

FACHHOCHSCHULE POTSDAM
FACHBEREICH ARCHITEKTUR UND STÄDTEBAU
MASTERSTUDIENGANG KONSERVIERUNG UND RESTAURIERUNG

STUDIENRICHTUNG STEIN

DIE FREITREPPE DER ALTEN NATIONALGALERIE IN BERLIN

Schadensursachenermittlung an den
sandsteinernen Treppenelementen



- Masterthesis -

Autor:	David Ohnmeiß
Matrikel-Nr.:	10816
E-Mail:	davidohnmeiss@yahoo.de
Tag der Abgabe:	07.09.2015
Bearbeitungszeit:	22 Wochen

Erstprüfer:	Prof. Gottfried Hauff
Zweitprüfer:	Dr. Horst Schuh

Danksagung

Vornweg sei allen gedankt, die mich während dieses halben Jahres ertragen haben und mir ein Ohr für meine Schwärmereien geliehen haben und natürlich allen, die hier vielleicht keine eigene Erwähnung finden.

Frau Buchholz aus dem Rathgenlabor möchte ich speziell danken, da ohne ihr Dazutun niemals der Bezug zur Alten Nationalgalerie und zu diesem Thema hergestellt worden wäre.

Meinen beiden Prüfern Herrn Hauff und Herrn Schuh möchte ich herzlich dafür danken, dass sie sich mir angenommen haben und durch konstruktive Kritik meine Arbeit in die richtige Richtung lenkten.

Frau Czarnecki, Frau Mösl, Frau Haug, Herrn Lang und den Pfortnern der Alten Nationalgalerie in Berlin danke ich ebenfalls recht herzlich für das entgegengebrachte Vertrauen und die ausgesprochen gute und unkomplizierte Zusammenarbeit vor Ort und in allen formellen Belangen.

Unseren Werkstattleitungen Frau Schmeikal und Frau Eschebach möchte ich speziell danken für ihre stete Hilfsbereitschaft und die unkomplizierte Material- sowie Geräteausleihe.

Ich möchte Frau Rüger für ihre außerordentliche Hilfsbereitschaft bei meiner Archivrecherche im Bundesamt für Bauwesen und Raumforschung danken und dafür, dass sie mir ihr Büro als Arbeitsplatz zur Verfügung gestellt hat.

Sehr danken möchte ich auch Herrn Laue so wie Frau Fuchs, aus dem naturwissenschaftlichen Labor der FH- Potsdam, für Rat und Tat bei der mikrochemischen Salzanalyse, der Polarisationsmikroskopie, der Ionenchromatographie, der Röntgendiffraktometrie sowie anderen Fragestellungen zur Salzanalyse.

Frau Ehling und ihren Kolleg/Innen aus der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe möchte ich für ihre sofortige Hilfsbereitschaft bei der Detektierung der verbauten Gesteinsarten danken.

Frau Petersen, Herrn Fritz und dem mikrobiologischen Labor der HAWK Hildesheim danke ich aufrichtig für die wegweisenden Ideen zum Umgang mit der Mikrobiologie und der problemlosen Geräteausleihe.

Auch danke ich Herrn Paul für seine Gesprächsbereitschaft und seiner Hilfe bei der Aufklärung der der letzten Instandsetzungsmaßnahmen.

Frau Brinkmann und Frau Skasa-Lindermeir möchte ich für die gewährte Einsicht in ihre Abschlussarbeiten danken, welche ohne ihre Hilfe nicht zugänglich gewesen wären.

Robert Blümel sei an dieser Stelle für seinen tatkräftigen Einsatz und für seine Hilfe beim Umgang mit dem Rollgerüst gedankt.

Zuletzt und ganz besonders gilt mein Dank meiner Freundin Patricia die zuhause immer ein offenes Ohr und vor Ort stets eine helfende Hand für mich übrig hatte.

Inhaltsverzeichnis

DANKSAGUNG	II
INHALTSVERZEICHNIS	III
1. EINLEITUNG	1
2. ÜBERBLICK ÜBER DIE GESCHICHTE DER FREITREPPE	4
2.1 OBJEKTGESCHICHTE	4
2.2 SANIERUNGS- UND RESTAURIERUNGSGESCHICHTE	8
3. BESTAND	13
3.1 GESTEINSARTEN	13
3.1.1 <i>Nebraer Sandstein</i>	14
3.2 POSTAER SANDSTEIN.....	16
3.3 ZEITLICHE EINORDNUNG DER BRÜSTUNGSPLETTEN UND FIGUREN	18
4. ZUSTAND	22
4.1 ZUSTAND DER BRÜSTUNGSPLETTEN	22
4.2 ZUSTAND DER FIGUREN	25
4.3 ZUSTAND DER POSTAMENTE, DER POSTAMENTABDECKUNGEN UND DER HANDLÄUFE	25
4.4 ZUSTAND DER FUGEN UND DES WASSERABLAUFS	25
4.5 ZUSAMMENFASSUNG DES ZUSTANDS DER FREITREPPENANLAGE.....	26
5. ANGENOMMENE SCHADENSAUSLÖSENDE PROZESSE	27
5.1 SALZKRISTALLATION	27
5.1.1 <i>Kristallisationsdruck</i>	27
5.1.2 <i>Hygroskopizität und Deliqueszenzfeuchte</i>	28
5.1.3 <i>Hydratsalze</i>	29
5.1.4 <i>Hypothesen zu den, durch Salze ausgelösten Schadensprozessen, an der Freitreppe</i>	29
5.1.5 <i>Geplante Vorgehensweise</i>	30
5.2 MIKROBIELLER BEWUCHS.....	30
5.2.1 <i>Flechten</i>	31
5.2.2 <i>Der mechanische Schadensprozess von Krustenflechten</i>	33
5.2.3 <i>Der chemische Schadensprozess</i>	34
5.2.4 <i>Hypothesen zu den, durch Flechten ausgelösten, Schadensprozessen an der Freitreppe</i>	35
5.2.5 <i>Geplante Vorgehensweise</i>	35

6.	UNTERSUCHUNGEN ZUM SALZ- UND FEUCHTEHAUSHALT	36
6.1	AUSWAHL DER UNTERSUCHUNGSMETHODEN.....	37
6.2	EHEMALIGE SALZANALYSEN	39
6.3	KONSTRUKTION, ABDICHTUNGEN UND WASSERABLAUF	40
6.4	AUSWERTUNG DER KLIMADATEN.....	41
6.5	QUALITATIVE SALZANALYSE	43
6.5.1	<i>Mikrochemische Salzanalyse.....</i>	<i>44</i>
6.5.2	<i>Durchführung der mikrochemischen Salzanalyse</i>	<i>44</i>
6.5.3	<i>Polarisationmikroskopie.....</i>	<i>46</i>
6.5.4	<i>Röntgendiffraktometrie (XRD)</i>	<i>52</i>
6.5.5	<i>Diskussion der Ergebnisse der qualitativen Salzanalyse</i>	<i>54</i>
6.5.6	<i>Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse zur qualitativen Salzanalyse</i>	<i>57</i>
6.6	QUANTITATIVE SALZANALYSE.....	58
6.6.1	<i>Oberflächennahe Ionenverteilung.....</i>	<i>59</i>
6.6.2	<i>Oberflächliche Feuchteverteilung der Brüstungsplatten.....</i>	<i>62</i>
6.6.3	<i>Ionenchromatographie</i>	<i>67</i>
6.6.4	<i>Interpretation der quantitativen Salzanalyse</i>	<i>71</i>
6.7	DISKUSSION UND INTERPRETATION DER ERGEBNISSE DER SALZANALYSE.....	72
7.	UNTERSUCHUNGEN ZUR MIKROBIOLOGISCHEN BESIEDLUNG.....	74
7.1	AUSWAHL DER UNTERSUCHUNGSMETHODEN.....	75
7.2	EHEMALIGE ANALYSEN	76
7.3	UNTERSUCHUNGEN IM MIKROBIOLOGISCHEM LABOR DER HAWK HILDESHEIM	76
7.3.1	<i>Untersuchung der Flechtenarten</i>	<i>77</i>
7.3.2	<i>Untersuchung der Schimmelpilze und Bakterien.....</i>	<i>78</i>
7.3.3	<i>Untersuchungen zur Eindringtiefe der Flechten.....</i>	<i>79</i>
7.3.4	<i>Untersuchung zu den Grabgängen der Flechten.....</i>	<i>81</i>
7.3.5	<i>Diskussion und Interpretation der Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen im Labor</i>	<i>82</i>
7.4	UNTERSUCHUNGEN ZU PRÄVENTIVEN REINIGUNGSMAßNAHMEN	84
7.4.1	<i>Anforderungskatalog</i>	<i>85</i>
7.4.2	<i>Reinigungsprobeflächen.....</i>	<i>86</i>
7.4.3	<i>Puls-Amplituden-Modulations (PAM)-Fluorometrie</i>	<i>101</i>
7.5	ZUSAMMENFASSUNG DER UNTERSUCHUNGEN DER MIKROBIOLOGIE	108
8.	EMPFEHLUNGEN	109
8.1	EMPFEHLUNGEN FÜR KOMMENDE SANIERUNGSMAßNAHMEN	109

8.1.1	<i>Notsicherungen</i>	109
8.1.2	<i>Kartierungen</i>	110
8.1.3	<i>Reinigung</i>	110
8.1.4	<i>Fugensanierung</i>	111
8.1.5	<i>Konstruktive Eingriffe</i>	112
8.1.6	<i>Salzreduzierung</i>	112
8.1.7	<i>Ergänzungen</i>	113
8.1.8	<i>Andere Maßnahmen</i>	113
8.2	EMPFEHLUNGEN FÜR ZUKÜNFTIGE PRÄVENTIVMAßNAHMEN	114
8.2.1	<i>Präventive Reinigungsmaßnahmen</i>	114
8.2.2	<i>Präventive Salzreduzierungsmaßnahmen</i>	114
8.2.3	<i>Präventive Wartungsarbeiten</i>	115
8.2.4	<i>Präventives Monitoringprogram</i>	115
9.	FAZIT DER ARBEIT	116
10.	AUSBLICK	118
	LITERATURVERZEICHNIS	VI
	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XII
	TABELLENVERZEICHNIS	XIII
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	XIV
	CD- VERZEICHNIS	XVI

1. Einleitung

Die Freitreppe der Alten Nationalgalerie in Berlin ist dem Museum für nationale Kunstwerke direkt vorgesetzt und somit zusammen mit den bedeutendsten Museen Berlins auf der Museumsinsel in Berlin-Mitte. In diesem Ensemble ist sie Bestandteil des UNESCO Weltkulturerbes und als Bauwerk einer zu Ende gehenden Blütezeit Berlins, geprägt von Schinkel und Humboldt, zu betrachten.

Die Freitreppe der Alten Nationalgalerie ist als exponierter Gebäudeteil stets der vorherrschenden Witterung ausgesetzt und dadurch stärker gefährdet als, durch Dachkonstruktionen geschützte, andere Bauteile. Aufgrund ihrer verwitterungsanfälligen Lage spielt die tadellose Funktion der Konstruktion des Bauwerks bei dessen Erhalt eine übergeordnete Rolle. Um unter diesen Umständen einen fehlerfreien konstruktiven Schutz gewährleisten zu können, ist eine regelmäßige Wartung des Bauwerks notwendig. Leider ist diese Wartung aufgrund zahlreicher Faktoren, wie finanzieller Aufwand, Zuständigkeiten oder Genehmigungen häufig nicht ordentlich durchführbar. So wurde auch an der Freitreppe die letzte Instandsetzungsmaßnahme vor fast 20 Jahren umgesetzt.

Mittlerweile sind zahlreiche Fugen offen und Regenwasser kann ungehindert in die Konstruktion eindringen und sich im Bauwerk verteilen. Ebenso konnten sich Flechten, Moose und Pilze ungestört ein geeignetes Habitat suchen und sich vermehren. Natürlich haben auch witterungsbedingte Prozesse wie Schwarzfärbung der Sandsteinoberfläche und Gipskrustenbildung stattgefunden. Dadurch lassen sich über die gesamte Freitreppe Verwitterungsspuren ablesen, welche an einigen Stellen, so auch an den reich ornamentierten Bereichen der Brüstungsplatten, zu unwiederbringlichen Schäden führten.

Diese Schäden sind mittlerweile so offensichtlich, dass eine Sanierungsmaßnahme in naher Zukunft im Fokus der Alten Nationalgalerie steht und vorbereitende Maßnahmen getroffen werden. Im Rahmen dieser Maßnahmen wurden Gutachten eingeholt, welche sich mit der Freitreppe im konstruktiven und bautechnischen Sinne beschäftigen. Um auch den konservatorischen Aspekten einer solchen Sanierung ausreichend Berücksichtigung zu verschaffen, sind ebenso restauratorische Gutachten nötig.

Darum soll sich diese Arbeit in restauratorisch konservatorischer Hinsicht mit den schadensauslösenden Prozessen an den sandsteinernen Brüstungsplatten,

Handläufen und den Figurengruppen der Freitreppe beschäftigen um die anstehende Sanierungsmaßnahme mit möglichen Empfehlungen zu unterstützen.

Die Arbeit beschäftigt sich nicht mit den Ursachen, die zu den möglichen konstruktiven Mängeln geführt haben, sondern mit den auftretenden Schadensmechanismen, die zu derzeit aktiven Schadensprozessen beitragen.

Orientierend an den Merkblättern der Wissenschaftlich- Technischen- Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. zur Bauwerks- und Mauerwerksdiagnostik¹ wird hier ein Untersuchungsprogramm vorgelegt, welches die analyserelevanten Schadensfaktoren des Bauwerks tiefer betrachtet. Die einzelnen Schadensphänomene werden nach dem jeweils neuesten Stand des Wissens hin untersucht und interpretiert. Erforderliche Expertenmeinungen werden hierfür abgefragt und in einzelne Untersuchungen mit einbezogen.

Es werden die nötigen Archive der staatlichen Museen zu Berlin, des Bundesministeriums für Bauwesen und des Landesamts für Denkmalpflege Berlin aufgesucht und bedeutsame Daten ausgewertet. Des Weiteren werden umfangreiche Untersuchungen zu den Themengebieten Salz- und Feuchteverteilung und Mikroorganismen unternommen. Die Untersuchungen werden ausgewertet und ihre Ergebnisse ggf. in ihrer Wechselwirkung miteinander interpretiert, um damit Empfehlungen zum präventiven Umgang aussprechen zu können.

Im Einzelnen wird eine Archivrecherche durchgeführt, die Aufschluss über die Sanierungs- und Restaurierungsgeschichte gibt. Ebenso werden Konstruktionspläne zum Aufbau der Freitreppe ihren Abdichtungen und ihrem Wasserablauf und den verwendeten Baustoffen gesucht. Es werden Schäden, Salzausblühungen und Feuchteverteilung kartiert. Die Salze werden mittels Polarisationsmikroskopie, Mikrochemie, Röntgendiffraktometrie und Ionenchromatographen analysiert und eine Anionen- und Kationen-Bilanz, in ggf. einem Höhen- und Tiefenprofil, dargestellt. Es wird Art der Ionen, Menge und Herkunft ermittelt. Der Feuchtehaushalt des Bauwerks wird über die Oberflächenfeuchte mit dem Moist200 Gerät begutachtet. Die Mikrobiologie wird hinsichtlich ihrer Art und Bauwerksgefährdung eingestuft. Hierfür

¹ Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (Hg.) (2006): Beurteilung von Mauerwerk. Mauerwerksdiagnostik. Unter Mitarbeit von R. Burkhardt. Dt. Fassung vom 30.09.1999, endgültige Fassung: 1999. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl. (WTA-Merkblatt, 4-5-99/D). Online verfügbar unter [http%3A//www.worldcat.org/oclc/650727813](http://www.worldcat.org/oclc/650727813).

werden durch mikrochemische und mikroskopische Untersuchungen die Eindringtiefe der Flechten und ihre Schädigung der Sandsteinoberflächen ermittelt. Weiterhin werden Testfelder angelegt die eine Beurteilung einer erneuten Besiedelung unter unterschiedlichen Bedingungen zulassen. Die Themengebiete werden im Einzelnen für sich erfasst und interpretiert, und im Anschluss in einen möglichen Zusammenhang gestellt. Andere Schadbilder wie z. B. Verschwärzungen und Gipskrusten werden ebenfalls betrachtet und ggf. Lösungsansätze zu deren Umgang durch Literaturrecherche oder gängiger Praxis vorgestellt. Abschließend werden für die jeweiligen Problematiken Empfehlungen ausgesprochen und Vorschläge zum präventiven Umgang gemacht.

2. Überblick über die Geschichte der Freitreppe

2.1 Objektgeschichte

Die Geschichte der Alten Nationalgalerie wird durch zahlreiche Überlieferungen dokumentiert und unter Anderen sehr ausführlich recherchiert in dem Buch „Die Alte Nationalgalerie“ von Bernhard Maaz (2001) oder auch in der Dissertation von Hartmuth Dogerloh (1999) zusammengefasst. Die folgenden Angaben zur Objektgeschichte beruhen in erster Linie auf den dort aufgeführten Erkenntnissen und Chronologien.



Abb. 1: Alte Nationalgalerie in Berlin

Quelle: Wikipedia

Die Konzeption der Alten Nationalgalerie in Berlin wurde nach den Entwürfen von August Stüler entwickelt. Nach dessen Tod 1865 führte Johann Heinrich Strack den Bau fort und gestaltete vor Allem die Detaillierung im Inneren. Erste Gedanken zu einer Nationalgalerie ergaben sich um 1815. Die Ausführungen wurden aber erst 1861 mit dem Erhalt der Wagenerischen Kunstsammlung als Grundstock der Galerie von Wilhelm I. von Preußen in Auftrag gegeben. Friedrich August Stüler, welcher sich schon 1841 mit Planungen für den Bereich nördlich des Alten Museums

auseinandergesetzt hatte, konnte nun, genau zwei Jahrzehnte später, seine schon damals entstandene Idee einer Tempelanlage konkretisieren. Die Grundsteinlegung geschah nach seinem Tod 1867 und der Bau wurde 1876 mit Johann Heinrich Strack als dem ausführenden Architekten unter Anwesenheit des Kaisers vollendet.² Die Freitreppenanlage kann erst mit der Enthüllung des Reiterstandbildes Friedrich Wilhelm IV. 1886 als vollendet betrachtet werden.

Die beiden unteren Geschosse der Alten Nationalgalerie erscheinen äußerlich als Unterbau, auf dem der obere, als Tempel ausgebildete obere Teil, über die den Platz umgebenden Kolonnaden emporgehoben wird. Die Höhe des Unterbaus beträgt 10,67 m. Der als ein Prostylon pseudoperipteros gestaltete Tempel hat eine Vorhalle mit acht freistehenden Säulen. Die fünfzehnsäulige Seitenfront ist mit Dreiviertelsäulen besetzt. Bis zur Spitze des Giebeldreiecks hat der Tempel eine Höhe von 29,19 m. Die Freitreppe erfüllt in erster Linie kompositorische Aufgaben. In der Vorderansicht wird durch die Freitreppe eine Verbreiterung des Unterbaus erzielt. Darüber hinaus ist die Freitreppe Teil der Krepis des „antiken“ Tempelaufbaus und die Basis für das Reiterstandbild.³

Die Freitreppenanlage besteht aus zwei doppelläufig ansetzenden Treppen welche über einen östlichen und einen westlichen Treppenabsatz in der Wende zu dem gemeinsamen zweiten Absatz führen. Von dort führt ein dritter Lauf zu einem Eingang im zweiten Ausstellungsgeschoß der Galerie. Der eigentliche Haupteingang der Nationalgalerie führt zwischen ihren beiden Antrittsläufen und unter ihrem zweiten Absatz hindurch. Die Bereiche nach den ersten Absätzen sind für Besucher gesperrt und durch ein massives Stahlgitter jeweils vor den zweiten Läufen optisch vom Besucher offenen Bereich getrennt. Die Treppenanlage ist 41,01 m breit⁴, 20,84 m tief und bis zur letzten Stufe 10,75 m hoch. Sie ist der Alten Nationalgalerie, an deren Hauptfassade, direkt vorgesetzt und wird von einer Gartenanlage mit Brunnen umgeben. Die Gartenanlage ihrerseits wird von Kolonnaden umgeben, welche das Neue Museum und die Alte Nationalgalerie straßen- und spreeseitig umschließen.

² Vgl. Maaz und Holan 2001, S.226

³ Vgl. Wallasch 1992a,

⁴ Damit ist sie knapp 10 m breiter als die Nationalgalerie



Abb. 2: Freitreppe, westlicher Flügel

Quelle: D. Ohnmeiß

Wie auf der Abbildung 2 sichtbar, besteht der Aufbau der Treppe aus einem Granitsockel, welcher von einem Sockelgesims aus Sandstein mit Karniesprofil optisch von dem Verblendmauerwerk und den restlichen sandsteinernen Aufbauten getrennt wird. Das Mauerwerk besteht aus vorgeblendeten Sandsteinplatten vor Ziegelmauerwerk und werden ihrerseits von einem profilierten Sandsteingesims nach oben hin abgeschlossen. Die Treppengeländer werden von einseitig reich ornamentierten Brüstungsplatten gebildet. Das Ornament ist handwerklich sowie künstlerisch fein ausgearbeitet und wird durch Blütenblätter und Arkantusranken in sich gegliedert. Der Handlauf ist dem Geländer aufgesetzt und besteht aus profiliertem Sandstein. An architektonischen Eckpunkten wird die Abfolge der Brüstungsplatten von Sandsteinpostamenten gegliedert. Die Postamente werden durch eine sandsteinerne Abdeckung und metallene Vasen bekrönt. Den Mittelpunkt der Anlage bildet das bronzene Reiterstandbild von Wilhelm IV. auf dem zweiten Absatz über den Haupteingang. Dieser Eingang in die Nationalgalerie wird durch einen Rundbogen, welcher durch zwei viereckige Säulen gestützt wird, gebildet. Der Rundbogen seinerseits ist ebenfalls durch Profile und Ornamente geschmückt. Die zwei Postamente an der Antrittsstufe und die zwei abschließenden Postamente auf dem

dritten Absatz sind wesentlich größer als die restlichen gestaltet und tragen jeweils eine Figurengruppe.

Die Figurengruppen der Hauptfassade der Alten Nationalgalerie nehmen alle einen Platz in einem ikonographisch durchdachten Programm ein. Das Programm wird dabei durch die vier Figurengruppen an der Freitreppe, der Figurengruppe als Giebelfeldbekrönung des Hauptgebäudes, dem reliefierten Tympanon und dem Relieffries in der Säulenvorhalle bestimmt. Bis auf die beiden Figurengruppen unmittelbar vor den Säulen wurde die Bauplastik an der Hauptfassade der Galerie von Moritz Schulz (1825- 1904), einem Schüler von Friedrich Drake (1805- 1882)⁵, entworfen. Das Konzept des Programms sieht die Darstellung der deutschen bildenden Kunst in all ihren Facetten vor. Die beiden Figurengruppen am Eingang stellen „das erste Erwachen des Talents und die eigene Kunsttätigkeit“⁶ in einer links die Plastik und rechts die Malerei vertretenden Darstellung dar. Die beiden Figurengruppen am Ende der Freitreppe personifizieren „das geistige Schaffen in Skulptur und Malerei“⁷ (rechts in der Malerei von Alexander Calandrelli⁸ (1834- 1903) entworfen und links in der Bildhauerei von Karl Adalbert Moser (1832- 1916)). Die Bekrönung des Hauptgiebels zeigt die drei weiblichen Allegorien der Bildhauerei, der Architektur und der Malerei. Im Giebelrelief wird unter Anderem die Germania bei der Verteilung von Kranz und Palmwedel an die seitlich anstehenden Vertreter der verschiedenen Kunstgattungen dargestellt.⁹ Das Relieffries in der Säulenvorhalle stellt die „Entwicklung der deutschen Kunst“ und ihre namentlich benannten Vertreter dar. Das monumentale Reiterstandbild Wilhelm IV. als Mittelpunkt des Programms kann als Würdigung seiner Bemühungen um die Erhaltung und Entwicklung der Kunst in Deutschland gesehen werden.

Der heutige Nutzen der Freitreppe unterscheidet sich von dem Ursprungsgedanken. Ursprünglich befand sich unter dem dritten Lauf der Freitreppe eine Kutscheneinfahrt. Der Haupteingang zur Galerie sollte am oberen Ende der Freitreppe im zweiten Ausstellungsgeschoß in das Gebäude führen und die Freitreppe selbst war jederzeit zugänglich für Besucher der Anlage¹⁰. Heute ist die Kutscheneinfahrt durch Verglasungen geschlossen, der Haupteingang befindet sich im Antrittsbereich der

⁵ Schüler von Christian Daniel Rauch und Erschaffer der Viktoria auf der Siegessäule

⁶ Dorgerloh 1999, S. 86

⁷ Ebd.

⁸ Von ihm wurde auch das Reiterstandbild entworfen

⁹ Dorgerloh 1999, S. 87

¹⁰ Vgl. Dorgerloh 1999, S.88

Freitreppe und damit im Erdgeschoß des Gebäudes. Dem Besucher ist nur das Betreten der beiden ersten Läufe inklusive ihrer Absätze gestattet. Die Freitreppe untersteht als eigenständiges Gebäude dem Denkmalschutz und ist im Ensemble der Museumsinsel Teil des UNESCO Welterbes.

2.2 Sanierungs- und Restaurierungsgeschichte

Die Sanierungs- und Restaurierungsgeschichte wird hier in drei Abschnitte unterteilt von der Eröffnung der Galerie bis zur Generalinstandsetzungsmaßnahme, die Generalsanierung 1996 und die Zeit ab 1997 bis heute.

1886 - 1992

Die hier angegebene Chronologie zur Baugeschichte von 1886 bis 1992 stützt sich stark auf die Anamneseuntersuchungen von Wallasch¹¹, im Rahmen seines Untersuchungsberichtes von 1992 zur Freitreppenanlage und auf deren Zusammenfassung nach Gröger¹². Diese Ergebnisse basieren auf der Zusammenarbeit mit drei Bibliotheken und neun Archiven und wurden ausführlich dokumentiert. Einige der damals konsultierten Archive wurden vom Autor ebenfalls besucht und es konnten bezüglich der Chronologie keine Widersprüche festgestellt werden, weswegen hier für diesen Zeitraum, auf die damals ermittelten Eckdaten zugegriffen wird. In dieser Arbeit wird eine möglichst zielführende und gekürzte Fassung aller bekannter Daten aufgelistet. Es werden ausschließlich bau- und konstruktionsrelevante Daten genannt. Einige der genannten Fotoaufnahmen können im Bildindex von Fotomarburg¹³ nachgesehen werden. Die zusammengefasste Chronologie, wie sie von Wallasch erstellt wurde, können im Anhang im Kapitel 4.2 nachgesehen werden.

Die Sanierungsgeschichte der Freitreppe der Alten Nationalgalerie beginnt, wie auch beim Hauptgebäude, gewissermaßen mit ihrer Eröffnung. Noch vor Enthüllung des Reiterstandbildes werden nach der Montage des Sockels für die Bronzeplastik laut eines Zeitungsartikels vom 8. Januar 1886 erste Risse am Mauerwerk und in den Brüstungsplatten der Freitreppe entdeckt. Fotoaufnahmen von 1895 zeigen Risse im Mauerwerk und deutliche Feuchteanstauungen in der oberen Quaderreihe des Verblendmauerwerks. 1914 wird die ehemalige Durchfahrt auf der westlichen Seite mit

¹¹ Vgl. Wallasch 1992a,

¹² Vgl. Gröger 1992

¹³ Vgl. Fotomarburg 2014

Nebraer Sandstein zugemauert. 1945 wird die Freitreppenanlage durch einen Bombentreffer und Beschuss durch Handfeuerwaffen stark beschädigt. 1950 - 1954 wird der Wiederaufbau für die Alte Nationalgalerie angestrebt. Die Rekonstruktion der Freitreppe musste noch bis 1962 warten. Bei diesen Arbeiten wird das durch Frost zerstörte ursprüngliche Ziegelmauerwerk der tragenden Unterkonstruktion der Freitreppe durch „Stahlbetonbauten mit Unterzügen auf Mauerpfeilern“¹⁴ ersetzt. Die Granitplatten und Stufen sowie die Brüstungsplatten werden versetzt. Wobei nur Lieferbelege für etwa die Hälfte der Brüstungsplatten vorhanden sind¹⁵. Statt den Metallvasen wurden sandsteinerne Repliken auf die Postamentabdeckungen gesetzt. Weiterhin werden die Rekonstruktionen der Figuren in Auftrag gegeben. 1965 zeigen sich auf der Westseite der Freitreppenanlage erneute Feuchteschäden und ein Protokoll vom 10.06.1965 beinhaltet eine Schadensfeststellung aufgrund von Regenwassereintrag wegen schlechter Isolierungsmaßnahmen. Diesem folgen Kostenangebote und Mitteilungen über ausgeführte Arbeiten. Fotos späterer Jahre belegen den weiterhin bestehenden Feuchteintrag sichtbar in der oberen Quaderreihe des Verblendmauerwerks. 1984 werden Heizungen in den Depoträumen unter der Freitreppe eingebaut. Aufgrund der fehlenden Wärmedämmungen zeigt sich zusätzlicher Feuchteintrag durch Kondenswasserbildung. Außerdem werden fortan starke Salzausblühungen beobachtet¹⁶.

Bemerkungen von Wallasch verweisen auf ein Telefongespräch und eine Besprechung von 1992 mit Herrn Rudi Medger, Sächsische Sandsteinwerke, wonach Nebraer Sandstein für die Rekonstruktion der Freitreppenanlage verwendet wurde. Außerdem sei die linke Seite des zweiten westlichen Laufs aus Postaer Sandstein gefertigt worden, da der Bruch Nebra der Firma Stiller geschlossen worden war. Die Brüstungsplatten des dritten Laufs von 1992 sollen angeblich noch die ursprünglichen von 1876 gewesen sein.¹⁷

1992 – 1996

Die folgenden Angaben stützen sich auf die Archivrecherche des Autors in den Archiven des Landesdenkmalamtes, des Bundesministeriums für Bauwesen und Raumforschung- Referat Museumsinsel und dem Zentralarchiv der staatlichen Museen

¹⁴ Wallasch 1992a; Aktenvermerke 1962

¹⁵ Die gelieferten Nebraer Platten sind auf den Lieferbelegen eindeutigen Stellen zugeordnet. Aber an diesen Stellen befinden sich heute zum Teil Postaer Platten.

¹⁶ Vgl. Wallasch 1992a, Anlage 2/vgl. Anhang dieser Arbeit Kap. 4.2

¹⁷ Vgl. ebd.

zu Berlin. Des Weiteren wurde ein Gespräch mit dem zuständigen Bauleiter der Sanierung 1995 - 1996 geführt und verwertbares Material dokumentiert.

Ab 1992 wurden im Rahmen der bevorstehenden Generalinstandsetzung zahlreiche Untersuchungen zur Schadensanalyse und Bestand durchgeführt. Es wurden Salzanalysen und Petrografische Untersuchungen sowie Untersuchungen zu Mikrobiellen Bewuchs und Befall durchgeführt¹⁸. Zusätzlich wurden Probeflächen zur Reinigung, Festigung und Hydrophobierung angelegt¹⁹ und das Ergebnis durch Bohrkernentnahme analysiert. Auf die Ergebnisse dieser Untersuchungen wird jeweils weiter unten eingegangen.

Auf Basis dieser Untersuchungen wurde 1995 mit der Generalsanierung der Freitreppenanlage begonnen. Laut der ausführlichen Dokumentation der damaligen Sanierungsmaßnahme²⁰ wurde die Anlage bis auf einige wenige Teile des Ziegelmauerwerks demontiert und anschließend wieder aufgebaut. Dabei wurden die Grundmauern aus Ziegelmauerwerk ergänzt und die Decken aus Stahlbeton mit Stahlbetonunterzügen konstruiert. Aus der Dokumentation geht hervor, dass die gesamte Decken- bzw. Bodenkonstruktion aus Stahlbeton erstellt wurde. Die Isolierungsarbeiten der Treppenläufe werden dort anschaulich dargestellt und ihre vertikalen Abdichtungsmaßnahmen erscheinen zweckdienlich. Eine Darstellung der Isolierungsarbeiten der jeweiligen Podeste kann detaillierten Konstruktionsplänen²¹ und dem Leistungsverzeichnis entnommen werden. Diese wurden von dem damaligen Bauleiter Paul glaubhaft „als äußerst gewissenhaft ausgeführt“ bestätigt und erscheinen plausibel und effektiv. Für die Ausführung des dritten Laufs ist bis zum Ende dieser Arbeit nur ein Konstruktionsschnitt²² aus dem Schal- und Bewehrungsplan gefunden worden. Dieser bestätigt, dass die oberen zwei Drittel des Laufs aus Ziegelmauerwerk als Bestand stehen gelassen wurden und nur der Antrittsbereich aus Stahlbeton ausgebildet wurde. Die Abdichtungsmaßnahmen wurden, laut dem damaligen Bauleiter, auch über die Ziegelsteinflächen ausgeführt. Die Anschlussfuge des Treppenlaufs zu den Brüstungsplatten ist an diesem Lauf, im Gegensatz zu den anderen, mineralisch ausgeführt. Die damals ausgeführten restauratorischen Natursteinarbeiten an den Brüstungsplatten, den Handläufen und den Gesimsen

¹⁸ Vgl. Wallasch 1992b

¹⁹ Vgl. Wallasch 1993

²⁰ Vgl. Denkmalpflege Berlin GmbH 1996a, 1996b, 1996c

²¹ Vgl. Konstruktionspläne, Anhang, Kap. 4.1

²² Vgl. ebd.

wurden in einer Maßnahmenkartierung²³ festgehalten. Dort wird aufgeführt, ob 1996 eine Neuanfertigung, eine Salzreduzierung, eine Vorfestigung, eine Reinigung, eine Festigung, oder eine Hydrophobierung des jeweiligen Bauteils vorgenommen wurden, oder ob dort Vierungen, Antragungen, oder Rissinjektionen durchgeführt wurden. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass nur an einer Brüstungsplatte weder eine Ergänzung modelliert²⁴ noch eine Vierung gesetzt wurde und, dass die Maßnahmen an den Nebraer Platten die Ausführungen an den Postaer Platten bei Weitem übersteigen. Während an den Brüstungsplatten aus Postaer Sandstein in der Regel nur eine Reinigung erfolgte, wurden die Nebraer Platten außerdem allesamt gefestigt²⁵ und hydrophobiert²⁶. Es wurden bei keinem Bauteil salzreduzierende Maßnahmen getroffen²⁷, da in den Voruntersuchungen²⁸ nur geringe Werte an Salzionen festgestellt wurden und die angelegten Testflächen zur Salzreduzierung kaum Erfolg brachten²⁹.

1997 – 2015

Nach den Sanierungsarbeiten von 1996 wurden 1997, in einem Schreiben der staatlichen Museen zu Berlin an die Bundesbaudirektion, Durchfeuchtungen an der Freitreppenanlage³⁰ aufgrund mangelnder Regenwasserableitung angemahnt³¹. Im Mai und Juli 1999 wurden von der Firma FEAD Untersuchungen³² zur Durchfeuchtung und Salzausblühungen der Anlage durchgeführt mit dem Ergebnis, dass Regenwasser in die Fugen eindringen und Salze aus dem Fugenmaterial heraus schwemmen würde. Dies könne zukünftig durch eine Fugenhydrophobierung verhindert werden. Im August

²³ Denkmalpflege Berlin GmbH 1996c

²⁴ An den einzelnen Nebraer Brüstungsplatten wurden im Mittel etwa 10 Antragungen und eine Vierung durchgeführt.

²⁵ Nach den Voruntersuchungen zur Festigung wurde von Wallasch, in Wallasch 1993, S.4, Funcosil OH 1:3 Butanon als Festigungsmittel in zwei- bis drei-maliger Flutungsmaßnahme für die Plattenvorderseiten und Rückseiten als Teilempfehlung zur Diskussion gestellt. Das tatsächlich zum Einsatz gekommene Festigungsmittel ist dem Autor bis dato nicht bekannt.

²⁶ Während der Voruntersuchungen zur Hydrophobierung wurde mit Funcosil SN durch einen drei- bis vier-maligen Flutvorgang hydrophobiert. Das tatsächliche tatsächlich zum Einsatz gekommene Hydrophobierungsmittel ist dem Autor bis dato nicht bekannt.

²⁷ Wallasch 1993, S.1 „Erwartungsgemäß konnte bei der vorliegenden ‘Hauptsalzart’ kein nachweisbarer Entsalzungseffekt festgestellt werden.“ Es wurden Testflächen mit Kompressen aus Quarzsand, Zellstofflocken und Calcigel 6:1:1 auf einer Lage Lagenzellstoff angelegt.

²⁸ Vgl. Wallasch 1992a, Anlage 9

²⁹ Vgl. ebd.

³⁰ Speziell wird auf die fassadenseitige Durchfeuchtung der Gesimssteine bei den Treppendepoteingängen verwiesen.

³¹ Vgl. Holan 16.12.1997

³² Vgl. FEAD 12.07.1999

1999 mahnt der zukünftige Direktor Bernhard Maaz in einem hausinternen Schreiben³³ nachhaltige Maßnahmen zur nunmehr dringenden Beseitigung der Salzausblühungen an. Im September 1999 kommt es zu einer Besprechung³⁴ in welcher über eine Fugenhydrophobierung, über dauerelastisches Fugenmaterial, über eine Entfernung der Salzausblühungen im Trockenstrahlverfahren und über Gesimsabdeckungen diskutiert wird. 2001 kommt es zur Ausführung der Arbeiten durch eine Steinmetzwerkstatt. Im Zuge dessen werden einige Anschlussfugen zwischen den Granitbauteilen und den Brüstungsplatten mit dem dauerelastischen Material Novasil S70 verfugt, gerissene Fugen erneuert und alle mineralischen Fugen mit der Hydrophobierungscreme Funcosil Fassadencreme hydrophobiert. Weiterhin werden bei dieser Maßnahme die Sandsteingesimse mit Zinkblech zur besseren Wasserabführung abgedeckt. Dem Autor wurden 2015 von Seitens der Mitarbeiter der staatlichen Museen zu Berlin von massiven Salzausblühungen seit Beginn ihrer jeweiligen Anstellungen berichtet (vgl. Abb. 3).



Abb. 3: Salzausblühungen 2014 an Bauteil C

Quelle: A. Czarnecki

³³ Vgl. Maaz 10.08.1997

³⁴ Vgl. Schubert 17.09.1999

3. Bestand

Die verbauten Materialien an der Freitreppe waren zu Anfang der Untersuchung noch unklar und die verbauten Gesteinsarten wurden darum mittels mobilem Infrarotspektrometer und durch visuelle Betrachtung ermittelt. Es wird im Folgenden auf die sandsteinernen Bauelemente, ohne das Verblendmauerwerk, der Freitreppenanlage eingegangen.

3.1 Gesteinsarten

Die verbauten Gesteinsarten wurden zusammen mit Frau Dr. Ehling, einem ihrer Kollegen und einer Praktikantin von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe am 13.05.2015 vor Ort mit dem Infrarotspektrometer Terra Spec 4 gemessen³⁵ und anschließend in deren Untersuchungsräumen ausgewertet. Die IR-Spektroskopie kann zur qualitativen Bestimmung bekannter Substanzen anhand eines Referenzspektrums genutzt werden. Dabei werden die Energiezustände der Moleküle einer Substanz durch Infrarotstrahlung angeregt und deren spezielle Schwingungen gemessen.

Die Vergleichsspektren für die ermittelten Sandsteinarten sind im Anhang im Kapitel 1.6 dargestellt. Auf diese Weise konnten alle Bauteile der Freitreppe ihrer Gesteinsart zugewiesen werden³⁶. Bereits vor Ort wurde erkennbar, dass es sich bei den verbauten Sandsteinarten um nur zwei Typen handelt, den Nebraer Buntsandstein und den Postaer Elbsandstein aus dem Ober bis Mittelturon. Beide Sandsteine wurden von Ehling³⁷ und von Wehry³⁸ bei Ehling et al. op. 2011 ausführlich auf ihre petrografischen Eigenschaften hin untersucht und beschrieben. Folgend werden relevante Daten aus dem dort Beschriebenen zusammengefasst.

³⁵ An welchen Bauteilen die Messungen durchgeführt wurden kann im Anhang im Kapitel 1.6 oder in der Kartierung Anhang, Kap. 2.10 nachgelesen werden

³⁶ Die direkte Zuweisung der Gesteinsarten der einzelnen Brüstungsplatten und Postamente sowie deren Bauteilbezeichnungen kann im Anhang im Kapitel 2.1 u. 2.2 nachgesehen werden.

³⁷ Ehling et al. op. 2011, S.209 f.

³⁸ Wehry op. 2011, S.106 f.

3.1.1 Nebraer Sandstein



Abb. 4: Nebraer Sandstein, Chirotherienfolge

Quelle: Traco Deutsche Travertinwerke

Der Nebraer Sandstein wird von Meike Wehry bezeichnet als ein „durch seine intensive Färbung und Struktur auffallender Sandstein, der seit der frühen Romanik zu den meist genutzten Bausandsteinen im südlichen Sachsen-Anhalt gehörte. Seit dem 18. Jahrhundert fand er u. a. als Bildhauerstein darüber hinaus im nördlichen Sachsen-Anhalt, West-Sachsen und Brandenburg Verwendung; mit Beginn des 19. Jahrhunderts setzt er farbliche Akzente in Metropolen wie Berlin und Hamburg.“ Weiterhin beschreibt sie ihn als „dickbankiger, häufig gradierter und geschichteter, fein – bis mittelkörniger (0,11- 0,42 mm), hauptsächlich kieselig gebundener, feldspatführender Sandstein von meist lachsfarbener, [...] Farbe und wechselnder Festigkeit“. Seine Textur wird dort als sowohl homogen als auch geschichtet mit leichten Korneinregelungen beschrieben. Er besitzt selten einzelne gröbere Körner und vereinzelt Tonlinsen. Die einzelnen Körner sind kantengerundet bis gut gerundet. Dicht beieinander treten Punkt-, Längs-, konkav/konvexe- und suturierte Kornkontakte auf.

Als Bestandteile können Feldspäte (7- 35%), Tonminerale (1- 3%) und daneben kaum andere Akzessorien (< 1%) auftreten³⁹.

Die Porenradienverteilung wird als überwiegend inhomogen beschrieben. Partien mit relativ hoher Porosität (25,6% GP/ 23,58% OP) scheinen mit stark kompaktierten Bereichen und ungleichmäßig mit Ton, Kalzit oder kieseligem Zement ausgefüllten Poren zu wechseln⁴⁰. Die Angaben zur Porenradienverteilung für die Ioderslebener Varietät liegt bei Schmeikal (2002) fast vollständig in dem Bereich von 0,1 bis 20 µm. Das Maximum befindet sich dort zwischen 10- 20 µm und der überwiegende Teil der Poren liegt im kapillaren Bereich⁴¹. Diese Verteilung sollte, aufgrund ihrer ähnlichen Korngrößen, in etwa ebenso auf die anderen Varietäten zutreffen.

Sein Verwitterungsverhalten wird in Abhängigkeit von der Intensität der kieseligen Bindung als gut bis mäßig dargestellt. Es können schichtparalleles linsenförmiges Auswittern und Abrunden einzelner Bausteine auftreten. Risse, Schalenbildung, Abschuppung und aufblättern treten vorwiegend an auf Spalt versetzten Bausteinen auf.⁴² Außerdem wird an älteren Bauwerken häufig die Ausbildung von schwarzen Krusten beobachtet.

Die an der Freitreppe verwendete Varietät des Nebraer Sandsteins kommt visuell der Ioderslebener Varietät am nächsten und die Traco Travertin Werken bezeichnen den Nebraer Sandstein aus der Chirotherien Folge als den an der Alten Nationalgalerie verbauten⁴³. Diese Varietät ist die feinkörnigste der drei bei Wehr unterschiedenen Varietäten. An der Freitreppe sind etwa die Hälfte aller Brüstungsplatten aus Nebraer Sandstein hergestellt. Des Weiteren sind sämtliche Gesimse und alle Handläufe sowie die Postamentabdeckungen aus Nebraer Sandstein gefertigt. Die zwei oberen Postamente für die beiden Figurengruppen sind ebenfalls aus Nebraer Sandstein.⁴⁴

³⁹ Vgl. Wehr op. 2011, S. 108; / hier Anhang Kap.6.1; / Die %- Angaben oben beziehen sich auf die Gesamtstreuung aller drei bekannten Horizonte

⁴⁰ Vgl. ebd. S. 109

⁴¹ Vgl. Schmeikal 2002, S.29

⁴² Vgl. Wehr op. 2011 S.111

⁴³ Vgl. Traco Deutsche Travertin Werke 2015

⁴⁴ Vgl. Bestandskartierung Brüstungselemente, Anhang, Kap. 2.2

3.2 Postaer Sandstein



Abb. 5: Postaer Sandstein mit geringen Einschlüssen

Quelle: Sächsische Sandsteinwerke



Abb. 6: Postaer Sandstein Bildhauerqualität

Quelle: Sächsische Sandsteinwerke

Der Postaer Sandstein ist ein Elbsandstein, der nachweislich seit dem 13. Jahrhundert gezielt für Bauzwecke abgebaut wird. Es ist die Bezeichnung für in den Bruchgebieten Pirna, Wehlen, Rathen und Lohmen abgebaute Erzeugnisse. Heute wird er von den sächsischen Sandsteinwerken aus den Brüchen Mühlleite und Wehlen vertrieben. Er wird dort in den Varietäten mit Einschlüssen, mit geringen Einschlüssen und Bildhauerqualität angeboten⁴⁵. Bei Ehling (2011) werden diese als „überwiegend mittel- bis grobkörnige (0,2- 0,7 mm), untergeordnet mitunter konglomeratische Sandsteine von grauer bis gelblicher Färbung und in der Regel fester Kornbindung“ beschrieben. Die Sortierung wird bei Ehling (2011) nach Grunert (1982) als schlecht beschrieben und die Körner von ihr als schwach gerundet bis gerundet bewertet. Es treten überwiegend direkte Kornkontakte auf und teils auch „kieselige Anwachsäume“⁴⁶. Als Bestandteile werden Quarz (> 98%), Tonanteile (<1%) und kaum Akzessorien (Rutil, Zirkon, Turmalin) genannt.

Die Porenradienverteilung wird im selben Artikel als offener Porenraum (mit 21,5% GP) mit einem hohen Anteil an Makro und Kapillarporen angegeben. Die Porenradien liegen dort in dem Bereich von 0,1 bis 65,2 µm wobei sich das Maximum zwischen 17,8 und 65,2 µm befindet.

Sein Verwitterungsverhalten wird aufgrund seiner festen Kornbindungen, den großen Poren und dem weitestgehendem Fehlen von Tonmineralen als sehr verwitterungs- und frostbeständig ausgewiesen. Das Verwitterungsverhalten der Bildhauer Varietät ist aufgrund ihres erhöhten Feinanteils etwas geringer beständig.

An der Freitreppe wurden sowohl die Varietät „mit geringen Einschlüssen“ als auch der „Bildhauersandstein“ verbaut. Die gröbere Varietät wurde in den Bereichen der Postamente und Figuren eingesetzt während für die filigraneren Bildhauerarbeiten der Brüstungsplatten die feinere Variante zum Einsatz kam. Alle Postamente der Treppengeländer und zwei der vier Postamente für die Figurengruppen an der Freitreppenanlage wurden aus dem gröberen Material gefertigt. Etwa die Hälfte der Brüstungsplatten der Freitreppe der Alten Nationalgalerie wurden aus dem, etwas feineren, Bildhauersandstein gehauen.⁴⁷ Wie weiter oben beschrieben, sollen Teile des dritten Laufs der Anlage 1992 noch aus originalen Platten von 1876 bestanden haben. Da in der Sanierungsmaßnahme 1996, laut Maßnahmenkartierung, weder Platten neu

⁴⁵ Vgl. Sächsische Sandsteinwerke 2015

⁴⁶ Ehling et al. op. 2011, S.228

⁴⁷ Vgl. Bestandskartierung Brüstungselemente, Anhang, Kap. 2.2

angefertigt noch verschoben worden sind, aber die sechs Platten des dritten Laufs heute aus Postaer Sandstein gefertigt sind wirft dies die Frage auf ob schon bauzeitlich Postaer Sandsteine als Brüstungsplattenelemente verbaut worden ist.

3.3 Zeitliche Einordnung der Brüstungsplatten und Figuren

Aufgrund der Archivdaten können einige Fakten zur zeitlichen Einordnung der Brüstungsplatten und den Figuren getroffen werden. Die folgenden Erkenntnisse beziehen sich auf den Untersuchungsbericht von Wallasch (1992), auf Aussagen des damaligen Bauleiters Paul und die in dieser Arbeit getätigten Gesteinsuntersuchungen. Aufgrund dieser Erkenntnisse lassen sich, außer Vermutungen, leider keine eindeutigen Schlüsse zu verbleibenden originalen Brüstungsplatten ableiten.

Es ist ein Kostenangebot⁴⁸ von 1963 bekannt, in welchem Brüstungsplatten aus Nebraer Sandstein für 14 spezielle Bausegmente (ca. 80 lfd. Meter) der Freitreppe angeboten wurden (vgl. Abb.7).

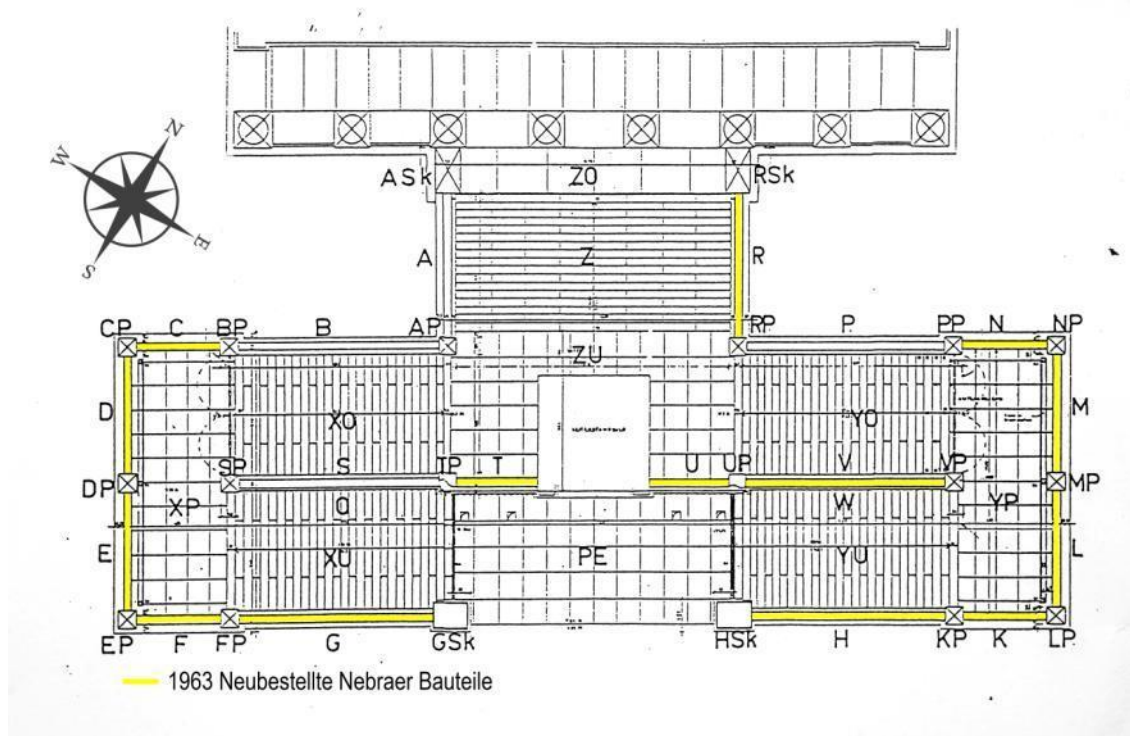


Abb. 7: Angebot 1963 in Nebraer Sandstein

Quelle: D. Ohnmeiß

Da es sich um ein sehr umfangreiches Angebot handelt, kann vermutet werden, dass die verbleibenden vier Bauteile vielleicht nicht neu angefertigt werden sollten. Laut

⁴⁸ Vgl. Wallasch 1992a, Anlage 8

Wallasch (1992) werden in einem Lieferungsbeleg vom 17.06.1963 von den angebotenen 80 Metern, 11 Meter weniger für das östliche Podest geliefert. Leider ist diese Aussage, nicht wie die anderen, in seiner Chronologie belegt. Es kommt hinzu, dass der Nebraer Bruch während der Bauarbeiten⁴⁹ geschlossen wurde. Heute sind am östlichen Podest 6,70 Meter Brüstung aus Nebraer Platten und die restlichen 11 Meter aus Postaer Platten gefertigt (vgl. Abb. 8). Es ist darum davon auszugehen, dass die damals nicht gelieferten Platten in Postaer Sandstein gefertigt wurden und später hin zu kamen. Außerdem sind heute drei andere Brüstungssegmente, welche damals in Nebraer Sandstein bestellt wurden, aus Postaer Sandstein gefertigt (vgl. Abb. 8).

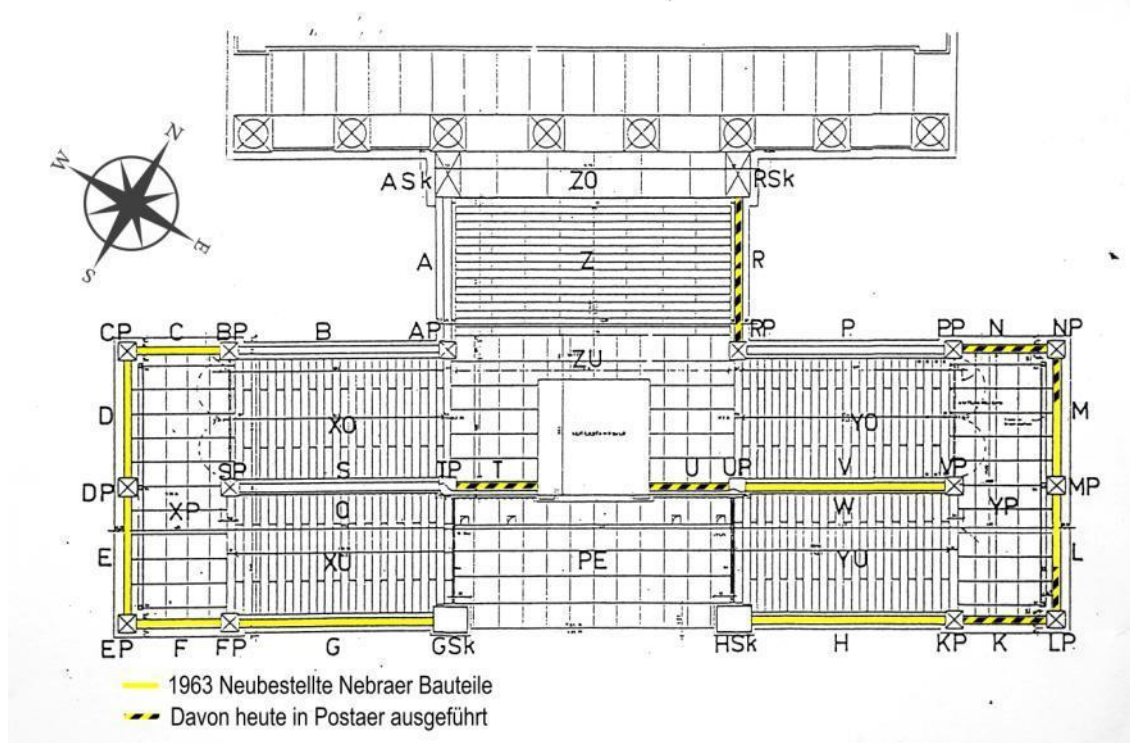


Abb. 8: 1963 in Postaer Sandstein ausgeführt

Quelle: D. Ohnmeiß

In der Baumaßnahme 1995 wurden laut dem damaligen Bauleiter Paul und den vorliegenden Bauakten weder Brüstungsplatten neu angefertigt, noch von einem zum anderen Ort verschoben. Darum wird davon ausgegangen, dass alle damals bestellten Bauteile, welche heute nicht in Nebraer Sandstein ausgeführt sind, 1963 in Postaer Sandstein ausgeführt wurden. Von den vier, damals nicht neu bestellten Brüstungssegmenten, sind heute drei aus Postaer Sandstein. Nur das südliche Geländer des westlichen zweiten Laufs ist heute noch aus Nebraer Sandstein (vgl.

⁴⁹ Vgl. Wallasch 1992a, Anlage 7

Abb. 9) und es liegen keine Archivalien vor, dass dieses 1963 neu angefertigt wurde. Der Zeitzeuge von 1963 Medger (Sächsische Sandsteinindustrie) berichtet in einer Besprechung mit Wallasch am 27.03.1992, dass möglicherweise Teile des dritten Laufs noch von 1867 seien und das nördliche Gelände des zweiten westlichen Laufs damals aus Postaer Sandstein gehauen worden sei, da der Bruch Nebra der Firma Stiller in Halle geschlossen wurde.

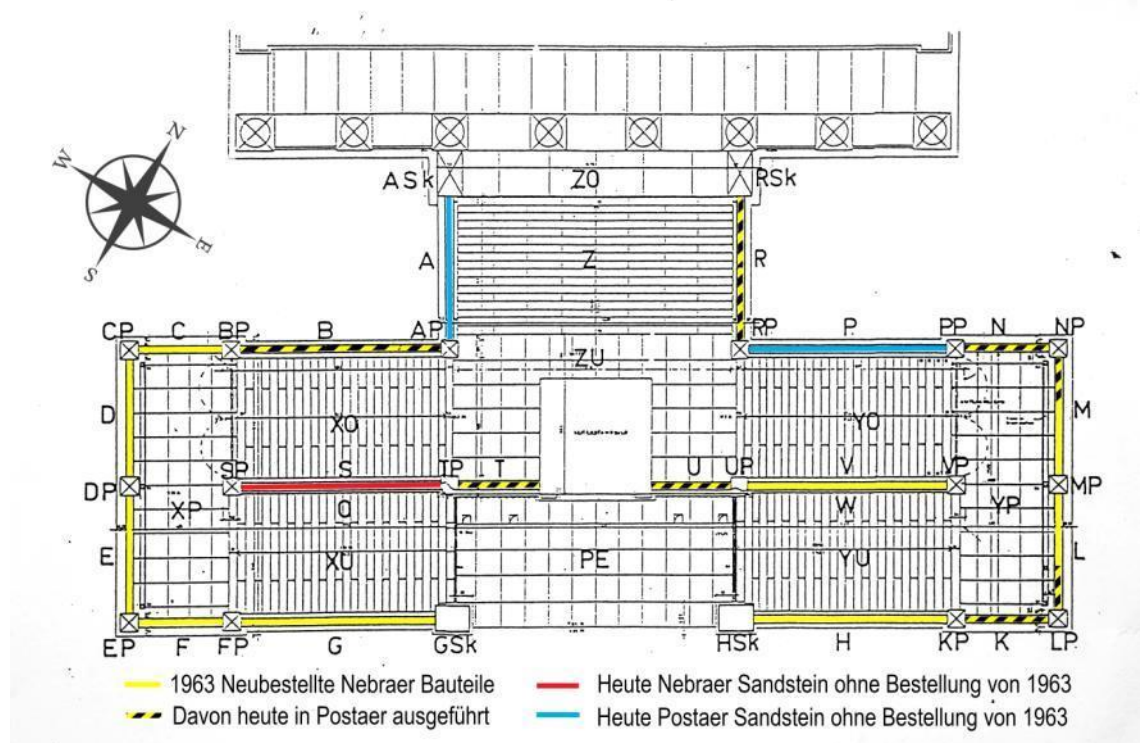


Abb. 9: Bestand der Brüstungsplatten heute und Neuanfertigungen von 1963

Quelle: D. Ohnmeiß

Die unteren Figurengruppen wurden 1873 aus Rackwitzer Sandstein gefertigt⁵⁰, im Krieg zerstört, 1963 erneut in Postaer Sandstein ausgeführt⁵¹ und 1996 nur abgebaut und wieder aufgebaut. Die östliche der oberen Figurengruppen wurde 1963 für nicht restaurierungsfähig befunden und in Postaer Sandstein neu ausgebildet. Für die westliche obere Figurengruppe fehlen Hinweise einer Neuausbildung und auf Fotos der Nachkriegszeit macht sie einen vollständigen Eindruck. Auf Abbildungen nach der Rekonstruktion 1962 sieht sie wiederum als einzige der Figuren verschwärzt und damit alt aus. Sie ist ebenfalls aus Postaer Sandstein gehauen.

⁵⁰ Vgl. Dorgerloh 1999, S.86

⁵¹ Vgl. Wallasch 1992a, Anlage 8

Die Gesimse wurden weder 1963, laut Medger⁵², noch 1996, laut der damaligen Maßnahmenkartierung⁵³, neu ausgeführt.

Zusammenfassend gibt es also drei Bauteilsegmente (P, A und S) für welche Anhaltspunkte zu einer Neuanfertigung der Brüstungsplatten fehlen, wovon wiederum nur ein Segment (S) aus Nebraer Sandstein besteht. Von den Figurengruppen könnte die westliche obere Gruppe, ebenfalls aus Postaer Sandstein, noch bauzeitlich sein. Leider fehlt bisher jeder Hinweis, dass ursprünglich auch Postaer Sandstein verwendet wurde⁵⁴ bzw. alle Brüstungsplatten aus Nebraer Sandstein gefertigt wurden. Sicher scheint wiederum zu sein, dass die Gesimste aus Nebraer Sandstein heute noch überwiegend Originale sind.

⁵² Vgl. Ebd.

⁵³ Denkmalpflege Berlin GmbH 1996c

⁵⁴ Seltsamer Weise wurde bei den Petrographischen Untersuchungen von 1992 kein Postaer Sandstein ermittelt obwohl laut den hier durchgeführten Untersuchungen alle Postamente und etwa die Hälfte aller Brüstungsplatten der Freitreppenanlage daraus bestehen und damals schon bestanden. Dies mag an der hier verbauten, weniger bekannten, Bildhauer-Varietät liegen.

4. Zustand

Während der verbaute Nebraer Sandstein ein breites Spektrum an Schäden aufweist zeigen die Elemente der Freitreppe aus Postaer Sandstein im Grunde keine starken Verwitterungserscheinungen weswegen die im Folgenden beschriebenen Schäden größtenteils an Bauteilen aus Nebraer Sandstein zu finden sind. Der Zustand der Freitreppe wurde in dieser Arbeit anhand von Zustandskartierungen (vgl. Anhang Kap. 2.3 u. 2.4) und einem Schadensglossar (vgl. Anhang Kap. 7.1) erfasst. In den Kartierungen wurden ausschließlich der Zustand der Vorderseite der Brüstungsplatten und der mikrobielle Bewuchs der Handläufe kategorisch erfasst, während sich das Schadensglossar mit exemplarischen Detailaufnahmen der Schäden über die gesamte Freitreppenanlage befasst. Folgend sind die Schäden einzelner Bauelemente zusammengefasst dargestellt.

4.1 Zustand der Brüstungsplatten

Der Zustand der Brüstungsplatten aus Postaer Sandstein muss als sehr gut beurteilt werden und es lassen sich bei visueller Betrachtung maximal leichte Rückwitterungen erahnen. Sieben der 36 Platten aus Postaer Sandstein zeigen jährlich wiederkehrende Salzausblühungen.

Die Brüstungsplatten aus Nebraer Sandstein hingegen zeigen vorderseitig, im unteren Drittel ihrer geringsten Dicke⁵⁵, Rückwitterungen durch Absanden⁵⁶ und Schalenbildung bis zum Formverlust⁵⁷ des Zierrats. Die Platten stehen auf Spalt, was unter anderem zu partiellem Verlust einzelner Teile der Sedimentationsschichten führt⁵⁸. Des Weiteren gibt es vorderseitig wie rückseitig mechanische Ausbrüche an Ecken, Kanten und auf Höhe der unteren Profile. Mikrobieller Bewuchs ist partiell als grüner Schleier sichtbar und nur zwei der 30 Platten zeigen Salzausblühungen. Wiederum zeigen Fotoaufnahmen der Dokumentation von 1996 einzelne Bereiche mit zum Teil starker Verwitterung welche heute kaum Unterschiede in der Rückwitterung aufweisen (vgl. Abb. 10 bis Abb. 13).

⁵⁵ Vgl. Schadensglossar, Anhang, Kap. 7.1, Bild- Nr.: 15

⁵⁶ Vgl. ebd., Bild- Nr.: 01

⁵⁷ Vgl. ebd., Bild- Nr.: 05

⁵⁸ Vgl. ebd., Bild- Nr.:02 u. 03



Abb. 10: Detail Brüstungsplatte V1 1996

Quelle: A. Kasinowski



Abb. 11: Detail Brüstungsplatte V1 2015

Quelle: D. Ohnmeiß



Abb. 12: Details Brüstungsplatte G1 1996

Quelle: A. Kasinowski



Abb. 13: Details Brüstungsplatte G1 2015

Quelle: D. Ohnmeiß

4.2 Zustand der Figuren

Die vier Figurengruppen sind aus Postaer Sandstein gefertigt⁵⁹. Demnach ist ihr Erhaltungszustand, ebenso wie bei den Postaer Brüstungsplatten als sehr gut zu beurteilen. Tatsächliche Rückwitterungen sind nicht auszumachen. Die Figurengruppen zeigen leichte Verschwärzungen⁶⁰ und vereinzelte Gipskrustenbildung⁶¹. Außerdem zeigt sich vereinzelt mikrobieller Bewuchs.

4.3 Zustand der Postamente, der Postamentabdeckungen und der Handläufe

Die Postamente aus Postaer Sandstein zeigen generell nur geringe Schäden an Ecken und Kanten während die zwei Postamente der oberen Figurengruppen aus Nebraer Sandstein Absanden und Schalenbildung an ihren oberen Profilen⁶² aufweisen. Die Salzausblühungen treten wiederum ausschließlich an den Postamenten aus Postaer Sandstein auf. Die Postamentabdeckungen und die Handläufe der Freitreppenanlage sind aus Nebraer Sandstein gehauen. Sie sind stark von Flechten bewachsen und zeigen vereinzelt Absanden und Schalenbildung. Außerdem gibt es mechanische Ausbrüche an den Ecken und Kanten⁶³.

4.4 Zustand der Fugen und des Wasserablaufs

Etwa die Hälfte der mineralischen Fugen zeigen Flankenabriss oder sind gänzlich herausgebrochen⁶⁴. Die mineralischen Fugen im Übergang zwischen den sandsteinernen Brüstungsplatten und dem Granit des dritten Laufs und dem der ersten Läufe sind in ihrer Gänze defekt und stehen größtenteils offen. Die elastischen Fugen zwischen den Granitbodenplatten untereinander und zu den sandsteinernen Brüstungsplatten hin sind im Grunde intakt.

Die ersten wirksamen Wasserabläufe befinden sich auf der äußeren Seite der ersten Absätze. Regenwasser fließt dadurch teilweise über zwei Drittel der Anlage bevor es abgeleitet wird.

⁵⁹ Ursprünglich (bis 1960) waren sie aus Rackwitzer Sandstein, welcher dem Postaer ähnlich ist.

⁶⁰ Vgl. Schadensglossar, Anhang, Kap. 7.1, Bild-Nr.: 18

⁶¹ Vgl. ebd. Bild- Nr.:17

⁶² Vgl. ebd. Bild- Nr.: 07 u. 08

⁶³ Vgl. ebd. Bild- Nr.: 13

⁶⁴ Vgl. ebd. Bild- Nr.: 10, 11 u. 12

4.5 Zusammenfassung des Zustands der Freitreppenanlage

Der Zustand der Sandsteine der Freitreppe ist im Allgemeinen als gut zu bezeichnen. Im Vergleich zu 1996 scheint es nur wenig aktive Stellen der Verwitterung zu geben. Einige Ecken und Kanten sind ausgebrochen. Der starke Flechtenbewuchs, die Salzausblühungen und die offenstehenden Fugen stellen wohl das Hauptproblem dar.

5. Angenommene Schadensauslösende Prozesse

5.1 Salzkristallation

Typische Schadensbilder für Salzschäden sind Absanden und Schalenbildung, Ausblühungen und Krustenbildung. Der dafür zuständige Mechanismus liegt hauptsächlich in der Kristallisation der bauschädlichen Salze begründet⁶⁵. Diese findet bei Übersättigung einer Salzlösung statt. Folglich wenn Wasser aus der Salzlösung verdunstet, was am Bauwerk in der Regel am Trocknungshorizont und somit meist oberflächennah geschieht⁶⁶. Die Kristallisation bringt Drücke mit sich, welche die Kornbindungen der porösen Materialien sprengen können und dadurch einzelne Körner aus dem Verband lösen⁶⁷. Dies kann in den obersten Kornlagen als Absanden geschehen oder als Schalenbildung, wenn der Trocknungshorizont etwas ins Gesteinsinnere verschoben wurde.

Neben dem physikalischen Verwitterungsprozess, den Salze mit sich bringen sind auch chemische denkbar⁶⁸. Allerdings sind diese bei quarzitisches gebundenen Gesteinen eher gering und finden daher keine nähere Berücksichtigung in dieser Arbeit.

Als besondere Faktoren bei dem schädigenden Mechanismus der Salzkristallation spielen der Kristallisationsdruck, die Hydratstufen, die Hygroskopizität und die Deliqueszenzfeuchte⁶⁹ einzelner Salze eine übergeordnete Rolle. Im Folgenden werden diese Begriffe erläutert.

5.1.1 Kristallisationsdruck

Der Kristallisationsdruck beschreibt den von einem Salzkristall ausgeübten Druck auf eine Porenwand. Steiger (2008) definiert die Theorie zum Kristallisationsdruck wie folgt: „Wächst ein Salzkristall in einer Pore gegen die Porenwand, so baut sich ein Druck auf. Der Salzkristall befindet sich dann unter anisotropen Druck. Während die freien Kristallflächen unter hydrostatischem Druck p_L der Porenlösung stehen, befinden sich die belasteten Kristallflächen unter dem erhöhten Druck p_c . Die Druckdifferenz

$$\Delta p = p_c - p_L$$

⁶⁵ Vgl. Juling und Franzen 2009, S.52 f.

⁶⁶ Vgl. Laue 2002, S.19

⁶⁷ Vgl. Steiger 2009a

⁶⁸ Vgl. Steiger et al. 2002 S.2

⁶⁹ auch Sättigungsfeuchte oder Gleichgewichtsfeuchte

ist der Kristallisationsdruck.“ Dies ist die einfachste theoretische Beschreibung des Vorgangs die Gesamtheit des Prozesses ist wesentlich komplexer⁷⁰.

5.1.2 Hygroskopizität und Deliqueszenzfeuchte

Die Hygroskopizität beschreibt die Fähigkeit des Salzes, Wasser aus der Luftfeuchtigkeit an sich zu binden. Wenn es genug Wasser an sich gebunden hat geht es schließlich vollständig in Lösung. Dieses Verhalten beruht auf dem Prinzip der Dampfdruckerniedrigung⁷¹ über Salzlösungen⁷². Das Maß für die Hygroskopizität ist die Deliqueszenzfeuchte eines Salzes, bei deren Erreichen ein Salz aus dem festen kristallinen in den flüssigen gelösten Zustand wechselt. Die Deliqueszenzfeuchte oder auch Gleichgewichtsfeuchte ist bei fast allen Salzen unterschiedlich und temperaturabhängig. Dadurch löst sich jedes Salz bei bestimmten Temperaturen und entsprechenden Luftfeuchtigkeiten und kristallisiert dementsprechend auch wieder aus. Genau in dieser zyklischen Abwechslung des Lösungs- und Kristallisationsprozesses, um eine bestimmte Luftfeuchtigkeit und Temperatur herum, liegt das enorme Schadpotential mancher bauschädlicher Salze. So können manche Salze, wie Nitronatrit (NaNO_3 / 76,5% rF / 15 °C)⁷³, deren Deliqueszenzfeuchte mehrmals am Tag über- und unterschritten werden kann, auch mehrmals am Tag kristallisieren und damit einhergehende Drücke auf das Korngefüge ausüben. Während ein Salz, wie Nitrokalit (KNO_3 / 95,4% rF / 15°C)⁷³ zu den thermodynamischen Bedingungen, um 75% rF / 15°C noch kristallin vorliegen würde und dadurch keinen zusätzlichen Schaden anrichten würde. Nitromagnesit ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$ / 55,9% rF / 15°C)⁷³ wiederum wäre in diesem Moment noch immer in Lösung und würde gar keinen physikalischen Schaden anrichten.

⁷⁰ Vgl. Steiger 2009a

⁷¹ „Aus reinen Flüssigkeiten oder reinen Festkörpern entweichen solange Atome/Moleküle in die Gasphase, bis sich darin ein von der Stoffart, dessen vorliegender Phase und der Gleichgewichtstemperatur abhängiger Druck eingestellt hat. Dieser Druck ist der Sättigungsdampfdruck. Er herrscht, wenn das Gas im thermodynamischen Gleichgewicht (identische chemische Potenziale der Phasen) mit der Flüssigkeit bzw. dem Feststoff steht.

In diesem Zustand ist also die Verdampfung bzw. Sublimation der Flüssigkeit bzw. des Feststoffes mengenmäßig gleich der Kondensation bzw. Resublimation des Gases. Keine der Phasen wächst unter dem Strich auf Kosten der anderen, wodurch beide nebeneinander stabil existieren können. Man spricht daher auch von einem dynamischen Gleichgewicht.“
Chemie.de Information GmbH 2015

⁷² Vgl. Laue 2002, S.20

⁷³ Vgl. Laue IFS S.20, Tab.: 1

5.1.3 Hydratsalze

Ähnliche Schäden, wie bei Über- oder Unterschreiten der Deliqueszenzfeuchte auftreten können, können durch die De- und Hydratation von Hydratsalzen bei Feuchteschwankungen hervorgerufen werden. Hierbei erfahren einige Salze eine enorme Volumenveränderung⁷⁴. „Existieren von einem Salz verschiedene Hydratstufen, können sich diese auch durch Wasseraufnahme (Hydratation) oder Wasserabgabe (Dehydratation) ineinander umwandeln“⁷⁵. Dieses Wasser wird nicht, wie bei der Hygroskopizität, an sich gebunden und damit eine Lösung eingegangen. Sondern es wird direkt in das Kristallgitter mit eingebaut und trotz gleicher An- und Kationen unterscheiden sich die Gitterstrukturen eines wasserfreien und eines hydratwasserhaltigen Salzes völlig. Bei dem Kristallwachstum eines hydratisierten Salzes entsteht wiederum Druck gegen die Porenwände auch Hydratationsdruck genannt⁷⁶. Diese Hydratationsreaktionen können ebenso zyklisch verlaufen wie oben bei den hygroskopischen Salzen beschrieben. Ein Beispielsalz hierfür sind die Natriumsulfate welche als Thenardit (NaSO_4), aber auch als Mirabilit ($\text{NaSO}_4 \times 10\text{H}_2\text{O}$) kristallisieren können. Diese Umwandlung von Thenardit zu Mirabilit geschieht schon bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 71% bei 15°C ⁷⁷ und ist mit einer Volumenexpansion von rund 320%⁷⁸ verbunden.

5.1.4 Hypothesen zu den, durch Salze ausgelösten Schadensprozessen, an der Freitreppe

An der Freitreppe der Alten Nationalgalerie treten die für Salzschäden typischen Schadbilder wie Absanden, Schalenbildung, Ausblühungen und Krustenbildung auf⁷⁹. Aus diesem Grund wird davon ausgegangen, dass die Sandsteine der Freitreppe bauschädliche Salze in nicht geringen Mengen enthalten. Die Herkunft der Salze wird auf mehrere Faktoren geschätzt. Zum einen werden Luftschadstoffe aus trockener und nasser Deposition und somit Nitrat und Sulfat erwartet. Weiterhin ist davon auszugehen, dass der Regen durch die ruinösen Fugen Kontakt mit alkalischen Baustoffen bekommt und dadurch Carbonate, Natrium und Kalium aus deren Zemente heraus gelöst werden. Auch können Chloride durch Streusalzeintrag erwartet werden. Der Regenablauf der Freitreppe wird aufgrund der fehlenden bzw. nicht funktionalen

⁷⁴ Vgl. Juling und Franzen 2009

⁷⁵ Steiger 2015

⁷⁶ Ebd.

⁷⁷ Vgl. Laue 2002

⁷⁸ Schwarz et al. 2010

⁷⁹ Vgl. Schadensglossar, Anhang, Kap. 7.1

Wasserabläufe und der zerstörten Fugenstruktur für mangelhaft eingeschätzt. Sinnvolle konstruktive Wasserabläufe gibt es ausschließlich auf den beiden ersten Absätzen. Die frei berechnete Fläche des dritten Laufs, der beiden zweiten Läufe und dem zweiten Absatz von etwa 250 qm muss sich demnach selbst entwässern. Dies könnte, durch die teilweise offenen Fugen, zu einem Feuchteeintrag auf der Plattform des zweiten Absatzes führen.

5.1.5 Geplante Vorgehensweise

Um die Salzschäden zu analysieren, werden zunächst sichtbare Effloreszenzen mikrochemisch auf die typischen Kationen und Anionen der bauschädlichen Salze hin untersucht. Zeitgleich soll bei den gleichen Proben das Hauptsalz der jeweiligen Probe durch Polarisationsmikroskopie und den Ergebnissen der mikrochemischen Analyse bestimmt werden. Durch Röntgendiffraktometrie sollen die Ergebnisse bestätigt bzw. unklare Ergebnisse richtig gestellt werden. Auf diese Weise sollen nicht alle vorkommenden Salzarten bestimmt werden, sondern eine Auswahl an Salzen, die den meisten Schaden anrichten. Um eine quantitative Aussage über die Freitreppenanlage zu bekommen, soll zusätzlich eine Ionenchromatographie durchgeführt werden. Um dafür geeignete Probenahmestellen zu detektieren, werden die Bereiche, die nicht bereits durch Salzausblühungen gekennzeichnet sind, vergleichend auf ihre Ionenanreicherung im oberflächennahem Bereich untersucht. Dies geschieht durch ein Kompressenverfahren, bei welchem deren elektronische Leitfähigkeit gemessen wird. Durch die Anionen und Kationenbilanz der Ionenchromatographie wird an geeigneten Stellen neben der ausschließlichen Ionenkonzentration ein Tiefenprofil der vorhandenen Salzionen dargestellt. Um einen Überblick über den Regenablauf und Feuchtehaushalt zu bekommen, wird zum einen der tatsächliche Wasserlauf der Freitreppe beobachtet und weiterhin wird die Oberflächenfeuchte der Brüstungsplatten und Postamente vergleichend mit dem Moist200 gemessen. Mögliche Fehlerquellen in der Konstruktion und in den verwendeten Baustoffen sollen durch Archivrecherche geklärt werden.

Durch die Interpretation dieser Analysen wird sich eine konkrete Aussage zur Salzherkunft und dem Salzhaushalt erwartet. (siehe Kap. 6)

5.2 Mikrobieller Bewuchs

Der eigentliche Schaden von mikrobiellem Bewuchs auf frei bewitterten Objekten wird von einigen bis heute noch gänzlich in Frage gestellt und ist mit Sicherheit im Einzelfall zu betrachten. Seit einiger Zeit wurde jedoch beobachtet, dass mikrobieller Bewuchs

auf Natursteinen mehr Schadpotential besitzen kann als eine Veränderung der Feuchteaufnahme und –abgabe eines Gesteins. Sogenannter mikrobieller Befall kann an Gesteinsoberflächen sowohl chemische als auch physikalische Schadensprozesse zur Folge haben und zu einer Destabilisierung der Gesteinsmatrix führen⁸⁰. Nicht ohne Grund erfolgen seit Jahrzehnten intensive Untersuchungen, im Rahmen der durch die heutige DBU geförderten Projekte, zur mikrobiologischen Besiedelung auf Naturstein⁸¹. Aber dabei müssen die einzelnen Bewuchsarten unterschieden werden. So verursachen größere Arten wie Gräser und Moose meist keine Schäden⁸² und einige kleinere Arten, wie Schimmelpilze oder die meisten Bakterien spielen bei frei bewitterten Denkmälern in der Regel keine Rolle. Es gilt abzuwägen, ob an dieser Stelle die oft subjektive Ästhetik oder der reine Reinigungswahn vor Naturschutz bzw. –erhalt einsetzen sollte. So wurde bspw. im Rahmen eines DBU Projektes an der Festungsmauer Rosenberg ein beispielhaftes Ergebnis im Zusammenspiel von Natur- und Denkmalschutz geschaffen⁸³. Auf der anderen Seite können einige Flechtenarten sehr wohl zu Schäden an Natursteinen führen und eine unterlassene Reinigung wäre an dieser Stelle fahrlässig gegenüber dem Kulturgut wie sich im Folgenden zeigt.

5.2.1 Flechten

Eine Flechte ist eine Symbiose zwischen einer Alge und/ oder einem Cyanobakterium und einem Pilz. Sie sind so eng miteinander assoziiert, dass sie eine morphologisch-physiologische Einheit bilden. Keiner der Partner wäre allein in der Lage einen derartigen Vegetationskörper aufzubauen.⁸⁴ Der Pilz (Mycobiont) bildet in dieser Lebensgemeinschaft durch sein Hyphengeflecht den Thallus aus und sorgt für die Wasseraufnahme, während die Alge und/ oder das Cyanobakterium (Photobiont) für die Photosynthese zuständig sind. (vgl. Abb. 14)

⁸⁰ Vgl. Warscheid 2011

⁸¹ Vgl. DBU 2015 und vgl. Gehrmann- Janszen und Petersen 2014, S.125

⁸² Vgl. Förster 2002

⁸³ Vgl. ebd.

⁸⁴ Vgl. Gehrmann- Janszen und Petersen 2014, S. 125

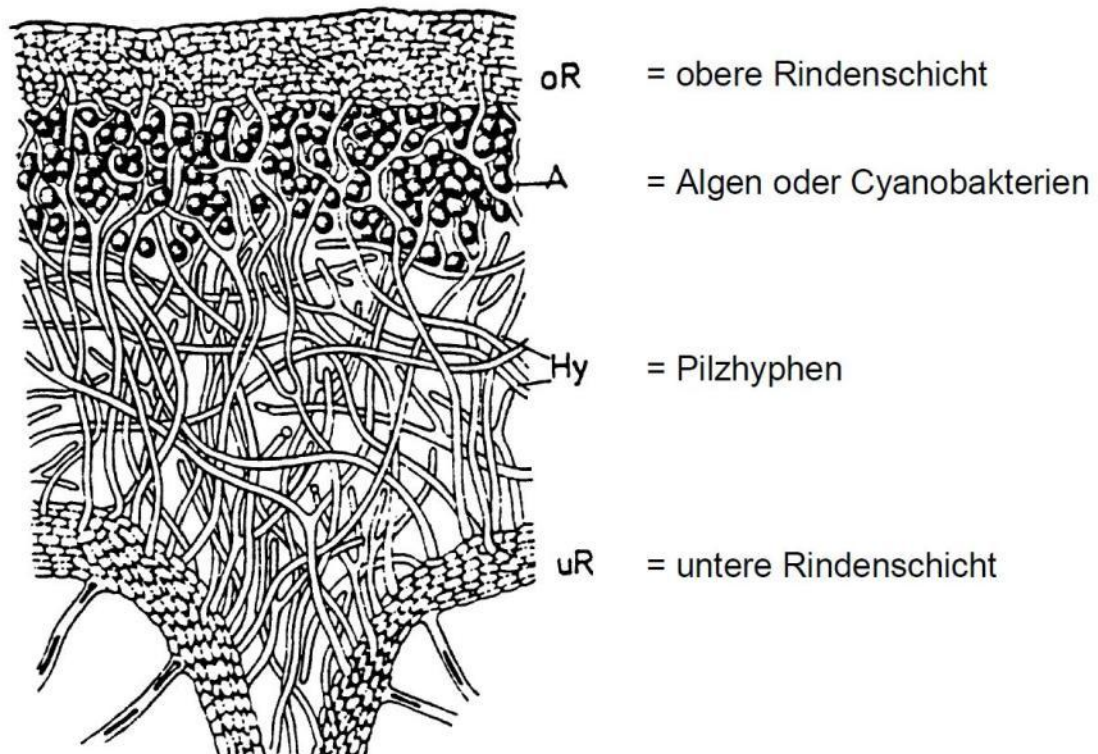


Abb. 14: Schematischer Flechtaufbau

Quelle: S. Beer (2007)

Sie vermehren sich vegetativ durch Thallusbruchstücke⁸⁵ und Ausbildung spezifischer Diasporen⁸⁶. Da Myco- und Photobiont auch freilebend existieren, können sich auch beide Symbiosepartner einzeln fortpflanzen⁸⁷. Als überaus erfolgreiche Lebensform kann sich die Flechte an extreme Standorte anpassen, besitzt eine außerordentliche Kälte- und Hitzeresistenz und Langlebigkeit was eine fast unbegrenzte Verbreitung ermöglicht⁸⁸. Es wird zwischen Srauchflechten, Blattflechten und Krustenflechten unterschieden. Die gesteinsbesiedelnden Flechten nennen sich wiederum Lithobionten und werden weiterhin in silicole⁸⁹ und calcole⁹⁰ Flechten unterteilt. Dass bestimmte Flechten bestimmte Gesteinsarten besiedeln, liegt an unterschiedlichen Vorzügen wie

⁸⁵ Sogenannte Insidien: einzelne Diasporen, die als warzige Auswüchse wie das umgebende Lager gebaut sind, aber eine größere und schwerere Struktur aufweisen. Sie entstehen am unverletzten Thallus oder bei Wundreiz an Bruchstellen durch Wucherung der Rindenhyphen mit Zellen des Photobionten.

⁸⁶ Sogenannte Soredien: aus von Hyphen umgebenden Algenzellen oder -sporenpaketen bestehende Diasporen, die in mehligem Ausbrüchen des Flechtenlagers (sog. Sorale) in der Algenschicht gebildet werden und durch aktives Aufreißen der Rinde austreten und sich verbreiten.

⁸⁷ Brinkmann 2010, S.4

⁸⁸ Vgl. Gehrman- Janszen und Petersen 2014, S. 125

⁸⁹ Flechten die auf silicatischen Untergrund wachsen

⁹⁰ Flechten die auf carbonathaltigem Untergrund wachsen

pH- Wert und Nährstoffangebot, wie z.B. Salze und Metalle.⁹¹ Bei den Lithobionten handelt es sich größten Teils um Krustenflechten, welche mit ihren Markhyphen fest mit dem Untergrund verbunden sind und bis zu 20mm⁹² tief in diesen hinein wachsen können⁹³ (vgl. Abb. 15).

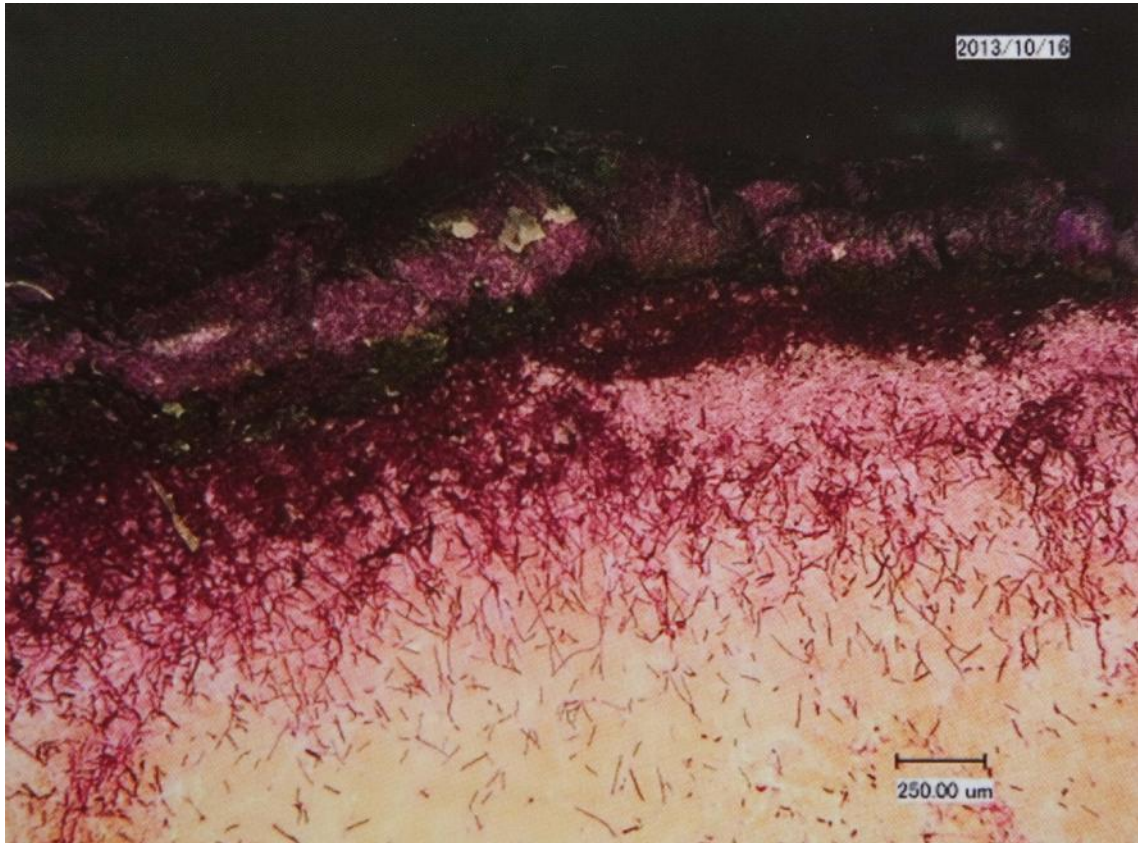


Abb. 15: Eindringen der Flechtenhyphen in Kalkstein

Quelle: Gehrman- Janszen (2014)

Bei der Zerstörung von Gesteinen wird aus diesem Grund der Krustenflechte eine höhere Bedeutung zugeschrieben als den Blattflechten. Die schadensauslösenden Prozesse werden hierbei in biogeophysikalisch- mechanische Prozesse und biogeochemische Prozesse unterschieden⁹⁴.

5.2.2 Der mechanische Schadensprozess von Krustenflechten

Ausgangspunkt für die mechanische Zerstörung von Sandsteinen durch Flechtenbesiedelung ist, die von der Feuchtigkeit abhängige Kontraktion und Expansion des Thallus und das Durchdringen des Gesteins mit Pilzhyphen. Bei

⁹¹ Vgl. Brinkmann 2010, S.6

⁹² Die Tiefe hängt von den physikalischen und chemischen Gesteinseigenschaften ab

⁹³ Vgl. Gehrman- Janszen und Petersen 2014, S.126

⁹⁴ Vgl. ebd.

Gehrmann- Janszen und Petersen (2014) wird der Prozess wie folgt beschrieben: „Aufgrund seines poikilohydrischen⁹⁵ Charakters ist der Flechtenthallus fortwährenden Feuchteschwankungen ausgesetzt. Die daraus resultierenden ständig alternierenden Kontraktionen und Expansionen führen zu Zugspannungen im Thallus. Diese Prozesse als Folge mikroklimatischer Bedingungen, führen zusammen mit biogeochemischen Reaktionen zu einer Desintegration der von Flechten besiedelten Gesteinspartien. [...] Eine Bedeutung haben auch die vom Mycobionten 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.“ Folglich wird durch ein Quellen und Schwinden der um die Quarzkörner gelegten Pilzhyphen der Verbund des einzelnen Kornes der Art geschwächt, so dass sich dieses unter Umständen ganz aus dem Verband löst. Folge ist der Verlust der ersten Kornlage und somit der originalen Oberfläche, wie ebenso eine Oberflächenvergrößerung was künftige Bewüchse nach einer Reinigung erneut fördern würde.

5.2.3 Der chemische Schadensprozess

Bei dem biogeochemischen Prozess sind die Ausscheidungen bestimmter Stoffwechselprodukte der Flechten entscheidend. Interessant für die Steinverwitterung sind dabei vor allem die sekundären Stoffwechselprodukte, früher Flechtensäuren, heute Flechtenstoffe genannt. Bis 1996 waren über 200 Flechtenstoffe bekannt und jährlich kommen neue hinzu⁹⁶. Dabei kann es sich u. a. um im Citrat-Zyklus gebildete Säuren wie Oxal-, Citronen-, Essig-, Ameisen- und Fumarsäure handeln⁹⁷. Diese organischen Säuren können an den Grenzflächen zwischen Flechte und Gestein zu Lösungsprozessen der gesteinsbildenden Minerale führen⁹⁸. Auf diese Weise können, laut Brinkmann, Feldspäte in Kaolin umgewandelt und Carbonatverbindungen gelöst werden. Als weiteren Schadensprozess kann Oxalsäure Calcium aus dem Kalkstein lösen und Calciumoxalat bilden⁹⁹. Dieses unter dem Namen Weddelit oder als Monohydrat Whewellit bekannte organische Salz ist nicht wasserlöslich¹⁰⁰ und

⁹⁵ Poikilohydre Organismen (wechselfeuchte Pflanzen) können die Aufnahme und Abgabe von Wasser nicht aktiv regulieren. Ihr Wassergehalt passt sich daher weitgehend den Feuchtigkeitsverhältnissen der Umgebung an.

⁹⁶ Beer 2007

⁹⁷ Vgl. Brinkmann 2010, S.7 / Gehrmann- Janszen und Petersen 2014, S. 127

⁹⁸ Vgl. Brinkmann 2010, S.8

⁹⁹ Vgl. Gehrmann- Janszen und Petersen 2014, S.127

¹⁰⁰ Schwarz et al. 2010

demnach nicht an denselben bauschädlichen Prozessen¹⁰¹ beteiligt wie die übrigen Schadsalze. Die chemisch aktiven Prozesse durch Flechten auf carbonatischem Gestein sind bekannt¹⁰², allerdings sind die chemischen Lösungsprozesse auf silikatischem Untergrund an dieser Stelle nicht ausreichend bewiesen und im Zuge dieser Arbeit nicht belegbar. Aus diesem Grund wird den möglichen chemischen Lösungsprozessen von Flechten auf silikatisch gebundenen Sandsteinen in der hier vorliegenden Arbeit keine Bedeutung zugemessen.

5.2.4 Hypothesen zu den, durch Flechten ausgelösten, Schadensprozessen an der Freitreppe

Die Freitreppe der Alten Nationalgalerie besitzt ca. 40 m² Handlauffläche. Diese Handläufe wurden seit 1997 nicht mehr gereinigt und mikrobiologische Organismen können sich seit dem ungehindert vermehren. Mittlerweile sind die Handläufe der Freitreppe stark bewachsen¹⁰³. Möglicherweise konnten somit die oben genannten Schadprozesse lange Zeit wirken. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Flechten der Freitreppe der Alten Nationalgalerie, wie die meisten Lithobionten Krustenflechten sind und somit in die Substanz hineinwachsen und in das Steingefüge eindringen. Darum werden mechanische Schadensprozesse vermutet und damit ein Lockern bis Lösen einzelner Quarzkörner in Betracht gezogen.

5.2.5 Geplante Vorgehensweise

Um die oben angestellten Vermutungen zu prüfen, sollen Proben der einzelnen Flechten und Besiedelungsarten genommen werden, um die vorkommenden Arten bestimmen zu können. Die Bestimmung der wichtigsten Arten soll durch Dr. rer. nat. Gehrman-Janszen im Labor in Hildesheim geschehen. Ebenfalls im Labor in Hildesheim sollen an den entnommenen Proben unter Aufsicht von Prof. Dr. Petersen Untersuchungen zur Eindringtiefe der Flechten, zur Oberflächenvergrößerung des Substrats und zum Schimmelpilz- bzw. Bakteriellen-Befall gemacht werden. Auf Basis der daraus resultierenden Erkenntnisse sollen Reinigungsprobleflächen angelegt werden, die den weiteren Umgang mit den Flechten an der Freitreppe regeln sollen.

¹⁰¹ Keine periodischen Lösungs- und Kristallisationsprozesse durch Feuchtigkeit

¹⁰² Warscheid 2011, S.106 / Gehrman- Janszen und Petersen 2014, S.127 / Brinkmann 2010, S.8

¹⁰³ Vgl. Schadensglossar, Anhang, Kap. 7.1, Bild- Nr.: 14

6. Untersuchungen zum Salz- und Feuchtehaushalt

Die Verteilung und die Art der bauschädlichen Salze in einem Bauwerk sind oft wesentlicher Bestandteil bei der Schadensermittlung an einzelnen Bauteilen oder Gebäuden. Als bauschädliche Salze werden im WTA-Merkblatt für Kompressenentsalzung¹⁰⁴ „[...] ionare, meist anorganische Verbindungen in gelöster oder kristalliner Form, die in porösen Baustoffen durch mechanische Belastung im Materialgefüge und / oder chemische Wirkung zu Schäden führen “ bezeichnet. Um eine Salzbelastung an einem Bauwerk zukünftig präventiv vermeiden zu können, ist das Wissen um die Herkunft der Salze unerlässlich.

Die Herkunft kann anthropogene sowie natürliche Faktoren haben und durch nasse sowie als trockene Deposition an das Bauteil gelangen. Dabei gilt heutzutage die trockene Deposition von SO₂ und NO_x als Hauptquelle für die Anhäufung von Schwefel und Stickstoff in Bauwerken¹⁰⁵. Chloride gelangen meist über Streusalze¹⁰⁶ und Carbonate über zementhaltige Bindemittel in das Porengefüge¹⁰⁷. Die zur gemeinsamen Salzbildung nötigen Metallkationen können dann durch die entstandenen Säuren aus anderen Baustoffen gelöst werden¹⁰⁸. Außerdem ist es für eine sinnvolle Maßnahme notwendig, die Wechselwirkung der Umwelteinflüsse, Baustoffe und bauteilinterner Transportmechanismen zu analysieren und zu verstehen. Diese Analyse setzt in den meisten Fällen die Untersuchung eines komplexen Prozesses voraus¹⁰⁹.

Bei Laue (2002)¹¹⁰ wird dieser Prozess als System aus porösem Stein, Salzlösung, kristallisiertes Salz und Klima beschrieben. In diesem System gilt die Anzahl, Größe und Anordnung der Poren als Transportmechanismus einer Salzlösung von A nach B. Überwiegend werden hierfür Kapillarkräfte verantwortlich gemacht. Kommt es an einer Stelle zur Übersättigung der Salzlösung kristallisieren Salzminerale im Porenraum.

¹⁰⁴ Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (Hg.) (2006): Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen, S.4

¹⁰⁵ Vgl. Siedel 2009, S.22

¹⁰⁶ Ebd.

¹⁰⁷ Vgl. Grassegger und Schwarz 2009, S.12 / Siedel 2009, S.26 f.

¹⁰⁸ Vgl. Steiger et al. 2002, S.2 und Kraus 2002, S.11 f.

¹⁰⁹ Vgl. Siedel 2009, S.22

¹¹⁰ Laue 2002, S.19 f.

Dies geschieht meist in Oberflächennahen Zonen, wo das Wasser als Transportmedium verdunstet. Salzlösungen bestehen aus in Wasser gelösten Salzionen, welche sich aus einem Anion und Kation oder auch mehreren, zusammensetzen. Die am häufigsten auftretenden Anionen der bauschädlichen Salze sind bei Laue (2002), laut Arnold und Zehnder (1990), SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , HCO_3^- und CO_3^- . Als Kationen werden Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} und NH_4^+ genannt. Welche Ionen in welchen Konzentrationen vorliegen, hängt „[...] von der Quelle der Salzionen, den Wassertransportmechanismen, den Lösungs- und Aufkonzentrierungsprozessen sowie von den bereits stattgefundenen Kristallisationsprozessen ab“¹¹¹. Meist liegt nicht nur ein Salz vor, sondern Ionengemische, die sich in konzentrierten Salzlösungen durch Wechselwirkungskräfte gegenseitig beeinflussen. Dies führt wiederum zu anderen Kristallisations- und Lösungseigenschaften von Ionengemischen gegenüber reinen Salzsystemen. Welche Salze aus einer Salzlösung kristallisieren, hängt vom Ionenangebot und von den thermodynamischen Bedingungen wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit ab. Die Hygroskopizität und die verschiedenen Hydratstufen einiger Salze sind hierbei entscheidend für ihr Schadpotential¹¹². Dies macht die umgebenden klimatischen Bedingungen zu einem besonders zu berücksichtigenden Faktor bei der Interpretation von Salzanalysen.

Die eben genannten Faktoren machen deutlich, welchen Einfluss der Feuchtehaushalt eines Bauteils auf die Salzlösungsverteilung und die Kristallisationsprozesse hat. Die Quellen der Salzionen, die an den Salzgemischen beteiligt sind, werden dadurch festgelegt, sowie die Orte der Kristallisationen werden davon bestimmt. Darum werden im Folgenden nicht nur Untersuchungen zur Salzanalyse vorgestellt, sondern auch zerstörungsfreie Analysemethoden zur oberflächlichen Feuchtebestimmung.

6.1 Auswahl der Untersuchungsmethoden

Um die Salzproblematik an der Freitreppe der Alten Nationalgalerie zielgerichtet ermitteln zu können, wurden aus den dafür geeigneten Untersuchungsmethoden einige ausgewählt, die an dieser Stelle für besonders sinnvoll bzw. durchführbar gehalten wurden. Als mögliche Analysemethoden für den Salzhaushalt werden auf dem Onlineportal „www.salzwiki.de“ von Hans- Jürgen Schwarz einige genannt. Dazu zählen die Polarisationsmikroskopie, die Mikrochemie, die Röntgendiffraktometrie (XDR), die Atomabsorptionsspektroskopie (AAS), Induktiv gekoppeltes Plasma (ICP),

¹¹¹ Laue 2002, S.20

¹¹² Vgl. Kapitel 5.1

die Ionenchromatographie (IC) und die Photometrie¹¹³. Die, in dieser Arbeit gewählten Untersuchungsmethoden, wurden zum einen nach dem Prinzip der Durchführbarkeit ausgewählt und zum anderen soll ein möglichst genaues Bild der vorkommenden Schadsalze und deren Verteilung erstellt werden. Aus Gründen der Machbarkeit kommen die Atomabsorptionsspektroskopie, das induktiv gekoppelte Plasma und die Photometrie in dieser Arbeit nicht zur Anwendung.

Vielmehr werden mittels der Mikrochemie und Polarisationsmikroskopie im Labor der Fachhochschule Potsdam direkte Schadsalze in Einzelproben der Effloreszenzen ermittelt, um eine Aussage über spezielle Salztypen und ihre Interaktion mit den vorherrschenden Klimabedingungen treffen zu können. Die Röntgendiffraktometrie soll anschließend ausgewählte Einzelproben in ihrem Ergebnis bestätigen. Durch das Wissen um den speziellen Salztyp kann eine Aussage über das Schadpotenzial generell getroffen werden¹¹⁴ und wie gefährdet die Sandsteine zukünftig bei gleicher Salzbelastung durch das umgebende Klima sein werden. Allerdings gilt es zu bedenken, dass die untersuchten Ausblühungen nur klimabedingte Momentaufnahmen der möglichen Salzkristallationen am Bauwerk darstellen¹¹⁵. Weiterhin bedeuten ausgeblühte Salze nicht, dass diese auch im Substrat vorhanden sein müssen¹¹⁶.

Da diese Methoden aber nur qualitativer Natur sind, wird, um eine Auskunft über die quantitative Salzbelastung der Freitreppe zu erlangen, ergänzend eine Untersuchung mit dem Ionenchromatographen durchgeführt. Dadurch soll eine Anionen- und Kationenbilanz erstellt werden, welche zum Teil in einem Höhen- und Tiefenprofil ausgewertet wird. Auf diese Weise lässt sich eine gesicherte Aussage über die Salzmengen an den jeweiligen Probestellen gewinnen¹¹⁷ und es können Aussagen über die qualitative und quantitative Salzionenverteilung getroffen werden¹¹⁸. Auch diese Methode liefert nur eine Momentaufnahme, aber möglicherweise ist aus den Analyseergebnissen ersichtlich, welche Salzsysteme an der jeweiligen Stelle auskristallisieren könnten¹¹⁹.

Um für die Ionenchromatographie geeignete Probenahmestellen zu ermitteln, wird ein Kompressenverfahren angewandt, welches durch die Messung der elektrischen

¹¹³ Vgl. Schwarz et al. 2010

¹¹⁴ Vgl. Steiger 2009b, S.83

¹¹⁵ Vgl. Juling und Franzen 2009, S.54

¹¹⁶ Vgl. Bläuer Böhm 1994, S.88

¹¹⁷ Vgl. Juling und Franzen 2009, S.54

¹¹⁸ Vgl. Laue 2002, S.22

¹¹⁹ Vgl. ebd.

Leitfähigkeit einen Rückschluss auf die Ionenanreicherung in oberflächennahen Bereichen zulässt. Des Weiteren werden die Oberflächenfeuchten mit dem Moist200 Mikrowellenmessgerät erfasst, um sich einen Überblick über die Feuchtigkeitsverteilung verschaffen zu können. Hiermit sollen, neben den bereits sichtbaren Ausblühungen, schadensfrei sinnvolle Bereiche für die Probenahme detektiert werden.

Durch die Recherche in den Archiven des Bundesamtes für Bauwesen und Raumforschung (Museumsinsel), des Landesdenkmalamtes Berlin und dem Zentralarchiv der Staatlichen Museen zu Berlin sollen Auskünfte zu den verbauten Materialien und Baustoffen gefunden werden, um mögliche Salzquellen ausschließen zu können oder zu entdecken. Außerdem sollen die Konstruktion der Freitreppe und die Abdichtungen der Stahlbetondecken ermittelt werden, um den natürlichen Wasserablauf und eine mögliche Herkunftsquelle für bestimmte Salzionen zu ergründen.

Ergänzend wurden die Klimadaten des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur angefordert, um ggf. das Schadpotenzial bestimmter Salze besser einschätzen zu können. Ebenso wird der tatsächliche natürliche Wasserablauf der Freitreppe dokumentiert, um direkte Auffälligkeiten festzuhalten.

6.2 Ehemalige Salzanalysen

Die ehemaligen Salzanalysen der Brüstungsplatten von 1992 ermitteln bereits Unterschiede bei den Schäden der beiden verbauten Sandsteintypen. Allerdings wird der Postaer Sandstein dort als schlesischer Sandstein vermutet. Die Untersuchungsergebnisse sind leider nicht ganz schlüssig nach zu vollziehen. Es wird Gips mit 0,6 M.-% in den Nebraer Platten nordseitig gemessen (dort befinden sich nur zwei Nebraer Platten, C1 und C2, aus welchen aber laut den Unterlagen keine Proben entnommen wurden) und 0,2- 0,3 M.-% südseitig. Diese Angaben scheinen sich allerdings nur auf den gemessenen Sulfatgehalt zu beziehen. Die damals aufgestellten Kationen- und Anionen-Bilanzen decken sich leider nicht¹²⁰, wie sie eigentlich sollten und lassen daher nur eingeschränkt Rückschlüsse auf Salzarten zu. Fest steht, dass die damals gemessenen Proben, der Brüstungsplatten G4 und S3, kaum Salze enthielten und bei allen genommenen Proben prinzipiell nur Sulfat und Nitrat sowie Kalium und Calcium detektiert wurden. Die geringe Salzkonzentration könnte an der

¹²⁰ Vgl. Wallasch 1992a, Anlage 9

etwas ungünstig gewählten Stelle der Probenentnahmen liegen. Diese wurden ausschließlich an den Brüstungsplatten der schrägen Treppenläufe gewählt, an welchen, durch die schräge Wasserableitung, nur geringer Feuchtigkeitsstau zu erwarten ist.

Den archivierten Akten nach, wurde 1996 in einem Besprechungsprotokoll von einem Salzanalysebericht der FEAD GmbH gesprochen. Die Ergebnisse dieses Berichts wurden dem Autor auf Anfrage ausgehändigt¹²¹. In diesem stellt die FEAD GmbH fest, dass das Fugenmaterial für den Kalium- und Natriumeintrag in dem Sandstein zuständig ist. In der Untersuchung wird ein zehnfacher Natrium- wie auch Kaliumwert in dem Fugenmaterial ermittelt, als im Sandstein gemessen werden konnte, und darum dieses Material für den Salzeintrag verantwortlich gemacht. Außerdem ergeben andere Messungen, dass der Sandstein nur an seiner Oberfläche mit Salzen konterminiert ist, was erneut auf keinen Feuchte- und Salzeintrag vom Inneren der Konstruktion schließen lässt. Leider wurde dieser Bericht erst sehr spät vom Autor entdeckt und andere Untersuchungen hätten auf dieser Grundlage sicherlich abgekürzt werden können.

6.3 Konstruktion, Abdichtungen und Wasserablauf

Einige relevante Konstruktionspläne können im Anhang im Kapitel 4.1 nachvollzogen werden. Außerdem wurden die beiden Teile der Dokumentationen und die Maßnahmenkartierungen von 1996 im Zuge dieser Arbeit vollständig digitalisiert, überarbeitet und als PDF-Version auf die, dem Original beiliegende CD gebrannt und können somit dort eingesehen werden. Laut diesen Aufzeichnungen sind die Abdichtungen damals gewissenhaft und effektiv ausgeführt worden. Die Betonflächen wurden abgefegt und mit einem Bitumenvoranstrich nach DIN 18195 versehen. Darauf folgte eine Dampfsperre, eine Wärmedämmung aus Schaumglas, zwei Dichtungsbahnen und eine Lage Bautenschutzmatte¹²². Die Abdichtungen wurden an senkrecht und waagrecht aufgehenden Bauteilen mit einem Bitumenvoranstrich, einer Lage Polymerbitumendachabdichtungsbahn und einer Lage Walzblei nach DIN 56610, nahtüberdeckend und weich verlötet, ausgeführt¹²³. Dadurch stehen weder die originalen Gesimssteine noch die Postamente oder die Brüstungsplatten im Kontakt mit den Stahlbetonbauteilen und sind von allen anderen Bauteilen durch das Walzblech getrennt. Die Brüstungsplatten wurden seitlich miteinander Verankert und durch eine

¹²¹ Vgl. Salzanalyse FEAD 1999, Anhang, Kap. 4.3

¹²² Vgl. Konstruktionspläne, Anhang, Kap. 4.1

¹²³ Vgl. ebd.

Edelstahlgewindestange im Gesimsstein befestigt¹²⁴, der wiederum für sich zweifach nach unten vernadelt ist. Diese Verankerung wurde mit Mörtel vergossen, dessen Material dem Autor unbekannt blieb. Der Bauleiter Paul vermutete einen Remmers-Mörtel.

Der Wasserablauf der Freitreppenanlage regelt sich durch jeweils drei Abläufe auf den ersten Podesten. Das Wasser kann durch eine Neigung der Granitplatten auf der Bodenoberfläche sowohl als auch im Inneren der Konstruktion in diese Abflüsse fließen. Im Inneren sind alle Podeste mit einem 2%igem Gefälle ausgestattet, so dass, sollte Wasser ins Innere gelangen, dieses auf den Dichtungsbahnen in die Abflüsse läuft¹²⁵.

6.4 Auswertung der Klimadaten

Da die Wetterstation am Alexanderplatz keine Luftfechtigkeiten misst, wurden die Klimadaten von der nächstliegenden Wetterstation Berlin Tempelhof eingeholt. In den folgenden Diagrammen wurden die höchsten Tagesminima und -maxima in den Monaten Januar sowie Juli der Jahre 2014/15 dargestellt. Daraus geht hervor, dass die täglichen Luftfechtigkeiten im Winter von 60- 90% rel.L und im Sommer sogar zwischen 40- und 90% rel.L schwanken können.

¹²⁴ Vgl. ebd.

¹²⁵ Vgl. ebd.

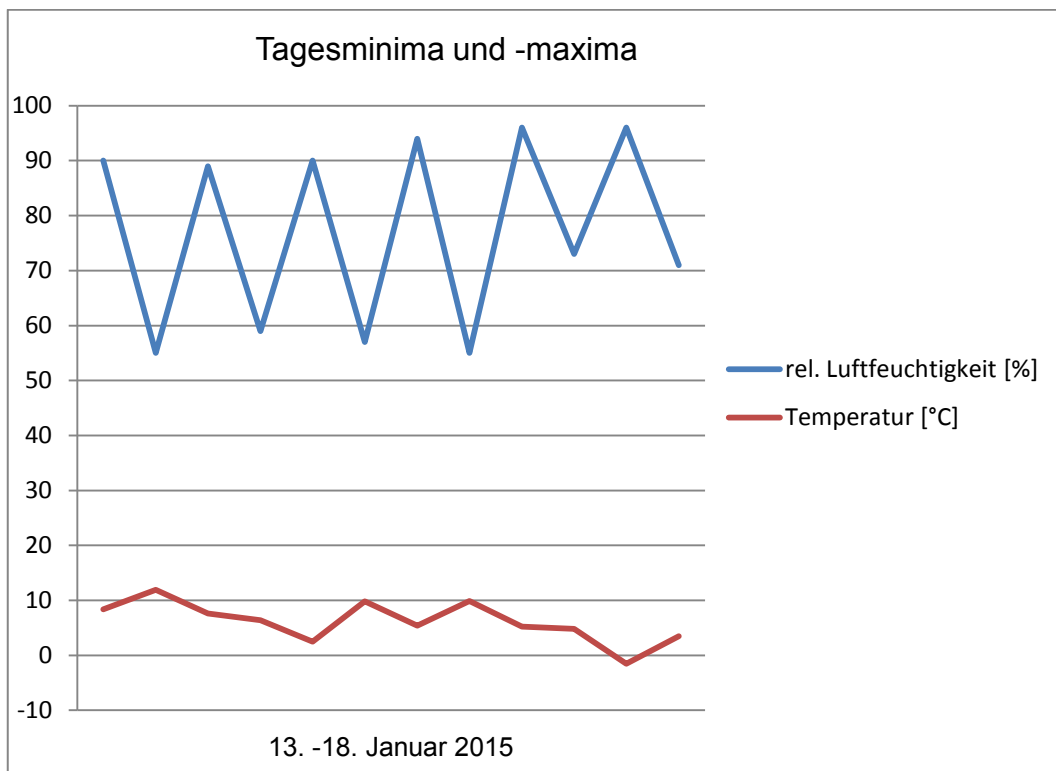


Abb. 16: Klimadaten des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur; Klimastation Berlin-Tempelhof; Januar 2015
Quelle: D. Ohnmeiß

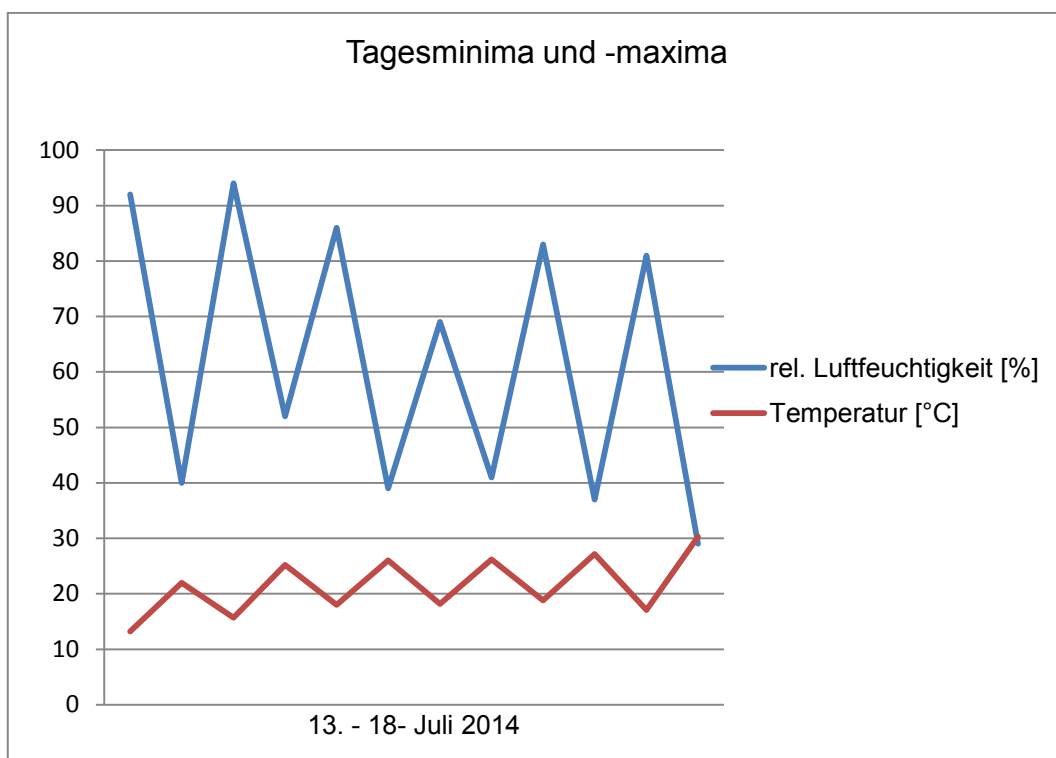


Abb. 17: Klimadaten des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur; Klimastation Berlin-Tempelhof; Juli 2014
Quelle: D. Ohnmeiß

Salze, deren Deliqueszenzfeuchte innerhalb dieser Parameter liegen, gehen demnach nächtlich in Lösung und kristallisieren täglich wieder aus. Bei diesen Thermodynamischen Bedingungen können Kristallisationsdrücke in zyklischen Abständen von unter 24 Stunden entstehen. Es muss erwähnt werden, dass die klimatischen Bedingungen in Berlin Tempelhof von denen der Museumsinsel abweichen können.

6.5 Qualitative Salzanalyse

Die Untersuchung der Salzausblühungen lassen qualitative Aussagen über die vorhandenen Schadsalze zu. Dabei darf nicht außer Acht gelassen werden, dass diese nur Momentaufnahmen der gegenwärtigen Beprobungsbedingungen sind. Auch sagt die Zusammensetzung einer oberflächlichen Ausbluhung nicht zwingend etwas über die Zusammensetzung des Salzgemisches unter der Oberfläche aus. Dort können unter Umständen völlig andere Salze kristallisieren¹²⁶. Dennoch geben sie einen guten Hinweis auf die ursprüngliche Zusammensetzung der Salzmischungen¹²⁷. Bei einem Schaden, wie Absanden, sind außerdem die Salze von Interesse, welche sehr oberflächennah ausbluhen. Wenn Ausblühungen zustande kommen sind diese auch in den ersten Kornlagen zu erwarten, wo der eigentliche Schadensprozess stattfindet. Demnach ist das vorgefundene ausgebluhte Salz, mindestens mitverantwortlich für den vorgefundenen Schaden und eher als eigentliches Schadsalz anzunehmen¹²⁸. Eine Bestimmung dieses Salzes ist außerdem von bedeutendem Vorteil bei der späteren Interpretation der Ionengemische. Desweiteren empfiehlt sich ein Monitoring der Ausblühungen, um festzustellen, ob die Ausblühungen erneut auftreten oder einmalige klimabedingte Vorkommnisse (z. B. Jahreszeitenwechsel) darstellen¹²⁹.

Als Probestellen werden in dieser Arbeit alle auftretenden Ausblühungen im Frühjahr 2015 in Betracht gezogen. Die Proben (ANG/ ES/ 01- 09) wurden an zwei Tagen Ende Februar genommen und die Proben (ANG/ ES/ 10- 14) einen Monat später Ende März. Außerdem wurden noch Proben (ANG/ KG17/ 01- 03) aus einem Kellerraum (KG17) und aus dem Treppendepot West (ANG/ TDW/ 01- 02) der Alten Nationalgalerie genommen. Die Proben wurden alle voran mit der Bezeichnung ANG für Alte Nationalgalerie gekennzeichnet. Anschließend folgt die Bezeichnung ES für Effloreszenzen an der Freitreppe, KG17 für Effloreszenzen aus dem Kellerraum KG17

¹²⁶ Vgl. Juling und Franzen 2009, S.53 f.

¹²⁷ Vgl. Grassegger und Schwarz 2009, S.9

¹²⁸ Vgl. Juling und Franzen 2009, S.54

¹²⁹ Vgl. Auras 2011, S.107

und TDW für Treppendepot West. Die folgende Nummer bezeichnet die jeweilige Probenentnahmestelle. Die Probenentnahmestellen der Effloreszenzen an der Freitreppe können in der gleichnamigen Kartierung im Anhang Kapitel 2.7 nachvollzogen werden.

Das Auftreten der Salze in besagtem Kellerraum ist so massiv, dass es dadurch zum Interesse wird. Die Salzschäden im Depotraum befinden sich direkt unter den ersten Stufen des westlichen Laufs der Freitreppe und sind dadurch ebenso von Interesse für die weitere Untersuchung.

Alle Probenahmestellen wurden anfänglich nach keiner örtlichen Sinnhaftigkeit, sondern durch ihr zeitliches Auftreten bestimmt. Darauf folgende Probenahmen wurden, wenn möglich, so gewählt, dass die gesamte Fläche der Freitreppe abgedeckt wird. Auf diese Weise wurden an insgesamt 18 Stellen Effloreszenzproben entnommen. Für jede Probe wurde ein Probenahmeprotokoll¹³⁰ erstellt und die wichtigsten Daten des Entnahmeverganges festgehalten. Außerdem wurde eine Streusalzprobe vor dem Depoteingang des Treppendepots-Ost als Natriumchlorid identifiziert. Der Fundort wurde dokumentiert¹³¹, die Analyse jedoch nicht protokolliert.

6.5.1 Mikrochemische Salzanalyse

Die mikrochemische Salzanalyse ist der qualitative Nachweis einzelner Salzionen. Hierfür werden chemische Reaktionen zwischen den Ionen der Salze und den Ionen der dazu gegebenen Reagenz unter dem Stereomikroskop oder sogar mit bloßem Auge sichtbar gemacht. Dadurch können die Proben auf ihre Kationen und Anionen untersucht werden. In dieser Arbeit wurden die genommenen puren Effloreszenzen auf die Anionen SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , NO_3^- , Cl^- und die Kationen Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ untersucht. Jede Prüfung auf ein einzelnes Ion einer Probe konnte separat ausgeführt werden.

6.5.2 Durchführung der mikrochemischen Salzanalyse

Für die Durchführung der Ionennachweise konnte das naturwissenschaftliche Labor der Fachhochschule Potsdam genutzt werden. Im Anhang Kapitel 1.1 werden die Präparatvorbereitung, die Erklärung der Methoden und der Versuchsaufbau genau geschildert. Außerdem können die Probenentnahmestellen der Kartierung im Anhang

¹³⁰ Vgl. Probenentnahmeprotokolle, Anhang, Kap. 3.1

¹³¹ Vgl. ebd.

Kapitel 2.7 nachgesehen werden. Alle Versuche sind unter Berücksichtigung allgemeiner Laborvorschriften und mit äußerster Sauberkeit durchgeführt worden, um Kontaminationen des Probenmaterials zu vermeiden. Die Durchführung geschah nach den von Bläuer-Böhm¹³² festgelegten Richtlinien.

6.5.2.1 **Ergebnisse**

Die Details der Ergebnisse können im Anhang Kap. 1.1.5 und in den Untersuchungsprotokollen im Anhang Kap. 3.3.1 nachgesehen werden. Zusammenfassend kann folgendes über die einzelnen Ionennachweise gesagt werden:

Anionen:

Chloridionen konnten in 6 von 18 Proben nachgewiesen werden, wobei sich das Vorkommen auf die Bodennahen Bauteile konzentriert und vor allem in den Keller- und Depoträumen auftaucht. Aber auch eine Probe des ersten und des zweiten Absatzes zeigen Chloridionen.

Nitrat-, Sulfat- und Carbonationen konnten, jeweils in mehr als zwei Dritteln aller Proben nachgewiesen werden und tauchen demnach in allen Höhenlagen auf.

Kationen:

Natriumionen wurden in fast allen Proben nachgewiesen.

Kaliumionen konnten mikrochemisch nur in einer Probe nachgewiesen werden und Ammoniakionen wurden nur in den Kellerräumen gefunden.

Calciumionen wurden in acht Proben nachgewiesen.

Magnesiumionen wurden in 13 der 18 Proben in allen Höhenlagen ermittelt

6.5.2.2 **Diskussion und Interpretation der Untersuchung**

Da Kalium ein weitverbreitetes Ion bei Schadsalzen ist und der mikrochemische Nachweis oft nur schwer zu erkennen ist, wird vermutet, dass sich durchaus Kalium in einigen weiteren Proben befindet. Mit der hier angewendeten Untersuchungsmethode konnte allerdings nur in einer Probe Kalium detektiert werden. Der Magnesiumnachweis war an mancher Stelle nur schwer zu erkennen, was am Alter der hier verwendeten, Magneson I-Lösung liegen kann und könnte demnach öfters für positiv befunden worden sein als er eigentlich ist.

Das Chlorid in den bodennahen Regionen auftaucht ist aufgrund der beobachteten Streusalzverwendung nicht weiter verwunderlich. In den Proben des Kellerraumes und

¹³² Vgl. Bläuer Böhm 1994, S.99

des Treppendepots-West treten fast alle Anionen und Kationen auf, was ebenfalls in der direkten Bodennähe begründet liegen kann. Während Nitrat- und Sulfationen auch über Trocken- und Nass-Depositionen in das Bauwerk eingetragen werden kann, können Carbonationen nur aus verwendeten Baumaterialien ausgeschwämmt werden.

Bei der Kationenverteilung zeigt sich Natrium als das am häufigsten auftretende Salzion, welches seinen Ursprung in der Regel in zementhaltigen Baumaterialien oder angewendeten Restaurierungsmaterialien haben kann. Wenn das hier gefundene Natrium seinen Ursprung in zementhaltigen Baustoffen findet, ist es wahrscheinlich, dass ebenfalls Kalium in größerer Verteilung am Bauwerk auftritt als mit dieser Untersuchung nachgewiesen werden konnte. Das auftretende Magnesium sowie das Calcium müssen ihren Ursprung in verwendeten Baumaterialien wie Fugenmörtel oder ähnlichem haben.

Eine gesameinheitliche Interpretation der Ergebnisse der qualitativen Salzanalyse wird weiter unten im Kapitel 6.5.5 diskutiert.

6.5.3 Polarisationsmikroskopie

Die Polarisationsmikroskopie ist die wichtigste Methode der Durchlichtmikroskopie an Kulturgut¹³³. In der Polarisationsmikroskopie wird polarisiertes Licht durch kristalline Strukturen einer Probe gelenkt, um diese unter dem Mikroskop nach charakteristischen Eigenschaften ihrer Lichtbrechung zu untersuchen. Auf diese Weise können einzelne Kristalle als spezifisches Mineral erkannt werden.

6.5.3.1 Durchführung der Salzanalyse mit dem Polarisationsmikroskop

Für die Durchführung der Effloreszenzuntersuchung mit dem Polarisationsmikroskop wurde das naturwissenschaftliche Labor der Fachhochschule Potsdam genutzt. Ein Fachhochschulkurs zur Polarisationsmikroskopie und eine weiterführende Einführung sowie Unterstützung durch Herrn Laue (Laborleiter) sollten den Autor dazu befähigen, diese Untersuchung durchzuführen.

Die genaue Beschreibung der Methode sowie die Probenentnahmestellen, die Präparatvorbereitung und die detaillierten Untersuchungsergebnisse können im

¹³³ Vgl. Wülfert 1999, S.100

Anhang Kap. 1.2 nachgelesen werden. Der Untersuchungsablauf wird im folgenden beschrieben.

6.5.3.2 Untersuchungsablauf

Für die Effloreszenzpräparate in dieser Arbeit wird ein Öl der Firma Merck mit dem Brechungsindex 1,515 als Einbettmedium verwendet. Von jeder an der Freitreppe entnommenen Probe der Effloreszenzen wird ein Präparat für die Polarisationsmikroskopie erstellt und mit dem Polarisationsmikroskop Olympus BX51 analysiert. Die dokumentierten Fotos wurden mit der Kamera Olympus Camedia C-5050 200M in der Automatik Einstellung als Mikroskopaufsatz fotografiert.

Die Präparate werden der Reihe nach, auf ihre Haupt- und NebenkompONENTEN untersucht und deren Lichtbrechungsindex, Isotropie oder Anisotropie und Interferenzfarben bestimmt. Da es sich hierbei um Streupräparate mit mineralischem Probenmaterial von Gesteinsoberflächen handelt und somit viele verschiedene Komponenten anzutreffen sind, darf nicht jeder Komponente eine hohe Gewichtigkeit gegeben werden. Bei der Untersuchung wird sich auf die jeweiligen Hauptkomponenten der Präparate konzentriert, um bei der Interpretation möglichst korrekte Aussagen treffen zu können.

Zur Bestimmung der Lichtbrechung wird ein Salzkorn in linear polarisiertem Licht scharf gestellt. An den Grenzen zu Einbettungsmedium sollte die Becke-Linie erkennbar sein. Hat das Mineral einen ähnlichen Brechungsindex wie das Öl ist es nur schwer zu erkennen¹³⁴. Durch Heben und Senken des Tubus wird verfolgt, ob sich die Becke-Linie jeweils in das Salzkorn oder das Immersionsöl bewegt und eine Aussage über den Lichtbrechungsindex des Minerals im Vergleich zu dem des Einbettöls getroffen¹³⁵. Einige Kristalle werden aufgrund ihrer Lichtbrechungsunterschiede in verschiedenen Winkeln des Objektisches untersucht.

Um die Doppelbrechung eines Salzkornes zu bestimmen, wird es im linear polarisiertem Licht scharf gestellt und der Analysator zugeschaltet. Erscheint es danach schwarz, wird diese Eigenschaft durch Drehen des Objektisches $< 90^\circ$ nochmals geprüft und ggf. bestätigt. In diesem Fall liegt eine Auslöschung also ein isotropes Salz bzw. Mineral vor. Erscheint es weiterhin sichtbar vor einem dunklen

¹³⁴ Vgl. Laue 2014

¹³⁵ Die Beckelinie bewegt sich beim senken des Objektisches in das Medium mit der höheren Lichtbrechung.

Hintergrund liegt eine Anisotropie vor und die Interferenzfarben werden Anhand der Farbtafel nach Michel-Lévy bestimmt.

An Hand einer Skala¹³⁶, von Bläuer-Böhm, auf welcher die Lichtbrechungsindizes der bekannten Salzkristalle eingetragen sind, kann eine Eingrenzung der in Frage kommenden Salze geschehen. Eine weitere Eingrenzung geschieht durch die Kenntnis um die Doppelbrechung und die Einordnung der Interferenzfarben der einzelnen Salzkristalle die in einem Workflow¹³⁷, ebenfalls von Bläuer-Böhm, eingetragen werden und so die in Frage kommenden Salzarten abgelesen werden können. Die Resultate wurden in einem Untersuchungsprotokoll fest gehalten und mit den Ergebnissen der mikrochemischen Analyse abgeglichen. Dadurch sollen spezifische Salzminerale festgelegt werden.

6.5.3.3 Ergebnisse der Polarisationsmikroskopie

Die Ergebnisse der Polarisationsmikroskopie wurden in einem Untersuchungsprotokoll¹³⁸ dokumentiert und in einer Tabelle¹³⁹ zusammengefasst. Dabei wurde den einzeln untersuchten Kristallen aus jeder Probe ein Buchstabe zur Typisierung zugewiesen. Mit etwas Erfahrung ließen sich die selben Salzkristalle in mehreren Proben ausmachen und bekamen demnach die selbe Buchstabenbezeichnung. Bei der Untersuchung wurde sich auf die Hauptkomponenten konzentriert, um in der Interpretation falsche Rückschlüsse¹⁴⁰ zu verhindern. Demnach wurden in der Regel die zwei am häufigsten auftretenden Kristallarten der Proben bestimmt und als Haupt- oder Nebenkomponente und Typ A oder B etc. für die Kristallart gekennzeichnet. Eine ausführliche Fotodokumentation der einzelnen Kristalltypen befindet sich im Anhang Kapitel 7.2. Hier sollen nur die Wichtigsten Salzkristalltypen zusammenfassend dargestellt werden (vgl. Tabelle 2) und in welchen Proben sie festgestellt wurden (vgl. Tabelle 1). Typ I wurde bereits vorab durch Röntgendiffraktometrie in Probe ANG/ES/03 als Thermonatrit bestimmt. Dadurch konnte Thermonatrit bei der Polarisationsmikroskopie in mehreren Proben als Typ I wiedererkannt und festgelegt werden, was ansonsten aufgrund der zu kleinen Größe der Kristalle nicht möglich gewesen wäre.

¹³⁶ Vgl. Anhang Kap. 1.2

¹³⁷ Vgl. ebd.

¹³⁸ Vgl. Untersuchungsprotokolle, Anhang, Kap. 3.3

¹³⁹ Vgl. Tabelle 2, Anhang, Kap. 1.2.3

¹⁴⁰ Nicht alle Kristalle in der Probe sind Salzkristalle

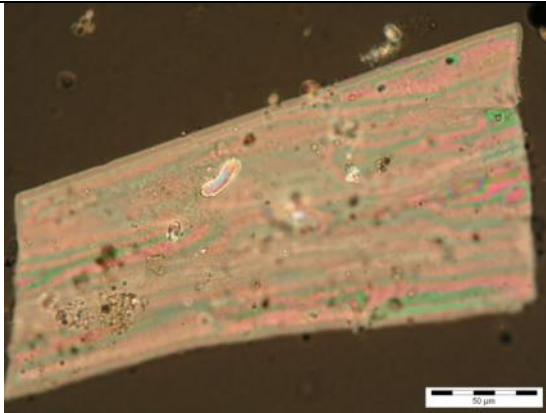
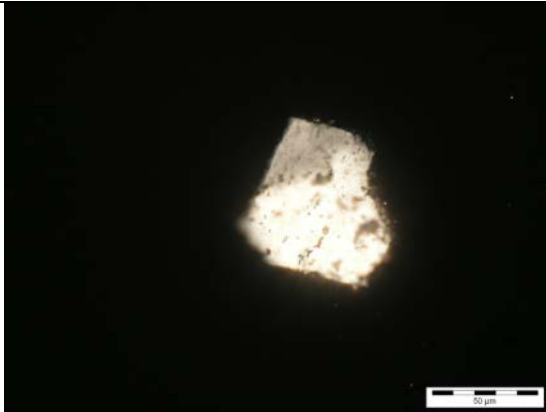
Tabelle 1: Kristalltypen und deren Fundort

Quelle: D. Ohnmeiß

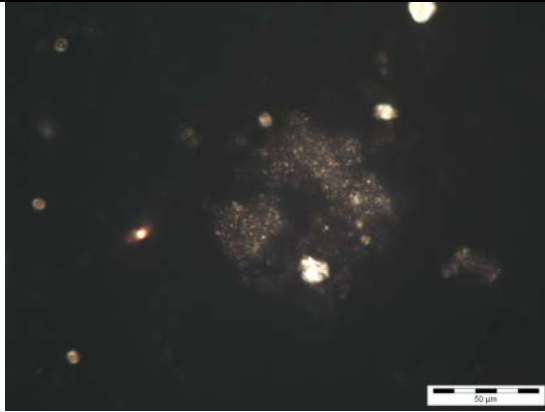
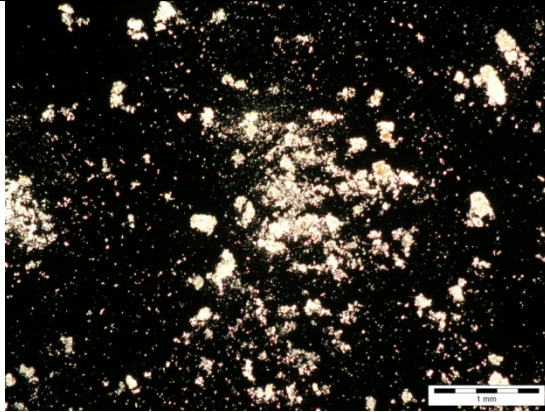
Kristalltyp	Typ A	Typ F	Typ H	Typ I
P r o b e ANG/...	KG17/02	ES/05	ES/07.1	TDW/01
	ES/07.1	ES/08	ES/07.2	ES/03
	ES/07.2	ES/09	ES/08	ES/10
	ES/09	ES/13	ES/09	ES/11
	ES/10	ES/14.1	ES/14.1	ES/12
	ES/12	ES/14.2	ES/14.2	ES/13

Tabelle 2: Kristalltypen und deren mögliche Salzzart¹⁴¹

Quelle: D. Ohnmeiß

Kristalltyp	Abbildung	Mögliche Salzzart
Typ A		Drapaskit [Na ₃ (NO ₃)(SO ₄) · H ₂ O], Nitrokalit [KNO ₃], Nitromagnesit [Mg(NO ₃) ₂ · 6 H ₂ O]
Typ F		Bassanit [CaSO ₄ · 0,5H ₂ O], Görgeyit [K ₂ Ca ₅ (SO ₄) ₆ · H ₂ O], (Syngenit [K ₂ Ca(SO ₄) ₂ · H ₂ O])

¹⁴¹ Vgl. Fotodokumentation Polarisationsmikroskopie, Anhang, Kap. 7.2

Kristalltyp	Abbildung	Mögliche Salzart
Typ H		k. A.
Typ I		Thermonatrit [$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$]

Jeder hier dargestellte Kristalltyp kommt also mindestens in 6 der 16 genommenen Proben vor und stellt somit ein stark verbreitetes Salz in den genommenen Proben der Freitreppe der Alten Nationalgalerie in Berlin dar.

6.5.3.4 Diskussion und Interpretation der Untersuchung

Nach anfänglichen Schwierigkeiten bei der korrekten Auswertung des Gesehenen, konnten einige wenige Minerale festgestellt werden und einige in mögliche Gruppen eingegrenzt werden.

Das Mineral Bassanit sowie Gorgeyit wurde nach dem, bei Bläuer-Böhm (1994), genannten Kriterien zwar bestimmt, aber es ist eher unwahrscheinlich, dass eines dieser Minerale als Effloreszenz ausblüht. Bassanit ist nur sehr schwer in Wasser löslich und beide Minerale wurden bei einer Zusammenfassung von 240 Salzproben über 12 Jahre an verschiedensten Bauwerken nicht ein einziges Mal detektiert¹⁴². Es ist eher davon auszugehen, dass es sich stattdessen um Syngenit handeln könnte.

¹⁴² Vgl. Grassegger und Schwarz 2009, S.13, Tabelle 6

Dieses Salz wurde als Ergebnis mit aufgeführt obwohl es nach Bläuer-Böhm (1994) bei diesen Testergebnissen eigentlich nicht in Frage kommt. Dies liegt an dem Brechungsindex des Immersionsöls. Bei dem von Bläuer-Böhm verwendeten Immersionsöl mit Brechungsindex $n = 1,518$ befindet sich Syngenit mit seinem Brechungsindex ($n_x = 1,501$, $n_y = 1,517$, $n_z = 1,518$) immer links des Immersionsöls und kann somit relativ eindeutig bestimmt werden. Das hier verwendete Immersionsöl der Firma Merck hat einen Brechungsindex von $n = 1,515 - 1,517$. Dieser minimale Unterschied führt dazu, dass der Brechungsindex von Syngenit genau auf dem des Immersionsöls liegt. Da Syngenit zusätzlich nur eine sehr geringe räumliche Streuung seiner Indizes besitzt, ist es an dieser Stelle äußerst schwer, die Beckelinie korrekt zu bestimmen. Aus diesem Grund kann für diesen Grenzfall der Workflow von Bläuer-Böhm nicht verwendet werden und für Typ F wird Syngenit als ebenso mögliches Mineral vermutet.

Des Weiteren stützen sich die endgültigen Eingrenzungen auf die Ergebnisse der chemischen Untersuchung. Wenn also in einer Probe bestimmte Ionen chemisch nicht ermittelt wurden, können sie bei der Interpretation der Polarisationsmikroskopie auch nicht berücksichtigt werden und es kann zu Fehleinschätzungen kommen. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Ergebnissen der mikrochemischen Analyse wurde in der Tabelle 3 im Anhang Kapitel 1.2.4 dokumentiert. Um die entstandenen Ergebnisse besser einordnen zu können, gilt es abzuwarten, welche Ergebnisse weiterführende Untersuchungen wie die Röntgendiffraktometrie zeigen.

Um die festgestellten häufigsten Salztypen genau zu bestimmen, werden auf Basis dieser Ergebnisse Salzproben ausgewählt, dessen Hauptkomponente mittels Röntgendiffraktometrie (XDR) ermittelt werden sollen. Wichtig erscheinen hierbei die Ermittlung der Salztypen, welche durch die Polarisationsmikroskopie als häufigste Hauptkomponenten bestimmt wurden. Dies sind Typ A, Typ F, Typ H und Typ I. Typ I, Thermonatrit wurde bereits vorab in der Probe ES/03 durch Röntgendiffraktometrie bestimmt und konnte dadurch visuell in mehreren Proben festgelegt werden. Für die XDR-Analysen werden die Proben ES/07.2, um möglichst Typ A zu definieren, ES/14.1, um Typ H oder Typ F zu bestimmen und ES/05 vorgeschlagen, da bei dieser Probe Salze mit einem besonderem Schadenspotential in Frage kommen.

An dieser Stelle ist viel Raum für Vermutungen zu vorkommenden Salzphasen geschaffen worden. Einige Rückschlüsse werden weiter unten in der Diskussion der Ergebnisse der qualitativen Salzanalyse in Kapitel 6.5.5 besprochen.

6.5.4 Röntgendiffraktometrie (XRD)

Durch die vorangehenden Untersuchungen konnten zwar ein paar wenige Salzarten bestimmt werden, jedoch sind auch einige, vielleicht wichtige nicht bestimmt worden, weil diese zu klein waren, um die Interferenzfarben oder die Beckelinie erkennen zu können oder weil nach der Eingrenzung zu viele Salzarten in Frage kamen. Mit der nötigen Erfahrung¹⁴³ kann aus der Untersuchung mit dem Polarisationsmikroskop noch wesentlich mehr Information gewonnen werden. Aus diesem Grund wurden auf Basis der vorangegangenen Untersuchungen Proben für eine weitere Untersuchung mit dem Röntgendiffraktometer bestimmt.

Bei der Röntgendiffraktometrie wird die gesetzmäßige Beugung der Röntgenstrahlen an einem Kristallgitter für die Strukturaufklärung und Identifikation kristalliner Materie benutzt. Dies geschieht, indem fokussiertes, monochromatisches Röntgenlicht in einem bestimmten Winkel θ auf eine feinkörnige Probe eingestrahlt wird¹⁴⁴. Beim Auftreten der Strahlen findet Röntgenbeugung nach der Bragg'schen Gleichung statt,

$$n \lambda = 2 d \times \sin\theta$$

wenn eine Kristallgitterebene mit dem Gittersabstand d eines Minerals bei der Wellenlänge λ oder einem ganzzahligen Vielfachen von λ in Winkel θ zum Strahl liegt¹⁴⁵. Das bedeutet, die Reflexion des Röntgenlichts an den verschiedenen Netzebenenscharen der Kristallgitter erfolgt unter einem bestimmten Glanzwinkel, welcher gemessen werden kann. Im Verlauf der Messung werden nun die Probe und der Detektor auf dem Goniometerkreis in der Ebene Röntgenröhre-Probe-Detektor so gedreht, dass sich der Winkel zwischen Röhre und Probe um $\delta\theta$ und der Winkel zwischen Röhre und Detektor um $2\delta\theta$ ändert.¹⁴⁶ Durch die für jede Mineralphase charakteristischen Muster der Beugungsreflexe lassen sich die verschiedenen Mineralphasen der Hauptkomponenten einer Probe identifizieren.¹⁴⁷ Die Analyse läuft mit Ausnahme des Probenwechsels praktisch vollautomatisch.¹⁴⁸

Die zu untersuchenden Salze wurden unter einem Binokular aus den Proben separiert, um möglichst wenig Fremdmaterialien zu analysieren und Herrn Laue vom Naturwissenschaftlichen Labor der FH-Potsdam für die weitere Untersuchung

¹⁴³ Das Wissen um das mögliche Aussehen der Salzkristalle ist hierfür ein immenser Pluspunkt

¹⁴⁴ Vgl. Schweinehage 2000, S.344

¹⁴⁵ Diener 2002, S.204

¹⁴⁶ Ebd.

¹⁴⁷ Schweinehage 2000, S.344

¹⁴⁸ Diener 2002, S.204

ausgehändigt. Die Salze wurden anschließend auf einem Si-Probenhalter appliziert und mit Hilfe des Röntgendiffraktometers Empyrean der Firma PANalytical mit CuK α -Strahlung gemessen. Geringe Anteile in einer Probe (ca. $\leq 5\%$) können mit dieser Methode nicht erfasst werden.¹⁴⁹

Vorab untersucht wurde Probe ES/03 in welcher Typ I Thermonatrit als Hauptkomponente festgestellt wurde. ES/03 wurde im Sockelbereich der Freitreppe entnommen. Als weitere Proben eigneten sich, wie oben bereits festgelegt, zum einen Proben, die auf anderen Höhenebenen der Freitreppe genommen wurden und zum anderen die Typen A und H enthalten. Hierfür boten sich die Probe ES/07.2 von einer Brüstungsplatte des zweiten Absatzes mit Salzkristallen des Typs A und H und die Probe ES/14.1 von einer Brüstungsplatte des ersten Absatzes mit Salzkristallen des Typs H und F an. Außerdem soll noch die Probe ES/05 untersucht werden, da in ihr möglicherweise Salzkristalle (Epsomit, Hexahydrat) mit besonderer bauschädlicher Wirkung vorhanden sind.

6.5.4.1 Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie

Die Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie wurden in dem Analyseprotokoll des naturwissenschaftlichen Labors für jede Probe in leichtlösliche Salze und schwerlösliche Minerale unterteilt. Auf die gleiche Weise werden diese auch in der Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3: Ergebnisse Röntgendiffraktometrie

Quelle: D. Ohnmeiß

Probe	lösliche Salze	schwerlösliche Minerale
ANG/ES/03	Thermonatrit [Na ₂ CO ₃ · H ₂ O] und etwas Sylvin [KCl]	Quarz [SiO ₂]
ANG/ES/05	Sylvin [KCl]	Calcit [CaCO ₃], Quarz [SiO ₂], Dolomit [CaMg(CO ₃) ₂]
ANG/ES/07.2	Thenardit [Na ₂ SO ₄], Nitrokalit [KNO ₃]	Quarz [SiO ₂]
ANG/ES/14.1	Thenardit [Na ₂ SO ₄], Syngenit [K ₂ Ca(SO ₄) ₂ · H ₂ O]	Quarz [SiO ₂]

¹⁴⁹ Vgl. Analyseprotokoll XRD, Anhang Kap. 1.3

6.5.4.2 Diskussion der Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie

In allen Proben wurde Kalium detektiert, welches in der mikrochemischen Analyse nicht bestimmt wurde. Des Weiteren konnte, in geringen Mengen, Sylvin in zwei der vier Proben festgestellt werden. Während ANG/ES/03 bodennah entnommen wurde und damit Chlorid über Streusalzeintrag vorstellbar ist, wurde ANG/ES/05 auf dem zweiten Absatz entnommen der seit zwanzig Jahren in einem abgeschlossenen Bereich liegt. Weiterhin wurde Thenardit und Nitrokalit bestimmt, welche nach Gips die beiden am häufigsten anzutreffenden bauschädigenden Salze sind. Auffällig ist das Auftreten von schwerlöslichem Calcit und Dolomit in Probe ANG/ES/05, welche fugennah als Salzkruste entnommen wurde.

6.5.5 Diskussion der Ergebnisse der qualitativen Salzanalyse

Die Diskussion der Ergebnisse aller durchgeführten Untersuchungen zur qualitativen Salzanalyse wird Anhand der Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie entfacht. Es stellt sich heraus, dass die Polarisationsmikroskopie einigen Fehlinterpretationen unterlag. Bei der chemischen Analyse konnte des Öfteren kein Kalium nachgewiesen werden, obwohl es in der Probe enthalten war. Quarz wird aufgrund des quarzitären Untergrunds bei der XRD-Untersuchung in jeder Probe detektiert und nicht weiter diskutiert. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Polarisationsmikroskopie und der chemischen Analyse, anhand der, durch die Röntgendiffraktometrie untersuchten Proben, verglichen und nähere Zusammenhänge diskutiert.

Probe **ANG/ES/03** wurde als feine Salzwhisker am östlichen ersten Treppenlauf entnommen¹⁵⁰. Die Entnahmestelle war auf Höhe der ersten Stufe Richtung Gartenseite am Profil aus Nebraer Sandstein oberhalb des Granitsockels. Aufgrund der Bodennähe und der im Winter durchgeführten Streumaßnahmen war an dieser Stelle mindestens Halit zu erwarten. Festgestellt wurden Sylvin [KCl] und Thermonatrit [Na₂CO₃]. Sylvin kann beim Vorhandensein von Kalium und Chlorid kristallisieren. Als Quelle der Herkunft für Chlorid würde hier Streusalz, Halit [NaCl] in Betracht kommen. Bei gleichen Konzentrationen von Natrium und Kalium beispielsweise würde, aufgrund seiner geringeren Löslichkeit, immer Sylvin vor Halit kristallisieren. Als Kaliumquelle kommen alkalische Baustoffe in Betracht. Damit Thermonatrit auftreten kann, benötigt es eine Natriumquelle und eine carbonatische Quelle. Als Natriumquelle kommen ebenfalls alkalische Baustoffe in Frage und als Carbonatquelle carbonathaltige Baustoffe. Dadurch, dass diese Probe vor der mikroskopischen Untersuchung mit dem

¹⁵⁰ Vgl. Protokoll Nr.: 10, Probenentnahmeprotokolle, Anhang, Kap. 3.1

XRD untersucht wurde, konnte Thermonatrit bei der Polarisationsmikroskopie eindeutig als Typ I festgelegt werden. Bei der chemischen Untersuchung wurden weder Kalium noch Chlorid festgestellt. Die restlichen Ionen stimmen mit der Untersuchung überein.

Probe **ANG/ES/05** wurde als harte Salzkruste am oberen nördlichen Postament (RP) des zweiten östlichen Treppenlaufs entnommen¹⁵¹. Das Postament steht somit an der östlichen Ecke des zweiten Absatzes. Die Entnahmestelle befand sich am unteren Profil der Postamentabdeckung aus Nebraer Sandstein. Die Stelle ist über einen Höhenmeter vom Boden der Treppe entfernt und dadurch völlig anders exponiert als die anderen Stellen mit Bodenbezug. Direkt unter der Entnahmestelle trennt eine Fuge das Postament von seiner Abdeckung. Effloreszenzen als Kruste wurde nur bei Probe ANG/ES/01 entdeckt, welche an selber Stelle eines anderen Postamentes einen Absatz tiefer entnommen wurde¹⁵². Es gab keine Vermutungen zu speziellen Salzarten. Als Salze und Minerale wurden bei der Röntgendiffraktometrie Sylvin [KCl], Calcit [CaCO₃] und Dolomit [CaMg(CO₃)₂] festgestellt. Dass Sylvin, welches eigentlich nur mit Streusalz als mögliche Quelle in Verbindung gebracht werden kann, so weit oben an der Freitreppe in einer Postamentabdeckung, (im Personen unzugänglichen Bereich und somit einer möglichen Salzstreuungsmaßnahme nicht zugänglich) auch noch entgegen dem konstruktionsbedingten Wasserfluss auftaucht, ist ungewöhnlich. Möglicher Weise sind dies Überreste aus Streumaßnahmen bevor dieser Teil der Treppe abgeschlossen wurde¹⁵³. Calcit und Dolomit als schwerlösliche Minerale sind ebenfalls ungewöhnliche Effloreszenzen, können aber an dieser Stelle möglicherweise durch die Nähe zur Fuge, als im Baustoff vorkommende Minerale, erklärt werden. Die Ionenchromatographie des Fugenmörtels wird vielleicht Aufschluss darüber geben. Die Salze (Epsomit, Hexahydrit) welche bei der Polarisationsmikroskopie detektiert wurden, konnten nicht festgestellt werden. Erneut konnten Kalium und Chlorid nicht bei der chemischen Untersuchung festgestellt werden. Die restlichen Ionen stimmen mit der Untersuchung überein.

Die Probe **ANG/ES/7.2** wurde als feine, flächige Salzausblühung bis 1mm Länge an der ersten Brüstungsplatte (T2) des zweiten Absatzes westlich vom Reiterstandbild entnommen¹⁵⁴. Die Entnahmestelle befand sich an der Vorderseite unterhalb des

¹⁵¹ Vgl. Protokoll Nr.: 14, Probenentnahmeprotokolle, Anhang, Kap. 3.1

¹⁵² Vgl. Protokoll Nr.: 09, Probenentnahmeprotokolle, Anhang, Kap. 3.1

¹⁵³ Die Gitter wurden 1996 im Zuge der Sanierungsarbeiten eingezogen.

¹⁵⁴ Vgl. Protokoll Nr.: 25, Probenentnahmeprotokolle, Anhang, Kap. 3.1

rechten Blütenornaments aus Postaer Sandstein. Die Stelle ist die erste dünne Stelle der Brüstungsplatten oberhalb des Podestbodens. Somit die erste gute Gelegenheit für mögliche aufsteigende Feuchte zu verdunsten. Alle Ausblühungen an den Brüstungsplatten der Freitreppe finden in diesem Höhenbereich der Platten statt¹⁵⁵. Durch die Nähe zum Podestboden und den Stahlbetondecken wurden an dieser Stelle Salze mit zementhaltigem Ursprung erwartet und außerdem die Aufklärung des Typs A und H der Polarisationsmikroskopie. In dieser Probe wurden Thenardit [Na_2SO_4] und Nitrokalit [KNO_3] festgestellt. Das Salz Thenardit tritt häufig bei Salzschäden durch zementhaltige Baustoffe auf und besitzt durch seine mögliche Umwandlung zu Mirabilit ein besonderes Schadenspotential¹⁵⁶. Nitrokalit ist eines der wichtigsten für Bauschäden verantwortlichen Schadsalze¹⁵⁷. Quellen für Kalium können Kaliwasserglas, Kalilauge oder Zemente sein. Nitrate können aus biogenen Quellen stammen oder von dem Eintrag aus mit NO_x – belasteter Luft durch Immission. Aufgrund der Ergebnisse der XRD-Untersuchung dieser Probe werden weiterhin die Zemente der Stahlbetondecken für eine mögliche Salzquelle in Betracht gezogen. Als Typ A wird Nitrokalit vermutet, da mittels der Polarisationsmikroskopie dieses als ein mögliches Salz festgestellt wurde und der chemische Nachweis von Kalium bei den anderen Proben mit großer Wahrscheinlichkeit fehlgeschlagen sein könnte. Als Typ H kommt Thenardit aufgrund der nicht sichtbaren Doppelbrechung kaum in Frage. Allerdings sind die Kristalle von Typ F der Artig klein, dass ihre Doppelbrechung aufgrund Häufchenbildung nicht erkannt werden könnte. Dies muss nochmals mit einem Sachkundigen in der Polarisationsmikroskopie diskutiert werden. Alle bei der XRD festgestellten Ionen konnten auch bei der chemischen Analyse dieser Probe festgestellt werden.

Probe **ANG/ES/14.1** wurde als feine, flächige Salzausblühung auf dem ersten Absatz an der ersten Brüstungsplatte (K1) nach dem ersten östlichen Treppenlauf entnommen¹⁵⁸. Die Entnahmestelle befand sich an der Vorderseite links unterhalb des rechten Blütenornaments aus Postaer Sandstein. Die Besonderheiten dieser Stelle gleichen denen der Probe ANG/ES/7.2. Auch die Vermuteten Salzquellen sind die gleichen. Aus der Polarisationsmikroskopie sollte mit dieser Probe Typ H und Typ F näher klassifiziert werden. Als Salzarten wurden erneut Thenardit [Na_2SO_4] und

¹⁵⁵ Vgl. Schadensglossar, Anhang, Kap. 7.1

¹⁵⁶ Vgl. Schwarz et al. 2010

¹⁵⁷ Ebd.

¹⁵⁸ Vgl. Protokoll Nr.: 30, Probenentnahmeprotokolle, Anhang, Kap. 3.1

zusätzlich Syngenit $[K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O]$ festgestellt. Syngenit benötigt für seine Ausbildung die Ionen Kalium Calcium und Sulfat, die möglichen Quellen dieser Ionen wurden schon mehrfach weiter oben genannt. Es wird aus oben genannten Gründen vermutet, dass es sich bei diesem Salz um den bei der Polarisationsmikroskopie festgestellten Typ F handeln könnte. Außerdem wurde in allen Proben in welchen Typ F mikroskopisch bestimmt wurde, mikrochemisch auch Calcium und Sulfat bestimmt und Kalium muss durch die Ergebnisse der XRD angenommen werden, wodurch diese Möglichkeit noch verstärkt wird. Thenardit wurde bereits oben erwähnt und könnte weiterhin als Typ H in Frage kommen. In dieser Probe wurden alle mit dem XRD festgestellten Ionen außer Kalium auch bei der chemischen Analyse festgestellt.

6.5.6 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse zur qualitativen Salzanalyse

Die eindeutige Klassifizierung der Kristalltypen aus der Polarisationsmikroskopie konnte im Nachhinein leider nicht erfolgen. Wahrscheinlich ist jedoch, dass Typ A als Nitrokalit, Typ F als Syngenit und möglicherweise Typ H als Thenardit vermutet werden kann. Festgelegt werden konnte nur Typ I als Thermonatrit und dieses konnte zum Untersuchungszeitpunkt damit als stark verbreitetes Salz identifiziert werden.

Durch die XRD-Untersuchung konnten jedoch die oben genannten Salzarten zumindest eindeutig in den untersuchten Proben bestimmt werden. Außerdem konnte die Verteilung der Anionen Sulfat, Nitrat und Carbonat und Natrium und Kalium als Kationen über die gesamte Freitreppe anhand der chemischen Untersuchungen festgestellt werden. Auch konnte durch die Polarisationsmikroskopie festgestellt werden, dass einzelne Mineralphasen wiederholt in den verschiedenen Proben auftauchen und sich somit auch einzelne Salztypen über die gesamte Freitreppe verteilen. Als vorkommende Salzarten sind Nitrokalit, Thermonatrit, Syngenit und Thenardit zu nennen. Von diesen vier Salzarten besitzt Thenardit aufgrund seiner Hydratstufenbildung zu Mirabilit mit einer Volumenexpansion von rund 320% bei einer Übergangstemperatur von 32- 35°C¹⁵⁹ das wohl schädlichste Verhalten. Die tatsächliche Schadhafteigkeit dieser Salze an der Freitreppe der Alten Nationalgalerie in Berlin muss anhand der Porenradienverteilung der jeweiligen Sandsteine, der Klimadaten und der quantitativen Salzanalyse ermittelt werden. Da in allen untersuchten Proben Alkalisalze festgestellt worden sind, verdichtet sich der Verdacht auf alkalische Baumaterialien als mögliche Schadsalzquelle. Um die Quellen der

¹⁵⁹ Schwarz et al. 2010

Ionenherkunft genauer bestimmen zu können, müssen der ermittelte Feuchtehaushalt der Freitreppe und die Konstruktionspläne bezüglich ihrer Abdichtungen und Wasserabläufe in die Interpretation mit einbezogen werden.

6.6 Quantitative Salzanalyse

Die quantitative Salzanalyse bestimmt die genauen Ionenkonzentrationen an der beprobten Stelle. Hierdurch kann abgeleitet werden ob die jeweiligen Konzentrationen durchschnittliche Mengen überschreiten und eine schadhafte Wirkung auf die Substanz haben könnten. Außerdem kann unter Umständen dadurch die Relevanz einer Salzreduzierungsmaßnahme festgelegt werden. Um die gemessene Menge an Ionen einer bestimmten Menge an Bausubstanz zuteilen zu können müssen Feststoffproben entnommen werden. In dieser Arbeit wird die quantitative Salzanalyse mittels Ionenchromatographen ermittelt, wofür eine Bohrmehlprobe von mindestens 1g notwendig ist. Da jede Probenentnahme einen invasiven Eingriff in die Originalsubstanz bedeutet, müssen die Probeentnahmestellen gut überlegt und in ihrer Anzahl auf ein notwendiges Minimum beschränkt sein. Um an einem Bauwerk wie der Freitreppe der Alten Nationalgalerie in Berlin geeignete Stellen für solche Probenentnahmen zu finden, müssen vorab einige Überlegungen getroffen werden. Um das Ausmaß der Salzreduzierungsmaßnahme abschätzen zu können, stellt sich die Frage, ob die Ionenkonzentrationen überall am Bauwerk ähnlich sind, bzw. wo am Bauwerk sind die höchsten und wo die niedrigsten Ionenkonzentrationen zu erwarten? Um diese Fragen zu beantworten und um die Herkunft der Salzquelle besser verstehen zu können, muss unter Anderem noch folgende Fragestellung beantwortet werden: Wo am Gebäude staut sich das Wasser nach Wassereintritt und welchen Weg nimmt es? Vor allem gilt es zu klären, welche Stellen bereits besonders geschädigt sind und ob bauschädliche Salze überhaupt etwas damit zu tun haben. Um diese Fragen zu beantworten, müssen die einzelnen Untersuchungen zuerst separat bearbeitet und dann gegenübergestellt werden. Hierfür eignet es sich Übersichtskartierungen der jeweiligen Analysen durch vorangehende zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden anzufertigen. Das bedeutet in diesem Fall Kartierungen für die Verteilung der Ionenkonzentrationen, den Feuchtehaushalt und den Schaden. Eine Verteilung der Ionenkonzentrationen wird in dieser Arbeit mit einem Minikompressenverfahren ermittelt, bei welchem die oberflächennahen Ionenkonzentrationen über die Leitfähigkeitsmessung in vergleichbaren Werten festgestellt werden. Der Feuchtehaushalt wird, ebenfalls oberflächennah, mit dem Moist 200 Gerät durch

Mikrowellenstrahlung gemessen und für die Schadenskartierung wurden die einzelnen Brüstungsplatten rein visuell in Schadkategorien eingeteilt und dokumentiert wie bereits weiter oben in Kapitel 4 vorgestellt¹⁶⁰.

6.6.1 Oberflächennahe Ionenverteilung

Um die Ionenkonzentrationen zerstörungsfrei oberflächennah ermitteln zu können, eignen sich Kompressenverfahren mit anschließenden Messungen in verschiedenen Modifikationen. So können die erstellten Eluate auf ihre Leitfähigkeit gemessen werden, aber auch mit Teststreifen halb quantitativ bestimmt werden. Auch können die Eluate direkt mit dem Ionenchromatographen untersucht werden. Für die Freitreppe sollte, aufgrund der Größe der zu erfassenden Fläche, ein möglichst unkompliziertes praktikables Verfahren angewandt werden. Dr. Horst Schuh als Zweitprüfer dieser Arbeit schlug ein, von ihm bereits des Öfteren angewendetes, Minikompressenverfahren vor¹⁶¹.

6.6.1.1 Minikompressenverfahren

Bei dem hier angewendeten Minikompressenverfahren handelt es sich um eine etwas abgewandelte Version des von Dr. Schuh angewandten Verfahrens. Das von Dr. Schuh angewendete Verfahren sieht vor, eine definierte Menge Kompressenmaterial in einem Deckel, eines dazu passenden Behältnisses (50 ml), an der Gesteinsoberfläche mittels Hilfsmittel, wie Klebeband oder Kittmasse, zu befestigen und nach 30 Minuten wieder abzunehmen. Der vollflächige Kontakt zwischen Kompressenmaterial und Substrat muss dabei gewährleistet sein. Das Behältnis wird anschließend mit 40 ml destilliertem Wasser gefüllt, der Deckel auf den Behälter gebracht, geschüttelt und die Leitfähigkeit des Eluats gemessen. Bei dieser Untersuchung gelangen die oberflächennahen (ca. 1 cm) Ionen überwiegend durch Diffusion¹⁶² und Konvektion¹⁶³ über die eingebrachte Feuchtigkeit in das Kompressenmaterial.

Nachdem in eigenen Voruntersuchungen an der Freitreppe festgestellt wurde, dass sich die Leitfähigkeiten der erstellten Eluate nur sehr geringfügig unterschieden, sollte die Untersuchungsmethode bezüglich Reaktionszeit, Oberflächenanhaftung und Reaktionsprinzip angepasst werden. Dadurch wurde eine stärkere Kapillarströmung und damit höhere Leitfähigkeitswerte der einzelnen Eluate und eine größere Streuung

¹⁶⁰ Vgl. Zustandskartierung der Schadenskategorien, Anhang, Kapitel 2.3

¹⁶¹ Vgl. Schuh 1996, S. 154

¹⁶² Konzentrationsausgleich

¹⁶³ Strömung durch u. A. thermische Ungleichgewichte

der Ergebnisse erwartet.

Der Ablauf sah nun vor, die definierte Menge Kompressenmaterial nicht mit Deckel an der Oberfläche des Gesteins zu platzieren, sondern das Kompressenpellet¹⁶⁴ aus dem Deckel heraus zu nehmen und mit kontrolliertem Schwung an das Substrat zu heften. Dadurch konnten einige Faktoren, auf Kosten der definierten Oberflächengröße, optimiert werden. Die Haftung der gesamten Fläche des Kompressenmaterials wurde gewährleistet, aber ihre Fläche dadurch auch undefiniert vergrößert. Der Untersuchungsablauf wurde wesentlich beschleunigt durch das fehlende Hantieren mit den Hilfsmitteln zur Haftungsherstellung des Deckels. Das Prinzip der Diffusionsreaktion und des Konvektionstroms wurde durch eine zumindest etwas stärkere Advektionsströmung¹⁶⁵ erweitert. Alle drei Reaktionen sollten durch eine längere Reaktionszeit von einer Stunde verstärkt werden.

6.6.1.2 **Materialien und Untersuchungsablauf**

Als Kompressenmaterial wurde Arbocel BC 200 mit destilliertem Wasser der Firma Kerndl (5,7µS) 1 zu 1 [Vol%] vermischt und in einem Gefrierbeutel unter Verschluss aufbewahrt, um Verdunstungen während der Maßnahme zu verhindern. Als spätere Eluatbehälter wurden Schraubdosen 38 x 65 mm mit 60 ml Volumen und weißem Deckel (ca. 15ml, 40 mm Ø) aus Plastik (PP) verwendet. Für die Leitfähigkeitsmessungen wurde der *Conductivity Meter* von WTW LF 325 auf 25°C kalibriert und von der Fachhochschule Potsdam ausgeliehen. Um eine Kontamination mit Ionen durch Hautkontakt zu vermeiden, wurde die gesamte Untersuchung mit Latexhandschuhen durchgeführt. Außerdem wurde noch ein gusseiserner Spatel und ein Handy als Stoppuhr verwendet. Die einzelnen Proben wurden nach dem jeweiligen Bauteil¹⁶⁶ und der Nummer der Platte beschriftet.

Die Kompressenmasse wurde mit dem Spatel so in den Deckel hineingestrichen und verdichtet, dass bei jeder Wiederholung von der gleichen Menge Arbocel im Deckel ausgegangen werden konnte. Das so entstandene Kompressenpellet wurde aus dem Deckel herausgenommen und mit kontrolliertem Schwung auf einer Höhe von 30 cm in die Bauteilmitte gesetzt, die Zeit gestartet und notiert. Dies wurde am ersten Versuchstag an 34 Bauteilen durchgeführt und am zweiten Versuchstag an den restlichen 40 Bauteilen. Im Anschluss daran konnten die Probestellen fotografiert werden. Nach einer Stunde wurde das erste Kompressenpellet mit dem Spatel von der

¹⁶⁴ Dies schien aufgrund des Aussehens eine geeignete Bezeichnung dafür zu sein

¹⁶⁵ Kapillarströmung durch Austrocknung

¹⁶⁶ Vgl. Bauteilbezeichnungen, Anhang, Kap. 2.1

Oberfläche des Sandsteins direkt in den 60 ml Behälter befördert und der Behälter verschlossen und beschriftet. Auf diese Weise wurden mit allen Proben verfahren. Anschließend wurden alle Probenbehälter, inklusive Probe, auf 50 ml, mit destilliertem Wasser (5,7µS), aufgefüllt und ihre Leitfähigkeit gemessen. Alle 74 Messergebnisse wurden in einem Protokoll¹⁶⁷ festgehalten und den einzelnen Leitfähigkeiten, je nach Intensität, eine Farbe zugeordnet. Auf dieser Basis wurde anschließend eine Kartierung erstellt¹⁶⁸.

6.6.1.3 Diskussion der Untersuchung

Der Untersuchungsablauf vor Ort ging reibungslos von der Hand und dauerte beide Male ca. 1 Std. 45 Min. Die Nachbereitung und die Leitfähigkeitsmessungen jeweils 1,5 Stunden. An dieser Stelle kann wirklich von einer praktikablen Methode gesprochen werden. Die Dokumentation und Visualisierung der Daten nahm auch hier die meiste Zeit in Anspruch. Probe ANG/MK/H2 wurde trotz Absperrung durch Vandlismus¹⁶⁹ heruntergerissen, aber direkt wieder platziert. Probe ANG/MK/A2 fiel bei der Abnahme auf den Granitplattenboden.

6.6.1.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die einzelnen Ergebnisse wurden in Protokollen¹⁷⁰ niedergeschrieben und außerdem in einer Übersichtskartierung festgehalten¹⁷¹. Die Werte liegen zwischen 58 µS der Blindprobe und 726 µS. Aber nur 8% der Messungen erreichen einen Wert über 200 µS und nur 24% einen Wert über 95 µS. Dabei kann der Wert von 200 µS vergleichsweise als gering angesehen werden¹⁷². Die 24% der Proben mit einem Wert über 95 µS wurden überwiegend an den Postamenten aus Postaer Sandstein gemessen, die direkten Kontakt mit den Podesten haben. Fast alle schrägen Brüstungsplatten zeigen auf der treppenseitigen Oberfläche keine erhöhten Ionenkonzentrationen. Diese etwa 75% der Proben liegen im Durchschnitt gerade mal 7 µS über den Werten der Blindproben. Die Untersuchung ergab folglich keine erhöhten Ionenkonzentration in den oberflächennahen Bereichen der Rückseiten der Brüstungsplatten.

¹⁶⁷ Vgl. Untersuchungsprotokolle, Anhang, Kap. 3.3.3

¹⁶⁸ Vgl. Kartierung der Ionenverteilung, Anhang, Kap. 2.6

¹⁶⁹ Ein Kind ging unter der Absperrung hindurch, kletterte die Treppe an den Brüstungsplatten entlang hangelnd hinauf und riss dabei die Hälfte besagter Probe herab.

¹⁷⁰ Vgl. Untersuchungsprotokoll Minikompressenverfahren, Anhang, Kap. 3.3.3

¹⁷¹ Vgl. Kartierung der Ionenverteilung, Anhang, Kap. 2.6

¹⁷² Vgl. Schuh 1996, S. 155

6.6.1.5 Diskussion der Ergebnisse

Wegen der Durchführbarkeit der Untersuchung wurden nur die Plattenrückseiten in die Untersuchung einbezogen. Aufgrund der Plattendicke an den untersuchten Stellen von 10 cm ist es unwahrscheinlich, dass Messungen an den Plattenvorderseiten höhere Ionenkonzentrationen gezeigt hätten. Außerdem zeigten die Blindproben bei der zweiten Versuchsreihe ca. 10 μS weniger als bei der ersten. Was erstaunlich ist, da beide aus der selben Charge stammen, welche einen Tag vor der ersten und somit zwei Tage vor der zweiten Untersuchungsreihe hergestellt wurde und für beide Untersuchungsreihen separat in einem Gefrierbeutel unter Verschluss gehalten wurden. Solange dies bei der Auswertung der Untersuchung berücksichtigt wird, ist es allerdings für die Ergebnisse irrelevant. Wenn den Ergebnissen der Untersuchung mit dem Minikompresenverfahren Glauben geschenkt werden kann ist es ein überaus sinnvolles Verfahren, um schnell Aussagen über die oberflächennahe Ionenverteilung von Bauteilen und Gebäuden zu erlangen. Ob die ermittelten Werte dieser Untersuchung als korrekt angesehen werden können, wird die Messung der Ionenkonzentrationen mit dem Ionenchromatographen zeigen.

6.6.2 Oberflächliche Feuchteverteilung der Brüstungsplatten

Weil sich salzbildende Ionen immer mit dem Feuchtestrom an Bauwerken bewegen, ist es für die Bestimmung der Salzquellen unter Anderem wichtig, die Verteilung der Feuchtigkeit an dem zu untersuchendem Objekt zu analysieren. Um einen Überblick über die Feuchteverteilung der Freitreppe der Alten Nationalgalerie in Berlin zu bekommen, wurde in dieser Arbeit mit dem Moist 200 Mikrowellenmessgerät gearbeitet. Es sollten damit Stellen am Bauwerk detektiert werden, an welchen sich die Feuchte auch nach längerer Trocknungsphase noch staut und somit dort höhere Salzkonzentrationen zu erwarten sind.

Zu Beginn der Arbeit war die Feuchtemessung mit der Gann-Hydromette UNI 2 geplant. Hauptsächlich da von Messungen auf der ornamentierten Vorderseite ausgegangen wurde, welche mit den Messköpfen des Moist 200 nicht realisierbar gewesen wäre. Gescheitert ist dieses Verfahren an der geringen Streuung der Messwerte von trockener Oberfläche zu feuchter Oberfläche, welche sich nur durch einen Wert von etwa 10 Digits¹⁷³ unterschied. Da diese Methode auch auf die

¹⁷³ In dieser Einheit wird bei der Gann- Hydromette UNI 2 gemessen bei einer möglichen Streuung von 0 - 200

Ionenleitfähigkeit der Salze reagiert, musste, beim Vorhandensein von Salzen, von nicht interpretierbaren Ergebnissen ausgegangen werden und sie wurde auf das Moist-Verfahren umgestellt.

6.6.2.1 **Moist 200**

Das Gerät arbeitet auf der Grundlage des dielektrischen Feuchtemessverfahrens. Bei diesem Verfahren wird sich der Dipolcharakter des Wasserstoffmoleküls zu nutzen gemacht. Durch seine starke polare Eigenschaft lässt sich Wasser von außen leicht durch ein magnetisches Feld polarisieren. Dabei richtet sich das Wasserstoffmolekül in einer Vorzugsrichtung aus und die Moleküle beginnen mit der Frequenz des Feldes zu rotieren. Dieser Effekt wird durch die physikalische Größe Dielektrizitätskonstante (DK) gekennzeichnet¹⁷⁴. Die relative DK von Wasser beträgt ca. 80, während die relative DK der meisten Feststoffe im Bereich von 2- 10 liegt. Der messbare Effekt des Verfahrens wird daher durch den Unterschied zwischen der DK von Wasser und der DK der Baustoffe verursacht.¹⁷⁵ Da dieser Unterschied sehr hoch ist, können schon geringe Mengen an Wasser mit diesem Verfahren detektiert werden. Das Problem anderer dielektrischer Feuchtemessverfahren im Gegensatz zu Mikrowellenmessverfahren, liegt in der niedrigeren Messfrequenz. Bei niedrigeren Frequenzen nehmen mögliche unerwünschte Einflüsse durch z. B. Ionenleitfähigkeit von Salzen zu¹⁷⁶. Dadurch können Messergebnisse bei Messungen an versalzter Bausubstanz verfälscht werden und somit schwerer zu interpretieren sein. Aufgrund der höheren Frequenz (2- 3 GHz) bei Mikrowellenmessungen werden die durch vorhandene Salze hervorgerufenen Störungen vernachlässigbar gering. Der genaue Ablauf der physikalischen Gesetzmäßigkeiten bei dielektrischen Feuchtemessungen lässt sich nachlesen bei Göller (1999).

Das Moist 200 Messgerät kann mit zwei verschiedenen Messköpfen bedient werden. Beide arbeiten nach einem reflektiven Verfahren und sind somit auf die Reflexion der gesendeten Wellen angewiesen. Der Oberflächenmesskopf Moist-R arbeitet dabei mit einem Streufeld und dringt in das Meßgut etwa 1- 3 cm ein, während der Volumenmesskopf Moist-P mit einer Antennenanordnung arbeitet und bis zu 30 cm in das Substrat eindringen kann. Die angegebenen Tiefendimensionen müssen unbedingt eingehalten werden, da sonst die Reflexion der Rückwand die Messung erheblich verfälscht. Dies bedeutet, man kann mit dem Volumenmesskopf nur messen, wenn

¹⁷⁴ Göller und hf Sensor GmbH 1999

¹⁷⁵ Ebd.

¹⁷⁶ Vgl. Göller und hf Sensor GmbH 1999

eine Substrattiefe von mindestens 30 cm und ein Abstand rund herum von mindestens 15 cm gewährleistet werden kann. Aus diesem Grund konnten die Brüstungsplatten der Freitreppe nur mit dem Oberflächenmesskopf gemessen werden. Bei dieser Messung wiederum spielt die Oberflächenrauheit eine wichtige Rolle. Je rauer die Oberfläche umso eher wird das Ergebnis verfälscht. Selbiges gilt für das Aufsetzen des Messkopfs an der Oberfläche. Dieser muss ganzflächig an der Oberfläche des Substrats ansitzen, da sonst die Messung erheblich gestört wird. Dadurch sind mit diesem Messkopf in der Regel nur absolut ebene Flächen zu bemessen. Die gemessene Feuchtigkeit kann von dem Gerät materialspezifisch in M.-% oder als einheitsloser Feuchteindex von 0 – 4000 angezeigt werden. Die Materialauswahl, Sandstein, ist zwar im Gerät vorhanden, aber für eine genaue Angabe in M.-% müsste das Gerät auf den jeweiligen Sandsteintypen kalibriert werden¹⁷⁷. Die Messungen können dank einer Speicherungsfunktion im Messgerät in Einzelmessungen oder in Messfeldern geschehen. Das Anlegen von Messfelder eignet sich besonders gut für die Messung von Flächen. Hierfür können bis zu acht Messfelder mit bis zu 250 Messungen vom Gerät gespeichert werden. Die Daten können mittels des Programms MoistAnalyse aufbereitet und visualisiert werden.

6.6.2.2 **Materialeien und Untersuchungsablauf**

Als Materialien kamen das Moist 200 Messgerät mit dem Oberflächenmesskopf Moist-R für Oberflächennahe Feuchtemessungen und ein Laptop mit dem Analyseprogramm MoistAnalyse zum Einsatz.

Es wurden an zwei Tagen Messungen durchgeführt. Die Messungen erfolgten jeweils 40 Stunden nach Regenschauern. Der Trocknungsprozess sollte so weit fortgeschritten sein, dass nur noch in den Bauteilen Feuchtigkeit vorhanden ist, in welchen sie sich staut. Dies wurde vor der Untersuchung durch Vergleichsmessungen geprüft, indem die Feuchtigkeiten nebeneinanderstehender Bauteile des gleichen Materials verglichen wurden. Wenn an vergleichbaren Stellen der Bauteile große Unterschiede gemessen wurden, konnte von geeigneten Voraussetzungen für die Messung der vergleichenden Feuchteverteilung ausgegangen werden. Die Verteilung der Feuchte wurde ausschließlich mit dem einheitslosen Feuchteindex gemessen.

Am ersten Untersuchungstag wurden ausschließlich die Postamente aus Postaer Sandstein gemessen. Es wurden nur die Flächen gemessen, welche treppenseitig zugänglich waren. Hierfür wurden pro Postamentfläche 32 Messungen, in einem Gitter

¹⁷⁷ Die Firma hf Sensor bietet diese Leistung an.

mit 8 x 4 Messpunkten, durchgeführt (vgl. Abb. 18). Für die Eckpostamente wurden ebenfalls 8 x 4 Messungen, aber über Eck ausgeführt. Auf diese Weise wurden alle 20 Postamente der Freitreppe gemessen.

Am zweiten Untersuchungstag wurden alle Brüstungsplatten aus Nebraer und aus Postaer Sandstein gemessen. Außerdem wurden einige Postamente gemessen, um die Ergebnisse mit denen des ersten Untersuchungstages zu vergleichen. Dies war wichtig, um eine Vergleichbarkeit der beiden Untersuchungen herstellen zu können. Die Feuchtigkeit der Platten wurde jeweils, ohne Rücksicht auf die teils unterschiedlichen Größen der Platten, mit 12 Messungen in einem Gitter von 3 x 4 Messpunkten pro Platte gemessen (vgl. Abb. 18). Auf diese Weise wurden alle 54 Platten gemessen. Nicht gemessen wurden die Brüstungsplattenzwickel, welche oben und unten einer jeden Schräge vorkommen (vgl. Anhang Kap.1.5).

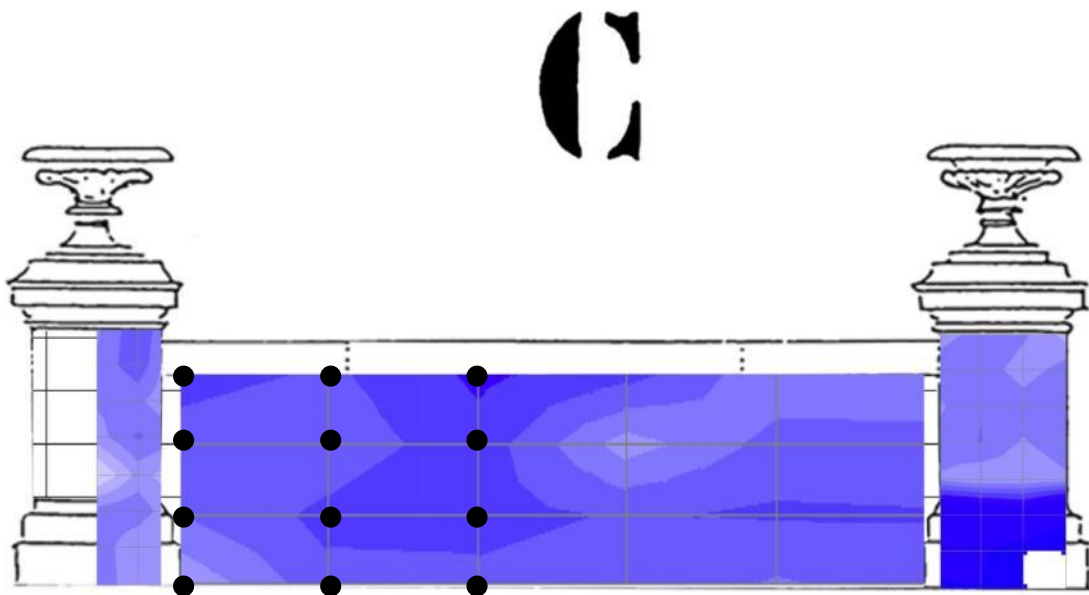


Abb. 18: Messpunkte der Feuchtemessung an Bauteil C am Beispiel C1

Quelle: D. Ohnmeiß

Die so gesammelten Daten wurden in dem Programm Moistanalyse gespeichert und weiterverarbeitet. Es wurde für jedes Bauteil eine Feuchteverteilung erstellt¹⁷⁸ und eine Kartierung der Gesamfeuchteverteilung der Freitreppe angelegt¹⁷⁹.

¹⁷⁸ Vgl. Ergebnisse zur Feuchteverteilung, Anhang, Kap. 1.5

¹⁷⁹ Vgl. Kartierung der Feuchteverteilung, Anhang, Kap. 2.5

6.6.2.3 **Diskussion der Untersuchung**

Die Messungen gingen, dank der unkomplizierten Handhabung und schnellen Messungen des Geräts, reibungslos von der Hand und es ließ sich in kurzer Zeit eine große Menge an Daten sammeln. Bei einigen Voruntersuchungen stellte sich schnell heraus, dass die Oberfläche weder verschmutzt, verwittert noch irgendwie gewellt oder gebogen sein darf, um ein vergleichbares Ergebnis bei der Messung zu erzielen. Aufgrund dieser Tatsache und des schnellen Ablaufs der Untersuchung geschehen mehrfache Fehlmessungen, welche sich aber problemlos Löschen und erneut messen lassen. Dies muss direkt im Anschluss an die Fehlmessung geschehen, weil sie sonst nicht mehr editiert werden kann. Darum muss der gemessene Wert stets auf seine Sinnhaftigkeit überprüft werden, um eine fehlerhafte Messung auch als solches zu bemerken. Aufgrund der Tatsache, dass die Oberfläche ganz eben sein muss, konnten wegen der Profile auf den Brüstungsplatten nicht so viele Messungen, wie anfangs geplant, durchgeführt werden. Pro Untersuchungstag wurden vor Ort etwa drei Stunden benötigt. Die anschließende Aufarbeitung der Daten nahm, trotz des mitgelieferten Analyseprogramms wesentlich mehr Zeit in Anspruch. Dennoch scheint die Feuchtemessung mit dem Moist 200 eine praktikable Methode zu sein, um schnell eine enorme Menge an Daten über große Flächen eines Bauwerks zu erlangen. Auch die weiterführende Verarbeitung der Daten wird mit der zugehörigen Software, im Gegensatz zu anderen Messmethoden, deutlich vereinfacht.

6.6.2.4 **Zusammenfassung der Ergebnisse**

Die gesamten erfassten Daten und Kartierungen lassen sich im Anhang einsehen. Hier sollen nur die wichtigsten Ergebnisse aufgelistet werden. Die Ergebnisse der Feuchtemessungen zeigen einige Bauteile, welche mehr Feuchtigkeit in sich haben als andere. Prinzipiell staut sich das Wasser vorzugsweise in den Postamenten auf den Podesten. Hier besonders an den nordseitigen Postamenten der Freitreppe. Die schrägen Brüstungsplatten neben den Treppenläufen zeigen keine Auffälligkeiten bezüglich ihres Feuchtehaushalts. Die Bauteile aus Nebraer Sandstein zeigen durchweg einen konstant höheren Wert als die aus Postaer Sandstein. Die auffälligste Durchfeuchtung an der Freitreppe wird nordöstlich, vom dritten Lauf bis zum ersten Podest in den Bauteilen R1- 3, RP, P1- 4, PP und N1+ 2 gemessen.

6.6.2.5 **Diskussion der Ergebnisse**

Die Auswertung der Feuchteverteilung wird durch die unterschiedlichen Sandsteinarten erschwert. Der Nebraer Sandstein hat aufgrund seiner kleineren Poren gegenüber dem

Postaer ein unterschiedliches Feuchtespeichervermögen. Trotz des konstant höheren Feuchtespeichervermögens des Nebraer Sandstein haben einige Postaer Postamente an dem Tag der Messung einen deutlich höheren Feuchtwert als alle Brüstungsplatten aus Nebraer Sandstein. Die gleichen Postamente weisen auch erhöhte Ionenkonzentrationen in vorangegangenen Untersuchungen auf, was auf einen Zusammenhang zwischen dem Feuchtehaushalt und der Salzanreicherung schließen lässt. An der nordöstlichen Seite der Freitreppe wurden über größere Distanzen die auffälligsten Feuchteanstauungen ermittelt. An dieser Stelle sind von außen starke Salzausblühungen in den Gesimssteinen sichtbar (vgl. Effloreszenzdokumentation, anhang, Kap.7.3).

6.6.3 Ionenchromatographie

Die Untersuchung mit dem Ionenchromatographen gibt Aufschluss über die genaue Ionenkonzentration in der entnommenen Probemenge. Dabei können massebezogene Aussagen getroffen werden und so Rückschlüsse auf die Schadhafteigkeit der Salzmengen gezogen und ggf. auch Entscheidungen zu Salzreduzierungsmaßnahmen getroffen werden.

Das Prinzip der unter Restauratoren bekannten Ionenchromatographie beruht auf dem Prinzip der Ionenaustausch-Chromatographie. Bei diesem Prinzip geschieht ein Ionenaustausch-Prozess zwischen der mobilen Phase (das Eluat der Probe) und den an der stationären Phase (das Trägermaterial im Gerät, oder die Säule) gebundenen Austauschplätzen. Die Ionen der Probemoleküle konkurrieren hierbei mit den Ionen des Lösemittels um einen Platz auf der Oberfläche der stationären Phase. Aufgrund der verschiedenen Affinitäten zur stationären Phase verweilen die Ionen unterschiedlich lange in der Säule und können deshalb getrennt und gemessen werden.¹⁸⁰

Auf Basis der oben durchgeführten zerstörungsfreien Untersuchungen konnten an der Freitreppe geeignete Stellen für eine Bohrmehlentnahme für die Ionenchromatografie ermittelt werden.

6.6.3.1 Bohrmehl-Probenentnahmen

Als Fragestellung zu geeigneten Probestellen war von besonderem Interesse:

¹⁸⁰ Vgl. Staub 2002, S.38

- Die Ionenkonzentration an stark verwitterten Sandsteinoberflächen
- Das Maximum an zu erwartender Ionenkonzentration
- Das Minimum an zu erwartender Ionenkonzentration

Um einen möglichst guten Gesamteindruck der Verteilung der Ionenkonzentrationen über die Freitreppenanlage zu bekommen, sollten die Probenentnahmestellen in verschiedenen Höhen und aus beiden Sandsteinarten entnommen werden. Weiterhin wurde Wert darauf gelegt, dieses Mal die Brüstungsplatten von Vorne zu beproben, da bei der Untersuchung zur oberflächlichen Ionenverteilung mit dem Minikompressenverfahren nur die Plattenrückseiten beprobt wurden und keine hohen Ionenkonzentrationen festgestellt werden konnten.

Um die Ionenkonzentrationen in den stark verwitterten Sandsteinoberflächen fest zu legen, wurden zwei Brüstungsplatten aus Nebraer Sandstein gewählt, die von der Treppe aus gut zu erreichen waren.

Das Maximum an zu erwartender Ionenkonzentration wurde an Stellen vermutet, an welchen sich Feuchtigkeit staut und/ oder die vorangehende Untersuchung mit dem Minikompressenverfahren erhöhte Werte zeigte sowie jährliche Ausblühungen zu sehen sind.

Das Minimum an Ionenkonzentration wurde in einer kaum verwitterten Nebraer Brüstungsplatte erwartet, wo weder mit dem Kompressenverfahren noch mit dem Feuchtemessgerät Auffälligkeiten gemessen werden konnten.

Da den ornamentalen Bereichen der Brüstungsplatten das Hauptaugenmerk dieser Arbeit gilt, wurden die Bohrmehlproben auch nur an den Brüstungsplatten entnommen. Die genauen Probenentnahmestellen sind der Kartierung Probenentnahmestellen Bohrmehlproben im Anhang Kapitel 2.8 zu entnehmen. Als leicht zu erreichende verwitterte Brüstungsplatten wurden die Platten S1 und G1 in unterschiedlichen Höhen gewählt und jeweils eine Probe entnommen. Für das zu erwartende Maximum wurden die Platten K2¹⁸¹, C2 und U1 gewählt, um einen besseren Überblick zu erlangen. Für das zu erwartende Minimum wurde die Platte M1 gewählt.

Die Probe U1 wurde als Ausnahme auf der Plattenrückseite genommen, da es von der Vorderseite aus nicht möglich war. An dieser Stelle wurde darum ein Tiefenprofil entnommen. Es wurden drei Tiefen von jeweils 2 cm entnommen. Die anderen Proben

¹⁸¹ Eigentlich sollte die Platte K1 beprobt werden, welche aber aufgrund eines fest installierten Schildes mit dem Rollgerüst nicht zu erreichen war. K2 weist aber dieselben Auswahlkriterien auf.

wurden an Stellen genommen, welche bereits einen Oberflächenverlust aufwiesen und stellten damit keinen Verlust der originalen Oberfläche dar. Für jede dieser Proben wurde mit einem 8 mm Steinbohrer 2 cm tief in die Substanz gebohrt und das Bohrmehl mit einer Karteikarte aufgefangen oder mit einem Strohhalmöffel aus dem Bohrloch geholt und in einen Globulibehälter befördert. Dieser ist wasserdicht verschließbar und wurde mehrfach mit Alufolie umwickelt, um ein vorzeitiges Austrocknen der Materialfeuchte zu verhindern. Die Bohrlöcher wurden direkt mit Remmers SK Mörtel in ähnlicher Farbe wie das Steinmaterial verschlossen. Die Proben wurden anschließend im naturwissenschaftlichen Labor der Fachhochschule Potsdam gewogen und bis zur Ausgleichsfeuchte getrocknet. Dadurch konnte gravimetrisch die Materialfeuchte der Probenmengen bestimmt werden. Etwa 1 Gramm jeder Probe wurde daraufhin in jeweils 100 ml destilliertes Wasser gegeben, in welchem sich die wasserlöslichen Bestandteile der Proben auflösen sollten. Nach einigen Tagen wurden die Leitfähigkeiten der einzelnen Eluate gemessen und etwa 5 ml für den Ionenchromatographen aus jeder Lösung entnommen. Die genauen Daten und Einwaagen können dem Untersuchungsprotokoll zur Ionenchromatographie im Anhang Kapitel 3.3.4 entnommen werden. Auf diese Weise wurden alle eluierten Proben mit dem Ionenchromatographen des naturwissenschaftlichen Labors der Fachhochschule Potsdam und der Software PeakNet 6 ® Diones 2001 gemessen.

6.6.3.2 **Diskussion der Untersuchung**

Die Probenentnahmen liefen dank der Rollgerüstleihgabe der Alten Nationalgalerie und einer helfenden Hand reibungslos. Der Wind musste mit einer speziellen Vorrichtung (Leitz-Ordner) davon abgehalten werden, das Bohrmehl von der Karteikarte zu wehen und speziell der Strohhalmöffel eignete sich hervorragend zur Bohrmehlentnahme aus tieferen Stellen. Die Bohrlöcher wurden mit Remmers SK Mörtel verschlossen, der Mörtel überstehend angetragen und den Tag über feuchtgehalten. An den Stellen welche nur mit Gerüst erreichbar waren (C2, K2, M1) konnte keine fachgerechte Überarbeitung des Mörtels stattfinden. Dies muss zu gegebenem Zeitpunkt noch nachgeholt werden.

6.6.3.3 **Ergebnisse**

Die höchste Konzentration mit 0,4 M.-% Sulfationen hat die oberste Probe des Tiefenprofils ANG/IC/U1.1 während die zweite Tiefe ANG/IC/U1.2 von 2- 4 cm schon nur noch 0,0145 M.-% und die nächste Tiefe ANG/IC/U1.3 in der Mitte der Platte nur noch 0,0091 M.-% an Sulfationen beherbergt. Auch die anderen Werte sind in dieser

Probe höher als in den anderen Bohrmehlproben. Die Probe mit den höchsten Gesamtionenkonzentrationen (vgl. Tabelle 4) ist eine Mörtelprobe ANG/IC/MRP, welche zwischen einem Postament (RP) und einer Brüstungsplatte (PP6) entnommen wurde. In ihr sind alle Ionenkonzentrationen außer Chlorid und Magnesium erhöht. Der Natriumgehalt dieser Probe ist mit 0,26 M.-% im Mittel 52 Mal höher als der der anderen Proben und drei Mal höher als der von ANG/IC/U1.1. Die ermittelten Werte in mg/l sowie die Spektren zur Ionenbilanz können im Anhang im Kapitel 1.4 nachgelesen werden. Die hier angegebene Differenz wurde über die Differenz der Kationen und Anionen in mol stöchiometrisch errechnet und gibt einen Eindruck über den ungefähren Carbonatanteil in den Proben. In der Tabelle 4 wurden jeweils die zwei höchsten Werte der einzelnen Anionen- bzw. Kationenbilanzen grau unterlegt.

Tabelle 4: Ionenkonzentrationen in M.-%

Quelle: D. Ohnmeiß

	Chlorid [M.-%]	Nitrat [M.-%]	Sulfat [M.-%]	Natrium [M.-%]	Kalium [M.-%]	Magnesium [M.-%]	Calcium [M.-%]	Differenz [M.-%]
ANG/IC/MPP	0,0025	0,009	0,0152	0,00431	0,00846	0,02074	0,24578	0,42111
ANG/IC/U1.1	0,0122	0,0534	0,4169	0,07815	0,14869	0,01052	0,10926	0,2891
ANG/IC/U1.2	0,0153	0,0064	0,0145	0,00532	0,05106	0,00188	0,02598	0,09467
ANG/IC/U1.3	0,0066	0,0105	0,0091	0,00784	0,00946	0,00183	0,02413	0,04863
ANG/IC/G1	0,0082	0,0074	0,0153	0,00739	0,07918	0,00632	0,02798	0,16776
ANG/IC/S1	0,0078	0,0107	0,0271	0,00585	0,06377	0,00685	0,02944	0,13369
ANG/IC/K2	0,0031	0,0008	0,0343	0,0019	0,00367	0,00826	0,06727	0,10429
ANG/IC/C2	0,0048	n.a.	0,0108	0,0031	0,01997	0,00917	0,0405	n.a.
ANG/IC/M1	0,0059	0,0116	0,006	0,00382	0,02632	0,00725	0,02335	0,07829
ANG/IC/MRP	0,0233	0,1678	0,3455	0,2613	0,15528	0,00202	0,21928	0,83644
ANG/IC/Dest	0,0014	0,0004	0,0011	0,00103	0,00169	0,00064	0,04237	0,06687

6.6.3.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Ionenchromatographie, der an der Freitreppe der Alten Nationalgalerie in Berlin entnommener Bohrmehlproben zeigen in der Regel keine hohen Ionenkonzentrationen bauschädlicher Salzionen. Nach dem WTA Merkblatt zum zerstörungsfreien Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen sind alle Proben außer ANG/IC/U1.1 und ANG/IC/MRP unbelastet bis gering belastet und keine Maßnahmen erforderlich¹⁸². Die Werte der beiden genannten Proben überschreiten mit ihrem Sulfatgehalt, die Mörtelprobe ebenso mit ihrem Nitratgehalt, die Angabe des Merkblatts, zu gering belastetem Material und sind als mittel bis hoch belastet anzusehen. Bei diesen beiden Konzentrationen wird von der

¹⁸² Vgl. Tabelle 5 u. 8, Anhang, Kap. 1.4

WTA eine Salzreduzierungsmaßnahme empfohlen. Das Gesamtergebnis der Untersuchung ist dennoch als positiv für die Freitreppenanlage zu bewerten und erfordert geringeren Handlungsbedarf als angenommen.

6.6.4 Interpretation der quantitativen Salzanalyse

Es hat sich herausgestellt, dass die Salzbelastung an der Freitreppenanlage lange nicht so hoch ist wie erwartet und nur eine Bohrmehlproben einen erhöhten Wert an Sulfationen zeigt.

Es wird vermutet, dass die Salzkonzentrationen der in den letzten zwei Jahrzehnten beobachteten Salzausblühungen schwächer werden. Der Ursprung der bauschädlichen Salze könnte demnach im Fugenmörtel oder vor der Sanierungsmaßnahme 1995 liegen. Damals wurden laut Maßnahmenkartierung keine Salzreduzierenden Maßnahmen durchgeführt, weil ähnliche Ionenkonzentrationen in den Brüstungsplatten festgestellt wurden wie heute. Allerdings waren die Probenentnahmestellen von damals vielleicht etwas ungünstig gewählt, da es sich dabei um schräge Brüstungsplatten handelte. Nach den hier gemachten Untersuchungen kann davon ausgegangen werden, dass die schrägen Brüstungsplatten wesentlich geringere Salzkonzentrationen aufweisen, da sich die Feuchtigkeit dort nicht stauen kann und dadurch eventuelle Salzlösungen weiter nach unten fließen würden. Alle (bis auf eine¹⁸³) dokumentierten Beobachtungen zu Salzausblühungen an den Brüstungsplatten wurden an waagrecht stehenden Platten auf Höhe der Podeste gemacht und sind dieses Jahr wesentlich weniger geworden¹⁸⁴. Darum wird vermutet, dass möglicherweise die beobachteten Salzausblühungen in den vergangenen Jahren immer mehr vom Regen ausgewaschen wurden. Der Fugenmörtel wird in einem Bericht von der FEAD GmbH als salzionenführend bezeichnet und es wurden auch in den hier gemachten Untersuchungen in einer Mörtelprobe wesentlich erhöhte Ionenkonzentrationen ermittelt.

Aufgrund der Tatsache, dass sich die Ergebnisse der Ionenchromatographie mit den Ergebnissen des Kompressenverfahrens decken, kann das Minikompressenverfahren als bestens geeignet angesehen werden, um eine Aussage über oberflächennahe Ionenkonzentrationen zu erhalten und um damit eine Verteilung von

¹⁸³ Dabei handelt es sich um die Platte P1 die sich im nördlichen Bereich des östlichen ersten Podestes an der Freitreppe befindet an welchem der größte Feuchtestau der Anlage gemessen wurde und diese damit eine Ausnahme bildet.

¹⁸⁴ Vgl. Effloreszenzdokumentation, Anhang, Kap. 7.3

Ionenkonzentrationen über größere Bauteile zu messen.

Aufgrund der schrägen Treppenläufe wären hohe Salzkonzentrationen oberhalb des Bodens eher nur auf Höhe der Podeste denkbar. Die Ergebnisse mit dem Kompressenverfahren haben gezeigt, dass die Salzkonzentrationen in den Postamenten im Durchschnitt wesentlich höher sind als in den Brüstungsplatten. In den Selben werden ebenfalls höhere Feuchtigkeiten gemessen.

6.7 Diskussion und Interpretation der Ergebnisse der Salzanalyse

Sichtbare Effloreszenzen und erhöhte Salzkonzentrationen zeigten sich im Nachhinein fast ausschließlich bei den Sandsteinelementen aus Postaer Sandstein. Diese Tatsache erweist sich als günstig, da der Postaer Sandstein aufgrund seiner etwas größeren Porenradien und seiner sehr starken Korn- zu Kornbindungen sehr gut mit Salzbelastungen umgehen kann und er darum gar keine oder nur wenige Schäden davon trägt.

Die Konstruktionspläne der Ausführungen von 1995 und ein Gespräch mit dem damaligen Bauleiter zeigten, dass die Abdichtungsmaßnahmen von erstklassiger Güte geplant waren und gewissenhaft ausgeführt worden sind und dadurch keine Neubelastung durch Salze, aus den zementhaltigen Baustoffen der Unterkonstruktion zu erwarten sind.

Die ermittelten Ergebnisse zu den Salzarten erscheinen angesichts der Tatsache, dass nur geringe Konzentrationen festgestellt werden konnten, eher irrelevant. Gesagt sei an dieser Stelle, dass es sich hauptsächlich um Alkalisalze handelt, die ihren Ursprung in alkalihaltigen Baustoffen haben. Da von einer effektiven Konstruktion und Abdichtung ausgegangen werden kann, können die Alkaliionen nur aus Zeiten vor der Sanierungsmaßnahme¹⁸⁵, dem Fugenmörtel oder den Vergussmörtel der Plattenverankerung stammen. Die ermittelten Salzarten wie Thenardit oder Thermonatrit können angesichts der in Berlin vorherrschenden Klimabedingungen an einigen Tagen in stark frequentierten Zyklen auskristallisieren und könnten bei höheren Konzentrationen dadurch zu erheblichen Schaden führen.

¹⁸⁵ Denkbar sind auch alte Reinigungsmaßnahmen mit Natronlauge oder Festigungen mit Natronwasserglas.

Nach genauerer Betrachtung kommt das Fugenmaterial durchaus als die salzbildende Quelle in Frage und ist sogar wahrscheinlich. Bei den Untersuchungen der FEAD GmbH und den hier durchgeführten Untersuchungen¹⁸⁶ zeigt das Fugenmaterial eine deutlich höhere Ionenanreicherung als der Sandstein. Außerdem würde es erklären warum die Salzbelastung mittlerweile nachlässt. Fragwürdig bleibt das Material des Vergussmörtels der Brüstungsplattenverankerung.

Auch zeigen einige Gesimssteine, an der Anlage, enorme Salzausblühungen und es wurde ebenfalls starker Feuchtestau an diesen Stellen der Freitreppe ermittelt, welcher sich meist durch pflanzlichen Bewuchs an diesen Stellen sichtbar macht. Die Durchfeuchtung der Gesimssteine wird höchstwahrscheinlich durch die offenen Fugen der unmittelbar oberhalb stehenden Postamente hervorgerufen. Da sich das Wasser nach Regenschauern selbstständig ableiten muss fließt es auf seinem Weg in offene Standfugen einiger Postamente. Aufgrund der Zinkblechabdeckungen konnten die Salze der betroffenen Gesimssteine im Laufe der Jahre nicht wie bei den anderen Bauteilen vom Regen reduziert werden.

Durch die unterschiedliche Verteilung der Ionenkonzentrationen an der Freitreppenanlage und den unterschiedlichen Schadensursachen gilt es ein individuelles Konzept aus Monitoring, Fugensanierung und Salzreduzierung zu erstellen wenn der vorherrschenden Salz- und Feuchteproblematik an der Freitreppenanlage der Alten Nationalgalerie in Berlin durch eine zukünftige Maßnahme genüge getan werden soll.

¹⁸⁶ Es wurden nachträglich nochmals zehn Proben des Fugenmörtels entnommen und auf ihre Leitfähigkeit hin untersucht. Alle Proben besitzen eine vielfach höhere Leitfähigkeit als die entnommenen Bohrmehlproben der Sandsteine.

7. Untersuchungen zur mikrobiologischen Besiedelung

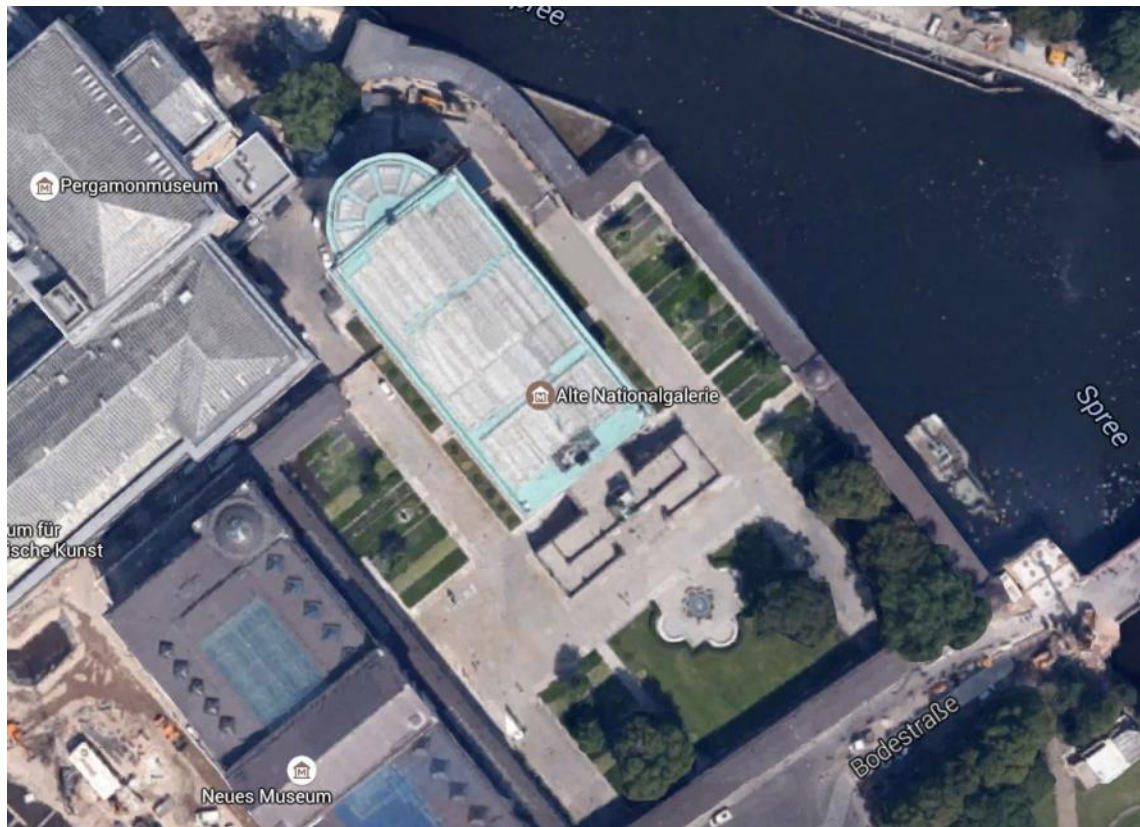


Abb. 19: Die Alte Nationalgalerie in Berlin auf der Museumsinsel

Quelle: Google Earth

Auf Grund der freien Exposition der Freitreppe, ihrer direkten Nähe zum Flusslauf der Spree und der sie umgebenden Gartensituation ist der Bewuchs mit Mikroorganismen an ihren einzelnen Bauteilen nachvollziehbar. An der Freitreppe der Alten Nationalgalerie treten verschiedene Bewuchsarten, wie Moose, Gräser, Flechten, Algen und sogar junge Bäume oder Sträucher auf. Wie oben beschrieben hat nicht jede Art ein Schadpotenzial oder ist so stark vertreten wie die Flechten. Organismen, wie Gräser und Moose, finden darum in dieser Arbeit keine weitere Beachtung.

Besonderes Augenmerk soll auf die Flechten gelegt werden, weil, aufgrund ihrer hohen Anzahl, von ihnen der größte Schaden angenommen wird. Sie können nicht nur bis zu 20 mm tief in Gesteine eindringen, sondern auch einzelne Gesteinsfragmente lockern und lösen¹⁸⁷. Die Flechten an der Freitreppe besiedeln hauptsächlich die Handläufe

¹⁸⁷ Vgl. Kapitel 5.2

welche aus Nebraer Sandstein gefertigt sind. Dieser Handlauf ist, wie auf der Kartierung¹⁸⁸ zu sehen, stark von ihnen bewachsen. Es wird darum davon ausgegangen, dass die Flechten einen schädigenden Einfluss auf die Gesteinsoberfläche der Handläufe aus Nebraer Sandstein haben.

Diese wird vermutlich durch lösen einzelner Quarzkörner in ihrer Fläche vergrößert und bietet, abgesehen von dem Verlust der originalen Oberfläche, zusätzlich eine größere Angriffsfläche für z.B. Feuchtigkeit, trockene Ablagerungen und mikrobielle Neubesiedelung. Um das tatsächliche Schadenspotenzial zu ermitteln, sollen im Folgenden ihre Arten näher bestimmt werden, ihre Eindringtiefe in das Substrat und ggf. bereits stattgefundene Oberflächenvergrößerungen visualisiert werden. Außerdem sollen Testreihen zu Schimmelpilzen und Bakterien durchgeführt werden, um einen außerordentlichen Befall ausschließen zu können.

Auf Basis dieser Untersuchungen und weiterer Recherche wurden Probeflächen für mögliche Reinigungsmethoden und Präventivbehandlungen angelegt. Diese Probeflächen sollen nach ihrer Reinigung und drei Monate später erneut auf ihre photosyntheseaktiven Zellen hin untersucht werden, um eine Aussage über vermeintliche unterschiedliche Geschwindigkeiten der Neubesiedelung, aber auch über den jeweiligen Reinigungserfolg zu erlangen.

7.1 Auswahl der Untersuchungsmethoden

Die Auswahl der Untersuchungsmethoden geschah auf Anraten von Frau Prof. Dr. Petersen im Rahmen eines einwöchigen Seminars im mikrobiologischen Labor der HAWK Hildesheim. Es wurden die dort gängigen Untersuchungsmethoden genutzt, um die Eindringtiefe der Flechtenhyphen, die Art der Flechten, den Bakterien- und Schimmelpilzbefall sowie die möglichen Grabgänge der Flechten zu ermitteln. Die Flechtenarten wurden von Frau Dr. Gehrmann-Janszen durch visuelle Betrachtung eingegrenzt und anschließend vom Autor näher bestimmt. Die Eindringtiefe konnte durch eine Anfärbemethode visualisiert und unter dem Binokular beobachtet werden. Um die Grabgänge erkennen zu können, wurden die Flechten von der Gesteinsoberfläche entfernt und die Oberflächenstruktur ebenfalls unter dem Binokular eingeschätzt. Der Bakterien und Pilzbefall wurde durch Ansetzen von Kulturen auf verschiedenen Nährkörpern beschleunigt und begutachtet.

¹⁸⁸ Vgl. Zustandskartierung Flechten, Anhang, Kap. 2.4

Die Auswahl der Methoden für das Anlegen der Reinigungsprobleflächen wurde über die Arbeiten von Amrit Brinkmann zur Reinigung von Flechten auf Sandsteinoberflächen und von Beate Skasa-Lindermeir über die Anwendung von Titandioxid auf Sandsteinoberflächen getroffen. Auf Basis dieser Arbeiten wurde sich für eine Reinigung mit dem Mikrodampfstrahlgerät und Nachbehandlungen mit Wasserstoffperoxid und Titandioxid entschieden.

7.2 Ehemalige Analysen

In ehemaligen Untersuchungen der Universität Hamburg¹⁸⁹ wurden 1992, sechs Proben auf den Befall mit Nitrifikanten, heterotrophen und methyloprophen Bakterien und Pilzen untersucht und Analysen zu Konzentrationen der Ionen Nitrit und Nitrat gemacht. Dabei wurde im Mittel eine geringe Belastung der Freitreppe mit Bakterien und Pilzen festgestellt. In Bereichen mit schwarzen Krusten wurden dabei die höchsten Konzentrationen gemessen. Sehr hohe Nitratwerte wurden in den historischen Mörteln ermittelt. Als Empfehlung wurde festgestellt, dass künftige Mörtel nach historischem Rezept entsprechend basisch einzustellen seien, damit Nitrifikanten in ihm nicht zum Wachsen kommen würden¹⁹⁰.

7.3 Untersuchungen im mikrobiologischen Labor der HAWK Hildesheim

Um den Flechtenbewuchs zu untersuchen, wurden sieben Proben des mikrobiellen Bewuchses an der Freitreppe entnommen. Sechs dieser Proben wurden mit der Abziehmethode und einem transparenten Klebestreifen entnommen. Damit sollten visuelle Begutachtungen der Flechtenarten durchgeführt und der Befall durch Bakterien und Schimmelpilze an der Freitreppenanlage beurteilt werden. Eine der Proben wurde inklusive Gesteinsmaterial entnommen. Mit dieser Probe sollten vor allem die Eindringtiefe der Flechtenhyphen und deren Grabgänge ermittelt werden. Die genauen Probenentnahmestellen sowie weitere Details können den Probenahmeprotokollen im Anhang Kapitel 3.1 entnommen werden. Alle Untersuchungen wurden nach den gängigen Methoden des mikrobiologischen Labors der HAWK Hildesheim durchgeführt.

¹⁸⁹ Vgl. Wallasch 1992a, Anlage 10

¹⁹⁰ Ebd.

7.3.1 Untersuchung der Flechtenarten

Die einzelnen Flechtenarten konnten in dieser Arbeit nur durch visuelle Betrachtung und Vergleiche mit anderen Bildaufnahmen bestimmt werden. Darum wird ein großer Erfahrungsschatz in diesem Bereich benötigt, um schnell zu einem Ergebnis zu kommen. Aus diesem Grund wurden für die Untersuchung der Flechtenarten die genommenen Proben bereits eine Woche vor Beginn des Seminars nach Hildesheim geschickt, da zu diesem Zeitpunkt Frau Dr. Gehrman-Janszen, als empfohlene Flechtenspezialistin, vor Ort war und die visuelle Beurteilung der einzelnen Flechtenarten vornehmen sollte. Ob es noch andere Verfahren zur Flechtenbestimmung gibt, ist dem Autor unbekannt und wurde von dem Labor in Hildesheim nicht vorgeschlagen.

Frau Gehrman-Janszen konnte anhand der eingereichten Proben drei Flechtenarten benennen. Zum einen die Flechtenart *Lecanora muralis*, eine *Candelariella* Art und eine schwarze *Phaeophyscia* Art. Die genauen Arten der Gattungen *Candelariella* und *Phaeophyscia* konnten vom Autor auch nach langer Bildrecherche nicht eindeutig zugewiesen werden. Bei der *Candelariella* Art handelt es sich vermutlich um die Art *aurella*, während für die *Phaeophyscia* Art keine visuelle Übereinstimmung in anderen Bildatlanten gefunden werden konnte¹⁹¹. Vielmehr scheint es sich hierbei um *Verrucaria nigrescens* zu handeln. In der Tabelle 5 werden die einzelnen Flechtenarten abgebildet sowie einige Vorlieben beschrieben.

Tabelle 5: Abbildungen der Flechtenarten

Quelle: D. Ohnmeiß

Lecanora muralis

gräuliche Flechte in der Bildmitte mit den ausgeprägten Fruchtkörpern

Von der Flechte bevorzugt

pH-Wert	>7
Sonnenlicht	mäßig bis hell
Feuchtigkeit	feucht
Luftfeuchtigkeit	mäßig bis trocken



Quelle: D. Ohnmeiß

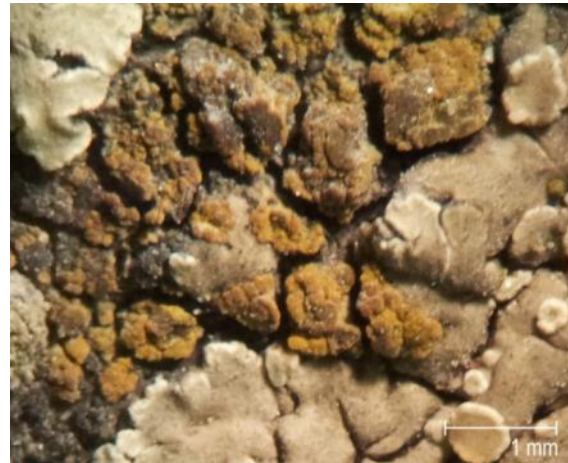
¹⁹¹ Vgl. beispielhaft Sharnoff 2014 und, dass es sich um keine *Physcia* Art handeln kann ist dort relativ eindeutig zu sehen.

Candelariella aurella

orange-gelbliche Flechtenart

Von der Flechte bevorzugt

pH-Wert	>7
Sonnenlicht	mäßig bis hell
Feuchtigkeit	-
Luftfeuchtigkeit	trocken



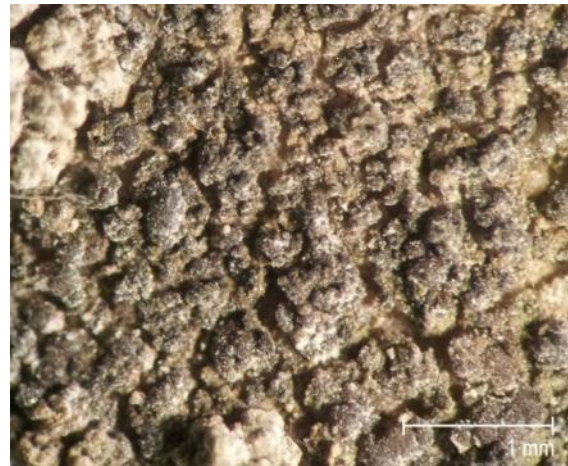
Quelle: D. Ohnmeiß

Verrucaria nigrescens

gräulich bis schwarze Flechtenart

Von der Flechte bevorzugt

pH-Wert	>7
Sonnenlicht	egal
Feuchtigkeit	feucht
Luftfeuchtigkeit	mäßig bis trocken



Quelle: D. Ohnmeiß

Als Photobiont fungiert in allen drei Fällen die Grünalge. Sie bevorzugt einen etwas höheren pH-Wert um etwa acht¹⁹² und kommt häufig in lichtreichen lufttrockenen Gebieten vor¹⁹³. Bei allen drei Flechtenarten handelt es sich um Krustenflechten welche durch ihre Markhyphen in das Gestein eindringen können.

7.3.2 Untersuchung der Schimmelpilze und Bakterien

Um einen außergewöhnlichen Befall mit Bakterien und Schimmelpilzen an der Freitreppe der Alten Nationalgalerie in Berlin ausschließen zu können, wurden die Klebestreifenproben in verschiedene Nährstoffböden gelegt, um ein Wachstum möglicher Pilze und Bakterien zu fördern und anschließend begutachten zu können.

¹⁹² Vgl. Brinkmann 2010, S.27 f.

¹⁹³ Ebd.

Es wurden mit allen sechs Klebestreifenproben jeweils vier Kulturen angelegt. Hierfür wurden die Klebestreifen zerschnitten und unter keimfreien Bedingungen auf spezielle Nährstoffböden auf Malz- und Kaseinbasis gelegt.

Die Untersuchung zeigte, dass, wie zu erwarten, keine besondere Kontamination mit Bakterien oder Schimmelpilzen an der Freitreppe vor liegt. Abbildungen mit den Ergebnissen der gezüchteten Nährböden können im Anhang im Kapitel 1.7 angesehen werden.

7.3.3 Untersuchungen zur Eindringtiefe der Flechten

Um die Eindringtiefe der Flechtenhyphen visualisieren zu können, wurde mit Flechten besiedeltes Gesteinsmaterial benötigt. Die Probe ANG/MB/01 wurde darum mit einer Dremel an ausgewählter Stelle 2 x 2 cm breit und 0,6 cm tief entnommen. Es wurde darauf geachtet eine Stelle mit möglichst vielen verschiedenen Flechtenarten zu entnehmen. Die Details zur Probenentnahme können, wie gehabt, dem Probenahmeprotokoll im Anhang, Kapitel 4.1 entnommen werden. Teile der entnommenen Probe wurden anschließend im Labor mit der Perjodsäure-Schiff-Reaktion (PAS) – Färbung auf die Eindringtiefen der Flechten untersucht.

Durch die PAS-Färbung lassen sich pilzliche Strukturen auf befallenen Materialien durch die Anfärbung von Zellwandbestandteilen wie Chitin besser sichtbar machen. Allgemein werden durch diese Färbemethode Kohlehydrate angefärbt, in dem die entstehenden Aldehyde nach Oxidation mittels Perjodsäure durch Schiff's Reagenz bläulich-rot angefärbt werden.¹⁹⁴

7.3.3.1 Material und Untersuchungsablauf

Neben Arbeitsschutzkleidung wurden als Materialien hierfür Ethanol 70%ig, Perjodsäure 0,75%ig, Schiff's Reagenz, Na-Sulfatlösung 0,6%ig und einige Reagenzgläser benötigt.

Das Probestückchen wurde zuerst 30 min. in 70%igem Ethanol inkubiert und hinterher 5- 8 min. in 0,75%iger Perjodsäure, dann 5 min. in 70%igem Ethanol geschüttelt. Anschließend wurde es 5 min. unter fließendem Wasser abgespült und hinterher bis 2 min. in Schiff's Reagenz inkubiert bis eine fortschreitende Rotfärbung beobachtet wurde. Daraufhin wurde es zweimal 3 min. in 0,6%iger Na-Sulfatlösung geschüttelt und

¹⁹⁴ Petersen und Möhlenhoff 2009, S.6

danach wieder einige Minuten unter fließendem Wasser abgespült. Zum Schluss musste die Probe erneut in 70%igem Ethanol überführt werden und die Pilzstrukturen wurden bläulich-rot auf dem Material sichtbar.

Die Anfärbung wurde unter dem Binokular betrachtet und das Ergebnis in mehreren Fotos festgehalten (siehe Abb. 20).

7.3.3.2 Ergebnisse der Anfärbung der Flechtenhyphen

Das Ergebnis der Anfärbemethode zur Eindringtiefe der Flechtenhyphen lässt auf Abbildung 20 erkennen, dass die Hyphen durch den gesamten Probekörper gewachsen sind und damit eine Eindringtiefe von mindestens 0,6 cm haben. Während im oberen Drittel des Probekörpers noch sehr viele Hyphen zu erkennen sind, nimmt deren Anzahl bis zum Ende des Körpers ab.



Abb. 20: Die bläulich-rot eingefärbten Flechtenhyphen sind als dünne lila Fäden, deutlich erkennbar, im gesamten Probekörper verteilt. Quelle: D. Ohnmeiß

7.3.4 Untersuchung zu den Grabgängen der Flechten

Für die Untersuchung der möglichen Grabgänge, Fraßgänge, Gruben oder auch Pittings¹⁹⁵ der Flechten wurden Teile desselben Probekörpers ANG/MB/01 verwendet, wie für die Untersuchungen zu den Eindringtiefen. Um die Grabgänge unter dem Binokular sichtbar zu machen, war es nötig, die Flechten von der Gesteinsoberfläche vollständig zu entfernen. Dies musste ohne mechanische Krafteinwirkung geschehen, um keine Quarzkörner von der Gesteinsoberfläche zu lösen und das Ergebnis dadurch zu verfälschen.

7.3.4.1 Material und Untersuchungsablauf

Aus oben beschriebenen Grund wurde zu einer Säure gegriffen, die organisches Material angreift, ohne das quarzitisches gebundenen Korngefüge zu beschädigen. Prof. Dr. Petersen riet an dieser Stelle zu Eau de Javel, einer wässrigen Lösung von Kaliumhypochlorid.

Das Probenmaterial wurde über Nacht in die Säure eingelegt und am nächsten Tag konnte die Flechte rückstandsfrei mit dem Pinsel von der Gesteinsoberfläche gestrichen werden. Anschließend wurde das Probestückchen unter dem Binokular begutachtet und Fotos durch das Okular gemacht (siehe Abb.21).

¹⁹⁵ Vgl. Gehrman- Janszen und Petersen 2014, S.126

7.3.4.2 Ergebnisse der Untersuchungen zu den Grabgängen der Flechten

Das entstandene Foto (vgl. Abb. 21) zeigt deutlich einige Stellen mit tieferen Gruben in der Oberflächenstruktur der Sandsteinoberfläche.

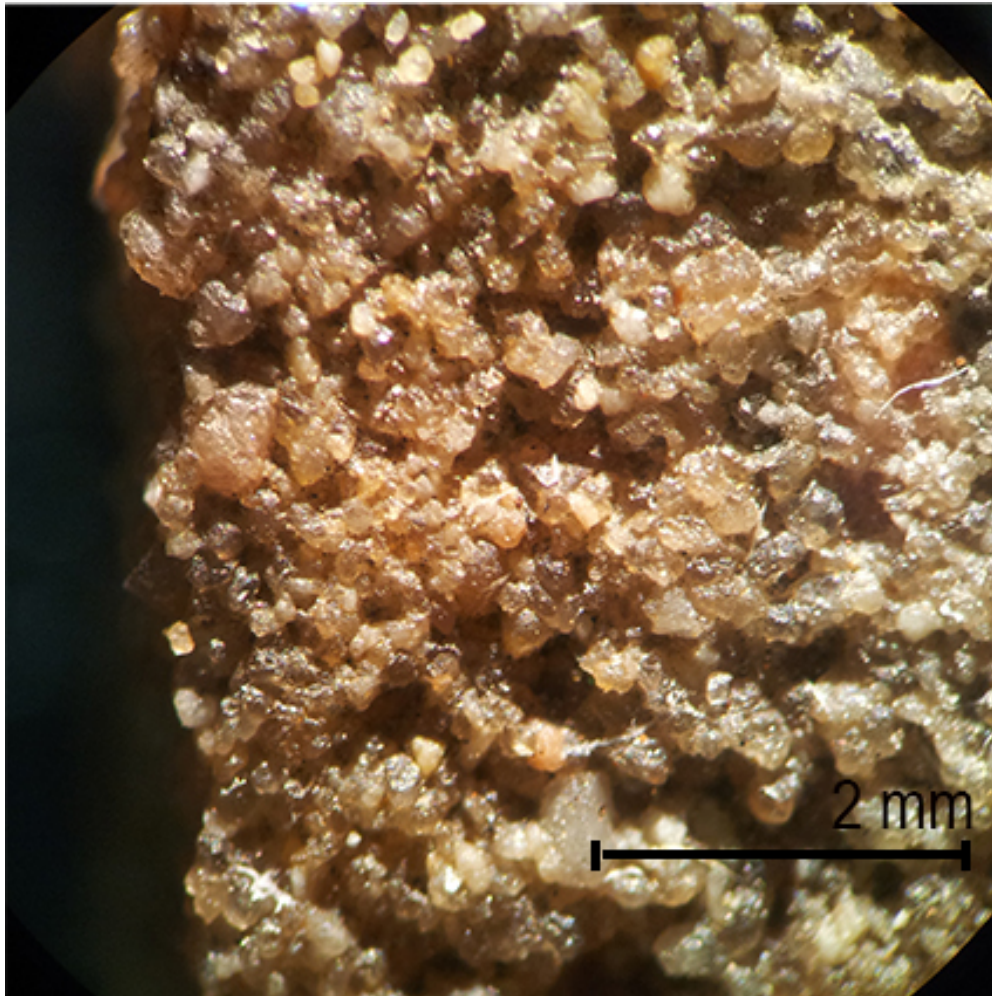


Abb. 21: Oberfläche des Probekörpers ANG/MB/01, an einigen Stellen sind tiefe Gruben erkennbar, das Korngefüge wirkt zerrüttet
Quelle: D. Ohnmeiß

7.3.5 Diskussion und Interpretation der Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen im Labor

Durch die Untersuchungen im mikrobiologischen Labor der HAWK Hildesheim konnten einige wichtige Ergebnisse ermittelt werden.

Was die Flechtenarten betrifft, konnten keine besonderen Flechtenarten ermittelt werden, die für die an der Freitreppe herrschenden Bedingungen untypisch wären. Als Photobiont kommt bei allen ermittelten Flechtenarten nur die Grünalge in Frage und

kein Cyanobakterium. Alle drei Flechtenarten sind Krustenflechten und bevorzugen ein alkalisches Milieu, benötigen viel Wasser, kaum Luftfeuchtigkeit und bevorzugen Sonneneinstrahlung. Alle diese Eigenschaften werden an der Freitreppe erfüllt. Zum Beispiel konnten bei der Effloreszenzanalyse einige alkalische Salze nachgewiesen werden und durch den alkalischen Fugenmörtel, ist von einem leicht erhöhten alkalischen Milieu auszugehen. Auch halten die Handläufe aus Nebraer Sandstein die Feuchtigkeit nach einem Regenschauer länger als bspw. der Postaer Sandstein, auf dem keine Flechten gefunden wurden und sorgen so für eine dauerhafte Befeuchtung. Die in Berlin gängigen Luftfeuchtigkeiten kommen den Flechten ebenfalls entgegen. Auch die ganztägige direkte Sonneneinstrahlung auf alle Handläufe der Freitreppe wird von ihnen bevorzugt.

Die Untersuchungen zur Eindringtiefe der Flechten haben gezeigt, dass die Flechtenhyphen bereits über 0,6 cm in das Substrat hineingewachsen sind. An dieser Stelle wird deutlich, dass unterlassene zyklische Reinigungsmaßnahmen das Kulturgut nicht nur ästhetisch abwerten können, sondern auch zu weiterführenden Schäden beitragen. Außerdem zeigt es, dass bei einer Reinigungsmaßnahme, einer mit Flechten bewachsenen Fläche, die Behandlung der in der Tiefe sitzenden Flechtenhyphen mit bedacht werden muss, wenn eine Neubesiedelung möglichst lange gehemmt werden soll.

Die Ergebnisse zu den, durch die Penetration der Flechtenhyphen entstehenden, Fraßgruben können ohne Vergleichsaufnahmen geschliffener Nebraer Sandsteinoberflächen nicht als eindeutig gewertet werden. Auf der Abbildung 21 können zwar Gruben in den Quarzkornschichten erkannt werden und Prof. Dr. Petersen nennt diese auch einen eindeutigen Nachweis der Pittings, jedoch fehlt dem Autor das nötige Vergleichsmaterial, um dies als einen eindeutigen Nachweis bezeichnen zu können. Sieht man sich allerdings auf der Abbildung 20 die oberflächennahen, stark umwachsenen, einzelnen Körner des nicht allzu stark quarzitisches gebundenen Nebraer Sandsteins an und berücksichtigt das feuchtigkeitsbedingte Quellen und Schwinden der Flechtenhyphen kann von dem Herauslösen einzelner Quarzkörner ausgegangen werden. Außerdem ist das Bilden von Gruben durch Flechtenbewuchs bereits an wesentlich härterem und weniger zugänglichem Gestein nachgewiesen¹⁹⁶ und der Handlauf der Freitreppe derartig stark und lange Zeit bewachsen, dass es geradezu seltsam wäre, wenn dieses Phänomen

¹⁹⁶ Vgl. Gehrman- Janszen und Petersen 2014, S.126

hier nicht auftreten würde.

Weiterhin soll erwähnt sein, dass sich das Eau de Javel für den Einsatz an diesem Probekörper zwar hervorragend eignete, der großflächige Einsatz an Kulturgütern aber aufgrund des Eintrags von salzbildenden Ionen unterlassen werden sollte.

7.4 Untersuchungen zu präventiven Reinigungsmaßnahmen

Ein Reinigungskonzept als Präventivmaßnahme zeichnet sich vor allem durch seine Nachhaltigkeit und seine Sinnhaftigkeit aus. Nach den vorangegangenen Untersuchungen zur Schadhafteit der an der Freitreppe vorliegenden Flechtenarten wird eine Reinigung nicht nur aus ästhetischer Sicht für sinnvoll erachtet, sondern auch als schadensreduzierende Maßnahme empfunden. Zwar wird hierbei die Sandsteinoberfläche für eine Neubesiedelung vergrößert und erneut freigegeben, aber dies scheint das weniger schlimme Übel, im Vergleich zu den zerstörenden Mechanismen der Flechtenhyphen. Auf eine Reinigung kann nicht, nur aufgrund einer möglichen mikrobiologischen Neubesiedelung, verzichtet werden. Ob diese anschließend eine größere Angriffsfläche zur erneuten Erschließung eines Lebensraums haben oder nicht, ist für die Handläufe der Freitreppe irrelevant, da mehr Besiedelung und dadurch auch mehr Schaden, als momentan vorherrschend, kaum erwartet werden kann.

Nach nur einmaliger Reinigung wiederum würden die Schadmechanismen lediglich pausieren bis die Flechten nachgewachsen sind und in dieser Zeit wiederum eine größere Ablagerungsfläche für Trockendispositionen bieten. Wenn sich darum einmal für eine Reinigung entschieden wurde, muss dieser Zustand durch Reinigungswiederholungen in jährlichen Intervallen aufrechterhalten werden. Reinigungswiederholungen können sich in vielen Fällen sehr einfach gestalten. Besonders die Handläufe der Freitreppe eignen sich, durch ihre unkomplizierte Erreichbarkeit, für einfach durchzuführende Reinigungsmaßnahmen.

Aus diesem Grund soll nachfolgend ein beispielhaftes Konzept zur wiederholbaren Reinigung und präventiven Behandlung der Handläufe der Freitreppe der Alten Nationalgalerie in Berlin erprobt werden. Zu diesem Zweck wurden mehrere Reinigungsprobeflächen angelegt und mit Stoffen versehen, die zum Einen eine möglichst vollständige Entfernung des Bewuchses gewährleisten sollen und zum Anderen eine Neubesiedelung aktiv hemmen sollen. Diese Reinigungsflächen werden

anschließend in zeitversetzten Abständen auf ihre mikrobiologische Erschließung hin untersucht und vergleichend gegenübergestellt, um die Intensität der jeweiligen Neubesiedelung und damit die Wirksamkeit der jeweiligen Behandlungsmethode festzustellen.

7.4.1 Anforderungskatalog

Auf Basis der vorangegangenen Untersuchungen, Recherchen und weiterführender Überlegungen zu diesem Thema wurde vorerst eine Art Anforderungskatalog für ein nachhaltiges Reinigungskonzept zur Entfernung des Flechtenbewuchses an der Freitreppe der Alten Nationalgalerie in Berlin erstellt. Da sowohl an die Erstbehandlung als auch an die Folgebehandlungen und die präventiven Maßnahmen andere Anforderungen gestellt werden, wurde der Katalog in diese drei Teile separiert. Da einzelne Stichworte an diesen Stellen immer zu Unklarheiten führen, wurde der Katalog möglichst verständlich ausformuliert. Die Punkte wurden in Reihenfolge, mit ihrer Wichtigkeit zuerst, aufgelistet

Anforderungen an die Reinigungsmaßnahme als Erstbehandlung

- Die **Sinnhaftigkeit** der Maßnahme muss gewährleistet sein, also alle vernünftigen Bedenken kritisch hinterfragt werden.
- **Jährliche Reinigungsmaßnahmen als Folgebehandlungen** sollten unbedingt geplant und vom Kostenträger akzeptiert sein.
- Die **Durchführbarkeit**, im räumlichen und physischem Sinne, muss gewährleistet sein.
- Es muss mindestens eine **schadensarme**, für das Substrat **stressfreie**, Behandlungsmethode gewählt werden und in Kauf genommene Schäden müssen in Relation mit der Sinnhaftigkeit stehen.
- Die Behandlung sollte möglichst **kostengünstig** sein.
- Die Behandlung sollte **gute Reinigungsergebnisse** liefern, auch im mikroskopischen nicht sichtbaren Bereich.
- Verwendete Mittel zur Abtötung der mikrobiologischen Reste im Porenraum müssen **unschädlich** für Bearbeiter und Steinmaterial sein.
- Eine möglichst **vollständige Tötung** der Reste des Altbefalls muss gewährleistet sein.

Anforderungen an präventive Maßnahmen zur Hemmung der Neubesiedelung

- Die verwendeten Mittel dürfen **nicht giftig für den Bearbeiter** sein.

- Die verwendeten Mittel dürfen **nicht giftig für den Besucher** sein.
- Es muss unbedingt eine **schadensfreie Behandlungsmethode** gewählt werden.
- Die Behandlung sollte **kostengünstig** sein.
- Die Behandlung sollte **wiederholbar** sein.
- Eine möglichst **vollständige Tötung** der Reste des Altbefalls sollte gewährleistet sein.
- Die verwendeten Mittel sollten eine **Neubesiedelung möglichst lange Zeit hemmen**.

Anforderungen an Reinigungsmaßnahmen als jährliche Folgebehandlungen

- Die **Wiederholbarkeit** muss vom Kostenträger gewährleistet sein und sollte technisch unkompliziert umsetzbar sein.
- Die Behandlungsmethode muss **schadensfrei** durchführbar sein.
- Die Behandlung sollte äußerst **kostengünstig** sein
- Ein **guter Reinigungserfolg** muss gewährleistet sein
- Der **Reinigungserfolg muss dokumentiert** werden, da zum Zeitpunkt der Folgebehandlung unter Umständen, makroskopisch, noch keine Notwendigkeit der Behandlung feststellbar gewesen sein könnte.

7.4.2 Reinigungsprobeflächen

Bei der Festlegung der Reinigungsprobeflächen wurde sich auf den vorher erstellten Anforderungskatalog gestützt. Das Konzept für die Reinigungsprobeflächen sollte die Abnahme der Flechten, anschließendes Abtöten der zurückgebliebenen Organismen in den Poren und die darauffolgende Behandlung mit einem Hemmstoff für eine Neubesiedelung von Mikroorganismen vorsehen. Amrit Brinkmann hat sich in ihrer Abschlussarbeit 2010 speziell mit der Reinigung von Flechten auf Sandsteinen befasst. Aufgrund ihrer Ergebnisse¹⁹⁷ und eigenen Praxiserfahrungen wurde das Mikrodampfstrahlverfahren als das Verfahren mit dem höchst zu erwartenden Reinigungserfolg eingestuft und darum für die mechanische Abnahme der Flechten und gleichzeitige Reinigung des Substrats ausgewählt.

¹⁹⁷ Brinkmann 2010, S.100

Um die, im Porengefüge zurückgebliebenen, Mikroorganismen abzutöten, wurde Wasserstoffperoxid gewählt, weil es eine starke Zersetzungsreaktion gegenüber organischem Material aufweist und sich schon nach kurzer Zeit an der Luft wieder in Wasser und Sauerstoff aufspaltet und somit keinerlei schadhafte Rückstände hinterlässt. Andere Materialien die in der Lage sind, Organismen anzugreifen, wie Eau de Javel oder Natriumhypochlorit, wurden in der Arbeit von Amrit Brinkman ebenfalls getestet und zeigten keinen nennenswerten Mehrerfolg¹⁹⁸. Weiterhin und besonders, kamen diese Mittel aufgrund ihrer zu Schadsalzen beitragenden Rückstände in dieser Arbeit nicht in Betracht.

Als Hemmstoff für die mikrobiologische Neubesiedelung an der Freitreppe der Alten Nationalgalerie kommt aufgrund der hohen Kinder- und Besucherzahlen nur ein ungiftiger Stoff in Frage. Die Entscheidung fiel auf einen Hemmstoff mit Titandioxid, weil dieses als Bewuchshemmer schon seit langem in vielen anderen Bereichen wie Beschichtungen für Dächer oder Wintergärten genutzt wird¹⁹⁹ und in der Arbeit von Beate Skasa Lindermeir mit Erfolg auf Sandsteinoberflächen angewandt wurde²⁰⁰ und vor Allem weil Titandioxid „bisher“ als völlig ungiftig deklariert ist²⁰¹. Darum und aus eigenem Interesse zu der Funktionalität und Umsetzbarkeit wurde dieses Material gewählt.

Der tatsächliche Erfolg der Reinigung, der Abtötung und der präventiven Neubesiedelungshemmung wird anschließend mit der Puls-Amplituden-Modulations (PAM)-Fluorometrie gemessen und beurteilt. Da eine mögliche Neubesiedelung erst nach langer Zeit sichtbar sein kann, ist eine sensible Diagnostikmethode von Vorteil. Bei der PAM-Fluorometrie werden kleinste Mengen photosynthesebetreibender Zellen bis unter die ersten Kornlagen sichtbar gemacht²⁰² und dadurch erscheint diese Methode als geeignet für die angestrebte Untersuchung. Die Messungen mit dem PAM-Gerät geschehen einmal direkt nach der Reinigung, um den Erfolg oder Misserfolg darzustellen und noch einmal nach einigen Monaten, um den Erfolg oder das Versagen der antibiogenen Behandlung festzustellen.

¹⁹⁸ Vgl. Brinkmann 2010, S.80

¹⁹⁹ Vgl. Fraunhofer Allianz Photokatalyse 2015

²⁰⁰ Vgl. Skasa-Lindermeir 2007, S.168

²⁰¹ Siehe Datenblatt Titandioxid, Anhang, Kap. 6.2

²⁰² Vgl. Werder und Venzmer 2008, S.21

Folgende Reinigungsflächen wurden angelegt:

- Um einen Vergleich zur Mikrodampfstrahlgereinigten Fläche zu bekommen wurde die erste Fläche (ANG/RP/B) nur mit Wasser, Bürste und Holzspatel gereinigt
- Die zweite Fläche (ANG/RP/D) wurde mit Wasser, Bürste, Holzspatel und dem Mikrodampfstrahlgerät²⁰³ Join Super Steam 3400 SCV gereinigt. Alle folgenden Flächen wurden auf diese Weise vorbehandelt.
- Die dritte Fläche (ANG/PR/DW) wurde zusätzlich zur mechanischen Reinigung mit Wasserstoffperoxid 15%ig behandelt um die übrig gebliebenen Mikroorganismen in den Porenzwischenräumen und unter der Oberfläche abzutöten.
- Die vierte Fläche (ANG/RP/DWT) wurde zusätzlich zur mechanischen Reinigung mit Wasserstoffperoxid 15%ig für die Abtötung und Titandioxid 1%ig in wässriger Lösung, um eine Neubesiedelung zu hemmen, versehen.
- Bei der fünften Fläche (ANG/RP/DT) wurde wiederum nach der mechanischen Reinigung auf eine Behandlung mit Wasserstoffperoxid verzichtet und nur mit Titandioxid behandelt, um auch hier einen möglichen Unterschied in der Wirkungsweise feststellen zu können.

Die Beschriftung der Flächen folgt dem gleichen Prinzip wie schon zuvor mit ANG für Alte Nationalgalerie, RP für Reinigungsprobe und dann jeweils B für Bürste, D für Mikrodampf, DW für Mikrodampf mit Wasserstoffperoxid, DWT für Mikrodampf Wasserstoffperoxid und Titandioxid und DT für Mikrodampf und Titandioxid.

7.4.2.1 Materialien

Als Materialien für das Anlegen der Reinigungsprobenflächen fanden folgende Geräte, Substanzen und Hilfsmittel ihren Einsatz.

Als Hilfsmittel zur wässrigen mechanischen Reinigung wurde ein Eimer Wasser und ein Tafelschwamm benutzt. Der Eimer mit Wasser wurde für die Reinigung mit der Bürste verwendet und der Schwamm, um das Wasser direkt wieder aufzufangen und somit eine Durchfeuchtung und Verschmutzung nicht gewünschter Bereiche zu verhindern.

²⁰³ Siehe Datenblatt Join Super Steam, Anhang, Kap. 6.2

- **Holzspatel**

Der Holzspatel ist für die mechanische Abnahme der Flechten gedacht, da mit ihm unter den Flechtenkörper gefahren werden kann und dadurch die Abnahme vereinfacht wird. Außerdem eignet er sich für jegliche Abnahme von hartnäckigeren Verschmutzungen, bei denen die Bürste versagt. Als Holzspatel wurden keine gewöhnlichen Mundholzspatel verwendet, sondern ein Stück eines Zollstabs, da dieser sich nicht so bruchanfällig bei Durchfeuchtung verhält wie gewöhnliche Mundholzspatel.

- **Bürsten**

Mit der Bürste können großflächig die etwas lockerer verwachsenen Mikroorganismen und aufliegende Schmutzpartikel entfernt werden. Als Bürste kam eine gewöhnliche Wurzelbürste mit Plastikborsten aus dem Baumarkt zum Einsatz. Ihre Borstenfläche war 18 cm lang und 4,5 cm breit.

- **Mikrodampf**

Als Mikrodampfstrahlgerät wurde der Join Super Steam 3400 SCV verwendet, welcher laut Händler einen Dampfdruck von 6,5 bar aufweist. Dieser Druck bezieht sich vermutlich auf den Kesseldruck und der Dampf kommt mit wesentlich geringerem Druck aus der Düse²⁰⁴. Ein stärkeres Gerät wäre für eine Reinigungsmaßnahme, bei welcher hauptsächlich Flechten entfernt werden, von Vorteil, ist aber sehr kostenintensiv.

- **Wasserstoffperoxid (H₂O₂)**

Wasserstoffperoxid ist ein starkes Oxidationsmittel. Es kann mikrobiologische Organismen durch Reduktion zersetzen²⁰⁵. Wasserstoffperoxid neigt dazu in Wasser und Sauerstoff zu zerfallen.



Das dabei entstehende reaktive Sauerstoffspezies, Hyperoxid-Anion O₂⁻, ist seinerseits hoch reaktiv, mit hohem Oxidationspotential und in der Lage organische Zellen

²⁰⁴ Persönlich wird der tatsächliche Arbeitsdruck des Join Supert Steam 3400 SCV auf maximal 3 bar geschätzt.

²⁰⁵ Vgl. Björn Lippold 2015

anzugreifen und zu letalen Zellschädigungen zu führen²⁰⁶. Aus diesem Grund wird erwartet, dass die, nach der Reinigung, übrig gebliebenen Flechtenrückstände durch Wasserstoffperoxid abgetötet werden können und sich dadurch nicht erneut vermehren. Das 30%ige Wasserstoffperoxid der Firma Hedinger wurde mit destilliertem Wasser der Firma Kerndl über das Mischungskreuz auf 15% herunterkonzentriert.

- **Titandioxid (TiO₂)**

Titandioxid ist vielen, vor allem, als Weißpigment ein Begriff und seine beliebte Verwendung aufgrund seiner hohen Lichtreflexion in Anwenderkreisen bekannt. Während es fast 90% des Lichts im sichtbaren Bereich reflektiert, absorbiert es aber fast vollständig den Strahlungsanteil im nahen UV-Bereich²⁰⁷. Durch diese Eigenschaft ist Titandioxid in der Lage eine photokatalytische Reaktion anzustoßen. Als Reaktanden kommen hierfür Gase, organische Flüssigkeiten oder gelöste Moleküle in direkter Umgebung in Frage. Aufgrund seiner Halbleitereigenschaft werden bei der Bestrahlung mit Licht im entsprechenden Wellenbereich Elektronen-Loch-Paare gebildet²⁰⁸. Dieser geladene Zustand des Titandioxids wird im Nanosekundenbereich abgefangen²⁰⁹, indem es ein anderes Elektron an sich bindet, um wieder in den energieärmeren Zustand zu gelangen. (vgl. Abb. 22)

²⁰⁶ Vgl. Posselt 2006, S.166

²⁰⁷ Skasa-Lindermeir 2007, S.13

²⁰⁸ Elektronen werden durch Energiezugabe aus dem Valenzband in das Leitungsband des Moleküls angehoben

²⁰⁹ Vgl. Tölke 2009, S.8

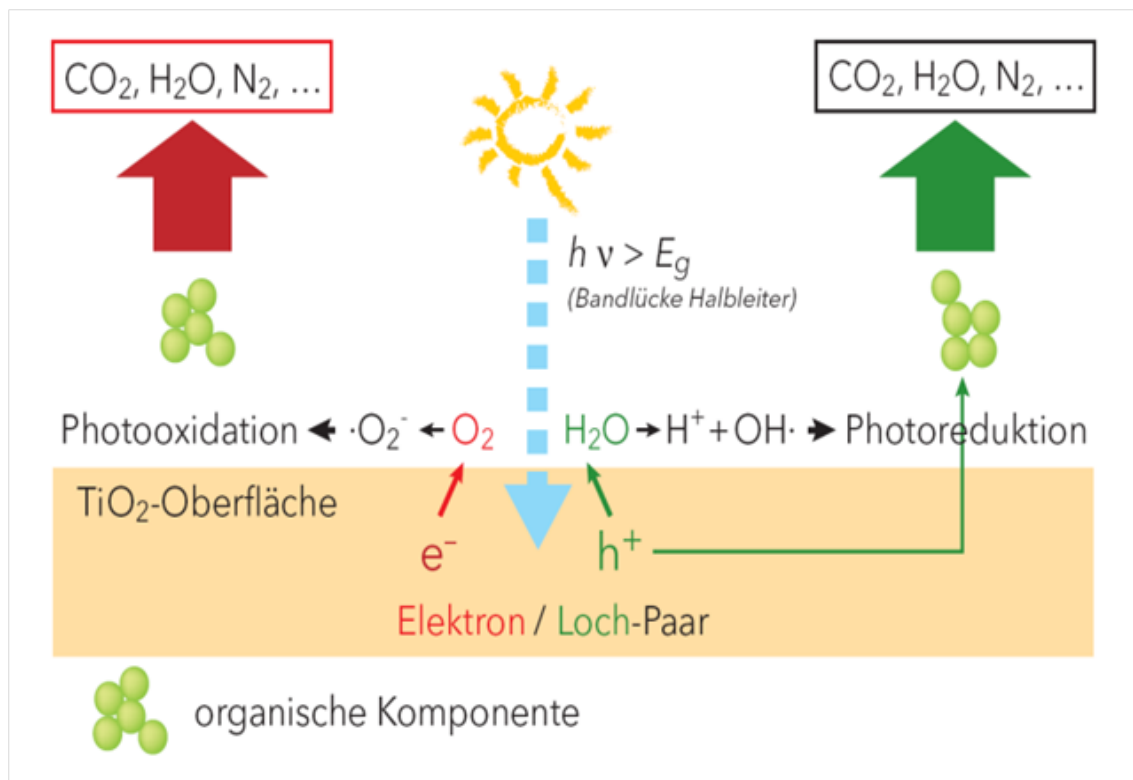


Abb. 22: Schematische Darstellung der Photooxidation

Quelle: www.photokatalyse.fraunhofer.de

Liegt in diesem Moment Sauerstoff an der TiO_2 -Oberfläche an, kann das benötigte Elektron durch die hervorgerufene Oxidationsreaktion direkt aus einem Sauerstoffmolekül gelöst werden und das Titandioxidmolekül hat erneut seinen Ausgangszustand erreicht. Das Sauerstoffmolekül wird seinerseits wiederum durch Abgabe eines Elektrons zu einer reaktiven Sauerstoffspezies und kann, wie oben bei dem Punkt Wasserstoffperoxid bereits beschrieben, zu einer letalen Zellschädigung organischer Stoffe führen²¹⁰. Aufgrund dieser Reaktion und weil das Titandioxid, im Gegensatz zum Wasserstoffperoxid, nicht nur einmalig Anwendung findet und dann zerfällt, sondern als Beschichtung für längere Zeit auf der Steinoberfläche verweilt, wird eine länger anhaltende Hemmung der Neubesiedelung erwartet. In dieser Arbeit wird das Titandioxid in seiner Rutil-Form²¹¹ verwendet obwohl seiner Anatas-Form ein besseres photokatalytisches Reaktionsverhalten zugeschrieben wird²¹². Da Rutil das normalerweise überall verwendete Weißpigment ist und ihm auch eine photokatalytische Wirkung zugeschrieben wird, war es deutlich einfacher und

²¹⁰ Tölke 2009, S.9

²¹¹ Damit ist seine Kristallform gemeint, Rutil und Anatas besitzen tetragonale Kristallstrukturen während die dritte Form, Brookit, rhomboedrisch ist.

²¹² Vgl. Tölke 2009, S.8

kostengünstiger, sich für diese Variante zu entscheiden. Es wurde ein Titandioxid von der Firma Kremer Pigmente verwendet und mit destilliertem Wasser der Firma Kerndl vermengt. Um geeignete Konzentrationen testen zu können, wurde eine 10%ige Suspension erstellt, indem 5 ml/ Vol Titandioxidmehl mit 45 ml destilliertem Wasser vermengt wurden. Die 10%ige Suspension wurde über das Mischungskreuz mit der entsprechenden Menge destilliertem Wasser in die jeweiligen Konzentrationen überführt.

7.4.2.2 Voruntersuchungen zur Festlegung der Konzentrationen

Um geeignete Konzentrationen der anzuwendenden Mittel festlegen zu können, wurden einige Voruntersuchungen durchgeführt. Hintergrund war, eine möglichst hohe Konzentration für das Wasserstoffperoxid zu finden, um einen möglichst großen Effekt zu haben, ohne eine zu starke Oxidation der Eisenmoleküle im Sandstein zu erhalten und eine mögliche Verfärbung ausschließen zu können. Das Titandioxid wiederum sollte so gering wie nötig eingestellt werden, damit kein Weißschimmer auf der Sandsteinoberfläche entsteht. Außerdem sollte möglichst eine immer gleiche Auftragsmenge gewährleistet werden.

Als Voruntersuchung für die Wasserstoffperoxidkonzentrationen wurde auf zwei verschiedenen Sandsteinen verschiedene Konzentrationen von 30- 7,5% getestet. Hierfür wurde das Wasserstoffperoxid in Streifen nacheinander aufgetragen und auf eine mögliche Verfärbung geachtet. Als Probekörper dienten ein Postaer und ein Cottaer Sandstein, da keine Nebraer Varietät vorhanden war. Es ließ sich keinerlei Reaktion mit jedweder Konzentration feststellen.

Das Titandioxid wurde ebenfalls in verschiedenen Konzentrationen von 5- 1%ig in Streifen nacheinander auf dieselben Probekörper aufgetragen. Als deutlich wurde, dass sich maximal die 1%ige Lösung eignen würde, wurde eine andere Testfläche angelegt, auf welcher der Auftragsablauf festgelegt werden sollte. Hierfür wurde ein 6er Storch Rundpinsel mit einem Durchmesser von etwa 4,5 cm gewählt, da es (aus praktischen Gründen) möglich sein sollte, eine größere Fläche in kürzerer Zeit anzulegen. Die Borsten wurden auf 2,5 cm gekürzt, um steifere Borsten zu erlangen. Dann wurde die gesamte Borstenlänge in die frisch geschüttelte 1%ige Titandioxid Suspension getunkt. Die so aufgenommene Menge wurde auf 100 cm² eingestrichen, bis der Pinsel keine Flüssigkeit mehr abzugeben hatte. Auf diese Weise sollten die später ca. 900 cm² großen Flächen gleichmäßig beschichtet werden können. Auf den Probekörpern war anschließend ein sehr leichter weißer Schleier erkennbar, der mit

dem Fotoapparat kaum festzuhalten war (vgl. Abb. 23) und wie er ebenfalls bei Beate Skasa-Lindermeir beobachtet wurde²¹³.



Abb. 23: Beschichtungsprobe mit Titandioxid, in der Mitte des Steins ist das 10x10 cm beschichtete Feld zu erkennen. Quelle: D. Ohnmeiß

Der von ihr beobachtete Schleier verlor sich allerdings im Laufe der Zeit so, dass er für den hier zu erzielenden Effekt akzeptabel erschien. Da das Titandioxid nicht an die Oberfläche gebunden wird, kann unter freier Bewitterung von einer Reduzierung bis Entfernung des Schleiers ausgegangen werden.

7.4.2.3 Untersuchungsablauf

Es wurden, wie oben beschrieben, fünf Probeflächen angelegt. Die Flächen wurden an einer Stelle gewählt, an welcher von einer Neubesiedelung innerhalb der nächsten drei Monate ausgegangen werden konnte. Es wurden darum Handläufe ausgewählt, welche einen Bewuchs von 50- 80% der Oberfläche aufwiesen, nebeneinander lagen und in einem dem Besucher nicht zugänglichen Bereich lagen. Dafür eigneten sich die

²¹³ Skasa-Lindermeir 2007, S.94

Handläufe des Bauteils R.²¹⁴ Die Flächen sollten jeweils 30 x 30 cm groß sein und einen Abstand von mindestens 15 cm zueinander haben. Dieser Abstand wurde gewählt, um eine Verfälschung der Ergebnisse durch Überfließen der verwendeten Mittel während der Anwendung zu verhindern. Die Handläufe der Freitreppe sind aus Nebraer Sandstein. (Die zu den Probeflächen angefertigten Protokolle mit weiteren Angaben können im Anhang²¹⁵ nachgelesen werden.)

Der Ablauf bestand im Wesentlichen aus vier Schritten, Entfernung der Flechtenkörper, Reinigung der Flächen, Nachbehandlung mit Wasserstoffperoxid und die Nachbehandlung mit Titandioxid.

Die Flechtenkörper mussten aufgrund ihrer starken Haftung an den Untergrund separat behandelt werden. Außerdem waren die Flechten im trockenen Zustand noch widerstandsfähiger. Darum wurden alle fünf Flächen vorher angefeuchtet um eine geringere mechanische Krafteinwirkung nötig zu machen. Die Flechten wurden anschließend einzeln mit dem Holzspatel von der Steinoberfläche abgenommen indem möglichst zwischen Stein und Flechtenkörper gefahren wurde. Auf diese Weise ließen sich die Flechtenkörper zwar entfernen, aber es blieben auch noch viele Rückstände zurück (vgl. Abb.24).

²¹⁴ Zu diesem Zeitpunkt war noch nicht klar, dass die zuerst geplante ATP- Messung durch die weitaus komplizierter anzuwendende PAM- Messung ersetzt werden würde, sonst wäre kein schräger Handlauf gewählt worden.

²¹⁵ Vgl. Probeflächenprotokolle, Anhang, Kap. 3.2

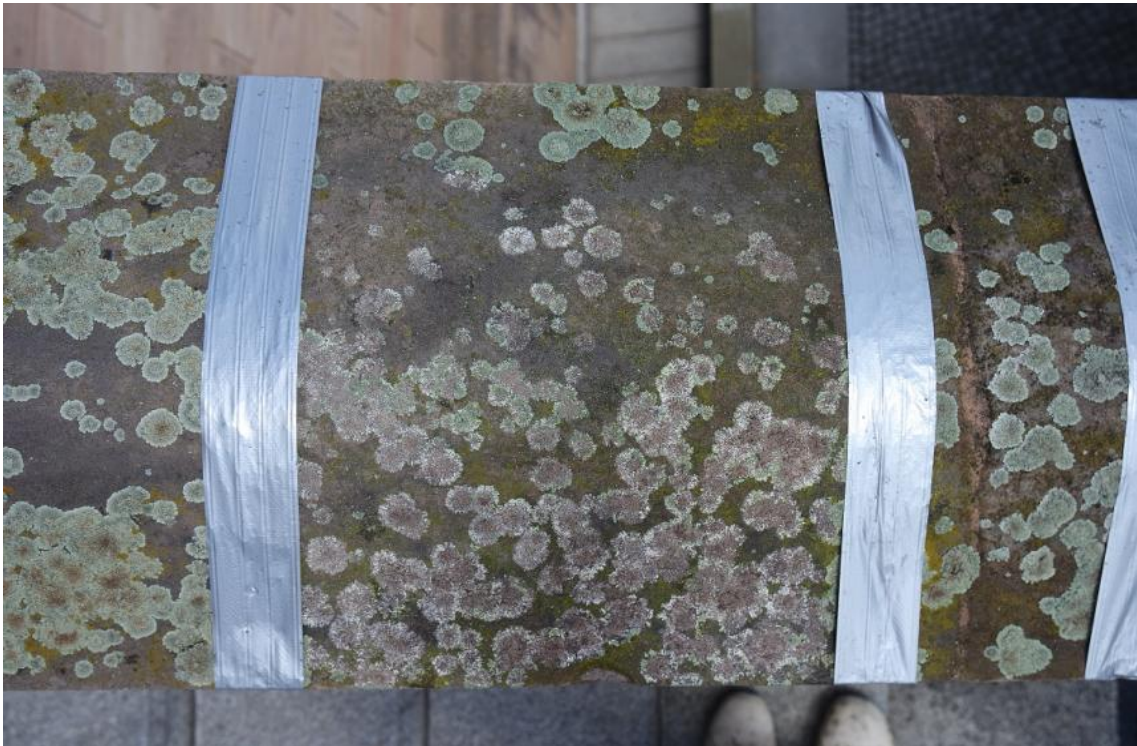


Abb. 24: Zwischenzustand Reinigung mit Holzspatel.

Quelle: D. Ohnmeiß

Im nächsten Schritt wurde alle Flächen mit der Wurzelbürste und Wasser gereinigt. Unterstützend wurde, bei besonders hartnäckigen Anhaftungen und Flechtenüberresten, nochmals der Holzspatel verwendet. Die Fläche, welche nur mit Bürste gereinigt werden sollte, erfuhr an dieser Stelle eine gründlichere Reinigung als die anderen (vgl. Abb. 25).



Abb. 25: Endzustand Reinigung mit Bürste.

Quelle: D. Ohnmeiß

Im Anschluss daran wurden die vier übrigen Flächen mit dem Mikrodampfstrahlgerät in Kombination mit dem Holzspatel gereinigt. Auch mit dieser Reinigungsmethode konnten nicht alle Rückstände entfernt werden. Das bedeutet es blieben noch weiße Ränder als Flechtenüberreste auf den Sandsteinoberflächen sichtbar (vgl. Abb. 26).



Abb. 26: Endzustand Reinigung mit Mikrodampfstrahlgerät.

Quelle: D. Ohnmeiß

Als nächstes wurden die zwei ausgewählten Flächen mit Wasserstoffperoxid 15%ig behandelt (vgl. Abb. 27). Aufgrund der Voruntersuchungen entschied man sich für eine 15%ige Lösung. Zwar haben die Probekörper bei der 30%igen Lösung keinerlei Verfärbungen gezeigt, jedoch ist die genaue Reaktion mit den Eisenanteilen im Sandstein nicht gänzlich absehbar. Des Weiteren erschien eine 15%ige Lösung als ausreichend reaktionär für die im Korngefüge zu erwartenden sehr feinen Flechtenhyphen. Es wurden genau 50ml 15%ige Wasserstoffperoxidlösung mit einem Pinsel möglichst nass und gleichmäßig auf die 900 cm² verteilt. Dies bedeutete etwa drei bis vier Aufträge bis 50ml aufgebraucht waren. Während des Auftrags waren keinerlei Schaumbildung noch andere Reaktionen sichtbar.

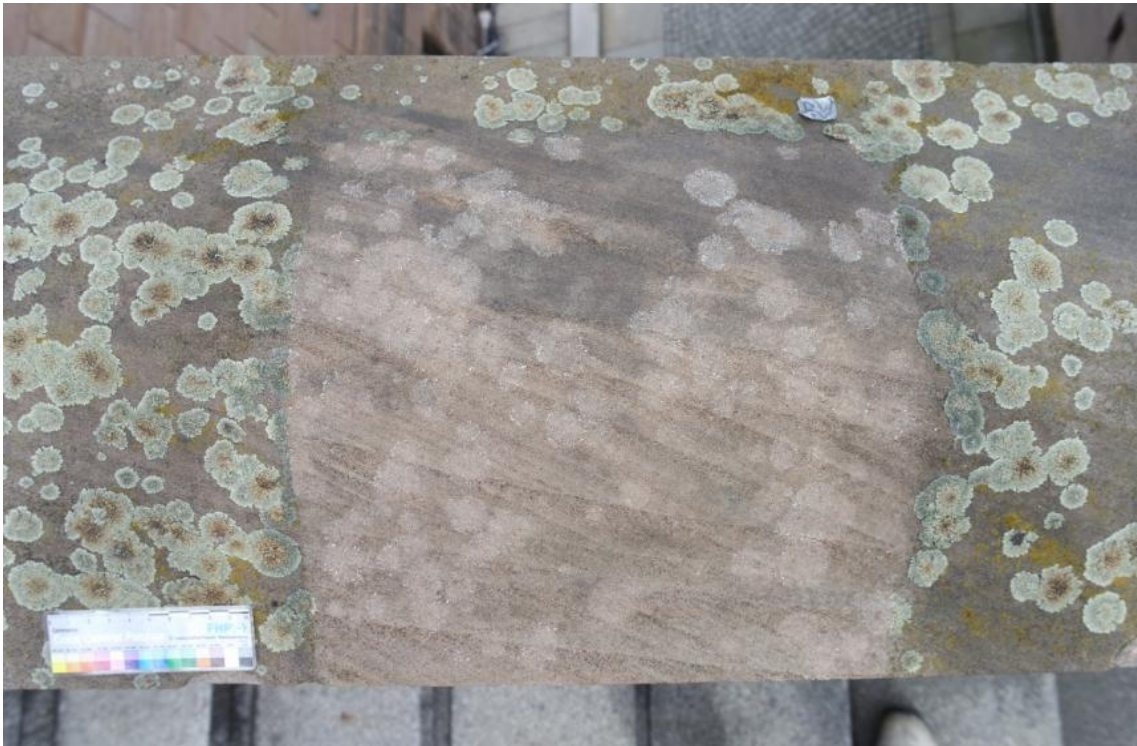


Abb. 27: Endzustand Reinigung mit dem Mikrodampfstrahlgerät und Behandlung mit Wasserstoffperoxid.
Quelle: D. Ohnmeiß

Zuletzt wurden zwei der Flächen mit der 1%igen Titandioxidsuspension beschichtet (vgl. Abb. 28 u. 29). Wie oben beschrieben, wurden jeweils 100 cm², pro Eintunken in die aufgeschüttelte Suspension, beschichtet und auf diese Weise die gesamten 900 cm² beider Flächen nach und nach behandelt. Nachdem die Feuchtigkeit weggetrocknet war, konnte festgestellt werden, dass ein erheblicher Weißschleier auf der Oberfläche sichtbar wurde. Eine direkte Reinigungsprobe zeigte, dass sich das Titandioxid mit Wasser, Bürste und Schwamm problemlos wieder auf eine unsichtbare Menge reduzieren ließ. Weiterhin wurde von einer Reduzierung des Weißschleiers durch Regen ausgegangen. Auch konnte eine mögliche Laufnasenbildung durch Regen ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund wurden die angelegten Flächen so belassen, um eine möglichst große Wirkung, auf die erwartete Neubesiedelung zu erzielen.



Abb. 28: Endzustand Reinigung mit dem Mikrodampfstrahlgerät und Behandlung mit Titandioxid.

Quelle: D. Ohnmeiß

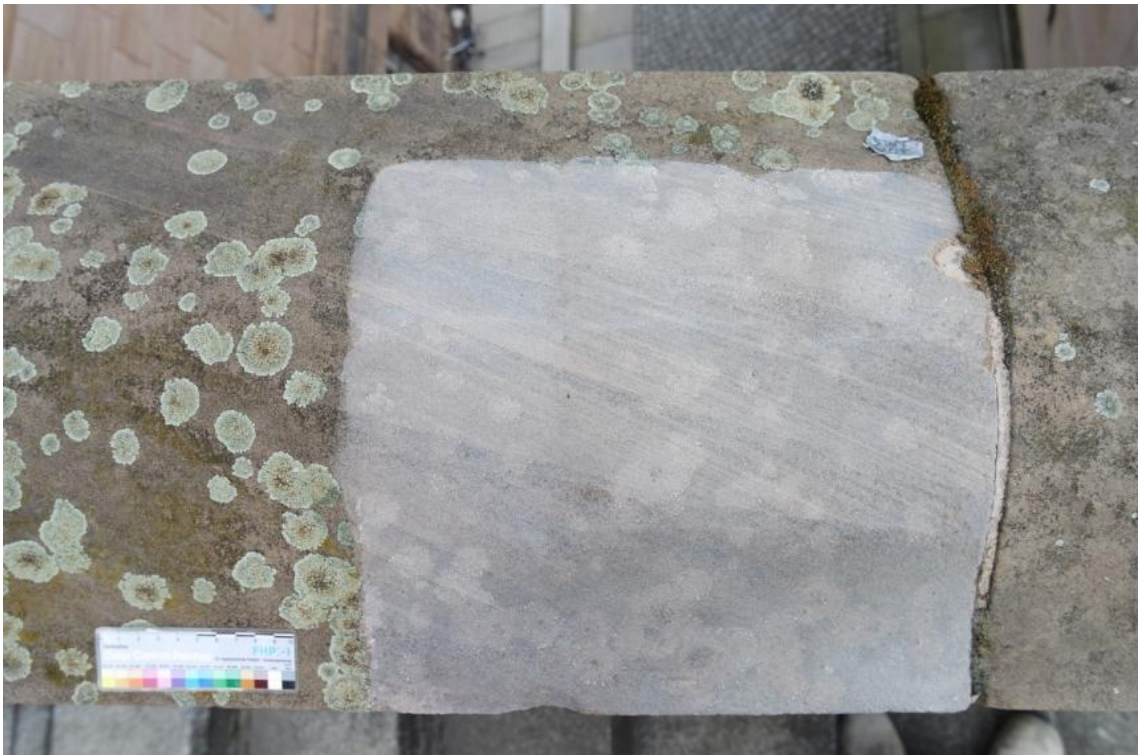


Abb. 29: Endzustand Reinigung mit dem Mikrodampfstrahlgerät und Behandlung mit Wasserstoffperoxid und Titandioxid.

Quelle: D. Ohnmeiß

Die tatsächlichen Reinigungsergebnisse werden in Kapitel 7.4.3 behandelt in welchem der Reinigungserfolg mit der Puls-Amplituden-Modulations-Fluorometrie gemessen wird.

7.4.2.4 **Diskussion der Untersuchung**

Der Ablauf der Reinigung ließ sich problemlos durchführen und die einzelnen Maßnahmen erscheinen vom Zeitaufwand auch auf dem freien Markt als wirtschaftlich durchführbar. Die gesamte Maßnahme hat etwa vier Stunden in Anspruch genommen, wovon 1,5 Stunden auf die tatsächliche Behandlung der Flächen entfallen. Die Abnahme der Flechten gestaltet sich hierbei als die zeitaufwendigste Maßnahme. Es wird zu einem Mikrodampfstrahlgerät geraten, welches wenigstens annähernd einen Druck von 4 bar an der Düsenspitze aufweist. Damit sollten die Flechten leichter und ohne vorhergehende Behandlung abnehmbar sein. Auch wäre der umsichtige Einsatz eines Hochdruckwasserstrahl-Gerätes mit regulierbarem Druckventil denkbar. Vorher müsste hierfür allerdings die Beschaffenheit der Oberflächen im Einzelnen untersucht werden.

Bei der Behandlung mit Wasserstoffperoxid gilt die hydrophobe Eigenschaft der Oberflächen, nach der Reinigung zu beachten. Vielleicht empfiehlt es sich einige Tage zu warten bis und ob diese nachgelassen hat. Die hydrophobe Eigenschaft, die Flechten nach einer Reinigung auf den Gesteinsoberflächen hinterlassen ist bekannt²¹⁶, aber der Umgang damit nicht ausreichend geklärt. Bei der Behandlung mit Wasserstoffperoxid konnte diese Eigenschaft beobachtet werden. Aus diesem Grund dauerte der Auftrag der 50 ml etwas länger und ein Abperlen der Flüssigkeit in unerwünschte Bereiche war nicht immer vollständig zu verhindern.

Die Behandlung mit der Titandioxidsuspension unterlag mehreren Missverständnissen. Dadurch, dass die Behandlung schnell geschehen musste, um einen möglichst langen Bewuchszeitraum zu gewährleisten, wurden erst im Nachhinein einige wichtige Details zu diesem Thema bemerkt. So wurde beispielsweise erst im Nachhinein entdeckt, dass es sich bei den sonst angewendeten Titandioxidsuspensionen um Nanopartikel als Feststoffe handelt. Aufgrund der wesentlich kleineren Molekülgrößen ist dabei eine transparentere Beschichtung möglich als mit den Molekülgrößen des Pigmentes. Aus diesem Grund erschien die hier behandelte Oberfläche wesentlich weißer als in der Arbeit von Skasa-Lindermeir. Weiterhin wurden die Probekörper der

²¹⁶ Vgl. Brinkmann 2010, S.8

Voruntersuchungen scheinbar ungünstig gewählt, weil sich bei ihnen, beim Postaer wegen der größeren Poren und beim Cottaer wegen des grauen Erscheinungsbildes, der Weißschimmel wesentlich geringer gestaltet als im anschließenden Realversuch. Vor allem, da die Handläufe aus Nebraer Sandstein auf ihren Oberflächen leichte Verschwärzungen zeigen und sich somit das Weiß noch stärker abhebt. Auch hat sich der Film nach drei Monaten und vielen Regenzyklen noch nicht sichtbar reduziert. Andererseits werden die abschließenden Untersuchungen hoffentlich Ergebnisse liefern, auf welchen man aufbauen kann.

7.4.3 Puls-Amplituden-Modulations (PAM)-Fluorometrie

Chlorophyll ist als natürlicher Farbstoff Bestandteil aller Organismen, die Photosynthese betreiben²¹⁷. Die Eigenschaft der Chlorophyll-Fluoreszenz macht es möglich, dass Chlorophyll durch Energiezufuhr mit entsprechenden Messgeräten sichtbar zu machen. Dabei wird ein durch Lichteinstrahlung elektronisch angeregtes Chlorophyllmolekül in einen energieärmeren Zustand versetzt. Die dabei emittierte Energie des Moleküls wird in Form von Licht abgegeben²¹⁸, welches als Fluoreszenz gemessen werden kann. Mit der PAM-Fluorometrie können anhand dieser Fluoreszenz, Chlorophyllkonzentrationen gemessen werden, die mit dem bloßen Auge erst ein Jahr später sichtbar wären²¹⁹. Auf diese Weise ist es möglich Bewuchs festzustellen bevor er sichtbar vorhanden ist. Die PAM-Messgeräte werden heute von der Firma Walz hergestellt und vertrieben. In dieser Arbeit wurde ein Gerät aus dem Mikrobiologielabor der HAWK aus Hildesheim ausgeliehen. Bei dem Gerät handelt es sich um die Imaging-PAM-Mini-Version. Das Gerät besteht aus der Steuereinheit (IMAG-CG) mit Batterieblock und Prozessor, dem Messkopf (IMAGING-PAM-MINI), mehreren Anschlusskabeln und einem, in diesem Fall im Leihumfang enthaltenem, HP-Laptop mit der vorinstallierten Software ImagingWin zur Datenvisualisierung (vgl. Abb. 30).

²¹⁷ Werder und Venzmer 2008, S.22

²¹⁸ Vgl. Geier 2011, S.33

²¹⁹ Werder und Venzmer 2008, S.32



Abb. 30: PAM-Messung vor Ort



Abb. 31: LED-Array des IMAGING PAM MINI



Abb. 32: Kamera des IMAGING-PAM-MINI

Quelle: D. Ohnmeiß

Der Messkopf besteht aus der LED-Anordnung (IMAG-MIN/B LED-array, vgl. Abb. 31) an welcher auch der Aluminiumrahmen für die Messfeldeingrenzung angebracht wird und der Kamera (CCD Camera IMAG-K6, vgl. Abb. 32) welche die Daten digitalisiert und über eine Firewire-Schnittstelle an den Laptop überträgt²²⁰. Das Anregungslicht des IMAG-PAM-MINI/B wird von blauen LEDs mit einer Wellenlänge von 460nm geliefert. Die Photodiode der Kamera, zur Detektion der abgestrahlten Fluoreszenz, verfügt über einen Filter für reflektierendes und gebrochenes Anregungslicht und verhindert dadurch mögliche Interferenzen. Die LEDs sowie die Photodiode sind so angeordnet, dass eine Fläche von 24 x 32 mm in 7 cm Entfernung gemessen wird. Für die Einhaltung dieser Parameter sorgt ein fest installierter Alurahmen, welcher vorne am Messkopf angebracht ist. Die Messungen werden in einer Software an einem Laptop verarbeitet und angezeigt. Als Ergebnis wird eine Visualisierung der Oberfläche als Farbbild erstellt und ein Zahlenwert für die Intensität der Besiedelung der gemessenen Fläche angegeben. Für eine zuverlässige vergleichende Prüfung mehrerer Messfelder sind zwei Voraussetzungen wichtig. Alle Messfelder müssen eine

²²⁰ Vgl. Walz 2014, S. 28

vollständige Hydratisierung der mikrobiologischen Zellen erfahren haben und vergleichbare Lichtverhältnisse vor der Untersuchung aufweisen. Bei Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass unterschiedliche Hydratisierung starke Schwankungen in den Messergebnissen hervorrufen kann und wiederum direkte Sonneneinstrahlung im Vergleich zur 10 minütigen Dunkeladaption keine messbaren Unterschiede zur Folge hatte. Obwohl das IMAGING-PAM-MINI im Freiluftversuch unter direkter Sonneneinstrahlung angewendet werden kann²²¹ sollte für Vergleichsmessungen eine Dunkeladaption geschehen. Die Idee dahinter ist, vergleichbare Lichtverhältnisse auf den Prüfflächen zu erreichen und Verfälschungen durch einstrahlendes Sonnenlicht zu verhindern. Sonnenlicht würde theoretisch zu einer Molekülanregung der Zellen führen und könnte dann durch zusätzliche Fluoreszenz das Ergebnis verfälschen.

7.4.3.1 **Materialien und Untersuchungsablauf**

Als Materialien kamen das genannte PAM-Gerät inklusive Laptop, mehrere Streifen Klebeband, eine Gloria-Wassersprühflasche, ein verstärkter Pappkarton und ein Abdunklungstuch 2 x 2 m zum Einsatz. Es sollen drei Messungen pro Reinigungsfläche durchgeführt werden. Auf diese Weise ist ein guter Durchschnittswert der Besiedelung für alle Flächen zu erwarten. Um die gleichzeitige Handhabung der Materialien einhalten zu können, wurde eine zweite Person involviert.

Um dieselben Stellen drei Monate später wieder bemessen zu können, wurden spezielle Stellen festgelegt und dokumentiert²²². Es wurde immer 14 cm von der Vorderkante des Handlaufs gemessen und die erste Messung orientierte sich an der rechten Seitenkante des Reinigungsfeldes. Für die zweite Messung wurde der Messkopf mit der linken Seite seines Rahmens direkt an die Stelle gesetzt, an welcher bei der Messung zuvor die rechte Seite seines Rahmens platziert war. Auf diese Weise wurden alle drei Messfelder pro Reinigungsfläche festgelegt.

Um eine vergleichende Dunkeladaption zu gewährleisten, wurden die Testfelder 10 Minuten mit einem Klebebandstreifen abgedunkelt. Dabei wurden 35 cm der Klebefläche des Klebebands abgeklebt, um wiederum eine unerwünschte Abnahme der Mikrobiologie auf den Flächen zu verhindern. Der Messkopf wurde in einem Karton aufbewahrt durch welchen man an der Seite mit einer Hand hindurchfassen konnte. Um ein Reinigungsfeld zu messen, wurde der Klebestreifen entfernt, die Fläche nass

²²¹ Vgl. Walz 2014, S.38

²²² Vgl. Probenflächenprotokolle, Anhang, Kap. 3.2

gesprüht und mit der freien Hand der Karton mit dem Messkopf auf die Fläche gestellt. Durch ein Loch im Karton konnte der Messkopf mit einer Hand in Position gehalten werden, ohne zusätzlichen Lichteinfall zu erhalten. Diese Schritte erfolgten in schneller Aufeinanderfolge, um eine mögliche unerwünschte Anregung der mikrobiologischen Zellen durch Sonnenenergie gering zu halten.

Auf diese Weise wurden pro Reinigungsfläche drei Messungen gemacht. Die Messergebnisse wurden in der Software verarbeitet, der maximal gemessene Wert und der Durchschnittswert der Intensität notiert und die Visualisierung als jpg-Datei gespeichert.

7.4.3.2 **Diskussion der Untersuchung**

Der Ablauf ließ sich zu zweit problemlos einhalten und die Messungen schienen durchaus vergleichbare Werte zu liefern. Ursprünglich war eine höherer Sonnenlichtausschluss und der Ablauf wie folgt geplant: Es sollte eine 10 minütige Dunkeladaption der zu messenden Flächen durch den Pappkarton und das Abdunklungstuch darum herum geschaffen werden. Gleichzeitig sollten die Flächen feucht gehalten werden und der Messkopf auf der gewellten Schräge des Handlaufs an der selben Stelle verweilen. Dies sollte für jede Fläche drei Mal wiederholt werden. Auf diese Weise wurden 6 Messungen gemacht und somit zwei der fünf Flächen gemessen. Aufgrund des starken Windes konnte die Verdunklung mittels Abdunklungstuch jedoch nicht weiter gewährleistet werden. Da auch die angefeuchteten Flächen wegen der langen Wartezeiten austrockneten, wurde der Versuchsablauf, wie oben beschrieben, geändert. Die Dunkeladaption wurde ursprünglich für essentiell wichtig empfunden und sollte darum unter besten Bedingungen hergestellt werden. Nachdem der Wind den ursprünglichen Ablauf nicht mehr zuließ, wurden mehrere Felder vergleichend gemessen, um den tatsächlichen Einfluss der direkten Sonneneinstrahlung auf die Messfelder festzustellen. Es konnten hierbei keine messbaren Unterschiede zwischen Verdunkeltem und direkt bestrahlten Zustand gemessen werden. Darum wurde die Messung erneut gestartet und auf das Abdunklungstuch verzichtet. Ohne Tuch konnte auch der Prüfkopf auf der gewellten schrägen Oberfläche des Handlaufs problemlos mit der Hand festgehalten werden, ohne ihn wie vorher mit doppelseitigem Klebestreifen fixieren zu müssen. Mit dem modifizierten Ablauf ließen sich die erforderlichen 15 Messungen in nur einer Stunde abschließen. Wichtig bei der Verarbeitung mit der Software sind die Einstellungen. Dabei ist unbedingt darauf zu achten, dass bei vergleichenden Messungen dieselben

Einstellungen vorzunehmen sind, da sonst kein Vergleich der einzelnen Messungen geschehen kann.

7.4.3.3 **Ergebnis**

Die Ergebnisse der Messung wurden in einzelnen Protokollen²²³ festgehalten und sind auf der CD als originale JPEG-Datei anzusehen. In nachfolgender Tabelle 6 werden die Ergebnisse dargestellt. In der Tabelle wird rechts das jeweilige Reinigungsfeld angegeben und mit welchen Mitteln es behandelt wurde. Darauf folgen Abbildungen der Reinigungsfläche und dann der Visualisierung der gemessenen photosynthesebetreibenden Zellen. Dabei gilt schwarz als unbesiedelt und je heller desto mehr aktive Zellen sind messbar. Die Farbskala erläutert die jeweiligen Steigungen. Über den Abbildungen wird der Zahlenwert der Intensität der Besiedelung auf der jeweiligen Messfläche angegeben. Die letzte Spalte zeigt den Mittelwert der Besiedelungsintensität der drei jeweiligen Messfelder. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass der Reinigungserfolg sich in der zu erwartenden Reihenfolge widerspiegelt. Die am meisten besiedelte Fläche ist die Fläche, welche nur mit Wasser und Bürste gereinigt wurde. Darauf folgt die mikrodampfstrahlgereinigte Fläche ohne eine Zusatzbehandlung und die Fläche die zusätzlich mit Titandioxid beschichtet wurde. Am wenigsten besiedelt sind die beiden mit Wasserstoffperoxid behandelten Flächen.

Tabelle 6: Zusammenfassung der Ergebnisse der PAM-Fluorometriemessung nach der Reinigung
Quelle: D. Ohnmeiß

ANG/RP/B		B1 0,054	B2 0,064	B3 0,028	Mittelwert
Bürste und Wasser					0,048
ANG/RP/D		D1 0,040	D2 0,014	D3 0,054	
Mikrodampfstrahlgerät					0,036

²²³ Vgl. Probeflächenprotokolle, Anhang, Kap. 3.2

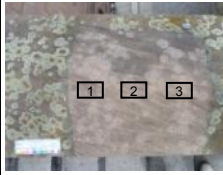



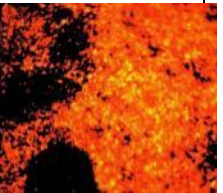
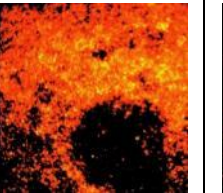
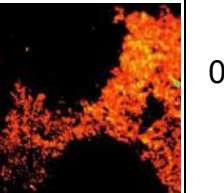
<p>ANG/RP/D W</p> <p>Mikro- dampf- strahlgerät Wasser- stoffperoxid</p>		DW1 0,017	DW2 0,020	DW3 0,010	0,015
<p>ANG/RP/D T</p> <p>Mikro- dampf- strahlgerät, Titandioxid</p>		DT1 0,026	DT2 0,022	DT3 0,024	0,024
<p>ANG/RP/D WT</p> <p>Mikro- dampf- strahlgerät, Wasser- stoffperoxid Titandioxid</p>		DWT1 0,011	DWT2 0,012	DWT3 0,014	0,012

Tabelle 7 spiegelt die Messungen des Reinigungsfeldes ANG/RP/B nach drei Monaten wieder. Die Abbildungen gleichen sich sehr und es werden im Grunde dieselben Intensitäten gemessen wie drei Monate zuvor.

Tabelle 7: Ergebnisse der PAM-Messung ANG/RP/B nach drei Monaten

Quelle: D. Ohnmeiß

<p>ANG/RP/ B (3M)</p> <p>Bürste und Wasser</p>		B1 0,054	B2 0,053	B3 0,034	0,047
					

7.4.3.4 **Diskussion der Ergebnisse**

Die Messungen direkt nach der Reinigung zeigen, dass Wasserstoffperoxid durchaus die richtige Wahl ist um Hyphenreste unter der Gesteinsoberfläche fast vollständig abzutöten. Auch wird deutlich, dass das Mikrodampfstrahlgerät nochmals mehr Reinigungserfolg liefert als nur Wasser und Bürste. Es bleibt festzuhalten, dass eine Entfernung der Flechten an den Handläufen der Alten Nationalgalerie in Berlin, mit den hier angewendeten Mitteln, fast rückstandslos möglich ist.

Die Messungen drei Monate später konnten leider aufgrund eines Geräteausfalls nicht vollständig durchgeführt werden. Die einzig verwertbaren Messungen lassen jedoch einen Vergleich der unbehandelten Fläche (mit der Bürste gereinigt) zu. Auf dieser Fläche konnte nach drei Monaten keine Neubesiedelung gemessen werden. Darum ist davon auszugehen, dass auch auf den anderen Flächen bisher keine messbare Neubesiedelung stattgefunden hat. Auf diese Möglichkeit wurde der Autor im Vorfeld hingewiesen. Aber darum keine Probeflächen anzulegen wurde nicht als sinnvoll erachtet. Nun können die Flächen zu einem späteren Zeitpunkt erneut gemessen werden.

Prinzipiell können die Ergebnisse als durchaus zuversichtlich gewertet werden. Immerhin ist man in der Lage, die Flechten fast rückstandslos zu entfernen und eine Neubesiedelung kann unter Umständen durch kostengünstige Folgemaßnahmen verhindert werden. Außerdem bliebe ohne die Messungen mit dem PAM-Gerät der Erfolg des Wasserstoffperoxids weiterhin fragwürdig.

7.5 Zusammenfassung der Untersuchungen der Mikrobiologie

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Befürchtungen zu den schadensauslösenden Prozessen der Flechten durch die Laboruntersuchungen bestätigt wurden. Es konnten Eindringtiefen der Flechtenhyphen über 0,6 cm gemessen werden und es muss von mehr ausgegangen werden. Der tatsächliche Oberflächenverlust durch schädigenden Einfluss der Flechten konnte zwar nicht eindeutig bewiesen werden, muss aber dennoch angenommen werden. Zum einen weil die vorgenommene Visualisierung eine Gesteinsoberfläche mit eindeutigen Gruben zeigt welche von Frau Prof. Dr. Petersen als Pittings durch Flechten verursacht betitelt wurden. Und zum anderen weil dieser Mechanismus der Flechten von Mikrobiologen bereits in weniger porösem und härterem Gestein nachgewiesen wurde, und bei der Anzahl und Dauer des Flechtenbewuchses auf den Handläufen der Freitreppe der Alten Nationalgalerie in Berlin darum ebenso davon ausgegangen werden muss.

Diese Erkenntnisse machen eine Reinigungsmaßnahme nicht nur aus ästhetischen Gründen sinnvoll, sondern auch aus kulturellerhaltenden Gründen unbedingt notwendig. Um zukünftig Schäden dieser Art zu verhindern, sind außerdem Reinigungsmaßnahmen in regelmäßigen Intervallen notwendig.

Die Reinigungsprobenflächen haben gezeigt, dass sich die Flechten mit relativ normalem Reinigungsaufwand bis auf ein gutes Minimum reduzieren lassen. Der Effekt der Wasserstoffperoxid-Behandlung zeigte sich als enorm und ist bei einer sinnvollen Flechtenreduzierung nicht außer Acht zu lassen. Leider konnte der hemmende Effekt des Titandioxids noch nicht gemessen werden, weil sich trotz der sensiblen Messtechnik der PAM-Fluorometrie eine messbare Neubesiedelung offenbar mehr Zeit lässt als von Mai bis August. Andererseits zeigt dies, dass einfachste Reinigungswiederholungen, wie jährliches Abspritzen der Handläufe mit Wasser und bestimmten Druck, unter Umständen eine Neubesiedelung bereits verhindern könnten. Des Weiteren ist der Einsatz der hier verwendeten Titandioxidsuspension (1%ig) aufgrund der starken Weißfärbung an keinem Kulturgut denkbar. Die Anwendung der Suspensionen mit Nanopartikel ist wiederum aus umweltspezifischen Gründen kritisch zu hinterfragen.

8. Empfehlungen

In diesem Kapitel soll auf die festgestellten Schäden und die untersuchten Schadensmechanismen eingegangen werden und Empfehlungen für den Umgang mit ihnen ausgesprochen werden. Die Empfehlungen werden über die im Schadensglossar (SG) festgestellten Schäden²²⁴ sowie über die Salzproblematik und den mikrobiologischen Bewuchs ausgesprochen und orientieren sich sowohl an den Ergebnissen der gemachten Untersuchungen, als auch am gängigen praktikablen Umgang mit den jeweiligen Schäden. Es werden Empfehlungen für kommende Sanierungsmaßnahmen und für präventive Folgemaßnahmen vorgeschlagen. Für eine deutlichere Veranschaulichung ist es sinnvoll, das Schadensglossar wie auch eine Bauplanübersicht²²⁵ zur Hand zu haben.

8.1 Empfehlungen für kommende Sanierungsmaßnahmen

Die Vorschläge zum Umgang mit einigen Schäden in einer kommenden Sanierungsmaßnahme werden in Reihenfolge der Dringlichkeit und Sinnhaftigkeit aufgelistet, angefangen mit dem Notwendigsten.

8.1.1 Notsicherungen

Einige wenige Stellen bedürfen sofortiger Notsicherungsmaßnahmen (vgl. SG, Bild-Nr.:09). Es wurden einige Stellen entdeckt, wie auf oben genannter Abbildung sichtbar, welche zentimeterdicke Schalen im ornamentierten Bereich aufweisen. Diese Schalen sind absturzgefährdet und würden beim Herunterfallen aus dieser Höhe höchstwahrscheinlich am Boden in viele Teile zerspringen und wären für immer verloren. Des Weiteren befindet sich dieses Beispiel im für Besucher zugänglichen Bereich und könnte womöglich auch zu Personenschaden führen. Außerdem besteht die Möglichkeit, dass es sich bei dieser Platte noch um eine originale Brüstungsplatte aus den 1870er Jahren handelt.

Aus diesem Grund sollten absturzgefährdete Teile so schnell wie möglich gesichert werden. Dem Autor ist nur diese eine extrem gefährdete Stelle bekannt, allerdings kann von mehreren ausgegangen werden, da dies nicht Teil der Arbeit war und die Freitreppenanlage ohne Gerüst begutachtet wurde und somit einige Stellen übersehen worden sein könnten.

²²⁴ Schadensglossar, Anhang, Kap. 7.1

²²⁵ Bestandskartierung Bauteilbeilbezeichnungen, Anhang, Kap. 2.1

Schalende und aufblätternde Bereiche (vgl. SG, Bild-Nr.:02 u. 03) sollten außerdem konstruktiv, durch Anböschern mit geeigneten Steinerfüllungsmassen, gesichert werden um eine Zerstörung dieser Stellen durch Folgemaßnahmen wie Reinigung und Salzreduzierung zu vermeiden. Weiterhin gilt diese Maßnahme der Verhinderung zusätzlicher Wassereinträge in diese Bereiche und soll eine geschlossene Oberfläche des Substrats gewährleisten.

8.1.2 Kartierungen

Sämtlich vorhandenes Kartierungsmaterial zur Freitreppenanlage ist ausschließlich in gezeichneter Form aus den Jahren 1996 oder älter vorhanden. Die Erstellung digitaler Kartierungen nach heutigem Standard ist wichtig, um einheitliche Systematiken bei zukünftigen Maßnahmen gewährleisten zu können. Dies beinhaltet Grundrisse und Schnitte, aber auch Bestands- und Zustandskartierungen. Nur auf der Basis dieser Kartierungen können Maßnahmenkartierungen für kommende Sanierungsmaßnahmen angefertigt werden.

8.1.3 Reinigung

Die Ablagerungen an der Freitreppenanlage sind mit Ausnahme der Handläufe als nicht besonders stark anzusehen. Die Handläufe bedürfen durch den überdurchschnittlichen Flechtenbewuchs einer intensiven Reinigungsbehandlung. Es wird eine Nassreinigung der gesamten Freitreppenanlage empfohlen. Hierbei müssen einige Bereiche differenziert behandelt werden. Von einer Reinigung mit nassen Hochdruckverfahren wird unbedingt abgeraten, da die vielen einzelnen gefährdeten Stellen bei diesem Verfahren unmöglich überblickt werden können. Von einer Reinigung mit Sandstrahlverfahren wird ebenfalls abgeraten, weil dieses Verfahren ohne Oberflächenverlust kaum bis gar nicht durchzuführen ist und weil die Oberflächen der Freitreppenanlage schon viel zu oft mit diesem Verfahren strapaziert wurden. Bei einer Nassreinigung ist darauf zu achten, dass die offenen Fugen keinen zu hohen Wassereintrag erfahren.

8.1.3.1 Reinigung Naturstein Verblendmauerwerk

Aufgrund der vielen Ergänzungen am vorgeblendeten Natursteinmauerwerk wird selbst dieses kaum mit größeren Hochdruckwasserstrahlverfahren gereinigt werden können. Aber dies gilt es nochmals abzuklären und eine umsichtige Reinigung mit stärkeren Geräten, aber mit regulierbarem Druck wäre an dieser Stelle unter Umständen denkbar.

8.1.3.2 **Reinigung der sandsteinernen Bauelemente**

Für die restlichen sandsteinernen Elemente der Freitreppe wird eine Nassreinigung mit dem Mikrodampfstrahlverfahren befürwortet. Zum einen, weil in dieser Arbeit selbst die stark anhaftenden Flechten mit diesem Verfahren entfernt werden konnten. Und zum anderen weil es sich damit fein genug arbeiten lässt, um den Überblick über gefährdete Stellen nicht zu verlieren. Aufgrund der typischen Aufblätterungen des Nebraer Sandsteins (vgl. SG, Bild-Nr.: 02) ist dieser mit besonderer Vorsicht zu behandeln. Die Handläufe sollten aufgrund ihres extremen Flechtenbewuchs (vgl. SG, Bild-Nr.: 14) zusätzlich eine anschließende Behandlung mit Wasserstoffperoxid erhalten, wie es in dieser Arbeit erprobt wurde, um das Absterben der in der Tiefe sitzenden Flechtenhyphen zu gewährleisten.

8.1.3.3 **Reduzierung der Gipskrusten und Verschwärzungen**

Eine Reduzierung der Gipskrusten ist an größeren Flächen wie sie teilweise an den Figurengruppen auftreten (vgl. SG, Bild-Nr.: 19) mit großflächigeren Verfahren wie dem Berieselungsverfahren oder pastösen Verfahren denkbar. An den Brüstungsplatten sind nur äußerst wenige nicht besonders ausgeprägte Gipskrusten vorhanden (vgl. SG, Bild-Nr.: 06), sodass eine vorsichtige mechanische Reduzierung mit dem Mikrosandstrahlverfahren oder auch reine handwerkliche Verfahren für sinnvoll erachtet werden. Eine Reduzierung der Verschwärzungen an dem Postaer Sandstein wird ausdrücklich nicht für sinnvoll beurteilt. Einerseits weil diese bekannter Maßen zu den Alterserscheinungen des Postaer Sandstein gehören und diesem nicht schaden. Andererseits weil eine Reduzierung immer mit Oberflächenverlust einhergeht. Die Verdunkelungen des Nebraer Sandsteins werden ebenfalls nicht als behandlungswürdig empfunden und sollten im Zusammenhang mit der Alterung des Steins toleriert werden, bis tatsächlich Nachteile für das Kulturgut nachgewiesen wurden.

8.1.4 **Fugensanierung**

Da das Fugenmaterial als mögliche Hauptsalzquelle identifiziert wurde, gilt es die gesamten mineralischen Fugen zu öffnen, herauszunehmen, zu säubern und durch ein geeignetes Fugenmaterial zu ersetzen. Ob hierbei auch die, meist noch intakten, elastischen Fugen geöffnet und erneuert werden sollten, müsste nochmals gesondert begutachtet werden. Besonders die offenen Anschlussfugen der Sandsteinelemente zu den Granitbauteilen an den Läufen sowie auf den Podesten der Freitreppe führen zu Durchfeuchtungen und Salzanreicherungen in den Gesimssteinen. Das elastische

Fugenmaterial der beiden zweiten Läufe und des zweiten Podestes scheint dieses Problem nicht mitzubringen und ist heute noch intakt. Da die beiden Materialien keine Feuchtigkeiten austauschen, ist an dieser Stelle nicht zwangsläufig ein wasserdampfdiffusionsoffenes Fugenmaterial notwendig. Da zusätzlich die Podestkonstruktion beweglich ist, könnte an der Stelle der Anschlüsse Granit-Sandstein durchaus ein elastisches wasserabsperrendes Material sinnvoll sein. Aber auch dies muss nochmals diskutiert werden

8.1.5 Konstruktive Eingriffe

Es gibt Stellen an der Freitreppe (vgl. SG. Bild-Nr.: 16- 18), an welchen die Standfugen der Postamente derartig durch Erdmaterial durchsetzt sind, dass möglicher Weise die Postamente angehoben werden müssen und die Standfuge komplett erneuert werden muss. Außerdem gibt es einige Treppenschenkelsteine aus Granit (vgl. SG, Bild-Nr.: 12), welche sich von ihrem ursprünglichen Sitz bewegt haben und damit die anschließenden Fugen weit geöffnet haben. Weiterhin sollte auch das Vergussmaterial der Brüstungsplattenanker untersucht werden, um dieses als weitere Salzquelle ausschließen zu können. Hierfür wäre es nötig eine Handlaufplatte anzuheben. Dies könnte im Zuge der Fugensanierung geschehen. Weitere konstruktive Mängel konnten nicht ausgemacht werden. Dies ist aber sicherlich von einem Fachmann auf dem Gebiet des Bauingenieurwesens zu beurteilen.

8.1.6 Salzreduzierung

Wie sich herausgestellt hat, scheint die Salzbelastung im Laufe der letzten Jahre abzunehmen (vgl. Anhang, Kap. 7.3, Effloreszendokumentation). Dies ist durchaus denkbar, da der Fugenmörtel als Hauptsalzquelle in Betracht kommt und dieser sich über die Jahre der freien Bewitterung ausgewaschen haben könnte. Die letzten Bauteile mit stärkeren Belastungen scheinen einige Gesimssteine zu sein, die von der Zinkblechabdeckung vor direktem Regeneinfall bewahrt werden, und darum nur mit Regenwasser über offene Fugen getränkt werden. Es wird die Weiterführung der Effloreszendokumentation in den Jahren bis zu einer Sanierungsmaßnahme empfohlen, um die salzreduzierende Wirkung des Regens bestätigen zu können. Aufgrund der Tatsache, dass nur an einigen Bauteilen Salze gemessen werden konnten und sichtbar sind, wird eine partielle Salzreduzierung an den Bauteilen empfohlen, an welchen eine Salzanreicherung gemessen wurde und an welchen Salzausblühungen dokumentiert wurden. Dies betrifft hauptsächlich einige Bauteile aus Postaer Sandstein und nur zwei Brüstungsplatten aus Nebraer Sandstein. Es wird

davon ausgegangen, dass der Regen die größten Salzmengen der letzten Jahre bereits herausgespült hat und weiterhin heraus spülen wird. Darum wird von Salzreduzierungsmaßnahmen an den Handläufen und Postamentabdeckungen abgesehen. Die Auswahl der Gesimssteine für eine Salzreduzierung kann ebenfalls durch visuelle Betrachtung geschehen. Dort wo keine Salze ausblühen sind mit großer Wahrscheinlichkeit nur geringe Konzentrationen zu erwarten. Es wird angenommen, dass die hier unternommenen Untersuchungen bereits ausreichen, um die zu entsalzenden Bauteile bestimmen zu können. Wenn detailliertere Untersuchungen zur Ionenverteilung unternommen werden sollen, wird das in dieser Arbeit angewendete Minikompressenverfahren empfohlen. Außerdem wird dringend angeraten, die Streusalzbelastung auf ein Minimum zu reduzieren, was bisher noch nicht geschehen ist.

8.1.7 Ergänzungen

Als ästhetische Ertüchtigung werden Ergänzungen der architektonischen Blicklinien empfohlen. Damit sind Antragungen der Ausbrüche an Ecken und Kanten sowie deutliche Ausbrüche an Rahmungen gemeint. Außerdem gibt es einige Altergänzungen, die im Laufe der Zeit an Form und Volumen verloren haben und einer Erneuerung bedürfen. Ergänzungen im ornamentalen Bereichen werden nicht empfohlen weil dies vom Autor für mehr als eigentlich nötig empfunden wird. In den meisten Fällen ist die Ablesbarkeit der Grundformen noch vorhanden und die zurückgewitterten Stellen verlieren sich leicht in den noch gut erhaltenen restlichen Teilen der reichen Ornamentik. Vielleicht gilt es in Anbetracht des damals verwendeten Fugenmörtels auch zu klären, ob es sich bei dem verwendeten Ergänzungsmörtel ebenfalls um einen mit salzbildenden Ionen angereicherten Mörtel handelt. In diesem Fall müssten natürlich alle betroffenen Altergänzungen erneuert werden. Diese Maßnahme ist nach dem Öffnen und vor dem Schließen der Fugen anzusiedeln, da für ein ordentliches Fugenbild eine mögliche Ergänzung an der Fugenflanke bereits vorhanden sein muss.

8.1.8 Andere Maßnahmen

Von anderen Sanierungsmaßnahmen wie Hydrophobierung oder Festigung im großen Rahmen wird abgeraten. Die verbauten Sandsteinelemente der Freitreppenanlage machen im Grunde einen soliden Eindruck und es konnten kaum aktive Verwitterungsbereiche festgestellt werden. Dies muss nochmals im Detail geklärt werden und durch weitere Untersuchungen bzw. Monitoring Programme im Einzelfall

sichergestellt werden. Partielle Festigungen einzelner weniger Bereiche sind durchaus denkbar. Hierzu sollten vorab Untersuchungen zu den noch aktiven Festigungen und Hydrophobierungen der 90er Jahre gemacht werden.

8.2 Empfehlungen für zukünftige Präventivmaßnahmen

Nach der Fertigstellung einer möglichen Sanierungsmaßnahme werden weitere Maßnahmen nötig sein, um die Freitreppenanlage vor erneutem Zerfall zu schützen. Ohne Wartung kehrt der pflanzliche Bewuchs auf die Anlage zurück. Und die Fugen werden an einigen Stellen aufgrund der Bewegung im Gebäude erneut reißen. Der daraus resultierende Wassereintrag beschleunigt die beiden Mechanismen und es würde nicht allzu lange dauern bis sich ein ähnliches Bild wie heute darbietet. Aber aufgrund der leichten Zugänglichkeit der Treppenanlage, können präventive Maßnahmen mit einem, vergleichsweise geringen, finanziellen Aufwand realisiert werden. Dadurch wäre die Instandhaltung der Freitreppenanlage für einen längeren Zeitraum gesichert.

8.2.1 Präventive Reinigungsmaßnahmen

Die Präventivmaßnahmen zur Reinigung richten sich hauptsächlich gegen erneuten Flechtenbewuchs. Auf Grundlage der hier unternommenen Untersuchungen, gibt es Anlass zu der Annahme, dass sich ein erneuter Bewuchs von Flechten kostengünstig bereits mit ein- oder zweijährigen Reinigungsintervallen vermeiden ließe. Da der Flechtenbewuchs offensichtlich nur sehr langsam von Statten geht, wird hierfür empfohlen, mit einem Wasserschlauch und einer Spritzpistole die Handläufe der Freitreppe unter gering erhöhtem Druck abzuspritzen. Diese Maßnahme lässt sich ohne großen Aufwand durchführen. Der Erfolg dieser Maßnahme ist aufgrund mangelnder Erfahrungsberichte und Fachkenntnisse auf diesem Gebiet zwar nicht gesichert, aber wird vom Autor als durchaus vielversprechend bewertet.

8.2.2 Präventive Salzreduzierungsmaßnahmen

Wenn die Effloreszenzdokumentation die selbstständige Salzreduzierung bestätigt, und darum nur partielle Salzreduzierungen an einzelnen Bauteilen stattfinden, könnte es an mancher Stelle der Freitreppe besonders im Frühjahr wiederholt zu vereinzelt Salzausblühungen kommen. Diese sollten im Zuge der Reinigungsmaßnahmen vorab dokumentiert und abgesaugt werden, um eine erneute Lösung der Salzkristalle und damit den erneuten Eintrag in das Substrat zu verhindern und somit die

Salzreduzierung zu beschleunigen. Auch diese Maßnahme lässt sich mit dem richtigen Handwerkszeug ohne Gerüst und damit kostengünstig umsetzen.

8.2.3 Präventive Wartungsarbeiten

Im Zuge der oben genannten minimalistischen Reinigungsarbeiten sollten die Fugen und die Bauwerksbewegungen beobachtet werden und ggf. ausgebessert werden. Damit wird ein unerwünschter Wassereintrag in die Substanz des Bauwerks verhindert und die Freitreppe vor den größten Schäden bewahrt. Auch diese Maßnahme ist jährlich mit nur ein paar Arbeitsstunden verbunden und damit kein Grund diesen geringen Kostenaufwand zu scheuen.

8.2.4 Präventives Monitoringprogramm

Das präventive Monitoringprogramm sollte auf jeden Fall die weitere Effloreszenzdokumentation beinhalten, den Reinigungserfolg der präventiven Reinigungsmaßnahme dokumentieren und das Fugenbild beobachten. Allen drei Maßnahmen wäre mit einigen Fotos und grundlegenden Bemerkungen zu den Randbedingungen in Form eines Monitoring-Protokolls genüge getan.

Denkbar wäre auch eine Beobachtung der aktiven oder passiven Verwitterung einiger Stellen mittels einer Untersuchung des Schälwiederstandes dieser Bereiche. Ebenso denkbar wäre eine rein fotografische Dokumentation der verwitterten Bereiche. Allerdings wäre der Schaden dabei bereits weiter fortgeschritten bis man ihn bemerkt als er es mit einer Untersuchung des Schälwiederstandes wäre.

Im Zuge der Dokumentation der Reinigungsmaßnahmen könnten die vom Autor angelegten Reinigungsprobenflächen vergleichend dokumentiert werden, um ggf. Aussagen über die Wirksamkeit des Titandioxids zu erlangen. Vorausgesetzt das Titandioxid wurde nicht bereits vom Autor in Absprache mit der Alten Nationalgalerie entfernt.

9. Fazit der Arbeit

Die strukturierte Vorgehensweise nach den WTA-Merkblättern zur Bauwerksdiagnostik hat sich als überaus sinnvoll erwiesen. Die ausgeführten Untersuchungsmethoden eigneten sich sehr gut, um verwertbare Ergebnisse zu liefern auf derer Basis sinnvolle Interpretationen stattfinden konnten. Die Schaden auslösenden Prozesse an der Freitreppe der Alten Nationalgalerie in Berlin konnten ermittelt und die Ursachen hierfür festgestellt werden. Außerdem konnten konservatorisch wertvolle Empfehlungen zu deren Umgang formuliert werden. Abschließend müssen die Ergebnisse dieser Arbeit bezüglich der Schaden auslösenden Prozesse an der Freitreppe als äußerst positiv für das Gebäude empfunden werden.

Die Abdichtungen zur Unterkonstruktion sind offensichtlich intakt und ein mühsames Aufbrechen der Konstruktion bleibt der Anlage erspart. Die notwendigen Maßnahmen kommen eher einer ausführlichen Wartungsarbeit gleich als einer umfangreichen Sanierungsmaßnahme.

Vergleicht man die Rückwitterungen heutiger stark verwitterter Stellen mit Fotoaufnahmen der 1996er Jahre, stellt man fest, dass seither kaum weitere Rückwitterungen stattgefunden haben.

Den größten Schaden hat nach dem momentanen Kenntnisstand das mit salzbildenden Ionen angereicherte Fugenmaterial angerichtet. Diese Ionen wurden im selben Zug, durch das Offenliegen der Fugen, im gesamten Baukörper verteilt. Die dadurch entstandenen Salze scheinen allerdings durch den Regen im Laufe der Jahre reduziert worden zu sein, so dass nach Erneuerung des Fugenmaterials partielle Salzreduzierungsmaßnahmen an ausgewählten Bauteilen ausreichend erscheinen.

Durch ihre starke Durchfeuchtung und die dadurch innere Anreicherung mit Salzen benötigen einige Gesimssteine mitunter den größten Aufwand, um diese zu konservieren. Aber da diese noch Originalbauteile sind, lohnt sich dieser.

Weitere bauzeitliche Originalteile konnten nicht mit absoluter Sicherheit festgestellt werden. Wahrscheinlich ist, dass zumindest die Brüstungsplatten des südlichen Geländers des zweiten westlichen Laufs und die nordwestliche Figur noch original sind. An dieser Stelle könnte womöglich eine noch intensivere, zielgerichtete Recherche Aufklärung bringen.

Aufgeklärt werden konnten die verbauten Sandsteinmaterialien. Während bis heute von vier verschiedenen Sandsteinarten ausgegangen wurde, ist nun geklärt, dass es sich ausschließlich um Nebraer Sandstein und Postaer Sandstein in verschiedenen Varietäten handelt. Nicht berücksichtigt ist dabei das Verblendmauerwerk, welches vermutlich aus diversen Materialien zusammengestellt wurde.

Auch konnte festgestellt werden, dass die Flechten zwar einen schädigenden Charakter besitzen, sich aber mit einigem Aufwand fast rückstandslos entfernen lassen. Des Weiteren kann angenommen werden, dass kostengünstige jährliche Reinigungsverfahren eine Neubesiedelung der Flechten verhindern.

In dieser Arbeit nicht untersucht wurde das mögliche Schadenspotenzial der Verschwärzungen bei dem Postaer- als auch bei dem Nebraer Sandstein. Dies wurde vom Autor hintenangestellt, da die untersuchten Schadensmechanismen als gefährlicher eingestuft wurden und diesen darum Vorrang eingeräumt wurde. Ebenso wurden keine Untersuchungen zu den Festigkeiten der Sandsteine und den 1996 durchgeführten Festigungen und Hydrophobierungen durchgeführt.

10. Ausblick

Um endgültige Entscheidungen zu zukünftigen Sanierungsmaßnahmen festlegen zu können, bedarf es sicherlich noch einiger Gutachten und Untersuchungen. So sollten unbedingt noch Untersuchungen zu den Festigkeiten der Sandsteine und den Hydrophobierungsmaßnahmen von 1996 gemacht werden bevor über den Umgang mit den sandsteinernen Elementen der Freitreppe entschieden wird. Auch sollte der Vergussmörtel der Brüstungsplattenverankerungen und der Ergänzungsmörtel auf salzbildende Ionen untersucht werden. Ebenfalls sollten genaue Überlegungen zu einem neuen Fugenmaterial und den elastischen Fugen stattfinden.

Interessant erscheinen dem Autor auch weiterführende Forschungen zur Salzdetektion durch ein Vergleichsverfahren mit der Gann-Hydromette und dem Moist-Mikrowellenmessgerät. Da die Gann-Hydromette bei ihren Messungen die Leitfähigkeiten der Salze zusätzlich zur Materialfeuchte detektiert, während das Moist-Verfahren nur die Materialfeuchte ermittelt, könnten Messungen im Vergleich beider Untersuchungen möglicherweise erhöhte Salzkonzentrationen an Gebäuden feststellen. Eine kurze Untersuchung in diese Richtung haben dem Autor durchaus vielversprechende Ergebnisse geliefert. Ein Vergleich dieser beiden Untersuchungsmethoden bezüglich versalzter Baumaterialien ließe sich wahrscheinlich unter Laborvoraussetzungen relativ einfach durchführen.

Kommenden Sanierungsarbeiten können die Bauherren der Alten Nationalgalerie in Berlin nun vielleicht entspannter entgegensehen. Es ist allerdings zu hoffen, dass die trotzdem unbedingt notwendigen Maßnahmen bald erfolgen und die benötigten Monitoring-Programme wie bspw. Effloreszenzdokumentation schon im nächsten Frühjahr anlaufen bzw. weitergeführt werden. Wenn sich die Sanierungsmaßnahmen an den hier vorgeschlagenen Maßstäben orientieren und ein anschließendes konservatorisches Wartungsprogramm in jährlichen Intervallen eingehalten wird, ist davon aus zu gehen, dass die Freitreppenanlage der Alten Nationalgalerie in Berlin auch in den kommenden Jahrzehnten ihren faszinierenden Eindruck beibehält und vor Allem beim näheren Hingucken auch nicht wieder verliert.

Literaturverzeichnis

- Auras, Michael (2011): Untersuchung bauschädlicher Salze. In: Michael Auras, Jeannine Meinhardt und Rolf Snethlage (Hg.): Leitfaden Naturstein-Monitoring. Nachkontrolle und Wartung als zukunftsweisende Erhaltungsstrategien. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl., S. 104–106.
- Beer, Sonja (2007): Flechten. Hg. v. Reiß. Uni- Marburg. Marburg. Online verfügbar unter http://www.chids.de/dachs/expvortrag/610Flechten_Beer_Scan.pdf, zuletzt geprüft am 10.05.2015.
- Björn Lippold (Hg.) (2015): Wasserstoffperoxid. Chemie.de Information GmbH. Online verfügbar unter http://www.chemie.de/lexikon/Wasserstoffperoxid.html#Chemische_Eigenschaften, zuletzt geprüft am 17.06.2015.
- Bläuer Böhm, Christine (1994): Salzuntersuchungen an Baudenkmalern. In: *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung* 8 (1), S. 86–103.
- Brinkmann, Amrit (2010): Flechtenbesiedlung auf Gesteinsoberflächen. Untersuchungen zur Möglichkeit materialschonender Abnahme. Masterarbeit. HAWK, Hildesheim.
- Chemie.de Information GmbH (Hg.) (2015): Sättigungsdampfdruck. Online verfügbar unter <http://www.chemie.de/lexikon/Sättigungsdampfdruck.html>, zuletzt geprüft am 19.04.2015.
- DBU (2015): Projektdatenbank. Auswahl nach Kategorien | Bereich: Projekte. Online verfügbar unter https://www.dbu.de/index.php?menuecms=799&db_suche=mikrobiologie&thema%5B%5D=1015, zuletzt geprüft am 09.05.2015.
- Denkmalpflege Berlin GmbH (1996a): Dokumentation Teil1. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Dokumentation der Demontage.
- Denkmalpflege Berlin GmbH (1996b): Dokumentation Teil2. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Dokumentation der Montage.
- Denkmalpflege Berlin GmbH (1996c): Maßnahmenkartierung. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung.

Diener, Rüdiger (2002): Die siliziklastischen Sedimente der synorogenen Hochwipfel-Formation im Karbon der Westkarawanken (Österreich/Slowenien/Italien) : Sedimentologie, Geochemie und Provenienz. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Planetologie. Online verfügbar unter <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2002/1236/>, zuletzt geprüft am 23.06.2015.

Dorgerloh, Hartmut (1999): Die Nationalgalerie in Berlin. Zur Geschichte des Gebäudes auf der Museumsinsel 1841 - 1970. Dissertation. Philosophische Fakultät III Humboldt- Universität zu Berlin, Berlin.

Ehling, Angela; Schubert, Thomas; Siedel, Heiner (Hg.) (op. 2011): Bausandsteine in Deutschland. Sachsen- Anhalt, Sachsen und Schlesien (Polen). Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller).

FEAD (12.07.1999): Fugenhydrophobierung. Zentralarchiv staatliche Museen zu Berlin. Bericht Voruntersuchungen.

Förster (2002): Projektkennblatt der Deutschen Stiftung Umwelt. Wissenschaftliche Untersuchungen und Restaurierung von Mauerwerk der Festungsmauer Rosenberg (Kronach/Bayern) in beispielhafter Zusammenarbeit von Natur- und Denkmalschutz. Az 11036. DBU, zuletzt geprüft am 09.05.2015.

Fotomarmburg (2014): Alte Nationalgalerie. bildindex der Kunst und Architektur. Online verfügbar unter <http://www.bildindex.de/?+pgesamt:%27Alte%27%20+pgesamt:%27Nationalgalerie%27#|home>, zuletzt aktualisiert am 24.10.2014, zuletzt geprüft am 22.07.2015.

Fraunhofer Allianz Photokatalyse (2015): Leistungsangebot. Hg. v. Fraunhofer FEP. Online verfügbar unter <http://www.photokatalyse.fraunhofer.de/de/Leistungsangebot.html>, zuletzt aktualisiert am 03.03.2015, zuletzt geprüft am 11.06.2015.

Gehrmann- Janszen, Cornelia; Petersen, Karin (2014): Untersuchungen der Mikrobiologie auf Marmoroberflächen. Perspektiven. In: Paul Bellendorf (Hg.): Erhaltung von Marmorskulpturen unter mitteleuropäischen Umweltbedingungen. Beiträge des 8.

Konservierungswissenschaftlichen Kolloquiums in Berlin / Brandenburg am 17. Oktober 2014 in Potsdam, Bd. 32. Potsdam, 17.10.2014. Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege und Archäologisches Landesmuseum (Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseums, Nr. 32), S. 125–133.

Geier, Stephanie (2011): Photobiologische Wasserstoffproduktion mit der einzelligen Grünalge *Chlamydomonas reinhardtii* unter verfahrenstechnischen Aspekten. Dissertation. Universität Erlangen- Nürnberg, Erlangen- Nürnberg. Technische Fakultät. Online verfügbar unter <https://opus4.kobv.de/opus4-fau/frontdoor/index/index/docId/1771>, zuletzt geprüft am 21.06.2015.

Göller, A.; hf Sensor GmbH (1999): Handheld-Mikrowellen-Feuchtemeßgeräte der MOIST-Serie. Anwendungen und Einsatzfälle im Bausektor. In: DGZfP- Berichtsband. Feuchtetag '99. Umwelt- Meßverfahren- Anwendungen, BB 69-CD. Feuchtetag '99. Berlin, 7.-8.10. BAM, S. Plakat 11. Online verfügbar unter www.dgzfp.de/Portals/24/PDFs/BBonline/bb_69-CD/bb69-p11.pdf, zuletzt geprüft am 27.06.2015.

Grassegger, Gabriele; Schwarz, Hans-Jürgen (2009): Salze und Salzschäden an Bauwerken. In: Hans-Jürgen Schwarz und Michael Steiger (Hg.): Salzschäden an Kulturgütern. Stand des Wissens und Forschungsdefizite ; Ergebnisse des DBU Workshops im Februar 2008 in Osnabrück. DBU-Workshop Salzschäden an Kulturgütern. Hannover, S. 6–21.

Gröger, Ulrich (1992): Bericht über die Freitreppe der Nationalgalerie in Berlin. Bundesministerium für Bauwesen und Raumordnung. Bestandsaufnahme- Untersuchungen- Schadensdarstellung- konservatorische Probleme- Restaurierungsvorschläge.

Holan (16.12.1997): Durchnässung, Mangel in der Regenwasserleitung. Zentralarchiv staatliche Museen zu Berlin. Schreiben SMB an BBR.

Juling, Herbert; Franzen, Christoph (2009): Schadensdiagnose. In: Hans-Jürgen Schwarz und Michael Steiger (Hg.): Salzschäden an Kulturgütern. Stand des Wissens und Forschungsdefizite ; Ergebnisse des DBU Workshops im Februar 2008 in Osnabrück. DBU-Workshop Salzschäden an Kulturgütern. Hannover, S. 52–58.

Kraus, Karin (2002): Lösliche Alkalisalze in neuen Mörteln. Bestimmung, Gehalte, Bewertung, Untersuchungsbedarf und erste Ergebnisse. In: Institut für Steinkonservierung e.V. (Hg.): Salze im historischen Natursteinmauerwerk. IFS- Tagung 2002. Mainz, S. 11–18.

Laue, Steffen (2002): Verwitterung von Naturstein durch lösliche Salze an wechselfeuchter Luft. In: Institut für Steinkonservierung e.V. (Hg.): Salze im historischen Natursteinmauerwerk. IFS- Tagung 2002. Mainz, S. 19–30.

Laue, Steffen (2014): Grundlagen der Polarisationsmikroskopie. Potsdam.

Maaz, Bernhard (10.08.1997): Salzausblühungen. Zentralarchiv staatliche Museen zu Berlin. Hausinternes Schreiben SMB.

Maaz, Bernhard; Holan, Gisela (2001): Die Alte Nationalgalerie. Geschichte, Bau und Umbau. Berlin: G-und-H-Verl.

Petersen, Karin; Möhlenhoff, Petra (2009): Mikrobielle Zerstörung von Kunst und Kulturkut. Mikrobielle Probenanalyse. Praktikumsbericht. HAWK, Hildesheim.

Posselt, Diana (2006): Eisen(diarylsalen)-Komplexe als neuartige Zytostatika. Synthese, pharmakologische und biochemische Untersuchungen zum Wirkungsmechanismus. Dissertation. Freie Universität Berlin, Berlin. Online verfügbar unter http://www.diss.fu-berlin.de/diss/receive/FUDISS_thesis_000000002510, zuletzt geprüft am 17.06.2015.

Sächsische Sandsteinwerke (2015): Postaer Sandstein. Varietäten. Hg. v. Sächsische Sandsteinwerke. Online verfügbar unter <http://www.sandsteine.de/sandsteinarten/postaer-sandstein/>, zuletzt geprüft am 17.07.2015.

Schmeikal, Katja (2002): Sandsteinkonservierung. Vergleich ausgewählter Festigungsmittel zur Festigung Loderslebener Sandsteins. Diplomarbeit. Fachhochschule Potsdam, Potsdam.

Schubert, Thomas (17.09.1999): Fugenhydrophobierung, Fugenmaterial, Salzausbühungen, Gesimsabdeckung. Zentralarchiv staatliche Museen zu Berlin. Protokoll einer Besprechung.

Schuh, Horst (1996): Voruntersuchungen zur Feuchte- Salzverteilung an der Nordwand des Hochchores. (Meißen, Dom). In: Gemeinsames Erbe gemeinsam erhalten, S. 153–157.

Schwarz, Hans-Jürgen; Steiger, Michael; Müller, Tim (2010): Natriumsulfat und Thenardit. Online verfügbar unter <http://www.salzwiki.de/>, zuletzt geprüft am 20.04.2015.

Schweinehage, Ralf (2000): Metamorphite der Silvrettadecke/Ostalpen : thermobarometrische und geochemische Untersuchungen zur präalpidischen Entwicklung. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Mineralogie und Kristallchemie. Online verfügbar unter <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2001/791/>, zuletzt geprüft am 23.06.2015.

Sharnoff (2014): Sharnoff Photos. Lichens Index. Online verfügbar unter http://www.sharnoffphotos.com/lichensE/phaeophyscia_unidentified.html, zuletzt aktualisiert am 17.02.2014, zuletzt geprüft am 05.08.2015.

Siedel, Heiner (2009): Zur Herkunft von Salzen an Bauwerken. In: Hans-Jürgen Schwarz und Michael Steiger (Hg.): Salzsäden an Kulturgütern. Stand des Wissens und Forschungsdefizite

; Ergebnisse des DBU Workshops im Februar 2008 in Osnabrück. DBU-Workshop Salzsäuren an Kulturgütern. Hannover, S. 22–29.

Skasa-Lindermeir, Beate (2007): Untersuchung der Wirksamkeit von photokatalytischem Titandioxid als Prophylaxe gegen mikrobiellen Befall von Sandsteinen. Masterarbeit. HAWK, Hildesheim.

Staub, Susanne (2002): Entwicklung und Anwendung einer Ionenpaar-Chromatographie mit makrozyklischen Polyethern zur Analyse anionischer Spezies in aquatischen Kompartimenten. Dissertation. Universität Hamburg, Hamburg. Online verfügbar unter http://www.chemie.uni-hamburg.de/bibliothek/2002/Dissertation_Staub.pdf, zuletzt geprüft am 31.07.2015.

Steiger, Michael (2009a): Mechanismus der Schädigung durch Salzkristallation. In: Hans-Jürgen Schwarz und Michael Steiger (Hg.): Salzsäuren an Kulturgütern. Stand des Wissens und Forschungsdefizite ; Ergebnisse des DBU Workshops im Februar 2008 in Osnabrück. DBU-Workshop Salzsäuren an Kulturgütern. Hannover, S. 65–79.

Steiger, Michael (2009b): Modellierung von Phasengleichgewichten. In: Hans-Jürgen Schwarz und Michael Steiger (Hg.): Salzsäuren an Kulturgütern. Stand des Wissens und Forschungsdefizite ; Ergebnisse des DBU Workshops im Februar 2008 in Osnabrück. DBU-Workshop Salzsäuren an Kulturgütern. Hannover, S. 80–99.

Steiger, Michael (2015): Hydratation (Salzwiki). Online verfügbar unter <http://193.175.110.91/salzwiki/index.php/Hydratation>, zuletzt geprüft am 19.04.2015.

Steiger, Michael; Behlen, Andreas; Wiese, Utz (2002): Immissionsbelastung durch salzbildende Stoffe und Wirkung auf mineralische Baustoffe. In: Institut für Steinkonservierung e.V. (Hg.): Salze im historischen Natursteinmauerwerk. IFS- Tagung 2002. Mainz, S. 1–10.

Tölke, Tina (2009): Photokatalytische Schichtsysteme für hochtransparente selbstreinigende Gläser. Dissertation. Friedrich- Schiller- Universität Jena, Jena. Chemisch- Geowissenschaftliche Fakultät. Online verfügbar unter <http://www.db-thueringen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-18874>, zuletzt geprüft am 19.06.2015.

Traco Deutsche Travertin Werke (2015): Sandstein Nebra. Chirotheriensandstein. Hg. v. Traco Deutsche Travertin Werke. Online verfügbar unter <http://traco.de/natursteine/sandstein-nebra/>, zuletzt aktualisiert am 01.01.2012, zuletzt geprüft am 18.07.2015.

Wallasch, Sven (1992a): Untersuchungsbericht Freitreppenanlage Alte Nationalgalerie Berlin. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Teil II: Anlagen.

Wallasch, Sven (1992b): Untersuchungsbericht Freitreppenanlage Alte Nationalgalerie Berlin. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Teil I: Untersuchungsbericht und Anlage 1.

Wallasch, Sven (1993): Untersuchungsbericht/ Nationalgalerie Berlin- Freitreppe Bewertung restauratorischer Vorproben. Bericht.

Walz, Heinrich (2014): IMAGING-PAM M-series Chlorophyll Fluometer. Instrument Description and Information for Users. Effeltrich.

Warscheid, Thomas (2011): Mikrobiologisches Monitoring von Gesteinsoberflächen. In: Michael Auras, Jeannine Meinhardt und Rolf Snethlage (Hg.): Leitfaden Naturstein-Monitoring. Nachkontrolle und Wartung als zukunftsweisende Erhaltungsstrategien. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl., S. 106–107.

Wehr, Meike (op. 2011): Mittlerer Buntsandstein. Nebraer Sandstein. In: Angela Ehling, Thomas Schubert und Heiner Siedel (Hg.): Bausandsteine in Deutschland. Sachsen- Anhalt, Sachsen und Schlesien (Polen), Bd. 2. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), S. 106–116.

Werder, J. von; Venzmer, H. (2008): PAM- Fluorometrie zur Algenfrüherkennung auf Fassadenoberflächen. In: Helmut Venzmer (Hg.): Forum Altbausanierung 2. Biofilme und funktionale Baustoffoberflächen Fassaden. 8. Dahlberg Kolloquium. Wismar, 25. -26. September: Fraunhofer IRB, S. 21–33.

Wölfert, Stefan (1999): Der Blick ins Bild. Lichtmikroskopische Methoden zur Untersuchung von Bildaufbau, Fasern und Pigmenten. Ravensburg, Berlin: Ravensburger Buchverlag; Seemann [distributor] (Bücherei des Restaurators, Bd. 4).

Abkürzungsverzeichnis

AAS	Atomabsorbtionsspektroskopie
Abb.	Abbildung
ATP	Adenosinriphosphat
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
Ebd.	Ebenda
ggf.	gegebenenfalls
GP	Gesamtporosität
ICP	Inductively Coupled Plasma
IR	Infrarot
Lfd.	laufende
Min.	Minuten
OP	Offene Porosität
PAM	Puls- Amplituden- Modulation
PAS	Perjodsäure-Schiff-Reaktion
SG	Schadensglossar
vgl.	vergleiche
WTA	Wissenschaftlich- Technische- Arbeitsgemeinschaft
XRD	Röntgendiffraktometrie
z. B.	zum Beispiel

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kristalltypen und deren Fundort	49
Tabelle 2: Kristalltypen und deren mögliche Salzzart	49
Tabelle 3: Ergebnisse Röntgendiffraktometrie	53
Tabelle 4: Ionenkonzentrationen in M.-%	70
Tabelle 5: Abbildungen der Flechtenarten	77
Tabelle 6: Zusammenfassung der Ergebnisse der PAM- Fluorometriemessung	
nach der Reinigung	105
Tabelle 7: Ergebnisse der PAM- Messung ANG/RP/B nach drei Monaten	106

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Alte Nationalgalerie in Berlin	4
Abb. 2: Freitreppe, westlicher Flügel	6
Abb. 3: Salzausblühungen 2014 an Bauteil C	12
Abb. 4: Nebraer Sandstein, Chirotherienfolge	14
Abb. 5: Postaer Sandstein mit geringen Einschlüssen	16
Abb. 6: Postaer Sandstein Bildhauerqualität	16
Abb. 7: Angebot 1963 in Nebraer Sandstein	18
Abb. 8: 1963 in Postaer Sandstein ausgeführt	19
Abb. 9: Bestand der Brüstungsplatten heute und Neuanfertigungen von 1963	20
Abb. 10: Detail Brüstungsplatte V1 1996	23
Abb. 11: Detail Brüstungsplatte V1 2015	23
Abb. 12: Details Brüstungsplatte G1 1996	24
Abb. 13: Details Brüstungsplatte G1 2015	24
Abb. 14: Schematischer Flechtenaufbau	32
Abb. 15: Eindringen der Flechtenhyphen in Kalkstein	33
Abb. 16: Klimadaten des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur; Klimastation Berlin- Tempelhof; Januar 2015.....	42
Abb. 17: Klimadaten des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur; Klimastation Berlin- Tempelhof; Juli 2014.....	42
Abb. 18: Messpunkte der Feuchteverteilung an Bauteil C	65
Abb. 19: Die Alte Nationalgalerie in Berlin auf der Museumsinsel	74
Abb. 20: Die bläulich- rot eingefärbten Flechtenhyphen sind als dünne lila Fäden, deutlich erkennbar, im gesamten Probekörper verteilt.....	80
Abb. 21: Oberfläche des Probekörpers ANG/MB/01, an einigen Stellen sind tiefe Gruben erkennbar, das Korngefüge wirkt zerrüttet.....	82
Abb. 22: Schematische Darstellung der Photooxidation	91
Abb. 23: Beschichtungsprobe mit Titandioxid, in der Mitte des Steins ist das 10x10 cm beschichtete Feld zu erkennen.	93
Abb. 24: Zwischenzustand Reinigung mit Holzspate	95
Abb. 25: Endzustand Reinigung mit Bürste.	96
Abb. 26: Endzustand Reinigung mit Mikrodampfstrahlgerät.	97

Abb. 27: Endzustand Reinigung mit dem Mikrodampfstrahlgerät und Behandlung mit Wasserstoffperoxid.....	98
Abb. 28: Endzustand Reinigung mit dem Mikrodampfstrahlgerät und Behandlung mit Titandioxid.....	99
Abb. 29: Endzustand Reinigung mit dem Mikrodampfstrahlgerät und Behandlung mit Wasserstoffperoxid und Titandioxid.....	99
Abb. 30: PAM- Messung vor Ort	102
Abb. 31: LED- Array des IMAGING PAM MINI.....	102
Abb. 32: Kamera des IMAGING PAM MINI	102

CD- Verzeichnis

1_Masterthesis mit Anhang und Fotodokumentation und Zusammenfassung

- **Masterthesis**
 - *MA_OHNMEISS_2015.doc*
 - *MA_OHNMEISS_2015.pdf*
- **Anhang**
 - *Anhang_MA_OHNMEISS_2015.doc*
 - *Anhang_MA_OHNMEISS_2015.pdf*
- **Fotodokumentationen**
 - *Effloreszenzdokumentation.pdf*
 - *Fotodokumentation Polarisationsmikroskopie.pdf*
 - *Schadensglossar.pdf*
- **Zusammenfassung**
 - *Zusammenfassung.doc*

2_Kartierungen und Aufmaße

- **Aufmaße**
 - *8 Dateien x.jpg*
- **Kartierungen**
 - *9 Dateien x.pdf*
- **Kartierungen Feuchteverteilung**
 - *1 Datei x.pdf*
 - *17 Dateien x.jpg*
- **Photoshop-Dateien**
 - *6 Dateien x.psd*
- **Rohzeichnungen**
 - *12 Dateien .jpg*

3_Protokolle

- **Probenentnahmeprotokolle**
 - *39 Dateien x.pdf*
- **Probenflächenprotokolle**
 - *10 Dateien x.pdf*
- **Protokolle von anderen Instituten**
 - Infrarotspektroskopie
 - *2 Dateien x.jpg*
 - Ionenchromatographie
 - *1 Datei x.pdf*
 - Röntgendiffraktometrie
 - *1 Datei x.pdf*
 - Untersuchungsprotokolle
 - *5 Dateien x.pdf*

4_Bilder

- **Bilder aus dem Anhang**
 - *13 Dateien x.jpg*

- Baupläne im Anhang
 - 8 Dateien x.jpg
 - 1 Datei x.pdf
- **Bilder aus dem Hauptteil**
 - 34 Dateien x.jpg
- **Bilder der Fotodokumentationen**
 - Bilder Effloreszenzdokumentation
 - 18 Dateien x.jpg
 - Bilder Fotodokumentation Polarisationsmikroskopie
 - 14 Ordner mit 88 Dateien x.jpg
 - Bilder Schadensglossar
 - 26 Dateien x.jpg
- **Bilder der Minikompresenuntersuchung**
 - 69 Dateien x.jpg
- **Bilder PAM**
 - 15 Dateien x.jpg
- **Bilder Untersuchungsmaterial und Geräte**
 - 6 Ordner mit 23 Dateien x.jpg

5_Daten für Software

- **Ionenchromatographie**
 - 2015-06-25IC Ohnmeis.xls
- **Klimadaten und Diagramme**
 - produkt_temp[...]_00433.txt
 - Tagesminima und -mxima Diagramm.xls
- **Moist200 Daten**
 - 1 Ordner mit Erläuterungen.txt
 - 3 Dateien x.hfs
 - 3 Ordner mit 78 Dateien x.bmp
 - 45 Ordner mit 45 Dateien x.hfs

6_Extras

- **Bilder und Eindrücke der Anlage und der Arbeit vor Ort**
 - 36 Dateien x.jpg
- **Dokumentationen von 1996**
 - 3 Dateien x.pdf