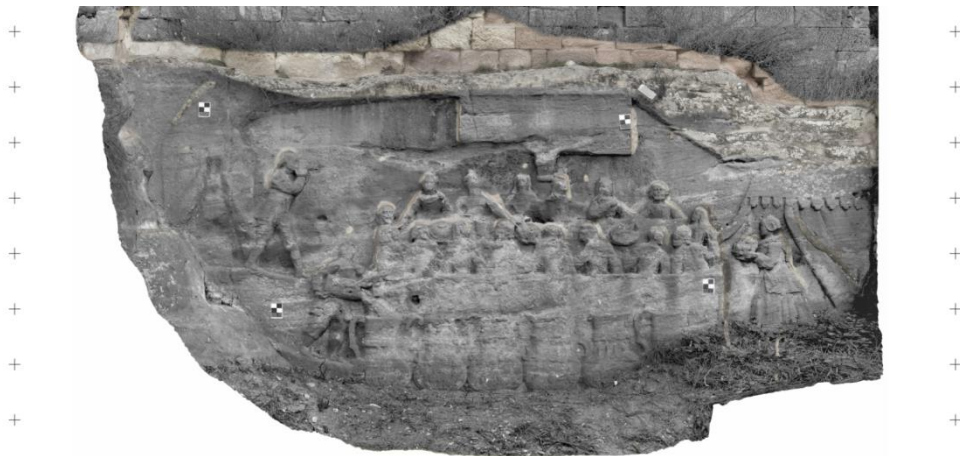


Abb. 10: Zustand 1995, vor der Restaurierungskampagne, Relief *Hochzeit zu Kana*

Betrachtet man den Zustand 1999 (siehe Abb. 11), kurz nach der weitreichenden Restaurierungskampagne, fällt zunächst einmal das stark reduzierte Erdreich vor dem Relief auf. Die Weinkrüge sind komplett erkennbar und auch der Boden, auf dem sie stehen. Die beiden Zelte, rechts und links im Relief, sind durch das Licht und die Reinigung deutlich zu erkennen. Auch der Mann, der von rechts die Weinkrüge befüllt, ist wieder im Detail auszumachen. Es wirkt etwas im Streiflicht, als sähe man Schriftzeichen auf der Tafel über der Hochzeitsgesellschaft. Aber bei näherer Betrachtung sind keine Zusammenhänge zu erkennen.



Abb. 11: Zustand 1999, nach der Restaurierung, Relief *Hochzeit zu Kana*

Innerhalb der knapp 20 Jahre bis 2017 ist auch für dieses Relief ein erheblicher Informationsverlust zu beschreiben. Erschwerend kommen hier die biogenen Besiedelungen und Krusten hinzu, die zusätzlich eine gewisse vertikale Gliederung suggerieren (siehe Abb. 12).



Abb. 12: Zustand 2017, Relief *Hochzeit zu Kana*

Als letztes Beispiel soll noch eine historische Aufnahme^{62 63} des Reliefs *Christus in der Kelter* mit den Aufnahmen von 1995 und 2021 verglichen werden.



Abb. 13: Historische Aufnahme des Reliefs *Christus in der Kelter*

Der Detailreichtum, den die Abbildung 13 wiedergibt, ist wunderbar. Die einzelnen Trauben in den vollständigen Körben sind deutlich zu erkennen. Selbst die milden Gesichtszüge von Jesus Christus sind gut sichtbar. Die Inschriftentafel ist noch vollständig. Links der Kelter ist oberhalb der Kinder ein gestörter Horizont erkennbar, von dem ausgehend sich die Schädigung des Reliefs fortgesetzt hat. Rechts der Kelter weist die zweite Person bereits Schäden im Hüft- und Oberschenkelbereich auf.

⁶² vermutlich auch 1898

⁶³ Archiv Schloss Neuenburg, Zur Verfügung gestellt von Dr. W. Wedekind.



Abb. 14: Zustand 1999, nach der Restaurierungskampagne, Relief *Christus in der Kelter*. Der Zustand wirkt insgesamt stabil.



Abb. 15: Zustand 2021, Relief *Christus in der Kelter*. Die Rückwitterungen im Beinbereich der Person rechts der Kelter sind deutlich vorangeschritten.

Über die Zeit haben sich massive Erosionen ergeben. Durch die Schrifttafel zieht sich eine große Fehlstelle, die im Rahmen der Restaurierungskampagne (1998-99) auch nicht verschlossen wurde und als Quelle weiterer Verwitterung durch horizontale Saugflächen verblieb (siehe Abb. 14.) Gesichter und Gliedmaßen sind 1999 eindeutiger als 2021 (siehe Abb. 15). Die Erosion im Hüftbereich der Figur rechts der Kelter ist stark vorangeschritten.

Fazit der Bildvergleiche

An den exemplarisch vorgestellten Reliefs in den oben gezeigten vergleichenden Darstellungen der unterschiedlichen Zeitschnitte wird deutlich, dass in allen drei Bereichen, die sich auch über ca. 180 m anstehendes Kliff verteilen, die Verwitterung trotz des Monitorings und der daran gekoppelten Pflege über die Jahre vorangeschritten ist. Die Einschränkungen der finanziellen Mittel für das regelmäßige Monitoring und die Pflege, die aktuell noch durch Peter Fiedler ausgeführt werden, müssten vor dem Hintergrund dringend aufgestockt werden. Die Zinsentwicklungen der letzten Zeit führen jedoch viel eher zu einer Reduktion der zur Verfügung stehenden Gelder. Noch wichtiger wäre es, den Besitzer des Steinauer Weinbergs, zu dem auch die Reliefs gehören, für den konsequenten Erhalt der Reliefs zu gewinnen. Eine Aufnahme des Steinernen Albums in die Reihe der Denkmäler nationaler Bedeutung würde helfen, Fördermittel zu generieren, um zumindest die Pflege, optimiert durch die in diesem Vorhaben erarbeiteten Schritte, weiterhin zuverlässig umzusetzen.

Schadensentwicklung ab 1905

Auf Grundlage einer 1905 erschienenen kunsthistorischen Quelle von Heinrich Bergner mit dem Titel „Beschreibende Darstellung der älteren Bau- und Kunstdenkmäler des Kreises Naumburg“ ist es ebenfalls möglich, die Zustandsentwicklung der letzten 100 Jahre grob nachzuvollziehen. Neben den kurzen Beschreibungen und der direkten Zitation von Inschriften liegen den Textquellen zum Teil kleine Zeichnungen der einzelnen Reliefdarstellungen bei. Diese sind auch an den Schautafeln entlang des

Radwegs am Steinernen Album angebracht. Von dort sind vor Kenntnis der Publikation von Heinrich Bergner die Bilder abphotographiert und bearbeitet worden (siehe Abb. 16-18). Diese erlauben einen vorsichtigen Vergleich der damals vorhandenen Bildteile mit den noch von Maßnahmen unberührten photogrammetrischen Aufnahmen der 1990er Jahre. Auch wenn die im Folgenden beschriebenen Unterschiede auf einer subjektiv ausgeführten Skizze des Dargestellten basieren, ist sie doch als eine nützliche Quelle für den Erhaltungszustand Anfang des 20. Jahrhunderts anzusehen.

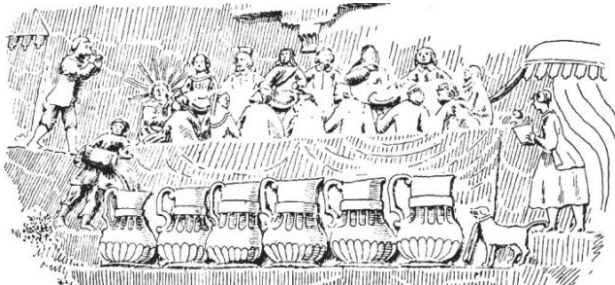


Abb. 16: Relief *Hochzeit zu Kana*, Skizze



Abb. 17: Relief *Christus in der Kelter*, Skizze

Im Allgemeinen stellt Heinrich Bergner in seinen Beschreibungen heraus, dass die Bildinhalte des Steinernen Albums noch „hinreichend festzustellen“ sind. Die Ausnahme bildet schon damals das Relief „Moses und Aron“. Hierzu äußert sich Heinrich Bergner wie folgt: „Das Relief ist stark vergangen, [die] Inschriften [sind] nicht mehr vorhanden, so daß auch der Sinn des Bildes unklar bleibt“.⁶⁴ Der beschriebene Zustand der Inschrift wird nicht nur an der Reliefdarstellung „Moses und Aron“ beklagt. Auch für andere Reliefs konstatiert Bergner, dass „die Inschriften leider durch Verwitterung größtenteils unleserlich geworden“ seien. Vergleicht man die noch durch Bergner zitierten Inschriften mit der heutigen Lesbarkeit der selbigen, wirkt die damalige Kritik dem Zustand heute vorgegriffen. Die damals noch gut zitierfähigen Inschriften sind heute zum Teil nicht mehr vorhanden oder nur noch in einem sehr fragmentarischen Zustand erhalten. Die Inhalte sind größtenteils gänzlich verloren gegangen und bleiben lediglich in Bergners Abschrift der Nachwelt erhalten.⁶⁵ Gut nachvollziehen lässt sich diese Entwicklung am Beispiel der Inschrift des in der Baumkrone hängenden Schriftteppichs der Reliefdarstellung *Herzog Christian*. Die Inschrift war 1905 für Bergner noch deutlich lesbar (Inschrift: „CHRISTIAN H.Z.S.J.C.B.E.V.W. Querfurth u. Weissenfels“).⁶⁶ In der Aufnahme von 1995, also genau neunzig Jahre nach dieser Beschreibung, sind lediglich noch die Buchstaben „Z“ und „S“ lesbar. Zum Teil waren damals noch einzelne Buchstabenfragmente auszumachen. Der aktuelle Zustand lässt lediglich nur noch den oberen Schwung des Buchstaben „S“ erahnen. Ähnlich dramatisch verhält es sich mit der Inschrifttafel des Reliefs *Hochzeit zu Kana*. Bergner zufolge war der Schriftplatte folgender Textinhalt zu eigen: „Gott macht immer aus Wasser Wein – Gesegnet ist die Frucht verdammt soll der Mi[scher sein] – Der [nicht Erquick]ung sucht.“ „Dieses hat tit. Herr Aug. Wilhelm Roder vorm: Handelsm: in Augsburg dem pt. Besitzer Joh. Chr. Steinauer in den Felsen zu Ehren einhauen lassen“.⁶⁷ Trotz der bereits damaligen kleinen Fehlstelle ist der Zusammenhang zwischen Schrift und Bild Anfang des 20. Jahrhunderts für den Betrachter nachvollziehbar. Dem damaligen Leser erschließt sich auf diese Weise noch der direkte Bezug zu dem dargestellten Bildinhalt, dem Stifter und dem Besitzer. Diese Möglichkeit bleibt dem heutigen Betrachter durch den vollständigen Verlust verwehrt. Der Vergleich mit den Aufnahmen aus den 1990er Jahren zeigt, dass die Inschrift bereits zu diesem Zeitpunkt vollständig verloren gegangen war. Diese beiden

⁶⁴ Bergner, 1905

⁶⁵ Hübner, 2018, S.18

⁶⁶ Bergner, 1905

⁶⁷ ebd.

herausgegriffenen Beispiele zeigen anschaulich die Entwicklung des Zustandes der letzten 100 Jahre am Steinernen Album. Die Entwicklung des Zustandes bis in die Mitte der 1990er Jahre verdeutlicht, unter welchem Handlungsdruck die Restauratoren und Denkmalpfleger damals am Steinernen Album standen. Innerhalb der Beschreibungen widmet sich Heinrich Bergner nicht nur dem Zustand der Inschriften. Er beschreibt kurz die Bildinhalte jeder Reliefdarstellung und ergänzt diese, wie bereits erwähnt, mit einer dazugehörigen Skizze. Durch diese Zeichnungen erschließen sich heute die zum Teil völlig rückgewitterten Inhalte. Betrachtet man zum Beispiel die angefertigte Skizze zu dem Relief *Hochzeit zu Kana* etwas intensiver (siehe Abb. 16), fällt auf, dass bereits einige Details, wie der Strahlenkranz, der Schleier der Braut, die mit Tüchern behangenen Bank und einzelne Gesichter bereits 1905 nur noch schemenhaft in der Skizze dargestellt sind. Neben der einsetzenden Rückwitterung sind zur damaligen Zeit bereits Teile abgebrochen. So fehlen einer Frauenfigur bereits beide Hände.⁶⁸

Ein ähnlicher Zustand lässt sich für das Relief *Christus in der Kelter* konstatieren. Leider erstellte Bergner in seiner Abschrift lediglich für den linken Teil des Reliefs eine Skizze, weshalb hier nur eingeschränkt Aussagen getroffen werden können (siehe Abb. 17). Aber nimmt man diese Darstellung als Grundlage für den Zustand von 1905 an, so zeigt diese bereits starke Rückwitterungen innerhalb der Gesichtszüge der hinteren Frauengruppe. In einem deutlich besseren Zustand als heute war damals der Hüftbereich der Frau, welche die Trauben gerade in das Fass schüttet. Besonders der von ihr getragene Weinlaubschurz ist, wenn überhaupt noch als solches zu bezeichnen, heute in einer sehr rudimentären Ausprägung vorhanden. Die Darstellung eines angebundenen Tieres zeigte damals schon starke Zurundungen.⁶⁹ Im Fall *Noah* sind besonders das Gesicht, die linke Hand, die Beine sowie die Basis mit den Kugeln, auf welchen Noah selbst balanciert, in einem sehr stark zurückgewittertem Zustand (siehe Abb. 18).



Abb. 18: Relief *Noah*, Skizze

Möglicherweise begünstigte der Verlust der noch auf der Zeichnung existierenden Überdachung in Form eines Baldachins, die enorme Schädigung der benannten Bildteile. Wie weit der abgebildete Baldachin wirklich hervorstand, ist aus den Aufzeichnungen von damals nicht abzuleiten. Deshalb lässt sich an dieser Stelle lediglich vermuten, dass der Verlust des Himmels zu einem verstärkten Regenablauf geführt haben könnte und auf diese Weise besonders im Gesichtsbereich der starken Rückwitterung der Weg geebnet

⁶⁸ Hübner, 2018, S. 19

⁶⁹ ebd.

wurde. Ähnliche Wasserablaufszenarien lassen sich charakteristisch am Steinernen Album für die Verluste an der beschriebenen Frauengruppe am Relief *Christus in der Kelter*, für den hinteren Teil des Pferdes in der Bilddarstellung *Herzog Christian* und die Schrifttafel im Relief *Josua und Kaleb* nachvollziehen. Der Vergleich zwischen den Skizzen von 1905 und dem Zustand der heutigen Darstellung zeigt im Fall der exemplarisch angeführten Beispiele und auch insbesondere bei der Bilddarstellung *Noah* ebenfalls den zum Teil enormen Bildverlust am Steinernen Album.

Allgemeiner Zustand in den 1990er Jahren

Dem damaligen DBU-Abschlussbericht von 1999 zufolge traten am Steinernen Album vor allem stark sandende Oberflächen auf. Des Weiteren ist dem Bericht zu entnehmen, dass bereits einzelne Fragmente abfielen, bzw. einer dringenden Notsicherung bedurften. Der beschriebene Zustand äußerte sich in Form einer abschalenden, dem Bröckelzerfall unterliegenden Oberfläche. Diese war zusätzlich stark verschmutzt und von einem biogenen Bewuchs überzogen. In Regenschattenbereichen zeigten sich flächige dunkle Krusten. Auch wurden bereits damals sichtbare Salze dokumentiert. Ebenfalls konnten Risse, Löcher und Klüfte am Steinernen Album beobachtet werden. Eine Auswertung der voranschreitenden Verluste auf Grundlage der Aufnahmen aus dem Jahr 1995 und heute ist aufgrund der in Zwischenzeit durchgeführten restauratorischen Maßnahmen problematisch (dennoch unter Kap. 6.1 dargestellt). Auf den ersten Blick wirkt die Darstellung heute durch ihre geschlossene Oberfläche intakter als auf den Aufnahmen von 1995. Die Unterschiede liegen dabei allerdings oftmals im Detail bzw. in der Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit. Die Ergänzungsmassen zeigen stellenweise starke Flankenablösungen, die so neu entstandenen Hohlstellen sorgen für zusätzliche Auswaschungen der Originalsubstanz. Auf der Oberfläche sind flächig verteilt eine Vielzahl kleiner Schalen und Schuppen zu sehen. Diese prägen heute im Wesentlichen das Erscheinungsbild. Auch wenn der DBU-Abschlussbericht 1999 festhielt, dass „die bisherigen Maßnahmen zu einer sehr guten Verbesserung des Zustandes der Felsenreliefs geführt“ haben und der Verlust der zentralen Bildinhalte seit den 1990er Jahren als gering zu bewerten ist, zeigt die gegenwärtige Zustandsentwicklung der Ergänzungen sowie die anhaltende Entwicklung der Phänomene des Absandens und der Schalenbildung, dass über einen längeren Zeitraum ohne Monitoring und entsprechendes Pflegekonzept mit einem zunehmenden Substanzverlust zu rechnen ist. Der heute zu beobachtende, zum Teil sich sehr flächig ausbreitende biogene Bewuchs sorgt an wichtigen Bildteilen zu einer deutlichen Verschlechterung der Lesbarkeit der Oberflächen. Der Vergleich mit früheren Aufnahmen zeigt, dass bereits einzelnen Flechten vor 20 Jahren auf der Oberfläche zu sehen waren, sich aber die Besiedelung deutlich verstärkt hat (Bsp. Reliefs *Puttentanz*, *Arbeiter im Weinberg*, *Moses und Aron* und *Fuchsjagd*).⁷⁰

6.2 Anwendung der Risikoziffer zur Zustandsbewertung

Ein Werkzeug zur Bewertung des Risikos, dem zum Zeitpunkt der Betrachtung ohne weitere Konservierungsmaßnahmen Skulpturen aus Marmor und Sandstein ausgesetzt sind, ist die sogenannte Risikoziffer, die durch Prof. Dr. Rolf Sneathlage etabliert worden ist.⁷¹ Die Risikoziffer ist zwar für freistehende Skulpturen entwickelt worden, dennoch wurde für vier Reliefskulpturen des Reliefs *Christus in der Kelter* (siehe Abb. 19), die eben nicht 360° freigestellt und noch dazu mit dem anstehenden Fels verbunden sind, also eine extreme Sondersituation darstellen, der Versuch unternommen, auch dafür die

⁷⁰ Hübner, 2018, S.21

⁷¹ AZ 33162/01-45: Messen und Bewerten: Eine Risikoziffer als Werkzeug, anthropogene Umweltschäden an Marmor und Sandsteinskulpturen zu erfassen und rational begründete Entscheidungen zu deren Konservierung zu treffen.

Risikoziffer zu ermitteln, um anhand dessen eine Zustandsbewertung und die Ableitung von erforderlichen Konservierungsmaßnahmen zu versuchen.



Abb. 19: Relief *Christus in der Kelter* mit Markierungen (Pfeile) an den bezüglich der Risikoziffer berücksichtigten Figuren. Ausführlich im Text dargestellt ist die Untersuchung der Relieffigur links außen (mit Hund).

Die Risikoziffer bildet den Zustand und Gefährdungsgrad einer Skulptur in einer einzigen Zahl ab. Unterschiedliche Kennwerte werden dabei auf den jeweils unverwitterten Zustand normiert. Deren Größe variiert immer nur zwischen Null und Eins. Auch die restauratorische Zustandserfassung spielt eine essentielle Rolle bei der Ermittlung der Risikoziffer. Über dieses Werkzeug soll ein problemloserer Vergleich von Objekten möglich werden, anders als bei unscharfen verbalen Beschreibungen, und so der Gefährdungsgrad einer Skulptur absolut und im Vergleich mit anderen Skulpturen ablesbar sein.⁷² Folgende Datenblätter müssen in dem Zusammenhang ausgefüllt werden:

1: Objektinformationen (allgemeine Information zum Objekt mit Angaben über Name der Skulptur, Bildhauer, Alter, Aufstellungsort usw.), 2: Kunstwissenschaftliche Bewertung (Bedeutung des Künstlers, Gestaltung, Formcharakteristika und Wertediskussion), 3: Restaurierungsgeschichte (nicht die Dokumentation aller restauratorischer Maßnahmen, sondern nur risikobehaftete Restaurierungsmethoden), 4: Umwelt - exogene Risikofaktoren (Verwitterungsdynamik durch „exogene Faktoren“, also Umweltbedingungen befördert (Aufstellungsort, lokales Klima, Frostereignisse oder Niederschlagsmenge), 6. (nur für Sandstein)⁷³: Naturstein (Gesteinspezifika, endogene Risikofaktoren - (Mineralbestand, Gefüge, Dehnungsparameter), 7: Vandalismus (Besteht das Risiko einer konkreten anthropogenen Bedrohung des Bestandes?), 8, 9, 10 und 11: Messtechnischen Methoden (Wie weit hat sich das Gestein von seinem Ausgangszustand entfernt? Methoden der Zustandserfassung (mechanische Schäden, Materialverlust, Veränderungen der Oberfläche) in drei Datenblättern zusammengefasst - durch zusätzliche Messwerte objektiviert (Oberflächenrauheit, Kantenrückwitterung und Ultraschalldiagnostik (Charakterisierung der Substanz) und 12: Gesamtbewertung (Zusammenfassung der Resultate der Datenblätter 2-11 und Berechnung der Gesamt-Risikoziffer (Zahlenwert zwischen 0-1).

Das Risiko, das von einem Parameter (i) für den Bestand einer Skulptur ausgeht, wird hierbei in Form der Risikoziffer ausgedrückt, dem Produkt aus Messwertziffer und Bewertungsziffer $R(i) = M(i) * B(i)$.⁷⁴

⁷² Snethlage, 2018

⁷³ Datenblatt 5 wird für Marmor verwendet. Für Marmor und Sandstein sind verschiedene Eigenschaften maßgeblich für die Verwitterung.

⁷⁴ Snethlage, 2018

Anwendung der Risikoziffer auf das Relief Christus in der Kelter

Im Relief *Christus in der Kelter* sind drei Halbrelied-Figuren bezüglich der Risikoziffer betrachtet worden. Für eine der Relieffiguren soll das nachfolgend das Vorgehen im Detail nachvollziehbar dargestellt werden (siehe Abb. 20-29). Die Berechnungen der anderen drei Figuren, die benachbart zu der hier dargestellten stehen, werden nur mit dem jeweiligen Ergebnis präsentiert.⁷⁵ Die Ermittlung der Risikoziffer erfolgt im Rahmen eines gemeinsamen Kurses mit Prof. Dr. Rolf Snethlage.

Aus der Recherche und diversen Messungen ergaben sich die Inhalte für die verschiedenen Kennblätter.

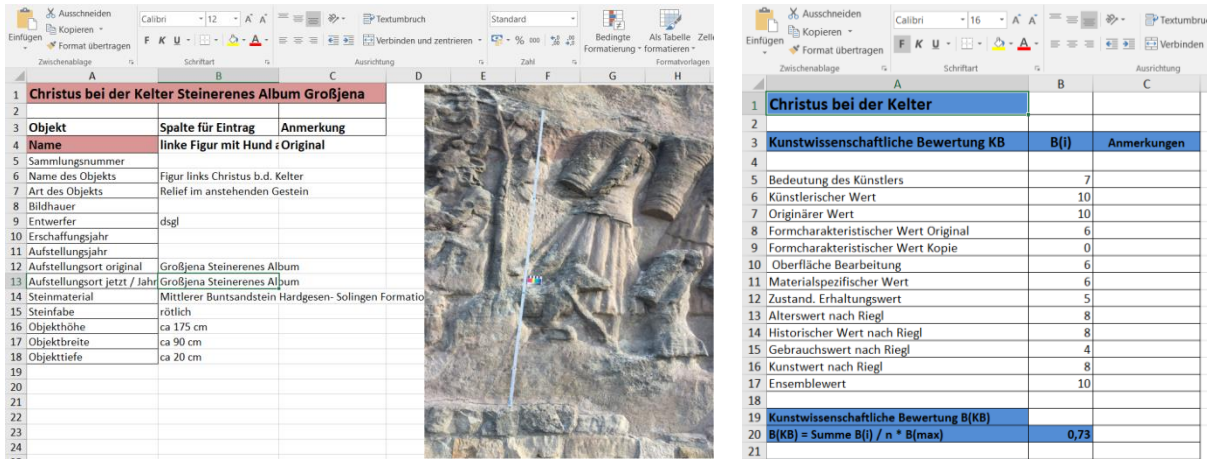


Abb. 20: Kennblätter 1 und 2 für die linke Figur mit Hund im Relief *Christus in der Kelter*

Jahr	Dokumentation	Maßnahme	Messwertzahl M(i)	Bewertungszahl (B(i)) Methode	Bewertungszahl B(i) wenn - dann	Risiko R(i) = M(i) * B(i)	Anzahl Hochrisiken	Anmerkungen
6	ja?	Reinigung	1	5	5	5	1	
7					0	0	0	
8	nein	Vierungen aus Stein	0	3	0	0	0	
9					0	0	0	
10	ja	Ergänzung aus Mörtel	1	2	2	2	1	
11					0	0	0	
12	nein	Rissfüllungen	0	2	0	0	0	
13					0	0	0	
14	ja	Festigung	1	2	2	2	1	
15					0	0	0	
16	nein	Farbfassung	0	0	0	0	0	
17					0	0	0	
18	nein	Hydrophobierung	0	0	0	0	0	
19					0	0	0	
20	nein	Vernadelungen Dübel	0	10	0	0	0	
21					0	0	0	
22	nein	Schutzschlänme	0	0	0	0	0	
23					0	0	0	
24	nein	Antigrffiti	0	0	0	0	0	
25					0	0	0	
26	nein	AVT	0	0	0	0	0	
27					0	0	0	
28	nein?	Entsalzung	0	5	0	0	0	
29					0	0	0	
30	nein?	Gipsumwandlung	0	0	0	0	0	
31								
32		Summe R(i) und B(i)		29	9	9	3	
33					9			
34		Risikoziffer Restaurierungsgeschichte						
35		R(RGS) = Summe R(i) / Summe B(i)				1,00		
36				B(max)	130			
37								
38								

Abb. 21: Kennblatt 3 für die linke Figur mit Hund im Relief *Christus in der Kelter*

⁷⁵ Die Berechnungen können bei der Autorin des Berichts im Detail eingesehen werden.

Bewertung der Schadensdynamik an den Reliefs

Umwelt Exogene Risikofaktoren (U)						
	Messwertzahl	Bewertungszahl	Risiko			
	M (I)	B(I)	R(I) = M(I) * B(I)	Anzahl Hochrisiken	Anmerkungen	
Aufstellungsort	1	10	10	1		
Niederschlag mm/Jahr	0,5	10	5	0		
Frostgefahr	1	10	10	1		
Nebel, Kondensation, Aerosol	0,5	6	3	0		
Trocknungsbedingungen	0,5	10	5	0		
Besondere Belastungen	Anstehendes Gestein/ stat	1	10	1		
Schadgas Immission NOx [(lgem) - I(o)] / (lgem) µg/m3	0	10	0	0		
Feinstaub Immission PM10 [(lgem) - I(o)] / (lgem)	0	10	0	0		
Schadgas Immission SO2 [(lgem) - I(o)] / (lgem) µg/m3	0	10	0	0		
Summe R(I) und B(I)			86	43	3	
Risikoziffer Umwelt					0,50	
R(U) = Summe R(I) / Summe B(I) * Messwertzahl Winterschutz						

→ 523 ml/ Jahr

→ 5µg/m³ ISB Sachsen-Anhalt⁷⁶
 → 12 mg/m³
 → 1µg/m³

Abb. 22: Kennblatt 4 für die linke Figur mit Hund im Relief *Christus in der Kelter*

Christus bei der Kelter							
Naturstein Endogene Risikofaktoren (N)							
	Auswahlkriterien M(I)	M(I)	B(I) Vorgabe	B(I) wenn - dann	Risiko R(I) = M(I) * B(I)	Anzahl Hochrisiken	Anmerkungen
Modelbestand	Chor + Mitt	0,5	10	10	5	0	
	Kapitell	0,5	10	10	5	0	
	St + Do	0,5	10	10	5	0	
	W(I) = W(I) / W(I)	0,107006	10	10	1,0700604	0	Niedrigster Messwert W(I) = 7,01 Messwert W(I) = Messung 1) 8,48 Messung 2) 8,06, Messung 3) 7,05, Durchschnitt W = 7,85 Literatur Ething WA 6,2 - 8,4 Laborwert nicht eingetragen
W-Wert kg/m ² h _{0,5} (Mittelwert)	Di - Di / Di (I)	0	10	0	0	0	
D-Wert kg/m ² h (Mittelwert)							
Kornform	Literatur Ething	0,5	8	8	4	0	Rund bis Angular
Kornbindung	Literatur Ething	0,5	10	10	5	0	Korn zu Korn und tonig
Textur	Literatur Ething/ Hübnar	1	5	5	5	1	
Risiko durch hygrische Dehnung	Aufstellungsort bewerten	1	10	10	10	1	
Optional wenn Probenahme möglich oder Literaturdaten verfügbar							
Porosität Vol.-% (Mittelwert aus Literaturdaten)	Literatur Ething	0	10	0	0	0	17,94 - 28,7 Ething 16,85 Hübnar
D-Wert (Mittelwert aus Literaturdaten)	Literatur Ething	0,7	10	10	0	0	0,66 - 0,75 Ething
Feuchtedehnung H ₂ O ges. (Mittelwert aus Literaturdaten)	nicht bekannt	0	10	0	0	0	
Durchfestigkeit DF Mpa	DF(I) = DF(I) / DF(I)	0	6	0	0	0	nicht ermitteln 43-69 Ething
Drängungsfestigkeit δZF Mpa	δZF(I) = δZF(I) / δZF(I)	0	8	0	0	0	nicht ermitteln 3,3 - 4,5 Ething
Summe R(I) und Summe B(I)			127	83	40,0706368	2	
Risikoziffer Naturstein					0,48		Bewertungszahl B(I) = 0 kein Risiko Bewertungszahl B(I) = 10 max. Risk Istwert X(I)
R(N) = Summe R(I) / Summe B(I)							Unverwittet X(I)

Abb. 23: Kennblatt 6 für die linke Figur mit Hund im Relief *Christus in der Kelter*

Christus bei der Kelter						
Gefahr durch den Menschen (V)						
	Auswahlkriterien M(I)	M(I)	B(I)	Risiko		
	Gefahrenreinschätzung			R(I) = M(I) * B(I)	Anzahl Hochrisiken	Anmerkungen
Vandalismus	Gefahrenreinschätzung	0	10	0	0	
Graffiti	Gefahrenreinschätzung	0	10	0	0	
Summe R(I) und B(I)			20	0	0	
Risikoziffer R (V) Gefahr durch Menschen				0,00		
R(V) = Summe R(I) / Summe B(I)						

Abb. 24: Kennblatt 7 für die linke Figur mit Hund im Relief *Christus in der Kelter*

⁷⁶ Immissionsschutzbericht Sachsen-Anhalt, Werte für ländliche Gebiete

Bewertung der Schadensdynamik an den Reliefs

Christus bei der Kelter						
Mechanische Schäden		Messwertzahl	Bewertungszahl	Risiko		
Auswahlkriterien M(i)	M(i)	B(i)	R(i) = M(i) * B(i)	Anzahl Hochrisiken	Verlustumfang	
Risstyp Craquelé	0	10	0	0	0	
Risstyp Haarriss	0	10	0	0	0	
Risstyp Trennschnitt	0	10	0	0	0	
Corpus	0	10	0	0	0	
Arm/Hand	0	10	0	0	0	
Bein/Beine	0	10	0	0	0	
Hals	0	10	0	0	0	
Kopf	0	10	0	0	0	
Finger	0	10	0	0	0	
Zehen/Fuß	0	10	0	0	0	
Nase	0	10	0	0	0	
Attribute	0	10	0	0	0	
Figur fehlende Teile						
Kopf	Verlust eingetreten ja	0,7	10	7	0	die zwei oberen Drittel des
Arm	Verlust eingetreten ja	0,7	10	7	0	rechter arm fehlt ab Ellenbogen
Bein/Beine	Verlust eingetreten nein	0	10	0	0	
Hand/hände	Verlust eingetreten ja	1	10	10	1	Hand fehlt
Finger	Verlust eingetreten ja	1	10	10	1	allen Finger fehlen
Nase	Verlust eingetreten ja	1	10	10	1	Nase fehlt
Zehen	Verlust eingetreten nein	0	10	0	0	
Sonstige	Verlust eingetreten nein	0	10	0	0	
Sonstige	Verlust eingetreten nein	0	10	0	0	
Attribute fehlende Teile						
Waffen	Verlust eingetreten nein	0	0	0	0	
Symbol	Verlust eingetreten nein	0	10	0	0	
Attribute fehlende Teile	Verlust eingetreten nein	0	10	0	0	
Summe R(i) und B(i)			220	44	3	
Risikoziffer Materialverlust R(M)			0,20			
R(M) = Summe R(i) / Summe B(i)						
Verlustumfang					0,14	

Abb. 25: Kennblatt 8 für die linke Figur mit Hund im Relief *Christus in der Kelter*

Christus bei der Kelter								
Veränderung der Oberfläche OF		Messwertzahl	Bewertungszahl	Bewertungszahl	Risiko			
Auswahlkriterien M(i)	Oberflächenanteil	M(i)	B(i)	B(i) wenn - dann	R(i) = M(i) * B(i)	Anzahl Hochrisiken	Anmerkungen	
Ablagerungen Farbveränderungen								
Ablagerungen	OF(i)/OF(ges)	0	4	0,00	0	0		
schwarze Krusten	OF(i)/OF(ges)	0	10	0,00	0	0		
Verfärbungen	OF(i)/OF(ges)	0	4	0,00	0	0		
Verfärbungen, Rostflecken	OF(i)/OF(ges)	0	4	0,00	0	0		
Ausblühungen	OF(i)/OF(ges)	0	6	0,00	0	0		
Materialverlust durch chem phys Prozesse								
Relief	OF(i)/OF(ges)	0	8	0,00	0	0		
Rückwitterung	OF(i)/OF(ges)	0,82	8	8,00	6,56	1		
Kreiden, Abmehlen	OF(i)/OF(ges)	0	6	0,00	0	0		
Absanden	OF(i)/OF(ges)	0,05	10	10,00	0,5	0		
Zuckerartiger Zerfall	OF(i)/OF(ges)	0	10	0,00	0	0		
Schuppen	OF(i)/OF(ges)	0	8	0,00	0	0		
Schalenbildung	OF(i)/OF(ges)	0	10	0,00	0	0		
Schichtspaltung Aufblättern	OF(i)/OF(ges)	0	10	0,00	0	0		
Ausbruch Rostsprengung	OF(i)/OF(ges)	0	10	0,00	0	0		
Abscherben Abspalten	OF(i)/OF(ges)	0	10	0,00	0	0		
Alveolen	OF(i)/OF(ges)	0	10	0,00	0	0		
Erosion: Materialverlust durch chem Lösungsvorgänge								
Rauheit				0,00	0	0		
P Zahl > 700	OF(i)/OF(ges)	0	0,56	0,00	0	0		
P Zahl 700 - 500	OF(i)/OF(ges)	0	0,16	0,00	0	0		
P Zahl 500 - 300	OF(i)/OF(ges)	0	0,28	0,00	0	0		
P Zahl 300 - 100	OF(i)/OF(ges)	0	8	0,00	0	0		
P Zahl < 100	OF(i)/OF(ges)	0	10	0,00	0	0		
Kantenrückwitterung/Aufplatzen?	mm	0,2	10	10,00	2	1		
Differentielle Erosion ("Zellulitis")	OF(i)/OF(ges)	0	10	0,00	0	0		
Mikrokarst	OF(i)/OF(ges)	0	6	0,00	0	0		
Pitting Grube	OF(i)/OF(ges)	0	6	0,00	0	0		
Biologische Besiedelung								
Algen Flechten Pilze Moose	OF(i)/OF(ges)	0,15	8	8,00	1,2	1		
Höhere Pflanzen	OF(i)/OF(ges)	0	10	0,00	0	0		
Originaloberfläche	ca. 75% oberflächlich Ergänzt	0,75						
Summe R(i) und B(i)			197,00	36,00	10,26	3		
Risikoziffer Veränderung der Oberfläche R(OF)			0,29					
R(OF) = Summe R(i) / Summe B(i)								

Abb. 26: Kennblatt 9 für die linke Figur mit Hund im Relief *Christus in der Kelter*

Bewertung der Schadensdynamik an den Reliefs

Zwischenablage		Schriftart		Ausrichtung		Zahl		Format			
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											
21											
22											
23											
24											
25											
26											
27											
28											
29											
30											
31											
32											
33											
34											
35											
36											
37											
38											
39											
40											
41											

Abb. 27: Kennblatt 10 für die linke Figur mit Hund im Relief *Christus in der Kelter*

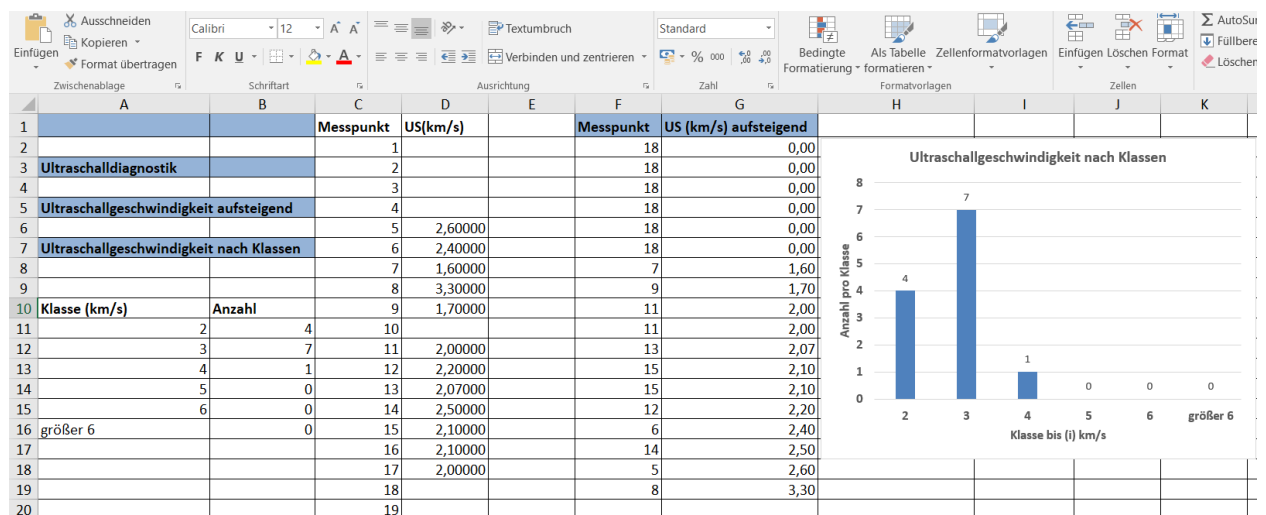


Abb. 28: Kennblatt 11 für die linke Figur mit Hund im Relief *Christus in der Kelter*

In der Abbildung 29 ist das Ergebnisblatt für die linke Figur im Relief *Christus in der Kelter* dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass die einzelnen Bewertungsaspekte ganz unterschiedlich stark zur Risikoziffer beitragen. Sogenannte Hochrisiken bergen die Altrestaurierung, das Klima, der detektierte Materialverlust. Auch der Naturstein selbst trägt mit seinem Mineralbestand und der Porosität als Risikofaktor in relevanter Weise bei. Der Zweck dieser Hochrisiken ist es, auf besondere Gefahrenschwerpunkte hinzuweisen, die ein sofortiges Handeln oder zumindest eine stetige Kontrolle benötigen. Als Hochrisiko wird ein Parameter gezählt, wenn sein $R(i) > 0,75$ liegt.⁷⁷

⁷⁷ Sneathlage, 2018, S. 91

Bewertung der Schadensdynamik an den Reliefs

	A	B	C	D	E	F
1						
2						
3	Gesamtbewertung		arithmetisches Mittel	quadratisches Mittel		
4	Objektbeschreibung B(O)	wird nicht bewertet				
5	Kunsthistorische Bewertung B(KB)	$B(KB) = \text{Summe } B(i) / n \cdot B(i) \text{ max}$	0,73	0,73		
6						
7	Restaurierungsgeschichte	$R(RGS) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$	1,00	1		
8	Umwelt	$R(U) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$	0,50	0,25		
9	Naturstein Marmor	$R(N-M) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$	0,00	0		
10	Naturstein Sandstein	$R(N-S) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$	0,48	0,233068661		
11	Vandalismus	$R(V) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$	0,00	0		
12	Materialverlust	$R(M) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$	0,20	0,04		
13	Veränderung der Oberfläche	$R(OF) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$	0,29	0,081225		
14	Ultraschalldiagnostik	$R(US) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$	0,24	0,059111543		
15						
16	Summe R(RGS) bis R(US)		2,71	1,66		
17						
18						
19						
20	Berechnung der Gesamt-Risikoziffer		arithmetisches Mittel		Anzahl Hochrisiken	Tabellenblatt
21	$R(\text{ges}) = \text{Summe } R(i) / n = R(RGS) + R(U) + R(N-M) + R(N-S) + R(V) + R(M) + R(OF) + R(US) / 7 =$		7,00		R(i) > 0,75	
22	R(ges) =		0,39		3	Restaurierung
23					3	Klima
24	Gewichtung durch kunstwissenschaftliche Bewertung K(B)				2	Naturstein
25	$R(\text{ges gewichtet}) = R(\text{ges}) \cdot B(KB)$	$R(\text{ges})$	0,39		0	Vandalismus
26		$B(KB)$	0,73		3	Materialverlust
27		R(ges gewichtet)	0,28		3	Oberfläche
28					0	Ultraschall
29				Summe R(i) > 0,75	14	
30	Berechnung der Gesamt-Risikoziffer		quadratisches Mittel			
31		$\text{SQR } R(i)$		0,49		
32		$B(KB)$		0,73		
33		R(ges gewichtet)		0,36		

Abb. 29: Kennblatt 12 Gesamtbewertung für die linke Figur mit Hund im Relief *Christus in der Kelter*

Die Gesamt-Risikoziffer für diese Figur liegt bei 0,36. Das Gesamtrisiko $R(\text{ges})$ erfasst alle Risikofaktoren und bildet somit den Gefährdungsgrad des betreffenden Objekts ab. $R(\text{ges})$ ist eine Zahl stets kleiner als 1. Je näher die Gesamt-Risikoziffer beim Wert 1 liegt, desto gefährdeter ist der Zustand einer Skulptur, weiterhin Schaden zu nehmen und im Bestand bedroht zu sein. Das quadratische Mittel betont verstärkt die schlechten Werte, d. h. die Risikoziffern, deren Werte näher bei 1 liegen. Hat eine Teil-Risikoziffer $R(i)$ den Wert Null, besteht kein Risiko, hat sie den Wert 1, besteht 100 % Risiko für weitere gravierende Schäden. Von welcher Eigenschaft dieses hohe Risiko ausgeht, kann an den Hochrisiken abgelesen werden. Anhand der Aufstellung dieser Hochrisiken auf dem Kennblatt zur Gesamtbewertung kann auf einen Blick erkannt werden, wo die besonders gefährdeten Bereiche angesiedelt sind.⁷⁸

Wie in der Detailabbildung der hier betrachteten Figur deutlich wird (siehe Abb. 30), steht sie augenscheinlich trotz eines hohen Anteils an Ergänzungsmörtel und massiven Rückwitterungen relativ stabil. Insbesondere im Gewandbereich sind auch immer wieder Salzausblühungen zu beobachten, die natürlich auch ein Risiko für den Fortbestand bedeuten. Das berechnete Gesamtrisiko von 0,36 scheint im Vergleich zu anderen Figuren in diesem Relief und auch in anderen Reliefs des Steinernen Albums als mäßig. Das nahezu entsprechende Gesamt-Risiko wurde mit 0,38 auch für die 3. Figur von links im Relief *Christus in der Kelter* errechnet (siehe Abb. 32). Im Vergleich zur linken Figur wäre eventuell ein minimal besserer Wert zu erwarten gewesen, auch da noch ein größerer Bestandteil an originalem Gesteinsmaterial vorliegt, das stabil steht (siehe Abb. 31). Da allerdings das Gesteinsmaterial durch die bearbeitende Studentin individuell risikobehafteter bewertet worden ist (siehe Abb. 31), blieb der positive Effekt des erhaltenen Originalmaterials ohne entsprechende Auswirkungen. Auch der Materialverlust (im unteren Gewandbereich) ist offensichtlich viel stärker als Risiko eingestuft worden, da offensichtlich ein aktiver Schaden vorliegt. Dringende konservatorische Maßnahmen scheinen vor dem Hintergrund der ermittelten Risikoziffer für diese beiden Figuren nicht dringend geboten. Das Monitoring weiterzuführen ist selbstverständlich zu empfehlen.

⁷⁸ Snethlage, 2018, S. 95



Abb. 30: Linke Figur im Relief *Christus in der Kelter* mit einem relativ hohen Anteil an Ergänzungen bzw. Verlusten von Originalmaterial. Starke Rückwitterung auch im unteren Gewandbereich.

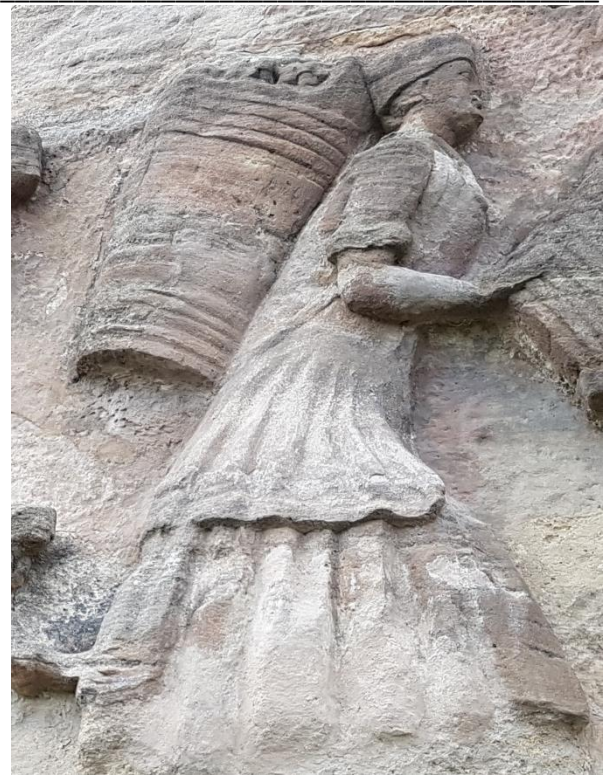


Abb. 31: Dritte Figur von links im Relief *Christus in der Kelter* ebenfalls mit einem relativ hohen Anteil an Ergänzungen im unteren Gewand. Ansonsten steht die Figur rechts stabil.

	A	B	C	D	E	F
1	Christus in der Kelter					
2						
3	Gesamtbewertung		arithmetisches Mittel	quadratisches Mittel		
4	Objektbeschreibung B(O)	wird nicht bewertet				
5	Kunsthistorische Bewertung B(KB)	$B(KB) = \text{Summe } B(i) / n \cdot B(i) \text{ max}$	0,66	0,66		
6						
7	Restaurierungsgeschichte	$R(RGS) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$	0,71	0,501736111		
8	Umwelt	$R(U) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$	0,31	0,093166915		
9	Naturstein Marmor	$R(N-M) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$	0,00	0		
10	Naturstein Sandstein	$R(N-S) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$	1,21	1,45229279		
11	Vandalismus	$R(V) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$	0,00	0		
12	Materialverlust	$R(M) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$	0,33	0,110103306		
13	Veränderung der Oberfläche	$R(OF) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$	0,29	0,081914388		
14	Ultraschalldiagnostik	$R(US) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$	0,25	0,064763725		
15						
16	Summe R(RGS) bis R(US)		3,09	2,30		
17						
18						
19						
20	Berechnung der Gesamt-Risikoziffer		arithmetisches Mittel		Anzahl Hochrisiken	
21	$R(\text{ges}) = \text{Summe } R(i) / n = B(RGS) + R(U) + R(N-M) + R(N-S) + R(V) + R(M) + R(OF) + R(US) / 7 =$		7,00		R(i) > 0,75	Tabellenblatt
22	R(ges) =		0,44		2	Restaurierung
23					3	Klima
24	Gewichtung durch kunstwissenschaftliche Bewertung K(B)				4	Naturstein
25	$R(\text{ges gewichtet}) = R(\text{ges}) \cdot B(KB)$	$R(\text{ges})$	0,44		0	Vandalismus
26		$B(KB)$	0,66		7	Materialverlust
27		R(ges gewichtet)	0,29		6	Oberfläche
28					0	Ultraschall
29				Summe R(i) > 0,75	22	
30	Berechnung der Gesamt-Risikoziffer		quadratisches Mittel			
31		$\text{SQRT } R(i)$		0,57		
32		$B(KB)$		0,66		
33		R(ges gewichtet)		0,38		
34						

Abb. 32: Kennblatt 12 *Gesamtbewertung* für die 3. Figur von links im Relief *Christus in der Kelter*

Für eine dritte Figur in dem Relief, der Weinträger rechts neben der Christusfigur (siehe Abb. 19), hat die Untersuchung, entgegen den beiden anderen, ein sehr hohes Risiko ergeben (0,94; siehe Abb. 33). Hochrisiken sind hier der Restaurierungsmaßnahme, dem Naturstein und auch dem Stand der aktuellen Materialverluste zuzuordnen. Die ermittelte Zahl deutet ganz eindeutig darauf hin, dass Maßnahmen zum weiteren Erhalt dringend erforderlich sind.

Bewertung der Schadensdynamik an den Reliefs

	A	B	C	D	E	F
1						
2						
3	Gesamtbewertung		arithmetisches Mittel	quadratisches Mittel		
4	Objektbeschreibung B(O)	wird nicht bewertet				
5	Kunsthistorische Bewertung B(KB)	$B(KB) = \text{Summe } B(i) / n \cdot B(i) \text{ max}$		0,35		
6						
7	Restaurierungsgeschichte	$R(RGS) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$		0,87	0,748890533	
8	Umwelt	$R(U) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$		0,44	0,19013656	
9	Naturstein Marmor	$R(N-M) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$		0,00	0	
10	Naturstein Sandstein	$R(N-S) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$		0,85	0,728177778	
11	Vandalismus	$R(V) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$		0,00	0	
12	Materialverlust	$R(M) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$		0,24	0,05803719	
13	Veränderung der Oberfläche	$R(OF) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$		6,98	48,67387778	
14	Ultraschalldiagnostik	$R(US) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$		0,49	0,236304012	
15						
16	Summe R(RGS) bis R(US)		9,86	50,64		
17						
18						
19						
20	Berechnung der Gesamt-Risikoziffer arithmetisches Mittel				Anzahl Hochrisiken	
21	$R(\text{ges}) = \text{Summe } R(i) / n = R(RGS) + R(U) + R(N-M) + R(N-S) + R(V) + R(M) + R(OF) + R(US) / 7 =$		7,00		R(i) > 0,75	Tabellenblatt
22	R(ges) =		1,41		5	Restaurierung
23					1	Klima
24	Gewichtung durch kunstwissenschaftliche Bewertung K(B)				5	Naturstein
25	$R(\text{ges gewichtet}) = R(\text{ges}) \cdot B(KB)$		1,41		0	Vandalismus
26	B(KB)		0,35		3	Materialverlust
27	R(ges gewichtet)		0,49		2	Oberfläche
28					0	Ultraschall
29					Summe R(i) > 0,75	16
30	Berechnung der Gesamt-Risikoziffer quadratisches Mittel					
31	$SQR R(i)$			2,69		
32	B(KB)			0,35		
33	R(ges gewichtet)			0,94		
34						

Abb. 33: Kennblatt 12 Gesamtbewertung für die Figur rechts des Christus im Relief *Christus in der Kelter*

Unter Beachtung der Detailaufnahme dieser Figur (siehe Abb. 34) ist auch ohne detaillierte Kenntnis der einzelnen Faktoren, die in die Bewertung eingeflossen sind, deutlich erkennbar, dass für diese Figur, im Vergleich zu beiden zuvor beschriebenen, Handlungsbedarf besteht. Somit korrelieren die Ergebnisse mit den subjektiven Einschätzungen aus der visuellen Betrachtung zumindest tendenziell.



Abb. 34: Erste Figur rechts der Kelter im Relief *Christus in der Kelter* mit massiven Fehlstellen u.a. im Oberschenkelbereich und Oberkörper sowie einem relativ hohen Anteil an Ergänzungen. Die Fehlstellen scheinen mürbe und sind damit auch aktiv.

Ob die Risikoziffer tatsächlich auch für die Bewertung des tatsächlichen Risikos einer Figur, die als Halbr relief angelegt ist, als valides Bemessungswerkzeug verwendet werden kann, müsste noch weiter geprüft werden. Allerdings sind die Bewertungskriterien, die auf freistehende Skulpturen und Plastiken angewendet werden, auch für die Reliefs gültig und damit eben auch die empfohlenen

Untersuchungsmethoden. Damit ist das Untersuchungsprogramm durchaus auch für den vorliegenden Fall zu empfehlen und kann als Monitoringhilfe eingesetzt werden. Wichtigster Punkt ist, dass die restauratorische Zustandsbewertung mit entsprechender Kartierung fachkundig ausgeführt wird. Das wird zusammen mit einer verlässlichen Bestimmung der Wasseraufnahme und ggf. Ultraschallmessungen zur Einschätzung der Festigkeit stets die wesentlichste Stütze bei der Entscheidung bezüglich anstehender konservatorischer und ggf. restauratorischer Maßnahmen sein.

7. Themenbereiche des optimierten Pflegekonzepts

7.1 Langzeitmonitoring der Situation der Feuchte- und Salzbelastung

Um die Schadensdynamik besser einschätzen zu können und um eine gesicherte Vorstellung von den Feuchteströmen in den Reliefs des Steinernen Albums zu gewinnen, zumindest in exemplarischen Bereichen, erwies es sich als erforderlich, im Rahmen eines Langzeitmonitorings und in Unterstützung der MPA Universität Stuttgart die Feuchtesituation im Tiefenprofil zu bestimmen. Dafür kamen Impedanzmessungen zum Einsatz. Auch die Salzbelastung wurde in diesem Zusammenhang langfristig beobachtet. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde dafür durch die MPA Universität Stuttgart am Steinernen Album in Großjena ein drahtloses Monitoringsystem für Feuchte und Klima installiert. Damit sollten die tatsächlichen Salz- und Feuchtetransportvorgänge im anstehenden Gestein der Reliefs, stellvertretend an zwei Stellen erfasst werden.⁷⁹

7.1.1 Durchgeführte Untersuchungen⁸⁰

Für das Monitoring wurde das drahtlose Messsystem SmartWSN der TTI GmbH - TGU Smartmote⁸¹ verwendet. Dieses teilt sich auf in die einzelnen Sensorknoten, an denen die Messwerte erfasst werden, und eine Basisstation, die die Messdaten der Sensorknoten aus dem lokalen Funknetzwerk empfängt und sie per Mobilfunk an den Datenserver der MPA Universität Stuttgart übermittelt. Die Sensorknoten sind batteriebetrieben, die Basisstation benötigt eine externe Spannungsversorgung.

Für die Erfassung von Temperatur und relativer Luftfeuchte wurden kapazitive Sensoren des Typs Sensirion SHT 25 (Typ. Genauigkeit $\pm 0,2$ °C, $\pm 1,8$ % r.F.)⁸² verwendet. Für die Messung der Impedanz wurden Nickel-Graphit Sensoren der MPA Universität Stuttgart⁸³ eingesetzt. Das Grundprinzip der Impedanzmessung [Ω] beruht auf dem Verhältnis von Strom und Spannung, welche jeweils zwischen zwei parallel angeordneten Elektroden gemessen wird.⁸⁴ Die Grundlage für die Bestimmung des daraus resultierenden Widerstandes basiert dabei auf dem Ohmschen Gesetz ($U=R \cdot I$). Das bedeutet, wenn die Stromstärke, wie im Messaufbau, gleichbleibt, sich aber aufgrund von Feuchtigkeit und Salzkontamination der Widerstand zwischen den Elektroden ändert, wird dies an der ansteigenden bzw. abfallenden Spannung deutlich. Aufgrund der gemessenen Spannung ergibt sich so automatisch ein dazugehöriger Widerstand. Liegt der Widerstand im Bereich von 10.000 Ω , ist das ein Indiz für die Beeinflussung der Spannung durch Feuchtigkeit. Ein weiteres Absinken des Widerstandes auf bis zu 1000 Ω kann als eine zusätzliche, durch Salze beeinflusste Herabsetzung des Widerstands interpretiert werden.⁸⁵ Ein Abfallen des Widerstandes unter den Grenzwert von 10.000 Ω auf bis zu 1000 Ω ist bei den Impedanzsensoren an den Messpunkten nicht zu erkennen. Der Einfluss von Salzen ist auf dieser Grundlage für das Relief *Hochzeit zu Kana* als gering zu bewerten. Anders verhält es sich mit dem Relief *Christus in der Kelter*.

⁷⁹ Leider war die damit verbundene Fernabfrage der Daten nicht kontinuierlich möglich, weshalb die Aufzeichnung der Daten zwischendrin, gerade auch zu relevanten Jahreszeiten, lückenhaft ist.

⁸⁰ MPA Universität Stuttgart, Abschlussbericht zum Klima- und Feuchtemonitoring, 2021

⁸¹ Technologie Transfer Initiative (TTI) GmbH - Transfer- und Gründerunternehmung (TGU) Smartmote.
<http://www.smartmote.de/>. Zuletzt aufgerufen am 15.01.2019.

⁸² Sensirion AG, Digitaler Feuchtesensor SHT 25.

<https://www.sensirion.com/de/umweltsensoren/feuchtesensoren/feuchte-temperatursensor-sht2x-digital-i2c-genauigkeit/>. Zuletzt aufgerufen am 14.01.2019.

⁸³ Lehmann (2018): Instrumented monitoring of moisture and salt by electrical impedance measurements. Dissertation, Universität Stuttgart. <https://dx.doi.org/10.18419/opus-10167>.

⁸⁴ Lehmann & Krüger 2014

⁸⁵ ebd.

Zumindest in der ersten Phase der Datenaufzeichnungen, im 1. Halbjahr 2018, lagen die Impedanzen der Sensoren in 200, 150 und 100 mm Tiefe im Bereich zwischen 10.000 und 1.000 Ω .

In Vorbereitung auf das Forschungsprojekt wurde am 12.11.2015 ein Messsystem am Relief *Hochzeit zu Kana* installiert (siehe Abb. 35).⁸⁶ In Abbildung 36 ist eine Nahaufnahme der Sensoren am Relief *Christus in der Kelter* abgebildet, wo sich die zweite Messstelle befand.



Abb. 35: Relief *Hochzeit zu Kana*. Impedanz- und Bohrlochklimasensoren (10 cm Tiefe) sind im Bereich der beiden Pfeile installiert worden.⁸⁷



Abb. 36: Relief *Christus in der Kelter*. Impedanz- und Bohrlochklimasensoren bis 20 cm Tiefe

Es wurden folgende Parameter erfasst:

1.) Lufttemperatur und relative Luftfeuchte:

An der Oberfläche des Reliefs, entsprechend der Orientierung zeitweise direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt. In unmittelbarer Nähe des Reliefs, jedoch im Schatten.

2.) Materialtemperatur und relative Luftfeuchte im Material:

In Bohrlöchern im Gestein in 15, 25 und 100 mm Tiefe.

3.) Elektrische Impedanz an zwei Messstellen mit je 3 Messpunkten:

In Bohrlöchern im Gestein in 12, 26 und 100 mm Tiefe.

Die Basisstation wurde an einem nahegelegenen Geräteschuppen installiert, an dem die notwendige Spannungsversorgung ermöglicht werden konnte. Die Klimamessungen wurden in einem zeitlichen Abstand von 10 Minuten aufgezeichnet. Die Impedanzen wurden alle 30 Minuten, bei jeweils 5 Frequenzen auf einer logarithmischen Skala ermittelt (10 Hz, 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz und 100 kHz). Alle Daten wurden per Mobilfunk an den Datenserver der MPA Universität Stuttgart übermittelt und waren für die berechtigten Projektbeteiligten unter <https://shm.mpa.uni-stuttgart.de> (ursprünglich <https://smartmote.net/neptun/>) als Grafik und ASCII abrufbar. Am 22. und 23.01.2018 wurde das Messsystem auf eine neue Hardware umgerüstet und die bisher vorhandene Sensorik deinstalliert. Die neuen Sensoren wurden dann am Relief *Christus in der Kelter* angebracht (siehe Abb. 37). Die erfassten Parameter blieben gleich, nur, dass die Erfassung nun bis in 200 mm Tiefe reichte.

⁸⁶ Angelegt im Rahmen eines Werkvertrags der MPA Stuttgart mit dem Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt.

⁸⁷ Die Klimasensoren für die Messung befinden sich im Schatten, an einem Gebäude, ca. 10 m entfernt.



Abb. 37: Relief *Christus in der Kelter*. Die Impedanz- und Bohrlochklimasensoren sind auf dem Bild oberhalb der Buttenträgerin, rechts des Weinkelers installiert. Die Klimasensoren für die Messung liegen im Schatten, am oberen Ende der Felsspalte (rechter Pfeil).

Lufttemperatur und relative Feuchte:

Die Sensoren sind an der Oberfläche des Reliefs, entsprechend der Orientierung zeitweise direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt. Allerdings in unmittelbarer Nähe des Reliefs im Schatten.

Materialtemperatur:

In den Bohrlöchern im Gestein in 30, 50, 75, 100, 150 und 200 mm Tiefe

Elektrische Impedanz an einer Messstelle mit 6 Messpunkten:

In Bohrlöchern im Gestein in 30, 50, 75, 100, 150 und 200 mm Tiefe.

Die Messungen wurden nach einem Systemausfall am 06.12.2020 beendet.⁸⁸

Die Basisstation wurde zunächst im Keller des nahegelegenen Gästehauses auf dem gleichen Grundstück installiert. Da der Empfang der Messdaten dort nicht fortwährend mit ausreichender Sicherheit gewährleistet werden konnte, wurde sie am 20.09.2018 in den Außenbereich des Gästehauses mit direkter Sichtverbindung zu den Sensorknoten versetzt. Die Klimamessungen wurden in einem zeitlichen Abstand von 10 Minuten aufgezeichnet. Die Impedanzen wurden alle 30 Minuten bei jeweils 5 Frequenzen auf einer logarithmischen Skala ermittelt (10 Hz, 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz und 100 kHz). Alle Daten wurden per Mobilfunk an den Datenserver der MPA Universität Stuttgart übermittelt und waren für die berechtigten Projektbeteiligten unter <https://shm.mpa.uni-stuttgart.de> als Grafik und ASCII abrufbar.

7.1.2 Ergebnisse⁸⁹

Hochzeit zu Kana

Die Daten der Messung am Relief *Hochzeit zu Kana* sind in den Abbildungen 38-41 dargestellt⁹⁰. Der Sensor CH 1 in 12 mm Tiefe an Messstelle 1 weist sehr hohe Messwerte auf (am oberen Ende des Messbereichs, um 2 M Ω), was auf eine vergleichsweise schlechte Ankopplung zurückzuführen ist. Mit nur 12 mm Einbautiefe konnte bei dem vorliegenden weichen Sandstein nur schwer eine dauerhaft hohe Pressung zwischen Sensor und Bohrloch erzielt werden, da der Stein beim Bohren an der Oberfläche leicht ausbrach.

⁸⁸ Leider war corona- und technikbedingt die Inbetriebnahme für das letzte Projektjahr nicht möglich.

⁸⁹ MPA Universität Stuttgart, Abschlussbericht zum Klima- und Feuchtemonitoring, 2021

⁹⁰ Die durchgezogenen Linien glätten jeweils die hinterlegten Rohdaten mit einem Savitzky-Golay-Filter 1. Ordnung über 2 Wochen.

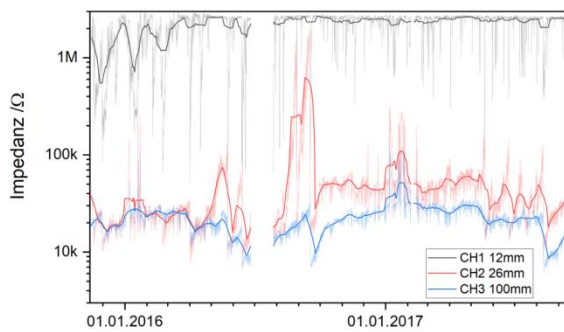


Abb. 38: Messstelle 1. Impedanzwerte bei 10 kHz der Sensoren mit 12 mm, 26 mm und 100 mm Abstand zur Steinoberfläche.

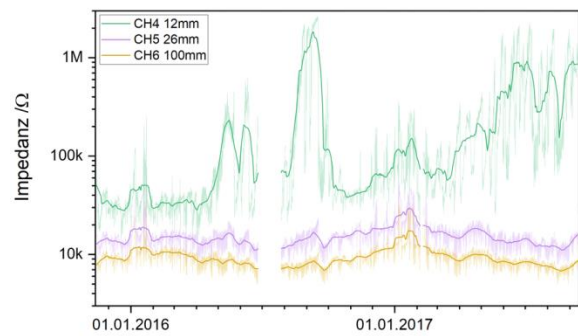


Abb. 39: Messstelle 2. Impedanzwerte bei 10 kHz der Sensoren mit 12 mm, 26 mm und 100 mm Abstand zur Steinoberfläche.

Die Impedanzen nehmen mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche an beiden Messstellen ab, was einem Anstieg der Feuchte zu größeren Tiefen entspricht. Die niedrigsten Werte liegen um 10 k Ω , was auf eine vergleichsweise niedrige Salzbelastung schließen lässt. Quantitative Aussagen zur Salzbelastung sind mit dieser Messmethode durch die gegenseitige Abhängigkeit von Feuchte und Salzen auf die Leitfähigkeit der Porenlösung nicht möglich.

Ein deutlicher Anstieg der Messwerte während der Sommermonate zeigt die Trocknung des Gesteins im Jahresverlauf. In den Daten ist der Einfluss der Temperaturänderung implizit enthalten, wobei ein Anstieg der Temperaturen (siehe Abb. 40 bzw. 38) zu einem Anstieg der Leitfähigkeit und damit einer Reduktion der Impedanz führt. Besonders ausgeprägt ist dieser Einfluss im Tagesgang sichtbar, was zu dem vermeintlich starken „Rauschen“ in den Messdaten der Impedanz führt.

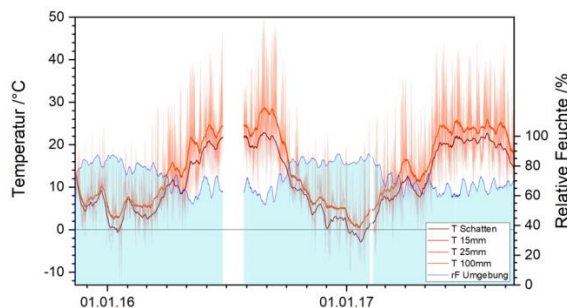


Abb. 40: Temperaturen aller am Relief verbauten Sensoren und mittlere relative Feuchte der Umgebungsluft.

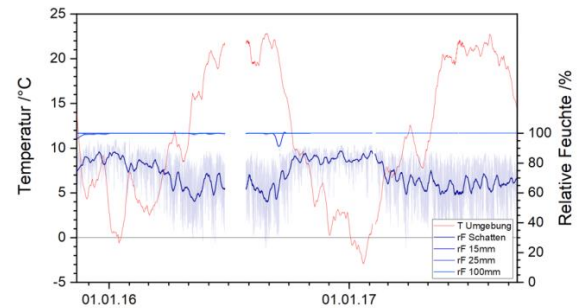


Abb. 41: Relative Luftfeuchten aller am Relief verbauten Sensoren und mittlere Temperatur der Umgebungsluft.

Zusätzlich sind in den Messwerten im Winter kurzzeitige sprunghafte Anstiege der Impedanz zu erkennen. Dieser Effekt lässt sich auf das Gefrieren des Porenwassers zurückführen, welches dann nicht mehr für die Ionenleitung zur Verfügung steht. Der Frost stellt sich über die gesamte Messtiefe von bis zu 100 mm ein. Regenereignisse lassen sich in den Daten durch sprunghafte Einbrüche der Impedanz um bis zu zwei Zehnerpotenzen erkennen. Je näher die Sensoren an der Oberfläche eingebaut sind, desto höher ist die Änderung. Die relativen Luftfeuchten in den Bohrlöchern liegen nahezu immer bei 100, mit Ausnahme einer kurzen Zeitspanne im Sommer 2016, im Bohrloch direkt unter der Steinoberfläche, in 15 mm Tiefe. Es ist auf Grundlage der Messungen davon auszugehen, dass die Feuchtebelastung des Steins ständig im überhygroskopischen Bereich liegt, was sich auch mit der Interpretation der Impedanzmessungen deckt.

Christus in der Kelter

Nach dem Umbau der Messvorrichtung von dem Relief *Hochzeit zu Kana* hin zu dem Relief *Christus in der Kelter* ergab sich auch eine Verlegung in eine andere Gesteinsvarietät bzw. eine Verlegung um ca. 60 Meter in Richtung Osten. Die Daten der Messungen am Relief *Christus in der Kelter* sind in den Abbildungen 42-45 dargestellt.⁹¹ Alle Sensoren weisen eine gute Ankopplung auf. Die offensichtlichen Messausfälle sind auf die bereits beschriebenen Einschränkungen in der Datenübertragung bis September 2018 zurückzuführen.

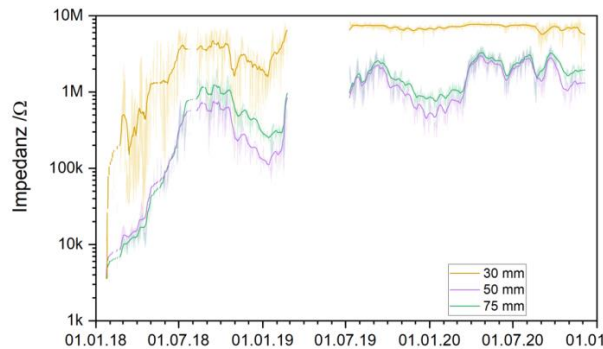


Abb. 42: Impedanzwerte bei 10 kHz der Sensoren in 30 mm, 50 mm und 75 mm Tiefe.

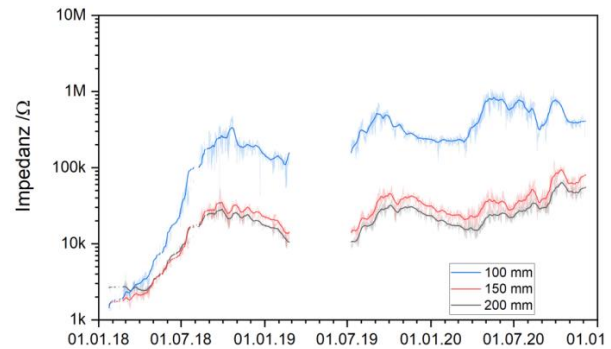


Abb. 43: Impedanzwerte bei 10 kHz der Sensoren in 100 mm, 150 mm und 200 mm Tiefe.

Die Impedanzen nehmen auch an diesem Relief mit zunehmendem Abstand zur Steinoberfläche ab (siehe Abb. 42 und 43). Das bedeutet, dass auch an diesem Relief die Materialfeuchte zu größeren Tiefen hin zunimmt. Zwischen den Werten aus 150 und 200 mm Tiefe sind die Unterschiede im Rahmen der Messungenauigkeit. Hier könnte die Feuchtesättigung oder zumindest ein Ausgleichszustand mit hoher Feuchte erreicht sein. Die niedrigsten Werte liegen an dieser Messstelle bei etwas über 1 k Ω , was auf eine höhere Salzbelastung relativ zum Relief *Hochzeit zu Kana* hinweist. Dieser Befund deckt sich mit den aufgelisteten Messwerten der Salzbelastung⁹² (siehe Kap. 7.2) an beiden Reliefs. Aufgrund der zunehmenden Feuchtebelastung mit der Tiefe kann davon ausgegangen werden, dass der hauptsächliche Feuchteintrag über den anstehenden Fels erfolgt.⁹³

Während des besonders trockenen Sommers 2018 steigen die Impedanzen in allen Messtiefen deutlich an, wobei die sich die Messwerte der Sensoren in 30 mm Tiefe an die obere Messbereichsgrenze annähern. Eine klare Grenze ist hier im Vergleich zu den alten Messungen nicht mehr gegeben, da beim Umbau Anfang 2018 eine neue, verbesserte Hardware eingebaut wurde. Mit einsetzendem Herbst sinken die Impedanzen langsam wieder ab, wobei der Ausgangszustand der Materialfeuchte nach einem Jahr Messdauer noch nicht wieder erreicht ist. Das Gestein ist damit zu diesem Zeitpunkt durch die geringen Niederschlagsmengen deutlich trockener als zuvor. Auch im weiteren Verlauf des Monitorings bis zum Ende des Überwachungszeitraums ist keine wesentliche erneute Wasseraufnahme zu erkennen.

Die Frostereignisse Anfang März 2018 sind in den Impedanzmessungen ab 50 mm Tiefe nicht erkennbar, d.h. das Gestein ist in diesen Tiefen nicht gefroren. Gründe dafür könnten eine zu kurze Frostperiode gewesen sein oder die höhere Salzbelastung an diesem Relief. Generell zu berücksichtigen ist dabei auch immer die Gefrierpunktsabsenkung um wenige Kelvin durch die Kapillarkräfte in porösen Materialien; d.h. Wasser in einem Porensystem gefriert erst bei Temperaturen unter 0 °C, umso niedriger, je kleiner die

⁹¹ Die durchgezogenen Linien glätten jeweils die hinterlegten Rohdaten mit einem Savitzky-Golay-Filter 1. Ordnung über 2 Wochen.

⁹² Hübner, 2018: Masterarbeit, FH Potsdam.

⁹³ MPA Universität Stuttgart, Abschlussbericht zum Klima- und Feuchtemonitoring, 2021

Porenradien sind. Eine Unterschreitung von 0 °C des Gesteins führt damit nicht automatisch zu einem Gefrieren des Porenwassers.⁹⁴

Die Temperaturkurven (siehe Abb. 44) zeigen sehr eindrücklich, dass die Schwankungen der Umgebungstemperatur bis in die Tiefe von 20 mm durchprägen, sowohl die niedrigen Temperaturen als auch die hohen, von bis zu 30°C.

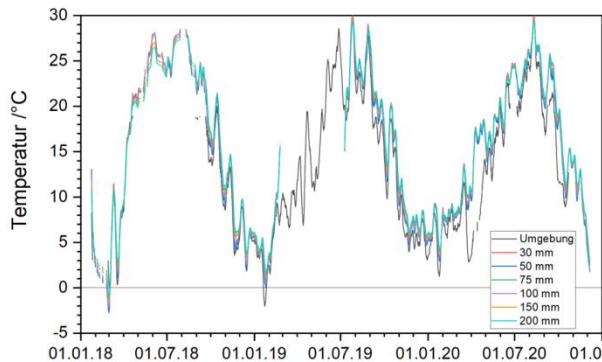


Abb. 44: Temperaturwerte aller verbauten Sensoren

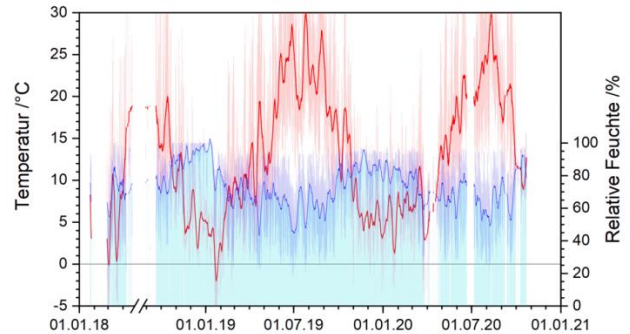


Abb. 45: Temperatur und relative Feuchte der Umgebungsluft am Relief. Die Zeitachse ist im Sommer 2018 wegen fehlender Werte unterbrochen.

In Abbildung 45 sind ergänzend noch Temperaturen und relativen Luftfeuchten der Umgebungsluft dargestellt. Die relativen Luftfeuchten in den Bohrlöchern liegen leider für das Relief *Christus in der Kelter* nicht vor. Durch diesen Vergleich war es ursprünglich am Relief *Hochzeit zu Kana*, in Ergänzung der Impedanzen, möglich gewesen zu erkennen, dass die relativen Feuchten nahezu immer bei 100 % lagen und damit eindeutig davon auszugehen war, dass die Feuchtebelastung des Steins ständig im überhygroskopischen Bereich ist.

7.1.3 Ergänzende Untersuchungen (IDK, FH Potsdam)

Im Rahmen der naturwissenschaftlichen Untersuchungen wurde am Relief *Hochzeit zu Kana* eine Messachse mit drei Bohrlöchern in den Höhen 0,5 m (SA_TP1), 1,25 m (SA_TP2) und 2,10 m (SA_TP3) durch das IDK angelegt.⁹⁵ Die in dem Zusammenhang gewonnenen Bohrmehlproben dienten neben der Bestimmung der Salzbelastung bis in eine Tiefe von 40 cm⁹⁶ der Bestimmung der Darrfeuchte. Die Auswertung der Untersuchungen bezüglich der Höhen- und Tiefenverteilung der Feuchtegehalte innerhalb der Messachse zeigte, dass der Feuchtegehalt oberflächennah (0-1 cm) von unten nach oben abnimmt. Der gemessene Wert des Feuchtegehalts an der untersten Messstelle liegt bei 2,3 Ma%. In der Mitte beträgt der Messwert im oberflächennahen Bereich bereits 1,6 Ma%. In einer Höhe von zwei Metern reduziert sich der Feuchtegehalt schließlich auf 0,4 Ma%. Diese Verteilung ändert sich bereits ab einer Tiefe von zwei Zentimetern. Die zuvor am geringsten feuchtebelastete obere Messstelle stieg von 0,4 Ma% sprunghaft auf 1,7 Ma% und schließlich bis, in einer Tiefe von 10 cm, noch auf weitere 2 Ma% an. Ab einer Tiefe von 20 cm stellt sich ein Gleichgewicht von 1,4 Ma% ein. Unerwartet zeigte sich das Bild der beiden darunterliegenden Messachsen. Die Messwerte dort liegen über dem Feuchtegehalt des oberen Tiefenprofils. Für beide Tiefenprofile gilt der angegebene Messwert des ersten Zentimeters innerhalb der Tiefenverteilung als Spitzenwert. Der Feuchtegehalt der auf 1,25 m liegenden Messstelle nimmt bis in eine Tiefe von 40 cm immer weiter ab. Dabei ist eine etwas feuchtere Zone im Bereich von

⁹⁴ MPA Universität Stuttgart, Abschlussbericht zum Klima- und Feuchtemonitoring, 2021.

⁹⁵ Bericht IDK HAL 56-2017

⁹⁶ Zwei weitere Messachsen wurden in relevanten Bereichen auf ähnliche Weise untersucht. Bericht IDK HAL 57-2017

3-10 cm zu beobachten (ca. 1 Ma%). In einer Tiefe von 20-40 cm liegt das Feuchteniveau bei 0,6 Ma%. Die unterste Messstelle mit der höchsten Oberflächenfeuchte von 2,3 Ma%, zeigt einen ähnlichen Verlauf des Feuchtegehaltes. Generell sinkt der Feuchtegehalt bis auf 0,9 Ma% ab. Dazwischen, im Bereich von 5-20 cm, wird der stetige abnehmenden Verlauf durch eine feuchtere Zone unterbrochen (1,6 Ma%). Auch eine Messung in der Nähe des Reliefs *Lots Berausung* bestätigt den nach hinten geringer werdenden Feuchtegehalt (SA_TP1)⁹⁷. Zusammenfassend ist für das anstehende Gestein am Relief *Hochzeit zu Kana* unterhalb von 2 m eine Absenkung des Feuchtegehaltes zu erkennen. Der Verlauf ist durch einzelne Zonen dabei immer wieder gestört. Die Messstelle oberhalb von 2 m zeigt oberflächennah eine geringe Feuchtebelastung, diese nimmt aber bis in eine Tiefe von 20 cm zu. Sie ist vergleichbar mit den Ergebnissen der Impedanzmessung. Eine wichtige Erkenntnis aus der Messreihe stellt die Verteilung der Feuchtigkeit ab einer Tiefe von 20 cm dar. Die Messwerte verändern sich bis in eine Tiefe von 40 cm nicht weiter. Der Verdacht liegt nah, dass sich ab einer Tiefe von 20 cm, ein Gleichgewicht der Feuchtigkeit einstellt. Von der Auffassung des in den 1990er Jahren postulierten Feuchtenachschubs aus dem Inneren des Gesteins, muss auf Grundlage der vorliegenden Messdaten der Darrfeuchtemessung Abstand genommen werden. Die Bohrmehlentnahme stellt allerdings nur eine Momentaufnahme der Feuchteverhältnisse zum Zeitpunkt der Bohrung dar. Um den oft formulierten Feuchtenachschub besser untersuchen bzw. wiederlegen zu können, wurden die Impedanz-Sensoren, wie in Kapitel 7.1 beschrieben, noch einmal neu angelegt und dabei bis in eine Tiefe von 20 cm. Der am Relief *Hochzeit zu Kana* gezogene Bohrkern aus der Nähe des Bodenniveaus (siehe Abb. 98) wurde u.a. ebenfalls zur Bewertung des Feuchtegehaltes verwendet. Der zwischen zwei Amphoren entnommene Bohrkern zeigt einen durchschnittlichen Feuchtegehalt von 1,1 Ma%.⁹⁸ Die ersten fünf Zentimeter zeigen dabei einen erhöhten Feuchtegehalt von 1,8 Ma% an. Dieser reduziert sich in der Tiefe ab 10 cm bis auf 0,65 Ma%. Er ist mit den Messungen aus der Bohrmehlanalyse vergleichbar.⁹⁹ Der Feuchtegehalt der feinkörnigen Varietät des Reliefs *Christus in der Kelter* konnte ebenfalls durch einen Bohrkern bestimmt werden.¹⁰⁰ Der Feuchtegehalt des im oberen Bereich des Reliefs (ca. 3,5 m Höhe) entnommenen Kerns (siehe Abb. 100) liegt durchschnittlich bei 0,78 Ma%. Der Bohrkern zeigt eine relativ gleichmäßige Feuchteverteilung zwischen den einzelnen Bohrkernteilen. Die beschriebenen massenbezogenen Feuchtebelastungen wurden weiterhin genutzt, um den vorliegenden Durchfeuchtungsgrad näher zu bestimmen.¹⁰¹ Die angegebenen Messwerte des Feuchtegehaltes wurden dafür in Relation zur maximalen Wasseraufnahme (WAK) gesetzt.¹⁰² Die ermittelten Werte zur Feuchtebelastung der Messachse zeigen eine mittlere Belastung der Oberfläche (0-2 cm) im bodennahen Bereich. Der Durchfeuchtungsgrad beträgt an diesem Messpunkt 21% (siehe Abb. 46).¹⁰³

⁹⁷ Bericht IDK HAL 56-2017

⁹⁸ Weiter wurde dieser Kern auch zur Ultraschallmessung im Rahmen der Untersuchungen zum Thema Frühhydrolyse verwendet (siehe Kap. 7.5.1).

⁹⁹ Hübner, 2018, S. 45

¹⁰⁰ Auch dieser wurde den Untersuchungen zum Thema Frühhydrolyse zugeführt (siehe Kap. 7.5.1).

¹⁰¹ Hübner, 2018, S. 46

¹⁰² Basis für den Wasseraufnahmekoeffizienten der grobkörnige Varietät 11%.

¹⁰³ gemessene Feuchtigkeit 2,3 Ma%

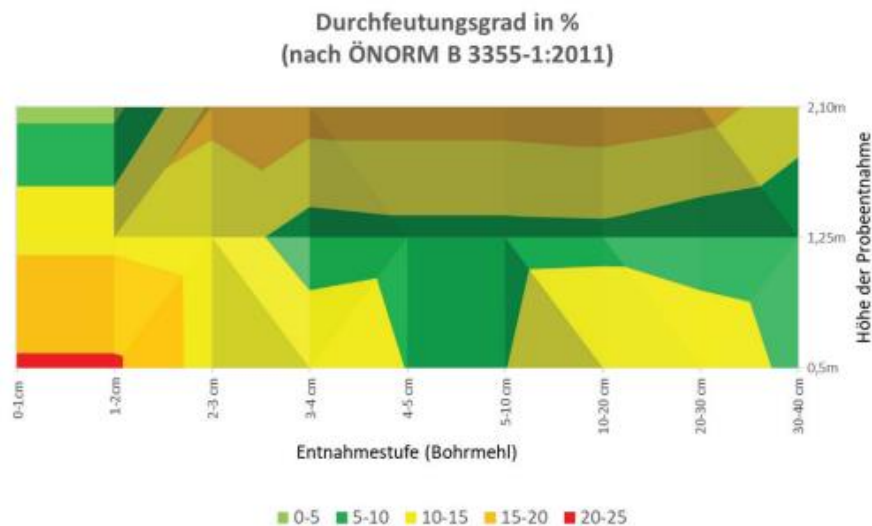


Abb. 46: Durchfeuchtungsgrad, Messachse Relief *Hochzeit zu Kana*

Der geringste bestimmte Durchfeuchtungsgrad innerhalb der gesamten Messsondierung (0,5m) ist mit 8% erst an der tiefsten Stelle in 30-40 cm Tiefe zu lokalisieren. Vergleicht man die Oberflächenprofile (0-2cm) der drei Bohrlöcher innerhalb der Messachse, so ist eine Reduzierung des Durchfeuchtungsgrades bis auf 4 % nach oben hin zu erkennen. An der obersten Messstelle steigt dieser Wert von 4%, nach 3 cm sprunghaft auf 13% an. Diese Beobachtung wird durch die Impedanzmessungen zusätzlich gestützt. Wichtig an dieser Stelle ist zu erwähnen, dass sich, über die Messtiefe der Impedanzsensoren hinaus (>100 cm), der hohe Wert von 17 -18% nach einer Tiefe von 30 cm auf 8% reduziert. Diese Beobachtung zeigt sich auch an der mittleren Bohrprobe (1,25 m), an der ebenfalls eine stetige Abnahme der Feuchtigkeit nach hinten zu erkennen ist. Die letzten 10 cm dieser Messbohrung erreicht den geringsten gemessenen Durchfeuchtungsgrad (6%). Auf Grundlage einer Vergleichsbohrung oberhalb eines Luftschachtes im rechten unteren Bildfeld des Reliefs, lässt sich der Einfluss von Bodenfeuchte auf den unteren Horizont des Reliefs nachweisen. Der Feuchtegehalt der Vergleichsprobe fällt auf Grundlage der baulichen Situation und dem fehlenden direkten Bodenkontakt sehr viel geringer aus. In allen Messtiefen dieser Bohrung ist ein geringer Durchfeuchtungsgrad (4%) bis in eine Tiefe von 20 cm ablesbar. Zur Abschätzung des Durchfeuchtungsgrades wurden die Bewertungen aus der ÖNORM B 3355-1:2011 herangezogen. Der Vergleich der am Steinernen Album gemessenen Durchfeuchtungsgrade zeigt, dass die Feuchtebelastungen allgemein als gering (unter 20 %) bis mittel (20-60 %) einzustufen sind (ÖNORM B 3355-1:2011). Diese Einstufung basiert allerdings auf der Beurteilung von geprüften Baustoffen hinsichtlich notwendiger Abdichtungsmaßnahmen. Diese berücksichtigten möglicherweise nicht den, zum Teil sehr tonhaltigen, inhomogen anstehenden Buntsandstein und die sich daraus ergebende Empfindlichkeiten gegenüber Feuchtigkeitseinflüssen. Diese Messungen wurden im Rahmen der Masterarbeit von Benjamin Hübner (2018) gemacht. Er resümiert, dass eine Betrachtung über die eigene Datenlage hinaus (*Hochzeit zu Kana*), die vorsichtige Vermutung zulässt, dass ein Einfluss von Feuchteströmen in größeren Höhen vorliegt. Es scheint, dass die über den Reliefs liegende Terrassierung möglicherweise ein großes Feuchtereservoir bietet und sich daraus ein logisches Modell für die Feuchtezonierung hinter einer abtrocknenden Oberfläche ergeben könnte. Die neuen Ergebnisse am Relief *Hochzeit zu Kana* zeigten weiterhin, dass der Einfluss von Bodenfeuchte für das Steinerner Album nicht, wie in den 1990er Jahren formuliert, vernachlässigt werden darf.¹⁰⁴ Weiterhin muss, so wie es häufig je nach Jahreszeit beobachtet werden kann, in dem Gedankenmodell der möglichen Feuchtezonierung am Steinernen Album der

¹⁰⁴ Hübner, 2018, S. 47

Einfluss von wasserführenden Schichten berücksichtigt werden. Um den Einfluss von Grundwasser und Bodenfeuchte besser abschätzen zu können, wurde versucht, über die Bohrdatenbank des Landesamtes für Geologie und Bergwesen, entsprechende Brunnen oder Hydrobohrungen in der Nähe des Steinernen Albums zu identifizieren. Leider stammten die einzigen in Frage kommenden Bohrungen aus den Jahren 1976 und 1984.¹⁰⁵ Diese wurden nie zur Pegelmessung ausgebaut. Auch die dazu dokumentierten Bohrprofile zeigten nur die geologische Schichtung und keine Grundwasserstände an.¹⁰⁶ Über den Kontakt zum Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt und über das von der selbigen Institution zur Verfügung gestellten Datenportal wurde versucht, mehr über die Grundwasserverhältnisse herauszufinden. Die Recherchen ergaben, dass lediglich in der weiteren Umgebung Pegelstände erhoben werden. Zum einen befindet sich ein Beobachtungsrohr zur Pegelmessung in Kleinjena sowie eine aktive Pegelmessstation in der Nachbarortschaft Freyburg. Darüber hinaus zeigt die im Datenportal zur Verfügung gestellte Karte die Isohypsenlinien der Region an. In Bezug auf die dargestellten Informationen liegt der Grundwasserspiegel am Steinernen Album im Bereich von 105 m ü. M. Der Ort Großjena selbst liegt 106 m ü. M., wobei die Unstrut vor dem Blütengrund ca. auf einer Höhe von 102 m ü. M. fließt. Für das am Hang höher gelegen Steinerne Album müsste der Grundwasserstand geschätzt ca. in 10 m Tiefe liegen. Darüber hinaus sind aus den Daten der Wassergüte der Messstelle in Freyburg hohe Sulfat- (>200mg/l) und Chloridbelastung (>250 mg/l) sowie erhöhte Natriumwerte (100-200mg/l) zu verzeichnen.¹⁰⁷

Zusammenfassend lässt sich für die beiden untersuchten Reliefs gemäß den Impedanzmessungen der MPA Stuttgart feststellen, dass zum einen die Feuchtebelastung im anstehenden Gestein bereits in einer Tiefe zwischen 5-10 cm sehr hoch ist, die relative Feuchte im überhygroscopischen Bereich liegt. Für die Konservierungsmaßnahme Ende der 1990er Jahre sind ähnliche Umstände als sehr wahrscheinlich anzunehmen, was einen erheblichen Einfluss auf die Hydrolyse des KSE gehabt haben könnte (siehe Kap. 7.5.1). Die Belastung mit löslichen Salzen ist in beiden Reliefs verschieden. Das Relief *Hochzeit von Kana* kann auf der Grundlage der durch die MPA Stuttgart erhobenen Daten im untersuchten Bereich als unkritisch bewertet werden. Im Relief *Christus in der Kelter* sind dahingegen höhere Salzbelastungen anhand der Leitfähigkeit detektiert worden. Diese Unterschiede zeigen sehr gut, das Spektrum an Eigenschaften, mit dem am Steinernen Album gerechnet werden muss.

Unter Berücksichtigung der Darrfeuchteuntersuchungen des IDK und der Betrachtungen im Rahmen der Masterarbeit von Benjamin Hübner kann zusammengefasst werden, dass die Feuchtegehalte innerhalb der Messachse den Einfluss nachströmenden Sickerwassers auf Grundlage der darüber liegenden Terrassierung sowie die Beeinflussung aufsteigender Feuchtigkeit in bodennahen Bereichen vermuten lassen. Der Feuchtegehalt im oberflächennahen Bereich wird nach oben hin geringer. In größeren Tiefen (ab 30 cm) ist kein erhöhter Feuchtegehalt über die Darrfeuchtebestimmung messbar. Es stellt sich eher ein geringer ausgeprägtes Gleichgewicht ein, was einem, aus dem anstehenden Stein heraus gebildeten Massentransport aus größerer Tiefe widerspräche.

¹⁰⁵ Bohrungen: TK25/4836: 193; 194; 197

¹⁰⁶ Hübner, 2018, S. 47

¹⁰⁷ Grundwassergütebericht Sachsen-Anhalt 2001-2010

7.2 Umgang mit löslichen Salzen

7.2.1 Untersuchung der vorliegenden Salzbelastung am Steinernen Album

Am gesamten Steinernen Album sind verschiedene Analyseverfahren zur Ermittlung der vorhandenen Salzbelastung durchgeführt worden. Mit Hilfe des Analyseverfahrens der Röntgendiffraktometrie konnten die an verschiedenen Stellen abgenommenen Effloreszenzen näher bestimmt werden. Darüber hinaus ist am Relief *Hochzeit zu Kana* durch das IDK eine Messachse mit drei Bohrlöchern in den Höhen 0,5 m (SA_TP1), 1,25 m (SA_TP2) und 2,10 m (SA_TP3) angelegt worden (siehe Abb. 47).¹⁰⁸ Die Erstellung der Messachse diente hauptsächlich der Erhebung der Salzbelastung bis in eine Tiefe von 40 cm. Die Proben wurden hinsichtlich ihrer Ionengehalte mittels Ionenaustauschchromatographie untersucht. Um die dynamische Entwicklung möglicher Salztransporte innerhalb des anstehenden Gesteins nachzuvollziehen, sind auch die Daten aus der bereits beschriebenen Impedanz zu berücksichtigen. Im Zusammenhang mit den Erkenntnissen aus den Ergebnissen der Bohrmehlanalyse an dem Relief *Hochzeit zu Kana* und den früheren Untersuchungen an anderen Reliefs *Herzog Christian*, *Josua und Kaleb*, *Quellwunder Moses*, wurden die Oberflächenbelastungen systematisch am gesamten Steinernen Album erhoben. Um einen schnellen Überblick über die tatsächlich belasteten Oberflächen der Reliefs zu bekommen, wurden kurzzeitig wirkende Cellulose-Kompressen aufgelegt (siehe Abb. 48). Diese zerstörungsfreie Untersuchungsmethode ermöglicht nach Abnahme der getrockneten Kompressen die Messung der elektrischen Leitfähigkeit. Mit Hilfe dieser Daten konnten anschließend auffällige Messfelder detaillierter mit Hinblick auf die dort vorkommenden Oberflächenbelastungen ausgewertet werden.¹⁰⁹



Abb. 47: Tiefenprofil des IDK am Relief Hochzeit zu Kana in 4 verschiedenen Höhen und jeweils bis in 40 cm Tiefe.



Abb. 48: Stichprobenartig und kurzfristig über die gesamten Reliefs angelegte Cellulosekompressen zur Detektion der Verteilung leichtlöslicher Salze.

7.2.2 Qualitative Salzanalyse von Ausblühsalzen mittels Röntgendiffraktometrie (RDA)

Am Steinernen Album wurden sechs Proben mittels dieser Untersuchungsmethode näher bestimmt. Die entnommenen Proben stammen zum einen aus der Nähe der Auskofferungen am Relief *Herzog Christian* (SA_H1), direkt von der Oberfläche einer mit Salzspeichermörteln gefüllten Fehlstelle am Relief *Christus in der Kelter* (SA_CK1) und aus unterschiedlichen Bereichen der unbearbeiteten Natursteinoberfläche (GJ1, GJ2 und SA_An_ES). Darüber hinaus wurde eine Probe einer aufliegenden Salzkruste am rechten Bildteil der *Hochzeit zu Kana* (SA_TP2_u_ES) entnommen.¹¹⁰

¹⁰⁸ Bericht IDK HAL 56-2017

¹⁰⁹ Hübner, 2018

¹¹⁰ IDK Bericht HAL 56-2017

Die Ergebnisse der RDA zeigten, dass überwiegend Anteile von Gips innerhalb der entnommenen Proben vorliegen. Die von verschiedenen Reliefs stammenden Proben aus dem Umfeld der Salzspeichermörtel zeigen zusätzlich Phasen des Natriumsulfats Thenardit. Des Weiteren konnten in mehreren Proben Natriumnitrat nachgewiesen werden. Die Analyse der Kruste hat ergeben, dass neben einem hohen Gipsanteil auch Magnesiumsulfat (Epsomit) vorkommt. Eine Ausnahme stellt die Probe SA_GJ2 dar, sie besteht aus dem Kalium-Calcium-Sulfat-Hydrat Syngenit.¹¹¹ Die Ergebnisse bestätigen die im Rahmen des Monitorings 2009 durchgeführte Röntgendiffraktometrie. Die Untersuchung zeigte ebenfalls hauptsächlich eine Belastung durch Gips, aber untergeordnet konnten auch Thenardit und Natriumnitrat innerhalb der Bildfelder „Quellwunder Mose“ und „Herzog Christian“ nachgewiesen werden.¹¹² Insgesamt lässt sich auch anhand der RDA-Untersuchungen nachvollziehen, dass das ursprünglich deutlich massiver vorkommende Magnesiumsulfat (in Abhängigkeit von der Sandsteinvarietät (dolomithaltig) nicht mehr dominant vorkommt. Hauptsächlich liegt Gips vor.

7.2.3 Quantitative Salzanalyse mittels Ionenaustauschchromatografie

Für die quantitative Analyse der Salzbelastung und die Bestimmung der daran beteiligten An- und Kationen wurde das Verfahren der Ionenaustauschchromatografie (HPIC) angewendet.

Die bereits im Kapitel 7.2.1 erläuterte Messachse am Relief *Hochzeit zu Kana* sollte hauptsächlich zur Eruierung der Salzbelastung und deren Verteilung innerhalb des anstehenden Gesteins dienen (SA_TP2_x). Ebenfalls wurde die Probe über dem Luftschaft des Reliefs *Hochzeit zu Kana* (SA_TP2u_1) und die Vergleichsbohrung im unbearbeiteten Gestein links neben dem Relief *Lots Berausung* (SA_TP1) untersucht. Neben den unterschiedlichen Höhen sollte die Salzbelastung vor allem auch den aus der Tiefe möglicherweise vorhandenen Ionennachschub näher untersuchen. Die Messachse, aus welcher der Hauptanteil der Proben stammten, wurde unter Berücksichtigung der dolomitischen Bindemittel geprägten Varietät angelegt. Um die vermutete Salzbelastung besser mit den gemessenen Klimabedingungen in Relation setzen zu können, wurde die Achse unterhalb der Impedanz-Sensorik angelegt. Die Bohrmehlentnahme erfolgte bis in eine Tiefe von 40 cm. Die einzelnen Entnahmestufen sind aufgrund der gleichen Probengrundlage analog zu den Feuchtegehalten zu betrachten.¹¹³

Ergebnisse der Bohrmehlanalyse am Relief *Hochzeit zu Kana*

Betrachtet man die Gehalte der Anionen der ersten Zentimeter der drei Bohrungen aus der Messachse (SA_TP2_1 bis 3) wird schnell deutlich, dass die oberflächennahen Bereiche hauptsächlich mit Sulfat belastet sind (0,96 - 1,3 Ma%) (siehe Abb. 49). Eine Belastung von bis zu 1,3 Ma% ist auf der Grundlage der angegebenen Bewertungsgrenzen des WTA-Merkblattes „Mauerwerksdiagnostik“¹¹⁴ für Sulfate als eine Belastung mittleren Ausmaßes einzustufen. Auf der Seite der Kationen ist Calcium das maßgeblich bestimmende Ion. Die Werte liegen zwischen 0,35-0,49 Ma%. Die Probe SA_TP2u_1 zeigt eine vergleichbare Ionenverteilung innerhalb des ersten Zentimeters. Die Probe aus der Nähe des Reliefs *Lots Berausung* weist eine geringere Sulfatbelastung auf (0,39 Ma%). An dieser Messstelle lässt sich zusätzlich eine mittlere Nitratbelastung nachweisen (0,19 Ma%) (siehe Abb. 49).

¹¹¹ ebd.

¹¹² Meinhardt, 2010

¹¹³ Hübner, 2018, S. 51

¹¹⁴ Merkblatt 4-5-99/D

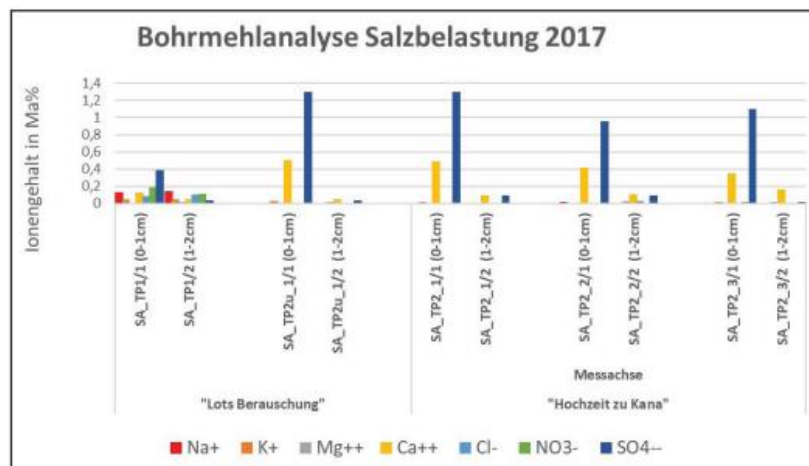


Abb. 49: Salzbelastung der Bohrmehlproben aus dem oberflächennahen Bereich (0-1 cm)

Die Untersuchung einer weiteren Tiefenstufe (2 cm) zeigt keine ernstzunehmende Belastung mit Salzionen. Es fällt allerdings auf, dass die Magnesiumkonzentration im Vergleich zu dem ersten Zentimeter leicht zunimmt (SA_TP_2/2). Das geschieht jedoch auf einem viel zu geringen Niveau, um von einer vorliegenden Salzbelastung sprechen zu können. Auf Grundlage der unerwartet geringen Salzbelastungen der entnommenen Proben wurden die weiteren Tiefenstufen nicht weiter auf ihren Ionengehalt hin analysiert. Eine daraufhin durchgeführte Messung der Ionen anhand des gewonnenen Bohrmehls des entnommenen Bohrkernes aus dem Relief *Christus in der Kelter* zeigte zusätzlich, dass außer einer geringen Sulfatbelastung keine für die Schäden am Steinernen Album infrage kommende Salzgehalte vorliegen (leichtlösliche Salze). Der offensichtliche Widerspruch zwischen den nachweislich aus Salzen bestehenden Ausblühungen und der geringen vorhandenen Mengen an leichtlöslichen Salzen innerhalb der dolomitisch gebundenen groben Varietät des Bildfeldes *Hochzeit zu Kana* konnte im Projekt nicht aufgelöst werden. Um einen besseren Eindruck der Salzbelastung am Steinernen Album zu bekommen, seien an dieser Stelle noch die vorangegangenen Salzanalysen aus den 1990er Jahren (Reliefs *Josua und Kaleb* und *Lots Berausung*) sowie Einzelergebnisse aus dem Monitoring 2009 (*Puttentanz*, *Herzog Christian*) für die Interpretation mit aufgeführt (siehe Abb. 50). Die Ergebnisse aus den 1990er Jahren beziehen sich auf die Messachse aus den Jahren 1996-1997. Damals wurden neben der Feuchtigkeit auch in 14 verschiedenen Höhen (0-4,3m), jeweils in vier verschiedenen Tiefenstufen (0-57 cm) die Ionengehalte bestimmt. Dabei zeigte sich für das Relief *Josua und Kaleb*, dass lediglich in den ersten Zentimetern (2,5 cm) bis in eine Höhe von 1,15 m eine geringe Sulfatbelastung von 0,13 bis 0,79 Ma% vorliegt. Auch hier zeigt ein Blick auf die beteiligten Kationen hauptsächlich Calcium mit einem Massenanteil von 0,27 % als einzig möglichen Partner an. In dem Bildfeld *Lots Berausung* zeigt sich die Belastung ähnlich. Die Sulfatbelastung trat an diesem Relief bis in eine Höhe von 1,5 m auf (0,28-0,79 Ma%).

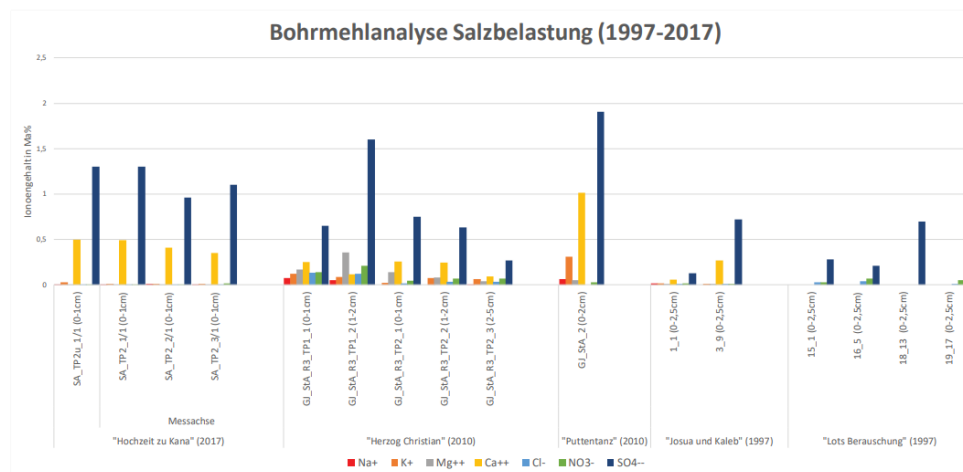


Abb. 50: Ionengehalte aller untersuchten Proben von 1997-2017

Als einzige, sich stark in den Ionengehalten unterscheidende Proben, stellten sich zwei Oberflächenproben mit der Bezeichnung „Kelter Fels“ heraus.¹¹⁵ Die Werte waren lediglich aus einer im Anhang befindlichen Tabelle der damaligen Analyse zu entnehmen. Die zwei entnommenen Proben stammen wahrscheinlich aus dem Bildfeld *Christus in der Kelter*, aus einer Höhe von 1,5 m. Aufgrund der sehr hohen Sulfatbelastung von 7-12 M% ist davon auszugehen, dass es sich dabei um die Analyse einer Kruste und nicht einer Bohrmehlprobe gehandelt haben muss.¹¹⁶ Neben dem extremen Sulfatgehalt wurden des Weiteren hohe Chlorid- (0,69-1 Ma%) und Nitratgehalte (0,37- 0,53 Ma%) gemessen. Auf der Seite der Kationen ist hauptsächlich Calcium mit 1,38-2,13 Ma% vertreten. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass es sich bei der untersuchten Kruste um eine Gipskruste handelt. Neben Calcium wurden aber auch größere Mengen an Magnesium (0,92-1,3 Ma%) in der Kruste detektiert.¹¹⁷ Die 2009 innerhalb des Monitoringprogramms erhobenen Daten bestehen aus der Auswertung zweier Bohrmehlproben aus dem Relief *Herzog Christian* mit einer Tiefenstufe von bis zu 10 cm sowie einer weiteren Bohrmehlprobe aus 0-2 cm. Ebenfalls wurde eine Krustenprobe aus dem Relief *Puttentanz* analysiert. Dabei zeigen die Bohrmehlproben aus dem Relief *Herzog Christian* eine mittlere bis hohe Sulfatbelastung innerhalb der ersten 2 cm (0,63-1,6 Ma%). In einer der beiden Bohrmehlproben (GJ_StA_R3_TP1_1-2) ist zusätzlich eine mittlere Nitratbelastung analysiert worden (0,21 Ma%). Der Hauptanteil der Kationen wird in fast allen Proben durch den Anteil des Calciums bestimmt (0,12- 0,26 Ma%), jedoch sind ebenfalls die Kationen des Magnesiums an der Salzbildung beteiligt (0,14-0,36 Ma%). Die Auswertung der Bohrmehlprobe aus dem Relief *Puttentanz* bestätigte die, sich durch das ganze Steinerne Album ziehende, oberflächennahe Gipsbelastung (SO_4^{2-} 1,9 Ma%; Ca 1 Ma%). Auch die entnommene Krustenprobe ist mit der beschriebenen Probe aus dem Jahr 1997 vergleichbar. Sie weist ebenfalls, wie für eine Gipskruste üblich, einen sehr hohen Sulfatgehalt (48,2 Ma%) auf. Auf der Seite der Kationen ist der Anteil von Magnesium-Ionen (12,3 Ma%) höher als der Anteil der Calcium-Ionen (7 Ma%). Ebenso sind, wie bereits in der zuvor beschriebenen Kruste, geringe Anteile von Chlorid und Nitrat auszumachen (siehe Abb. 51).

¹¹⁵ Ganß, 1997

¹¹⁶ Hübner, 2018, S. 53

¹¹⁷ Ganß, 1997

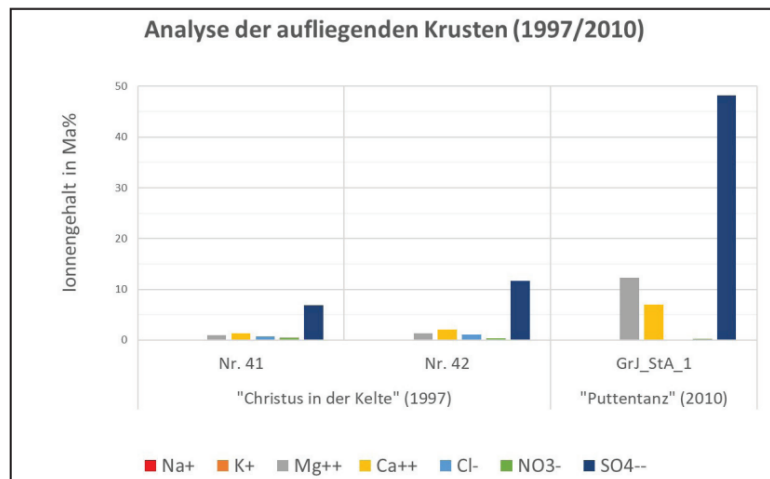


Abb. 51: Ionengehalte der Krusten (1997-2010)

Mit dem Vergleich vorangegangener Untersuchungen wird das Bild der Salzbelastung am Steinernen Album etwas deutlicher. Allerdings sind die entnommenen Proben leider nicht systematisch genug angelegt gewesen, um heute eventuelle Höhen bzw. Varietäteneffekte daraus ableiten zu können. Ebenso ist von den zwölf Reliefbildern nur ca. ein Drittel durch die beschriebenen Untersuchungen erfasst. Um besonders die immer wieder detektierte Oberflächenbelastung großflächig zu eruieren, wurden mittels Cellulose-Kompressenfelder große Teile des Steinernen Albums zumindest auf leichtlösliche Salze hin untersucht (siehe Abb. 48).¹¹⁸

7.2.4 Analyse der oberflächennahen Salzbelastung mittels Cellulose-Kompressen¹¹⁹

Wie zu Beginn des Kapitels beschrieben, sind breit angelegte Untersuchung der Oberflächenbelastung mittels Cellulose-Kompressen (ca. 25×25cm), die stichprobenartig über die gesamte Höhe der Reliefdarstellungen verteilt waren (siehe Abb. 48), durchgeführt worden. Um möglichst viele Faktoren miteinander in Beziehung setzen zu können, erfolgte die Auswahl der Probeflächen nach bestimmten Kriterien. Zu diesen gehörte einerseits die unterschiedliche Feuchtebeaufschlagung, also Regenschatten- oder Regenablaufzonen. Aber auch Subfloreszenzen bzw. Effloreszenzen gaben den Ausschlag bei der Auswahl der zu untersuchenden Bereiche. Auf diese Weise ergeben sich pro Relief drei bis vier Messfelder. Insgesamt wurden 41 Messstellen, verteilt auf zwölf Reliefdarstellungen, angelegt. Die Cellulose-Kompressen basieren auf einer sich als sehr praxistauglich erwiesenen Mischung aus Arbocel BC 1000 und Arbocel BW 40 im Gewichtsverhältnis von 1:2,1 und einer Zugabe von 4,5 Teilen destilliertem Wasser.¹²⁰ Die Kompressen wurden in einer Schichtdicke von ca. 1 cm aufgetragen. Nach dem Einwirken über mindestens 24 Stunden wurden mittels einer Schablone (10×10 cm), die für die wässrigen Auszüge vorgesehenen abgetrockneten Kompressenproben entnommen.¹²¹ Die Klimabedingungen waren zum Zeitpunkt der Maßnahme mit sehr hohen Temperaturen bis über 30 °C als typisch sommerlich zu bezeichnen. Jedoch sorgten besonders am Spätnachmittag des zweiten Tages starke Gewitter dazu, dass nicht alle Messfelder später für die Analyse zur Verfügung standen. Es konnten jedoch letztlich von 36 Messfeldern von neun Reliefs die Leitfähigkeit bestimmt werden.¹²²

¹¹⁸ Hübner, 2018, S. 55

¹¹⁹ ebd.

¹²⁰ Maitschke, 2013

¹²¹ Hübner, 2018, S. 55

¹²² Diese wurden aufgrund ihres direkt als wässriger Auszug ohne vorherige Gewichtsbestimmung in 1 Liter dest. Wasser aufgelöst. Anschließend wurde die elektrische Leitfähigkeit bestimmt.

Ergebnisse der elektrischen Leitfähigkeit der Cellulose-Kompressen¹²³

Die an den Eluaten erfolgten Messungen der elektrischen Leitfähigkeit zeigen eine sehr große Spannweite der Messergebnisse. Dabei wurden 25 Werte unterhalb des Mittelwertes von 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ gemessen. Zum Teil liegen diese Werte im Bereich von nur 16-60 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und sind als unbelastet zu deklarieren. An elf Messfeldern wurden elektrische Leitfähigkeitswerte über dem errechneten Durchschnittswert ermittelt. Besonders auffällig sind die drei Messstellen mit einer Belastung von über 10 % der Gesamtverteilung. Die in Relation zur Gesamtverteilung hohen Werte reichen von 272-1344 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Neben diesen drei Werten wurden auf Grundlage der näher untersuchten Reliefdarstellungen *Hochzeit zu Kana* und *Christus in der Kelter* die über dem Durchschnitt liegenden Werte dieser Darstellungen weiter analysiert. Betrachtet man alle überdurchschnittlichen Werte, fällt auf, dass fast alle auffälligen Messfelder auf der roten feinkörnigen Varietät verteilt liegen bzw. sich in direkter Nähe dazu befinden. Das trifft nicht für die Messwerte des Reliefs *Herzog Christian* zu. Hier liegen auch die gemessenen Werte der ockerfarbenen grobkörnigen Buntsandsteinvarietät leicht über dem Durchschnitt. Wichtig zu erwähnen ist, dass neben den auffälligen Werten auch Messfelder ohne eine Salzbelastung der roten Varietät zuzuordnen sind. Somit zeigt nicht jede Messstelle der feinkörnigen Varietät eine Belastung, jedoch wenn eine Belastung vorliegt, dann gehäuft im Zusammenhang zur roten, feinkörnigen Varietät.

Die Analyse des Ionengehalts der Cellulose-Kompressen¹²⁴

Wie bereits die sehr hohe Leitfähigkeit (1344 $\mu\text{S}/\text{cm}$) erahnen ließ, zeigt die Komresse aus dem unteren Bereich (70 cm) des Reliefs *Noah* mit Abstand den höchsten Ionengehalt mit 84 g/m^2 (siehe Probe 10_2 in Abb. 52).

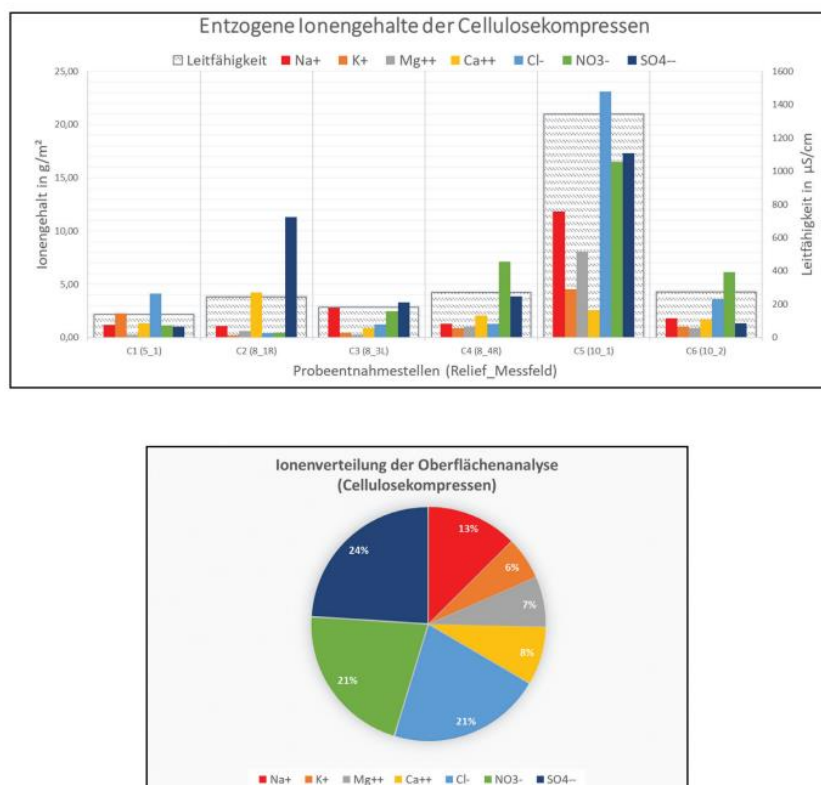


Abb. 52: Ergebnisse der Cellulosekompressen - Ionenverteilung in den Oberflächen

¹²³ Hübner, 2018, S. 57

¹²⁴ ebd.

Die Verteilung der Anionen zeigt, dass der höchste gemessene Anteil durch Chloridionen verursacht wird (23 g/m^2). Aber auch die Sulfat- und Nitratbelastung dieser Probe fällt mit 17 g/m^2 hoch aus. Die entsprechenden Kationen dieser sehr auffälligen Probe verteilen sich nach absteigender Ordnung wie folgt: Ein Großteil der Kationen geht auf Natrium zurück (12 g/m^2), darauf folgen Magnesium (8 g/m^2) und Kalium ($4,56 \text{ g/m}^2$). Den geringsten Anteil innerhalb der gemessenen Probe haben die Calciumionen ($2,6 \text{ g/m}^2$). Durch den kurzen Kontakt der Cellulose-Kompresse mit der belasteten Oberfläche sind eher leichtlösliche Salze entzogen worden. Der zuvor häufig analysierte Gips (Bohrmehlproben, RDA) kann aufgrund seiner geringeren Löslichkeit ($2,14 \text{ g/l}$)¹²⁵ nur zu einem Teil in die Kompresse transportiert werden. Diese Beobachtung kann für fast alle Cellulosekompressen, mit Ausnahme der Probe 8_1R, getroffen werden. Bei dieser Probe konnte sich ein hoher Calcium-Anteil mit einer entsprechenden Sulfatbelastung einlagern. Besonders interessant für die Interpretation der gemessenen Ionen ist die Probe 10_1 im Zusammenhang mit dem entzogenen Sulfatanteil. Für diese Messstelle könnte sowohl das mit der RDA identifizierte Natriumsulfat, als auch Magnesiumsulfat verursachend sein. Die Probe oberhalb der beschriebenen Messstelle in einer Höhe von 2,3 m (10_2) zeigt hauptsächlich eine Belastung von Nitrat (6 g/m^2) und Sulfat ($1,3 \text{ g/m}^2$). Die Betrachtung der Kationen zeigt, dass es sich dabei zum Großteil um das ebenfalls bereits in der RDA identifizierte Natriumnitrat handeln könnte. Eine weitere Probe an dem gleichen Relief (*Christus in der Kelter*) zeigt in höherer Lage nur geringere Sulfat- und Calciumgehalte. Besonders scheint hier eher eine Nitratbelastung relevant zu sein (7 g/m^2). Ein Blick auf die Gesamtverteilung der Ionen aller Cellulose-Kompressen zeigt (siehe Abb. 52), dass praktisch alle Ionen in den Kompressen nachzuweisen sind. Im Unterschied zu den bisherigen Ergebnissen zeigt der Vergleich der Anteile aller gemessenen Anionen eine relativ gleichmäßige Verteilung untereinander. In den Kompressen konnte eine vergleichbare Sulfat-, Chlorid- und Nitratbelastungen gemessen werden. Wobei der Sulfatgehalt aufgrund seiner bereits beschriebenen Löslichkeit in Form von Gips höher anzunehmen ist. Das am meisten bestimmte Kation ist Natrium, gefolgt von Calcium, Magnesium und Kalium.¹²⁶

7.2.6 Analyse des Salzspeichermörtels

Ein wichtiges Anliegen in Bezug auf die Salzgehalte im Gefüge des Steinernen Albums bzw. mit Hinblick auf die Schäden, die sich aus löslichen Salzen perspektivisch noch ergeben können, war zumindest eine stichprobenartige Untersuchung der Salzspeichermörtel. Dieses erfolgte an einer Probe, die aus einer Auskofferung westlich des Reliefs *Puttentanz* stammt. Es ging darum zu klären, ob der Salzspeichermörtel bereits seine Speicherkapazität erreicht hat oder ob er seiner ursprünglich angedachten Funktion, eben als Akkumulationsbereich von löslichen Salzen zu fungieren und damit die umgebenden gestalteten Flächen - Sandstein und Ergänzungsmörtel - zu entlasten, noch gerecht werden kann. Die Proben des Salzspeichermörtels wurden am IDK hinsichtlich ihrer Belastung im Tiefenprofil untersucht. Es wurde Bohrmehl im Tiefenprofil von 0-1, 1-2, 2-3 cm entnommen, das qualitativ und quantitativ auf Salze analysiert worden ist.¹²⁷ Darüber hinaus erfolgten REM-EDX-Analysen¹²⁸ im Profil senkrecht zur Oberfläche. Diese dienten der Untersuchung zur Einlagerung der Schadsalze in die Struktur des

¹²⁵ Löslichkeit (g/l) bei 20°C (Quelle: Salzwiki „Calciumsulfat und Gips“ (15.08.2017) abgerufen von <http://www.salzwiki.de/index.php/Gips>)

¹²⁶ Hübner, 2018, S. 59

¹²⁷ Die quantitative Ionenbestimmung erfolgte mittels HACH DR/2008 Direct Reading Spectrometer, Natrium HACH Sension 2.

¹²⁸ Die REM-EDX-Analysen erfolgten standartfrei mit einem EDX-System der Firma Bruker an einem REM JEOL JSM6510LV am Museum für Naturkunde Görlitz

Salzspeicherputzes.¹²⁹ In den Abbildungen 53 und 54 ist die Probe des Salzspeichermörtels gezeigt, aus der dann auch senkrecht zur Oberfläche die Untersuchungen ausgeführt worden sind.



Abb. 53: Probe des Salzspeichermörtels, Schnitt senkrecht zur Oberfläche

Abb. 54: Oberfläche des Salzspeichermörtels

Die Ergebnisse der Eluate der Bohrmehle zeigten eine Anreicherung von Schadsalzen im gesamten Querschnitt (siehe Tab. 1-3). Dabei ist eine deutliche Abnahme der Gehalte von der unteren Putzschicht (direkt auf der Natursteinoberfläche) zur Oberfläche hin zu verzeichnen. Diese Tendenz könnte zumindest anteilig auch mit einer Auswaschung der Salze in der oberen Anreicherungszone durch Niederschläge erklärt werden. Die Auswertung¹³⁰ ist in den Tabellen 1-3 dargestellt.¹³¹ Demnach können in Verbindung mit den ermittelten Kationen folgende Schadsalze vorliegen: Nitrat: Kaliumnitrat, Natriumnitrat; Chloride: Natriumchlorid; Sulfat: Natriumsulfathydrat, Magnesiumsulfathydrat, (Gips). Die Bildung von Mischsalzen ist ebenfalls möglich. Die Schadsalze wirken offensichtlich vor allem im Grenzbereich zur Natursteinoberfläche.

Tab. 1: Ergebnisse der Basisuntersuchungen

Probe	Tiefe [cm]	Lf ₂₅₀ [µS/cm]	pH [-]	Σ wasserlös. Bestandteile [Ma.-%]	Feuchte [Ma.-%]
SPO (Putz oben)	0-1 cm	261	7,51	1,2	-
SPM (Putz Mitte)	1-2 cm	211	8,54	0,91	-
SPU (Putz unten)	2-3 cm	269	7,32	2,61	-

Tab. 2: Ergebnisse der qualit. und quant. Salzanalysen an den Bohrmehlproben der verschiedenen Tiefen

Probe	Tiefe [cm]	Anteile an löslichen Ionen in Ma.-%						
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
SPO (Putz oben)	0-1 cm	0,02	0,030	0,028	0,461	0,13	0,09	0,17
SPM (Putz Mitte)	1-2 cm	0,22	0,016	0,007	0,065	0,38	0,01	0,11
SPU (Putz unten)	2-3 cm	0,08	0,055	0,156	0,309	0,40	0,34	1,03

¹²⁹ IDK Bericht HAL 60-2021

¹³⁰ nach WTA-Merkblättern E 3-13-01/D "Kompressenentsalzung" und WTA-Merkblatt 4-5-99/D "Mauerwerksdiagnostik"

¹³¹ IDK-Bericht HAL 60-2021

Tab. 3: Bewertung der Ergebnisse der qualit. und quant. Salzanalysen an den Bohrmehlproben nach WTA-Merkblatt 4-5-99/D „Mauerwerksdiagnostik

Probe	Tiefe [cm]	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
		WTA-Merkblatt E 3-13-01/D "Kompressenentsalzung"			WTA-Merkblatt 4-5-99/D "Mauerwerksdiagnostik"		
SPO (Putz oben)	0-1 cm	mittel	mittel	mittel	gering	gering	mittel
SPM (Putz Mitte)	1-2 cm	hoch	gering	mittel	gering	gering	mittel
SPU (Putz unten)	2-3 cm	hoch	extrem	extrem	gering	mittel	hoch

Eine Probe der unterliegenden Natursteinoberfläche wurde leider in dem Zusammenhang nicht mit beprobt. Der vorliegende Speicherputz weist einen großen Porenraum auf und enthält bis zu ca. 2 mm große helle Komponenten (siehe Abb. 55), bei denen es sich vermutlich um Bims handelt, die für eine Salzspeicherung und Gewichtsreduktion zugesetzt wurden.¹³²

Die REM-EDX-Analysen erfolgten mit einem sehr aufwendigen Verfahren, mittels Elementverteilungsmapping über den gesamten Querschnitt, in 11 Ausschnitten (inklusive Detailmapping) der Salzspeicherputzprobe. Das sehr aufwendige Elementverteilungsmapping über den gesamten Querschnitt der Probe kann für die mit der Methode nachweisbaren Elemente, die zuvor durch Bohrmehleluatuntersuchungen festgestellte An- und Kationenverteilung nicht bestätigen. Die Elementgehalte scheinen allerdings gleichmäßig verteilt. Die Methode ist bei dieser Fragestellung bekanntlich auch deutlich unterlegen. Der Porenraum der Bimskomponenten ist kaum stärker mit Ionen belegt als das restliche Gefüge um die Quarzzuschläge. Allein beim Natrium scheinen die Poreninnenseiten deutlicher mit Natrium ausgekleidet zu sein (siehe Abb. 56). Eine wirkliche „Füllung“ des Porenraums wurde in keinem Fall festgestellt.¹³³



Abb. 55: Salzspeicherputzprobe mit vermutlich Bimskomponenten, die für eine Salzspeicherung und Gewichtsreduktion zugesetzt wurden.

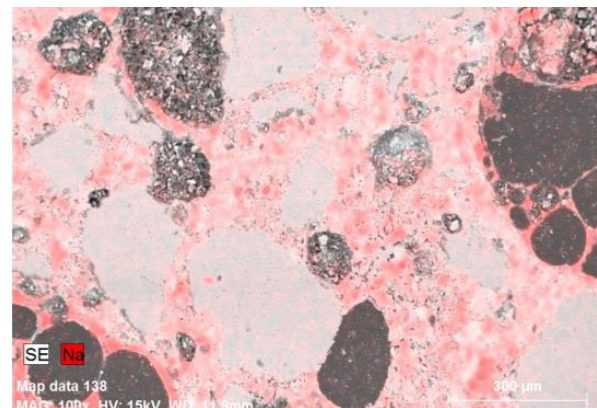


Abb. 56: Salzspeicherputzprobe, Natrium-Elementverteilungsmapping auf SE-Bild, Detail

Im Fazit schlussfolgerte das IDK auf der Grundlage dieser stichprobenartigen Untersuchung mit gebotener Vorsicht, dass die Salzspeichermörtel durchaus in dem Sinn ihrer Anwendung gewirkt haben und dieses auch weiterhin tun können, da der Porenraum nicht umfassend ausgefüllt ist. Sicherlich ist das in verschiedenen Bereichen auch unterschiedlich, aber es erlaubt eine erste Einschätzung. Die Salzspeichermörtel in den Auskofferungen auszutauschen o.ä. Gedanken, sind daher nicht haltbar.¹³⁴

¹³² IDK-Bericht HAL 60-2021

¹³³ ebd.

¹³⁴ auch bezüglich des enormen Aufwandes

7.2.7 Zusammenfassung zur vorliegenden Salzbelastung am Steinernen Album

Aus den im Projekt neugewonnenen Ergebnissen der Untersuchungen und dem Vergleich vorrangegangener Messungen lassen sich allgemeingültige Aussagen für das Steinernes Album formulieren. Dabei berücksichtigen die beschriebenen Ergebnisse elf der Reliefs des Steinernen Albums und bilden somit ein breites Untersuchungsspektrum der Salzbelastungen ab. Oftmals ergeben sich erst durch die Zusammenführung unterschiedlicher Messmethoden entsprechende Interpretationsmöglichkeiten, wie im Rahmen dieses Projekts deutlich wurde. So lassen sich die Ionenauszüge der Cellulose-Kompressen nur mit Hilfe der Ergebnisse aus der RDA richtig interpretieren. Selbst wenn es sich nicht um die gleichen Probestellen handelt, können vorhandene Ionen und auftretende Salze in Zusammenhang gebracht werden.

Zusammenfassend ist für die Salzbelastung am Steinernen Album festzuhalten, dass hauptsächlich flächig, ganz gleich in welcher Höhe, oberflächennah zumindest eine mittlere Gipsbelastung vorliegt. Dies wird durch alle Untersuchungsmethoden immer wieder bestätigt. Auch zeigen alle Untersuchungen, wie auch die Daten der Impedanz, dass am Steinernen Album lediglich die ersten Zentimeter eine gewisse Salzbelastung aufweisen. Dieser Umstand kann als ein weiteres Indiz gegen den in der Frühphase der naturwissenschaftlichen Auseinandersetzung mit dem Steinernen Album postulierten kontinuierlichen Salztransport aus größeren Tiefen gewertet werden. Die Beteiligung anderer Salze am Steinernen Album muss, wie die unterschiedlichen Ergebnisse zeigen, differenzierter betrachtet werden. Aus den Untersuchungen geht hervor, dass zum Teil Thenardit, Epsomit, Natriumnitrat und auch Syngenit auftreten können. Betrachtet man die Ergebnisse hinsichtlich der Magnesiumgehalte wird deutlich, dass dieses zwar immer eine Rolle spielt, aber sowohl die bestimmten Bohrmehlproben als auch die Cellulose-Kompressen, wenn überhaupt, dann nur eine geringe Belastung zeigten. Ein ganz anderes Bild vermittelten die Analysen der Jahre 2009 und 1997 zu den untersuchten Gipskrusten. In diesen sind auch sehr hohe Mengen an Magnesium ermittelt worden.¹³⁵

Vor dem Hintergrund dieser Beobachtung wird vermutet, dass es über die Zeit zu einer natürlichen Eluierung des Magnesiumsulfats gekommen ist. Zunächst kam es durch die anthropogen verursachten Umwandlungsvorgänge¹³⁶ in den dolomithaltigen¹³⁷ Gesteinsbereichen zur Bildung von Magnesiumsulfat und auch Gips. Durch Reinigungsmaßnahmen im Rahmen der Restaurierung in den 1990er Jahren und die dabei erfolgte Entfernung aufliegender Krusten konnte bereits ein Teil des Gipses und Magnesiumsulfates entfernt werden. Aber auch noch 2009 wurde $MgSO_4$ in relevanten Mengen detektiert. Seit der Installation der Rauchgasentschwefelungsanlagen Anfang der 1990er Jahre kam es eigentlich nicht mehr zur Umwandlung dolomithaltiger Bindemittelbestandteile, da die schwefelsaure Atmosphäre fehlte. Nach der Restaurierungskampagne 1998/99 haben über die Zeit eventuell durch Niederschläge hervorgerufene Ausspüleeffekte stattgefunden und zu einer immer weiteren Reduktion der leichtlöslichen Magnesiumsalze geführt. Heute lassen sie sich nur noch in wenigen Arealen in Anwesenheit anderer Salze nachweisen. Der schwerer lösliche Gips ist von den Spülvorgängen aufgrund seiner geringeren Löslichkeit erfahrungsgemäß nur marginal betroffen und stellt daher weiterhin ein ernstzunehmendes Problem für den Fortbestand der Reliefs dar.

Vereinzelte können am Steinernen Album darüber hinaus immer wieder zonierte Natriumnitrat- und Natriumsulfatbelastungen festgestellt werden. Besonders die Kompressenanalyse zeigte, dass Natrium an den belasteten Stellen eine größere Bedeutung hat, als es zuvor aus den Bohrmehlanalysen hervorging. Im Allgemeinen lassen sich diese Nitrate und Natrium in höherer Ausprägung in den höheren Bereichen der Reliefs detektieren und sind daher eventuell mit einer möglichen Düngung in Verbindung zu bringen.

¹³⁵ Hübner, 2018, S. 60

¹³⁶ Interaktion der schwefelsauren Atmosphäre mit dem CaMg-Karbonat

¹³⁷ $CaMg(CO_3)_2$

Ob entsprechendes stattfand oder stattfindet, war nicht verlässlich in Erfahrung zu bringen.¹³⁸ Die Effloreszenz-Probe (SA_An_ES) und auch die Kompressen-Probe 10_1 zeigten, dass allerdings auch in der Sockelzone mit höheren Natriumnitratwerten zu rechnen ist. Möglicherweise führt die benachbarte starke Klüftung zu ablaufenden Wässern aus dem Bereich der darüber liegenden Terrassenanlage und somit ebenfalls zu einer Beeinflussung dieser im Sockelbereich gelegenen Zone.¹³⁹ Neben den Nitraten konnten die Cellulose-Kompressen ebenfalls höhere Anteile von Chloriden der Oberfläche entziehen. Eine wichtige Erkenntnis aus der breit angelegten Untersuchung der Oberflächenbelastung ist, dass lediglich die beiden Reliefs *Noah der erste Weinbauer* und *Christus in der Kelter* eine hohe Salzbelastung aufweisen. Vor dem Hintergrund der Messergebnisse können darüber hinaus noch vier weitere Reliefs mit geringer Oberflächenbelastung in die Gruppe der belasteten Reliefdarstellungen aufgenommen werden. Es handelt sich dabei um die Reliefs *Herzog Christian*, *Puttentanz*, *Hochzeit zu Kana* und *Lots Berausung*. Auf Grundlage der analysierten Ausblühsalze ist auch für das Relief *Quellwunder* eine Oberflächenbelastung denkbar. Alle anderen Bildfelder sind hinsichtlich ihrer leichtlöslichen Salzbelastung nach dem derzeitigen Wissensstand als eher unbedenklich einzustufen.¹⁴⁰

Ursprünglich war im Rahmen des DBU-Vorhabens die Anlage von Musterflächen zur Salzreduktion vorgesehen, da leichtlösliche Salze (u.a. $MgSO_4$) durch ihre recht hohe Mobilität als wesentliche Schadensverursacher an den betroffenen Reliefs galten. Diese Musterflächen waren so geplant, dass die Kompressenmaterialien langfristig, als eine Art kurative Maßnahme, eine Salzreduktion ermöglichen und zeitgleich die Erkennbarkeit der Reliefs erhöhen. 2014 und 2015 war in diesem Sinne in Kooperation mit den Restauratoren des Landesamts für Denkmalpflege Sachsen-Anhalt am Relief *Josua und Kaleb* eine entsprechende Musterfläche angelegt worden. Die Masterarbeit von Benjamin Hübner sollte sich im Rahmen des hier beschriebenen DBU-Vorhabens mit der Anlage derartiger Musterflächen zur Salzreduzierung bei gleichzeitiger Optimierung der Ablesbarkeit der Reliefs (Fernwirkung) beschäftigen. Im Zuge dessen ergaben systematische Salzuntersuchungen, dass die leichtlöslichen Salze eigentlich für den Hauptanteil der Reliefs keine wesentliche Rolle mehr spielen (außer für die Reliefs *Christus in der Kelter* und *Noah der erste Weinbauer*). Aus diesem Grund gab es im DBU-Vorhaben auch eine inhaltliche Verschiebung hin zu den Schlämmen im Zusammenhang mit der Vergrämung des biogenen Bewuchses (siehe Kap. 7.3.3). Benjamin Hübner hielt dennoch am Thema seiner Masterarbeit fest, ist es zu Zeiten immer knapper werdender finanzieller Mittel in der Denkmalpflege für Objekte im festen Mauerwerksverbund oder eben im anstehenden Fels, wie beim Steinernen Album, durchaus eine Option, längerfristige Kompressenputze auf salzbelasteten Untergründen aufzubringen. Ein wesentlicher Aspekt in diesem Vorhaben war die möglichst geringe Mächtigkeit der Kompressen (bei gleichzeitiger Wirksamkeit), um darunterliegende reliefierte Darstellungen weiterhin ablesbar zu halten. Es sind in dem Zusammenhang bereits in der Konservierungs- und Restaurierungspraxis erfolgreich eingesetzte Rezepturen zum Einsatz gekommen, die im Rahmen der Masterarbeit hinsichtlich einer möglichst dünnen Auftragsstärke ("oberflächenfühlig") und geeigneter Applikationsmethoden untersucht worden sind.¹⁴¹ Auch wenn die Ergebnisse der Arbeit aus bereits beschriebenen Gründen am Steinernen Album nicht angewendet wurde, sind sie dennoch sehr gut und auch auf andere Objekte übertragbar. Auch hinsichtlich der Erstellung der Probekörper kann die Arbeit zur Konsultation nur empfohlen werden. Nachfolgend

¹³⁸ Der Einsatz des Unkrautvernichtungsmittels roundup© oberhalb der Reliefs und auch das Besprühen der Weinreben unterhalb der Reliefs (gegen Mehltau?) wurde allerdings im Rahmen einer Projektkampagne beobachtet.

¹³⁹ oder eventuell auch durch mit der Luft herangetragene Düngung bzw. Schädlingsbekämpfung

¹⁴⁰ Hübner, 2018, S. 59 ff.

¹⁴¹ Hübner, 2018

sollen an dieser Stelle aufgrund der wirklich sehr intensive und qualitätsvollen Auseinandersetzung von Benjamin Hübner zumindest die verwendeten Materialien beschrieben und das Fazit der Vergleichstudie zur Effektivität der ausgewählten Kompressen dargestellt werden.

Rezepturen der ausgewählten Kompressenauflagen

Konfektionsware Remmers Entsalzungskompreße (EKS 1070): Die Kompressenmischung von Remmers besteht aus Bentonit, Bimsgranulat, Cellulose und feinem Quarzsand.¹⁴² Die genauere Zusammensetzung ist nicht bekannt. Es fällt auf, dass rein aus der optischen Betrachtung der Trockenmischung die Cellulose einen deutlichen Anteil innerhalb der Mischung einnimmt. Es sind einzelne Flocken größerer Faserlängen erkennbar. Die Cellulose sorgt in der Kompreße, neben dem Bentonit, zusätzlich für die Verbesserung des Adsorptionsvermögens des Gesamtauftrages. Des Weiteren fungiert sie als Wasserreservoir, welches bei der Trocknung nur langsam Wasser abgibt.¹⁴³ Einer, durch das Bentonit aufkommenden Schrumpffneigung aufgrund schneller Trocknung, kann auf dieser Weise entgegengewirkt werden. Neben dem optischen Eindruck zeigten rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen an der Kompreße, dass die Anteile von Bentonit und Cellulose im Verhältnis zu den Zuschlagsstoffen (Quarzsand und Bimsgranulat) gering ausfallen.¹⁴⁴ Die Kompreße ist laut Julia Maitzschke aufgrund ihres hohen Anteils an Zuschlägen als stark abgemagert einzustufen. Die Kompreße ist frei von Zement- und Kalkbestandteilen. Die von Remmers angebotene Kompressenmischung hat einen grau-beigen Farbton. Die Schüttdichte liegt bei 1,4 kg/dm³. Der Wc -Wert, welcher das Verhältnis von Wassermenge zum Trockengewicht der Kompreße beschreibt, liegt für eine optimale Verarbeitbarkeit bei einem Wert von 0,3.¹⁴⁵ Aus früheren Untersuchungen lassen sich im Hinblick auf den Porenraum für die Kompreße von Remmers folgende Messergebnisse ableiten: Die offene Porosität liegt bei 41 Vol%, die Rohdichte liegt bei 1,64 g/cm³ und die Reindichte bei 2,77 g/cm³. Der gesamte Porenraum kann mit einer Oberfläche von 250 mm²/g angegeben werden. Die Porenverteilung liegt zwischen 10-100 µm, der Hauptanteil liegt dabei bei 70 µm. Der Median der damals getesteten Probe lag bei 50 µm.¹⁴⁶ Im Vergleich mit den am Steinernen Album ermittelten Werten ist festzuhalten, dass das Porenvolumen und auch die Porosität doppelt so groß sind, wie die des anstehenden Buntsandsteins. Der Median der Poren und die Reindichte des Baustoffes und des Natursteins liegen eng beieinander. Die Rohdichte der Kompreße ist nur halb so groß, wie die des geprüften Sandsteins. Innerhalb des durchgeführten Versuchs wurde die Entsalzungskompreße in zwei Auftragsschichten ausgeführt. In einer üblichen 15 mm mächtigen Schicht, sowie in einer dünneren 5mm dicken Schicht.

Konfektionsware: RCP Entsalzungskompreße (BA4+)

Die von RCP vorgemischte Sackware besteht aus einem Leichtfüllstoff, einem Feinsand, Bentonit (Montmorillonit >72%) und Cellulose. Die Kompreße ist, ebenfalls wie die der Firma Remmers, frei von Zement- und Kalkbestandteilen. Die Rezeptur verzichtet gänzlich auf hydrophob wirkende Zusätze, die Kompreße bleibt auf diese Weise kapillare- und diffusionsoffen. Die Grundmischung ist in ihrer Farbigkeit gelb-beige eingestellt, diese ist aber auf Wunsch an das anstehende Gestein anpassbar. Die dem technischen Merkblatt zu entnehmenden Werte der Baustoffeigenschaften zeigen, dass die Mischung mit einer hohen kapillaren Wasseraufnahme ausgestattet ist (>20 kg/m²*h^{0,5}). Die Schüttdichte liegt mit 0,65-0,8 kg/dm³ deutlich unter der Entsalzungskompreße von Remmers. Die im technischen Merkblatt

¹⁴² Maitzschke 2013

¹⁴³ ebd.

¹⁴⁴ ebd.

¹⁴⁵ ebd.

¹⁴⁶ ebd.

angegebene Porosität von 80 Vol% liegt damit im Vergleich zum Fertigprodukt von Remmers doppelt so hoch. Der Verbrauch mit 6-8 kg/m² pro 10 mm Schichtauftrag zeigt in der Gegenüberstellung zum Konkurrenzprodukt (14 kg/m²) die geringere Gewichtsbelastung, als auch den geringeren Materialverbrauch. Nähere Angaben zur Porenradialverteilung konnten in der Literatur zu diesem Produkt nicht gefunden werden. Innerhalb des Versuches wurde die Komresse in einer 15 mm mächtigen und ebenfalls in der dünneren 5mm dicken Schicht aufgetragen.

Eigenrezepturen: Bentonit

Die wesentlichen Bestandteile der eigen rezeptierten Bentonit-Kompressen sind neben dem sich aus der Bezeichnung ableitenden, verwendeten Tons vor allem Quarzsand, Leichtstoffzuschlag (Poraver®) und hydraulischer Kalk. Das verwendete Bentonit besteht hauptsächlich aus dem Mineral Montmorillonit (Smektitgruppe: Dreischicht-Silikat), zu geringen Anteilen liegen Begleitminerale wie Quarz, Feldspat und Glimmer vor. Der Anteil des Bentonits bestimmt maßgeblich den Effekt der Salzreduzierung. Durch die bis zu sechsfache Aufnahme an Wasser und der Eigenschaft der Ioneneinlagerung, wird das geforderte Absorptionsvermögen sowie die salzreduzierende Wirkungsweise gewährleistet. Als Zuschlagsstoff wurde ein Gemisch aus 50 Vol% feinen Farbsanden¹⁴⁷ (0-0,5 mm), 30 Vol% reinem Quarzsand (1-3 mm) und 20 Vol% des Leichtzuschlagsstoffes Poraver® (0,25-0,5 mm) verwendet. Das Größtkorn von 3 mm wurde aus Gründen der zum Teil am Steinernen Album sichtbaren großen Quarzkörner ausgewählt. Durch die Wahl des Größtkorns sollte eine steinimitierende Oberflächenstruktur der Komresse geschaffen werden. Zumal bei einem geringeren Größtkorn von 2 mm der Anteil des Quarzsandes mit seinen eckigen Körnern (obere Sieblinie) im Vergleich zu den rund ausgeformten Körnern des Farbsandes und des Leichtzuschlages in einem ungünstigen Verhältnis hinsichtlich der Stabilität stehen. Aus diesen Gründen war, neben der imitierenden Oberflächenstruktur, unter Einhaltung der Idealsieblinie nach Fuller ein Größtkorn von 3 mm sinnvoll, auch wenn die Korngröße sehr nah an der gewünschten Schichtdicke (5 mm) liegt. Die bereits angesprochenen Farbsande wurden hinsichtlich der Sieblinie extra für den unteren Korngrößenbereich von 0-0,5 mm gewählt. In diesem Bereich war der Effekt der Farbwirkung auf die gesamte Mischung als am größten zu erwarten. Die Farbsande wurden in die Kompressenmischung integriert, um der Anforderung der farblichen Anpassung an das Steinernes Album nachzukommen, ohne dabei zusätzlich Feinanteile durch Pigmente der Sieblinie hinzuzufügen. Dabei wurde für den Versuch eine einheitliche Mischung des Farbsandes von Feuerrot zu Ocker im Verhältnis 2:1 gewählt. Das sollte innerhalb des Versuches die Möglichkeit der Einfärbung mittels, in die Sieblinie integrierter Farbsande verdeutlichen. Gleichzeitig wurde die geringere Festigkeitsentwicklung aufgrund der sehr rund ausgestalteten Körner berücksichtigt. Die Farbabstimmung bedarf für das Steinernes Album sicherlich einer genaueren Farb Rezeptierung, welche aufgrund des vielseitigen Angebotes zu Farbsanden gut möglich sein dürfte. Der Bereich oberhalb von 0,5 mm wurde genutzt, um die Komresse hinsichtlich des Gewichtes weiter zu modifizieren. Damit die runden Blähglaskugeln (Poraver®) nicht zu sehr das Erscheinungsbild prägen, wurde der Kornbereich zwischen 0,25-0,5 mm gewählt. Neben der Modifizierung der Farbigkeit durch die Farbsande und der Gewichtsreduzierung mittels Blähglas, sollte durch die Zugabe eines hydraulischen Kalkes (Otterbein NHL 5) die Stabilität der Mischung über einen längeren Zeitraum ermöglicht werden. Der Anteil unterschied sich je nach Rezeptur zwischen 0,5-1 RT. Zur Orientierung der allgemeinen Zusammensetzung dienten die aus der Literatur entlehnten, als effektiv beschriebenen Mischungsverhältnisse. Neben der hohen Effektivität zeigte die Anwendung des Bindemittel-Zuschlags-Verhältnisses von 1:4 die geringste Schrumpfung.¹⁴⁸ Aufgrund des fehlenden Cellulose-Anteils (1:4:1) wurden Rezepturvarianten verschiedener Tongehalte (1,5:4 und 2:4) integriert,

¹⁴⁷ MAROTON „Feuerrot 2142“: „Ocker 2130“ (Vertrieb Treiser Sand Walter Rysse GmbH & Co. KG)

¹⁴⁸ Vergès-Belmin & Siedel, 2005

um die Effektivität weiter zu steigern. Die aufgetragene Schichtdicke liegt bei den verschiedenen Mischungen ebenfalls wieder bei 15 und 5 mm. Der hinzugefügte Wassergehalt schwankt je nach Rezeptur zwischen dem Wc -Wert von 0,2-0,3.

Eigenrezepturen: Sepiolith

Die auf Sepiolith basierenden Kompressenmischungen orientieren sich an den untersuchten Rezepturen der groß angelegten Versuchsreihe zur Salzreduzierung an den Deckengemälden der Würzburger Residenz.¹⁴⁹ Die Ergebnisse zeigten, dass die beste Effizienz bei einem Mischungsverhältnis von 1-2 RT Sepiolith, 1 RT Poraver® und 12 RT Quarzsand erzielt werden konnte. Diese Rezeptur wurde in Würzburg für den Innenraum konzipiert. Um die Komresse für den Einsatz am Steinernen Album witterungsbeständiger einzustellen, wurde diese mittels eines hydraulischen Kalks modifiziert (1,5 RT). Allgemein handelt es sich bei dem verwendeten Sepiolith um ein Magnesiumsilikat, welches strukturell durch kleine Bündel von kapillarförmigen Röhrchen geprägt ist.¹⁵⁰ Die Wirkungsweise ist mit anderen Tonmineralen vergleichbar. Im Falle des Zuschlages wurde analog zu den Bentonit-Rezepturen der Farbsand (0-0,5 mm) mit Quarzsand (0,5-3 mm) gemischt. Innerhalb der Mischung der Zuschlagstoffe wurde auf die Zugabe von Poraver®, aufgrund des schon im Grundrezept vorhandenen hohen Anteils (6 RT), verzichtet. Ersatzweise wurde innerhalb der Sieblinie auf einen handelsüblichen Quarzsand zurückgegriffen. Der Wc -Wert liegt bei den Sepiolith-Kompressen bei 0,27. Auch diese Mischungen wurden jeweils in 15 und 5 mm Stärke aufgetragen.

Weißkalkhydrat-Anstrich:

Neben den reinen Kompressen, wurde die Hälfte der aufgetragenen Fläche mit einem dispergierten Weißkalkhydrat-Anstrich versehen. Dieser sollte durch seine hohen Feinanteile die Saugspannung zusätzlich erhöhen. Neben der möglichen Verbesserung der Effizienz ist besonders im Außenbereich durch eine zusätzliche Schicht davon auszugehen, dass mit einem Anstrich die Dauerhaftigkeit der Kompressen deutlich verlängert werden kann. Im Fall einer direkten Beregnung sollte der Wassereintrag gemindert auf die Komresse einwirken. Zusätzlich ermöglicht der Anstrich eine Optimierung der Farbwirkung des Auftrags. Durch die Hinzugabe von Pigmenten¹⁵¹ kann dieser noch genauer an das Steinernes Album angepasst werden. Die Färbung der darunterliegenden Schicht ist trotz Anstrich wichtig. Sollte sich im Laufe der Zeit der Anstrich abbauen bzw. kleinere Fehlstellen entstehen, sind die ästhetischen Auswirkungen gering. Im Falle einer, durch längere Standzeit verursachte Beschädigung, stellt der Anstrich eine schnelle und günstig zu erneuernde Schutzschicht dar. Eine verwitterte Komresse wäre nur durch einen Austausch und Neuauftrag in Stand zu setzen und erneut mit größeren finanziellen Aufwendungen verbunden.

Fazit aus der Vergleichsstudie zur Effektivität der ausgewählten Kompressen¹⁵²

Der erstmalig erprobte Versuchsaufbau zur Versalzung der Buntsandsteine sowie der Nachstellung eines Kompressenauftrages innerhalb eines kapillaraktiven Systems, kann bezogen auf eine gleichmäßige Versalzung als positiv bewertet werden. Es konnte innerhalb von zehn Tagen, unter Bildung starker Salzausblühungen, eine hohe Oberflächenbelastung erzeugt werden. Der Aufbau ermöglichte es einen wenige Millimeter tiefen, gerichteten Verdunstungshorizont zu erzeugen. Die relativ simple gewählte

¹⁴⁹ Lenzner, 2009

¹⁵⁰ Technisches Merkblatt Sepiolith

¹⁵¹ Pigmentanteil liegt bei 3% (2,5% Umbra Ocker, 0,5% Englisch Rot)

¹⁵² Hübner, 2018, S. 123ff.

Abdichtung zeigt im Vergleich zu sonst üblichen Kunstharzanstrichen¹⁵³ eine wesentlich effizientere Versiegelung. Die Untersuchungen zur Aufnahmekapazität zeigten, dass alle aufgetragenen Kompressen dem Untergrund hohe Salzmengen entziehen und einlagern konnten. Besonders wichtig ist die Erkenntnis, dass auch dünnere Kompressenauflagen innerhalb von 30 Tagen übliche Salzmengen von über 700 g/m² einlagern konnten. Dabei zeigten die meisten Kompressen trotz einer dünnen Auftragsschicht und der extremen Salzbelastung nur geringfügige Strukturveränderungen. Ein zusätzlich aufgetragener Weißkalkhydrat-Anstrich führte in dem dargelegten Versuch zu keiner Steigerung der Salzeinlagerung. Die abgebundenen Anstriche zeigten eine zusätzliche Verlagerung des Feuchtehorizontes an die Oberfläche und eine verstärkte Effloreszenzbildung. Dieser Effekt reduziert den Einfluss von Subfloreszenzen und verbessert somit die Dauerhaftigkeit der darunterliegenden Kompressenauflage. Der für die Effizienz bestimmende Faktor innerhalb des Versuchsaufbaus wird durch den Einfluss der Feuchtigkeit bestimmt. Unklar bleibt, ob ein höherer Tongehalt oder mögliche hygroskopische Eigenschaften des Salzes diesen Faktor bestimmen. Ein weiteres sich aus der sehr starken Versalzung ergebende Resultat ist, dass die beschriebenen Sepiolith-Kompressen als einzige mit der extremen Feuchtigkeit zurechtkamen. Sie zeigten eine ausreichende Aushärtung unter zusätzlich guten reversiblen Eigenschaften. Im Allgemeinen zeigten die Sepiolith-Kompressen neben der ausreichenden Salzeinlagerung und den guten Performance-Eigenschaften ein geringes Eigengewicht. Ebenfalls konnte, im Gegensatz zu den Fertigprodukten, eine dem Stein nahekommende Oberfläche erzielt werden. Leider erwies sich die sepiolithgebundenen Kompressen in einem ersten Versuch als nicht maschinengängig. Neben den Eigenschaften der Salzreduzierung zeigten die Versuche, dass durch die Integration von Farbsanden (0-0,5 mm) in die Sieblinie der Zuschläge eine ausreichende Färbung erzielt werden konnte.

7.3. Umgang mit der biogenen Besiedelung

Ein großes Thema im Zusammenhang mit der Lesbarkeit und dem langfristigen Erhalt der Steinernen Albums ist der biogene Bewuchs, von dem einige Reliefs massiv betroffen sind. Um dieses Thema grundsätzlich für das Steinerne Album anzugehen, wurde im Rahmen des vorliegenden DBU-Projekts die Arbeitsgruppe von Frau Prof. Karin Petersen, HAWK Hildesheim beauftragt, die Vegetationsaufnahme der Flechtenflora durchzuführen. Frau Dr. Cornelia Gehrman-Janßen hat Entsprechendes im Juli 2018 durchgeführt.¹⁵⁴ In dem Zusammenhang wurde die Kartierung der Flechtenflora an den Reliefs *Fuchsjagd* und *Christus in der Kelter* exemplarisch ausgeführt. Biogener Bewuchs umfasst in diesem Zusammenhang über die Flechten hinaus auch Mikroorganismen wie z. B. Algen, Cyanobakterien und Pilze. Gesteinsbesiedelnde Flechten können erheblich zur Desintegration der Gesteinsoberflächen beitragen. Aus diesem Grund war es für die Erhaltung der betroffenen Reliefs relevant, einerseits den vorhandenen Bewuchs zu charakterisieren und dabei auch die Abhängigkeit der Besiedelung von dem Gestein und erfolgten Altmaßnahmen bzw. Umgebungsbedingungen zu bedenken, um diese Kenntnis eventuell im Zusammenhang mit der Vergrämung des Flechtenbewuchses zu berücksichtigen. Durch begleitende Bohrwiderstandsmessungen und eine optische Einschätzung wurde versucht, den Einfluss der verschiedenen Flechten auf die Gesteinsverwitterung zu bestimmen.

7.3.1 Flechten

Eine Flechte ist eine Lebensgemeinschaft (Symbiose) zwischen einer Alge (Phycobiont) und einem Pilz (Mycobiont). Überdies kann der Pilz auch mit einem Cyanobakterium vergesellschaftet sein, was

¹⁵³ Teilweise zeigen Anstriche mit Kunstharzen keine ausreichende Resistenz bei starker Salzbelastung. Es kann zur Bildung von Blasen und letztendlich zu einem Aufbrechen der Isolationsschicht kommen (Maitschke 2013).

¹⁵⁴ Gehrman-Janßen, 2018

allerdings nur selten anzutreffen ist. In der Flechte sind Pilz und Alge so eng miteinander assoziiert, dass sie eine morphologische und physiologische Einheit bilden. Weder der Pilz noch die Alge ist allein in der Lage, einen derartigen Vegetationskörper (Thallus oder Lager) aufzubauen.¹⁵⁵ Die Hyphen des Mycobionten bauen den Thallus auf und bestimmen auch weitgehend dessen Form. Es werden Strauchflechten, Blattflechten und Krustenflechten unterschieden. Die Flechtensymbiose stellt eine überaus erfolgreiche Lebensform dar. Über den physiologischen Bereich hinaus, zeigt sich dies insbesondere in der Anpassung an extreme Standorte. Hierbei wirken sich die ausgesprochene Kälte- und Trockenresistenz, ihr langsames Wachstum (jährliche Zuwachsraten der Krustenflechten, die auch jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen, zwischen 0,1 und 2 mm) und ihre Langlebigkeit besonders günstig aus und ermöglichen eine fast unbegrenzte Verbreitung. Flechten wachsen auf den unterschiedlichsten Substraten¹⁵⁶, so auch bevorzugt auf Gestein.

Wenn man sich mit der Vergrämung von Flechten beschäftigen möchte, wie es in diesem Projekt erfolgt ist, sind Kenntnis bezüglich der Lebensfaktoren der Flechten, biotischen und abiotischen, von großer Relevanz. Die meisten Flechten zeigen eine auffällige Substratspezifität. Daher werden drei ökologische Gruppen unterschieden: die Phyto-, Pedo- und Lithobionten. Der Terminus Lithobiont umfasst die Flechten, die auf (epi) oder im (endo) Gestein leben. Die Ansiedlung von Flechten auf Gestein wird von den den Standort charakterisierenden abiotischen und biotischen Faktoren beeinflusst. Zu den abiotischen Faktoren gehören: Wasser (Regen, Tau, Luftfeuchtigkeit), Licht, Temperatur, Exposition und der pH-Wert. Biotische Faktoren sind: Nährstoffanreicherung durch Vogelexkremente (Regelung des Stickstoffhaushalts), Beschattung durch Bäume und Sträucher und anthropogene Einflüsse (Industrieemissionen, Naturzerstörung). Darüber hinaus kommt bei der Gesteinsbesiedlung auch der Gesteins Härte, der Rauigkeit der Oberflächen, der Porosität (Wasseraufnahmekapazität) und der chemischen bzw. mineralogischen Zusammensetzung des Gesteins eine besondere Bedeutung zu. Die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Gesteine sind auch für deren Verwitterbarkeit ausschlaggebend. Beispielsweise ist ein poröser Sandstein mit schwacher Kornbindung verwitterungsanfälliger als ein Basalt, der sich durch höhere Gesteins Härte und geringere Porosität auszeichnet.¹⁵⁷ Zweifellos ist an Gesteinsoberflächen, die von Flechten besiedelt werden, mit einer Desintegration zu rechnen. Hierbei kommt den Krustenflechten gegenüber den Strauch- und Blattflechten eine größere Bedeutung zu. Strauch- und Blattflechten verfügen über Rhizinen (kompakte Hyphenstränge) an der Thallusunterseite, die zur Befestigung des Lagers an das Substrat dienen. Der Kontakt zur Unterlage erfolgt nur mittels dieser Anhangsorgane. Die Krustenflechten liegen hingegen dem Gestein mit ihrer ganzen Thallusunterseite an und sind fest mit ihm verwachsen. Pilzhyphen wirken als Festhalteorgane, indem sie mehr oder weniger in das Gestein eindringen. Die Eindringtiefe der Hyphen in das Gesteinsinnere (0,5 - 20 mm) ist abhängig von den physikalischen und chemischen Eigenschaften des Gesteins und der beteiligten Flechte.¹⁵⁸ Der biodeteriorative Effekt der Hyphenpenetration im Gesteinsinneren äußert sich in der Bildung von Gruben (Pits), Bohrkanälen sowie im mechanischen Aufspalten der Gesteinskomponenten. Infolge dieser Bohrkationen kommt es zur Vergrößerung der Mineral- und Gesteinsoberfläche und damit zu einer Vergrößerung der Porosität des Gesteins.¹⁵⁹

¹⁵⁵ Gehrmann-Janßen 2018, S. 4

¹⁵⁶ Gehrmann-Janßen 2018, S. 5

¹⁵⁷ Gehrmann-Janßen 2018, S. 5

¹⁵⁸ Gehrmann-Janßen 2018, S. 6

¹⁵⁹ ebd.

7.3.2 Vegetationsaufnahme der Flechtenflora am Steinernen Album

Am 26. und 27. Juli 2018 wurde an den Reliefs *Fuchsjagd* und *Christus in der Kelter*¹⁶⁰ durch Frau Dr. Gehrman-Janßen die Flechtenvegetation aufgenommen. Neben der Kartierung der Flechtenvegetation wurden in Einzelfällen Kratzproben von Flechten entnommen und mikroskopisch untersucht. Im Allgemeinen bilden die meisten Flechten sogenannte Flechtenstoffe, sekundäre Stoffwechselprodukte, die mit bestimmten Reagenzien (z.B. KOH) Farbreaktionen eingehen, die zur Identifizierung der Flechten dienen können. In dem Zusammenhang kamen die Reagenzien Kalilauge (KOH - Kaliumhydroxid), Natriumhypochloridlösung, para-Phenyldiamin, Jod-Lösung (Lugolsche Lösung) und Salpetersäure (HNO₃) zum Einsatz. Darüber hinaus wurden Kontaktpräparate mit Tesafilm entnommen, um ggf. auch solitäre Algen, Cyanobakterien und Pilze zu erfassen. Einige winzige Probestückchen wurden aus vom Relief *Christus in der Kelter* entnommen, um die Penetration der Hyphen in das Gestein mikroskopisch zu untersuchen. Zur Sichtbarmachung der Hyphen im Gestein wurden die Proben der Periodsäure-Schiff-Reaktion (PAS) unterworfen.¹⁶¹ Dabei handelt es sich um eine histochemische Reaktion zum Nachweis von Polysacchariden, neutralen Mucopolysacchariden, Muco- und Glycoproteinen, Glycolipiden, ungesättigten Fetten und Phospholipiden. PAS-positive Substanzen färben sich rosa bis rotviolett. Damit bietet die PAS-Reaktion eine Möglichkeit zur Visualisierung der Penetration von Pilzhypen in das Gestein.¹⁶²

Ergebnisse

Insgesamt sind zehn verschiedene Krustenflechten kartiert worden, deren Thallus aus einer Alge und einem Pilz zusammengesetzt ist. Darüber hinaus wurden Algen, Cyanobakterien und Pilze als solitäre Organismen beobachtet.¹⁶³

Folgende Krustenflechten wurden identifiziert:

Caloplaca albolutescens (Nyl.) H. Olivier

Morphologie: Thallus dick, weißlich, unregelmäßig wachsend, dunkelgraue Soredien, Apothecien anfangs mit einem weißlichen Thallusrand umgeben

Ökologie: Vorkommen hauptsächlich auf Sandstein, z. B. auf alten Weinbergmauern, fast gar nicht auf Mörtel.

Verbreitung: selten

Charakteristische Merkmale der Flechte zum Substrat und zum Standort: Flechte subneutrophytisch bis neutrophytisch (Substrat pH 5,7-7); Flechte mäßig bis ziemlich nitrophytisch (Substrat mäßig bis ziemlich eutrophiert bzw. mäßig bis ziemlich nährstoffreich); Flechte xerophytisch (Standort lufttrocken); Flechte ziemlich bis sehr photophytisch (Standort ziemlich bis sehr lichtreich)

Caloplaca citrina

Morphologie: Thallus gelb bis orange, dünn bis dick, Sorale begrenzt, hauptsächlich sich von den Areolenrändern her entwickelnd, alte Thalli oft völlig sorediös, Apothecien mäßig bis häufig, Scheibe orange, Rand gelblich, ganz oder sorediös.

Ökologie: Vorkommen auf Karbonatgestein, kalkhaltigem Kunststein, hohe Ammoniumtoleranz

Verbreitung: häufig

Charakteristische Merkmale der Flechte zum Substrat und zum Standort: Flechte subneutrophytisch bis basiphytisch (Substrat pH 6->8); Flechte ziemlich bis extrem nitrophytisch (Substrat ziemlich bis extrem eutrophiert bzw. ziemlich bis extrem nährstoffreich); Flechte mesophytisch bis xerophytisch (Standort

¹⁶⁰ nur die rechte Seite unterhalb des Reliefs

¹⁶¹ Gehrman-Janßen 2018, S. 8

¹⁶² ebd.

¹⁶³ Gehrman-Janßen 2018, S. 9ff.

mäßig luftfeucht bzw. mäßig lufttrocken); Flechte photoindifferent (Flechte mit weiter ökologischer Amplitude)

Caloplaca flavovirescens (Wulfen) Dalla Torre & Sarnth.

Morphologie: Thallus grüngelb, hellgelb, graugelb, areoliert, Apothecien mit orangebrauner Scheibe und gelbem Lagerrand

Ökologie: Vorkommen auf kalkhaltigem Substrat, insbesondere an vermörteltem Silikatgestein, an Mauern in Weinbergen, auf Mörtel

Verbreitung: verbreitet

Charakteristische Merkmale der Flechte zum Substrat und zum Standort: Flechte subneutrophytisch bis mäßig basiphytisch (Substrat pH 5,7-8,5); Flechte anitrophytisch bis mäßig bis ziemlich nitrophytisch (Substrat nicht eutrophiert bis mäßig bis ziemlich eutrophiert bzw. nichteutrophiert bis nährstoffreich); Flechte mäßig bis ziemlich photophytisch (Standort mäßig bis ziemlich lichtreich)

Caloplaca teicholyta (siehe Abb. 57) (Ach.) J. Steiner [C. arenaria auct.p.p., non (Pers.) Müll. Arg.

Morphologie: Thallus grau, oft weißlich bereift, dick, kreisrund, mit Randlappen, zentraler Bereich des Thallus blastidiat, oft steril

Ökologie: Vorkommen auf Mauern, Grabsteinen, auf vermauertem Naturstein (häufig Sandstein), auf Mörtel, Beton, Ziegel

Verbreitung: häufig

Charakteristische Merkmale der Flechte zum Substrat und zum Standort: Flechte subneutrophytisch bis neutrophytisch (Substrat pH 5,7-7); Flechte mäßig bis ziemlich nitrophytisch (Substrat mäßig bis ziemlich eutrophiert bzw. mäßig bis ziemlich nährstoffreich); Flechte xerophytisch (Standort lufttrocken); Flechte ziemlich bis sehr photophytisch (Standort ziemlich bis sehr lichtreich)



Abb. 57: Einige Thalli von *Caloplaca teicholyta* auf dem Relief *Fuchsjagd*



Abb. 58: *Candelariella aurella* auf dem Relief *Fuchsjagd*

Candelariella aurella (siehe Abb. 58) (Hoffm.) Zahlbr. [C. heidelbergensis (Nyl.) Poelt]

Morphologie: Thallus variabel, mehr oder weniger gelb, körnig oder areoliert, oder fast fehlend, Apothecien flach bis leicht gewölbt, deutlich berandet, zahlreich, oft gedrängt, Scheitel dottergelb, gelb, olivgelb, oliv

Ökologie: Vorkommen auf kalkreichem bis schwach kalkhaltigem Gestein, oft auf Mörtel und kalkhaltigem Kunststein, auch auf kalkstaubimprägniertem Holz, häufig auch an Mauern, an nährstoffreichen Standorten vom Tiefland bis in die alpine Stufe

Verbreitung: weltweit

Charakteristische Merkmale der Flechte zum Substrat und zum Standort: Flechte basiphytisch (Substrat pH > 8) - Flechte anitrophytisch (Substrat nicht eutrophiert) bis mäßig bis ziemlich nitrophytisch (Substrat mäßig bis ziemlich eutrophiert bzw. mäßig bis ziemlich nährstoffreich); Flechte xerophytisch (Standort lufttrocken); Flechte mäßig bis sehr photophytisch (Standort mäßig bis sehr lichtreich)

Circinaria caesiocinerea (siehe Abb. 59) (Nyl. ex Malbr.) A. Nordin, S. Savic & Tibell [Aspicilia c. (Malbr.) Arnold]

Morphologie: Thallus rissig bis warzig areoliert, dunkelgrau bis hellgrau, grauweiß, zuweilen auch braun, Apothecien zahlreich, eingesenkt, mit dünnem Thallusrand, schwarz

Ökologie: auf Silikatgestein, vorwiegend an Horizontal- und Schrägflächen

Verbreitung: selten

Charakteristische Merkmale der Flechte zum Substrat und zum Standort: Flechte subneutrophytisch (Substrat pH 5,7-7) bis mäßig bis ziemlich acidophytisch (Substrat pH 4,9-5,6 bis pH 4,1-4,8); Flechte anitrophytisch bis mäßig bis sehr nitrophytisch (Substrat nicht eutrophiert bis mäßig eutrophiert bis stark eutrophiert bzw. mäßig bis sehr nährstoffreich); Flechte mäßig bis sehr photophytisch (Standort mäßig lichtreich bis sehr lichtreich)



Abb. 59: *Circinaria caesiocinerea* auf dem Relief *Christus in der Kelter*



Abb. 60: *Lecanora albescens* auf dem Relief *Fuchsjagd*

Lecanora albescens (siehe Abb. 60) (Hoffm.) Branth & Rostr. (*L. galactina* Ach.)

Morphologie: Thallus mäßig bis ziemlich dick, oft rundlich-rosettig, deutlich begrenzt, mitunter angedeutet gelappt, areoliert bis rissig areoliert, Areolen flach bis hochgewölbt, weißgrau bis weiß, gelblichweiß, oft bereift. Apothecien dicht gedrängt, sitzend bis etwas eingesenkt, gelbbraun, schmutzig hellbraun, olivbraun, rosa, grau, grünlich, oft leicht bereift, meist mit ungekerbten Rand

Ökologie: auf mäßig bis sehr kalkreichem Gestein, staubverkrustetem Silikatgestein und Kunststein (auch auf bearbeitetem Holz), Schwerpunkt auf anthropogenen Substraten (Mauern, Gräber, Zäune usw.), besonders an Mörtel, vermauerten Steinen, staubverkrustetem Beton, Asbestzement, neben *Caloplaca*

Themenbereiche des optimierten Pflegeplans

citrina und *Caloplaca decipiens* düngungstoleranteste Art, an naturnahen Standorten bevorzugt an regengeschützten bis mäßig beregneten Überhängen und Vertikalflächen

Verbreitung: häufig

Charakteristische Merkmale der Flechte zum Substrat und zum Standort: Flechte subneutrophytisch bis basiphytisch (Substrat pH 6->8); Flechte ziemlich bis extrem nitrophytisch (Substrat ziemlich bis extrem eutrophiert bzw. nährstoffreich); Flechte xerophytisch bis mesophytisch (Standort lufttrocken bis luftfeucht); Flechte photoindifferent (Flechte mit weiter ökologischer Amplitude)

Lecanora muralis (siehe Abb. 61) (Schreb.) Rabenh. [*L. saxicola* (Pollich) Ach., *Protoparmeliopsis* m. (Schreb.) M. Choisy, *Placodium* s. (Pollich) Körb.]

Morphologie: Thallus rosettig, mit verlängerten, gelappten Randareolen, Lappen grünlich, grünweiß, gelblich bis graugrün, Apothecien zahlreich, grünlich, hell bis dunkelbraun, mit Lagerrand

Ökologie: auf anthropogenen Substraten, Beton, Asphalt, kalkfreies Silikatgestein, an Schräg- und Horizontalflächen

Verbreitung: weit verbreitet

Charakteristische Merkmale der Flechte zum Substrat und zum Standort: Flechte subneutrophytisch bis basiphytisch (Substrat pH 6->8); Flechte mäßig bis ziemlich bis sehr nitrophytisch (Substrat mäßig bis ziemlich bis sehr eutrophiert bzw. nährstoffreich); Flechte xerophytisch bis mesophytisch (Standort lufttrocken bis luftfeucht); Flechte mäßig bis sehr photophytisch (Standort mäßig bis sehr lichtreich)



Abb. 61: *Lecanora muralis* auf dem Relief *Fuchsjagd*



Abb. 62: *Lecidella stigmatea* auf dem Relief *Fuchsjagd*

Lecidella stigmatea (siehe Abb. 62) (Ach.) Hertel & Leuckert [*Lecidea* s. Ach., *Lecidea vulgata* Zahlbr.]

Morphologie: Thallus weißlich bis schmutzig graugrün, schwärzlich rostrot bis braun, areoliert bis körnig, Apothecien flach bis konvex, schwärzlich

Ökologie: Flechte kommt unter sehr verschiedenen Standortsbedingungen vor, auf Karbonatgestein, auf basischem Silikatgestein, Sandstein, Kalkstein, auf anthropogenen Substraten

Verbreitung: häufig

Charakteristische Merkmale der Flechte zum Substrat und zum Standort: Flechte subneutrophytisch bis basiphytisch (Substrat pH 6->8); Flechte mäßig bis sehr nitrophytisch (Substrat mäßig bis sehr eutrophiert bzw. nährstoffreich); Flechte ombrophytisch (Substrat beregnet); Flechte ziemlich bis sehr photophytisch (Standort ziemlich bis sehr lichtreich)

Verrucaria nigrescens Pers. (siehe Abb. 63)

Morphologie: Thallus hell- bis dunkelbraun, schwarzbraun, rotbraun, ockerbraun, feucht grünstichig, rissig areoliert, Oberfläche der Areolen glatt, Areolen polygonal, 0,2 - 1mm. Perithecium bei dünnen Thalli halb, bei dicken ganz eingesenkt

Ökologie: sehr euryöke Art (unter sehr verschieden Standortsbedingungen vorkommend, mit breitem Standortsbereich), auf Karbonatgestein aller Art, auf Mörtel, Beton, Ziegel, Asbestzement etc., auf kalkimprägniertem oder kalkhaltigem Silikatgestein

Verbreitung: häufig

Charakteristische Merkmale der Flechte zum Substrat und zum Standort: Flechte neutrophytisch - basiphytisch (Substrat pH 5->8); Flechte ziemlich bis sehr nitrophytisch (ziemlich bis sehr eutrophiert bzw. ziemlich bis sehr nährstoffreich); Flechte xerophytisch bis mesophytisch (Standort lufttrocken bis mäßig luftfeucht bis mäßig lufttrocken); Flechte ziemlich photoindifferent (weite ökologische Amplitude) optimal an ziemlich bis sehr lichtreichen Orte



Abb. 63: Verrucaria nigrescens auf dem Relief *Fuchsjagd*

Wie aus den detaillierten Beschreibungen der kartierten Flechten deutlich wird, repräsentieren diese, typisch für Krustenflechten, einen relativ weiten pH-Wert Bereich, zwischen 5,7-7 (siehe Tab. 4)¹⁶⁴. Sie besiedeln demnach subneutrale bis neutrale Substrate.

Tab. 4: Übersicht über den schwerpunktartig besiedelten pH-Wertbereich der kartierten Flechten

Flechten	pH-Wert Bereich
Caloplaca albolutescens	5,7 - 7
Caloplaca citrina	5,7 - > 7
Caloplaca flavovirescens	5,7 – 8,5
Caloplaca teicholyta	5,7 – 7
Candelariella aurella	> 8
Circinaria caesiocinerea	4,1 - 5,6 und 5,7 - 7
Lecanora albescens	7 - > 7
Lecanora muralis	5,7 - > 7
Lecidella stigmatea	5,7 - > 7
Verrucaria nigrescens	5 - > 8

Candelariella aurella bevorzugt zwar ausnahmsweise eher basische Substrate und findet sich daher auch auf Mörteln. Die eher acidophytische Circinaria caesiocinerea dominiert am Relief *Christus in der Kelter*

¹⁶⁴ Gehrmann-Janßen 2018, S. 21

im kartierten unteren rechten Bereich, der nur z. T. dem restauratorischen Maßnahmenkatalog unterlag, so dass hier die mehr für den Buntsandstein typischen „acidophytischen“ Verhältnisse vorliegen. Aus den Ergebnissen waren insgesamt keine besonderen Spezifika für die massive biogene Besiedelung mancher Reliefs des Steinernen Albums abzuleiten.

Detailbetrachtung des Reliefs *Fuchsjagd*

Dieses Relief ist mit der Oberkante zum Hang geneigt und nach Süden exponiert. Bei der Betrachtung der Abbildung 64 fallen sofort die Thalli von *Lecanora muralis* ins Auge. Diese Krustenflechte überwächst großflächig die Oberfläche des Reliefs und dominiert somit alle anderen kartierten Flechten. Makroskopisch augenfällig sind auch die gelben Krustenflechten *Candelariella aurella* und *Caloplaca citrina* sowie die schwarz/braune *Verrucaria nigrescens*. Die rosettig wachsende Flechte *Caloplaca teicholyta* ist ebenso nicht zu übersehen.¹⁶⁵ Alle anderen am Steinernen Album insgesamt nachgewiesenen Flechten kommen nur vereinzelt vor.



Abb. 64: Ausschnitt aus der rechten Hälfte des Reliefs *Fuchsjagd*

Überdies ist auch ein dunkel gefärbter Biofilm, der sich im Wesentlichen aus Algen, Cyanobakterien und Pilzen zusammensetzt, und der die Gesteinsoberfläche stellenweise, zuweilen auch großflächig, krustenartig überzieht (siehe Abb. 64), nicht zu übersehen.¹⁶⁶ Die mikroskopische Untersuchungen dieser schwarzen Bereiche, die an den entnommenen Kontaktpräparate erfolgten, visualisieren einen Biofilm mit einer eindeutige Dominanz coccaler und fädiger Cyanobakterien (siehe Abb. 65). Coccale Grünalgen sowie schwarze Hefen, *Alternaria* sp., *Cladosporium* sp. und sterile Hyphen können nur vereinzelt beobachtet werden.¹⁶⁷

¹⁶⁵ Gehrmann-Janßen 2018, S. 23

¹⁶⁶ Gehrmann-Janßen 2018, S. 23

¹⁶⁷ Gehrmann-Janßen 2018, S. 32

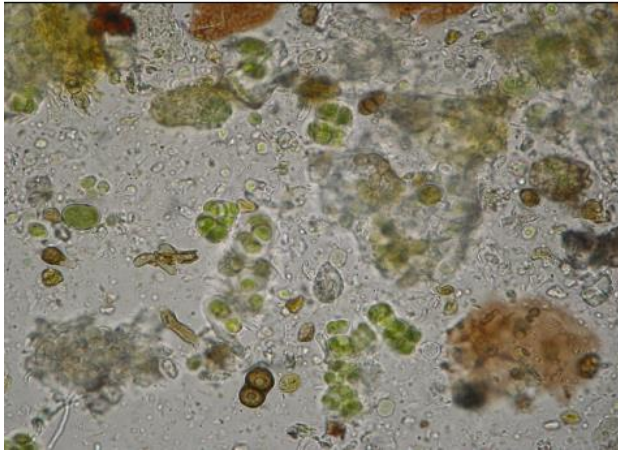


Abb. 65: Relief *Fuchsjagd* Dominanz coccaler Cyanobakterien (grün)

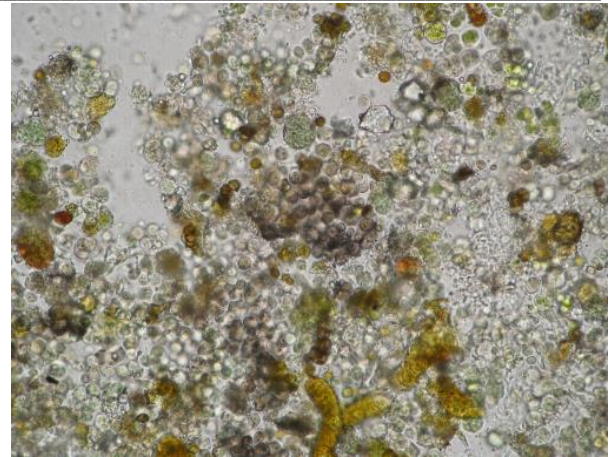


Abb. 66: Relief *Christus in der Kelter* Dominanz coccaler (blauschwarze Haufen) und fädiger Cyanobakterien (unten Mitte)

Detailbetrachtung des Reliefs *Christus in der Kelter*

Der näher betrachtete Teil dieses Relief ist südostexponiert und nicht im gleichen Maße wie die *Fuchsjagd* mit der Oberkante zum Hang geneigt (siehe Abb. 67). Im Bereich, der in Abbildung 68 im Detail zu sehen ist, wurden vier siedelnde Krustenflächen identifiziert, weniger als an der *Fuchsjagd* (*Caloplaca albolutescens* *Caloplaca flavovirescens* *Circinaria caesiocinerea* *Lecanora muralis*).¹⁶⁸



Abb. 67: Relief *Christus in der Kelter*, östlicher Bereich. Der Pfeil markiert den Bereich unter den bildhauerischen Arbeiten, der mit Hinblick auf die Vegetationskartierung großflächig näher betrachtet worden ist (siehe Abb. 68).



Abb. 68: Kartierter Bereich (nicht das markierte Feld) unterhalb des Reliefs *Christus in der Kelter*

Augenfällig sind in den Abbildungen 67 und 68 die z. T. ausgedehnten weißlich-grauen Thalli von *Circinaria caesiocinerea*, die die Gesteinsoberfläche überziehen. Nicht zu übersehen sind auch die grünliche *Lecanora muralis* und die gelbe *Caloplaca flavovirescens*. Auch hier sind die Flechten fest mit der Gesteinsoberfläche verbunden.

Die Abbildungen 65 und 66 zeigen für beide detailliert betrachteten Reliefs eine Dominanz coccaler und fädiger Cyanobakterien. Die Cyanobakterien sind in erster Linie für die dunkel gefärbten Gesteinsober-

¹⁶⁸ Gehrman-Janßen 2018, S. 25

flächen auf den von ihnen besiedelten Bereichen verantwortlich. Da sie so dominant auftreten, kann ihnen demzufolge ein Einfluss auf die Desintegration der Gesteinsoberfläche zugesprochen werden. Hierbei ist vor allem die physikalisch-mechanische Komponente wirksam. Die vorwiegend kohlenhydratreichen Schleime der Cyanobakterien, denen ein hydrophiler Charakter zugeschrieben werden kann, können auf das Gestein einen „mechanisch trennenden“ Einfluss ausüben.¹⁶⁹ Wasseraufnahme und Wasserabgabe führen zu Zugspannungen, Gesteinspartikel können in Folge herausgerissen werden. Der mechanische Zerfall des Gesteins hat zur Folge, dass sich die Porosität und somit die kapillare Wasseraufnahme erhöht. Die Desintegration des Gesteins schreitet fort.

Die auf den untersuchten Flächen des Steinernen Albums ebenso vorkommenden Algen und Pilze treten zur Zeit der Probennahme (Hochsommer) nur partiell in Erscheinung. Ändern sich die mikroklimatischen Bedingungen zu Gunsten der Mikroorganismen (z. B. Erhöhung der Luftfeuchtigkeit), können sich Algen und Pilze rasch vermehren.¹⁷⁰

Perjodsäure – Schiff – Reaktion

Alle kartierten Flechten gehören zur großen Gruppe der epilithischen Krustenflechten, d. h. sie wachsen auf der Gesteinsoberfläche. Charakteristisch für die Krustenflechten ist, dass dem Thallus die untere Rinde fehlt, so dass die Markhyphen in das Gestein eindringen und so die Flechte verankern.¹⁷¹ In Abhängigkeit von den physikalischen und chemischen Eigenschaften des Gesteins, dessen Verwitterungszustand und der beteiligten Flechte penetrieren die Pilzhyphe mehr oder weniger das Innere des Gesteins. Bei dem vorliegenden Buntsandstein erfolgt das Durchdringen des Gesteins über Porenräume, Spalten und Rissen. Mittels der Perjodsäure-Schiff-Reaktion konnte dieses Phänomen gut dokumentiert werden. Die Mikroskopie zeigt anhand der angefärbten Gesteinsproben ein ausgedehntes Hyphengeflecht im Inneren des Gesteins. In der oberen Schicht des Buntsandsteins, hier in 2mm Tiefe, scheint die Kornbindung nur noch sehr schwach zu sein, so dass Hyphenbündel oder Einzelhyphen den Porenraum durchziehen (siehe Abb. 69 und 70).

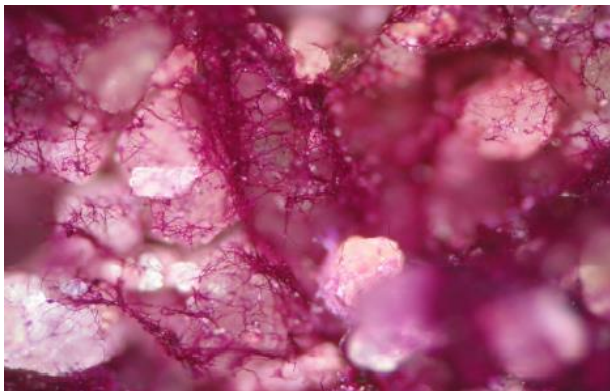


Abb. 69: *Lecanora muralis*, Hyphen (\varnothing 2-5 μ m) des Pilzes an der Unterseite in 2mm Gesteinstiefe, Relief *Fuchsjagd* (PAS, 200fach)



Abb. 70: *Circinaria caesiocinerea*, Längsseite, Hyphen (\varnothing 2-5 μ m) schlingen sich um Minerale, Relief *Christus in der Kelter*, rechte untere Reliefhälfte (PAS, 200fach)

Anhand der PAS - Reaktion konnte sehr klar visualisiert werden, dass die Pilzhyphe der Flechten in das Gesteinsinnere vorgedrungen sind.¹⁷² Die Wirkungsmechanismen, die hierbei zum Tragen kommen,

¹⁶⁹ Gehrman-Janßen 2018, S. 34

¹⁷⁰ ebd.

¹⁷¹ Gehrman-Janßen 2018, S. 26

¹⁷² Gehrman-Janßen 2018, S. 30

werden wesentlich durch die physikalisch-mechanischen und chemischen Aktivitäten des Flechtenthallus bestimmt. Charakteristisch für den biogeophysikalisch-mechanischen Prozess ist die Kontraktion und Expansion des Thallus und das Durchdringen des Gesteins mit Pilzhyphen.¹⁷³ Flechten gehören zu den sogenannten poikilohydrischen Organismen (wechselfeuchte Pflanzen). Diese Organismen können die Aufnahme und Abgabe von Wasser nicht aktiv regulieren. Ihr Wassergehalt richtet sich nach den Feuchtigkeitsverhältnissen in der Umgebung. Aufgrund ihres poikilohydrischen Charakters ist der Flechtenthallus fortwährend Wassergehaltsschwankungen ausgesetzt. Die ständig alternierenden Kontraktionen und Expansionen führen zu Zugspannungen im Thallus. Diese Prozesse, die zugleich in einem Zusammenhang mit den mikroklimatischen Bedingungen stehen, führen zusammen mit biogeochemischen Reaktionen zu einer Desintegration der von den Flechten besiedelten Gesteinspartien.¹⁷⁴ Darüber hinaus sind auch die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Gesteine für deren Verwitterbarkeit ausschlaggebend. Eine Bedeutung haben auch die von den Mycobionten (Pilzpartner) produzierten Schleime. Diese Schleime (Biokolloide) können bei Austrocknung hohe Adhäsionskräfte entwickeln, die zur Reduktion der Kohäsion und Adhäsion zwischen den strukturellen Komponenten des Gesteins führen können, so dass Gesteinspartikel herausgerissen werden können. Überdies sind viele dieser Schleime „aggressiv und oberflächenaktiv“.¹⁷⁵ Für den biogeochemischen Prozess ist vor allem die Ausscheidung bestimmter primärer und sekundärer Stoffwechselprodukte der Flechten entscheidend. Etliche Verbindungen des Citronensäurezyklus (primäre Stoffe) konnten in Flechten nachgewiesen werden, denen ein wesentlicher Anteil an den Verwitterungsprozessen zugesprochen wird, z. B. Oxalsäure und Citronensäure. Zudem synthetisieren Flechten eine Vielzahl sekundärer Stoffwechselprodukte, die sogenannten Flechtensubstanzen, von denen einige ebenso am Verwitterungsprozess beteiligt sind. Eine besondere Bedeutung kommt der Oxalsäure zu, die häufig quantitativ gegenüber den anderen produzierten Säuren dominiert und schon lange als ein wirksames Verwitterungsmittel gilt.¹⁷⁶ Oxalsäure gehört zu den starken Säuren und ist aufgrund der Molekülstruktur ein starker Komplexbildner bzw. Chelator. Die Chelatisierung mit Metallkationen, z. B. Ca-Ionen führt zur Bildung von schwerlöslichen Calciumoxalaten, die extra- oder intrazellulär im Flechtenthallus abgelagert werden.¹⁷⁷ Wie bereits erwähnt, kommt den Krustenflechten mit Hinblick auf diese Ausführungen eine besondere Bedeutung bei der Gesteinsdesintegration zu. Auf Sandsteinen, je nach physikalischer und chemischer Beschaffenheit, kommt für den Verwitterungsprozess insbesondere die physikalisch-mechanische Verwitterungskomponente zum Tragen, indem die von den Flechten verursachten Zugspannungen und die produzierten Schleime am bedeutsamsten sind.¹⁷⁸ Überdies wird auch die Möglichkeit eines Schutzes durch Flechtenthalli diskutiert. Einzelbeobachtungen lassen den Schluss zu, dass Flechten auch als Schutzkrusten wirken können, wodurch weitreichende Verwitterungsabläufe verlangsamt oder gehemmt werden. Die Gesteinsverwitterung, ein Stoffaustausch zwischen der Lithosphäre und Atmosphäre (Hydrosphäre), ist letztlich durch physikalische, chemische und biologische Prozesse definiert. Dieser Biodeteriorationsvorgang kann verlangsamt werden oder zum Stillstand kommen, wenn es zwischen beiden Systemen zu einem Gleichgewicht kommt. In diesem Fall kann ein dichter Flechtenbewuchs den Substanzschwund bzw. ein Absanden der Gesteinsoberfläche hemmen und physikalische und chemische Verwitterungsabläufe, wie große Temperaturschwankungen und Angriffe von Atmosphärien, mindern.¹⁷⁹

¹⁷³ ebd.

¹⁷⁴ ebd.

¹⁷⁵ ebd.

¹⁷⁶ Gehrman-Janßen 2018, S. 30

¹⁷⁷ Gehrman-Janßen 2018, S. 31

¹⁷⁸ ebd.

¹⁷⁹ Gehrman-Janßen, 1995

7.3.3 Maßnahmen zum Umgang mit der massiven Flechtenbesiedelung

An dieser Stelle setzen die Überlegungen zum perspektivischen Umgang mit den massiven Flechtenbesiedelungen an den Reliefs *Fuchsjagd*, *Puttentanz* (*Harfenspieler David*), *Christus in der Kelter*, *Arbeiter im Weinberg*, *Josua und Kaleb* sowie das flach ausgearbeitete Relief *Moses im Gelobten Land* (siehe Anhang S. 1-7) an. In den Abbildungen 71 und 72 ist gezeigt, wie man ohne Weiteres Kanülen oder sogar ein Skalpell in den mit Flechten besiedelten Untergrund stecken kann und diese dann stehen bleiben.



Abb. 71 und 72: Das Gestein unterhalb des Flechtenbewuchs ist vermutlich durch die Aktivität der Hyphen bereits sehr stark entfestigt. Skalpell (71) und Kanüle (72) sind leicht einzustecken.

Im Rahmen der Reinigungsmaßnahmen an den Musterflächen und auch aus beispielhaften Bohrwiderstandsmessungen (siehe Abb. 73 und 74) wurde deutlich, dass der Flechtenbewuchs an den betroffenen Reliefs bereits zu einer starken Entfestigung des unterliegenden Gesteins geführt hat.

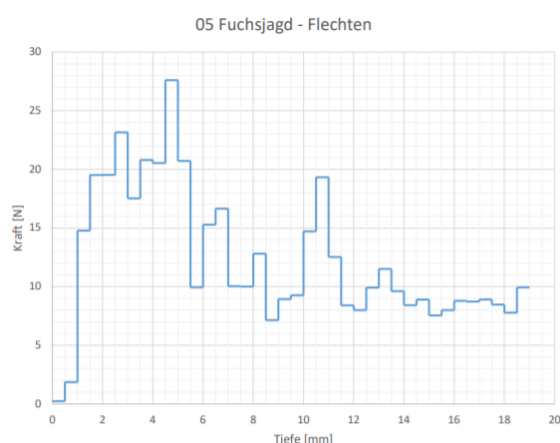


Abb. 73: Bohrwiderstandsmessung zur Charakterisierung des Einflusses der Flechten auf den Untergrund, Messfläche 05, Relief *Fuchsjagd*

Im Diagramm der Abbildung 73 ist in den vorderen 5 mm im Vergleich zu tieferen Bereichen zwar insgesamt eine höhere Festigkeit (Kombination des Flechtenbewuchses und Vergipsung) detektiert worden, allerdings schwankt die Festigkeit sehr, was einen deutlich disintegriertes Material widerspiegelt. Dieser Schwankungsbereich reicht bis in eine Tiefe von 1,1 cm. Bis in diesen Bereich ist erfahrungsgemäß auch maximal mit der Hyphenaktivität zu rechnen. Hin zu größeren Tiefen liegt der Bohrwiderstand ziemlich einheitlich bei ca. 10 N.



Abb. 74: Bohrwiderstandsmessung zur Charakterisierung des Einflusses der Flechten auf den Untergrund, Messfläche 06, Relief *Christus in der Kelter*

Die Bohrwiderstandsmessung in Abbildung 74 spiegelt ebenfalls schwankende Festigkeiten einer biogen besiedelten Fläche wider. Die maximalen Festigkeiten sind an dieser Messstelle weniger als halb so hoch wie im Relief *Fuchsjagd* (siehe Abb. 73). Die entfestigte oberflächennahe Zone reicht bis in 2 mm Tiefe.¹⁸⁰ Während der unterschiedlich intensiven Reinigungsmaßnahmen (s.u.), bei denen z.T. sandende Kornlagen abgetragen worden sind, kam selbstverständlich auch die Überlegung auf, den Bewuchs zu belassen, da eine intensive Reinigung eben mit Materialverlusten einhergehen kann, die durch die Bioaktivität vielleicht erst nach langer Zeit erreicht werden würden. Dennoch sollte im Rahmen des vorliegenden DBU-Vorhabens der Fragen nach Möglichkeiten der Einschränkung einer biogenen Besiedelung, noch dazu unter den vorliegenden extremen Bedingungen, nachgegangen werden. Der unwägbare zerstörerische Einfluss von Flechten und auch die starke optische Einschränkung, die insbesondere in der „Vitalphase“ der Flechten mit grellen bunten Kreisen am Steinernen Album extrem sein kann, unterstützt diese Ausrichtung des Projekts in Richtung der Möglichkeiten der Vergrämung des biogenen Bewuchses. Die spezielle Situation der Reliefs, die ca. 50-60 Meter vom unten vorbeiführenden Radweg entfernt sind, erfordert eigentlich eine gute Erkennbarkeit. In dem Zusammenhang sollten zum einen verschiedene Reinigungsmaßnahmen auf ihre Eignung geprüft, Flechtenbewuchs zu reduzieren. Darüber hinaus war die Bewertung der Effektivität der Reinigung im Zusammenhang mit der nachträglichen Applikation unterschiedlicher Schutzschlämmen von großem Interesse.

Das Maßnahmenkonzept sah den Auftrag von Schlämflächen vor, die zumindest teilweise reaktiv eingestellt sind bzw. andererseits eine Vergrämung durch die Einschränkung der Lebensgrundlagen Licht zur Photosynthese und Feuchtigkeit eben durch Abdeckung der besiedelten Flächen mit einer Schlämme erwirken. Durch die farbliche Vereinheitlichung der Oberflächen im Zuge des Schlämmauftrags, verbessert sich erfahrungsgemäß die Ablesbarkeit der Reliefs, insbesondere mit Hinblick auf die Fernwirkung. Die ästhetische Beeinflussung durch den z.T. massiven Flechtenbewuchs muss in der Abwägung des physikalischen Einflusses und einer möglichen Schutzfunktion der Flechten zumindest ebenfalls in der Bewertung berücksichtigt werden.

Ausgewählt wurde für die Musterflächen das in besonderer Weise von Flechten betroffene Relief *Fuchsjagd* (siehe Abb. 75). Dieses Relief liegt am westlichen Rand des Grundstücks und ist von dem vorbeiführenden Weg nicht sehr gut einsehbar. Auch dieser Umstand wurde bei der Wahl der Musterfläche berücksichtigt.

¹⁸⁰ Die Messung wurde vorzeitig abgebrochen („cell overload“).



Abb. 75: Relief *Fuchsjagd* im Sommer 2017

In Abbildung 76 (a-c) sind Details des massiven biogenen Bewuchses dargestellt, der zum Teil durch eine mehrlagige, intensiv grün und gelbe Flechtenbesiedelung charakterisiert ist.



Abb. 76 (a-c): Details des Reliefs *Fuchsjagd* Januar 2018

Reinigungsmethoden

Im Sommer 2018 wurden die Musterflächen mit unterschiedlichen Schlämmen angelegt. Zunächst erfolgte die Reinigung der insgesamt 51 Musterflächen (siehe Abb. 83) nach unterschiedlichen Verfahrensweisen. Dieses Vorgehen diente dem Ziel herauszuarbeiten, wie wenig Reinigung minimal erforderlich ist, um die Unterdrückung der erneuten Entwicklung der Flechten unter den Schlämmen oder eine Neubesiedelung möglichst langfristig zu erreichen. Der geringste Grad der Reinigung bedeutet lediglich ein trockenes, lockeres Abpinseln. Die gesteigerte Intensität umfasste eine trockene Abnahme der auflagernden Flechtenbestandteile mittels Bürsten und Skalpell. Als nächster Schritt der Steigerung der Reinigungsintensität wurden die entsprechende Musterfläche mit Ethanol angequollen und anschließend die Fläche mit kreisenden Bewegungen mit Zahnbürsten gereinigt. Weiterhin kam H_2O_2 ¹⁸¹ kombiniert mit kreisend bürstender Reinigung zum Einsatz. Eine derartig intensiv gereinigte Fläche wurde zusätzlich

¹⁸¹ Wasserstoffperoxid

über 48 h UV-c Strahlung ausgesetzt (siehe Abb. 77).



Abb. 77: Schutzvorrichtung um die UV-c-Lampe, deren Strahlung für 48 Stunden gegen den linken unteren Bereich des Reliefs gerichtet war.



Abb. 78: Heterogen besiedelte Oberfläche mit dem Gitter, das zur Orientierung bei der Anlage der Musterflächen diente.

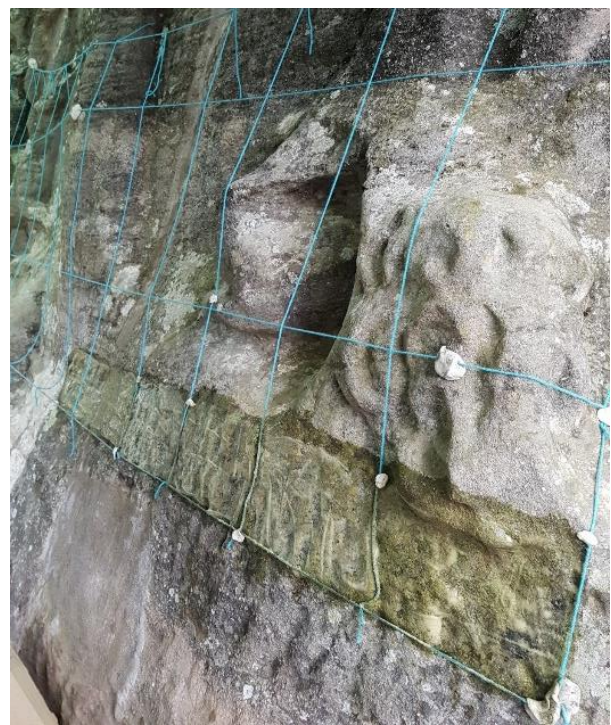


Abb. 79: Anlage der Musterflächen. In der unteren Reihe erfolgt die Reinigung mit H_2O_2 als intensivste Reinigungsmethode (gezeigt Einwirkung des H_2O_2)

In Abbildung 78 ist zunächst ein Ausschnitt der geplanten Reinigungsflächen zu sehen, wie es über gesamte Musterflächen am Relief *Fuchsjagd* umgesetzt worden ist. Natürlich waren nicht alle Flächen in gleicher Weise besiedelt. Dieser Umstand schränkt im Nachgang die vergleichende Betrachtung der Effektivität der Reinigungsmethoden und der Schlämmen etwas ein, da jedoch mehrere Flächen in

gleicher Weise behandelt worden sind, sollten alle Fälle berücksichtigt worden sein. Eine Versuchsfläche am Realobjekt ist naturgemäß¹⁸² nicht mit Laborbedingungen gleichzusetzen (siehe Abb. 78).

Insgesamt sind 51 Musterflächen angelegt worden, drei Reihen, in denen die einzelnen Musterflächen z.T. noch einmal vertikal oder horizontal untergliedert worden sind (siehe Abb. 83). Die oberste Reihe des Musterfeldes ist gar nicht gereinigt worden, lediglich locker angepinselt. Die mittlere Reihe gliedert sich horizontal in oben mit Ethanol gereinigt und unten mit H₂O₂. Die untere Reihe ist bezüglich der angewendeten Reinigungsmethoden ebenfalls horizontal geteilt in oben trocken gereinigt und unten mit H₂O₂ (siehe Abb. 79). Die linken drei Musterflächen der unteren Reihe sind, wie bereits erwähnt, anschließend noch für 48h mit UV-c Strahlung beaufschlagt worden (siehe Abb. 77).

Die Abbildung 80-82 zeigen im Vergleich gereinigte und ungereinigte Reliefoberflächen. Zwar kann der Bewuchs nicht umfassend mit H₂O₂ abgenommen werden, aber es ist deutlich zu erkennen, dass das unterliegende Gestein in seiner Farbigkeit wieder hervortritt. Auch die Formen sind im gereinigten Zustand deutlicher erkennbar (siehe Abb. 82).



Abb. 80: Eine mit H₂O₂ gereinigte Fläche (links) im Vergleich zur nahezu entsprechenden ungereinigten Fläche (rechts). Ein leicht fleckiges Bild bleibt zurück, jedoch kommt die originale Farbigkeit des Gesteins zum Vorschein.



Abb. 82: Gereinigter Jäger im Relief *Fuchsjagd*, hellgrau bis hellrötliche Sandsteinvarietät

Abb. 81: Kriechender Jäger im Relief *Fuchsjagd* mit massivem hellgrünem Flechtenbewuchs

¹⁸² und zum Glück!

Themenbereiche des optimierten Pflegeplans

Nach der Reinigung erfolgte der Schlämmauftrag. Die Auswahl der zu verwendeten Bindemittel wurden vor dem Auftrag mit den Restauratoren des Landesamts für Denkmalpflege Sachsen-Anhalt, Torsten Arnold und Karsten Böhm, besprochen. Es wurden gängige Bindemittelsysteme gewählt, die auch in anderen Zusammenhängen auf Sandstein Anwendung finden und darauf grundsätzlich gut anbinden können.



Abb. 83: Übersicht der Musterflächen mit den unterschiedlichen angewendeten Reinigungsmethoden und -intensitäten sowie den verschiedenen aufgetragenen Bindemitteln Kieselol, KSE, Acrylat und Kalk (up - unpigmentiert, pg - pigmentiert und GM - mit Gesteinsmehl bzw. -sand eingefärbt; 1x - einmaliger Auftrag, 2x - zweimaliger Auftrag der Schlämme; TiO₂ - Nano-Titandioxid und ZnO - Zinkoxid).

Zum Einsatz kamen die Bindemittel: Kieselol, KSE, Acrylatmörtel von Romstedt und Kalk.¹⁸³ Wesentlichen war, dass die Schlämme zumindest anteilig mit Nano-Titandioxid (TiO₂) oder Zinkoxid versetzt worden sind. Titandioxid (TiO₂) kommt in den drei Kristallmodifikationen Rutil, Anatas und Brookit vor, wobei Rutil und Anatas derzeit von technischer Bedeutung sind.¹⁸⁴ Rutil ist thermodynamisch am stabilsten, wohingegen Anatas die höchste photokatalytische Wirkung besitzt, weshalb es derzeit auch am häufigsten für die Photokatalyse eingesetzt wird.¹⁸⁵ Bei der Photokatalyse handelt es sich um einen Vorgang, bei dem durch die Bildung von freien Radikalen, organische Materialien zersetzt werden und somit ein selbstreinigender bzw. antimikrobieller Effekt bei photokatalytisch beschichteten Oberflächen eintritt. TiO₂ ist ein Halbleiter, was bedeutet, dass dessen elektronische Leitfähigkeit zwischen dem eines Leiters (wie Kupfer) und dem eines Isolators (wie Kunststoff) liegt. Als Halbleiter besitzt TiO₂ eine energetische Lücke zwischen Valenz- und Leitungsband. Aufgrund der fehlenden Elektronen, kann das Leitungsband also keinen elektrischen Strom leiten.¹⁸⁶ Da diese Bandlücke für Anatas mit etwa 3,2 eV relativ klein ist, können die Elektronen des vollbesetzten Valenzbandes in das Leitungsband angehoben werden.¹⁸⁷ Diese photochemische Reaktion wird durch die Bestrahlung von Sonnenlicht bzw. UVA-Licht,

¹⁸³ Kieselol- und KSE Schlämme wurden einen Monat nach dem Auftrag noch gefestigt. Die anderen nicht.

¹⁸⁴ Winkler 2013, S. 11 ff.; Fries & Simko 2012, S. 1

¹⁸⁵ Fries & Simko 2012, S. 2

¹⁸⁶ ebd.

¹⁸⁷ Kamaruddin 2015, S. 9

mit einer Wellenlänge unter 380 nm, angeregt.¹⁸⁸ Das angehobene Elektron und das zurückbleibende positive Elektronenloch bewegen sich auf der Oberfläche des Titandioxid-Kristallgitters. In diesem angeregten Zustand (bewegliche elektrische Ladung) werden Redoxreaktionen ausgelöst, wodurch Hydroxylradikale (OH•) gebildet werden. Diese Radikale sind in der Lage, Mikroorganismen wie Bakterien, Schimmelpilze und Algen durch Oxidation abzubauen. Als Abbauprodukt verbleibt anschließend nur Kohlendioxid und Wasser.¹⁸⁹ Die photokatalytische Aktivität wird durch die vergrößerte Oberfläche von TiO₂ in Nanoform, im Vergleich zu mikroskaligen Titandioxidpartikeln, verstärkt.¹⁹⁰ Zudem wird TiO₂ bei der Katalyse nicht verbraucht, weshalb eine Langzeitwirkung vorausgesetzt werden kann.¹⁹¹

Es wurde bereits während eines DBU-Projekts an der Mikwe in Worms¹⁹² die Wirksamkeit von TiO₂ als Prophylaxe gegen biogenen Bewuchs und auch gegen bestehenden Algenbewuchs auf Putz und Naturstein bestätigt.¹⁹³ In den Versuchen wurde das TiO₂ in KSE als Trägermaterial zu einer Suspension gemischt und auf die Oberflächen aufgetragen. Dabei stellte sich heraus, dass bereits eine geringe Titandioxiddosierung von nur 0,6 % einen nachweisbaren Effekt auf die Vergrämung von biogenem Bewuchs hat, wobei eine möglichst geringe Dosierung des hochdeckenden TiO₂ gewählt wurde, um eine Schleierbildung zu vermeiden. Aus diesem Grund wurde im Projekt die erwähnte Konzentration gewählt. Metallische Nanomaterialien wie Silber und Metalloxide wie Zinkoxid wirken durch die Ausbildung von Metallionen, welche durch die Oxidation mit Sauerstoff und in Kontakt mit Feuchtigkeit gebildet werden, antimikrobiell. Vor diesem Hintergrund wurde im Vorhaben auch ZnO als Zusatz zu den Schlämmen verwendet. Um die Schlämmen zumindest theoretisch im Modelversuch auf die vielfältigen Farben des Buntsandsteins am Steinernen Album einzustellen, wurden sie in unterschiedlichen Farben eingefärbt. Dafür kamen entweder Pigmente (pig) oder farbiges Gesteismehl (GM) bzw. -sand zum Einsatz. Hintergrund des Einsatzes beider Varianten war, dass in dem Zusammenhang überprüft werden sollte, ob das eingesetzte Pigment eventuell dazu in der Lage ist, das TiO₂ zu umhüllen und dadurch die Effektivität einzuschränken. Jedes Bindemittel kam auch unpigmentiert (up) zum Einsatz. In den Abbildungen 83 und 84 sind alle eingesetzten Bindemittel mit und ohne TiO₂ (bzw. ZnO) aufgeführt. Es kamen sowohl einlagige also auch zweilagige Schlämmaufträge zur Ausführung.

Die Zusammenstellung der Schlämmen auf KSE und Kieselisolbasis (siehe Tab. 5) richtete sich nach den Rezepturen aus dem DBU-Projekt der *Kolonaden am Neuen Palais im Park Sanssouci (UNESCO-Welterbe)*. In Vorbereitung wurden die Wirkstoffe TiO₂ in Kieselisol und KSE sowie ZnO in Kieselisol gegeben und mit einem Stabmixer etwa sieben Minuten gemischt. Dieser Vorgang wurde für jeweils etwa zwei Minuten vor der Zugabe zu den abgewogenen Zuschlägen wiederholt. Eine Charge reichte für den einmaligen Auftrag auf drei Musterflächen aus.

Tab. 5: Rezepturen der Schlämmen

	Kieselisol -Schlämme	KSE -Schlämme
Quarzsand F 36	105,0 g	105,0 g
Quarzsand Kremer 58630 / ggf. Gesteismehl-Mischung	43,7 g ¹⁹⁴	43,7 g ¹⁸²

¹⁸⁸ Fries & Simko 2012, S. 2

¹⁸⁹ Skasa-Lindermeir & Wendler 2019, S. 61

¹⁹⁰ Fries & Simko 2012, S. 3

¹⁹¹ Greßler et al. 2010, S. 4

¹⁹² DBU-Projekt: Entwicklung und Erprobung von Methoden zur Konservierung umweltgeschädigter, historisch wertvoller Putz- und Steinoberflächen sowie zur Mauerwerkstertüchtigung unter dauerfeuchten Bedingungen und mikrobiellen Belastungen an der Mikwe in Worms

¹⁹³ Skasa-Lindermeir & Wendler 2019, S. 77

¹⁹⁴ Je nach Musterflächen-Reihe wurden entweder Quarzsand Kremer 586 mit der Pigment-Mischung oder farbiges Gesteismehl-Mischungen ohne Pigmente kombiniert.

Themenbereiche des optimierten Pflegeplans

Funcosil Zuschlag A	6,7 g	6,7 g
Funcosil Zuschlag B	13,0 g	13,0 g
Pigment-Mischung	0,5 g ¹⁸²	0,5 g ¹⁸²
Funcosil 333 STE ¹⁹⁵ -Mischung ¹⁹⁶	-	68,4 g
Kieselso Sol Syton X30-Mischung ¹⁸⁴	68,4 g	-

Für die Schlämme auf Acrylatbasis wurde das Fertigprodukt der Firma Romstedt „Sandsteinschlämme 552/1234“ mit Dispersion verwendet. Dieses Bindemittelsystem wurde, wie auch KSE und Kieselso Sol, für die Musterflächen in der Werkstatt verwendet. Laut Herstellerangaben wird auf 1 Kg Zuschlag, 220 ml Acrylatdispersion gegeben. Das vorgegebene Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis ist laut Hersteller unbedingt zu beachten. Da aber vom Hersteller nur eine Verarbeitungszeit von 15 Minuten empfohlen wird und generell weniger als 1kg Material benötigt wurde, mussten die Mengen kleiner berechnet werden. Um die exakte Dispersionszugabe auf die Zuschlagsmenge zu erhalten, wurde ermittelt, dass 1 ml Dispersion 1,024 g entspricht. Somit ergab sich folgendes Verhältnis: 125 g Zuschlag 27,5 ml bzw. 28,16 g Dispersion. Des Weiteren war zu beachten, dass zuerst nur die Hälfte der Acrylatdispersion dem Zuschlag beigemischt und gut vermennt wird und erst dann die restliche Dispersionszugabe erfolgte.

Für die Kalkschlämme wurde ein handelsübliches Weißkalkhydrat verwendet, ohne Zusatz von TiO₂ oder ZnO. Auf Wunsch der Restauratoren des Landesamtes für Denkmalpflege wurde diese traditionelle Form des Schlämmmaterials zusätzlich eingesetzt.

Nach dem Auftrag am Steinernen Album wurde festgestellt, dass die Konzentration des Wirkstoffs (TiO₂ bzw. ZnO) mit 6g/1000ml Bindemittel zu geringen gewählt gewesen ist. Daher sind für die Musterflächen, die in der Werkstatt der FH Potsdam nachträglich angelegt wurden, höher Konzentrationen eingestellt worden.



Abb. 84: Musterflächen mit den unterschiedlichen Schlämmrezepturen am Relief *Fuchsjagd*

Die Schlamm-Musterflächen wurden nach der Anlage regelmäßig bei den Ortsterminen photodokumentiert. Die gesammelten Bilder liegen sortiert an der FH Potsdam in einer Datenbank vor. In

¹⁹⁵ 300 ml Funcosil 500 STE + 700 ml Funcosil 300 E

¹⁹⁶ Auf 1000 ml des Bindemittels wurden 6g des Wirkstoffes gegeben

Themenbereiche des optimierten Pflegeplans

diesem Abschlussbericht sollen nachfolgend nur die Ergebnisse nach ca. 2,5jähriger Standzeit vorgestellt werden. Das Monitoring der Stabilität der Schlämmen bzw. der Wiederbesiedelung der Flächen mit unterschiedlichem Reinigungsgrad ergab, dass KSE als Bindemittel gar nicht geeignet ist. Bereits zwei Monate nach dem Auftrag gab es massive Fehlstellen, sowohl im gar nicht, als auch auf stark gereinigten Musterflächen. Ein einmaliger (siehe Abb. 85) und ein zweimaliger Auftrag (siehe Abb. 86) machte keinen Unterschied. Da bereits nach 7monatiger Standzeit deutlich wurde, dass KSE für den Zweck nicht als Schlämmmaterial geeignet ist, wird im Bericht der Zustand nur bis zu dem Zeitpunkt dargestellt.

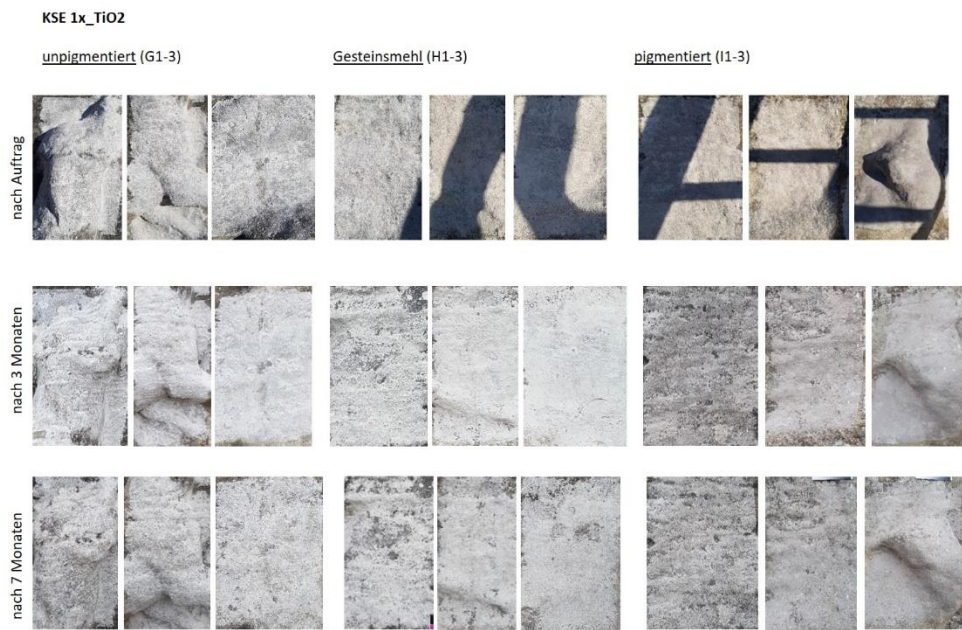


Abb. 85: Musterflächen mit einmaligem Schlammauftrag KSE mit TiO₂-Zusatz am Relief *Fuchsjagd* in einer Zeitschau nach dem Auftrag, nach 3 Monaten und 7 Monaten.



Abb. 86: Musterflächen mit zweimaligem Schlammauftrag KSE mit TiO₂-Zusatz am Relief *Fuchsjagd* in einer Zeitschau nach dem Auftrag, nach 3 Monaten und 7 Monaten.

Die Flächen mit den Kieselolschlämmen sind deutlich stabiler, ein zweimalige Auftrag der Schlämme, der dennoch dünn genug ist, um feinste Details des Untergrundes nachvollziehen zu können, ist dauerhafter.

Themenbereiche des optimierten Pflegeplans

Die Bilder des Monitorings geben ebenfalls eine 7monatige Standzeit wieder (siehe Abb. 87-88), um eine bessere Vergleichbarkeit zu den KSE-Flächen zu ermöglichen.



Abb. 87: Musterflächen mit einmaligem Schlämmauftrag Kieselzol mit TiO₂-Zusatz am Relief *Fuchsjagd* in einer Zeitschau nach dem Auftrag, nach 3 Monaten und 7 Monaten.

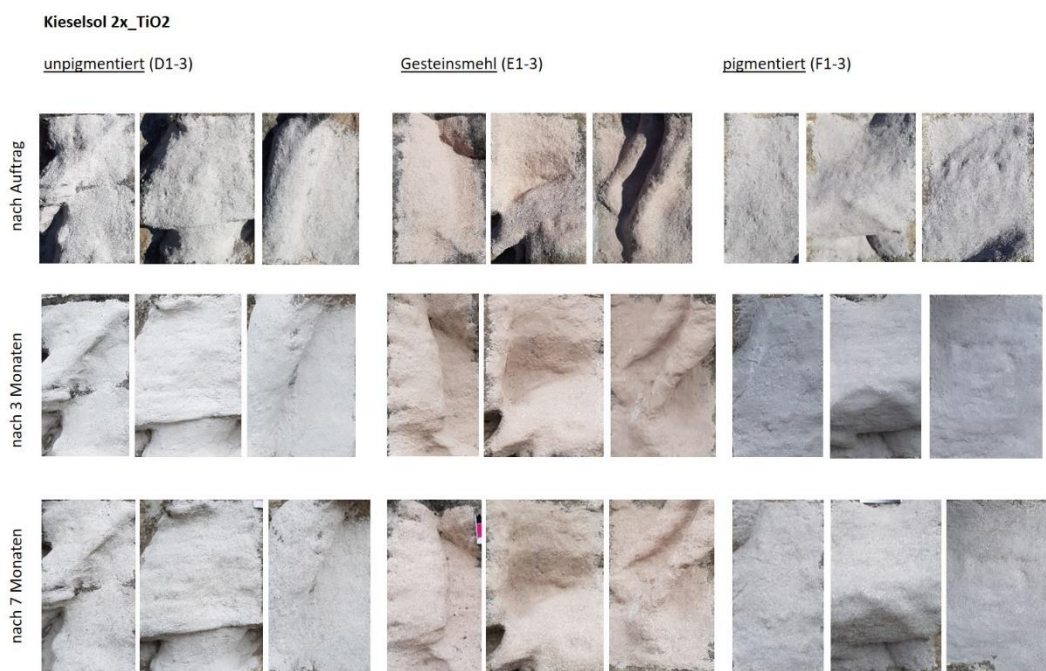


Abb. 88: Musterflächen mit zweimaligem Schlämmauftrag Kieselzol mit TiO₂-Zusatz am Relief *Fuchsjagd* in einer Zeitschau nach dem Auftrag, nach 3 Monaten und 7 Monaten.

Am besten stehen die Flächen mit dem Acrylatmörtel, nahezu unabhängig vom Reinigungsgrad gibt es nur minimale Ausplutzer der Schlämme durch nachwachsende Flechten (siehe Abb. 89). Auch diese Flächen sind für die Vergleichbarkeit nach 3- und 7monatiger Standzeit dargestellt. Auch nach 2 Jahren Standzeit sind die Flächen noch nahezu fehlstellenfrei.

Acrylat 1x (links) und 2x (rechts)
unpigmentiert (P1-3)



Abb. 89: Musterflächen mit ein- und zweimaligem Schlammauftrag Acrylat (ohne TiO_2 -Zusatz) am Relief *Fuchsjagd* in einer Zeitschau nach dem Auftrag, nach 3 Monaten und 7 Monaten.

Die Kalkflächen erwiesen sich stabiler als die KSE-gebundenen, allerdings gab es am Ende der Kampagne deutliche Fehlstellen (siehe Abb. 90).

Kalk 1x (links) und 2x (rechts)
unpigmentiert (P1-3)

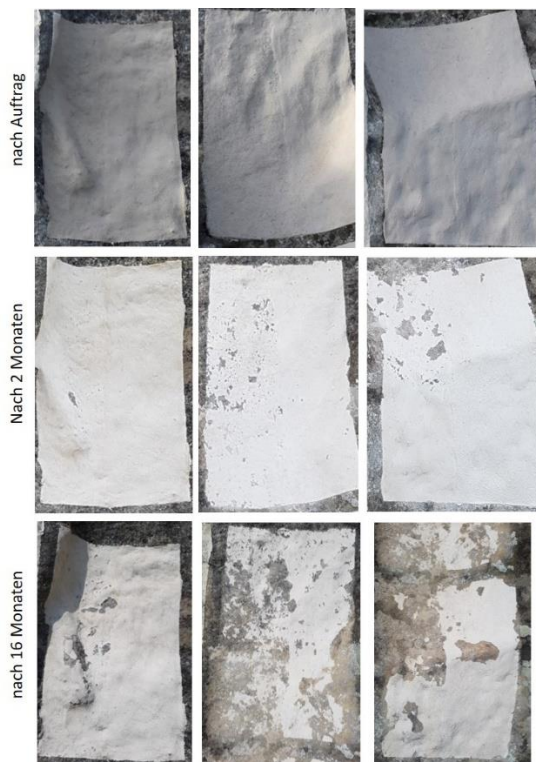


Abb. 90: Musterflächen mit ein- und zweimaligem Schlammauftrag Kalk (ohne TiO_2 -Zusatz) am Relief *Fuchsjagd* in einer Zeitschau nach dem Auftrag, nach 2 Monaten und 16 Monaten.

Der Einfluss des TiO_2 ist nicht eindeutig ablesbar. Die Besiedelung an den Oberflächen der Schlämmen war mit und ohne TiO_2 nicht signifikant voneinander zu unterscheiden. Ebenso verhält es sich mit dem ZnO . In Abbildung 91 sind durchgebrochene Flechtenbewüchse beispielhaft abgebildet.

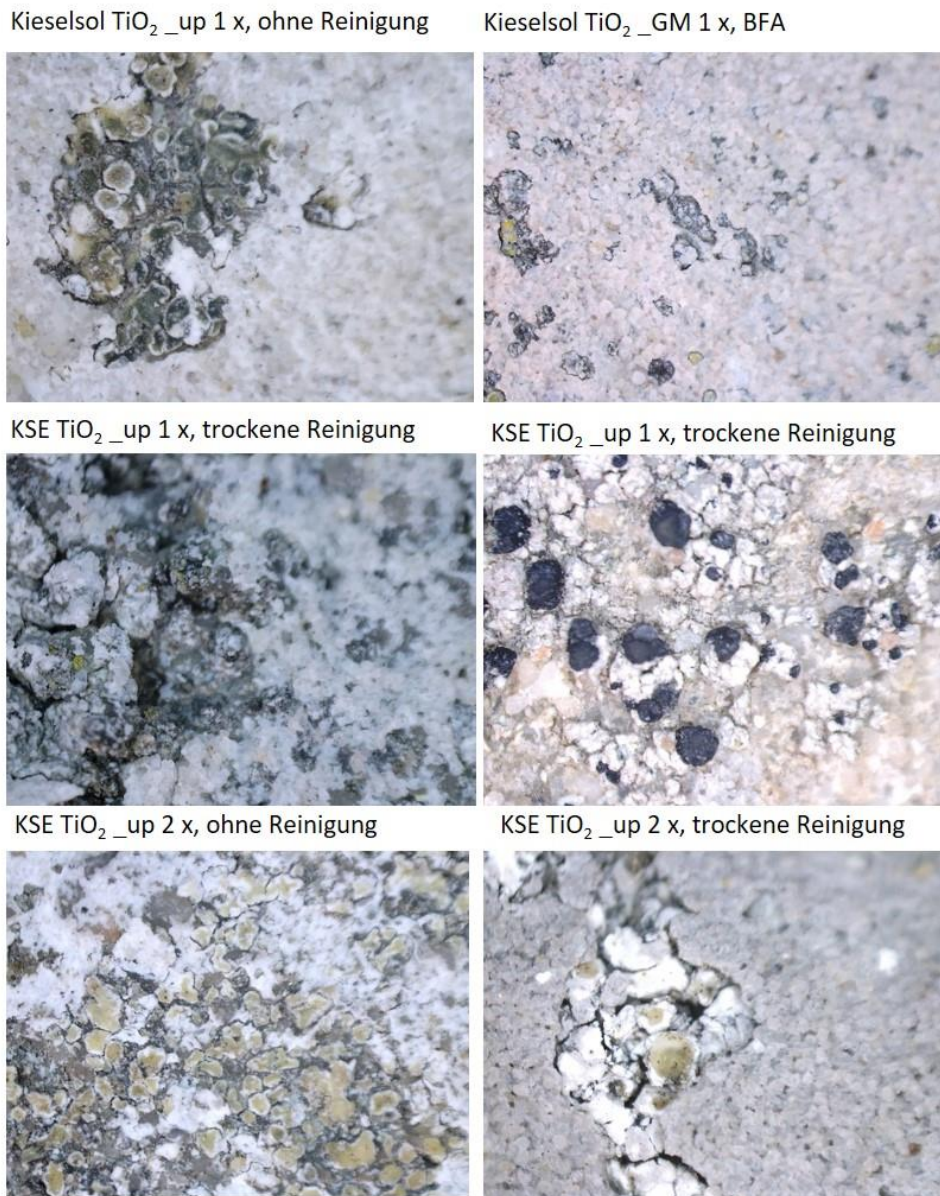


Abb. 91: Musterflächen unterschiedlicher KSE- und Kieselolschlämmaufträgen nach ca. einjähriger Standzeit am Relief *Fuchsjagd*

Wie bereits erwähnt, war der Wirkstoffgehalt vermutlich zu gering bemessen, weshalb die Musterflächen an der Fachhochschule mit höheren TiO_2 -Gehalt angelegt und frei exponiert worden. Auch ist der biogene Bewuchs auf den ausgewählten Baluster und Platten (siehe Abb. 93), der die Schlämmen unterlagert, eher mit einem Biofilm als mit grob abgereinigten Flächen zu vergleichen. Die Standzeit seit April 2020 ist nicht gleichzusetzen mit der am Steinernen Album. Noch dazu ist die Exposition nicht vergleichsweise extrem wie am Relief *Fuchsjagd*. Daher kann aktuell keine signifikante Aussage getroffen werden. Alle Musterflächen stehen nur leicht verschmutzt, aber ansonsten völlig unverändert und werden auch weiterhin, über die Projektlaufzeit hinaus, beobachtet.

Im Rahmen des letzten Ortstermins des Projekts, im September 2021, wurden die Musterflächen, die ohnehin viele Fehlstellen aufwiesen und daher nicht weiterverfolgt werden, soweit es ging abgereinigt. Die nahezu intakten aus dem Bereich der Acrylatschlämme und eines Kieselolbereichs verblieben unangetastet zur weiteren Beobachtung. Abschließend erfolgte eine Retusche aller Flächen mit Silikatkreiden (umbra, ocker, schwarz),¹⁹⁷ die darauffolgend noch mit KSE fixiert wurden, um sie optisch besser in das Umfeld einzupassen (siehe Abb. 92).¹⁹⁸



Abb. 92: Schlämmmuster auf dem Relief Fuchsjagd nachdem sie zum Ende des Projekts einretuschiert worden sind.

Zusätzlich zur Anlage der Musterflächen am Steinernen Album wurden auch an der Fachhochschule Flächen in freier Exposition angelegt (siehe Abb. 93).¹⁹⁹ Einerseits konnten diese trotz coronabedingtem Dienstreisestopp beobachtet werden und noch dazu sind hier im Vergleich noch einmal höhere Wirkstoffkonzentrationen an Nano-TiO₂²⁰⁰ angewendet worden.



Abb. 93: Aufstellungssituation der beschichteten Probeflächen bzw. -körper, auf der Terrasse der Steinwerkstatt, ab April 2020. Im Vordergrund insgesamt 3 Platten und 3 Baluster. Im Hintergrund die beschichtete Balkonbrüstung

¹⁹⁷ Aufgemahlen und in Ethanol gelöst wurde es mit dem Pinsel aufgestupft.

¹⁹⁸ Es ist nicht gewiss, wann das Team der FH Potsdam nach Abschluss der DBU-Projekts wieder Zutritt zum Steinauer Weinberg bekommen wird.

¹⁹⁹ Masterprojekt von J. Zilm: „Vergrämung von biogenem Bewuchs durch Beschichtungssysteme mit integriertem Titandioxid und durch verschiedene Metallapplikationen“; Protokoll

²⁰⁰ 0 %, 2 % und 3 % Titandioxidzusatz für jeweils pigmentiertes und unpigmentiertes Bindemittel

Restaurierungsethische Betrachtung eines langfristigen Schlämmauftrags

Selbstverständlich ist es der Arbeitsgruppe der FH Potsdam bewusst, dass ein langfristiger Schlämmauftrag in dem natürlichen Umfeld des Steinernen Album als Fremdkörper wahrgenommen werden kann. Insbesondere der Alterswert des Objekts wird eingeschränkt. Im Seminar wurde dieser Eingriff auch intensiv und kontrovers mit den Studierenden diskutiert. Das teilweise starke Farbspiel der Sandsteinvarietäten am Steinernen Album erschwert es extrem, eine sich optisch gut integrierende Schlämme zu konzipieren. Die Gefahr eines starken gestalterischen Eingriffs in den natürlichen Zustand besteht. Dennoch kann zusammenfassend geäußert werden, dass der Nutzen einer Schutzschlämme, zumindest im Sinne einer Musterfläche, zu vertreten ist, auch wenn dadurch der Alterswert der Reliefs reduziert würde, wird unterstützt pro und contra eines Schlämmauftrags objektiv zu diskutieren. Die Acrylschlämmen sind offensichtlich dauerhaft und wirken langfristig vergrämend. Die nicht extra auf die Farbigekeit der Reliefs abgestimmten Acrylschlämmaufträge wirken tatsächlich wie ein kunststoffhaltiger Überzug, auch wenn der Acrylatanteil in der Schlämme sehr gering ist. Eventuell verbessert sich dieser Eindruck durch eine bessere farbliche Anpassung an die Umgebung. Favorisiert wird das Bindemittel Kieselöl für eine einheitliche, größere Musterfläche, da dieses Bindemittel einen poröseren mineralischen Eindruck vermittelt. Die zermürbende Wirkung der Hyphen der Flechten, die am Steinernen Album zum Teil mehrlagig übereinander wachsen und in Abhängigkeit von der Vitalität der Pflanzen, einen chaotischen Farbeindruck vermitteln können, der das Erkennen der Reliefformen extrem erschwert, ist vor dem Hintergrund der Erfahrungen im Projekt keine akzeptable Alternative. Wenn man sich im abschließenden Fachgespräch mit den Verantwortlichen des Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt, das im Nachgang des Projekts mit Hinblick auf die mögliche Umsetzung erfolgen soll, entscheiden würde, ein Relief komplett als Musterfläche anzulegen, müsste stärker als bisher in dieser Pilotstudie, auf die farbige Integration geachtet werden. Die Schlämmen erzeugen durch die damit einhergehende Vereinheitlichung der Oberfläche zwar eine gewisse unnatürliche Erscheinung, aber insgesamt wird die Erkennbarkeit von Details tatsächlich verbessert und, ebenfalls sehr wichtig, werden die Lebensbedingungen für den Flechtenbewuchs eingeschränkt (Feuchte und Licht).

Eine bessere Erkennbarkeit der stark biogen besiedelten bzw. zurückgewitterten Reliefs kann auch mit günstigen Lichtverhältnissen erreicht werden. Licht von West bzw. Südwest (Abendsonne) ist für die Reliefs links der Weinbergmauer (*Hochzeit zu Kana, Puttentanz, Herzog Christian und Fuchsjagd*) gut geeignet, um Detail zu erkennen. Allerdings bliebe dann immer noch die zerstörerische Kraft der Flechten. *Christus in der Kelter, Noah* usw. bekommen schon bei südlicherem Sonnenstand Streiflicht (nachmittags), was in diesen Bereichen zu einer besseren Erkennbarkeit der zurückgewitterten und bewachsenen Reliefoberflächen führt.

7.4 Umgang mit den vergipsten Oberflächen

Wie bereits eingangs geschildert, sind die Reliefs im Zusammenhang mit der großen Restaurierungskampagne Ende der 1990er Jahre zwar stark invasiv gefestigt worden, nicht jedoch sind Salz- bzw. Gipsreduktionsmaßnahmen ausgeführt worden. In Abhängigkeit von der Gesteinsvarietät kommen an den Reliefs auch anteilig dolomitisch gebundene Horizonte vor (siehe Kap. 4). In Interaktion mit SO₂-haltiger Atmosphäre kam es während der DDR-Zeit zu einer Umwandlung dieses Bindemittels in Gips, Calciumsulfat(di)hydrat und auch Magnesiumsulfat. Auch im aktuellen Projekt konnten in allen untersuchten Bereichen oberflächennah deutliche Gipsgehalte detektiert werden (siehe Kap. 7.2). Vermutlich diese Vergipsung oder deren Interaktion mit dem Festiger führte in einzelnen Bereichen zu einer zähen Verfestigung der Oberfläche, eine Art ganz dünne Haut oder Kruste (siehe Abb. 94 und 95). Darunter ist das Gestein meist nur von (sehr) geringer Festigkeit.



Abb. 94: Zähle, spannungsreiche Oberfläche mit Pusteln, darunter sandend – Überfestigung oder Interaktion mit Gips, Relief *Herzog Christian*, linker Bereich



Abb. 95: Detail, spannungsreiche Pustel, darunter sandend, Relief *Herzog Christian*, linker Bereich

Diese verfestigten Bereiche, die sich in den Abbildungen 94 und 95 als Pusteln zeigen, gibt es in anderen, nicht reliefierten Zonen auch großflächigere, tapetenartige Ablösung der Oberfläche (siehe Abb. 96). Zumindest ein Teil des Bindemittels dieser dünnen Schalen besteht gemäß der mikroskopischen Analyse, die daran ausgeführt wurde²⁰¹, aus Gips (siehe Kap. 7.4.1).



Abb. 96: Großflächige schalige Ablösungen, deren Bindemittel zumindest teilweise aus Gips besteht (plastisch verformt). Auch andere Salze sind in der Umgebung auskristallisiert (Nitrate). Das dargestellte Phänomen liegt im bodennahen, umgestalteten Bereich, westlich des Reliefs *Lots Berausung*.

Dieses kritische Schadensphänomen konnte für betroffene Reliefs im exemplarischen Rahmen mit der Methode der Bohrwiderstandsmessungen im Detail dargestellt werden (siehe Kap. 7.4.2). Vor dem Hintergrund, dass sich Gips sehr gut mit KSE-Produkten festigen lässt, zumindest zeigten dieses Phänomen einige bisherige Versuche, auch von Dr. Eberhard Wendler²⁰², würde theoretisch eine fortwährende Flutung sandender Bereiche, wie Peter Fiedler es im Rahmen der Pflege immer auch versucht hatte, problematisch sein, da sie zu einer weiteren Überfestigen der oberen Kornlagen führen könnten. Da in manchen Bereichen zähe, feste Häute an der Oberfläche beobachtet werden konnten, wurde dieses Phänomen zumindest für wahrscheinlich erachtet.

²⁰¹ Schlütter, F., Untersuchungsbericht MPA Bremen 05-10241-19

²⁰² freundl. mündl. Mitteilung

Um dieses Schadensphänomen am Steinernen Album besser zu verstehen und auf dieser Basis ggf. ein zum bisherigen Konsolidierungskonzept alternatives Vorgehen zu entwickeln, sind einerseits ausführliche Untersuchungen zu Möglichkeiten der Gipsreduktion in den betroffenen Reliefbereichen durchgeführt worden, immer begleitet von hochauflösenden Tiefenprofiluntersuchungen mit Hilfe der Bohrwiderstandsmessung (siehe Kap. 7.4.2). Darüber hinaus hat der Masterstudent J. Klein seine Masterarbeit diesem Thema gewidmet²⁰³. Ziel der Thesis war es, die Annahme, dass eine Konsolidierung von vergipsten Sandsteinoberflächen mit Kieselsäureester zu einer Überfestigung führen könnte, nachzuweisen bzw. zu widerlegen. Außerdem sollte die potenziell (über-)festigende Wirkung des Konsolidierungsmittels KSE auf vergipsten Oberflächen abgeschätzt und anhand zahlreicher Probekörper fundiert beurteilt werden. Ein weiteres Ziel bestand darin zu überprüfen, ob und in welchem Maß eine mögliche Überfestigung durch eine geeignete Gipsreduzierung verhindert oder zumindest reduziert werden kann. Dabei soll das wirksamste Mittel zur Gipsreduzierung im Zusammenhang mit einer anschließenden Festigung ermittelt werden, wodurch konkrete Lösungsansätze für den weiteren Umgang mit den teilweise stark geschädigten Bildreliefs am Steinernen Album zur Verfügung gestellt werden sollten. Die Ergebnisse der Masterarbeit, die von Dr. Eberhard Wendler und mir betreut wurde, finden in diesem Abschlussbericht nur zusammenfassend Erwähnung (s.u.). Die Masterarbeit selbst kann zu einem späteren Zeitpunkt, nach der Bewertung und Verteidigung, über das Hornemann Institut als e-Publication bezogen werden.

Zur Identifikation der Zusammensetzung der zäh zusammenhängenden Oberfläche, die an manchen Reliefs beobachtet werden kann (siehe Abb. 94 und 95) wurden einerseits exemplarisch Oberflächenproben genommen, die durch die MPA Bremen polarisationsmikroskopisch untersucht worden sind. Darüber hinaus sind in verschiedenen Zusammenhängen Tiefenprofile an den unterschiedlichen Reliefs durch das IDK angelegt worden (siehe Kap. 7.1.3). Auch dabei konnte eine Gipsbelastung im oberflächennahen Bereich detektiert werden.

7.4.1 Ergebnisse der Materialuntersuchung der MPA Bremen²⁰⁴

Mehrere Teilstücke der beprobten Schalen wurden vor der Herstellung der Dünnschliffe unter Vakuum mit Kunstharz getränkt. Die Verwendung von blauem Harz verbessert die Erkennbarkeit von Poren, Hohlräumen und Rissen. In den Abbildungen 97 und 98 sind Aufnahmen der Dünnschliffe dargestellt. Darauf ist deutlich die oberflächennahen Vergipsung und auch das entfestigte Gefüge zu erkennen.

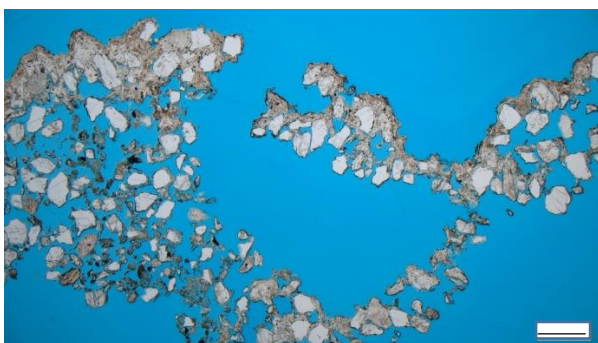


Abb. 97: Dünne Sandsteinschale mit aufgelockertem Gefüge (Mürbzona) unterhalb eines Gipssaums (Bereich 1), Maßstab 1mm (Hellfeld)

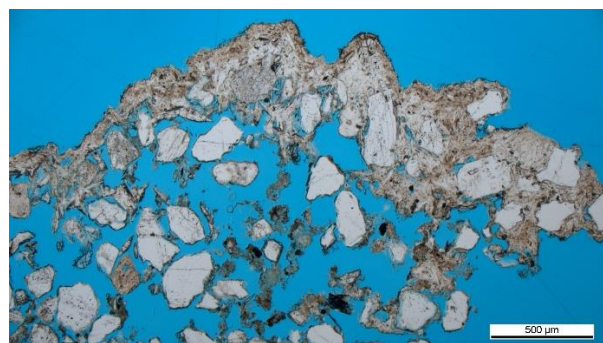


Abb. 98: Dünne Sandsteinschale mit aufgelockertem Gefüge (Mürbzona) unterhalb eines Gipssaums (Bereich 1), Maßstab 0,5 mm (Hellfeld)

²⁰³ Klein, 2022: Untersuchungen zur Festigung vergipster Sandsteinoberflächen mit Kieselsäureester, Abgabe 23.04.2022

²⁰⁴ Schlütter, 2019, Untersuchungsbericht MPA Bremen 05-10241-19

Unter gekreuzten Polarisatoren können in der genutzten Polarisationsmikroskopie die einzelnen Gipsnadeln im Gipssaum deutlich dargestellt werden (siehe Abb. 99 und 100).

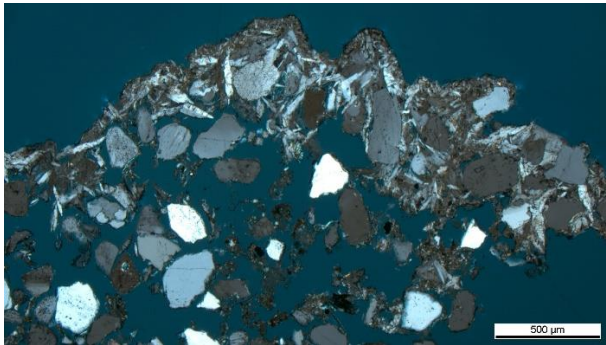


Abb. 99: Dünne Sandsteinschale mit aufgelockertem Gefüge (Mürbzone) unterhalb eines Gipssaums mit weißen Gipsnadeln (gekreuzte Polarisatoren) (0,5 mm)

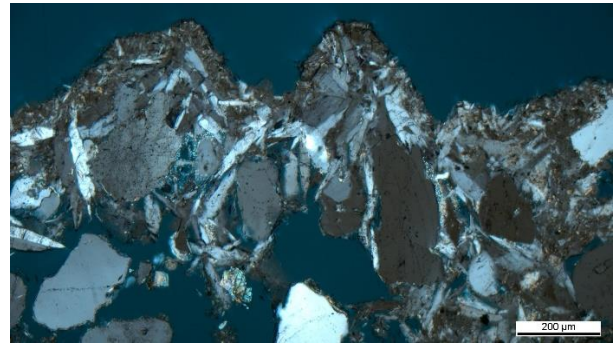


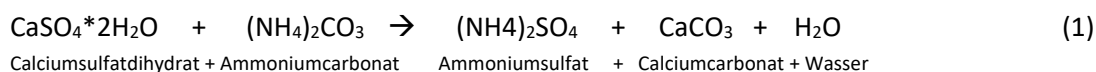
Abb. 100: Sandsteinschale mit einem Gipssaum, an der Außenseite, Maßstab 0,2mm (gekreuzte Polarisatoren)

7.4.2 Musterflächen zur Reduktion der gipsbelasteten Oberflächen

Über den Projektzeitraum sind zahlreiche Musterflächen zur Reduktion bzw. Umwandlung von Gips am Steinernen Album angewendet worden, immer begleitet von Messungen der kapillaren Wasseraufnahme zur direkten Bewertung der damit einhergehenden Veränderungen im oberflächennahen Porenraum sowie von Bohrwiderstandsmessungen, zur Beurteilung der Festigkeit im Zusammenhang mit der Gipsreduktion. Nachfolgend wird zunächst die Anlage der Musterflächen beschrieben.

Wie bereits beschrieben treten an einigen Reliefs saugfähige und nahezu wasserabweisende Bereiche auch direkt nebeneinander auf. Da keine hydrophobierende Behandlung dokumentiert ist²⁰⁵, wurde für wahrscheinlich erachtet, dass sich die schwache Saugfähigkeit mancher Zonen aus deren Vergipsung ergab. In derartigen Bereichen und in jenen, die bereits mit einer zähen, festen Haut beschrieben wurden, sind unterschiedliche Substanzen zur chemischen Umwandlung von Gips appliziert worden. Deren Effektivität bezüglich der Veränderungen im oberflächennahen Porenraum ist mit dem Test der kapillaren Wasseraufnahme und des Bohrwiderstands vor und nach der Applikation überprüft worden.

Zum Einsatz kamen folgende Mittel, die in Form von Kompressen appliziert worden sind: Ammoniumkarbonat (zur Steigerung der Löslichkeit des Calciumsulfat(di-)hydrats). Die Reaktion verläuft nach folgender Reaktionsgleichung²⁰⁶ ab:



Calciumsulfatdihydrat + Ammoniumcarbonat Ammoniumsulfat + Calciumcarbonat + Wasser

Weiterhin sind die Anionentauscher Powdex GX 113, Akeogel A 1500 sowie Amberlite 4400 OH (bzw. INOEX OH) angewendet worden. Auch die Kombination aus Ammoniumkarbonat und Ionentauscher ist bemustert worden. Im Nachgang der Wirkstoffapplikation wurden mehrmalig Neutralkompressen (aqua dest) aufgetragen. Im Zusammenhang mit Ammoniumkarbonat, aus dessen Reaktion mit dem Gips in der Oberfläche leichtlösliches Ammoniumsulfat entsteht (siehe Gleichung 1), ist zu dessen Bindung keine Bariumhydroxidlösung angewendet worden. Der mehrmalige Auftrag von Neutralkompressen, gleich nach Abnahme der Ammoniumkarbonatkompressen, erwies sich als ausreichend effektiv hinsichtlich der

²⁰⁵ Lediglich an zwei Stellen sind wasserabweisende Ablaufspuren zu beobachten gewesen, die nahelegen, dass hier doch eine wasserabweisende Substanz versuchsweise und undokumentiert appliziert worden ist.

²⁰⁶ Matteini & Nepoti, 2001, S. 68

Entfernung des Ammoniumsulfats. Es sind im Verlauf des Projekts an keiner Musterfläche Salzausblühungen beobachtet worden.

Verwendete Anionentauscher

Es handelt sich bei allen Produkten um Anionentauscher, welche selektiv Sulfationen binden. Bei dem Produkt Akeogel A 1500 der Firma Syremont (Italien) handelt es sich um einen stark basischen, OH-beladenen Anionentauscher in Form eines gelblichen Pulvers, das zunächst mit destilliertem Wasser zu einer pastösen Masse angeteigt und nach dem Vornässen der Musterfläche in einer Schichtstärke zwischen 3 mm und 4 mm aufgetragen und mit einer Plastikfolie abgedeckt wurde. Die Einwirkzeit variierte zwischen 2 und 8 Stunden. Bei dem Produkt Powdex GX 113 der Firma Graver Technologies, USA, handelt es sich um einen karbonatisch beladenen Anionenaustauscher, der in gleicher Weise wie Akeogel angewendet worden ist. Amberlite 4400 OH bzw. Amberjet 4400 OH ist ebenfalls ein stark basischer, OH-beladener Anionentauscher. Damit wurde nur eine kleine Musterfläche angelegt (nicht repräsentativ). In den nachfolgenden Abbildungen (101-106) sind verschiedene Musterflächen mit den verschiedenen Pasten bzw. Kompressen (Anionentauscher und Ammoniumkarbonat) dargestellt.



Abb. 101: Musterfläche mit Ionentauschern (u. und Mi.) und Ammoniumkarbonat (o.) im li. Bereich des Reliefs *Hochzeit zu Kana*, Bereich mit schlechter Wasseraufnahme



Abb. 102: Detail der Abbildung 101 nur mit Ionentauschern



Abb. 103: Musterfläche mit Ionentauscher Akeogel (oben) und Ammoniumkarbonat (unten) im Reliefs *Christus in der Kelter*, im Bereich mit schlechter Wasseraufnahme



Abb. 104: Musterfläche mit Ionentauschern (li. Akeogel, re. Powdex) im re. Bereich des Reliefs *Herzog Christian*, im saugfähigen Bereich mit fester, zäher, leicht pusteliger Oberfläche



Abb. 105: Musterfläche mit Ammoniumkarbonat im li. Bereich des Reliefs *Herzog Christian*, im saugfähigen Bereich mit fester, zäher, leicht pusteliger Oberfläche

Abb. 106: Detail aus Abbildung 105

Sowohl die Betrachtung der kapillaren Wasseraufnahme als auch der Entwicklung der Bohrwiderstandsmessung flossen in die Bewertung der Musterflächen zur Reduktion der Gipsbelastung ein.

Bewertungsmethoden

Bohrwiderstandsmessung

Der Studiengang Konservierung und Restaurierung, Fachrichtung Stein, verfügt glücklicherweise über ein Bohrwiderstandsmessgerät DRMS der Firma SINT. Bei der zerstörungsarmen Prüfung des Bohrwiderstandes wird der Widerstand gemessen, welchen das Material dem Bohrer entgegenstellt. Grundlage für diese Untersuchungsmethode ist die Korrelationsmöglichkeit zwischen Bohrwiderstand und Festigkeit des Materials.²⁰⁷ Dadurch ist eine Schadensdiagnose bzw. Bewertung von Festigkeitsveränderungen infolge von Verwitterungsprozessen oder Konservierungsmaßnahmen hochauflösend im Tiefenprofil möglich. Das ist ein sehr großer Vorteil dieser Methode. Allerdings bedarf es für die korrekte Ausführung und Bewertung der Messungen viel Erfahrung und noch mehr Geduld.²⁰⁸ Die Firma SINT ist immer wieder hilfsbereit, aber die Tücken des Gerätes können aufregend sein. Im Rahmen des DBU-Vorhabens wurde auf der Grundlage der Erfahrungen mit dem Gerät eine Art „how to Bohrwiderstand“ zusammengestellt, das anderen Nutzer*innen dieses Gerätes helfen soll, valide Ergebnisse zu erzeugen und mit Tricks und Kniffen eventuell doch noch den lange geplanten Vor-Ortstermin zu retten.²⁰⁹ Die Messungen mit dem SINT DRMS cordless erfolgen mit einem Bohrkraft-Messsystem (DFMS). Die Bestimmung des Bohrwiderstands basiert auf der Messung der Kraft [N], die notwendig ist, bei vorgegebenen Randbedingungen (Eindringgeschwindigkeit, Drehzahl, Bohrgeometrie) ein Loch in das jeweilige Material zu bohren. Um die Beeinträchtigung der Reliefs im Rahmen der Untersuchungen so gering wie möglich zu halten, wurden alle Bohrlöcher mit 3mm-Bohrern durchgeführt. Wichtig ist, neben der richtigen Auswahl der Bohrer mit Hinblick auf deren Härte/Stabilität, die unbedingt mit einem Referenzmaterial (ARS - Artificial Reference Stone von SINT) überprüft und im Laufe der Messung kalibriert und korrigiert werden muss, um Bohrerabrieb etc. zu ermitteln²¹⁰ auch der Winkel der Bohrschneiden. Die beiden Flanken müssen in einem möglichst flachen Winkel aneinandergrenzen (siehe Abb. 107), um zu vermeiden, dass nicht erst in größerer Bohrtiefe der gesamte Bohrkopf im Material

²⁰⁷ Meinhardt & Pfefferkorn, 2010, S. 65

²⁰⁸ Immer wieder Geräteausfälle vorgekommen, leider auch direkt beim Ortstermin, da zu heiß, zu kalt, zu irgendetwas.

²⁰⁹ siehe Anhang, S. 8

²¹⁰ Gaedke, 2020, S. 27f.

angekommen ist, sondern mit dem Eindringen der Bohrspitze in die Oberfläche die Messung beginnt. Mit einem spitzen Bohrer wäre es nicht möglich, periphere Phänomene, wie dünne Vergipsungen auf einer Oberfläche messtechnisch aufzulösen.

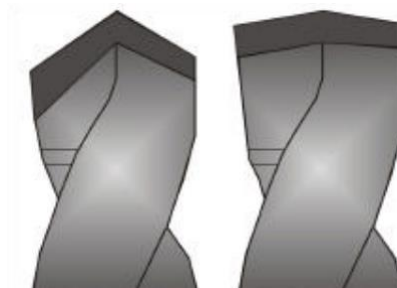


Abb. 107: Bohrergeometrien, wobei nur der rechte gezeigte Bohrer für die Auflösung oberflächennaher Phänomene geeignet ist. Bei dem spitzen Bohrer würde mehr Information verlorengehen, ehe der gesamte schneidende Bohrkopf (dunkelgrauer Bereich) in das Material eingedrungen ist.

Während der Messung werden Vorschub und Rotationsgeschwindigkeit generell konstant gehalten. Diese Parameter werden entsprechend der Festigkeitsklassifikation des untersuchten Materials gewählt.²¹¹ Als Richtlinie für die Auswahl der Messparameter gilt, dass bei hoher Festigkeit des zu bearbeitenden Materials (z.B. Carrara Marmor) mit hoher Drehzahl (1200U/min) und geringem Vorschub (5mm/min) gebohrt werden sollte. Ein weicher und poröser Kalkstein hingegen würde mit geringer Rotationsgeschwindigkeit und schnellerem Vorschub (20mm/min) untersucht werden.²¹² An den Reliefs des Steinernen Albums wurde in der Regel mit 400 rpm und 15 mm/min gearbeitet.

In den Abbildungen 108-110 sind exemplarisch Bohrwiderstandsprofile für drei unterschiedliche Untersuchungspunkte gezeigt, die einerseits die dünne, feste „Haut“ an der Oberfläche und zum Teil die sich anschließende Mürbzone sowie weiterhin das insgesamt relativ geringe Festigkeitsniveau des unterlagernden Gesteins wiedergeben.

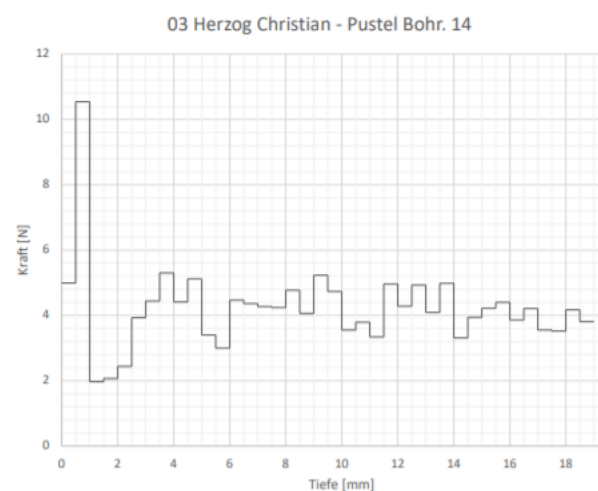


Abb. 108: Relief *Herzog Christian* (MP 03). Typisches Kurvenprofil für zähe feste Oberflächen, die z.T. pustelig aufspringen. Eine sehr dünne, überfeste Schicht (10,5 N) ist gefolgt von schmaler entfestigter Mürbzone (2 N) und dann dem „normal festen“ Gestein, auf sehr niedrigem Festigkeitsniveau (Werte zwischen 3 – 5,3 N).

²¹¹ siehe Anhang, S. 8

²¹² Meinhardt & Pfefferkorn, 2010, S. 66)

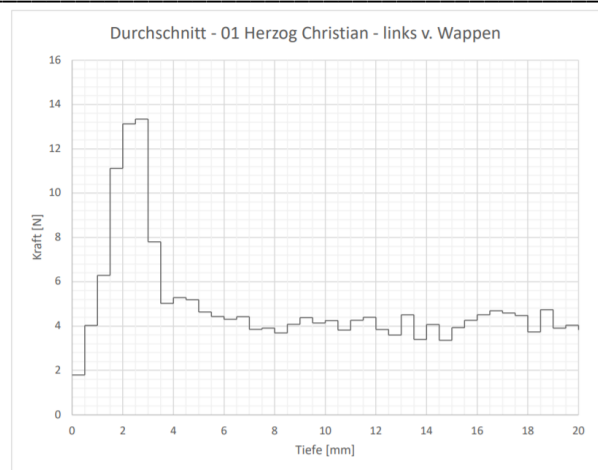


Abb. 109: Relief *Herzog Christian* (MP 01). Ebenfalls typisches Kurvenprofil für zähe feste Oberflächen: erhöhte Festigkeit zwischen 1 - 3,5 mm (Höchstwert 13,3 N; ca. 3x so hoch wie Mittelwert „normal“), keine Mürbzone, „normal“ ab 4 mm (Werte zwischen 3,4 - 5 N)

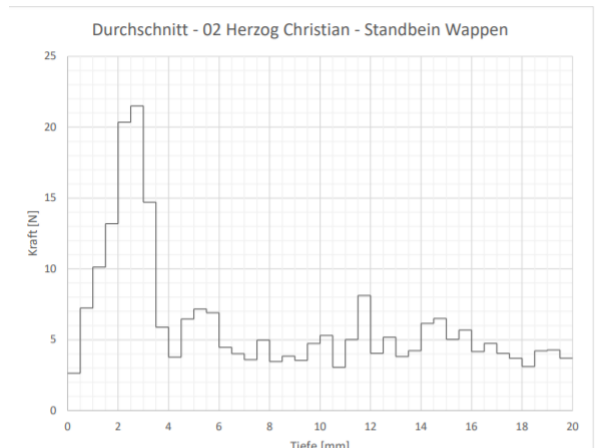


Abb. 110: Relief *Herzog Christian* (MP 02). Typisches Kurvenprofil für zähe feste Oberflächen: erhöhte Festigkeit zwischen 0,5 - 3,5 mm (Höchstwert 21,5 N; ca. 4x so hoch wie der Mittelwert „normal“), keine deutliche Mürbzone „normal“ ab 4 mm (Werte zwischen 3,1 – 6,9 N; Einzelwert 8 N)

Nach der Applikation von Ammoniumkarbonat und Akeogel (siehe Abb. 112) sind die Festigkeitsspitzen der oberflächennahen Peaks in unterschiedlichem Maße reduziert. Ein Beispiel für das Relief *Herzog Christian* ist diesbezüglich in der nachfolgenden Abbildung (111) gezeigt. Es steht in direktem Bezug zu dem Vorzustand in Abbildung 109.

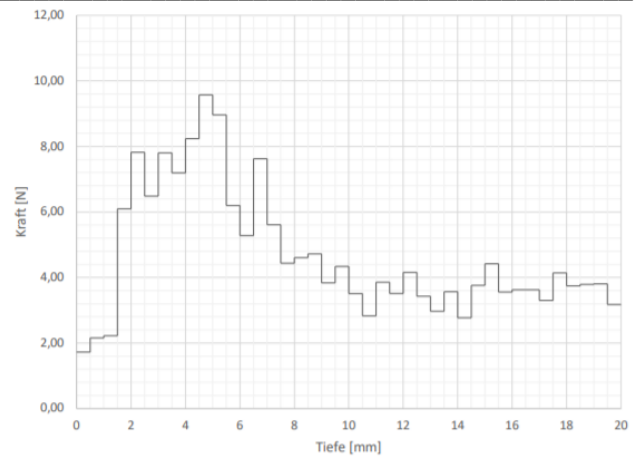


Abb. 111: Bohrwiderstand. Messstellen 01-04, Relief *Herzog Christian*, nach dem Auftrag des Ammoniumkarbonats (MP 01): 1-1,5 mm: entfestigt (< 3 N); erhöhte Festigkeit zwischen 2-7 mm (Höchstwert 9,6 N) = abgeflachter „Gips-Peak“; „normal“ ab 7,5 mm (2,8-4,7 N)



Abb. 112: Detail 03 und 04 (links); Fläche in 2018 mit Ionenaustauschern behandelt, Messungen um Pustel herum angeordnet.

Erfassung der Kapillaren Wasseraufnahme

Die kapillare Wasseraufnahme wurde in den Untersuchungsbereichen vor Ort hauptsächlich mit Hilfe des Karstensen Prüfröhrchens im Sinne der Ermittlung des w -Wertes gemessen.²¹³ Zur groben Orientierung wurde zunächst auch nur destilliertes Wasser mit der Pipette (als Tropfen definierter Größe) oder mit der Laborsprühflasche aufgetragen, um daran das kapillare Saugen rein qualitativ zu bewerten.

Auswertung der Musterflächen zur Reduktion der gipsbelasteten Oberflächen

Sowohl die Bereiche mit geringer Wasseraufnahme als auch jene mit zäher, fester und besser saugfähigen Oberfläche konnten mit Ammoniumkarbonat und den Ionentauscher hinsichtlich der Saugfähigkeit verändert werden. In unterschiedlichem Maße hat sich die Wasseraufnahme verbessert, was für eine Öffnung des Porenraums spricht bzw. im Umkehrschluss zeigte, dass sowohl die zähen, festen Oberflächen und auch die Bereiche mit schlechter Saugfähigkeit mit dem Gips in Verbindung stehen. Die beste Wirkung hinsichtlich der Gipsreduktion bzw. der Öffnung des Porenraums hatte Ammoniumkarbonat. Insbesondere die wiederholte Anwendung führte zu einer deutlichen Steigerung der Saugfähigkeit. Die Ionentauscher waren weniger effektiv als Ammoniumkarbonat, obgleich Akeogel das beste Ergebnis unter den Ionentauschern aufwies. Die jeweils längere Anwendung erwies sich als effektiver als die kürzere.

²¹³ Vorgehen nach D'ham, Meinhardt, Niemeyer 2010, S. 82

Zusammenfassung der Resultate der Masterarbeit von Janosch Klein

Die Arbeit mit dem Titel „Untersuchungen zur Festigung vergipster Sandsteinoberflächen mit Kieselsäureester“ wurde im Wesentlichen im Wintersemester 2021/22 im Studiengang Konservierung und Restaurierung, Fachrichtung Stein, erstellt. Sie ist in ihrer Fragestellung angelehnt an die Problematik der vergipsten Oberflächen des Steinernen Albums, in Kombination mit den entfestigten, darunterliegenden Bereichen. Dieses Phänomen trifft nur auf einige der Reliefs zu, ist aber für diese mit Hinblick auf den langfristigen Erhalt von enormer Bedeutung. Es muss entsprechend den Ergebnissen der Festigkeitsuntersuchungen daran erneut eine tiefreichende Festigung durchgeführt werden. Die Interaktion dieser Maßnahme mit den Vergipsungen in der oberflächennahen Zone gilt es zu betrachten sowie die Möglichkeiten der Gipsreduktion in diesem Zusammenhang. Nachfolgend werden nur die wesentlichen Ergebnisse der sehr umfangreichen Masterarbeit dargestellt. Die Arbeit selbst kann zu einem späteren Zeitpunkt über das Hornemann Institut als e-Publication bezogen werden.

Vermutet wurde, auch mit Bezug auf die Beobachtungen am Steinernen Album und vor dem Hintergrund der Tatsache, dass sich Gips solitär sehr gut mit KSE festigen lässt, dass die Festigung vergipster Oberflächen zu einer Versprödung bzw. einem Anstieg des E-Moduls und auch zur überproportionalen Festigkeitssteigerung führt. Die Arbeit von J. Klein, die an künstlich vergipsten Probekörpern aus Buntsandstein einer dem Steinernen Album ähnlichen Varietät (tonig, mittel- bis feinkörnig) erfolgt sind, zeigte jedoch, dass die ermittelten Festigkeitsparameter (Ultraschallgeschwindigkeit und biaxiale Biegezugfestigkeit) nach der Festigung von unbehandeltem Material deutlich über den Werten nach der Festigung von vergipsten Probekörpern lagen. Aus den Ergebnissen der aufgeführten Untersuchungsreihen konnte abgeleitet werden, dass bei der Festigung ohne eine vorherige Vergipsung ein deutlich festeres und steiferes Material entstanden ist als nach der Festigung vergipster Oberflächen. Ein weiterer Hinweis auf die Behinderung der Festigung durch Gips konnte bei der Betrachtung der vor der Festigung mit Ionentauschern und Ammoniumcarbonat behandelten Probereihen gewonnen werden. Hier kam es sowohl bei den Ultraschallmessungen als auch bei der Messung der biaxialen Biegezugfestigkeit und des statischen E-Moduls dazu, dass nach einer vorangegangenen Gipsreduzierung durch die Festigung größere Festigkeitssteigerungen erreicht werden konnten als nach der Festigung von vergipstem Material. Das spricht eindeutig dafür, dass Gips die Festigkeitszunahme behindert hat. Es ist zu vermuten, dass Gips, welcher sich in den Kornzwischenräumen der Gesteinskörner abgelagert hat, den Platz für die Gelabscheidung des Kieselsäureesters belegt hat. Da das vermutlich die Stellen sind, wo Kieselgel die größte Festigkeitssteigerung erreichen und am effektivsten anhaften kann, wurde die Festigkeitszunahme durch die Anwesenheit von Gips vermutlich reduziert. Weiterhin kann nicht völlig ausgeschlossen werden, dass Gips die Vernetzung des Kieselgels negativ beeinflusst hat. Gegen eine Behinderung der Festigung durch Gips sprechen jedoch die Tiefenprofile aus der Bohrwiderstandsmessung. Hier kam es häufig dazu, dass gesteigerte Bohrwiderstände in einer Tiefe zwischen 0,3 und 1 mm, welche nach der Vergipsung gemessen wurden, nach der Festigung im gleichen Verhältnis angestiegen sind als die gesamte Messkurve. Das wiederum würde für eine tendenzielle Überfestigung der Oberfläche durch eine Festigung vergipster Bereiche sprechen. Es könnte argumentiert werden, dass die unterschiedlichen Ergebnisse aus Bohrwiderstandsmessung auf der einen Seite und der Messung des Ultraschalls, des statischen E-Moduls und der biaxialen Biegezugfestigkeiten auf der anderen Seite darin begründet sind, dass hier unterschiedliche Tiefenabschnitte erfasst werden. Während bei der Bohrwiderstandsmessung Messergebnisse in einem Raster von 0,02 mm dargestellt werden, bezieht sich die Ultraschallmessung nur auf die Tiefe von 3 mm und die biaxialen Biegezugfestigkeitsmessung und die Messung des statischen E-Moduls auf den gesamten Tiefenabschnitt von 0-5 mm. Daraus könnte man ableiten, dass, da sich ein Großteil des Gipses vermutlich an der absoluten Oberfläche angesammelt hat, eine Überfestigung nur im Bereich bis 1 mm Tiefe vorhanden war und diese deshalb nur durch die

Bohrwiderstandsmessung aufgelöst werden konnte. Das würde jedoch immer noch nicht erklären, warum bei allen anderen Messmethoden eine geringere Festigkeitssteigerung in Anwesenheit von Gips im Vergleich zur Festigung unbehandelten Materials festgestellt werden konnte. Es scheint unwahrscheinlich, dass sich an der Oberfläche mit einer hohen Gipskonzentration zu einer Überfestigung und in tieferliegenden Zonen mit geringerer Konzentration im Vergleich zur Festigung unbehandelten Materials ein deutlich reduzierter Festigkeitsanstieg infolge der Festigung eingestellt hat. Das würde bedeuten, dass der Festigkeitsanstieg bei hoher Gipskonzentration im Vergleich zur Festigung unbehandelten Materials steigt, während er bei niedriger Gipskonzentration im Vergleich zu unbehandeltem Material sinkt. Dem muss in nachfolgenden Untersuchungen im Detail nachgegangen werden. Die Ergebnisse der Untersuchung deuten darauf hin, dass es im Zuge der Festigung von vergipsten Gesteinsoberflächen weder zu einer Überfestigung noch zu einer Versprödung der Oberfläche kommt. Die Messungen der Ultraschallgeschwindigkeit, der biaxialen Biegezugfestigkeit und des statischen E-Moduls legen nahe, dass die Wirksamkeit einer Festigung auf vergipsten Oberflächen deutlich reduziert wird. Lediglich die Ergebnisse der Bohrwiderstandsmessung lassen eine teilweise Überfestigung in einer Tiefe zwischen 0,3 und 1 mm vermuten. Es ist hier jedoch nicht klar, ob diese Ergebnisse die tatsächliche Gesteinsfestigkeit wiedergeben und wie belastbar die hier gewonnenen Ergebnisse sind. Da die Bohrwiderstandsmessung die einzige der hier durchgeführten Messung ist, die diesen oberflächennahen Tiefenbereich auflösen konnte, kann eine Überfestigung der obersten Kornlagen nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Bei der Frage, mit welchem Mittel zur Gipsreduzierung die stärkste Öffnung der Oberfläche erreicht werden konnte, zeigte der Ionentauscher (Akeogel) die besten Eigenschaften. Es bleibt offen, inwieweit die Ergebnisse der Gipsreduzierung mit Ammoniumcarbonat durch auf der Oberfläche verbliebenes Calciumcarbonat beeinflusst wurden und inwieweit eine intensivere Nachreinigung die Ergebnisse verbessert hätten. Nach der Anwendung des Ionentauschers konnte eindeutig belegt werden, dass dessen Wirksamkeit durch eine vorangegangene Festigungsmaßnahme stark behindert wurde. Es konnte jedoch auch festgestellt werden, dass dieser auch nach einer vorangegangenen Festigungsmaßnahme zumindest an den oberen Kornlagen Gips entfernen konnte. Auch die Gipsreduzierung durch Ammoniumcarbonat und Ammonium-Dihydrogenphosphat scheint durch eine vorangegangene Festigungsmaßnahme behindert zu werden.

Aus den in der Arbeit gewonnenen Ergebnissen lassen sich Schlüsse für das praktische Vorgehen bei einer Gipsreduzierung zu festigender Oberflächen im Allgemeinen und in Bezug auf das Steinerne Album ableiten. Prinzipiell sollte, wann auch immer die Möglichkeit besteht, die Gipsreduzierung vor der Festigung durchgeführt werden, da diese eine deutlich bessere Wirksamkeit aufweist. Weiterhin kann nach jetzigem Kenntnisstand eine Überfestigung der Oberflächenzone noch nicht völlig ausgeschlossen werden. Die Untersuchungen legten nahe, dass eine mögliche Überfestigung durch eine vorherige Gipsreduzierung verhindert werden kann. Das gilt sowohl für eine Gipsreduzierung mit Ionentauschern als auch für eine Gipsreduzierung mit Ammoniumcarbonat. Ob eine Gipsreduzierung auch durch eine Vorfestigung mit einem Festigungsmittel geringerer Gelabscheidungsrate gestört wird und ob es auch hier zu einer Überfestigung kommen könnte, konnte nicht abschließend geklärt werden. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass die Wirkung der Gipsreduzierung auch durch eine Vorfestigung zumindest verringert wird. Da eine auf die Festigung folgende Gipsreduzierung im schlimmsten Fall wirkungslos sein könnte, muss bei der Entscheidung, ob die Gipsreduzierung vor oder nach der Festigung durchgeführt wird, abgewogen werden, ob die vorherrschende Vergipsung ein größeres Schadenspotenzial birgt als ein Verlust von oberflächlichen Bestandteilen bei einer Kompressenaufgabe. Bei der Wahl des Mittels zur Gipsreduzierung ist festzuhalten, dass verschiedenen Faktoren den Entscheidungsprozess beeinflussen

sollten. Zu nennen sind hier unter anderem die Tiefe und Konzentration der Vergipsung sowie ob die Möglichkeit einer darauffolgenden Kompressenentsalzung bzw. einer Umwandlung der leichtlöslichen Salze besteht. Zur Entscheidungsfindung wäre es ratsam, zunächst Probeflächen mit den infrage kommenden Mitteln zur Gipsreduzierung anzulegen. Diese sollten durch Vor- und Nachmessungen auf ihre Wirksamkeit überprüft werden. Hier wäre beispielsweise eine Überprüfung der Oberflächenöffnung über Wassertropfentest und Wasseraufnahmemessungen sinnvoll. Auch eine mikroskopische Betrachtung der Oberfläche sowie eine quantitative Gipsanalyse könnte zur Erfolgsüberprüfung beitragen. Sollten Ionentauscher und Ammoniumcarbonat vergleichbare Ergebnisse zeigen, ist der Ionentauscher vorzuziehen, da es hier nicht zum Eintrag leichtlöslicher Salze kommt, welche nicht mehr ohne Weiteres aus dem Porenraum entfernt werden können.

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass sich Ammonium-Dihydrogenphosphat aufgrund der Abdichtung der Oberfläche sowie des vermutlich hohen Eintrags leichtlöslicher Salze nicht zur Anwendung am Steinernen Album eignet. Dieses Verfahren birgt jedoch dadurch, dass Gips nahezu vollständig in ein noch trägeres Mineral umgewandelt wird, welches auch bei Temperaturen über 50° C keiner nennenswerten Hydratwasserabgabe unterliegt sowie aufgrund der festigenden Eigenschaften, ein gewisses Potenzial.²¹⁴

7.5 Strukturelle Festigung

7.5.1 Bewertung der Altkonservierung unter Beachtung einer möglichen Frühhydrolyse

Im Rahmen der großen Restaurierungskampagne Ende der 1990er Jahre sind alle Reliefs über die Trichterinjektion²¹⁵ gefestigt worden. Dabei sind insgesamt nahezu 3500 Liter KSE²¹⁶ in das Steinerne Album eingebracht worden. Hierzu wurden mit einem ca. 30 cm langen Bohrer (siehe Abb. 114) schräg zahlreiche Löcher in die Reliefoberflächen gebohrt. Der tiefste Punkt der jeweiligen Bohrlöcher lag ungefähr in einer Tiefe von 25 cm unterhalb der Oberfläche. Das Festigungsmittel wurde anschließend über Trichter in die Bohrlöcher eingebracht, fortwährend, bis sich an der Reliefoberfläche ein Feuchtehorizont erkennbar war (siehe Abb. 113). An diesem Punkt ging man davon aus, dass der KSE von der Tiefe an die Oberfläche migriert war und darüber die erhoffte tiefgreifende Festigung erzielt worden ist²¹⁷. Trotz dieses nachvollziehbaren sehr guten Ansatzes für die großangelegte Festigungskampagne, die damals von einer Expertenkommission beschlossen worden war und die sich über alle zwölf Reliefs erstreckte, zeigen sich stellenweise, wie bereits erwähnt, weiterhin Rückwitterung, Mürbzonen, Schuppenbildung sowie absandende Bereiche. Diese Phänomene deuten eher auf eine unzureichende Festigkeit der Oberfläche hin. Diese Beobachtungen gaben Anlass, die Effektivität der Maßnahme der Injektionsfestigung zu überdenken und messtechnisch zu prüfen. Es ging dabei um den Versuch zu klären, ob trotz der im Rahmen der Impedanzmessung ermittelten überhygroskopischen Zustände relativ kurz unterhalb der Reliefoberfläche die Migration des über Trichter eingebrachten Kieselsäureesters tatsächlich bis zur Oberfläche hätte erfolgen können. Die beobachteten Mürbzonen in manchen Bereichen sprechen eher gegen die Entwicklung eines harmonischen Festigkeitsprofils von der Tiefe des Injektionslochs bis an die Oberfläche. Eventuell handelt es sich in den entsprechenden Zonen bei den Feuchtehorizonten an der Oberfläche in Folge der Festigung zumindest teilweise um das Lösungsmittel. Es wurde der These nachgegangen, ob die eingebrachten Kieselsäureester eventuell stellenweise in der

²¹⁴ Wendler, 2017, S. 165

²¹⁵ KSE 100 und 300

²¹⁶ Restaurierungsdokumentation P. Fiedler

²¹⁷ freundl. mündl. Mitteilung P. Fiedler



Abb. 113: Situation der Injektionsfestigung über auf Bohrlöcher aufgesetzte Trichter im Zuge der umfassenden Restaurierungskampagne 1998/99 am Bereich des Reliefs *Herzog Christian*

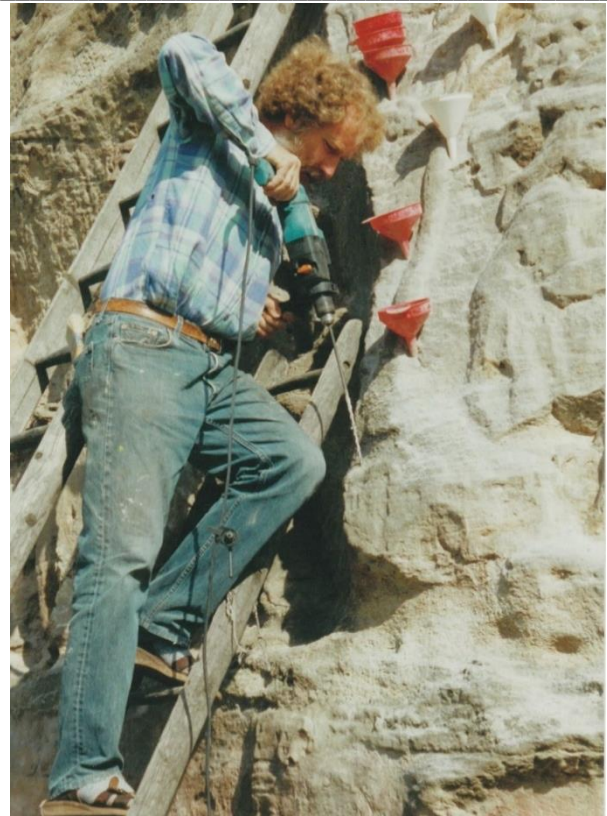


Abb. 114: Vorgehen im Rahmen der Injektionsfestigung: mit einem 30 cm langen Bohrer wurden zahlreiche Kanäle zur Injektion in die Reliefoberflächen gebohrt. Über aufgesetzte Trichter ist das KSE eingebracht worden.

Tiefe einer Frühhydrolyse unterworfen waren, die die Migration der Substanz erheblich eingeschränkt hätte. Dazu wäre sicherlich zumindest eine 30%ige Porensättigung mit Wasser erforderlich gewesen. Durch die Porenfüllung mit Wasser, würde die Hydrolyse (Bildung von Silanolgruppen) und anschließende Kondensation (Bildung von Siloxanverbindungen) (siehe Abb. 115) der Moleküle sehr schnell einsetzen, wodurch sich größere Moleküle bilden, die schlechter durch den Porenraum migrieren können.

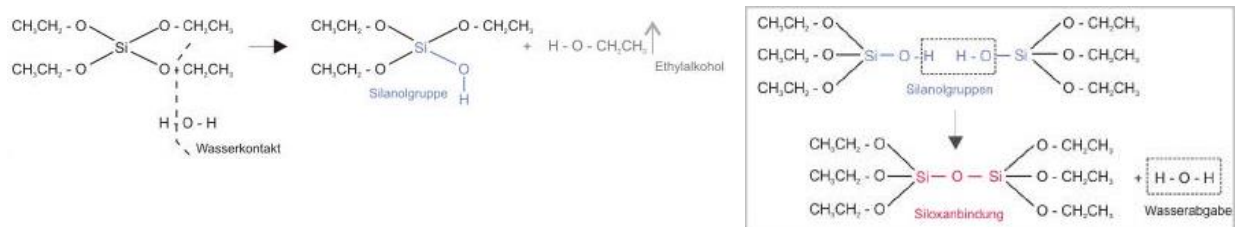


Abb. 115: Hydrolysereaktion (links) mit Bildung der Silanolgruppen und Kondensationsreaktion (rechts) mit der Bildung der Siloxanverbindungen

Zur Klärung dieser Fragestellung sind unter Beachtung der lithostratigraphischen Bandbreite des Steinernen Albums zwei Bohrkerne (19 und 21 cm Tiefe) entnommen worden²¹⁸ – ein Bohrkern der mittelkörnigen rötlichen Varietät (*Hochzeit zu Kana*) und ein weiterer, die feinkörnige, hellgraue Varietät repräsentierend (*Christus in der Kelter*) (siehe Abb. 116). Beide Bohrkerne stammen jeweils aus dem Randbereich, der gemäß dem Injektionsplan von 1998/99 in jedem Fall auch von dem Festigungsmaterial erreicht wurde, aber nicht bildhauerisch bzw. künstlerisch gestaltet ist. Anhand der Kerne sollte die Beurteilung der Effektivität der durchgeführten Festigungsmaßnahme bzw. die Lage der Festigungsfront erfolgen.

²¹⁸ mit denkmalrechtlicher Genehmigung



Abb. 116: Bohrkerne zweier verschiedener Varietäten, die aus den Reliefs *Hochzeit zu Kana* und *Christus in der Kelter*, jeweils aus gefestigten Bereichen entnommen wurden, um daran exemplarisch die Effektivität der Festigung von 1998/99 zu überprüfen.

In den nachfolgenden Abbildungen (117-120) sind die Entnahmestellen der beiden Bohrkerne (aus Abb. 116) angegeben, jeweils auch mit ihrer Verortung in den Maßnahmenkartierungen von 1998/99.

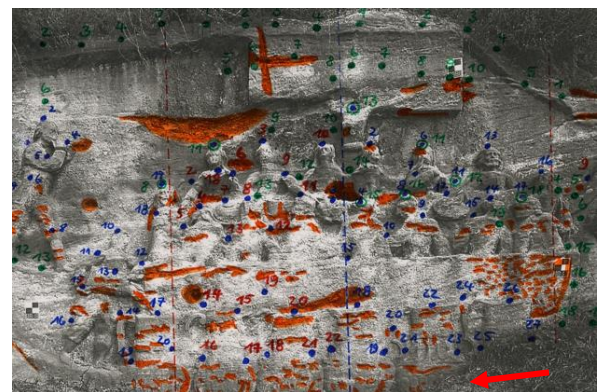


Abb. 117: Verortung des Bohrkerns im Relief *Hochzeit zu Kana* (Pfeil) im unteren Bereich, hellgraue, mittelkörnige Varietät und in der Maßnahmenkartierung (Pfeil), unweit von zwei durch blau Punkte markierte Injektionslöcher bzw. unterhalb zweier Bohrlöcher und damit ungefähr auf Höhe derer tiefsten Stellen.



Abb. 118: Verortung des Bohrkerns im Relief *Christus in der Kelter*, li. Bereich (Pfeil) im oberen Bereich, rötliche, feinkörnige Varietät

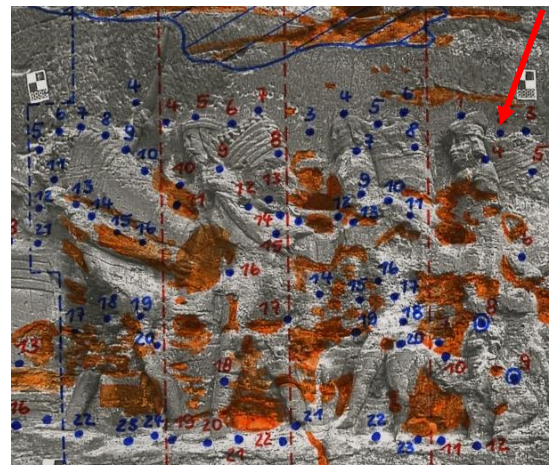


Abb. 119: Verortung des Bohrkerns in der Maßnahmenkartierung des Reliefs *Christus in der Kelter*, li. Bereich (Pfeil), direkt neben einem mit einem blauen Punkte markiertem Injektionsloch. Da die Bohrlöcher über die Trichter bis zum oberen Rand mit KSE gefüllt waren, müsste auch dieser Bereich getränkt worden sein.

Eine wichtige Methode zur Bestimmung der Festigkeit eines Gesteins ist die Methode der Ultraschallmessung. Diese wurde an den Bohrkernen angewendet, um im Tiefenprofil die Festigkeit und darüber die Effektivität der Konservierungsmaßnahme von 1998/99 zu bestimmen. Derartige Tiefenprofilmessungen sind im Rahmen der ursprünglichen Maßnahme nicht ausgeführt worden.

Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit

Die Grundzüge des Verfahrens werden beschrieben in DIN EN 14579 „Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Geschwindigkeit der Schallausbreitung“ (2005) und im Merkblatt B4 „Merkblatt für das Ultraschall-Impuls-Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile“ der DGzFP (1999). Ultraschall ist eine mikromechanische Schwingung, die sich als Welle in festen, flüssigen und gasförmigen Medien ausbreitet. Die Messfrequenzen beginnen oberhalb des hörbaren Schallbereiches bei 20kHz und sind bei Naturstein bis etwa 1 MHz für Untersuchungen nutzbar. Die Wellen breiten sich in verschiedenen Bewegungsformen im Gestein aus und werden dementsprechend auch unterschiedlich stark gedämpft. Die wichtigsten Wellenformen sind die Stoßwellen (Longitudinalwellen, Primärwellen, P-Wellen) und die Scherwellen (Transversalwellen, Sekundärwellen, S-Wellen). Die einfachste Messgröße bei Ultraschallmessungen in Transmission ist die Ultraschallgeschwindigkeit, die sich aus der Zeit, die der Schall zur Durchquerung einer definierten Messstrecke benötigt, errechnet.

Die Messungen wurden mit einem 350 KHz Schallwandler durchgeführt, dessen Spitzen trocken angekoppelt worden sind. (Messgerät Fa. Krompholz). Die Proben sind vor der Messung einheitlich auf 20°C und 40% rel. Feuchte konditioniert worden. Im nachfolgenden Diagramm (siehe Abb. 120) sind die Ultraschallgeschwindigkeit beider Bohrkern tiefenabhängig vergleichend dargestellt.

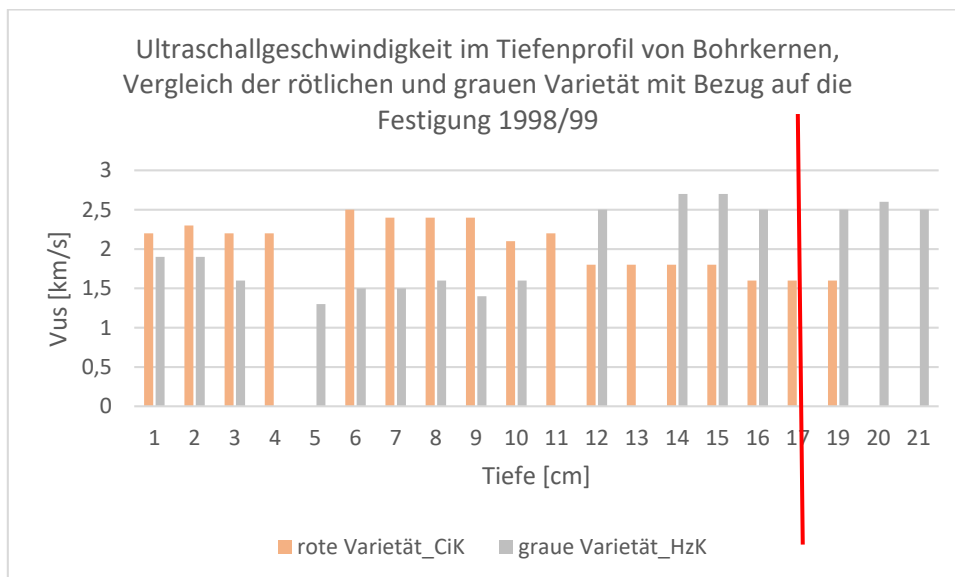


Abb. 120: Vergleichende Darstellung der Ultraschallgeschwindigkeiten der beiden entnommenen Bohrkern (rötliche, feinkörnige aus dem Relief *Christus in der Kelter* und die graue, mittelkörnige Varietät aus dem Relief *Hochzeit zu Kana*). Die rote Linie markiert die angenommenen Bohrtiefe zur Injektion des Festigers.

Die ermittelten Ultraschallgeschwindigkeiten liegen für die feinkörnige, rötliche Varietät (Relief *Christus in der Kelter*) im Mittel bei 2,0 km/s. Auch bei der hellen, mittelkörnigen Varietät (Relief *Hochzeit zu Kana*) liegt der Mittelwert über den gesamten Kern bei 2,0 km/s. Allerdings zeigen beide Kerne eine ganz unterschiedliche Verteilung der Messwerte im Tiefenprofil. Die rötliche Varietät wurde im Relief *Christus*

in der Kelter ganz oben, oberhalb eines Weinkorbes entnommen (siehe Abb. 118). Der Entnahmebereich fiel entsprechend der Maßnahmenkartierung aus 1998/99 direkt zusammen mit einem Injektionsloch. Der Festiger wird vom schräg in die Tiefe eingebrachten Bohrloch aus natürlich kapillar, aber auch in gewissem Maße der Gravitation folgend in das umliegende Gestein gesaugt (gesickert) worden sein²¹⁹. Daher kann davon ausgegangen werden, dass der Bohrkern, der in diesem Bereich bis in 19 cm Tiefe genommen wurde, im hinteren Bereich eher unbeeinflusst vom Festiger sein sollte. Die hier anzutreffenden Ultraschallgeschwindigkeiten von 1,6 km/s repräsentieren daher sicherlich die Festigkeit des unbehandelten, unverwitterten Gesteins dieser Varietät. Bezogen darauf bedeutet der Bereich zwischen 0-11 cm Tiefe, wo die Ultraschallgeschwindigkeiten zwischen 2,1 und 2,4 km/s liegen eine deutliche Steigerung der Festigkeit. In diesem Bereich kann theoretisch von einer erfolgreichen Konsolidierung, zumindest ab 11 cm Tiefe hin zur Oberfläche ausgegangen werden. Im Kern der hellgrauen, feinkörnigen Varietät verhalten sich die gemessenen Ultraschallgeschwindigkeiten dem entgegen. Der beprobte Bereich liegt sowohl auf der Höhe als auch unterhalb von Injektionslöchern. Daher ist davon auszugehen, dass sich der Festiger über das Bohrloch für die Injektion (ca. 20-25 cm) auch in diesen Tiefen ringsherum verteilt hat und eben auch in Richtung Oberfläche „wanderte“. Ohne eine angelegte Verdunstungsebene wird es in der Tiefe von 20-25 cm relativ schwierig sein, eine fokussierte Migration zur Reliefoberfläche zu erwirken. Entsprechend den physikalischen Grundsätzen der Ultraschallmessung unterstützt die Entwicklung der Geschwindigkeiten im Bohrkern der grauen, feinkörnigen Varietät den Ansatz, dass es möglicherweise aufgrund einer Frühhydrolyse des KSE zu einer eingeschränkten Migration des Festigers und zu einer Gelabscheidung in größeren Tiefen kam. Die Messergebnisse geben einen charakteristischen Hinweis auf eine unzureichende KSE-Migration in Richtung Oberfläche. So liegen die Kennwerte zwischen ca. 21-12 cm Tiefe im Mittel bei 2,6 km/s, was für den Mittleren Buntsandstein eine gute Festigkeit widerspiegelt.²²⁰ Im Vergleich zur Zone zwischen 10-3 cm, deren Mittelwert signifikant niedriger bei 1,5 km/s liegt und der häufig an den Reliefs im Monitoring ermittelt wird. Dieser Wert spiegelt eher nicht erfolgreich konsolidiertes Material wider. Zur Oberfläche (0-3 cm) steigt die Ultraschallgeschwindigkeit nochmal etwas an (Mittelwert 1,8 km/s). Hierfür können Oberflächenfestigung, wie sie im Rahmen der Restaurierungskampagne 1998/99 ebenfalls stellenweise durchgeführt worden sind bzw. auch im Pflegeprozess angewendet wurden, verantwortlich sein. Es wird also deutlich, dass ein mächtiges Gesteinspaket von der Oberfläche bis in ca. 12 cm Tiefe eine eher geringe Festigkeit hat, die für den dauerhaften Erhalt der Reliefs problematisch sein könnte.

Zusätzlich zu den Ultraschallmessungen wurden auch rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen an Proben unterschiedlicher Tiefe durchgeführt. Allerdings erbrachte dieser Versuch keinen eindeutigen Nachweis von Kieselgelen im Porenraum. Entsprechendes hätte das abschließende Fazit zur Verteilung des Festigers über das Tiefenprofil sehr gut unterstützen können. An dieser Stelle müsste eventuell noch einmal mit systematischeren rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen nachgeprüft werden. Bislang stützt sich die Vermutung der Frühhydrolyse bzw. der unzureichenden Festigerverteilung vor allem im oberflächennahen Bereich von ca. 0-12 cm Tiefe auf die dargestellten Ultraschallmessungen an der feinkörnigen, grauen Buntsandsteinvarietät und im Wesentlichen auf den Beobachtungen der Schadensphänomene, wie Mürbzonen unter einer spannungsreichen Oberfläche (siehe Abb. 121) sowie den stellenweise schuppig und körnigen Materialverlusten (siehe Abb. 122). Auf dieser Grundlage sind im Rahmen des Projekts Überlegungen getroffen worden, welches Vorgehen zur Festigung für die aktuell als kritisch zu bewerteten Reliefs als alternativer Pflegeprozess etabliert werden könnte, um die Festigkeit

²¹⁹ Entsprechend Beobachtungen wurden im Rahmen der Wiederbehandlungskampagne am Relief *Herzog Christian* im Sommer 2021 gemacht.

²²⁰ Daten für Mittleren Buntsandstein aus Meinhardt & Grimm (2018): Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland, Teil 1, Kapitel Sachsen-Anhalt.

des Gesteins unterhalb der Oberfläche bis in eine Tiefe von ca. 10 cm zu steigern und so den langfristigen Erhalt der Reliefs zu unterstützen. Die Tiefe von 10 cm eines Festigungshorizontes bleibt zwar hinter dem Ziel der ursprünglichen Kampagne 1998/99, wird aber als ausreichend erachtet, insbesondere, wenn man so sicherer bezüglich einer möglichen Frühhydrolyse wäre.



Abb. 121: Zäh, spannungsreiche Oberfläche mit Pusteln, darunter sandend – Überfestigung oder Interaktion mit Gips, Relief *Herzog Christian*, linker Bereich



Abb. 122: Relief Hochzeit zu Kana: schuppiger und körniger Materialverlust. Auch hier sind helle Ränder und Flächen zu erkennen, bei denen es sich ebenfalls vermutlich um kristallisierte Salze handelt.

Bei diesen Überlegungen galt es darüber hinaus zu berücksichtigen, dass manche Reliefs die in Kapitel 7.4 beschriebenen vergipsten Oberflächen besitzen, die sich häufig durch eine zähe und spannungsreiche „Haut“ auf relativ weichem und instabilen Gestein zeigen, wie in den Bohrwiderstandsmessungen deutlich wurde (siehe Kap. 7.4.2). In diesen Bereichen weiterhin zu versuchen, über die Oberfläche einen Eintrag an Festigungsmittel zu erreichen, wie im Rahmen der Pflege immer wieder versucht wurde, funktioniert erfahrungsgemäß an den betroffenen Reliefs nicht. Vor dem Hintergrund der zu Projektbeginn postulierten guten Ansprache des Gipses auf eine KSE-Festigung, die zwar für ein vergipstes Sandsteingefüge entsprechend den Untersuchungen von J. Klein²²¹ nicht bestätigt werden konnte, für Gips als solitäres Material allerdings schon, würde ein Fortfahren der Festigung über die Oberfläche wahrscheinlich zu einer weiteren Versprödung der dünnen, nur wenige Kornlagen ausmachenden „Gips Haut“ führen.

Im Rahmen verschiedener Lehrformate im Studiengang sind die einzelnen Fragstellungen dieser komplexen Pflegeaufgabe untersucht worden. In wiederholten Praxiskampagnen vor Ort, in Großjena, sind zahlreiche Versuche zur petrophysikalischen Untersuchung der vergipsten Oberflächen, vor allem mit Hinblick auf die Porosität im Sinne der kapillaren Saugfähigkeit, vorgenommen worden. Auf dieser Datengrundlage erfolgte die Auswahl verschiedener Musterflächen, an denen wiederum Materialien zur Gipsreduktion und -umwandlung appliziert wurden (siehe Kap. 7.4.2). Die Nachuntersuchungen der Effektivität dieser Maßnahmen zur Öffnung des oberflächennahen Porenraums erfolgten ebenfalls über die Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme und des Bohrwiderstandes (siehe Kap. 7.4.2). Darüber hinaus wurden die Möglichkeiten der Wiederbehandlung der betroffenen Reliefs in Form einer angepassten Wiederholung der Injektionsfestigung eruiert. Das Thema der Festigung vergipster Sandsteinoberflächen mit Kieselsäureester im Zusammenhang mit verschiedenen Gipsreduktions-

²²¹ Klein 2022

maßnahmen wurde, wie bereits beschrieben, auch im Rahmen der Masterarbeit von J. Klein²²² im Detail betrachtet. Die beiden Themenfelder, die im Zusammenhang mit der vergipsten Oberfläche stehen, sind bereits im Kapitel 7.4 erläutert worden. Nachfolgend wird die im Projekt angelegte Musterfläche zur Wiederbehandlung unter angepasster Anwendung der Injektionstränkung im Relief *Herzog Christian*, bezüglich der Planung und Umsetzung vorgestellt.

7.5.2 Wiederbehandlung mittels einer angepassten Injektionstränkung

Das ursprünglich im Rahmen des Monitoring- und Pflegeplans festgelegte Vorgehen, dass im Falle des Auftretens eines neuerlich sandenden Bereichs über Berieselung eine Festigung ausgeführt werden soll, funktionierte nach Aussage von Peter Fiedler schon recht bald nicht mehr. Er beschrieb schon seit langer Zeit, dass der Untergrund zwar entfestigt wirkt, die Oberfläche aber nur schlecht saugfähig für KSE ist. Wie oben beschrieben, ist nicht nur die mangelnde Saugfähigkeit ein Problem für eine Festigung über die Oberfläche, sondern eben auch die Vergipsung selbiger, die in Interaktion mit dem KSE wohlmöglich noch stärkere Spannungen zu erzeugen vermag. Die Ultraschall- (siehe Abb. 120) und Bohrwiderstandsmessungen (siehe Kap. 7.4.2) zeigen auch, dass der Sandstein im untersuchten Bereich, aber vor allem von der Oberfläche bis in 10 cm Tiefe ein niedriges Festigkeitsniveau aufweist. Daher wird angestrebt, eine Alternative zur ursprünglich festgelegten Vorgehensweise zu finden. Es lag nahe, sich dem intensiv und fachmännisch geplanten Vorhaben der Injektionsfestigung erneut zuzuwenden, allerdings in wesentlichen Punkten in modifizierter Weise. Die ursprüngliche massiv invasive Injektionsfestigung wurde von einem größeren Fachgremium entschieden, dem damals u.a. Prof. Dr. Rolf Sneathlage, Prof. Dr. Heiner Siedel, das Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK) und die erfahrenen Restaurator*innen des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen-Anhalt angehört haben. Auch wenn die massive „Durchlöcherung“ der Reliefs (siehe Abb. 113 und 114) und der damit einhergehende Verlust der Originalsubstanz selbstverständlich zu bedauern sind, war dieser Ansatz, der eine möglichst tiefgreifende Festigung des anstehenden Gesteins anstrebte, das einzig mögliche Vorgehen, unter den Gegebenheiten vor Ort eine tiefgründige Festigung der Reliefs zu bewirken.

Vor dem Hintergrund des erheblichen Feuchtegehalts im Porenraum, der in Tiefen bis 20 cm ermittelt worden ist (siehe Kap. 7.1) und die zumindest für die graue Varietät exemplarisch als Potential für eine Frühhydrolyse bzw. eine unzureichende Migration des Festigungsmittels postuliert wird, lag es daher nahe, die Tiefe der Anlage der Injektionskanäle zu reduzieren und nur bis in maximal 10 cm Tiefe einzubringen. Dafür wurde extra eine Bohrschablone erstellt (siehe Abb. 123). Die maximale Bohrtiefe wird für die Maßnahme in 1998/99 entsprechend den Aufzeichnungen und der Länge des verwendeten Bohrers mit ca. 20-25 unterhalb der Reliefoberfläche angenommen. War doch damals auch angestrebt, eine möglichst große Gesteinstiefe mit dem Festiger zu durchtränken.

²²² Klein 2022

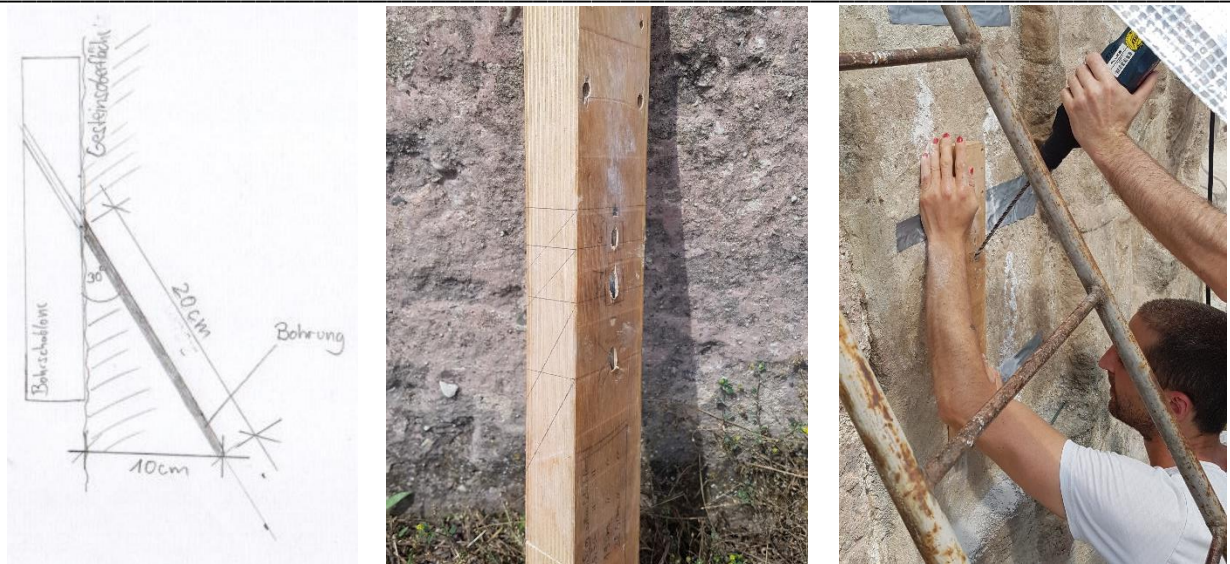


Abb. 123: Bohrschablone (erstellt von J. Klein), mit der es möglich war, in unterschiedlichen Winkeln am Relief zu bohren, um zu gewährleisten, dass die geplanten 10 cm Bohrtiefe am tiefsten Punkt der Bohrung, bezogen auf die Reliefoberfläche, erreicht wird.

Nach der Bestimmung der optimalen Festigungstiefe, eines geeigneten Zeitpunktes²²³ und den zu verwendenden Festigungsmitteln wurden am Relief *Herzog Christian*, selbstverständlich im ungestalteten Bereich, Musterflächen für eine exemplarische, wiederbehandelnde Injektionsfestigung²²⁴ angelegt.



Abb. 124: Bohrkernentnahmestelle am unteren Rand der li., unteren Musterfläche, hellgraue mittelkörnige Varietät, Vorzustand vor der Injektionsfestigung. Die rote Linie markiert den unteren Rand der Musterfläche mit KSE 300.



Abb. 125: Gewonnener Bohrkern, der einen relativ bröseliges, instabiles Material repräsentiert.

²²³ Durch die begrenzte Zeit für Praxisübungen, die der Studienplan frei lässt, und die Coronasituation wurde erst im Sommer 2021 gefestigt.

²²⁴ Denkmalrechtliche Genehmigung liegt vor.

Begleitet wurden diese Probefestigungen durch die Methode der Bohrwiderstandsmessung, die minimal invasiv²²⁵ und hochauflösend im Tiefenprofil erlaubte, den Zustand vor und nach der erneuten Injektionsfestigung zu überprüfen. Weiterhin erfolgten Ultraschallmessungen, um eine mögliche Festigkeitsentwicklung zu detektieren. Hierfür wurde jeweils vor und nach der Festigung ein Bohrkern im angrenzenden ungestalteten Bereich entnommen (siehe Abb. 124 und 128)²²⁶.



Abb. 126: Bohrkernentnahmestelle (Pfeil) rechts neben dem Relief *Herzog Christian*, in der gleichen Gesteinsvarietät verortet, wie die beiden Musterflächen rechts des Pferdes (KSE 300) - hellgraue mittel- bis grobkörnige Varietät



Rot - feinkörnig	1		R 59 Cardina
Grau/ Ocker - mittleres Korn	2		YR 24 Pale sepia
Hellgrau/ Ocker - grobkörnig	3		E 27 African
Helles Ocker - mittleres Korn	4		E 44 Clay

Abb. 127: Lithologische Kartierung des Reliefs *Herzog Christian* aus den 1990er Jahren mit Legende. Der Pfeil markiert das Bohrkernloch.



Abb. 128: Bohrkern aus dem markierten Bereich. Relativ stabiles Material.

Die Musterflächen wurden am 14. und 15. Juli 2021 angelegt. Es herrschten tageszeitlich schwankende Temperaturen an den Gesteinsoberflächen zwischen 24°C bis zu 49°C bei rel. Luftfeuchtigkeiten zwischen 29% und 49%. Die Oberflächen wurden mit großen Planen vor zu starker Besonnung (Verdunstung des Lösungsmittels) und vorhergesagtem Regen vorsorglich geschützt (siehe Abb. 129).²²⁷



Abb. 129: Abplanung der Musterflächen. Wiederholung der Injektionsfestigung am Relief *Herzog Christian*



Abb. 130: Überblick der Musterflächen am Relief *Herzog Christian*

²²⁵ Bohrlöcher von 3 mm Durchmesser

²²⁶ Denkmalrechtliche Genehmigung liegt vor.

²²⁷ Der Regen blieb aus.

Zur Durchführung der Probefestigungen wurden im Relief *Herzog Christian* vier ungestaltete Flächen jeweils mit einer Abmessung von 30 x 50 cm ausgewählt (siehe Abb. 130). Diese befinden sich links neben dem Wappen (siehe Abb. 131) sowie auf der rechten Seite, neben dem Knie des Pferdes und in der Höhe des Pferdehufes (siehe Abb. 132). Hinsichtlich der verwendeten Festiger fiel die Auswahl hauptsächlich auf KSE 300, ein monomerer Kieselsäureester, der die kleinsten Moleküle der kommerziell zu erwerbenden KSE-Produkte besitzt (2-3 nm). Daher war das günstigste Eindringverhalten zu erwarten. Und darauf lag vor allem der Fokus, vor dem absoluten Festigkeitszuwachs.



Abb. 131: Zwei Musterflächen links des Wappens – oben KSE 100 und KSE 300 unten

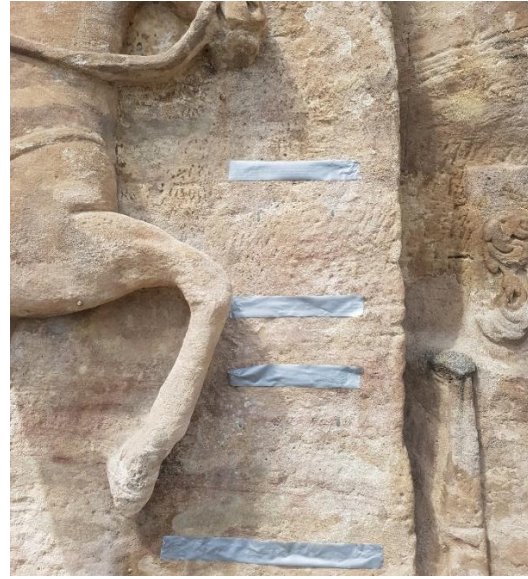


Abb. 132: Zwei Musterflächen rechts des Pferdes – beide mit KSE 300

In einer Fläche wurde versuchsweise auch KSE 100 verwendet, ein oligomerer KSE, der stark verdünnt ist. Der Wirkstoffgehalt ist also geringer, aber die Molekülgröße ist mit ca. 6-8 nm mehr doppelt so groß wie die des monomeren KSE.

Ergebnis der Injektionsfestigung

Bezüglich des Vorgehens bei der Festigung hat sich die verwendete Konstruktion grundsätzlich als geeignet herausgestellt.²²⁸ Hierbei ist zu beachten, dass die Schläuche der Konstruktion möglichst kurz gehalten werden müssen, um einen stetigen Fluss des Festigungsmittels zu gewährleisten (siehe Abb. 133). Weiterhin kam es vereinzelt dazu, dass sich Luftblasen in den Schläuchen gebildet haben, wodurch der Fluss des Festigungsmittels unterbrochen wurde. Das könnte durch die Verwendung eines Ventils am oberen Ende des Schlauches, mit welchem die Luft abgelassen werden kann, perspektivisch verhindert werden.²²⁹ Weiterhin empfiehlt es sich die Größe des Behälters, in welchen das Festigungsmittel vorrätig gehalten wird, zukünftig zu vergrößern. Bezüglich der Positionierung der Injektionslöcher hat sich gezeigt, dass sich die Feuchtehöfe der 20 cm voneinander entfernten Bohrlöcher meist nach kurzer Zeit verbunden haben (siehe Abb. 134 und 135). Geht man davon aus, dass die Ausdehnung des Feuchtigkeitsvolumens in der Tiefe ähnlich verhält, könnte man den Abstand der einzelnen Bohrlöcher zueinander vergrößern, wodurch weniger invasiv gearbeitet werden könnte. Betrachtet man die horizontale Ausdehnung der Feuchtehöfe so scheint ein Abstandsmaß von ca. 30 cm als ausreichend. Bezüglich des vertikalen

²²⁸ beschattet

²²⁹ Bei der Verwendung von Ventilen besteht jedoch die Gefahr, dass die Gummidichtungen durch den Festiger angegriffen werden, was die Gefahr eines unkontrollierten Austretens des Festigungsmittels birgt.

Abstandes hat sich gezeigt, dass ebenfalls ein Maß von 30 cm und sogar mehr bei fast allen Injektionen überbrückt werden kann.



Abb. 133: Aufhängung der Behälter mit dem KSE, für einen möglichst knickfreien Verlauf der Schläuche



Abb. 134: Musterfläche oben rechts - KSE 300 nach 75 min des Saugens (li.) und in Folge des Nachsaugens (re.)



Abb. 135: Musterfläche unten rechts - KSE 300 nach 75 min des Saugens (links) und Musterfläche unten links - KSE 300 nach 75 min (rechts)

Bezüglich der Auswertung der Klimadaten scheint der Festigungszeitpunkt Mitte Juli gut geeignet. Es sollte jedoch unbedingt darauf geachtet werden, die Festigung in den frühen Morgenstunden durchzuführen und die Oberfläche dauerhaft vor Sonneneinstrahlung zu schützen.

In Tabelle 6 sind die aufgenommenen Festigungsmengen der einzelnen Injektionslöcher dokumentiert. Die Mengen sind deutlich unterschiedlich.

Tab. 6: Aufgenommenen Festigungsmengen der einzelnen Injektionslöcher

Übersicht Injektionsfestigung					
Position	Festigungsmittel	Festigermenge nach 75 min	Feuchtehof vertikal	Feuchtehof horizontal	
oben links linkes Bohrloch	KSE 100	0 ml	0 cm	0 cm	
oben links rechtes Bohrloch	KSE 100	75 ml	18 cm	18 cm	
unten links linkes Bohrloch	KSE 300	1600 ml	40 cm	23 cm	
unten links rechtes Bohrloch	KSE 300	430 ml	26 cm	19 cm	
oben rechts linkes Bohrloch	KSE 300	930 ml	44 cm	20 cm	
oben rechts rechtes Bohrloch	KSE 300	960 ml	27 cm	24 cm	
unten rechts linkes Bohrloch	KSE 300	720 ml	34 cm	25 cm	
unten rechts rechtes Bohrloch	KSE 300	1560 ml	29 cm	33 cm	

Die unterschiedliche Menge an aufgenommenem Festigungsmittel lässt sich einerseits durch die unterschiedlich starke Verwitterung des anstehenden Gesteins bzw. dessen Inhomogenität erklären. Betrachtet man die Kartierung der Gesteinsvarietäten des Reliefs *Herzog Christian* zeigt sich zwar, dass dort hauptsächlich die Varietät heller Ocker mittleres Korn zu verorten ist (siehe Abb. 136). Aber die Qua-



Sandsteinvarietäten	Ziffer	Linie	Raster	Farb Nr	COPIG
Rot - feinkörnig	1		■	R 59	Cardina
Grau/ Ocker - mittleres Korn	2	vvvvv	▨	YR 24	Pale sepia
Hellgrau/ Ocker - grobkörnig	3	ooooo	○	E 27	African
Helles Ocker - mittleres Korn	4	●	E 44	Clay

Abb. 136: Lithologische Kartierung Relief *Herzog Christian* mit Legend

lität des Gesteins ist doch offensichtlich sehr variabel, wie die Bohrkerne des Vorzustandes in beiden Teilen des Reliefs widerspiegeln (siehe Abb. 125 und 128). Hier kommt es lediglich im oberen Bereich der linken unteren Probefläche zu einem Varietätenwechsel in Form eines dünnen Streifens der Varietät grauer Ocker mittleres Korn (siehe Abb. 136). Jedoch zeigen die zahlreichen Karstenmessungen, die im Verlauf des Monitorings am Steinernen Album durchgeführt wurden, dass es selbst innerhalb einer Varietät zu stark unterschiedlichem Wasseraufnahmeverhalten kommen kann. Auch die geringe Aufnahme des Festigungsmittels KSE 100 (0 bis 75 ml /100 min) (siehe Tab. 6) könnte durch diesen Umstand erklärt werden. Weiterhin ist es möglich, dass dieses Festigungsmittel aufgrund der größeren Partikelgröße schwerer in das Gestein eindringen konnte. Ein weiterer Faktor, der das Eindringen des Festigungsmittels gestört haben könnte, ist die hohe Umgebungstemperatur von 49,5°C während des Versuches. Bei der Festigung mit KSE 100 herrschten im Vergleich zu den anderen Messungen mit Abstand die höchsten Temperaturen, da sie zuletzt ausgeführt worden sind, nachdem morgens um 7:00 Uhr mit den anderen begonnen wurde. Es konnte weiterhin festgestellt werden, dass die Größe der Feuchtehöfe nur teilweise von der aufgenommenen Menge an Festigungsmittel abhängig war. Das zeige beispielsweise der Vergleich der Injektionsfläche rechts oben links Bohrloch mit 930 ml aufgenommenem Festiger und einer durchschnittlichen Größe des Feuchtehofes von 30,5 cm mit der Injektion links unten links Bohrloch mit 1600 ml aufgenommenem Festiger und einer durchschnittlichen Größe des Feuchtehofes von 31,5 cm. Die nahezu identische Größe des Feuchtehofes bei stark unterschiedlicher Menge an aufgenommenem Festiger, gibt ein Hinweis auf laterales Saugen bzw. auf ein Abwandern des Festigungsmittels in die Tiefe und könnte einerseits durch die natürliche Inhomogenität des Gesteines oder andererseits durch eine inhomogene Verwitterung begründet sein. Hier könnte durch oberflächliche Verwitterungsphänomene wie Entfestigung bzw. Mürbzone oder Schalenbildung zu einem oberflächenparallelen Saugverhalten führen. Auch feine Risse könnten zum Abwandern des Festigungsmittels in tieferliegende Zonen führen. Es konnten bei den Tränkungen auf der rechten Seite ein unterschiedlich starkes Nachsaugen nach der Unterbrechung der Zufuhr des Festigungsmittels festgestellt werden.

Wie bereits beschrieben, sind bereits vor der Anlage der Musterfläche zwei Bohrkerne für die Messung der Ultraschallgeschwindigkeit im Tiefenprofil zur Grundlagenermittlung für die Bestimmung des möglichen Festigkeitszuwachses nach der Tränkung entnommen (siehe Abb. 124 und 126). Benachbart dazu sind ca. 8 Wochen nach der Festigung erneut zwei Kerne in diesen Bereichen entnommen worden. An allen vier Kernen sind im Labor der FH Potsdam Ultraschallmessungen im Tiefenprofil durchgeführt worden, deren vergleichende Darstellungen in den nachfolgenden Abbildungen 137 und 138 gezeigt sind.

Auswertung der Ultraschall- und Bohrwiderstandsmessungen

In Abbildung 137 ist der Vergleich der Festigkeiten vor und nach der Infusion des Festigers KSE 300 in der Musterfläche links unten im Relief *Herzog Christian* abgebildet. Die orangefarbenen Balken kennzeichnen den Zustand vor der erneuten Tränkung mit KSE 300 und die blauen Balken den nach der Festigung. Da der Bohrkern, der im Vorfeld entnommen wurde, sehr bröselig war (siehe Abb. 125), konnten daran nicht so viele Ultraschallmessungen gemacht werden, wie an dem Kern der Nachmessungen. Deutlich ist in der Gegenüberstellung zu erkennen, dass bei dieser Varietät die Festigkeit des Sandsteins deutlich zugenommen hat. Die Bohrtiefe lag bei 10 cm von der Oberfläche. Vor dieser Tiefe ausgehend ist offensichtlich ringsherum, auch in tiefere Bereiche, Festiger gesaugt worden. Auch wenn für die tieferen Zonen der direkte Vergleich zu Vormessungen fehlt, da der ursprüngliche Kern eben nicht lang genug war, ist das Niveau dennoch deutlich höher. Der Zuwachs an Festigkeit schwankt zwischen 97 % nahe der Oberfläche und 25% in der Tiefe.

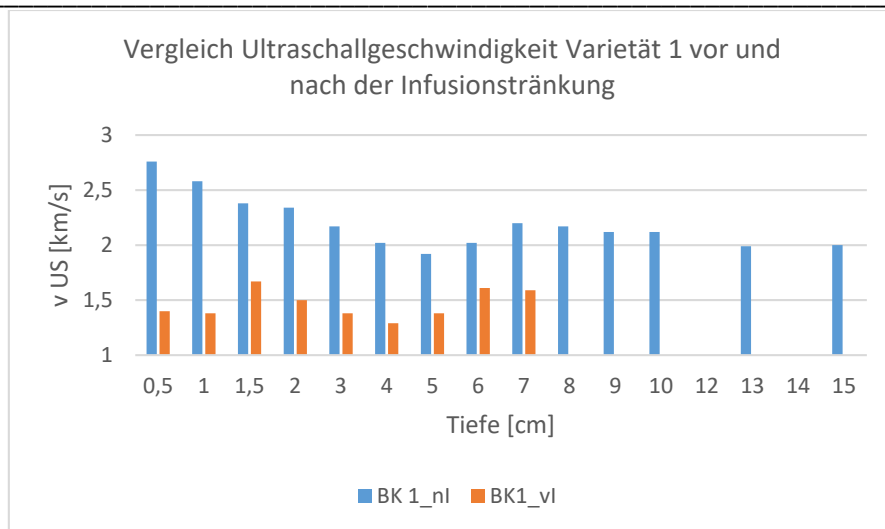


Abb. 137: Vergleichende Darstellung der Ultraschallmessungen vor und nach der Infusionsfestigung mit KSE 300, Varietät 1, im linken Bereich des Reliefs *Herzog Christian*

Der zweite Bohrkern bzw. die andere Varietät, die bereits vor der erneuten Festigung deutlich stabiler war (siehe Abb. 128) als das Material aus dem linken Bereich des Reliefs, erfuhr durch die Nachfestigung mit KSE 300 keinen entsprechenden Festigkeitszuwachs (siehe Abb. 138). Die orangefarbenen Balken spiegeln bereits ein viel höheres Ausgangsniveau der Festigkeit wider, obwohl die Varietät laut lithologischer Kartierung entsprechend sein sollte. Ausgehend von der Lage des Injektionslochs in 10 cm Tiefe ist Festiger wahrscheinlich in alle Richtungen migriert. Sowohl in tieferen Bereichen, aber auch zur Oberfläche hin sind zumindest kleine Festigkeitszunahmen zu verzeichnen, die jedoch im vorderen Bereich nur bei 7 bis maximal 25 % liegen.

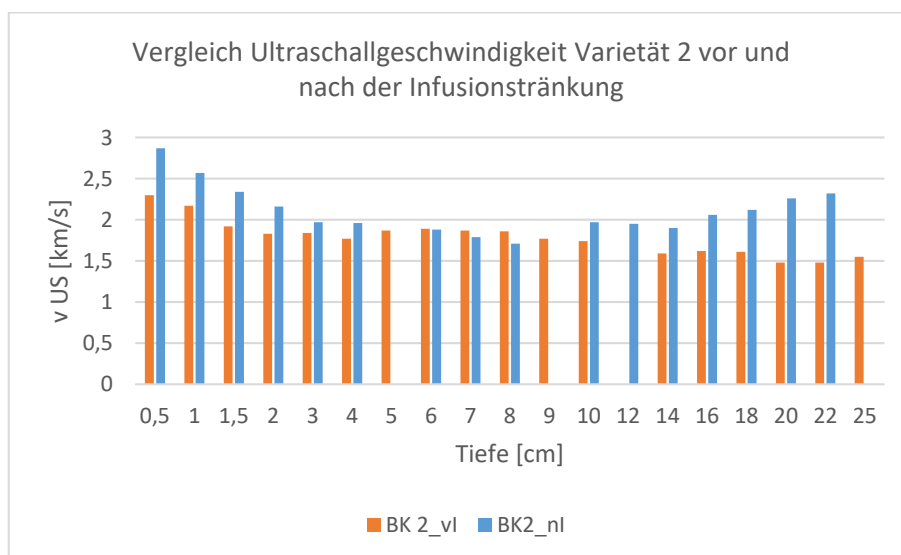


Abb. 138: Vergleichende Darstellung der Ultraschallmessungen vor und nach der Infusionsfestigung mit KSE 300, Varietät 2, im rechten Bereich des Reliefs *Herzog Christian*

Insgesamt wird aus dem Verlauf der Festigkeitszuwächse deutlich, dass das Phänomen der Frühhydrolyse in beiden betrachteten Versuchsflächen nicht vorliegt.²³⁰ Insbesondere im Bereich der entfestigten

²³⁰ Die Musterfläche mit dem KSE 100, links oben, wurde nicht abschließend untersucht, da der Zustrom an Festigungsmittel zwischenzeitlich unterbrochen war.

Varietät ist ein deutlicher Festigkeitszuwachs durch die Infusion mit KSE 300, bei guter Migration, erreicht worden.

Neben den Ultraschallmessungen ist auch die Methode der Bohrwiderstandsmessung für die Bestimmung der Festigkeitsentwicklung in Folge der Injektionsfestigung im oberflächennahen Bereich eingesetzt worden. In diesem Zusammenhang sind alle Musterflächen in repräsentativem Maße vor- und nachuntersucht worden. Die kompletten Ergebnisse können bei Interesse zur Verfügung gestellt werden. An dieser Stelle wird die Entwicklung der Bohrhärte nur exemplarisch vorgestellt, da es ansonsten den Rahmen des Berichts übersteigen würde.

Die Bohrparameter waren folgende: Rotationsgeschwindigkeit: 400 rpm, Vorschub: 15 mm/min und Bohrtiefe: 20 mm. Obwohl nach der Tränkung bis zur Nachuntersuchungen nahezu 8 Wochen vergangen waren, sind die Oberflächen noch immer hydrophob gewesen. Generell wurde in den Untersuchungen stets darauf geachtet, dass in verschiedenen Höhen um das Injektionsloch, das an der Oberfläche ansteht, die Bohrwiderstandsmessungen erfolgt sind (siehe Abb. 139). Darüber sollte gewährleistet werden, dass im Nachhinein möglichst viele Informationen abgeleitet werden können.



- 1: ca. 11 cm unter Injektionsloch
- 2: ca. 4 cm unter Injektionsloch
- 3: ca. 2,5 cm über Injektionsloch

Abb.: 139: Anordnung der Bohrlöcher der Bohrwiderstandsmessungen, in Bezug auf das Bohrloch für die Injektion (Pfeil)

In der Abbildung 140 stehen die Bohrprofile aus einem Bereich der Musterfläche rechts unten, die vor der Tränkung ermittelt wurden. Man erkennt einen oberflächennahen Festigkeitspeak, der bis in 2 mm Tiefe reicht. Dahinter fällt die Festigkeit auf knapp die Hälfte ab.

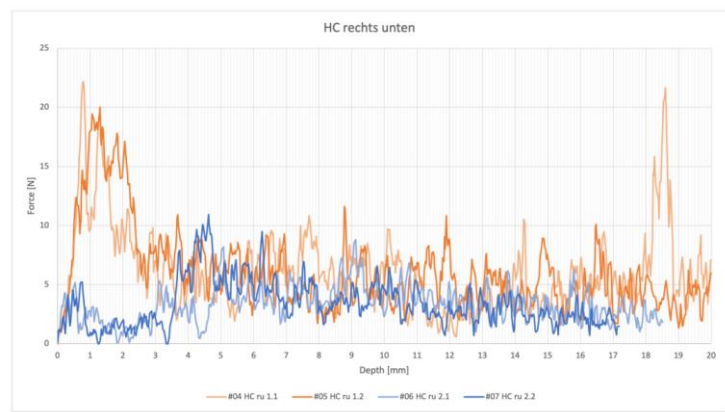
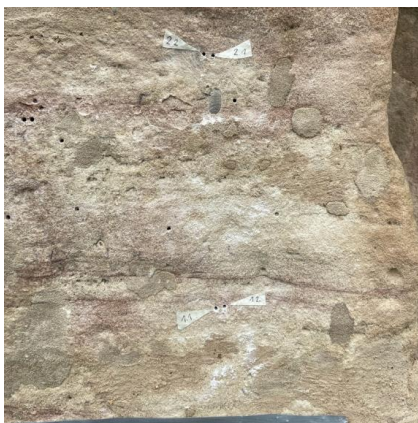


Abb.140: Musterfläche rechts unten, Relief *Herzog Christian*, vor der Tränkung

Nach der Festigung (siehe Abb. 141) ist einerseits die Festigkeit gesteigert, und noch dazu reicht die Zone einer höheren Festigkeit in größere Tiefe. Der Peak ist breiter. Die Festigkeit ist deutlich gesteigert worden. Bis in ca. einen Zentimeter Tiefe ist eine höhere Festigkeit erreicht worden. Die Messungen in der Musterfläche unten rechts ist nah zu dem bröseligen Sandstein (siehe Abb. 125, Varietät 1) angelegt. Hier konnte mit dem Ultraschall ein massiver Festigkeitszuwachs detektiert werden (siehe Abb. 137). Warum mit der Bohrwiderstands-messung, anders als mit der Ultraschallmessung, die Steigerung der Festigkeit in der Tiefe zwischen 1 und 2 cm Tiefe nicht so deutlich ausfällt, kann nicht schlüssig beantwortet werden. Es zeigt aber deutlich, dass zur Bewertung von Naturstein bzw. Maßnahmen nicht nur eine Messmethode ausreicht. Das Verständnis eines Sachverhalts wird durch die kombinierte Anwendung mehrere Messmethoden verbessert.

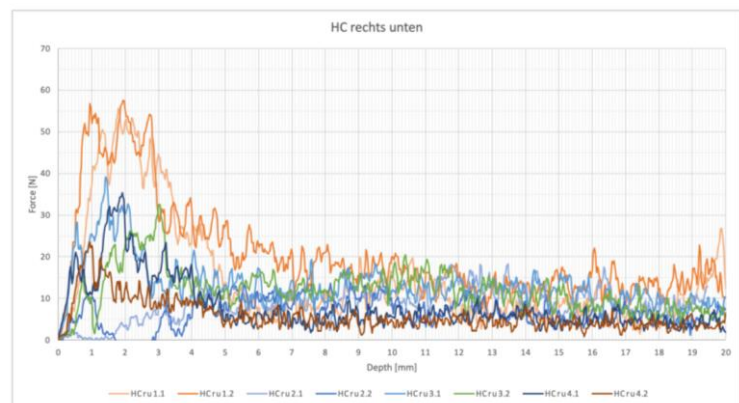
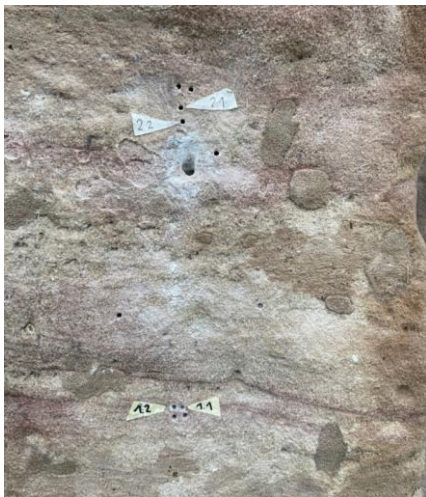


Abb. 141: Musterfläche rechts unten, Relief *Herzog Christian*, nach der Tränkung mit KSE 300

In Anlehnung an die Ergebnisse der Masterarbeit von J. Klein²³¹ und den Versuchen im Rahmen des DBU-Projekts wäre es optimal, vor der Injektionsfestigung eine Gipsreduktion mit Ammoniumkarbonat (oder dem Ionentauscher Akeogel) und anschließender Anwendung von Neutralkompressen durchzuführen. Das würde helfen, den Festigkeitspeak vor der Tränkung zu harmonisieren. Die Anbindung an die silikatischen Bestandteile des Sandsteins würde darüber hinaus noch besser nach Gipsreduktion funktionieren.

Weiterhin soll noch die Musterfläche unten links am Relief *Herzog Christian* bezüglich der Bohrwiderstandsmessungen im Zuge der Tränkung mit KSE 300 betrachtet werden (siehe Abb. 142-143). Auch hier ist durch die erneute Festigung einerseits eine Steigerung der Festigkeit im Peakbereich erzielt worden und darüber hinaus ist das Gesamtniveau der Festigkeit innerhalb des untersuchten Bereichs von 0-2 cm gesteigert worden.

²³¹ Klein 2022

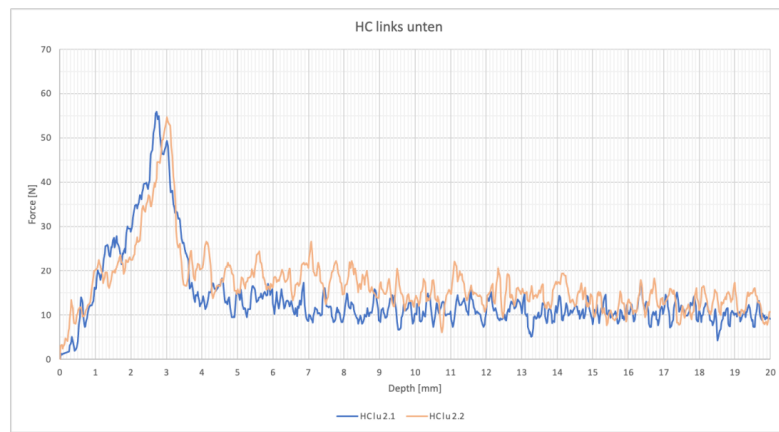
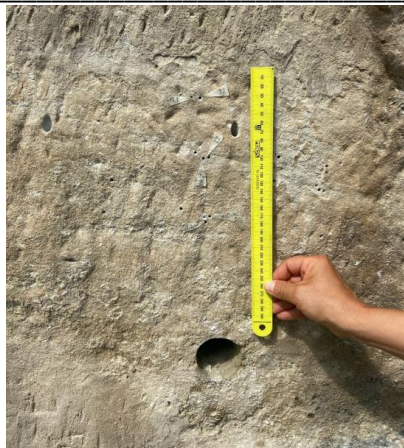


Abb. 142: Musterfläche links unten, Relief *Herzog Christian*, vor der Tränkung

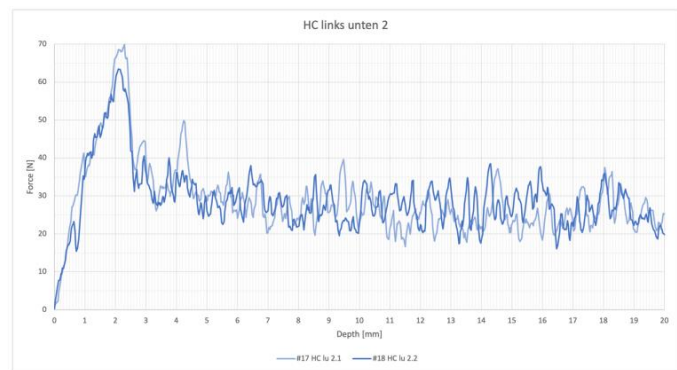
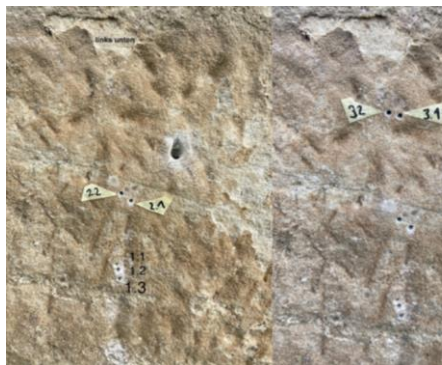


Abb. 143: Musterfläche links unten, Relief *Herzog Christian*, nach der Tränkung mit KSE 300: Messung 9 cm unter dem Injektionsloch (Oberfläche)

7.6 Steinergänzung und Steininjektion

7.6.1 Aktueller Zustand der Steinergänzungsmassen

Wie eingangs beschrieben, sind in manchen Bereichen der Reliefs die Ergänzungen nicht sehr dauerhaft. Normalerweise setzt Peter Fiedler für alle Ergänzungen an den Reliefs Remmers Steinergänzungsmörtel weich ein. An manchen Stellen funktioniert das auch dauerhaft gut, aber für andere wiederum ist im Rahmen einer Bachelorarbeit von J. Zilm²³², die auch durch das Landesamt für Denkmalpflege mitbetreut worden ist, nach geeigneten Alternativen gesucht worden. Wie erwähnt, wird seit dem Abschluss der Restaurierungsarbeiten Ende der 1990er Jahre der Restauriermörtel „RM-weich“²³³ angewandt. Bei großen, tiefen Fehlstellen wird zusätzlich, zur Unterfütterung, ein Salzspeicherputz eingebracht, auf welchem anschließend der farblich angepasste Deckmörtel angetragen wird. Die mit den „RM weich“ durchgeführten Ergänzungen und Anböschungen sind über weite Bereiche positiv zu beurteilen. Allerdings wurde schon 2005 beim Monitoring des Objektes durch Peter Fiedler beschrieben²³⁴, dass das Produkt den Anforderungen am Steinernen Album nicht in allen Bereichen genügt. Ergänzungen sanden und sind auch von Rissen durchzogen, liegen stellenweise hohl und weisen Flankenablösung auf. Auch wird teilweise bemängelt, dass der Mörtel zu hart für das Gestein ist. Daher erfolgt an weichen

²³² Zilm, 2018, Entwicklung eines Steinergänzungsmörtels für freibewitterten Buntsandstein in Großjena, BA-Thesis, FH Potsdam

²³³ RM Remmers GmbH, Restauriermörtel weich

²³⁴ Monitoringbericht P. Fiedler

Gesteinsuntergründen die Anpassung der Ergänzungsmasse durch Waschsand. Bei groben Kornlagen wird, um sich dem Gestein strukturell anzunähern, dem Mörtel Waschkies in einer Größenordnung von 0 bis 4 mm zugeführt²³⁵. Die optische Anpassung der Antragungen an die Gesteinsfarbigkeit über die zusätzliche Zugabe von Pigmenten passt sich in vielen Bereichen recht gut an das umliegende Gestein ein, erscheint aber andererseits stellenweise auch ungenügend (siehe Abb. 144), da in zeitlichen Abständen farbige Retuschen an den Ergänzungen vorgenommen werden muss(t)en. Ein Abplatzen sowohl der Ergänzungen und auch des teilweise darunterliegenden Salzspeicherputzes wurden verstärkt ab 2005 beobachtet. Aber auch schon früher sind schadhafte Mörtelergänzungen in den Dokumentationsunterlagen von Peter Fiedler beschrieben worden, so für das Relief *Herzog Christian*. Der heutige Zustand des Reliefs kann im Vergleich zu den anderen Bildern als relativ gut bewertet werden. Seit den Restaurierungsmaßnahmen 1998/99 wurde auch hier „RM-weich“, wenn nötig mit Salzspeicherputz als Unterfütterung verwendet. Einige dieser Antragungen zeigten bereits 2001 die ersten Risse und platzten 2002 teilweise ab.²³⁶ Über die Jahre gab es entsprechend den Monitoringberichten von Peter Fiedler immer wieder Problemstellen, beispielsweise im Bereich der Hufe des Pferdes. Dort sind verstärkt Salzeffloreszenzen an den Ergänzungen beobachtet worden. Die Salze sind höchstwahrscheinlich Grund für die begrenzte Haltbarkeit bzw. die Verwitterung der Antragungen, in Form von Absanden und Abplatzungen. Peter Fiedler spricht in seinem Monitoringbericht von 2003 auch von einem Bröckelzerfall der Ergänzungen. 2006 wurden im Rahmen des Monitorings erstmalig Hohlstellen in diesem Relieffeld erwähnt, im Bereich der Ergänzungen und am Gesteinsuntergrund. Durch Risse in den Ergänzungen kann Wasser eindringen und erosiv wirken. Darüber wird die Ergänzung tendenziell von innen entfestigt. Die hohl liegenden und zum Teil durch Flankenablösung charakterisierten Altergänzungen deuten auf eine Unverträglichkeit der Ergänzungsmasse zum Gesteinsuntergrund hin. Sie scheinen in einigen Bereichen zu fest und starr, wodurch mechanische Spannungen zur Ablösung vom Gesteinsuntergrund führen. Diese Antragungen müssen als potentielle Schadfaktoren angesehen werden, da durch Risse und Flankenablösungen Wasser an das Gestein geleitet wird und dort komplex schädigend wirken kann. Des Weiteren werden erfahrungsgemäß jedes Mal beim Ablösen der Antragungen Kornlagen des Gesteinsmaterials abgerissen, wodurch weitere Originalsubstanz verloren geht.

7.6.2 Überlegungen zur Anpassung der Steinerfüllungsmassen an die Objektsituation

Im Rahmen der Bachelorthesis von J. Zilm²³⁷ wurden drei verschiedene Steinerfüllungsmassen, auf Acrylatbasis, auf Kieselolbasis und auf Basis eines mineralischen Bindemittels, hinsichtlich ihrer Eignung für perspektivische Ergänzungen am Steinernen Album untersucht.²³⁸ Darüber hinaus wurde auch der derzeitige verwendete Mörtel „RM-weich“ petrophysikalischen Tests unterzogen ($\beta_{BZ} = 3,26 \text{ N/mm}^2$, relativ geringe Wasseraufnahme), um mögliche Gründe für die Unverträglichkeit mit dem unterliegenden Gestein herauszufinden. Die alternativen Mörtelrezepturen sind für die Anwendung in tiefen Fehlstellenbereichen auch in Kombination mit einem unterliegenden Salzspeichermörtel²³⁹ getestet worden.

Hauptsächlich ging es bei den Untersuchungen im Rahmen der Bachelorarbeit um die Ergänzung kleiner, flache Fehlstellen (siehe Abb. 144).

²³⁵ freundl. mündl. Mitteilung P. Fiedler

²³⁶ Monitoringbericht P. Fiedler

²³⁷ Zilm, 2018, BA-Thesis

²³⁸ Detaillierte Ergebnisse sind in der Bachelorthesis von J. Zilm einzusehen.

²³⁹ Größtkorn 1-2 mm, mineralischer Leichtzuschlag Poraver für stabiles Porenvolumen und effektive Salzeinlagerung Als Bindemittel diente ein NHL 2 der Firma Otterbein (B-Z 1 :3 und alternativ 1:4).



Abb. 144: Ergänzung (Remmers weich) mit Flankenablösung. Das darunterliegende Gestein sandet stark. Die Ergänzung erscheint zu hart

Die Ergänzungsmassen zeigen aktuell stellenweise starke Flankenablösungen, die so neu entstandenen Hohlstellen sorgen für zusätzliche Auswaschungen der Originalsubstanz.

Die Ergänzungsmassen sind vordergründig für die kleinen, flachen Fehlstellen gedacht. Sie sollten auch in pustelig aufgewitterten Bereichen angewendet werden können. Weiterhin sollen auch feine, abstehende Schalen und dünne Risse angebösch und gesichert werden können. Für tiefe Fehlstellen wurde der mineralische Salzspeicherputz gemeinsam mit dem Jahn-Mörtel „M70“²⁴⁰ und dem Remmers-Mörtel „RM-weich“ erprobt. Tiefe Fehlstellen entstehen vor allem durch Abplatzungen, abgebrochene Figurenbestandteile und unterschiedlich tiefe Auswitterungen im Gestein.

Aufgrund der verschiedenen Varietäten am Steinernen Album und deren unterschiedlichen Eigenschaften, war es im Rahmen der Bachelorarbeit nicht möglich, auf alle Gegebenheiten einzugehen. Daher fokussiert sich die Auswahl der Ergänzungsmassen und deren Zusammensetzung auf die Eigenschaften der roten feinkörnigen Varietät.

Für die Auswahl des geeigneten Bindemittels bzw. B/Z-Verhältnisses sind neben der Kompatibilität zum Sandstein auch thermische und hygri-sche Umgebungsbedingungen zu berücksichtigen. Wie in Kapitel 7.1.2 dargelegt, kommen an den Reliefoberflächen z.T. extreme Temperaturen von bis zu 49°C²⁴¹ vor.

Die in der Bachelorthesis geprüften Rezepturen sind aufgrund des begrenzten zeitlichen Rahmens der Qualifikationsarbeit nur an Probekörpern und nicht am Objekt selbst geprüft worden. Demnach müssten die Ergebnisse aus dem Labor noch an das Steinerne Album direkt hinsichtlich der Übertragbarkeit geprüft werden. Es ging im Rahmen der Thesis vor allem darum mögliche Alternativen für den mineralischen Remmers-Mörtel weich eingebracht werden, um diese perspektivisch für die kleinen und flachen Ergänzungen alternativ einzusetzen. Sowohl eine kiesel-sol-(siehe Abb. 145) als auch eine acrylatgebundene Rezeptur (Fa. Romstedt) haben sich im Einsatz an den Probekörpern als aussichtsreich erwiesen.

²⁴⁰ Mittlerweile nicht mehr verfügbar.

²⁴¹ siehe Kapitel 7.5.2

Bestandteile		Größe [mm]	Anteil [Gew.-%]	Gesamtanteil
Zuschlag	Quarzmehl / Plastorit 00 ⁷³	0 – 0,063	20	1000 g
	Quarzmehl	0,063 – 0,125	3,5	
	Brechsand/ Quarzsand bzw. -mehl	0,125 – 0,25	76,5	
Bindemittel	Syton X30			140 ml
Pigment				< 2 %

Abb. 145: Rezeptur C2 auf Kieselolbasis (Quelle: J. Zilm)

Als Unterfütterung für tiefe Fehlstellen eignet sich der Salzspeicherputz A4 (siehe Abb. 146). Er lässt sich verhältnismäßig gut herstellen und kann mit seinen Eigenschaften nach einer Trocknungsdauer von mindestens 28 Tagen überzeugen. Bei den mineralischen Massen, welche als Deckmörtel für die tieferen Fehlstellen eingesetzt werden sollten, erwies sich der Jahn-Mörtel aufgrund der hohen Festigkeit, der geringen Elastizität und der geringen Wasseraufnahmeeigenschaft als ungeeignet. Er wurde als Alternative für den Remmers-Mörtel weich, der bereits seit vielen Jahren für alle Fehlstellen am Steinernen Album Einsatz findet, untersucht. Jedoch konnte der Jahn-Mörtel gegenüber dem Remmers-Mörtel bei den petrophysikalischen Untersuchungen nicht überzeugen.

Bestandteile		Größe [mm]	Anteil [Vol.-%]	Gesamtanteil: A3	Gesamtanteil: A4	Gesamtanteil: A4,5
Zuschlag ⁷⁰	Quarzmehl	0 – 0,5	50	3 RT	4 RT	4,5 RT
	Quarzsand	1 – 3	30			
	Poraver	0,25 – 0,5	20			
Bindemittel	Otterbeiner NHL 2	-	-	1 RT	1 RT	1 RT

Abb. 146: Rezepturen der untersuchten Salzspeicherputze, markiert A4 (Quelle: J. Zilm)

Somit ist auch eine Untermauerung des Einsatzes von Remmers weich für die großen Fehlstellen gelungen. Für die kleinen, flachen Fehlstellen, die mit Remmers weich ausgeführt häufig Flankenablösungen und Hohllagen zeigen, sollte jedoch zukünftig mit einem alternativen Bindemittel gearbeitet werden. Als Ergänzungsmasse für die feinen Fehlstellen sollte das Rezept C2 der kieselolgebundenen Massen (siehe Abb. 145) noch in situ geprüft werden. Es zeichnet sich durch eine gute Verarbeitbarkeit und Struktur aus. Die farbige Anpassung der Masse erfolgt problemlos und, aufgrund des Gesteinszuschlags, mit einem geringen Pigmentanteil. Es wurde in den Tests eine geringe Festigkeit ermittelt. Diese Eigenschaften könnten jedoch durch eine Nachfestigung mit KSE verbessert werden. Da das Vorschlämmen des Untergrundes zu ästhetisch unschönen Ränder führte und vermutlich bei einer Nachfestigung der Antragung, ein ausreichend stabiler Übergang zum Gesteinsuntergrund hergestellt wird, sollte auf das Vorschlämmen verzichtet werden.²⁴² Neben der kieselolgebundenen Ergänzungsmasse C2 scheinen auch die acrylatgebundenen Massen der Fa. Romstedt geeignet. Die Massen überzeugten durch eine leichte Handhabung, gute Verarbeitbarkeit und eine gute Einfärbung.²⁴³

²⁴² Die Auswirkungen einer Nachfestigung der Massen mit KSE sollten durch eine Versuchsreihe überprüft werden.

²⁴³ Die Beurteilung der Materialkennwerte der Massen beruht jedoch nur auf den Angaben des Herstellers

7.6.3 Maßnahmeempfehlung zur Sicherung von Hohlstellen

Neben den Steinerzänzungsmörteln ist auch die Vorgehensweise bezüglich der Injektion von Hohlstellen ein relevantes Thema im Zusammenhang mit der Anpassung der Pflegemaßnahmen am Steinernen Album gewesen. Hohlliegende Schalen sind bislang nicht geeignet verschlossen, sondern lediglich randlich gesichert worden. Auch der Versuch, Hohllagen gravitativ zu verfüllen, wurde beobachtet. Dieses Vorgehen ist allerdings bei komplex kommunizierenden Hohlräumen grundsätzlich schwierig. Um auch für derartige Schadensbilder, kleinere und größere hohlliegende Bereiche, zukünftig eine umfängliche Sicherung zu gewährleisten, ist für eine massive hohlliegende Schrifttafel oberhalb des Reliefs *Christus in der Kelter* ein Konzept zur Hinterfüllung erstellt worden. Anhand dieser Anleitung wird es zukünftig Peter Fiedler sehr gut möglich sein, derartige Bereich zuverlässig und dauerhaft an den Untergrund anzubinden und vor Verlust zu sichern. Nachfolgend werden das Vorgehen und das zu verwendende Material beschrieben.

Sicherung der Schrifttafel

Zunächst wurde die Schrifttafel über eine Perkussionskartierung hinsichtlich der Ausdehnung der Hohllagen kartiert. Die Kartierung ist in Abbildung 147 dargestellt.



Abb. 147: Kartierung der Hohlstellen und Altergänzungen, die mittels sehr fester und nur oberflächlich aufliegender Mörtel in jüngerer Vergangenheit ausgeführt worden sind. Sie waren eigentlich zur Injektion gedacht, sind allerdings offensichtlich nicht in den Hohlraum eingedrungen, sondern hafteten auf der aufstehenden Flanke der Schale.

Wie in der Abbildung 148 zu erkennen ist, sind die Flanken der hohlliegenden Schale im Rahmen einer früheren Kampagne mit einem Mörtel verfüllt worden, der im Umfeld massiv zur Rand- und Schleierbildung geführt hat. Auch an anderen hohlliegenden bzw. schaligen Bereichen wurde dieser Mörtel offensichtlich versuchsweise angewandt (siehe Abb. 149). Diese Stellen sind alle aufwändig gereinigt und später mit dem Kieselsool Syton X30 angebunden worden (entsprechend dem Vorgehen an der Inschriftentafel).



Abb. 148: Inschriftentafel im Relief *Christus in der Kelter* mit großen Fehlstellen und unzureichender Anwendung des Injektionsmörtels. Der Mörtel liegt auf der Schalenflanke auf und führte ringsherum zu Schleiern.



Abb. 149: Umfeld des Reliefs *Lots Berauschung* mit Ablaufspuren des nicht geeigneten Injektionsmörtels (Anwendung P. Fiedler) unter dem Relief und weiter zum linken Bildrand.

Vorgehen

Zunächst erfolgte eine Vorfestigung mit Syton X30, (1:1 verdünnt mit dest. Wasser), da die Hohllagen stellenweise nicht komplett ausgeräumt werden konnten. Die Vorfestigung erfolgte, um lose verbliebenes Material zu konsolidieren und einen Haftverbund der Injektionsmasse zu befördern. Eine Stunde nach der Vorfestigung wurden in die Bohrlöcher mit Zellstoff umwickelte Silikonschläuche (0,5 mm) eingeführt. Anschließend sind die festsitzenden Röhrchen noch mit Heißkleber gegen das Auslaufen der Injektionsmasse gesichert worden (siehe Abb. 150 und 151). Diese Vorgehensweise war erforderlich, da die Schalen relativ weit aufstanden bzw. sich durch unterschiedliche Verwitterungstiefen z.T. offene Flanken von 2,5 cm ergeben haben. In diese hätten auch gleich mit einem geeigneten Mörtel die Schläuche stabil eingesetzt werden können. Da aber die Situation der vorangegangenen Injektionsversuche von Peter Fiedler ungünstig war, sind alle Flanken mit einem Mörtel verschlossen gewesen und mussten in den erforderlichen Bereichen aufgebohrt werden. Dadurch konnte nicht mit einem Mörtel gesichert werden, sondern war eine zusätzliche Sicherung der Schläuche mit Heißkleber erforderlich.



Abb. 150: Mit Heißkleber eingesetzte und fixierte Schläuche zur Injektion bzw. zur Entlüftung



Abb. 151: Nahaufnahme der Oberkante der hohl liegenden Schale – mit Heißkleber abgedichtet und mit Injektionsschläuchen versehen.



Abb. 152: Schläuche zur Injektion im unteren Bereich der zu hinterfüllenden Platte, eingeklebt mit Heißkleber.

Die Verfüllung der Schrifttafel erfolgte über Spritzen, die auf die Silikonschläuche aufgesetzt worden sind, jeweils von unten nach oben, gegen die Schwerkraft (siehe Abb. 152). Es wurde stets abgewartet, ehe die Luft mit der Mörtelsuspension aus darüber liegenden Löchern knapp austrat. So konnte davon ausgegangen werden, dass die Luft ausgetrieben und die Hohllagen nahezu vollflächig verfüllt wurden. Nach dem Verfüllen wurden die jeweiligen Röhrchen mit Zellstoff verschlossen, um ein Austropfen zu vermeiden.

Rezeptur der Hinterfüllmasse

75 ml Syton X30 mit 25 ml Ethanol mit einem elektrischen Rührer (geliert etwas); Zugabe der KSE-Füllstoffe A und B²⁴⁴ (Füllstoff A = 40g und Füllstoff B = 65g)

Am Ende wurde der Mischung 1g Umbra gebrannt zugesetzt, um die Masse etwas einzufärben, falls sie an die Oberfläche gelangt.²⁴⁵

Da es sich um sehr große Hohllagen handelte, war zu erwarten, dass die Mörtelmasse beim Abbinden schrumpft. Deswegen folgte nach einem halben Jahr, im Rahmen der nächsten Kampagne, die finale Verfüllung. Nach dem Entfernen der Schläuche sind die Öffnungen mit dem mineralischen Mörtel Remmers weich verschlossen worden (siehe Abb. 153). Die Anbindung der hohl liegenden Bereiche ist entsprechend einer abschließenden Perkussionsprüfung nahezu umfänglich gelungen. Die Schleier, die durch das falsche Material im Vorfeld verursacht worden waren, konnten im Rahmen des Projekts an der Inschriftentafel leider nicht wieder zufriedenstellend entfernt werden. An dieser Stelle müsste im Rahmen der Pflegemaßnahmen nochmal durch Herrn Fiedler nachgearbeitet werden. Mit der Anleitung zur Injektion wird zukünftig auch diese Pflegemaßnahmen denkmalverträglich und nachhaltig ausgeführt werden können.

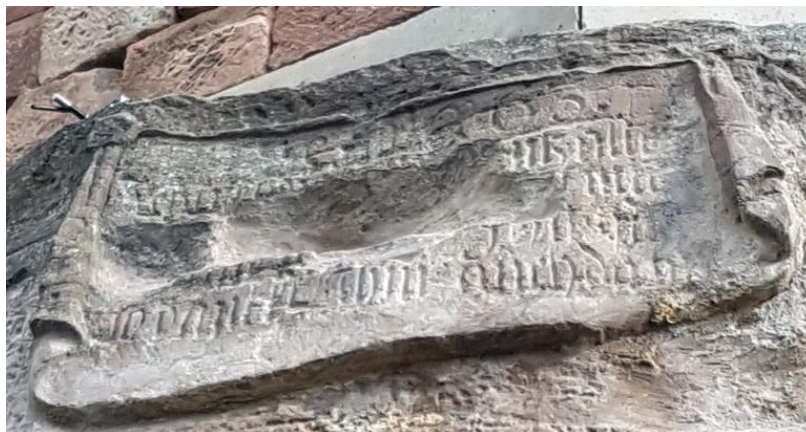


Abb. 153: Inschriftentafel nach Abschluss der Arbeiten im Sommer 2021

²⁴⁴ KSE-Füllstoffe A und B, Remmers GmbH

²⁴⁵ Folgende Mengen wurden injiziert: linkes unteres Loch 40 ml, mittleres Loch in unterer Kante: 35 ml

8. Öffentlichkeitsarbeit

8.1 Optimierung der Präsentation der Reliefs vor Ort

8.1.1 Beweggründe

Nur wenn heutzutage ein Denkmal genutzt wird und bekannt ist, wird es auch möglich sein, fortwährend den Erhalt gegen jedwede Widerstände durchzusetzen. Meistens sind fehlende finanzielle Mittel Grund für die Vernachlässigung unserer Denkmäler. Aber nicht selten sind es auch Unkenntnis oder gar Desinteresse. Um die Reliefs des Steinernen Albums stärker im regionalen und überregionalen Bewusstsein zu verankern und gleichzeitig die Öffentlichkeit dafür zu sensibilisieren, dass Kulturelles Erbe Pflege braucht, um erhalten zu bleiben, wurde im DBU-Vorhaben auch die Optimierung der Präsentation der Reliefs entlang des Saale-Unstrut-Radwegs bearbeitet. Der direkte Zugang zu den Reliefs ist von den Eigentümern des Weinbergs nicht gewünscht. Umso wichtiger ist es, die Reliefs in einer anschaulichen Art und Weise dort zu präsentieren, wo es Interessierten möglich ist, sie in Augenschein zu nehmen. Damit kann gleichermaßen informiert und sensibilisiert werden. Aber man verhindert auch, dass Besucher über den Zaun steigen, wie es laut Aussage der Eigentümer bereits passiert sein soll. Aktuell sind die Reliefs entlang des Radwegs mit Zeichnungen und kleinen Texten zu jedem Relief repräsentiert (siehe Abb. 154). Das entspricht einerseits nicht mehr ganz den heutigen Ansprüchen interessierter Besucher*innen. Andererseits kann auf der Grundlage der Zeichnungen, insbesondere für sehbehinderte Menschen, kein realistischer Eindruck dieses Kunstwerks gewonnen werden.



Abb. 154: Aktuelle Präsentation der Reliefs des Steinernen Albums entlang dem Radweg

Im DBU-Vorhaben war daher vorgesehen, auf der Grundlage der 3D-Erfassung der fokus GmbH Leipzig, von einem Relief eine Vorlage zu erstellen, die dann abgeformt werden kann. Dafür wurde das Relief *Fuchsjagd* ausgewählt, das vom Radweg besonders schlecht zu erkennen ist, einerseits aufgrund seiner Lage und andererseits aufgrund des erheblichen Flechtenbewuchses. Daher wurde auf der Grundlage der 3D-Erfassung der Reliefs durch die Firma Fokus GmbH stellvertretend für das Relief *Fuchsjagd* (siehe Abb. 155) eine Kopie des aktuellen Zustands im Maßstab 1:10 mit der Frästechnik hergestellt (siehe Abb. 156). Eine Kopie dieser Größe in 3D-Drucktechnik wäre zwar noch präziser gewesen, allerdings hätte das die dafür im Projekt vorgesehenen Kosten deutlich überstiegen. Die Kopie dieser Reliefoberfläche wurde im Rahmen eines Masterprojekts an der FH Potsdam in verschiedenen Mörtelrezepturen umgesetzt.



Abb. 155: Relief Fuchsjagd, Zustand Sommer 2021



Abb. 156: Gefräste Kopie des Reliefs Fuchsjagd

8.1.2. Praktische Umsetzung

Grundlage für die Herstellung des Positivs für die Abformung und den anschließenden Abguss ist, wie bereits erwähnt, ein hochauflösender 3D-Laserscan der fokus GmbH Leipzig. Dieser wurde im Sinne der Weiterführung des Monitorings und zur Darstellung des Verwitterungsfortschritts von nahezu allen Reliefs erstellt. Auf dieser Datengrundlage ist in der Firma *Schichtwerk* das Relief *Fuchsjagd* mit einer CNC-Fräse kopiert worden (siehe Abb. 157).

Damit die Kopie den Besucher*innen möglichst lange einen originalen Eindruck vermittelt und auch dauerhaft frei exponiert sein kann, geschützt gegen Wind und Wetter, aber auch vor der möglicherweise exzessiven Beanspruchung durch menschliche Nutzung, bestehen wichtige Anforderungen an das Vorgehen und das Material, mit dem der Abguss hergestellt werden sollte. Wesentliches Augenmerk liegt dabei auf der Genauigkeit: Der Abguss muss möglichst präzise dem gescannten Original folgen. Das erforderte in allen Teilschritten sehr genaues Arbeiten. Zuerst musste der 3D-Scan hochauflösend ausgeführt werden, damit möglichst viele Details des Originals erfasst sind. Auch die Berechnung der maßstabsgerecht verkleinerten Kopie und die anschließende Übersetzung des Rechenmodells in die CNC-Fräsung sind möglichst verlustfrei ausgeführt worden. Im Rechenmodell sind hinterschnittene Bereiche vermittelt worden. An diesen Stellen sind, bezogen auf das Original, gewisse Ungenauigkeiten im Rechenmodell nahezu nicht zu vermeiden gewesen. Auch die Silikonabformung musste möglichst präzise erfolgen. Ein weiterer wichtiger Aspekt neben der Genauigkeit der Kopie, ist die Dauerhaftigkeit, die sich vor allem an der Güte der Gussmasse orientiert, die nach dem Abbinden den Sandstein-imitierenden Mörtel bildet. Dieser musste ausreichend fein und fließfähig eingestellt werden, um alle Details des Originals in der Kopie abzubilden und sogenannte Lunker zu vermeiden. Das abgebundene Material sollte darüber hinaus witterungsbeständig gegenüber Frost, thermischer Belastung (Sonne) und Regen sein und auch, zumindest leichtem, Vandalismus standhalten. Die Farbe des Abgusses sollte letztlich eine Natursteinanmutung haben und gleichzeitig eine möglichst gute Detailerkennbarkeit ermöglichen, was bei einem dunkelroten Material beispielsweise problematisch gewesen wäre.

Ausräsung der maßstabsgerecht verkleinerten Kopie in einer Polyurethan-Platte

Aus einer PU-Platte mit den Maßen 100 x 50 cm ist die Umsetzung der 3D-Daten durch die Firma *Schichtwerk* erfolgt (siehe Abb. 157 und 158).



Abb. 157: Arbeitsschritte beim Übertragen der 3D-Daten mittels der Frästechnik in die PU-Platte (Umsetzung Fa. Schichtwerk)



Abb. 158: Fertiggestellte, gefräste Reliefplatte *Fuchsjagd*. Auf dieser Grundlage erfolgte die Abformung mit Silikon und weiterhin die Kopie mit verschiedenen mineralischen Mörteln.

Herstellung der Negativform

Auf der Grundlage der gefrästen PU-Reliefplatte konnte ein „klassisches“ Abgussnegativ aus einer Silikonharzform mit 2-teiliger Gips-Stützform geschaffen werden. Die Negativform ist mit Unterstützung des Gestaltungslehrers des Studiengangs, Roland Satlow, hergestellt worden. Als erster Schritt wurde auf den reliefierten PU-Block (porenfrei, chemisch stabil) zunächst ein Trennmittel aus Vaseline mit Balsamterpentin auftragen (siehe Abb. 159), gefolgt von einer Schicht Silikonharz-Abformmasse (Produkt „Mold Max Strong“ der Marke „Smooth-On“, mit Katalysator aktiviert-ca. 1h verarbeitbar; kostenintensiv).



Abb. 159: Geprägtes Relief aus dem PU-Block, eingepinselt mit dem Trennmittel, vor Aufbringen der Silikonschicht

Die relativ dünnflüssige Konsistenz der Silikonabformmasse eignet sich gut für die Tiefen des Reliefs und konnte leicht aufgespritzt werden (siehe Abb. 160). Für die erhabenen Stellen des Reliefs ist durch die Zugabe eines Verdickungsmittels die Konsistenz der Abformmasse zähflüssiger eingestellt worden, um das Wegfließen zu verhindern.



Abb. 160: Die erste, dünne Schicht der Abformmasse aus Silikonharz wurde besonders sorgfältig mit dem Pinsel aufgebracht, da hiervon die Präzision des Endergebnisses maßgeblich abhängt.

Für einen präzisen Sitz der Silikonform in der Stützform während des Abgussvorganges wurden sogenannte Schlösser in die Silikonform eingebaut. Diese leicht hinterschnittenen, 1x2cm großen Quader aus Silikonharz wurden extra gegossen und außen auf die fertige Silikonharzform aufgeklebt. Sie verschließen sich mit der Gipsform und verhindern, dass die Silikonharzform in der Stützform verrutscht. Insgesamt wurden 5 Schlösser angebracht. Ein kleiner Tonsteg um das PU-Modell verhinderte darüber hinaus das Wegfließen der ersten dünnen Silikonschicht (siehe Abb. 161). Nach etwa 4 Arbeitsstunden war die Silikonform fertig. Nach einem weiteren Tag Trocknungszeit wurde die Stützform gebaut. Diese hatte die Aufgabe, die Silikonform in Position zu halten, als diese mit Gips bzw. Mörtel gefüllt wurde. Gleichzeitig musste sie nach Aushärtung des Gussmaterials abnehmbar bleiben. Auf Grund der relativ einfachen Reliefform und nur wenigen Hinterschneidungen wurde entschieden, eine Stützform aus nur 2

Teilen zu fertigen. Probleme beim Ausschalen zeigten, dass es trotz der relativ wenigen Hinterschneidungen von Vorteil gewesen wäre, die Stützform doch besser vierteilig zu bauen. Die Silikonform wurde nun an der Außenseite mit Tonschlämme eingepinselt und anschließend ist ein Tonsteg als Trennung der beiden Schalungsteile mittig über das Relief gelegt worden. Anschließend wurde der Gips großflächig über den Silikonformhälfte verteilt (gleichmäßiger Auftrag von ca. 2 cm Stärke). Für eine Formhälfte sind etwa 30 Liter Gips benötigt worden. Nachdem die erste Hälfte fertig und der Gips erhärtet war, konnte der Tonsteg entfernt werden. Auch die Gipsform erhielt einfache Schlösser, an denen die beiden Stützformteile aufeinandertreffen. Hierzu wurden einfach Dreiecke aus dem Rand der fertigen Hälfte herausgeschnitten. Der gesamte Rand der Stützform wurde nachfolgend mit einer Tonschlämme als Trennschicht eingepinselt. Auch auf der zweiten Formhälfte wurden ca. 30 Liter Gips verteilt, wobei der Gips auch sorgfältig in die ausgeschnittenen Dreiecke der ersten Hälfte eingearbeitet werden musste, da an diese Stelle die Stützformteile ineinandergreifen und sich aneinander verschließen.



Abb. 161: Die Stützformen wurden sorgfältig aneinandergelegt und mit untergelegten Keilen ausgerichtet. Anschließend wurde die Stützform mit einem Spanngurt fixiert.

Vorversuche zur Abformmasse und dem Abguss

In Vorversuchen wurden mit Hinblick auf farbliche Aspekte, Verarbeitbarkeit und die erforderliche Widerstandsfähigkeit unterschiedliche Mörtelmischungen untersucht. Bezüglich der Farbigkeit ist festgestellt worden, dass eine hellere Abgussmasse eine bessere Ablesbarkeit von Details ermöglicht als eine dunklere. Schattenwürfe sind auf einem helleren Material auch besser zu erkennen. Die Farbigkeit der Buntsandsteinvarietät im Bereich des Reliefs *Fuchsjagd* ist mit einem hellen Grau mit leicht grünlichem Anschein allerdings eher untypisch für den Gesamteindruck des Steinernen Albums, das über weite Strecken durch einen roten Sandstein dominiert wird.



Abb. 162: Mörtelprobe 11 (links) und 12 (rechts) mit einem darüber liegende Stück Buntsandstein vom Steinernen Album aus der Nähe des Reliefs *Fuchs Jagd*. Die obere Hälfte der Mörtelproben sind nachgekratzt. (Letztlich kam es zur Umsetzung der Mörtelrezeptur 12.)

Der Pigmentzuschlag muss für jede Mörtelrezeptur einzeln ermittelt werden. Je nach Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis, Sieblinie und verwendetem Bindemittel wirkte sich die Zugabe der Pigmente unterschiedlich aus (siehe Abb. 162). Zum Finden der richtigen Rezeptur wurden Probereihen mit unterschiedlichen Zugaben von Pigmenten angefertigt. Letztlich fiel die Entscheidung auf eine Mörtelrezeptur (1) folgender Zusammensetzung: B-Z-Verhältnis 1:1, wobei das Bindemittel zu 83% aus Weißzement (Firma Dyckerhoff, CEM I 42,5 R) und zu 17% aus Portlandzement (Heidelberg Cement, CEM II/A-S 42,5 N) bestand. Färbend waren die Pigmente 0,1% Sienna Natur und 0,1% Caput Mortuum zugegeben (Gew-% im Trockenmörtel). Als Zuschlag wurde gewaschener Sand der Körnung 0,2-1 mm gewählt.

Es kam auch eine zweite Mörtelrezeptur (2) zum Einsatz, die mit Hinblick auf die optimalen Fließeigenschaften, die entscheidend sind für die Abbildung eines feinen Reliefs, von der Firma Romstedt empfohlen worden sind. Es handelt sich dabei um einen selbstverdichtenden Gussmörtel mit folgender Rezeptur (Mischung für 20 kg): Zusatz 1: 1,5 kg nicht weiter spezifiziertes hochfeines „Mehl“, Zusatz 2: 1 Liter Acrylharzdispersion, Zusatz 3: etwa 20 ml eines auch nicht weiter spezifizierten durchsichtigen Harzes, Zuschlag 1: 7,74 kg Sand der Körnung 0-2mm, Zuschlag 2: 6,68 kg Kies der Körnung 2-8 mm, Bindemittel 1: 3,3 kg Portlandzement und Bindemittel 2: 3,3 kg Weißzement, Pigment: 25 g Caput Mortuum (=0,125%) und 50 g Sienna Natur (=0,25%) sowie 1,5 Liter Wasser. Als Bindemittel wurde durch die Firma Romstedt eigentlich ein CEM III/B 32,5 LH/HS/NA empfohlen, der allerdings in Mindermengen, wie sie für den versuchsweisen Abguss gebraucht worden sind, nicht beschaffbar gewesen ist. Der Vorteil des CEM III-B liegt nach Aussage von Herrn Romstedt vorrangig auf seiner geringeren Hydratationsgeschwindigkeit und der hierdurch reduzierten Wärmeentwicklung. Die Gefahr erhöhter Spannungen und hierdurch verursachte Risse im Gußteil ist bei einem CEM II höher, was im Projekt auch bei den Tests festgestellt worden ist. Bei der ursprünglichen Rezeptierung (mit CEM III-B) wären auch die Helligkeit und Eigenfarbigkeit des Mörtels (nahe am Kalk) besser. (CEM III-B hat eine scharfkantige Partikelform - Fließfähigkeit des Gussmörtels.)

Um die Beständigkeit der Abgüsse zu verbessern, wurden Armierungen eingefügt (siehe Abb. 163). Diese bestehen aus 3 Gewindestangen M10 mit 80 cm Länge aus rostfreiem Edelstahl und einem Edelstahl Drahtnetz, welches eigentlich zur Taubenvergrämung eingesetzt wird (Maschenweite 3 cm, an den Kreuzungspunkten verschweißt).



Abb. 163: Die vorbereitete Armierung wird in die Gussform eingelegt und vorsichtig in den Mörtel gedrückt (links). Anschließend wird komplett mit Mörtel aufgefüllt (rechts).

Direkt vor dem Einfüllen des Mörtels in die Silikonform wurde ein sehr dünner Film Seifenwasser auf die Form aufgespritzt. Die Seife bricht erfahrungsgemäß die Oberflächenspannung des Wassers und vermindert somit die Entstehung von Luftblasen.

Ergebnisse

Mörtelrezeptur 1: Dieser Abguss ist sehr gut gelungen. Viele Details sind erkennbar (siehe Abb. 164).



Abb. 164: Der fertige Abguss mit der Mörtelrezeptur 1. Die Abformung und der Abguss haben gut funktioniert.

Beim Ausschalen schien es, als hätte sich die Pigmente an der Oberfläche angereichert. Nach einigen Tagen hellte sich die Oberfläche allerdings in Folge des abgeschlossenen Trocknungsvorgangs auf. Wenige Luftblasen hatten sich an der Oberfläche erhalten (siehe Abb. 165). Diese konnten jedoch mit einer gleichfarbigen Schlämme geschlossen werden.



Abb. 165: Kleine Löcher im Mörtel als Folge von Lufteinschlüssen an der Silikonform.

Der hohe Bindemittelanteil, für den sich mit Hinblick auf die daraus resultierende detaillierte Abformung entschieden wurde, stellte sich im Nachhinein jedoch als ungünstig heraus. Zwar ist die Blasenbildung minimal, aber der hohe Zementanteil verursachte im Zuge der Trocknung ein starkes Schwinden des Mörtels. Das führte wiederum zu starken Spannungen im Mörtelgefüge, welche sich in Haarrissen zeigten. Dadurch ist die perspektivische Verwitterungsresistenz des Abgusses deutlich eingeschränkt. Zwar sind durch die Verwendung von Edelstahl für die Armierung daran keine Korrosion und damit verbundene Schäden zu erwarten, aber auch optisch beeinträchtigen die Risse das Gesamtbild. In Anlehnung an diese Rezeptur (3) wurde noch eine weitere, bindemittelärmere (B-Z-Verhältnis 1:2) umgesetzt (20% Portlandzement, 80% Weißzement; Zuschlag 1: Sand 0-2mm 60%, Zuschlag 2: Kies 2-8mm 40%; Pigment 0,1% Sienna natur). Dieser Abguss ergab ein zufriedenstellendes Ergebnis (siehe Abb. 166). An einigen Stellen gab es zwar ebenfalls einige Luftblasen, die sich an der Silikonform festgesetzt hatten. Aber diese ließen sich auch mit einer feinen Schlämme nahezu unsichtbar ausgleichen.



Abb. 166: Ergebnis der Mörtelmischung 3. Trotz einiger sehr kleiner Fehlstellen (rechts) sind die meisten Details präzise nachgebildet. Auch die Farbwirkung kommt dem originalen Gestein sehr nahe.

Der Abguss in Anlehnung an die Rezeptur nach Romstedt ist leider aufgrund unzureichender Verarbeitung der Mörtelmischung (2) durch den Studenten nach seiner eigenen Angabe nicht gelungen (siehe Abb. 167). Der CEM II neigte zu stärkerer Rissbildung. Es wird vermutet, dass die Rezeptur nach Vorschrift und

ordentlicher Verarbeitung gut funktioniert hätte. Auf jeden Fall liegen dazu Langzeitinformationen von Herrn Romstedt²⁴⁶ vor.



Abb. 167: Ergebnis des Abgusses mit Mörtelmischung 2. Wegen mangelnde Durchmischung gibt es massive Fehlstellen (unterer Bereich). Auch im figürlichen Bereich des Reliefs sind Luftblasenlöcher und Fehlstellen zu beklagen.

Aktuell ist es nur möglich, die Reliefs von dem unten vorbeiführenden Rad- und Wanderweg in Augenschein zu nehmen, was die Erkennbarkeit der teilweise stark zurückgewitterten Details noch zusätzlich sehr einschränkt. Wie bereits erwähnt, sind entlang der unten am Weinberg vorbeiführenden Straße, in ca. 40-50 Metern Entfernung zu den Originalen, kleine, hölzerne Schautafeln zu Erläuterung des biblischen Hintergrundes der gezeigten Reliefs mit schemenhafter Darstellung der Bildinhalte aufgestellt. An denen ist die Witterung nicht ohne Einfluss vorübergegangen, so dass ohnehin eine Überarbeitung des Präsentationskonzepts der Reliefs, die durchaus das Potential eines „Denkmals nationaler Bedeutung“ tragen, anstünde. Die Optimierung des Präsentationskonzepts, ob über die hier vorgestellte Reliefkopie des aktuellen Zustandes oder auch eines früheren Zustandes, dessen Präsentation noch schmerzhafter den zu verzeichnenden Detailverlust auch für Laien erfahrbar machen würde, ist in jedem Fall erforderlich. Sie würde u.a. den Tourismusbetreibenden helfen, dieses großartige Stück unseres Kulturellen Erbes zur Bewerbung der Region zu nutzen und darüber ein Bewusstsein in der Öffentlichkeit und in Folge auch einen stärkeren Erhaltungsdruck zu erzeugen. Durch die optimierte Präsentation (siehe Abb. 168) entlang des Radwegs, den jährlich sicherlich einige tausend Radler*innen passieren, erhoffen sich die Projektbeteiligten ein gesteigertes Interesse an den Reliefs und perspektivisch eine Sensibilisierung für die zum Erhalt notwendigen konservatorischer und restauratorischen Maßnahmen.

²⁴⁶ freundl. mündl. Mitteilung

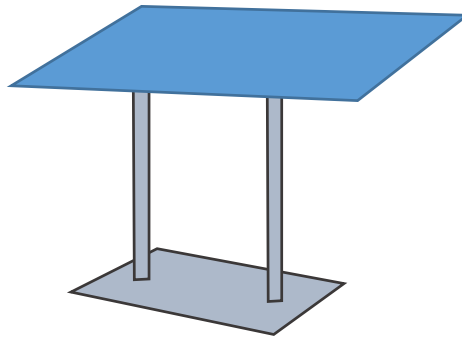


Abb. 168: Schematische Darstellung der geplanten Aufstellsituation der Abformung am Radweg unterhalb des Steinernen Albums.

8.2 Publikationen im Rahmen des Projekts

Im Rahmen der Laufzeit des vorliegenden Forschungsvorhabens sind verschiedene Artikel, u.a. auch in Kooperation mit den Studierenden des Studiengangs, entstanden. Die eigene Tätigkeit nachträglich noch in einen wissenschaftlichen Artikel zu überführen, trainiert einerseits die Fähigkeit des wissenschaftlichen Arbeitens und stärkt darüber hinaus das Selbstbewusstsein der zukünftigen Restaurator*innen. Die Wirkmächtigkeit eigenen Handelns zu realisieren, ist ein wesentliches Element in der positiven Bestärkung der Studierenden, perspektivisch auch eigenständig fundierte Entscheidungen zu treffen.

Folgende Vorträge wurden zum Thema während der Projektlaufzeit und darüber hinaus gehalten:

- Im Rahmen der 13th International Conference on the Detioration and Conservation of stone in Paisley, Schottland Vortrag und Fachartikel: MEINHARDT, J., ARNOLD, T., BÖHM, K.. (2016): The rock reliefs “Steinerne Album” of Großjena, Germany – Problems of Deterioration and Approaches for a Lasting Preservation; In: Science and Art - A Future of Stone. Proceedings of the 13th International conference on the deterioration and conservation of stone (ed.: Hughes, J., Howind, T), University of West of Scotland Paisley, September 2016. Pp. 879-888.
- Im Rahmen der öffentlichen Vortragsreihe des Rathgen-Forschungslabors „Konservierungswissenschaften im Dialog“ am 30.05.2017: J. MEINHARDT, Thema: „Das Steinerne Album in Großjena - Ein barocker Schatz der Kulturlandschaft Saale-Unstrut in Gefahr“
- MEINHARDT, J., ARNOLD, T., BÖHM, K., HÜBNER, B. (2017): The Stone Reliefs of Großjena - problems of deterioration and approaches for a salt reduction in a long term. In: 4th International Conference on Salt Weathering of Buildings and Stone Sculptures (SWBSS), September 2017, FH Potsdam (abstract)
- Vortrag und Poster im Rahmen der 12. Arbeitstagung des Netzwerks „Steine in der Stadt“ im 30.03.02.04.2017 in Gotha: Thema: J. MEINHARDT, Das Steinerne Album in Großjena – ein barockes Denkmal nationaler Bedeutung in Gefahr, Tagungsband. S. 9.
- Im Rahmen der Natursteinsanierung Stuttgart 2018 zusätzlich dazu Fachartikel in der Tagungspublikation: MEINHARDT, J., SCHMEIKAL, K., HÜBNER, B. (2018): Das Steinerne Album in Großjena. Die Problematik der nachhaltigen Pflege von Objekten im anstehenden Gestein und der Umgang mit der erfolgten Altkonservierung. In: Natursteinsanierung Stuttgart 2018 - Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen, (Hrsg. Patitz, G., Grassegger, G., Wölbart, O.), S. 48-57, Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart.

- Publikation (kein Vortrag, da die Tagung coronabedingt ausgefallen ist): MEINHARDT, J. & SCHMEIKAL, K. (2020): Investigations of aversive conditioning of biogenous growth on exposed sandstone objects. In: Siegesmund, S. & Middendorf, B. (eds): Monument Future: Decay and Conservation of Stone. Proceedings of the 14th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Vol. I und II, Mitteldeutscher Verlag, 747-752.
- Das Abschlusskolloquium zum vorliegenden umfassenden DBU-Vorhaben wurde aufgrund der speziellen Coronasituation im *Hybridmodus* (in der FH Potsdam und via ZOOM), verteilt auf mehrere Abende geplant. Das Abschlusskolloquium wurde in die regelmäßig im Wintersemester stattfindenden Gastvorträge des Studiengangs Konservierung und Restaurierung der FH Potsdam integriert. Dabei wurde eine thematische Aufteilung in verschiedene Schwerpunkte des DBU-Vorhabens angestrebt.
 - 26.10.2021: Überwachung von Bauwerksfeuchte mit Impedanzmessung und anderen Verfahren - Dr. Frank Lehmann (MPA Universität Stuttgart)
 - 16.11.2021: Mikroorganismen an Stein und Architekturoberfläche - Prof. Dr. Karin Petersen (HAWK Hildesheim)
 - Die **abschließende Präsentation der konkreten konservatorisch-restauratorischen Ergebnisse des Projekts** durch die Autorin des Abschlussberichts musste coronabedingt zweimal verschoben werden und findet als **Präsenzveranstaltung an der FH Potsdam am Freitag, 10.06.2022** statt.

Projektbegleitend sind im Studiengang Konservierung und Restaurierung der FH Potsdam, in der Fachrichtung Stein, verschiedene Qualifikationsarbeiten erfolgreich erstellt worden:

Masterarbeiten:

Benjamin Hübner (SoSe 2017): „Die langfristige Pflege und Erhaltung stark belasteter Objekte im anstehenden Gestein – Entwicklung eines mineralischen Kompressenputzes zum Schutz anthropogen geschädigter Oberflächen im anstehenden Gestein am Beispiel des Steinernen Albums in Großjena“

Janosch Klein (WiSe 2021/22): „Untersuchungen zur Festigung vergipster Sandsteinoberflächen mit Kieselsäureester am Beispiel des Steinernen Albums in Großjena“.

(Joann Zilm (Abgabe Ende SoSe 2022): „Untersuchungen zur Auswirkung von Reinigungsmaßnahmen auf die biogene Wiederbesiedlung von Sandsteinen sowie zur Wirksamkeit und Anwendbarkeit von Phytochemikalien als ökologische Biozide“ (in Ergänzung zu den am Steinernen Album ausgeführten Untersuchungen)

Bachelorarbeit

Joann Zilm (SoSe 2018): „Entwicklung eines Steinerfüllmörtels für freibewitterten Buntsandstein im Zusammenhang mit dem langfristigen Erhalt des Steinernen Albums in Großjena“

9. Schlussfolgerungen bezogen auf den zu optimierenden Pflegeplan

Zusammenfassend ist für die **Salzbelastung** am Steinernen Album festzuhalten, dass in den meisten Bereichen oberflächennah zumindest eine mittlere Gipsbelastung vorliegt. Diese Belastungssituation ist unabhängig von der Höhe innerhalb der Reliefs. Dieser Zustand wurde sowohl durch vorhergehende Untersuchungen als auch jenen im Rahmen des Projekts durchgeführten immer wieder bestätigt. Sowohl die Bohrmehluntersuchungen als auch die Impedanzmessungen spiegeln in leicht abweichender Weise, dass am Steinernen Album lediglich die ersten Zentimeter eine gewisse Salzbelastung aufweisen. Dieser Umstand kann als ein wichtiges Indiz gegen den in der Frühphase der naturwissenschaftlichen Auseinandersetzung mit dem Steinernen Album postulierten kontinuierlichen Salztransport aus größeren Tiefen gewertet werden. Die Beteiligung anderer Salze am Steinernen Album muss, wie die unterschiedlichen Ergebnisse zeigen, differenzierter betrachtet werden. Aus den Untersuchungen geht hervor, dass zum Teil Thenardit, Epsomit, Natriumnitrat und auch Syngenit auftreten können. Betrachtet man die Ergebnisse hinsichtlich der Magnesiumgehalte wird deutlich, dass dieses zwar immer noch eine gewisse Rolle spielen. Aber sowohl die Bohrmehluntersuchungen als auch die Analysen der Cellulose-Kompressen spiegeln, wenn überhaupt, nur eine geringe Belastung. Ein ganz anderes Bild vermittelten die Analysen der Jahre 2009 und 1997 zu den untersuchten Gipskrusten. In diesen sind auch sehr hohe Mengen an Magnesium ermittelt worden. Vor dem Hintergrund dieser Beobachtung wird vermutet, dass es über die Zeit zu einer natürlichen Eluierung des Magnesiumsulfats gekommen ist. Zunächst kam es durch die anthropogen verursachten Umwandlungsvorgänge in den dolomithaltigen Gesteinsbereichen zur Bildung von Magnesiumsulfat und auch Gips. Durch Reinigungsmaßnahmen im Rahmen der Restaurierung in den 1990er Jahren und die dabei erfolgte Entfernung aufliegender Krusten konnte bereits ein Teil des Gipses und Magnesiumsulfates entfernt werden. Aber auch noch 2009 wurde $MgSO_4$ in relevanten Mengen detektiert. Seit der Installation der Rauchgasentschwefelungsanlagen Anfang der 1990er Jahre kam es eigentlich nicht mehr zur Umwandlung dolomithaltiger Bindemittelbestandteile, da die schwefelsaure Atmosphäre fehlte. Nach der Restaurierungskampagne 1998/99 haben über die Zeit eventuell durch Niederschläge hervorgerufene Ausspüleffekte stattgefunden und zu einer immer weiteren Reduktion der leichtlöslichen Magnesiumsalze geführt. Heute lassen sie sich nur noch in wenigen Arealen in Anwesenheit anderer Salze nachweisen. Der schwerer lösliche Gips ist von der Auslaugung aufgrund seiner geringeren Löslichkeit eigentlich nicht betroffen und stellt daher weiterhin ein ernstzunehmendes Problem für den Fortbestand der Reliefs dar. Am Steinernen Album können darüber hinaus vereinzelt immer wieder zonierte Natriumnitrat- und Natriumsulfatbelastungen festgestellt werden. Besonders die Kompressenanalysen zeigten, dass Natrium an den belasteten Stellen eine größere Bedeutung hat, als es zuvor aus den Bohrmehlanalysen hervorging. Im Allgemeinen lassen sich diese Nitrate und Natrium in höherer Gehalten in den oberen Bereichen der untersuchten Reliefs detektieren und sind daher eventuell mit einer möglichen Düngung in Verbindung zu bringen. Ob entsprechendes stattfand oder stattfindet, war nicht verlässlich in Erfahrung zu bringen. Vereinzelt muss nachweislich allerdings auch in der Sockelzone mit höheren Natriumnitratwerten gerechnet werden. Möglicherweise führt die benachbarte starke Klüftung zu ablaufenden Wässern aus dem Bereich der darüber liegenden Terrassenanlage und somit ebenfalls zu einer Beeinflussung dieser im Sockelbereich gelegenen Zone. Auch leicht- bis mittellösliche Chloride sind in den Oberflächen detektiert worden. Eine wichtige Erkenntnis aus den breit angelegten Untersuchungen zur Oberflächenbelastung ist allerdings, dass aktuell lediglich noch die beiden Reliefs *Noah der erste Weinbauer* und *Christus in der Kelter* eine hohe Salzbelastung aufweisen. Darüber hinaus sind vier weitere Reliefs als gering belastet zu kategorisieren. Es handelt sich dabei um die Reliefs *Herzog Christian*, *Puttentanz*, *Hochzeit zu Kana* und *Lots Berausung*. Auf Grundlage der analysierten Ausblühsalze ist auch für das Relief *Quellwunder* eine

Oberflächenbelastung denkbar. Alle anderen Bildfelder sind hinsichtlich ihrer leichtlöslichen Salzbelastung nach dem derzeitigen Wissensstand als eher unbedenklich einzustufen.

Die Salzuntersuchungen, die direkt im Projekt ausgeführt wurden, ergeben zusammen mit den vorherigen (1997-2012) bilden ein breites Untersuchungsspektrum der Salzbelastungen ab. Deutlich konnte auch in diesem Projekt durch die vielfältige Auswahl an Untersuchungsmethoden gezeigt werden, dass sich oftmals erst durch die Zusammenführung unterschiedlicher Messmethoden gute Interpretationsmöglichkeiten ergeben.

Bezüglich der **Feuchtesituation** des Steinernen Albums, die es im vorliegenden Projekt galt, verbindlicher zu klären, um Antworten auf Verwitterungsfortschritt und möglicherweise Problemen bei der Konservierung besser zu verstehen, sind neben konventionellen Bohrmehluntersuchungen an zwei Reliefs Langzeitmonitorings im Tiefenprofil mit Hilfe der Impedanzmessung durchgeführt worden. Zusammenfassend lässt sich für die beiden untersuchten Reliefs gemäß den Impedanzmessungen der MPA Stuttgart feststellen, dass zum einen die Feuchtebelastung im anstehenden Gestein bereits in einer Tiefe zwischen 5-10 cm sehr hoch ist, die relative Feuchte im überhygroskopischen Bereich liegt. Für die Konservierungsmaßnahme Ende der 1990er Jahre sind ähnliche Umstände als sehr wahrscheinlich anzunehmen, was einen erheblichen Einfluss auf die Hydrolyse des KSE gehabt haben könnte. Unter Berücksichtigung der Darrfeuchteuntersuchungen des IDK und der Betrachtungen im Rahmen der Masterarbeit von Benjamin Hübner kann zusammengefasst werden, dass die Feuchtegehalte innerhalb der Messachse den Einfluss nachströmenden Sickerwassers auf Grundlage der darüber liegenden Terrassierung sowie die Beeinflussung aufsteigender Feuchtigkeit in bodennahen Bereichen vermuten lassen. Der Feuchtegehalt im oberflächennahen Bereich wird nach oben hin geringer. In größeren Tiefen (ab 30 cm) ist kein erhöhter Feuchtegehalt über die Darrfeuchtebestimmung messbar. Es stellt sich eher ein geringer ausgeprägtes Gleichgewicht ein, was einem, aus dem anstehenden Stein heraus gebildeten Massentransport aus größerer Tiefe entgegensteht.

Aus den Ergebnissen zur **biogenen Besiedelung** waren insgesamt keine besonderen Spezifika für die massive biogene Besiedelung mancher Reliefs des Steinernen Albums abzuleiten. Massiven Flechtenbesiedelungen gibt es an den Reliefs *Fuchsjagd*, *Puttentanz* (Harfenspieler David), *Christus in der Kelter*, *Arbeiter im Weinberg*, *Josua und Kaleb* sowie das flach ausgearbeitete Relief *Moses im Gelobten Land*. Insgesamt sind 10 Arten an Krustenflechten detektiert worden, deren Thallus aus einer Alge und einem Pilz zusammengesetzt ist und die insgesamt einen relativ breiten pH-Wert Bereich repräsentieren. Darüber hinaus wurden Algen, Cyanobakterien und Pilze als solitäre Organismen beobachtet. Die negative Beeinflussung der Reliefs durch den Flechtenbewuchs reicht von der nachweislich massiven Gefügelockerung durch die Hyphen, die mittels optischer und haptischer Einschätzung sowie objektiv mit der Methode der Bohrwiderstandmessungen festgestellt wurde, bis hin zu starken optischen Einschränkungen, die besonders in der „Vitalphase“ der Flechten mit grellen bunten Kreisen extrem sein kann. Neben dem zerstörerischen Einfluss der Flechten gab vor allem auch die spezielle Situation der Reliefs, die nur aus ca. 50-60 m vom unten vorbeiführenden Radweg einsehbar und nicht direkt begehbar sind, Ausschlag für die Ausrichtung des Projekts in Richtung der Möglichkeiten der Vergrämung des biogenen Bewuchses. Selbstverständlich fand auch die Überlegung Berücksichtigung, den Bewuchs zu belassen, da eine intensive Reinigung eben mit Materialverlusten einhergehen kann, die durch die Bioaktivität vielleicht erst nach längerer Zeit erreicht werden würden. Letztlich sollte aber auf der Basis geringerer Reinigung die Effektivität unterschiedlicher Schutzschlämmen überprüft werden, um im Rahmen des Projekts zumindest das Potential dieses Vorgehens zu eruieren. Die Musterflächen im Relief *Fuchsjagd* sind mit unterschiedlichen Schlämmen angelegt worden. Zunächst erfolgte die Reinigung der

insgesamt 51 Musterflächen nach unterschiedlichen Verfahrensweisen. Dieses Vorgehen diene dem Ziel herauszuarbeiten, wie wenig Reinigung minimal erforderlich ist, um die Unterdrückung der erneuten Entwicklung der Flechten unter den Schlämmen oder eine Neubesiedelung möglichst langfristig zu erreichen. Der geringste Grad der Reinigung bedeutet ein trockenes, lockeres Abpinseln. Die gesteigerte Intensität umfasste eine trockene Abnahme der auflagernden Flechtenbestandteile mittels Bürsten und Skalpell. Als nächster Schritt der Steigerung der Reinigungsintensität wurden die entsprechende Musterfläche mit Ethanol angequollen und anschließend die Fläche mit kreisenden Bewegungen mit Zahnbürsten gereinigt. Weiterhin kam H₂O₂ kombiniert mit kreisend bürstender Reinigung zum Einsatz. Eine derartig intensiv gereinigte Fläche wurde zusätzlich über 48 h UV-c Strahlung ausgesetzt.

Für die Schlämmen kamen die Bindemittel Kieselzol, KSE, Acrylatmörtel von Romstedt und Kalk, ein- und zweilagig zu Einsatz. Wesentliches war, dass die Schlämmen zumindest anteilig mit Nano-Titandioxid (TiO₂, Anatas mit der höchsten photokatalytischen Wirkung) oder Zinkoxid versetzt worden sind. Nach dem Auftrag am Steinernen Album wurde festgestellt, dass die Konzentration des Wirkstoffs (TiO₂ bzw. ZnO) mit 6g/1000ml Bindemittel zu geringen gewählt gewesen ist. Daher sind für die Musterflächen, die in der Werkstatt der FH Potsdam nachträglich angelegt wurden, höhere Konzentrationen eingestellt worden. (Hieran ist allerdings bis zum Abschluss des Projekts keine Veränderung festgestellt worden, vermutlich, da die Expositions- und Besiedelungsbedingung von Steinernem Album und den Balustern in der Werkstatt der FH Potsdam doch zu unterschiedlich waren.)

Nach ca. 2,5jähriger Standzeit ergab das zwischenzeitlich regelmäßig ausgeführte Monitoring der Stabilität der Schlämmen bzw. der Wiederbesiedelung der Flächen mit unterschiedlichem Reinigungsgrad letztlich, dass KSE als Bindemittel für diesen Anwendungsfall gar nicht geeignet ist. Bereits zwei Monate nach dem Auftrag gab es massive Fehlstellen, sowohl im gar nicht, als auch auf stark gereinigten Musterflächen. Es machte keinen Unterschied, ob ein einmaliger oder ein zweimaliger Auftrag erfolgt. Bereits nach 7monatiger Standzeit deutlich wurde, dass KSE für den Zweck nicht als Schlämmmaterial geeignet ist. Die Flächen mit den Kieselzolschlämmen sind deutlich stabiler, ein zweimaliger Auftrag der Schlämme, der dennoch dünn genug ist, um feinste Details des Untergrundes nachvollziehen zu können, ist dauerhafter als ein einmaliger Auftrag. Am besten stehen die Flächen mit dem Acrylatmörtel, nahezu unabhängig vom Reinigungsgrad gibt es nur minimale Ausplutzer der Schlämme durch nachwachsende Flechten. Auch nach 2 Jahren Standzeit sind die Flächen noch nahezu fehlerstellenfrei. Allerdings wirkt die Schlämmfläche sehr homogen und sie glänzt auch etwas, was dem natürlichen Eindruck der umgebenden Sandsteinflächen zumindest optisch etwas entgegensteht. Die Kalkflächen erwiesen sich stabiler als die KSE-gebundenen, allerdings gab es am Ende der Kampagne deutliche Fehlstellen, die das Bindemittel als nicht geeignet erscheinen ließen. Der Einfluss des TiO₂ ist nicht eindeutig ablesbar. Die Besiedelung an den Oberflächen der Schlämmen war mit und ohne TiO₂ nicht signifikant voneinander zu unterscheiden. Ebenso verhält es sich mit dem ZnO.

Im Rahmen des letzten Ortstermins des Projekts, im September 2021, wurden die Musterflächen, die ohnehin viele Fehlstellen aufwiesen und daher nicht weiterverfolgt werden, soweit es ging abgereinigt. Die nahezu intakten aus dem Bereich der Acrylatschlämme und eines Kieselzobereichs verblieben unangetastet zur weiteren Beobachtung. Abschließend erfolgte eine Retusche aller Flächen mit Silikatkreiden (umbra, ocker, schwarz), die darauffolgend noch mit KSE fixiert wurden, um sie optisch besser in das Umfeld einzupassen.

Mit Hinblick auf den **Festigkeitszustand** der untersuchten Reliefs wurde festgestellt, dass der Buntsandstein in zahlreichen Bereichen von recht geringer Festigkeit ist, was einem dauerhaften Bestand eher entgegensteht. Für die Reliefs, die von Mürbzone unter einer zähen **Vergipsung** betroffen sind, wurde darüber hinaus deutlich, dass diese die nicht so massiv von biogenem Bewuchs betroffen. Diese

Schadensbilder kommen demnach nicht gemeinschaftlich vor. Stark biogen besiedelte Reliefs sind eher nach hinten geneigten, wohingegen die mit der verstärkten *Gipshaut* auf mürbem Untergrund nahezu senkrecht in der Wand stehen. Die Reliefs sind im Zusammenhang mit der großen Restaurierungskampagne Ende der 1990er Jahre zwar stark invasiv gefestigt worden, nicht jedoch sind Salz- bzw. Gipsreduktionsmaßnahmen ausgeführt worden (abgesehen von der Entfernung von Krusten). In Abhängigkeit von der Gesteinsvarietät kommen an den Reliefs auch anteilig dolomitisch gebundene Horizonte vor. In Interaktion mit SO₂-haltiger Atmosphäre kam es während der DDR-Zeit zu einer Umwandlung dieses Bindemittels in Gips, Calciumsulfat(di)hydrat und auch Magnesiumsulfat. Vermutlich diese Vergipsung oder auch deren Interaktion mit dem Festiger führte in einzelnen Bereichen zu einer zähen Verfestigung der Oberfläche, eine Art ganz dünne Haut oder Kruste. Darunter ist das Gestein meist nur von (sehr) geringer Festigkeit. Um dieses Schadensphänomen am Steinernen Album besser zu verstehen und auf dieser Basis ggf. ein zum bisherigen Konsolidierungskonzept alternatives Vorgehen zu entwickeln, sind ausführliche Untersuchungen zu Möglichkeiten der Gipsreduktion in den betroffenen Reliefbereichen durchgeführt worden, immer begleitet von hochauflösenden Tiefenprofiluntersuchungen mit Hilfe der Bohrwiderstandsmessung sowie der Erfassung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten. Sowohl die Bereiche mit geringer Wasseraufnahme als auch jene mit zäher, fester und besser saugfähigen Oberfläche konnten mit Ammoniumkarbonat und den Ionentauscher hinsichtlich der Saugfähigkeit verändert werden. In unterschiedlichem Maße hat sich die Wasseraufnahme verbessert, was für eine Öffnung des Porenraums spricht bzw. im Umkehrschluss zeigte, dass sowohl die zähen, festen Oberflächen und auch die Bereiche mit schlechter Saugfähigkeit mit dem Gips in Verbindung stehen. Die beste Wirkung hinsichtlich der Gipsreduktion bzw. der Öffnung des Porenraums hatte Ammoniumkarbonat. Insbesondere die wiederholte Anwendung führte zu einer deutlichen Steigerung der Saugfähigkeit. Die Ionentauscher waren weniger effektiv als Ammoniumkarbonat, obgleich Akeogel das beste Ergebnis unter den Ionentauschern aufwies. Die jeweils längere Anwendung erwies sich als effektiver als die kürzere.

In Begleitung der Maßnahmen am Steinernen Album absolvierte J. Klein seine Masterarbeit zum Thema „Untersuchungen zur Festigung vergipster Sandsteinoberflächen mit Kieselsäureester“ im Wintersemester 2021/22 im Studiengang Konservierung und Restaurierung, Fachrichtung Stein. Aus den in der Arbeit gewonnenen Ergebnissen lassen sich Schlüsse für das praktische Vorgehen bei einer Gipsreduzierung zu festigender Oberflächen im Allgemeinen und in Bezug auf das Steinerne Album ableiten. Prinzipiell sollte, wann auch immer die Möglichkeit besteht, die Gipsreduzierung vor der Festigung durchgeführt werden, da diese eine deutlich bessere Wirksamkeit aufweist. Weiterhin kann nach jetzigem Kenntnisstand eine Überfestigung der Oberflächenzone noch nicht völlig ausgeschlossen werden. Die Untersuchungen legten nahe, dass eine mögliche Überfestigung durch eine vorherige Gipsreduzierung verhindert werden kann. Das gilt sowohl für eine Gipsreduzierung mit Ionentauschern als auch für eine Gipsreduzierung mit Ammoniumcarbonat. Ob eine Gipsreduzierung auch durch eine Vorfestigung mit einem Festigungsmittel geringerer Gelabscheidungsrate gestört wird und ob es auch hier zu einer Überfestigung kommen könnte, konnte nicht abschließend geklärt werden. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass die Wirkung der Gipsreduzierung auch durch eine Vorfestigung zumindest verringert wird. Da eine auf die Festigung folgende Gipsreduzierung im schlimmsten Fall wirkungslos sein könnte, muss bei der Entscheidung, ob die Gipsreduzierung vor oder nach der Festigung durchgeführt wird, abgewogen werden, ob die vorherrschende Vergipsung ein größeres Schadenspotenzial birgt als ein Verlust von oberflächlichen Bestandteilen bei einer Kompressenaufgabe. Bei der Wahl des Mittels zur Gipsreduzierung ist festzuhalten, dass verschiedenen Faktoren den Entscheidungsprozess beeinflussen sollten. Zu nennen sind hier unter anderem die Tiefe und Konzentration der Vergipsung sowie ob die Möglichkeit einer darauffolgenden Kompressenentsalzung bzw. einer Umwandlung der leichtlöslichen

Salze besteht. Zur Entscheidungsfindung wäre es ratsam, zunächst Probeflächen mit den infrage kommenden Mitteln zur Gipsreduzierung anzulegen. Diese sollten durch Vor- und Nachmessungen auf ihre Wirksamkeit überprüft werden. Hier wäre beispielsweise eine Überprüfung der Oberflächenöffnung über Wassertropfentest und Wasseraufnahmemessungen sinnvoll. Auch eine mikroskopische Betrachtung der Oberfläche sowie eine quantitative Gipsanalyse könnte zur Erfolgsüberprüfung beitragen. Sollten Ionentauscher und Ammoniumcarbonat vergleichbare Ergebnisse zeigen, ist der Ionentauscher vorzuziehen, da es hier nicht zum potentiellen Eintrag leichtlöslicher Salze kommt, welche möglicherweise über Neutralkompressen, wie im Projekt angewendet, nicht komplett aus dem Porenraum entfernt werden können. Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass sich Ammonium-Dihydrogenphosphat aufgrund der Abdichtung der Oberfläche sowie des vermutlich hohen Eintrags leichtlöslicher Salze nicht zur Anwendung am Steinernen Album eignet. Dieses Verfahren birgt jedoch dadurch, dass Gips nahezu vollständig in ein noch trägeres Mineral umgewandelt wird, welches auch bei Temperaturen über 50° C keiner nennenswerten Hydratwasserabgabe unterliegt sowie aufgrund der festigenden Eigenschaften, ein gewisses Potenzial.

Im Rahmen der großen Restaurierungskampagne Ende der 1990er Jahre sind alle Reliefs über die Trichterinjektion gefestigt worden. Dabei sind insgesamt nahezu 3500 Liter KSE in das Steinerne Album eingebracht worden. Hierzu wurden mit einem ca. 30 cm langen Bohrer schräg zahlreiche Löcher in die Reliefoberflächen gebohrt. Der tiefste Punkt der jeweiligen Bohrlöcher lag ungefähr in einer Tiefe von 25 cm unterhalb der Oberfläche. Das Festigungsmittel wurde anschließend über Trichter in die Bohrlöcher eingebracht. Trotz dieses nachvollziehbaren sehr guten Ansatzes für die großangelegte Festigungskampagne zeigen sich stellenweise weiterhin Rückwitterung, Mürbzonen, Schuppenbildung sowie absandende Bereiche. Diese Phänomene deuten eher auf eine unzureichende Festigkeit der Oberfläche hin. Diese Beobachtungen gaben Anlass, die Effektivität der Maßnahme der Injektionsfestigung zu überdenken und messtechnisch zu prüfen. Die beobachteten Mürbzonen in manchen Bereichen sprechen eher gegen die Entwicklung eines harmonischen Festigkeitsprofils von der Tiefe des Injektionslochs bis an die Oberfläche. Es wurde der These nachgegangen, ob die eingebrachten Kieselsäureester eventuell stellenweise in der Tiefe einer Frühhydrolyse unterworfen waren, die die Migration der Substanz erheblich eingeschränkt hätte. Zur Klärung dieser Fragestellung sind zwei Bohrkern aus dem Randbereich, der gemäß dem Injektionsplan von 1998/99 in jedem Fall auch von dem Festigungsmaterial erreicht wurde, aber nicht bildhauerisch bzw. künstlerisch gestaltet ist, entnommen worden - ein Bohrkern der mittelkörnigen rötlichen Varietät (*Hochzeit zu Kana*) und ein weiterer, die feinkörnige, hellgraue Varietät repräsentierend (*Christus in der Kelter*). Die Methode der Ultraschallmessung wurde an den Bohrkernen angewendet, um im Tiefenprofil die Festigkeit und darüber die Effektivität der Konservierungsmaßnahme von 1998/99 zu bestimmen. Die ermittelten Ultraschallgeschwindigkeiten liegen für die feinkörnige, rötliche Varietät (Relief *Christus in der Kelter*) im Mittel bei 2,0 km/s. Auch bei der hellen, mittelkörnigen Varietät (Relief *Hochzeit zu Kana*) liegt der Mittelwert über den gesamten Kern bei 2,0 km/s. Allerdings zeigen beide Kerne eine ganz unterschiedliche Verteilung der Messwerte im Tiefenprofil. Der unbehandelte Zustand der rötlichen Varietät wird durch eine Ultraschallgeschwindigkeit von 1,6 km/s repräsentiert. Der Bereich zwischen 0-11 cm Tiefe liegen die ermittelten Ultraschallgeschwindigkeiten allerdings höher, zwischen 2,1 und 2,4 km/s. Diese Steigerung der Festigkeit korreliert mit der Annahme einer erfolgreichen Konsolidierung. Im Kern der hellgrauen, feinkörnigen Varietät verhalten sich die gemessenen Ultraschallgeschwindigkeiten dem entgegen. Die Ergebnisse der Ultraschallmessungen unterstützen eher die Vermutung, dass es aufgrund einer Frühhydrolyse des KSE zu einer eingeschränkten Migration des Festigers und zu einer Gelabscheidung in größeren Tiefen kam. Die Messergebnisse geben einen charakteristischen Hinweis auf eine unzureichende KSE-Migration in Richtung Oberfläche. So liegen die Kennwerte zwischen ca. 21-12 cm Tiefe im Mittel bei 2,6 km/s, was für

den Mittleren Buntsandstein eine gute Festigkeit widerspiegelt. Im Vergleich zur Zone zwischen 10-3 cm, deren Mittelwert signifikant niedriger bei 1,5 km/s liegt und der häufig an den Reliefs im Monitoring ermittelt wird. Auf dieser Grundlage sind im Rahmen des Projekts Überlegungen getroffen worden, um die Festigkeit des Gesteins unterhalb der Oberfläche bis in eine Tiefe von ca. 10 cm zu steigern und so den langfristigen Erhalt der Reliefs zu unterstützen. Die Tiefe von 10 cm eines Festigungshorizontes bleibt zwar hinter dem Ziel der ursprünglichen Kampagne 1998/99, wurde aber als ausreichend erachtet, insbesondere, wenn man so sicherer bezüglich einer möglichen Frühhydrolyse wäre. Die Ergebnisse der probeweisen Wiederbehandlung, die am Relief *Herzog Christian* in unterschiedlichen Musterflächen mittels einer angepassten Injektionstränkung ausgeführt wurden, sind vielversprechend. Die Varietät in der Musterfläche links unten im Relief war vor der erneuten Festigung mit KSE 300 sehr bröselig. Der entnommene Kern wurde in mehreren Einzelteilen geborgen. Der Bohrkern, der nach der Injektionsfestigung benachbart zum ursprünglichen Kern entnommen wurde, weist jedoch deutlich höhere Ultraschallgeschwindigkeiten auf. Der Zuwachs an Festigkeit schwankt zwischen 97 % nahe der Oberfläche und 25% in der Tiefe. Die Varietät in der Musterfläche oben rechts war bereits vor der erneuten Festigung recht stabil. Hier ist im Zuge der Injektion nur eine Steigerung der Festigkeit zwischen 7 und 25%. Insgesamt wird aus dem Verlauf der Festigkeitszuwächse (ermittelt mit dem Ultraschallverfahren) auch deutlich, dass das Phänomen der Frühhydrolyse in beiden betrachteten Versuchsflächen nicht vorliegt.

Zusammenfassend lässt sich für die **Ergänzungsmörtel** an den unterschiedlichen Reliefs feststellen, dass in manchen Bereichen der Reliefs die Ergänzungen nicht sehr dauerhaft sind. Normalerweise setzt Peter Fiedler für alle Ergänzungen den mineralischen Mörtel *Remmers Steinerergänzungsmörtel weich* ein. Bei großen, tiefen Fehlstellen wird zusätzlich, zur Unterfütterung ein Salzspeicherputz eingebracht, auf welchem anschließend der farbig angepasste Deckmörtel angetragen wird. Die mit den „RM weich“ durchgeführten Ergänzungen und Anböschungen sind über weite Bereiche für den beschriebenen Anwendungsfall positiv zu beurteilt. An anderen Stellen funktioniert es allerdings nicht dauerhaft gut, Das betrifft insbesondere dünnlagige Antragungen. Daher gab es Überlegungen im Projekt zu alternativen Mörteln. Ergänzungen sanden und sind auch von Rissen durchzogen, liegen stellenweise hohl und weisen Flankenablösung auf. Auch wird teilweise bemängelt, dass der Mörtel, in Abhängigkeit von der vorliegenden Varietät, zu hart für das Gestein ist. Für die kleinen und flachen Ergänzungen haben sich im Rahmen der Bachelorarbeit von J. Zilm sowohl Kieselol- als auch Acrylat-gebundene Ergänzungsmörtel als aussichtsreich erwiesen. Ihr Versuche an Probekörpern aus dem Steinernen Album vergleichbaren Sandsteinen müssen jedoch noch unter vor Ort Bedingungen erprobt werden.

Die bestehenden Auskofferungen mit Salzspeichermörtel haben sich in einer stichprobenartigen Untersuchung als noch aufnahmefähig erwiesen. Diese Beobachtung und die Tatsache, dass die Belastung mit leicht- und mittellöslichen Salzen nur für wenige Reliefs überhaupt noch besteht spricht eindeutig dafür, die ursprünglich im großen Stil eingebrachten Salzspeichermörtel an den Orten zu belassen. Darüber hinaus würde ein Austausch einen erheblichen invasiven Aufwand bedeuten, der nicht zu vertreten ist.

Neben den Steinerergänzungsmörteln ist auch die Vorgehensweise bezüglich der **Injektion von Hohlstellen** ein relevantes Thema im Zusammenhang mit der Anpassung der Pflegemaßnahmen am Steinernen Album gewesen. Hohlliegende Schalen sind bislang nicht geeignet verschlossen, sondern lediglich randlich gesichert worden. Um auch für derartige Schadensbilder, kleinere und größere hohlliegende Bereiche, zukünftig eine umfängliche Sicherung zu gewährleisten, wurde an einer hohlliegenden Schrifftafel das erforderliche Vorgehen exemplarisch durchexerziert. Dieses sieht neben einer Vorfestigung mit Syton X30, (1:1 verdünnt mit dest. Wasser) und dem richtigen Einsatz von Silikonschläuche (0,5 mm) deren ordnungsgemäße Verfüllung vor. Folgende Hinterfüllmasse wurde verwendet: 75 ml Syton X30 mit 25 ml

Ethanol mit einem elektrischen Rührer; Zugabe der KSE-Füllstoffe A und B (Füllstoff A = 40g und Füllstoff B = 65g). Am Ende wurde der Mischung 1g Umbra gebrannt zugesetzt, um die Masse etwas einzufärben, falls sie an die Oberfläche gelangt.

Im Rahmen des Projekts, aufbauend auf dem Langzeitmonitoring, wurde deutlich, dass in allen Bereichen, des über ca. 180 m anstehendes Kliffs die Verwitterung trotz des Monitorings und der daran gekoppelten Pflege voranschreitet. Folgende konkrete Pflegemaßnahmen werden in der Tradition der bisherigen Pflegemaßnahmen bzw. in Ergänzung dazu auf der Grundlage der Projektergebnisse empfohlen:

- Weiterhin wird die regelmäßige Reinigung von lose aufliegendem Schmutz (Erde) bzw. die Entfernung der höheren Pflanzen empfohlen. Die Staub- und Schmutzabnahme kann auch vor dem Hintergrund der Beobachtung, dass Pflanzenschutzmittel auf die Weinreben gespritzt worden sind²⁴⁷, sinnvoll sein, da dieser Umstand mit einer entsprechende Partikelablagerung auch auf den Reliefs verbunden sein wird.
- Abnahme stabiler, krustiger Auflagerungen (nicht Vergipsung), die Einfluss auf die Erkennbarkeit der Reliefs haben, da dadurch eine optische Veränderung bewirkt wird. Dieses Vorgehen ist allerdings nicht unbedingt konservatorisch erforderlich. Der Einsatz von Heißdampf war bislang allerdings nicht erfolgreich. Sinnvoll wäre hier sicherlich leichtes Sandstrahlen, wofür allerdings ein Kompressor bzw. ein verlässlicher Stromanschluss notwendig wäre.
- Für die Reduktion der Spannung aus den zähen und spannungsreichen Oberflächen wird empfohlen, Ammoniumkarbonatkompressen (in Kombination mit Neutralkompressen) anzuwenden. Der Ionentauscher Akeogel war auch effektiv, wenn auch durch Ammoniumkarbonat eine intensivere Gipsreduktion bzw. Öffnung des Porenraums erfolgt war. Diese Maßnahmeempfehlung bezieht sich im Wesentlichen auf die Reliefs *Herzog Christian, Hochzeit zu Kana* und bereichsweise *Christus in der Kelter* und *Noah* (in den Rücklagen).
- Bezüglich der Reinigung stark biogen besiedelter Flächen hat sich die kombinierte Anwendung aus Wasserstoffperoxid und Heißdampf als am effektivsten erwiesen. Allerdings blieben in dem jeweiligen Besiedelungsraum der Flechten Schatten zurück, die ein fleckiges Aussehen bewirkte. Eine derartig intensive Reinigung ist vor dem Hintergrund der dauerhaften freien Bewitterung darüber hinaus als kritisch zu betrachten. Es geht keinesfalls darum, die betroffenen Reliefs „clean“ zu reinigen, sondern um ein Maß der Reinigung, das perspektivisch zur Vergrämung des biogenen Bewuchses führt, auch in Kombination mit einem Schlämmauftrag, so dem von den Verantwortlichen des Landesdenkmalamtes Sachsen-Anhalt bzw. der zuständigen Unteren Denkmalschutzbehörde zugestimmt würde (Musterfläche). Es ist eine sukzessive Reduktion des Flechtenbewuchses anzustreben, um Mehrlagigkeit von Flechten und Unkenntlichkeit des Untergrundes zu vermeiden (mit Holzspatel und Skalpell dünnen). Alternativ zu dem Auftrag einer Schutzschlämme, die im nächsten Punkt erläutert wird, könnte auch mit Phytochemikalien als ökologische Biozide in Anlehnung an die Ergebnisse der Masterarbeit von J. Zilm gearbeitet werden. In stark betroffenen Bereichen wird auch eine Festigung des Gesteins (KSE 100) unter dem massiven Flechtenbewuchs empfohlen.
- Der Auftrag einer Schutzschlämme zur Vergrämung des ansonsten massiven Flechtenbewuchses (beispielsweise im Relief *Puttentanz*) entspricht einem ernsthaften gestalterischen Eingriff und setzt einen sensiblen Umgang bezüglich der Anpassung der Farbigkeit der Schlämme auf die des eigentlichen Gesteins voraus. Unbedingt sind eine homogene Farbigkeit und eine geometrische Form

²⁴⁷ Beobachtet und selbst in der Sprühwolke gestanden im Sommer 2021.

der Schlämmfläche zu vermeiden, wie sie für die Musterflächen im Rahmen des Projekts gewählt worden sind. Diese wirken schon aufgrund der Erscheinung als nicht akzeptabler Fremdkörper. Der Schlämbereich sollte rundherum fließend in das Umfeld eingehen. Es sollte keinen harten Bruch zwischen umgebendem Stein und Schlämmfläche geben. Es muss bei der Abwägung zum Einsatz einer solchen Schlämme unbedingt der damit verbundene mögliche Schutz der Originalsubstanz in Betracht gezogen werden. Und wenn der Auftrag einer Schlämme zur Reduktion der Vitalität der Flechten beiträgt, und entsprechendes wurde für die Acrylschlämme und auch die auf Basis von Kieselol (abgeschwächt) im Projekt festgestellt, wäre das ein wesentlicher Vorteil. Auch wenn sich die Kieselolschlämme als weniger stabil als die Acrylschlämme erwiesen hat, wird aufgrund des anzunehmenden „organischeren Rückwitters“ des Kieselols diesem tendenziell der Vorzug gegeben (zweimaliger Auftrag). Auch Titandioxid sollte als reaktiver Bestandteil (photokatalytisch) integriert werden (Konzentration 12g/1000ml Bindemittel). Die Einfärbung der Schlämme erfolgt mit Pigmenten bzw. mit Silkatkreiden. Beides ist im Projekt angewendet worden. Eine anschließende Festigung mit KSE 100 wird empfohlen. Da die Ergebnisse zum Einsatz von transparenten Phytochemikalien als ökologische Biozide während des Projekts noch nicht vorlagen (Masterarbeit J. Zilm), konnten sie in den Musterflächen nicht berücksichtigt werden. Der Anlage einer solchen Musterfläche wird vor Anlage einer sichtbaren Schlämme zunächst unbedingt der Vorzug gegeben.

- Mit Hinblick auf die geringe Festigkeit im relevanten Bereich von 10 cm Tiefe unterhalb der Oberfläche sind zumindest für die Reliefs *Christus in der Kelter*, *Hochzeit zu Kana* und die Rücklagen von *Noah* erneute Injektionsfestigung mit KSE 300 empfehlenswert. Es hat sich gezeigt, dass ein Abstand der Bohrlöcher von ca. 30 cm in alle Richtungen ausreicht, um geeignete Saughorizonte zu erzeugen. Das hat einen positiven Einfluss auf die Invasivität dieser Maßnahme, die so gering wie möglich zu halten ist. Die Bohrtiefe liegt im flachen Winkel bei maximal 10 cm. Eine Gipsreduzierung in oben beschriebener Form sollte vor der Festigung erfolgen. (Feuchteschleier, also stehendes Festigungsmittel auf der Oberfläche, konnten im Rahmen der Musterinjektionen im Relief *Christus in der Kelter* nicht beobachtet werden. Sollte Entsprechendes vorkommen, müsste der Bereich mit Lösungsmittel nachgereinigt werden, um Überfestigungen an der Oberfläche zu vermeiden.)
- Bezüglich der immer wieder abwitternden Ergänzungen mit Salzsäuren (z.B. Buttenträger, Pferdehuf) wird empfohlen, mürbe Bereiche abzunehmen und mit weichem Kompressenmörtel (Masterarbeit B. Hübner) im Sinne einer „kurativen Maßnahme“ zu versehen. Nach ausreichender Standzeit von ca. 2 Jahren sollte der Kompressenmörtel entfernt und die Ergänzung je nach Größe - mit dem für große Fehlstellen bewährten mineralischen Mörtel Remmers weich und bei kleinen Ergänzungen mit Kieselol als Bindemittel ausgeführt werden.
- Erforderliche Schalenhinterfüllungen sollten, wie an der Wappentafel des Reliefs *Christus in der Kelter*, mit Syton X30 erprobt, zukünftig in der Form ausgeführt werden. (Eine Anleitung ist mit P. Fiedler vereinbart.)

Die Schadensdynamik besteht und ist erheblich. Ziel der Modifizierung des Umfangs der bisherigen Pflegemaßnahmen ist eine Verlangsamung der Verwitterung.

Die im Projekt erprobten Maßnahmen zur besseren Bewerbung der Reliefs des Steinernen Albums entlang des Radwegs sollen helfen, die Popularität dieses Kleinods zu erhöhen und darüber eine stärkere Sensibilisierung für den Erhalt des Steinernen Albums zu erzielen.

10. Ausblick

Im Ausblick hoffen wir sehr, dass es weitergeht...

Im Rahmen des Projekts, aufbauend auf dem Langzeitmonitoring, wurde deutlich, dass in allen Bereichen, des über ca. 180 m anstehendes Kliffs die Verwitterung trotz des Monitorings und der daran gekoppelten Pflege voranschreitet. Die Einschränkungen der finanziellen Mittel für das regelmäßige Monitoring mit der Pflege, die aktuell noch durch Peter Fiedler ausgeführt werden, müssten vor dem Hintergrund dringend aufgestockt werden. Die Zinsentwicklungen der letzten Zeit führen jedoch viel eher zu einem Eindampfen der zur Verfügung stehenden Gelder. Noch wichtiger wäre es jedoch, die Besitzer des Steinauer Weinbergs, zu dem auch die Reliefs des Steinernen Albums gehören, für den konsequenten Erhalt der Reliefs zu gewinnen. Eine Aufnahme des Steinernen Albums in die Reihe der Denkmäler nationaler Bedeutung würde helfen, Fördermittel zu generieren, um zumindest die Pflege, optimiert durch die in diesem Vorhaben erarbeiteten Schritte, weiterhin umzusetzen.

Langfristig sollte Peter Fiedler, der sich über weite Strecken altruistisch um die Reliefs gekümmert hat und auch noch kümmert, zumindest eine Person einarbeiten oder wenigstens Unterstützung bekommen, um perspektivisch ohne Brüche eine Kontinuität in der Betreuung zu erreichen und auch eine Wissens- und Erfahrungsweitergabe zu gewährleisten.

Um für das Steinerner Album auf lange Sicht die Kontinuität von Monitoring und Pflege zu gewährleisten, und auch vor dem Hintergrund der allmählich versiegenden Zinserträge, mit denen die Deutsche Stiftung Denkmalschutz seit dem Abschluss der großen Restaurierungskampagne Ende der 1990er Jahre dankenswerter Weise die Pflege und das Monitoring der Reliefs auf kleiner Flamme finanziert, wird den Verantwortlichen der staatlichen Denkmalpflege und auch den Eigentümern dringend empfohlen, für dieses herausragende Objekt einen Antrag auf „Denkmal nationaler Bedeutung“ zu stellen

Wir hoffen weiterhin, dass der Faden zwischen dem „Steinernen Album“ und der Stadt Naumburg bzw. dem Saale-Unstrut-Tourismus e.V. weitergesponnen wird, um für den kompletten Radweg unterhalb des Steinernen Albums Kopien der Reliefs aufzustellen bzw. diese zuvor aus 3D-Daten maßstabsgerecht zu erzeugen und anschließend, wie im Projekt gezeigt, in Mörtel abzugießen. Für eine stärkere Identifizierung der interessierten Besucher*innen wird empfohlen, dafür Daten eines früheren, besser erhaltenen Zustands zu wählen, um einerseits für die Arbeit der Restaurator*innen im Sinne des notwendigen Kulturguterhalts zu sensibilisieren und andererseits, um einfach noch mehr Details der Bildhauerkunst zu transportieren.

Den Eigentümern des Steinauer Weinbergs wünschen wir noch etwas mehr Bewusstsein für den großartigen Kulturschatz, für den sie Verantwortung tragen. Ohne weiterreichendes Engagement und nur mit einer regelmäßigen Begehbarkeit durch Restaurator*innen können die Reliefs überhaupt nur erhalten werden.

11. Literaturverzeichnis

- Auras, M, Meinhardt, J., Snelhage, R. (Hrsg.) (2010):** Leitfaden Naturstein-Monitoring. Nachkontrolle und Wartung als zukunftsweisende Erhaltungsstrategien. Fraunhofer IRB-Verlag.
- Bergner, H. (1905):** Beschreibende Darstellung der älteren Bau- und Kunstdenkmäler des Kreises Naumburg, Otto Hendel, Halle/Saale, pp. 37-45.
- DBU-Abschlussbericht (1999):** Modellhafte Konservierung umweltgeschädigter Sandsteinreliefs des Steinernen Albums in Großjena (Sachsen-Anhalt), Aktenzeichen AZ 07894, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Naumburg.
- DGzfp²⁴⁸ (1999):** „Merkblatt für das Ultraschall-Impuls-Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile“, Merkblatt B4.
- D’ham, G., Meinhardt, Niemeyer, R. (2010):** Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme mit Messröhrchen nach Karsten und Mirowski. In: Leitfaden Naturstein-Monitoring. Nachkontrolle und Wartung als zukunftsweisende Erhaltungsstrategien. Auras, M. et al. (Hrsg.), Fraunhofer IRB-Verlag, pp. 82-92.
- DIN EN 14579 (2005):** „Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung der Geschwindigkeit der Schallausbreitung“
- Do, J. (2000):** Untersuchungen der Verwitterung von Fassaden aus Naturstein – Vergleich an den Gebäuden der Museumsinsel in Berlin. Dissertation, TU Berlin.
- Fiedler, P. (1997):** Steinernes Festbuch Großjena - Modellversuche zur Steinfestigung, Dokumentation der Sicherungs- und Erhaltungsmaßnahmen, Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V., Halle/Saale (unveröffentlicht)
- Ganß, E.-D. (1997):** Feuchtetechnische Untersuchungen - Steinernes Festbuch Großjena, Meßergebnisse der Untersuchung an den Reliefs „Josua und Kaleb“ und „Lots Berauschung“, Projektgruppe Bauphysik, Weimar (unveröffentlicht)
- Gehrmann-Janßen, C. (1995):** On The Biopitting Corrosion By Epilithic And Endolithic Lichens On Carbonate Rocks – Biophysical and Biochemical Weathering Aspects. Dissertation. Carl von Ossietzky Universität Oldenburg. 60 Seiten.
- Gehrmann-Janßen, C. (2018):** Vegetationsaufnahme der Flechtenflora am Steinernen Album Großjena. Projektbericht im DBU-Fördervorhaben AZ 33821/01-45.
- Greßler S., Fiedler U., Simkó M, Gzásó A. & Nentwich M. (2010):** Selbstreinigende, schmutz- und wasserabweisende Beschichtungen auf Basis von Nanotechnologie. In: Nanotrust-Dossiers Nr. 020 der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. Zugriff am 03.09.2021 (<http://epub.oeaw.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier020.pdf>)
- Hofestädt, B. (2011):** Das Steinerner Album bei Großjena – Zu Ehren des Fürsten Christian von Sachsen-Weißenfels, in: Kulturgeschichten aus Sachsen-Anhalt (Hrsg. H. Meller & A. Reichenberg), Landesamt für Denkmalpflege u. Archäologie Sachsen-Anhalt, Halle/ Saale, pp. 248-251.
- Kamaruddin S. (2015):** TiO₂-Beschichtungen zur Herstellung von photokatalytisch modifizierten SiO₂-TiO₂-Kompositmaterialien. Dissertation, TU-Berlin. Zugriff am 24.08.2021 (https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKewiX3PHJ7d3yAhWv_rsiHTTpDQAQFnoECAIQAQ&url=https%3A%2F%2Fdepositonce.tuberlin.de%2Fbitstream%2F11303%2F4951%2F2%2Fkamaruddin_sameena.pdf&usq=AOvVaw3E01YAXd5saytoJcciLn5h)
- Klein, J. (2022):** Untersuchungen zur Festigung vergipster Sandsteinoberflächen mit Kieselsäureester am Beispiel des Steinernen Albums in Großjena., Masterarbeit FH Potsdam, Studiengang Konservierung und Restaurierung, Fachrichtung Stein (aktuell nicht publiziert).

²⁴⁸ Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.

- Lenzner, S. (2009):** Gipsinterbehandlung an der Gewölbeausmalung, In: Die Restaurierung eines Meisterwerks (Hrsg. M. Staschull, B. Rösch), Deutscher Kunstverlag, München, pp. 109-117.
- Lindner, B. (1997):** Entwicklung von Steinerergänzungsmörteln (SEM) für das Objekt „Steinernes Festbuch“ - Gesteintechnische Kennwertermittlung und Modifizierung handelsüblicher Steinerergänzungsmörtel. In: DBU-Projekt „Steinernes Festbuch in Großjena“ (unveröffentl.), Quelle Archiv IDK Halle.
- Maitschke, J. (2013):** Salzminderung an Cottaer Sandstein mit angepassten Kompressen - Untersuchungen zur Optimierung des Kompressenmaterials und der Applikationsbedingungen, Diplomarbeit, Fachhochschule Potsdam.
- Matteini, M. & Nepoti, M. R. (2001):** Analytische Kontrolle der Methoden zur Beseitigung von Gips in der Wandmalerei und bei Kunstobjekten aus Stein. In: J. Pursche (Hrsg.): Konservierung von Wandmalerei. Reaktive Behandlungsmethoden zur Bestandserhaltung: Beiträge einer Fortbildungsveranstaltung der Restaurierungswerkstätten des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege am 9. Dezember 1994. München: Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, S. 67–76
- Meinhardt, J. & Grimm, W.D. (2018):** Kapitel Sachsen-Anhalt. In: Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg. Koch, R. & Grimm, W.D.), Ebner Verlag Ulm.
- Meinhardt, J., Arnold, T., & Böhm, K. (2016):** The Rock Reliefs „Steinernes Album“ of Großjena, Germany - Problems of Deterioration and Approaches for a lasting Preservation, SCIENCE AND ART: A FUTURE FOR STONE PROCEEDINGS OF THE 13th INTERNATIONAL CONGRESS ON THE DETERIORATION AND CONSERVATION OF STONE VOLUME II, Paisley, Scotland, pp. 879-888.
- Meinhardt, J. (2010):** Großjena, Steinernes Album - DBU-Projekt „Monitoring Naturstein“ - Bericht zum Monitoring der Konservierungsmaßnahmen, Bericht HAL 19/2010, Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V., Halle/Saale (unveröffentlicht).
- Meinhardt, J. & Pfefferkorn, S. (2010):** Bohrwiderstand-Prüfverfahren. In: Leitfaden Naturstein-Monitoring. Nachkontrolle und Wartung als zukunftsweisende Erhaltungsstrategien. Auras, M. et al. (Hrsg.), Fraunhofer IRB-Verlag, pp. 65-73.
- MPA Universität Stuttgart (2021):** Ergebnisdokumentation. Abschlussbericht zum Klima- und Feuchtemonitoring am Steinernen Album in Großjena, Verfasser F. Lehmann, Berichtsnummer 8703 3604/2021, 15 S.
- Müller, A. & Beutler, G., & Siegesmund, S. (2014):** Geologie des Triaslandes und Landschaftsentwicklung, in Siegesmund, S.; Hoppert, M., & Epperlein, K. (Ed.): Natur, Stein, Kultur, Wein. Zwischen Saale und Unstrut, Mitteldeutscher Verlag, Halle/Saale, pp. 45-92.
- Nimis, P. L., Pinna D. & Salvadori, O. (1992):** Licheni E Conservazione Dei Monumenti. Bologna: CLUEB.
- Purvis, O. W., Coppins, B. J., Hawksworth, D. L., James, P. W. & Moore D. M. (1992):** The Lichen Flora Of Great Britain and Ireland. Natural History Museum Publications in assoc. with The British Lichen Society.
- Radzinski, K. H. (1995):** Zur Gliederung der Trias im Süden von Sachsen-Anhalt, in: Zeitschrift für Geologische Wissenschaften, Band 23 Heft 1/2, Verl. für Geowissenschaften Wutzke, Berlin, pp. 43-62.
- Schiller, C. (1987):** Über den Einfluß silicoler und calcicoler Flechten auf Grabsteine jüdischer Friedhöfe unter besonderer Berücksichtigung von Standortsbedingungen und Biokorrosionsprozessen. Diplomarbeit. Carl von Ossietzky Universität Oldenburg. 117 Seiten.
- Schlütter, F. (2019):** Untersuchungsbericht 05-10241-19, Amtliche Materialprüfungsanstalt der Freien Hansestadt Bremen, Geschäftsbereich des Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien – IWT
- Siedel, H. (1998):** Petrografische Untersuchung an Sandsteinproben vom „Steinernen Festbuch“ Großjena, Bericht DD 10/98, Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V., Halle/Saale (unveröffentlicht).
- Siedel, H. & Klemm, W. (2001):** Salzausblühungen auf der Oberfläche von Sandsteindenkmälern und auf anstehenden Sandsteinen in Aufschlüssen – natürliche oder anthropogene Ursachen? Sonderdruck aus

Geologica Saxonica, Proceedings of the Symposium in Honour of Hanns Bruna Geinitz, Abhandlungen des Museums für Mineralogie und Geologie Dresden, Band 46/47, pp. 203-208.

Skasa-Lindermeir B. und Wendler E. (2019): Anwendung von photokatalytisch wirksamem Titandioxid als Prophylaxe gegen mikrobiellen Befall von Naturstein und Putz in der Mikwe in Worms. In: Auf dem Weg zu einem Konservierungskonzept für die Mikwe in Worms. IFS-Bericht Nr. 58, S. 61-78

Snethlage, R. (2018): Risikoziffer I bis III; Umweltschäden an Marmor und Sandsteinskulpturen erfassen und objektiv bewerten; Forschungen des Instituts für Archäologische Wissenschaften, Denkmalwissenschaften und Kunstgeschichte der Otto-Friedrich-Universität Bamberg; Herausgeber: Rainer Drewello: Bd.12; 2018; University of Bamberg Press.

Snethlage, R. (1997): Kurzbericht zur Beiratssitzung 11.12.1997, Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V., Halle/Saale (unveröffentlicht).

Terheiden, K. (2007): Feuchte- und Salztransport – Charakterisierung der Interaktion zwischen Porenfluid und porösem Baustoff. Dissertation Bauhaus-Universität Weimer, Cuvillier Verlag, Göttingen.

Vergès-Belmin, V., Siedel, H. (2005): Desalination of Masonries and Monumental Sculptures by Policing: A Review, in: Bauinstandsetzung und Baudenkmalpflege Vol. 11, No. 6, pp. 391-408.

Wendler, E. (2017): Reaktive Behandlungsmethoden zur Umwandlung von Gips - eine Alternative zur „Florentiner Methode“? In: Bayrisches Landesamt für Denkmalpflege (Hrsg.): Retrospektive und Perspektive. Methoden und Techniken in der Wandmalereirestauration: Werkstattgespräch des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege im Literaturhaus München, 9. und 10. Mai 2016. München: Volk Verlag, S. 155–165.

Winkler J. (2013): Titandioxid: Produktion, Eigenschaften und effektiver Einsatz. 2. Auflage

Wirth, V., Hauck, M. und Schultz, M. (2013): Die Flechten Deutschlands. Band 1 und 2. Stuttgart: Ulmer

WTA-Merkblatt (1999): Beurteilung von Mauerwerk - Mauerwerksdiagnostik (Merkblatt 4-5-99/D), Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege, WTA, München.

Zilm, J. (2018): Erstellung eines nachhaltigen Konzepts zum Umgang mit Fehlstellen im anstehenden Gestein des Mittleren Buntsandsteins. Bachelorthesis, FH Potsdam.

12. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung	Bezeichnung	Quelle	Seite
Deckblatt		J. Meinhardt	Deckblatt
Dank		J. Meinhardt	4
1	Aufnahme vor 1945 (genaues Jahr nicht gewiss), Relief <i>Fuchsjagd</i>	fokus GmbH	18
2	Aufnahme 1995, vor der Restaurierungskampagne...	fokus GmbH	19
3	Zustand 1999, nach der Restaurierungskampagne...	fokus GmbH	19
4	Zustand 2017, vor der Anlage der Musterflächen zur Vergrämung der biogenen Besiedelung...	fokus GmbH	20
5	Zustand vor 1945, Relief <i>Herzog Christian</i>	fokus GmbH	20
6	Aufnahme eventuell aus dem Jahr 1898. In beiden Draperien sind noch die Inschriften deutlich erkennbar...	Archiv Schloss Neuenburg (übergeben von Dr. W. Wedekind)	21
7	Zustand 1995, vor der Restaurierungskampagne, Relief <i>Herzog Christian</i>	fokus GmbH	21
8	Zustand 2017, Relief <i>Herzog Christian</i>	fokus GmbH	22
9	Historische Aufnahme des Reliefs <i>Hochzeit zu Kana</i> ...	Archiv Schloss Neuenburg (übergeben von Dr. W. Wedekind)	22
10	Zustand 1995, vor der Restaurierungskampagne, Relief <i>Hochzeit zu Kana</i>	fokus GmbH	23
11	Zustand 1999, nach der Restaurierung, Relief <i>Hochzeit zu Kana</i>	fokus GmbH	23
12	Zustand 2017, Relief <i>Hochzeit zu Kana</i>	fokus GmbH	24
13	Historische Aufnahme des Reliefs <i>Christus in der Kelter</i>	Archiv Schloss Neuenburg (übergeben von Dr. W. Wedekind)	24
14	Zustand 1999, nach der Restaurierungskampagne, Relief <i>Christus in der Kelter</i> .	J. Meinhardt	25
15	Zustand 2021, Relief <i>Christus in der Kelter</i> ...	J. Meinhardt	25
16	Relief <i>Hochzeit zu Kana</i> , Skizze	Bearbeitete Photos der aktuellen Aufstellern am Weg unterhalb des Steinernen Album, bearbeitet von J. Meinhardt	26
17	Relief <i>Christus in der Kelter</i> , Skizze		26
18	Relief <i>Noah</i> , Skizze		27
19	Relief <i>Christus in der Kelter</i> mit Markierungen (Pfeile) an den bezüglich der Risikoziffer berücksichtigten Figuren.	J. Meinhardt	29
20	Kennblätter 1 und 2 für die linke Figur mit Hund im Relief <i>Christus in der Kelter</i>	J. Klein	30
21	Kennblatt 3 für die linke Figur mit Hund im Relief <i>Christus in der Kelter</i>	J. Klein	30
22	Kennblatt 4 für die linke Figur mit Hund im Relief <i>Christus in der Kelter</i>	J. Klein	31
23	Kennblatt 6 für die linke Figur mit Hund im Relief <i>Christus in der Kelter</i>	J. Klein	31
24	Kennblatt 7 für die linke Figur mit Hund im Relief <i>Christus in der Kelter</i>	J. Klein	31
25	Kennblatt 8 für die linke Figur mit Hund im Relief <i>Christus in der Kelter</i>	J. Klein	32

Abbildungsverzeichnis

26	Kennblatt 9 für die linke Figur mit Hund im Relief <i>Christus in der Kelter</i>	J. Klein	32
27	Kennblatt 10 für die linke Figur mit Hund im Relief <i>Christus in der Kelter</i>	J. Klein	33
28	Kennblatt 11 für die linke Figur mit Hund im Relief <i>Christus in der Kelter</i>	J. Klein	33
29	Kennblatt 12 Gesamtbewertung für die linke Figur mit Hund im Relief <i>Christus in der Kelter</i>	J. Klein	34
30	Linke Figur im Relief <i>Christus in der Kelter...</i>	J. Meinhardt	35
31	Dritte Figur von links im Relief <i>Christus in der Kelter...</i>	J. Meinhardt	35
32	Kennblatt 12 Gesamtbewertung für die 3. Figur von links im Relief <i>Christus in der Kelter</i>	J. Zilm	35
33	Kennblatt 12 Gesamtbewertung für die Figur rechts des Christus im Relief <i>Christus in der Kelter</i>	F. Baschin	36
34	Erste Figur rechts der Kelter im Relief <i>Christus in der Kelter</i> mit massiven Fehlstellen...	J. Meinhardt	36
35	Relief <i>Hochzeit zu Kana</i> . Impedanz- und Bohrlochklimasensoren (10 cm Tiefe) im Bereich der beiden Pfeile installiert	F. Lehmann	39
36	Relief <i>Christus in der Kelter</i> . Impedanz- und Bohrlochklimasensoren bis 20 cm...	J. Meinhardt	39
37	Relief <i>Christus in der Kelter</i> . Die Impedanz- und Bohrlochklimasensoren sind auf dem Bild oberhalb der Buttenträgerin, rechts des Weinkelers installiert...	F. Lehmann	40
38	Messstelle 1. Impedanzwerte bei 10 kHz der Sensoren mit 12 mm, 26 mm und 100 mm Abstand zur Steinoberfläche.	F. Lehmann	41
39	Messstelle 2. Impedanzwerte bei 10 kHz der Sensoren mit 12 mm, 26 mm und 100 mm Abstand zur Steinoberfläche.	F. Lehmann	41
40	Temperaturen aller am Relief verbauten Sensoren und mittlere relative Feuchte der Umgebungsluft.	F. Lehmann	41
41	Relative Luftfeuchten aller am Relief verbauten Sensoren und mittlere Temperatur der Umgebungsluft	F. Lehmann	41
42	Impedanzwerte bei 10 kHz der Sensoren in 30 mm, 50 mm und 75 mm Tiefe.	F. Lehmann	42
43	Impedanzwerte bei 10 kHz der Sensoren in 100 mm, 150 mm und 200 mm Tiefe.	F. Lehmann	42
44	Temperaturwerte aller verbauten Sensoren	F. Lehmann	43
45	Temperatur und relative Feuchte der Umgebungsluft am Relief. Die Zeitachse ist im Sommer 2018 wegen fehlender Werte unterbrochen.	F. Lehmann	43
46	Durchfeuchtungsgrad, Messachse Relief <i>Hochzeit zu Kana</i>	B. Hübner	45

Abbildungsverzeichnis

47	Tiefenprofil des IDK am Relief <i>Hochzeit zu Kana</i> in 4 verschiedenen Höhen und jeweils bis in 40 cm Tiefe.	M. Zötzl	47
48	Stichprobenartig und kurzfristig über die gesamten Reliefs angelegte Cellulosekompressen...	B. Hübner	47
49	Salzbelastung der Bohrmehlproben aus dem oberflächennahen Bereich (0-1 cm)	B. Hübner	49
50	Ionengehalte aller untersuchten Proben von 1997-2017	B. Hübner	50
51	Ionengehalte der Krusten (1997-2010)	B. Hübner	51
52	Ergebnisse der Cellulosekompressen - Ionenverteilung in den Oberflächen	B. Hübner	52
53	Probe des Salzspeichermörtels, Schnitt senkrecht zur Oberfläche	M. Zötzl	54
54	Oberfläche des Salzspeichermörtels	M. Zötzl	54
55	Salzspeicherputzprobe mit vermutlich Bimskomponenten, die für eine....	M. Zötzl	55
56	Salzspeicherputzprobe, Natrium-Elementverteilungsmapping auf SE-Bild	M. Zötzl	55
57	Einige Thalli von <i>Caloplaca teicholyta</i> auf dem Relief <i>Fuchsjagd</i>	C. Gehrman-Janßen	64
58	<i>Candelariella aurella</i> auf dem Relief <i>Fuchsjagd</i>	C. Gehrman-Janßen	64
59	<i>Circinaria caesiocinerea</i> auf dem Relief <i>Christus in der Kelter</i>	C. Gehrman-Janßen	65
60	<i>Lecanora albescens</i> auf dem Relief <i>Fuchsjagd</i>	C. Gehrman-Janßen	65
61	<i>Lecanora muralis</i> auf dem Relief <i>Fuchsjagd</i>	C. Gehrman-Janßen	66
62	<i>Lecidella stigmatea</i> auf dem Relief <i>Fuchsjagd</i>	C. Gehrman-Janßen	66
63	<i>Verrucaria nigrescens</i> auf dem Relief <i>Fuchsjagd</i>	C. Gehrman-Janßen	67
64	Ausschnitt aus der rechten Hälfte des Reliefs <i>Fuchsjagd</i>	C. Gehrman-Janßen	68
65	Relief <i>Fuchsjagd</i> Dominanz coccaler Cyano-bakterien (grün)	C. Gehrman-Janßen	69
66	Relief <i>Christus in der Kelter</i> Dominanz coccaler (blauschwarze Haufen) und fädiger Cyanobakterien (unten Mitte)	C. Gehrman-Janßen	69
67	Relief <i>Christus in der Kelter</i> , östlicher Bereich. Der Pfeil markiert den Bereich unter den bildhauerischen Arbeiten, der mit Hinblick auf die Vegetationskartierung großflächig näher betrachtet worden ist.	C. Gehrman-Janßen	69
68	Kartierter Bereich (nicht das markierte Feld) unterhalb des Reliefs <i>Christus in der Kelter</i>	C. Gehrman-Janßen	69
69	<i>Lecanora muralis</i> , Hyphen (\varnothing 2-5 μ m) des Pilzes an der Unterseite in 2mm (PAS, 200fach)	C. Gehrman-Janßen	70
70	<i>Circinaria caesiocinerea</i> , Längsseite, Hyphen (\varnothing 2-5 μ m) mäandern um Gesteinskristalle, Relief <i>Christus in der Kelter</i> , (PAS, 200fach)	C. Gehrman-Janßen	70

Abbildungsverzeichnis

71	Das Gestein unterhalb des Flechtenbewuchs ist vermutlich durch die Aktivität der Hyphen bereits sehr stark entfestigt. Skalpell (71) und Kanüle (72) sind leicht einzustecken	J. Meinhardt	72
72			
73	Bohrwiderstandsmessung zur Charakterisierung des Einflusses der Flechten auf den Untergrund, Messfläche 05, Relief <i>Fuchsjagd</i>	J. Meinhardt	72
74	Bohrwiderstandsmessung zur Charakterisierung des Einflusses der Flechten auf den Untergrund, Messfläche 06, Relief <i>Christus in der Kelter</i>	J. Meinhardt	73
75	Relief <i>Fuchsjagd</i> im Sommer 2017	J. Meinhardt	74
76 (a-c)	Details des Reliefs <i>Fuchsjagd</i> Januar 2018	J. Meinhardt	74
77	Schutzvorrichtung um die UV-c-Lampe, deren Strahlung für 48 Stunden gegen den linken unteren Bereich des Reliefs gerichtet war.	J. Meinhardt	75
78	Heterogen besiedelte Oberfläche mit dem Gitter, das zur Orientierung bei der Anlage der Musterflächen diente.	J. Meinhardt	75

79	Anlage der Musterflächen. In der unteren Reihe erfolgt die Reinigung mit H ₂ O ₂ als intensivste Reinigungsmethode	J. Meinhardt	75
80	Eine mit H ₂ O ₂ gereinigte Fläche (links) im Vergleich zur nahezu...	J. Meinhardt	76
81	Kriechender Jäger im Relief <i>Fuchsjagd</i> mit massivem hellgrünem Flechten...	J. Meinhardt	76
82	Gereinigter Jäger im Relief <i>Fuchsjagd</i> , hellgrau bis hellrötliche Sandstein		
83	Übersicht der Musterflächen mit den unterschiedlichen angewendeten Reinigungsmethoden und -intensitäten	J. Meinhardt	77
84	Musterflächen mit den unterschiedlichen Schlämmrezepturen am Relief <i>Fuchsjagd</i>	J. Meinhardt	79
85	Musterflächen mit einmaligem Schlämmauftrag KSE mit TiO ₂ -Zusatz am Relief <i>Fuchsjagd</i> in einer Zeitschau nach dem Auftrag, nach 3 Monaten und 7 Monaten.	J. Meinhardt	80
86	Musterflächen mit zweimaligem Schlämmauftrag KSE mit TiO ₂ -Zusatz am Relief <i>Fuchsjagd</i> in einer Zeitschau nach dem Auftrag, nach 3 Monaten und 7 Monaten.	J. Meinhardt	80
87	Musterflächen mit einmaligem Schlämmauftrag Kieselol mit TiO ₂ -Zusatz am Relief <i>Fuchsjagd</i> in einer Zeitschau nach dem Auftrag, nach 3 Monaten und 7 Monaten.	J. Meinhardt	81
88	Musterflächen mit zweimaligem Schlämmauftrag Kieselol mit TiO ₂ -Zusatz am Relief <i>Fuchsjagd</i> in einer	J. Meinhardt	81

Abbildungsverzeichnis

	Zeitschau nach dem Auftrag, nach 3 Monaten und 7 Monaten.		
89	Musterflächen mit ein- und zweimaligem Schlämmauftrag Acrylat (ohne TiO ₂ -Zusatz) am Relief <i>Fuchsjagd</i> in einer Zeitschau nach dem Auftrag, nach 3 Monaten und 7 Monaten.	J. Meinhardt	82
90	Musterflächen mit ein- und zweimaligem Schlämmauftrag Kalk (ohne TiO ₂ -Zusatz) am Relief <i>Fuchsjagd</i> in einer Zeitschau nach dem Auftrag, nach 2 Monaten und 16 Monaten.	J. Meinhardt	82
91	Musterflächen unterschiedlicher KSE- und Kieselsolschlämmaufträgen nach ca. einjähriger Standzeit am Relief <i>Fuchsjagd</i>	J. Meinhardt	83
92	Schlämmmuster auf dem Relief <i>Fuchsjagd</i> nachdem sie zum Ende des Projekts einretuschiert worden sind.	J. Meinhardt	84
93	Aufstellungssituation der beschichteten Probeflächen bzw. -körper, auf der Terrasse der Steinwerkstatt, ab April 2020...	J. Meinhardt	84
94	Zähe, spannungsreiche Oberfläche mit Pusteln, darunter sandend...	J. Meinhardt	86
95	Detail, spannungsreiche Pustel, darunter sandend, <i>Relief Herzog Christian...</i>	J. Meinhardt	86
96	Großflächige schalige Ablösungen, deren Bindemittel zumindest teilweise aus Gips besteht (plastisch verformt)...	J. Meinhardt	86
97	Dünne Sandsteinschale mit aufgelockertem Gefüge (Mürbzone) unterhalb eines Gipssaums (Bereich 1), Maßstab 1mm (Hellfeld)	F. Schlütter, MPA Bremen	87
98	Dünne Sandsteinschale mit aufgelockertem Gefüge (Mürbzone) unterhalb eines Gipssaums (Detail Bereich 1), Maßstab 0,5 mm (Hellfeld)	F. Schlütter, MPA Bremen	87
99	Dünne Sandsteinschale mit aufgelockertem Gefüge (Mürbzone) unterhalb eines Gipssaums mit weißen Gipsnadeln (gekreuzte Polarisatoren) (0,5 mm)	F. Schlütter, MPA Bremen	88
100	Sandsteinschale mit einem Gipssaum, an der Außenseite, Maßstab 0,2mm (gekreuzte Polarisatoren)	F. Schlütter, MPA Bremen	88
101	Musterfläche mit Ionentauschern (u. und Mi.) und Ammoniumkarbonat (o.) im li. Bereich des Reliefs <i>Hochzeit zu Kana</i>	J. Meinhardt	89
102	Detail der Abbildung 101 nur mit Ionentauschern	J. Meinhardt	89
103	Musterfläche mit Ionentauscher Akeogel (oben) und Ammoniumkarbonat (unten) im Reliefs <i>Christus in der Kelter</i>	J. Meinhardt	89

Abbildungsverzeichnis

104	Musterfläche mit Ionentauschern (li. Akeogel, re. Powdex) im re. Bereich des Reliefs <i>Herzog Christian...</i>	J. Meinhardt	89
105	Musterfläche mit Ammonium-karbonat im li. Bereich des Reliefs <i>Herzog Christian...</i>	J. Meinhardt	90
106	Detail aus Abbildung 105	J. Meinhardt	90
107	Bohrergeometrien, wobei nur der rechte gezeigte Bohrer für die Auflösung oberflächennaher Phänomene geeignet ist...	J. Meinhardt	91
108	Relief <i>Herzog Christian</i> (MP 03). Typisches Kurvenprofil für zähe feste Oberflächen, die z.T. pustelig aufspringen....	J. Meinhardt	91
109	Relief <i>Herzog Christian</i> (MP 01). Ebenfalls typisches Kurvenprofil für zähe feste Oberflächen: erhöhte Festigkeit zwischen 1 - 3,5 mm...	J. Meinhardt	92
110	Relief <i>Herzog Christian</i> (MP 02). Typisches Kurvenprofil für zähe feste Oberflächen: erhöhte Festigkeit zwischen 0,5 - 3,5 mm (Höchstwert 21,5 N; ca. 4x so hoch wie der Mittelwert „normal“), keine deutliche Mürbzone „normal“ ab 4 mm (Werte zwischen 3,1 – 6,9 N; Einzelwert 8 N)	J. Meinhardt	92
111	Bohrwiderstand. Messstellen 01-04, Relief <i>Herzog Christian</i> , nach dem Auftrag des Ammoniumkarbonats (MP 01)...	J. Meinhardt	93
112	Detail 03 und 04 (links); Fläche in 2018 mit Ionenaustauschern behandelt, Messungen um Pustel herum...	J. Meinhardt	93
113	Situation der Injektionsfestigung über auf Bohrlöcher aufgesetzte Trichter im Zuge der umfassenden Restaurierungskampagne 1998/99 am Bereich des Reliefs <i>Herzog Christian</i>	P. Fiedler	97
114	Vorgehen im Rahmen der Injektionsfestigung...	P. Fiedler	97
115	Hydrolysereaktion (links) mit Bildung der Silanolgruppen und Kondensationsreaktion (re.) mit der Bildung der Siloxanverbindungen	E. Wendler	97
116	Bohrkerne zweier verschiedener Varietäten, die aus den Reliefs <i>Hochzeit zu Kana</i> und <i>Christus in der Kelter</i> , jeweils aus gefestigten Bereichen...	J. Meinhardt	98
117	Verortung des Bohrkerns im Relief <i>Hochzeit zu Kana</i> (Pfeil) im unteren Bereich, hellgraue, mittelkörnige Varietät und Lage des Kerns in der Maßnahmenkartierung (Pfeil), unweit von zwei durch blau Punkte markierte Injektionslöcher...	J. Meinhardt (links), P. Fiedler (rechts)	98
118	Verortung des Bohrkerns im Relief <i>Christus in der Kelter</i> , li. Bereich (Pfeil) i	J. Meinhardt	98

Abbildungsverzeichnis

119	Verortung des Bohrkerns in der Maßnahmenkartierung des Reliefs <i>Christus in der Kelter</i> , li. Bereich (Pfeil), direkt neben einem mit einem blauen Punkte markiertem Injektionsloch...	P. Fiedler (verändert durch J. Meinhardt)	98
120	Vergleichende Darstellung der Ultraschallgeschwindigkeiten der beiden entnommenen Bohrkern (rötliche, feinkörnige aus dem Relief <i>Christus in der Kelter</i> und die graue, mittelkörnige Varietät aus dem Relief <i>Hochzeit zu Kana</i>).	J. Meinhardt	99
121	Zähe, spannungsreiche Oberfläche mit Pusteln, darunter sandend – Überfestigung oder Interaktion mit Gips, Relief <i>Herzog Christian</i> , li. Bereich	J. Meinhardt	101
122	Relief <i>Hochzeit zu Kana</i> : schuppiger und körniger Materialverlust...	J. Meinhardt	101
123	Bohrschablone (erstellt von J. Klein), mit der es möglich war, in unterschiedlichen Winkeln am Relief zu bohren...	J. Meinhardt	103
124	Bohrkernentnahmestelle am unteren Rand der li., unteren Musterfläche, hellgraue mittelkörnige Varietät, Vorzustand vor der Injektionsfestigung.	J. Meinhardt	103
125	Gewonnener Bohrkern, der einen relativ bröseliges, instabiles Material repräsentiert.	J. Meinhardt	103
126	Bohrkernentnahmestelle (Pfeil) rechts neben dem Relief <i>Herzog Christian</i> , in der gleichen Gesteinsvarietät verortet, wie die beiden Musterflächen rechts des Pferdes (KSE 300)	J. Meinhardt	104
127	Lithologische Kartierung des Reliefs <i>Herzog Christian</i> aus den 1990er Jahren	P. Fiedler	104
128	Bohrkern aus dem markierten Bereich.	J. Meinhardt	104
129	Abplanung der Musterflächen. Wiederholung der Injektionsfestigung am Relief <i>Herzog Christian</i>	J. Meinhardt	104
130	Überblick der Musterflächen am Relief <i>Herzog Christian</i>	J. Meinhardt	104
131	Zwei Musterflächen links des Wappens – oben KSE 100 und KSE 300 unten	J. Meinhardt	105
132	Zwei Musterflächen rechts des Pferdes – beide mit KSE 300	J. Meinhardt	105
133	Aufhängung der Behälter mit dem KSE, für einen möglichst knickfreien Verlauf der Schläuche	J. Meinhardt	106
134	Musterfläche oben rechts - KSE 300 nach 75 min des Saugens (li.) und in Folge des Nachsaugens (re.)	J. Meinhardt	106
135	Musterfläche unten rechts - KSE 300 nach 75 min des Saugens (links) und Musterfläche unten links - KSE 300	J. Meinhardt	107
136	Lithologische Kartierung Relief <i>Herzog Christian</i> mit Legend	P. Fiedler	107

Abbildungsverzeichnis

137	Vergleichende Darstellung der Ultraschallmessungen vor und nach der Infusionsfestigung mit KSE 300, Varietät 1, im linken Bereich des Reliefs <i>Herzog Christian</i>	J. Meinhardt	109
138	Vergleichende Darstellung der Ultraschallmessungen vor und nach der Infusionsfestigung mit KSE 300, Varietät 2, im rechten Bereich des Reliefs <i>Herzog Christian</i>	J. Meinhardt	109
139	Anordnung der Bohrlöcher der Bohrwiderstandsmessungen, in Bezug auf das Bohrloch für die Injektion (Pfeil)	J. Meinhardt	110
140	Musterfläche rechts unten, Relief <i>Herzog Christian</i> , vor der Tränkung	J. Meinhardt (Photo), J. Quadrius (Messkurven)	111
141	Musterfläche rechts unten, Relief <i>Herzog Christian</i> , nach der Tränkung mit KSE 300	J. Meinhardt (Photo), J. Quadrius (Messkurven)	111
142	Musterfläche links unten, Relief <i>Herzog Christian</i> , vor der Tränkung	J. Meinhardt (Photo), J. Quadrius (Messkurven)	111
143	Musterfläche links unten, Relief <i>Herzog Christian</i> , nach der Tränkung mit KSE 300...	J. Meinhardt (Photo), J. Quadrius (Messkurven)	112
144	Ergänzung (Remmers weich) mit Flankenablösung. Das darunterliegende Gestein sandet stark...	J. Meinhardt	113
145	Rezeptur C2 auf Kieselsolbasis (Quelle: J. Zilm)	J. Zilm	114
146	Rezepturen der untersuchten Salzspeicherputze, markiert A4 (Quelle: J. Zilm)	J. Zilm	115
147	Kartierung der Hohlstellen und Altergänzungen, die mittels sehr fester und nur oberflächlich aufliegender Mörtel in jüngerer Vergangenheit ausgeführt worden sind...	J. Meinhardt	116
148	Inskriptentafel im Relief <i>Christus in der Kelter</i> mit großen Fehlstellen und unzureichender Anwendung des Injektionsmörtels...	J. Meinhardt	116
149	Umfeld des Reliefs <i>Lots Berausung</i> mit Ablaufspuren des nicht geeigneten Injektionsmörtels...	J. Meinhardt	116
150	Mit Heißkleber eingesetzte und fixierte Schläuche zur Injektion bzw. zur Entlüftung	J. Meinhardt	117
151	Nahaufnahme der Oberkante der hohl liegenden Schale – mit Heißkleber abgedichtet und mit Injektionsschläuchen versehen.	J. Meinhardt	117
152	Schläuche zur Injektion im unteren Bereich der zu hinterfüllenden Platte, eingeklebt mit Heißkleber.	J. Meinhardt	117
153	Inskriptentafel nach Abschluss der Arbeiten im Sommer 2021	J. Meinhardt	118

Abbildungsverzeichnis

154	Aktuelle Präsentation der Reliefs des Steinernen Albums entlang dem Radweg	J. Meinhardt	119
155	Relief <i>Fuchsjagd</i> , Zustand Juli 2021	J. Meinhardt	120
156	Gefräste Kopie des Reliefs <i>Fuchsjagd</i>	J. Meinhardt	120
157	Arbeitsschritte beim Übertragen der 3D-Daten mittels der Frästechnik in die PU-Platte (Umsetzung Fa. Schichtwerk)	J. Meinhardt	121
158	Fertiggestellte, gefräste Reliefplatte <i>Fuchsjagd</i> ...	J. Meinhardt	121
159	Gefrästes Relief aus dem PU-Block, eingepinselt mit dem Trennmittel, vor Aufbringen der Silikonschicht	F. Geiger	122
160	Die erste, dünne Schicht der Abformmasse aus Silikonharz...	F. Geiger	122
161	Die Stützformen wurden sorgfältig aneinandergelegt und mit untergelegten Keilen ausgerichtet...	F. Geiger	123
162	Mörtelprobe 11 (links) und 12 (rechts) mit einem darüber liegende Stück Buntsandstein vom Steinernen Album aus der Nähe des Reliefs <i>Fuchsjagd</i> .	F. Geiger	124
163	Die vorbereitete Armierung wird in die Gussform eingelegt und vorsichtig in den Mörtel gedrückt (links). Anschließend wird komplett mit Mörtel aufgefüllt (rechts).	F. Geiger	125
164	Der fertige Abguss mit der Mörtelrezeptur 1. Die Abformung und der Abguss haben gut funktioniert.	F. Geiger	125
165	Kleine Löcher im Mörtel als Folge von Lufteinschlüssen an der Silikonform.	F. Geiger	126
166	Ergebnis der Mörtelmischung 3. Trotz einiger sehr kleiner Fehlstellen (rechts) sind die meisten Details präzise nachgebildet...	F. Geiger	126
167	Ergebnis des Abgusses mit Mörtelmischung 2. Wegen mangelnde Durchmischung gibt es massive Fehlstellen (unterer Bereich)...	F. Geiger	127
168	Schematische Darstellung der geplanten Aufstellungssituation der Abformung am Radweg unterhalb der Reliefs	J. Meinhardt	128
ANHANG			ANHANG
1-14	Aktuelle Darstellungen der Reliefs 2-12	J. Meinhardt	1-7
15	SINT Drill Resistance Measurement System (DRMS Cordless)	https://sint-technology.com/drilling-resistance-measurement-system/ https://sint-technology.com/wp-content/uploads/2016/08/MG_4674.jpg	8
16	Hauptbedienoberfläche der Software DRMS Cordless 5.05b	Screenshot Auswerteprogramm J. Meinhardt	8
17	Oberfläche Test Configuration (links) und erweiterte Oberfläche Test Configuration (rechts)	Screenshot Auswerteprogramm J. Meinhardt	9
18	Messung am Objekt (links) und an einer Probe im Labor (rechts)	J. M. Quadrius	11

Tabellenverzeichnis

Tabelle	Bezeichnung	Quelle	Seite
1	Ergebnisse der Basisuntersuchungen	M. Zötzl	54
2	Ergebnisse der qualit. und quant. Salzanalysen an den Bohrmehlproben der verschiedenen Tiefen	M. Zötzl	54
3	Bewertung der Ergebnisse der qualit. und quant. Salzanalysen an den Bohrmehlproben nach WTA-Merkblatt 4-5-99/D „Mauerwerksdiagnostik	M. Zötzl	55
4	Übersicht über den schwerpunktartig besiedelten pH-Wertbereich der kartierten Flechten	C. Gehrman-Janßen	67
5	Rezepturen der Schlämmen	T. Schubert	78
6	Aufgenommenen Festigungsmengen der einzelnen Injektionslöcher	J. Klein	107
ANHANG			
1	Einstellungen Bohrmaschine	J. M. Quadrizius	10
2	Beispieleinstellungen der Firma SINT	ZINT Technology	10

Aktuelle Aufnahmen der Reliefs des Steinernen Albums (Zeitraum 2017 bzw. 2021)



Abb. 1: Relief *Fuchsjagd*, Oktober 2017



Abb. 2: Relief *Herzog Christian*, Juli 2021



Abb. 3: Relief *Puttentanz*, Juli 2021



Abb. 4: Relief *Hochzeit zu Kana*, Juli 2021



Abb. 5: Relief *Lots Berausung* (rechts) mit dem brennenden Sodom (links), Juli 2020



Abb. 6: Relief *Lots Berausung*, Juli 2021



Abb. 7: Relief *Verkündigung an die Hirten*, September 2020



Abb. 8: Relief *Christus in der Kelter* (linker Bereich), Juli 2020



Abb. 9: Relief *Christus in der Kelter* (zentraler Bereich), Juli 2020



Abb. 10: Relief *Christus in der Kelter* (rechter Bereich), September 2020



Abb. 11: Relief Arbeiter im Weinberg, September 2020



Abb. 12: Relief Noah, Juli 2020



Abb. 13: Relief *Josua und Kaleb*, September 2021



Abb. 14: Relief *Moses im gelobten Land*, September 2020

Anleitung zur Bohrwiderstandsmessung mit dem Gerät SINT DRMS

Beim Arbeiten mit dem SINT Drill Resistance Measurement System (DRMS Cordless) kam es immer wieder zu unerwarteten Schwierigkeiten, welche in der Gebrauchsanweisung unzureichend oder gar nicht aufgeführt werden. Der folgende Abschnitt beinhaltet ausführliche Bedienhinweise für das DRMS, zeigt Fehlermeldungen und deren Vermeidung, sowie Lösungsansätze auf.

Das DRMS besteht aus dem eigentlichen Bohrwiderstandgerät und einem tragbaren Rechner, welcher von SINT inklusive vorinstallierter DRMS-Software mitgeliefert wurde.



Abb. 15: SINT Drill Resistance Measurement System (DRMS Cordless)

Vorgehen bei der Inbetriebnahme

- 1.) Rechner/Laptop hochfahren, anschließend das DRMS via USB-Kabel anschließen
- 2.) Akku der Bohrmaschine einlegen (Immer auf eine möglichst volle Ladung des Akkus achten, da bei kompletter Entladung des internen Gerätespeichers eine Remote-Wartung durch SINT nötig wird. Auch weniger als halbvoll geladener Akku ist ungünstig.)
- 3.) Gerät am Kippschalter einschalten (ggf. Systemsound für Verbindung abwarten)
- 4.) Programm "SINT DRMS Cordless 5.05b" öffnen

Hinweis: Das Programm lässt sich auch ohne Verbindung mit dem angeschalteten Gerät öffnen um bspw. DRM-Dateien zu betrachten/exportieren oder Bohreinstellungen vorzubereiten. Es erscheint jedoch dauerhaft eine blinkende Fehlermeldung "Acquisition Error Occured". Diese kann lediglich aus dem Sichtbereich gezogen werden. Ein Schließen der Fehlermeldung ist nicht möglich.

Wird das Gerät ausgeschaltet, der Akku gewechselt oder die USB-Verbindung getrennt, muss das Programm aufgrund dieser Meldung geschlossen und erneut gestartet werden. Vorgenommene Einstellungen müssen wieder geladen bzw. erneut konfiguriert werden.

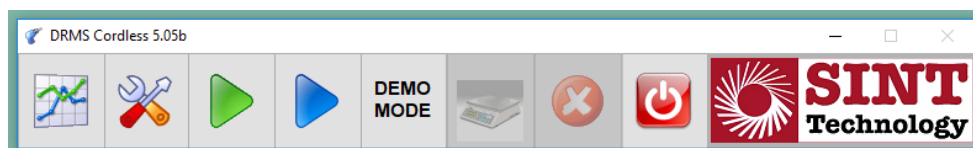


Abb. 16: Hauptbedienoberfläche der Software DRMS Cordless 5.05b

Messungen vorbereiten
Test configuration (Werkzeugsymbol)

Für die Messungen sind nur folgende vier Parameter wichtig: Destination path, Hole Depth (mm), Penetration Rate (mm) und Revolution Speed (mm).

Weitere Informationen wie Anwender*in, Gesteinsart, Verwitterung etc. können angegeben werden, sind aber später nur einzeln und umständlich auslesbar (siehe Test Elaboration/Show Settings).

Daher empfiehlt es sich die Bohrungen parallel zu dokumentieren, um spätere Verwechslungen zu vermeiden.

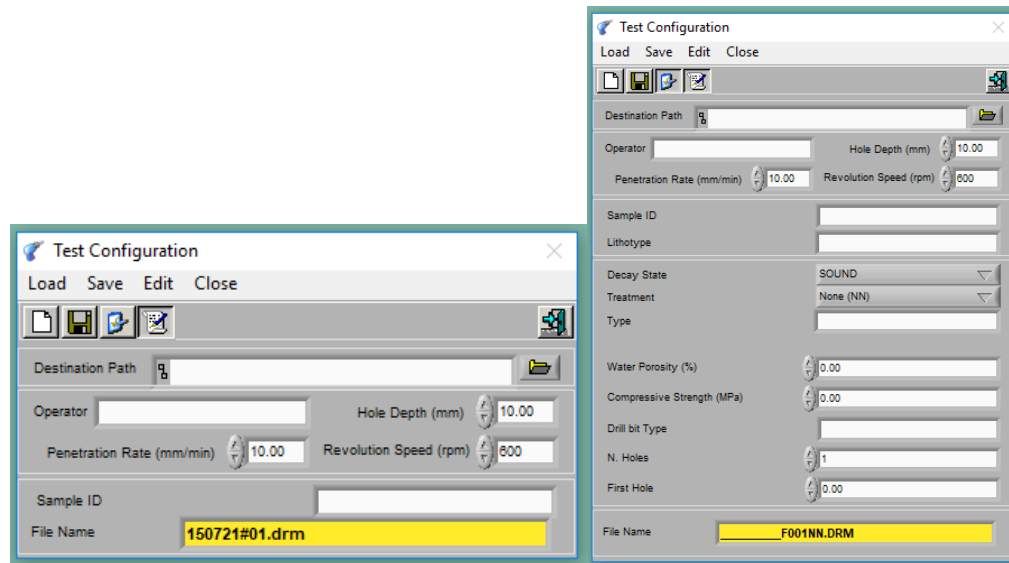


Abb. 17: Oberfläche Test Configuration (links) und erweiterte Oberfläche Test Configuration (rechts)

Destination path (Zielpfad) bezeichnet den Ordner, in dem die Messungen abgespeichert werden. Diesen manuell eintippen oder mit dem Ordner-Symbol einen Explorer-Dialog öffnen. Nun den gewünschten Ordner öffnen (nicht nur markieren), "current folder" Button auswählen. Hinweis: Das Programm weist nicht darauf hin, wenn der gewählte Ordner nicht (mehr) existiert, wie es beispielsweise beim Verschieben von Ordnerstrukturen passieren kann. Anschließend durchgeführte Messungen werden ohne Fehlermeldung durchgeführt, jedoch nicht abgespeichert, wenn der Ordner nicht vorhanden ist.

Der Parameter Hole Depth (Bohrlochtiefe) kann auf zwei Dezimalstellen genau in mm gewählt werden. Hier muss beachtet werden, dass die maximale Bohrtiefe durch den Geräteschlitten, die Bohrerlänge und die Form der Probe/des Objekts beeinflusst werden kann. Um festzustellen, was die maximale Bohrtiefe ab Geräteschlitten ist, diesen mit eingesetztem Bohrer im Programmbereich "Signal Monitor" auf die End Position fahren (siehe Signal Monitor).

Die penetration rate (Vorschubgeschwindigkeit) wird in Millimetern pro Minute auf zwei Dezimalstellen angegeben. Mögliche Minimal- und Maximalwerte sind nicht bekannt.

Revolution Speed (rpm)/Rotationsgeschwindigkeit kann zwischen 20 und 1000 rpm gewählt werden. Je nach gewählter Rotationsgeschwindigkeit muss der Gang der verbauten Schlagbohrmaschine gewählt werden. (Den Modus-Schalter der Bohrmaschine stets auf Bohren, nicht auf Schlagbohren stellen.)

Tab. 1: Einstellungen Bohrmaschine

Rotationsgeschwindigkeit [rpm]	Bohrmaschinen-Gang
20 - 200	1
200 - 400	2
400 - 1000	3

Ist der falsche Gang gewählt, kommt es zur Fehlermeldung "Speed Control Time Out". Die Messung scheint zu starten, der Bohrer beginnt sich zu drehen, der Schlitten fährt jedoch nicht nach vorne, nach einem kurzen Moment erscheint die Fehlermeldung. Bei 200 und 400 rpm sollten theoretisch der 1. und 2. bzw. der 2. und 3. Gang funktionieren. Es wurde die Erfahrung gemacht, dass das nicht immer der Fall ist. Ein Neustart des Programms kann manchmal Abhilfe schaffen.

Hinweis: Die Fehlermeldung "Speed Control Time Out" kann auch ohne ersichtlichen Grund mit gleicher Wirkung erscheinen. Hierbei handelt es sich laut SINT um falsche Parameter im Microprozessor des DRMS. Diese können manchmal durch externe Einflüsse geändert werden (bspw. Regen, hohe Luftfeuchte, hohe oder niedrige Temperaturen, Erschütterungen etc.). Eine Pause und/oder Neustart des Rechners können meist Abhilfe verschaffen. Erscheint die Fehlermeldung trotz allem immer noch, muss eventuell eine Remote-Wartung von SINT durchgeführt werden.

Bei der Wahl der Rotationsgeschwindigkeit und des Vorschubs gibt es keine festgelegten Werte. Diese sind unter anderem von Material(zustand) und der Fragestellung abhängig, sollten zur Vergleichbarkeit innerhalb einer Messkampagne aber immer gleich gewählt werden.

Insbesondere bei vergleichenden Messungen nach strukturellen Festigungen oder ähnlichem muss darauf geachtet werden, die Parameter nicht zu „knapp“ zu wählen, um auch nach einer erfolgreichen Festigung Messungen vornehmen zu können (siehe Mögliche Fehlermeldungen/Cell Overload)

SINT gibt zwei Beispielwerte an:

Tab. 2: Beispielseinstellungen der Firma SINT

Gestein	Granit	Pietra Leccese (Lecce-Kalkstein)
Rotationsgeschwindigkeit	900 rpm	20 rpm
Vorschub	5 mm/min	40 mm/min

Der Dateiname jeder Messung bildet sich aus dem Datum TTMMJJ#n (n Anzahl Bohrung an diesem Tag). Hinweis: Bei vollständiger Entladung des DRMS-Rechners kann es passieren, dass die Systemuhr nicht weiterläuft. Daher stets das Datum und die Uhrzeit vor Beginn der Messungen kontrollieren.

Durch die Taste "automatic file name" kann diese Option an-/ bzw. abgewählt werden. Bei Deaktivierung erscheint nach der Messung ein Fenster zur Eingabe des Dateinamens.

Erweiterte, nicht obligatorische Einstellungen sind über den Full Settings-Button (Checklisten-Symbol) zu erreichen. Die Sample ID kann angegeben werden und ergänzt dann den automatischen Dateinamen mit vorgestelltem Unterstrich, jedoch wird die Anzahl der später angezeigten Zeichen begrenzt.

Bsp.: Mit der Sample ID "Herzog Christian" wird der Dateinamen zu 150920#01_herzo

Weitere Informationen haben nur bedingt Einfluss auf den Dateinamen und wurden aus oben genanntem Grund nicht verwendet und werden daher hier nicht weiter erläutert.

Diese Einstellungen lassen sich als .set-Datei über 'Save' in der Menüleiste oder das Speichern-Symbol abspeichern.

Hinweis: Ein Abspeichern empfiehlt sich in jedem Fall, da, wie bereits oben beschrieben, das Programm bei Akkuwechsel, Trennen der Verbindung oder Ausschalten des Geräts das Programm erneut geöffnet und die Bohrparameter eingestellt bzw. geladen werden müssen ('Load' in der Menüleiste).

Anschließend den Programm-Dialog mit 'Close' bzw. dem Tür-Symbol verlassen.

Signal Monitor (Symbol grüner Pfeil)

Im Signal Monitor wird die aktuell gemessene Tiefe/Depth [mm] des Schlittens, die von der Kraftmessdose gelesene Kraft/Force [N] sowie der Ladestatus des Akkus angezeigt. Die Felder Revolution Speed und Penetration Speed werden in diesem Programmteil nicht verwendet. Wird der Programmteil Signal Monitor angezeigt, befindet sich das Gerät im Acquisition Mode und der Schlitten kann nach vorne und hinten mittels des Drückschalters am Gerät verschoben werden. Auf der Taste Set Zero Reference (Waage-Symbol) lässt sich der Wert der Kraftmessdose *nullen*. Die Tiefe wird hier nicht *genullt*, sondern automatisch während der Messung, sobald ein Widerstand gemessen wird.

Signalmonitor mit Abort / Exit Acquisition Mode (X-Symbol) verlassen.

Ausrichten der Bohrmaschine bzw. Einspannen der Probe

- 1.) Die gewünschten Bohrer (flache Bohrschneide!) ins Bohrfutter einspannen. Gegebenenfalls wie oben beschrieben, testen, ob die gewünschte Bohrtiefe erreicht werden kann (siehe Abschnitt Hole Depth).
- 2.) Das Gerät nah an das Objekt heranbringen oder Probekörper zwischen zwei Platte auf dem Schlitten einspannen (siehe Abb. 18).

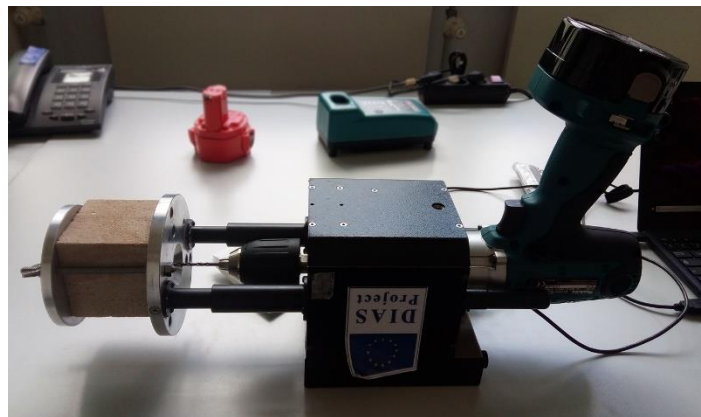


Abb. 18: Messung am Objekt (links) und an einer Probe im Labor (rechts)

An der Unterseite des DRMS-Kasten lässt sich ein Stativ anbringen, um das Gerät stabiler halten zu können. Beim Ausrichten des Geräts auf eine möglichst waagerechte Position achten. Hierbei kann eine kleine, auf dem Gerät aufgeklebte Wasserwaage nützlich sein.

Bei planen Oberfläche lässt sich die Schlittenplatte einfach auflegen. Mittels dreier Gewindestifte mit Spitze, welche an sechs verschiedenen Punkten der Platte eingedreht werden können, können Unebenheiten der Oberfläche ausgeglichen werden.

Beim Messvorgang muss das Gerät fest an die Objektoberfläche gedrückt werden und darf nicht wackeln oder sich von dem zu untersuchenden Objekt abdrücken.

Probekörper müssen an der Schlittenplatte eingespannt werden. Hierzu wurde eine Platte, ähnlich der am Schlitten befestigten, sowie drei Gewindestangen mit Flügelmuttern als Spannvorrichtung mitgeliefert (siehe Abb. 18, rechts). Durch diese Stangen ist die Probekörpergröße und Geometrie beschränkt, außerdem ist das Einspannen mittels der Flügelmuttern langwierig. Um größere und/oder unförmige Probekörper einzuspannen, sowie das Einspannen zu beschleunigen, haben sich zwei bis vier Mini-Einhandzwingen bewährt.

Das Gerät kann bei Messungen im Labor mit einem kleinen Tischstativ verwendet oder auf dem Kopf gestellt werden.

Checkliste vor Beginn der Messreihe

- 1.) Ist der Akku vollgeladen?
- 2.) Datum/Zeit richtig?
- 3.) Existiert der Zielordner?
- 4.) Bohrparameter richtig?
- 5.) Gang entsprechend der Rotationsgeschwindigkeit eingestellt?
- 6.) Steht das Gerät sicher bzw. kann sicher gehalten werden?
- 7.) Liegt der Schlitten wackelfrei an bzw. ist der Probekörper fest eingespannt?
- 8.) Im Acquisition Mode (via Signal Monitor) den Schlitten mithilfe der Drucktaste und der Richtungstaste der Bohrmaschine so verschieben, dass sich die Bohrspitze so nah wie möglich, aber noch ohne Kontakt an der Messstelle befindet.

Start der Messungen

- 1.) Den Wert der Kraftmessdose *nullen*. Acquisition Mode verlassen.
- 2.) Start Drilling Test öffnen (Symbol blauer Pfeil)
- 3.) Ein Signalmonitor wie im Acquisition Mode sowie ein blinkender Hinweis "NOW YOU CAN START DRILLING !!!" erscheint.
- 4.) Die Drucktaste am Bohrer einmal betätigen (nicht gedrückt lassen).
- 5.) Die Richtungstaste kann hier im Vorwärts- oder Rückwärtsgang sein, diese wird vom DRMS ignoriert.
- 6.) Der Bohrvorgang beginnt und der Schlitten fährt automatisch mit dem gewählten Vorschub an das Objekt heran. In Echtzeit können auf einem, unter dem Signalmonitor erscheinenden, Graphen die Messwerte beobachtet werden.
- 7.) Mit Erreichen der eingestellten Messtiefe fährt der Schlitten automatisch zurück. Die Messung ist beendet.
- 8.) Der Speicherort der DRM-Datei inkl. des Datei-Namens kann oberhalb des Graphen abgelesen werden.
- 9.) Den Bildschirm via Exit (Kreuz-Symbol) verlassen.
- 10.) Ggf. mit weiteren Messungen fortfahren. Hierbei jedes Mal die Kraftmessdose nach dem Ausrichten/Einspannen *nullen*.

Mögliche Fehlermeldungen:

Speed Control Time Out: Der Bohrer beginnt sich zu drehen, der Schlitten fährt jedoch nicht nach vorne. Weiteres s.o.

Hinweis: Die Fehlmessung wird trotzdem abgespeichert. Entweder diese 'leere' DRM-Datei direkt löschen oder dokumentieren, damit die Nummerierung der einzelnen Messungen richtig zuzuordnen ist.

Bei den folgenden Fehlermeldungen kommt es zu einem Abbruch der Messung, die Frage "Do you want to save partial test?" erscheint. Dies sollte stets bejaht werden, da oft Teile der Messung genutzt werden können. Ein späteres Verwerfen ist immer möglich.

End Limit Engaged: Die eingestellte Bohrtiefe konnte nicht erreicht werden, da die Endposition des Schlittens erreicht wurde. Die Messung wird ab diesem Punkt beendet. Zu vermeiden, wenn vor Beginn der Messung die real erreichbare Bohrtiefe kontrolliert wird.

Cell Over Load: Die gemessene Kraft übersteigt 100N. Die Messung wird ab diesem Punkt beendet. → ggf. Rotationsgeschwindigkeit erhöhen, Vorschub verringern, abgenutzte Bohrer wechseln, Akkustand prüfen. Wenn alle anderen Messungen einer Reihe problemlos abliefen, kann es sich auch um ein einzelnes großes Quarzkorn o.ä. handeln, welches zu hart für die gewählten Parameter war.

Battery Package Low: Die Akkuladung war zu gering, um die Messung korrekt auszuführen. Manchmal wird die Messung beendet, manchmal weitergeführt, jedoch mit verfälschten Messergebnissen. → Stets auf volle Akkuladung achten! Lieber zu früh als zu spät den Akku wechseln, um eine komplette Entladung des internen Speichers zu verhindern, welche das Gerät bis zu einer Wartung durch SINT unbrauchbar macht. Die Akkuladung wird während des Bohrvorgangs an der rechten Seite des Signalmonitors angezeigt und mit grüner, gelber und roter Farbe indiziert.

Test Elaboration (Graph-Symbol)

Innerhalb des DRMS-Programmes gibt es die Möglichkeit, die Messkurven zu betrachten, zu glätten, zu beschneiden und miteinander zu vergleichen. Die Optionen sind jedoch beschränkt und das Programm teilweise umständlich zu bedienen. Daher wurden für das Projekt alle Daten exportiert und anschließend mittels MS Excel ausgewertet.

Vorgehen: DRM-Datei via Open-Dialog öffnen, Graph wird angezeigt.

Um weitere Graphen zu öffnen muss im DropDown-Menu "Curve selct." eine leere Kurven ausgewählt werden, sonst wird die soeben hochgeladene Kurve überschrieben.

Wird das Optionsfeld "Curves Auto Number" gewählt, wird beim Laden in das Programm automatisch ein leerer Kurvenplatz gewählt. Anschließend kann die Kurve bearbeitet werden.

Schnell-Export, um Graphen zu exportieren via Menüleiste 'Print Graph'. Ein Fenster mit den Buttons 'Word', 'HTML', 'Printer' und 'Undo' erscheint. Die Felder Word und HTML geben eine doc- oder HTML-Datei aus. Bei der Funktion Printer erscheint die Option, eine PDF abzuspeichern, was jedoch nicht möglich ist. Eine Fehlermeldung (Error 41004) erscheint und das Programm stürzt ab. Eventuell bearbeitete Graphen sind verloren.

Alle Messdaten können über "Export" in der Menüleiste als .txt-Datei abgespeichert werden. Hierbei können immer nur die Daten eines einzelnen Graphen exportiert werden. Ein Massenexport ist nicht möglich. Die Daten bestehen aus Messpaaren aus Kraft in N und Tiefe in mm. Wird der gesamte Textblock bei MS Excel eingefügt, werden diese automatisch als einzelne Zellen erkannt und die Daten können ohne weitere Einstellungen verarbeitet werden.

Die Daten bestehen aus Messpaaren aus Kraft in N und Tiefe in mm. Wird der gesamte Textblock bei MS Excel eingefügt, werden diese automatisch als einzelne Zellen erkannt und die Daten können ohne weitere Einstellungen verarbeitet werden.

(Hinweis: Als Dezimalseparator in der .txt-Datei wird ein Punkt verwendet, dies ist beim Einfügen in Excel zu berücksichtigen.)