Brandenburgische Geowiss. Beitr.	Kleinmachnow	9 (2002), 1/2	S. 1–15	3 Abb., 8 Tab., 24 Lit.

Sandsteinverwitterung durch bauschädliche Salze - Ergebnisse der Säulensanierung des Belvedere auf dem Pfingstberg / Potsdam

Holger Müller, Joachim Luckert & Detlef Röper

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Pünktlich zur Eröffnung der Bundesgartenschau in Potsdam konnte mit dem Belvedere auf dem Pfingstberg ein weiteres architektonisches Kleinod der preussischen Geschichte zur teilweisen Nutzung übergeben werden. Nach 7-jährigen Instandsetzungsarbeiten des schwer beschädigten Bauwerks sind gegenwärtig der Westturm, der Westflügel sowie der Innenhof mit Torhalle und Freitreppen zugänglich. Sie gewähren dem Besucher einen herrlichen Blick auf das Bornimer Feld (mit BUGA-Gelände) und auf die einzigartige Potsdamer Parklandschaft, ganz im Sinne ihrer geistigen Väter um den preußischen König Friedrich Wilhelm IV (1840 bis 1858). Errichtet wurde das Belvedere in den Jahren 1847 bis 1852 nach Plänen der Architekten Ludwig Persius, Ludwig Ferdinand Hesse und Friedrich August Stüler. In einer zweiten Bauphase von 1860 bis 1863 wurde das Ensemble komplettiert.

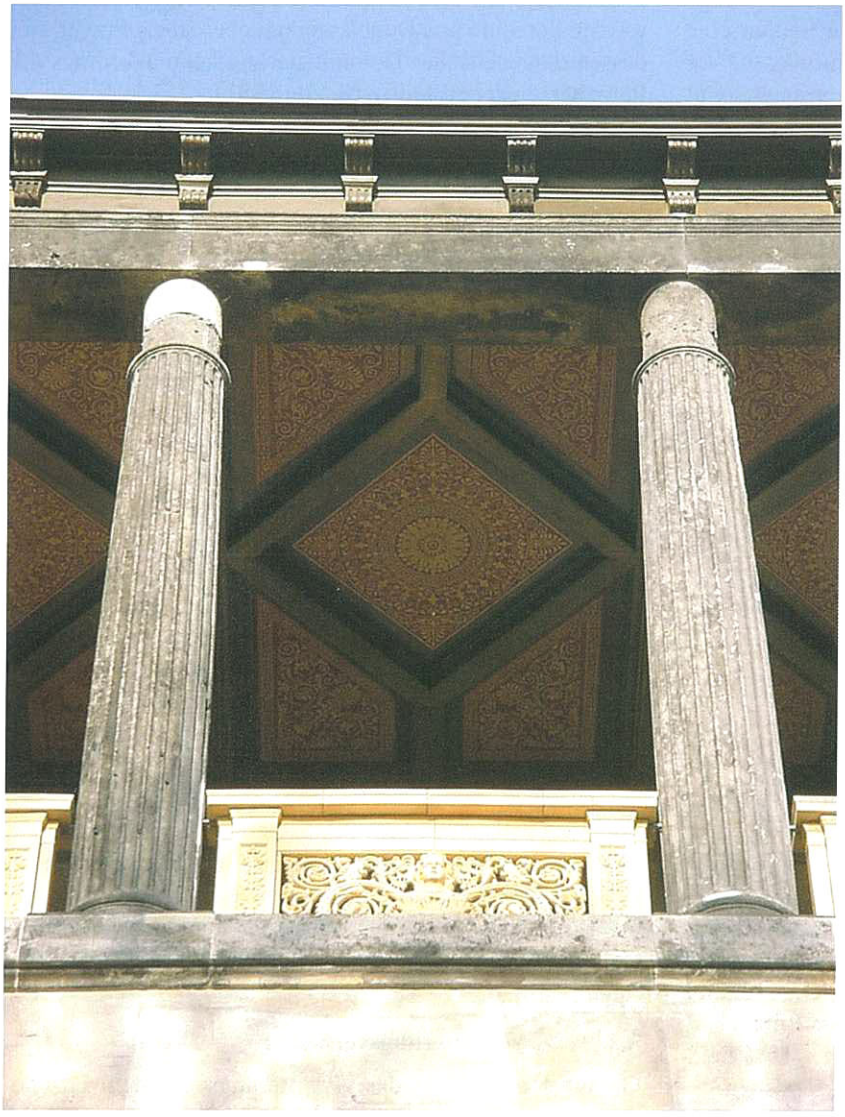

Abb. 1
Detailansicht der entsalzten Sandsteinsäulen (ohne Metallkapitelle)

Durch seine exponierte Lage auf dem 76 m hohen Pfingstberg war das Bauwerk seit seiner Fertigstellung, also über einen Zeitraum von 150 Jahren, intensiven Witterungseinflüssen ausgesetzt. Wie die Baugeschichte zeigt, mussten des Öfteren umfangreiche Instandsetzungsarbeiten insbesondere an der Nordwand und an den Türmen durchgeführt werden (Selle 1998). Deutliche Verwitterungsspuren wiesen auch die korinthischen Sandsteinsäulen der ca. 4,5 m hohen Kolonnaden auf, die sich über den seitlichen Arkaden erheben (Titelbild und Abb. 1). Diese Säulen zeigten typische Schadensbilder wie Absandungsflächen, Schalenbildung und punktuell kavernöse Verwitterung mit cm-starken Abplatzungen. Die Stege zwischen den Kanneluren (senkrechte Rillen am Säulenschaft) und die Säulenfüße waren an den Kanten stellenweise zugerundet bis hin zur völligen Zerstörung der ursprünglichen Form. Außerdem wurden schwarze Beläge und Salzausblühungen an den unbehandelten Säulen beobachtet.

Eine im Zusammenhang mit der Aufgabenstellung bedeutsame Besonderheit der Säulen bestand darin, dass sie im Jahre 1852 korinthische Kapitelle aus Zinkguss erhielten. Zu Beginn der Sanierungsarbeiten 1999 waren bereits zwei Drittel dieser Kapitelle durch Vandalismus zerstört, die restlichen befanden sich in einem stark korrodierten Zustand (Abb. 2). Im Zuge der weiteren Re-

staurierung sollen die Säulen bis zum Jahre 2003 neue Kapitelle erhalten.

Abb. 2
Originales Kapitell aus Zinkguss in stark korrodiertem Zustand

Voruntersuchungen hatten ergeben, dass die Säulen eine hohe Belastung an bauschädlichen Salzen aufwiesen. Vor weiterführenden Restaurierungsmaßnahmen bestand somit die Notwendigkeit, die Salzbelastung dauerhaft zu beseitigen. Dazu waren zwei unterschiedliche Entsalzungsmethoden von Sandsteinsäulen mittels Kompressen hinsichtlich ihrer Effektivität, d. h. der Vollständigkeit der Entfernung bauschädlicher Salze zu bewerten. Um eine neutrale Begutachtung zu gewährleisten, erteilte die Stiftung Preussische Schlösser und Gärten Berlin Brandenburg als Bauherr dem Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg diesen Auftrag.

Bevor auf die durchgeführten Untersuchungen und deren Ergebnisse eingegangen wird, ist es notwendig, einige grundlegende Ausführungen zum Naturwerkstoff Sandstein, zu dessen Verwitterungsverhalten unter besonderer Berücksichtigung der Wirkung bauschädlicher Salze sowie zu den Ursachen für die Entstehung der beschriebenen Schadensbilder an den Säulen zu machen.

2. Verwitterungsprozesse an Sandstein

2.1 Sandstein als Baumaterial

Sandsteine sind klastische Sedimentgesteine, die vorwiegend aus Quarz- oder Silikatkörnern mit einem Durchmesser zwischen 0,063 und 2 mm bestehen (Füchtbauer 1988). Die mengenmäßig wesentlichsten Komponenten sind Quarz, Feldspat und Gesteinsbruchstücke. Daneben treten Tonminerale und Karbonate sowie akzessorisch Schwerminerale auf. Entsprechend der von Füchtbauer verwendeten Klassifikation handelt es sich bei dem für die Säulen auf dem Pfingstberg verwendeten Sandstein mit einem Anteil von < 10% Feldspat + Gesteinsbruchstücken um einen Quarzsandstein.

Die hier interessierenden Werkstoffeigenschaften des Sandsteins sind das Ergebnis diagenetischer bis geringmetamorpher Veränderungen der sandigen Sedimente. Diese Prozesse führen zu einer Kompaktion und Zementation der Körner, wobei die Porosität und damit die Permeabilität der Sedimente stark abnimmt.

Grundsätzlich besteht zwischen mittlerer Korngröße und Porosität ein nahezu linearer, umgekehrt proportionaler Zusammenhang. Mit steigender Korngröße nimmt die Porosität ab. Sie nimmt zu, je besser die Sortierung nach Korngrößen (bzw. je niedriger der sogenannte Sortierungswert als Maß für die Breite der Korngrößenverteilung) im Gestein ist. Quarzsandsteine sind in der Regel sehr gut sortiert und weisen daher eine relativ hohe Porosität auf.

Die Durchlässigkeit ist mit der Porosität über die spezifische innere Oberfläche, die ihrerseits eine Funktion der Korngröße ist, nach der Kozeny-Carman-Beziehung verknüpft (Füchtbauer 1988). Die höchsten Durchlässigkeitswerte werden von mittel- bis feinkörnigen Sandsteinen erreicht. Sind Tonminerale als Zement vorhanden, bewirken sie infolge ihrer großen spezifischen Oberfläche eine erhebliche Verringerung der Durchlässigkeit. Tritt Calcit als porenfüllender Zement auf, werden Porosität und Duchlässigkeit ebenfalls geringer. Bei dessen diagenetischer Dolomitisierung kann allerdings die Porosität wieder ansteigen (Schuh 1987).

Bei Mirwald (1997) finden sich gesteinsphysikalische Kennwerte zu Sandsteinen verschiedenen Alters. Die offene Porosität für Quarzsandsteine wird mit 0,5 bis 25 Vol.-% angegeben. Daraus resultiert eine sehr variable Wasseraufnahme zwischen 1,0 und 12,0 Masse-%. Die große Variationsbreite auch bei Gesteinen gleichen Alters und gleicher Genese ist in erster Linie in der schichtungsbedingten Anisotropie begründet und widerspiegelt die komplexen und kleinräumig wechselnden Bedingungen der Sedimentation sowie der nachfolgenden Diagenese des Gesteins. Auch Schuh (1987) stellt fest, dass die Schwankungen der Porosität innerhalb eines Blocks bis zu 20% betragen können. Die Variationsbreite innerhalb eines Gesteinspakets, kann ebenso groß sein wie die der Sandsteine insgesamt. Dementsprechend differenziert verhält sich das Gestein bei der Verwitterung. Ungeachtet der großen Variabilität können selbstverständlich für kommerzielle Produkte technische Parameter zur Verwitterungsresistenz in bestimmten Toleranzen angegeben werden, wie z. B. Rohdichte, Druckfestigkeit, Wasseraufnahme und Abriebfestigkeit.

Von den Sandsteinen vom Pfingstberg ist lediglich bekannt, dass sie aus dem Elbsandsteingebirge stammen. Es liegen keine gesteinsphysikalischen Kennwerte vor. Auf geochemische und mineralogische Besonderheiten der untersuchten Sandsteine wird in Kapitel 5 eingegangen.

2.2 Verwitterungsverhalten

Gut untersucht wurde das Verwitterungsverhalten verschiedener Bayrischer Sandsteine durch Schuh (1987). Er stellte fest, dass sich durch die Veränderung porenraumbezogener Eigenschaften der unmittelbar der Witterung ausgesetzten

Oberflächenschicht Spannungen zwischen Steinkern und Oberfläche aufbauen, die bei häufigem Temperatur- und Feuchtewechsel letztlich zur Zerstörung des Gesteins führen.

Eine Schlüsselrolle spielt hierbei die hygrische Dehnung (Quellung). Bei schrittweiser Befeuchtung des Gesteins kommt es bei einer relativen Luftfeuchte bis 95% zunächst zu einer hygroskopischen, dann verstärkt zu einer kapillaren Wasseraufnahme, wobei zunächst die Kapillarporen (10^2 bis 10^6 nm), später auch die Makroporen (> 10^6 nm) und schließlich die Sackporen mit Wasser gefüllt werden. Feinkörnige Gesteine mit einer großen inneren Oberfläche weisen eine stärkere Quellfähigkeit auf. Entscheidend ist die Anzahl der Kornkontaktstellen. Durch die Ausbildung eines Wasserfilms um die Körner wird der Abstand zwischen ihnen vergrößert und es kommt zu einer Aufweitung des Gefüges und zur Ausdehnung des Körpers.

Bei Anwesenheit von Tonmineralen erhöht sich infolge der Hydratation der Zwischenschichtkationen die Quellfähigkeit erheblich. Versuche am Roten Mainsandstein (Plattensandstein mit 80% Quarz und 10% Feldspat) ergaben, dass bei einer geringfügigen Zunahme des Tongehalts von 2 auf 3% die Quellung um 700% auf 1,4 mm/m anstieg. Frantz (1990) wies durch Kristallisationsversuche (siehe 2.3.5) nach, dass tonig gebundene Sandsteine bereits nach 5 Beanspruchungszyklen zerstört waren, während quarzitisch gebundene Proben nach 50 Zyklen noch nicht zerstört sind.

Die hygrische Dehnung wird durch die Anwesenheit von leichtlöslichen Salzen, die meist auch stark hygroskopisch sind, erheblich verstärkt. Daher werden sie als bauschädliche Salze bezeichnet. Die Hydratation dieser Salze führt zu einer Volumenvergrößerung und erhöht den Sprengdruck auf die Kornkontakte (siehe auch Tab. 3). Die Gefügeaufweitung des Gesteins wird zudem durch den Kristallisationsdruck verstärkt.

Die thermische Dehnung spielt neben der hygrischen Dehnung insbesondere bei tonhaltigen und schon mit Salzen angereicherten Gesteinen eine untergeordnete Rolle, kann aber dennoch erhebliche Werte erreichen. Die klimatischen Temperaturschwankungen führen zu Volumenänderungen der Minerale und verursachen Druck- und Zugspannungen zwischen den Körnern bzw. zwischen Korn und Bindemittel. Diese Prozesse bleiben auf die oberflächennahe Gesteinsschicht beschränkt, so dass zusätzliche Spannungen zwischen Oberflächenschicht und Gesteinskern entstehen. Da die thermischen Ausdehnungskoeffizienten löslicher Salze we-

Tab. 1
Zusammenstellung der wichtigsten bauschädlichen Salze
[aus Weber (1986), Weiss (1992), Grassegger (1997), Lange's (1992), Perry's (1999), Merck (2001), Rösler (1979), u.a.]

Mineralnamen	Zusammensetzung	Löslichkeit in Wasser (in g/100ml bei 20°C)
Sulfate		
Bassanit	$Ca[SO_4] \cdot ½ H_2O$	0,32
Gips	$Ca[SO_4] \cdot 2H_2O$	0,25
Ettringit	$Ca_6Al_2[(OH)_4/SO_4]_3 \cdot 26 H_2O$	k.A.
Arcanit	$K_2[SO_4]$	11,1
Syngenit	$K_2Ca[SO_4]_2 \cdot H_2O$	k.A.
Pikromerit (Schönit)	$K_2Mg[SO_4]_2 \cdot 6 H_2O$	25 [1)]
Glaserit (Aphthitalit)	$K_3Na[SO_4]_2$	k.A.
Kieserit	$Mg[SO_4] \cdot H_2O$	36,2
Hexahydrit	$Mg[SO_4] \cdot 6 H_2O$	42,2
Epsomit (Bittersalz)	$Mg[SO_4] \cdot 7 H_2O$	71
Darapskit	$Na_2[NO_3/SO_4] \cdot H_2O$	k.A.
Thenardit	$Na_2[SO_4]$	19,5
Mirabilit (Glaubersalz)	$Na_2[SO_4] \cdot 10 H_2O$ (monoklin)	36 (15°C)
Glauberit	$Na_2Ca[SO_4]_2$	schwer löslich
Astrakanit (Blödit)	$Na_2Mg[SO_4]_2 \cdot 4 H_2O$	leicht löslich
Ammoniumsulfat	$[NH_4]_2[SO_4]$	75,4
Gunningit	$Zn[SO_4] \cdot H_2O$	60 [1)]
Zinksulfat-Hexahydrat, monoklin	$Zn[SO_4] \cdot 6 H_2O$	60 [1)]
Ammonium-Zinksulfat-Hexahydrat	$[NH_4]_2Zn[SO_4]_2 \cdot 6 H_2O$	12,5 [1)]
Chloride		
Hydrophilit	$CaCl_2$	74,5
Antarcitit	$CaCl_2 \cdot 6 H_2O$	536
Tachyhydrit	$CaMg_2Cl_6 \cdot 12 H_2O$	160,3 (18,75°C)
Sylvin	KCl	34,2
Bischofit	$MgCl_2 \cdot 6 H_2O$	167 (54,6 [1)])
Halit (Kochsalz)	$NaCl$	35,9
Nitrate		
Calciumnitrat	$Ca[NO_3]_2$	102 (0°C)
Nitrocalcit (Kalksalpeter)	$Ca[NO_3]_2 \cdot 4 H_2O$	129
Nitrokalit (Kalisalpeter, Niter)	$K[NO_3]$	31,6
Nitromagnesit (Magnesiasalpeter)	$Mg[NO_3]_2 \cdot 6 H_2O$	69,5 [1)]
Nitronatrit (Natronsalpeter)	$Na[NO_3]$	87,6
Nitrammit (Ammonsalpeter)	$[NH_4][NO_3]$	192
Karbonate		
Calcit (Kalkspat)	$Ca[CO_3]$	1,4
Portlandit	$Ca[OH]_2$	0,173
Dolomit	$CaMg[CO_3]_2$	0,032 (18°C)
Pottasche	$K_2[CO_3]$	112
Kaliumkarbonat, Dihydrat	$K_2[CO_3] \cdot 2 H_2O$	147
Kalicinit	$KH[CO_3]$	33,7
Magnesit (Bitterspat)	$Mg[CO_3]$	0,0106
Nesquehonit	$Mg[CO_3] \cdot 3 H_2O$	0,1518 (19°C)
Hydromagnesit	$Mg_5[OH/(CO_3)_2]_2 \cdot 4 H_2O$	k.A.
Natrit (Soda)	$Na_2[CO_3] \cdot 10 H_2O$	21,5 (0°C), 238 (30°C)
Thermonatrit	$Na_2[CO_3] \cdot H_2O$	k.A.
Trona	$Na_3H[CO_3]_2 \cdot 2 H_2O$	13 (0°C), 42 (100°C)
Nahcolith	$NaH[CO_3]$	9,6

[1)] Angabe für das wasserfreie Salz
[2)] metastabiler Bodenkörper

sentlich höher sind als die der gesteinsbildenden Minerale, wird in einem salzbelasteten Gestein – bei entsprechender Porenfüllung – ein zusätzlicher thermischer Effekt eintreten (WEISS 1992).

2.3 Verwitterung durch bauschädliche Salze (Salzsprengung)

2.3.1 Art der Salze

Auf der Grundlage von bauchemischen Untersuchungen an ca. 100 Gebäuden stellt WEBER (1986) fest, dass bauschädliche Salze die maßgeblichen Verursacher von umweltbedingten Bauschäden sind. In erster Linie handelt es sich dabei um leichtlösliche Sulfate, Chloride und Nitrate. Daneben treten auch Karbonate auf. In Tabelle 1 sind mehr oder weniger häufig anzutreffende typische bauschädliche Salze aufgeführt. Viele dieser Salze sind auch als natürliche Minerale z. B. aus Evaporitlagerstätten bekannt. Die Angaben zur Wasserlöslichkeit stammen hauptsächlich aus LANGE'S (1992) und MERCK (2001). Die in den Fachpublikationen gefundenen Werte unterscheiden sich teilweise erheblich. Bei Hydraten ist dies aus der Tatsache zu erklären, dass das Kristallwasser unterschiedlich berücksichtigt wurde.

2.3.2 Herkunft der Salze

Die Salze stammen meist nur zu einem geringen Teil aus dem Gestein selbst. So berichtet WEBER (1986) von oberbayrischen Tuffen mit einem Gehalt an löslichen Eigensalzen von ca. 2%. Entscheidend sind die durch Immission über den Luftpfad und die Niederschläge, aber auch – bei Grundmauern – über den Boden durch aufsteigende Feuchtigkeit eingetragenen bzw. neu gebildeten Fremdsalze. Weitere Quellen sind Stickstoffverbindungen aus Düngemitteln oder Fäkalien in landwirtschaftlich genutzten Gebäuden, Toilettenanlagen oder an anderen exponierten Gebäudeteilen (Exkremente von Vögeln, Hunden etc.). Im straßennahen Sockelbereich führen Tausalze häufig zu einer erheblichen Schädigung der Bausubstanz (z. B. FRIESE & PROTZ 1994).

Darüber hinaus kann es zur Bildung von bauschädlichen Salzen durch die Verwendung ungeeigneter oder unverträglicher Werkstoffe sowohl im konstruktiven als auch im restaurativen Bereich kommen. So entsteht beispielsweise an Kontakten von Zement und Gips Ettringit, ein Calcium-Aluminium-Sulfat mit hohem Wasseranteil, der durch seine starke Quellwirkung Zerstörungen verursacht und daher auch als Zementbazillus bezeichnet wird (WEBER 1986). Metallteile am Bauwerk, wie Eisenanker, Bleirohre, Bleche der Dacheindeckung oder Schmuckelemente stellen ebenfalls potentielle Kationen-Lieferanten dar, wofür die Säulen auf dem Pfingstberg mit ihren Zinkgusskapitellen ein eindrucksvolles Beispiel geben.

Die Problematik der Werkstoffunverträglichkeit wird besonders deutlich bei Betrachtung der historischen Restaurierungsmaßnahmen am Dresdner Zwinger (ARNOLD 1991). Hier fand 1780-1790 zunächst Gipsmörtel zur Ausbesserung des schadhaften Sandsteins Verwendung. Später (1860, 1890) wurde Portlandzement benutzt. Die Reste des anschließend aufgebrachten Ölfarbanstrichs (!) wurden 1926 bis 1936 mit der sogenannten Zwingerpaste (Sägespäne, Weißkalk, Schmierseife, NaOH) abgebeizt. Alle diese Maßnahmen führten zu einer enormen auch makroskopisch sichtbaren Salzbelastung des Sandsteins. Bei Analysen wurden Alkalinitrate, Glaserit, Thenardit und Gips gefunden.

Bei GRASSEGGER (1997) finden sich illustrierte Beispiele für Ausblühungen von Salzen, die aus Steinersatzmassen bzw. dem Fugenmörtel stammen.

Reinigungsmaßnahmen von Natursteinoberflächen mit sauer reagierenden Systemen auf HCl- oder HF-Basis führen zur Korrosion von karbonatischen bzw. silikatischen Mineralen unter Bildung von Chloriden und Fluoriden. Auch bei der Anwendung von Laugen kommt es als unerwünschter Nebeneffekt zur Salzbildung in Form von Alkalikarbonaten (AURAS, SIEDEL et al. 1997).

2.3.3 Immissionen als Quelle bauschädlicher Salze

Die Luftverschmutzung ist eine der hauptsächlichen Ursachen für die Zerstörung insbesondere historischer Bausubstanz. Die Intensität der Einwirkung immittierter Luftschadstoffe auf Gebäude und Gebäudeteile sind von zahlreichen Faktoren abhängig, wobei letztendlich die Konzentration der Schadstoffe in der Luft bestimmend ist. Man kann vier Komplexe von Einflussgrößen unterscheiden, zwischen denen es vielfältige Wechselwirkungen gibt:

1. die baustoffspezifischen Faktoren, wie Dichte, Porosität, Wasseraufnahme, Durchlässigkeit und chemische Zusammensetzung („Reaktionsvermögen");
2. die klimatischen Faktoren, wie Niederschlagsmenge und -häufigkeit, Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung, Windstärke und -richtung, Frost-Tau-Wechsel;
3. die Expositionsfaktoren, wie räumliche Ausrichtung (Himmelsrichtung), Flächenneigung und vertikale Position (Höhe) des Bauteiles und schließlich
4. die Immissionsfaktoren, wie Konzentration und Zusammensetzung der Luftschadstoffe.

Von verschiedenen Autoren wurden Depositionsmessungen direkt am Bauwerk vorgenommen (in GRASSEGGER 1997). Sie ergaben, dass die Schadstoffe sowohl durch nassen als auch trockenen Eintrag akkumuliert werden. Die Deposition ist deutlich himmelsrichtungsabhängig, wobei wegen der vorherrschenden westlichen Wetterlagen an den nach Westen gerichteten Flächen die höchsten Raten festgestellt wurden. An vertikalen Flächen werden nur 1,5-3% der Niederschläge und lediglich 10% der an horizontalen Flächen gemessenen Immissionen wirksam.

Die Entstehung bauschädlicher Salze im Werkstein erfolgt durch die Reaktion der sich nach den folgenden Gleichungen bildenden Säuren mit den Gesteinskomponenten. In jedem Falle ist die Säurebildung an das Vorhandensein von

Wasser gebunden. Bezüglich ihres Säurepotentials stehen die Schwefelverbindungen an erster Stelle, gefolgt von den Stickstoffverbindungen (FÖRSTNER 1984).

$$SO_2 + 2\,H_2O \rightarrow 2\,H_2SO_3$$
$$2\,H_2SO_3 + O_2 \rightarrow 2\,\mathbf{H_2SO_4}$$

$$2\,NO + O_2 \rightarrow 2\,NO_2$$
$$4\,NO_2 + 2\,H_2O + O_2 \rightarrow 4\,\mathbf{HNO_3}$$

$$CO_2 + H_2O \rightarrow \mathbf{H_2CO_3}$$

Insbesondere Karbonate werden durch die sauren Lösungen angegriffen und zu Gips, Calciumchlorid bzw. Calciumnitrat umgesetzt:

$$CaCO_3 + H_2SO_4 + 2\,H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2\,H_2O + H_2O + CO_2$$
$$CaCO_3 + 2\,HCl \rightarrow CaCl_2 + H_2O + CO_2$$
$$CaCO_3 + 2\,HNO_3 \rightarrow Ca(NO_3)_2 + H_2O + CO_2$$

Die Anreicherung von Gips führt zur Ausbildung von Krusten an der Gesteinsoberfläche. In Verbindung mit Rußpartikeln und anderen Stäuben entstehen die für Sandsteine typischen schwarzen Beläge. Auch die silikatischen Bestandteile unterliegen einer chemischen Verwitterung durch die sauren Lösungen, die über kapillare Wasseraufnahme und Wasserdampfdiffusion in den oberflächennahen Bereich oder an Schwächezonen (Schichtflächen, Risse, Tonmineralnester o. ä.) auch tiefer eindringen. Die Porenlösungen weisen einen nahezu neutralen pH-Wert auf. Der Neutralisationsprozess der sauren Niederschläge ist mit einer Freisetzung insbesondere von Ca, Mg und K aus den Mineralen verbunden. In der Zone zwischen Gesteinsoberfläche und unverändertem Gestein müssen also stark schwankende pH-Verhältnisse herrschen (pH = 4 bis 12), die auch zu einer Mobilisierung von Al und Fe führen können, was sich erheblich auf die Tonmineralzusammensetzung auswirken kann (GRASSEGGER 1997).

2.3.4 Immissionssituation auf dem Pfingstberg

Die Konzentrationen von Schwefeldioxid (SO_2), Stickstoffdioxid (NO_2), Stäuben, Ozon und anderen Schadstoffen werden durch das bundesweite Luftschadstoff-Messnetz des Umweltbundesamtes bzw. der Länder überwacht. In Tabelle 2 sind die diesbezüglichen Jahresmittelwerte zweier Potsdamer Messstellen in unmittelbarer Umgebung des Pfingstberges zusammengestellt. Die Messstelle Potsdam Hebbelstraße 1 liegt im Stadtzentrum ca. 2 km vom Pfingstberg entfernt, während die Messstelle Hermannswerder einen Bereich mit einem hohen Grünanteil und sehr geringer Verkehrsbelastung repräsentiert (Entfernung vom Pfingstberg ca. 4 km). Die Werte der Messstellen Berlin Parochialstraße und Dresden-Mitte erlauben einen Vergleich mit der Immissionssituation in großstädtischen Zentren. Die Messstelle Neuglobsow repräsentiert ein nahezu unbelastetes Gebiet.

Als unmittelbare Folge des deutlichen Rückgangs der Industrieproduktion im Berliner Ballungsgebiet nach der Wende 1989/90 sowie dank der Ausrüstung der bestehenden Großkraftwerke mit Rauchgasentschwefelungsanlagen und der weitgehenden Umstellung der Gebäudeheizungen auf Erdgas und Fernwärme ist die Entwicklung der SO_2-Immissionen stark rückläufig. Auch die Staubimmissionen sanken seit 1990 um 50%. Der Staubniederschlag an der Messstelle Potsdam, Hebbelstraße betrug im Jahr 1999 222 mg/m²d. Die in erster Linie durch den Straßenverkehr verursachten Stickoxid-Immissionen nahmen dagegen infolge des zunehmenden Verkehrsaufkommens nur unwesentlich ab.

Nach der I_L-Werteskala liegt der Bereich Potsdam mit einem Luftverunreinigungsindex von 0,25 an der Obergrenze der Klasse „niedrige Luftverunreinigung" (LUA 2000). Bei einer weiteren Verringerung der Schadstoffimmissionen insbesondere von Stickoxiden bestehen gute Voraussetzungen für eine lange Bestandsdauer der Restaurierungsmaßnahmen auf dem Pfingstberg und in Potsdam insgesamt.

Tab. 2 Immissionsdaten von Luftschadstoffen für ausgewählte Messstellen
(Arithmetischer Mittelwert der Einzelmessungen in µg/m³)
Quellen: Datenbank des Umweltbundesamtes Berlin (www.umweltbundesamt.de),LUA 2000, SENSTADTUM 2001
[1] errechnet aus PM10

	SO_2					NO_2					Gesamtstaub (TSP)				
	P1	P2	B	DD	N	P1	P2	B	DD	N	P1	P2	B	DD	N
1988	40		64		10								66		39
1989	53	58	106	61	13						64	64		115	40
1990	55		66			17	16	38	19	7	45		73	82	
1991	53	29			16	44					56		78	76	26
1992	34		35	92	9			36	35	10	41		68	67	22
1993	34		29	47	11	26		36	35	8	43		70	65	21
1994	26	24	22	39	7	27	19	35		8	35	38	57	58	20
1995	16	15	19	32	8	26	19	34		9	38	35	54	53	20
1996	18	9	17	28	10			36	31	9	41	36	61	60	21
1997	10		11	23	5	28	17	36	34		37	29	53	52	16
1998	7		8	13	4	23		33	35	10	30		43	43	15
1999	5		6	12	4	28	17	32	32	10	27	20	40[1]	39	13
2000	5		7	6	4	25		29	33	8	22		37[1]	36	14
Leitwert	40-60					50					150				

Messstellen:

P1 Potsdam-Zentrum, Hebbelstraße 1 (BB021)
P2 Potsdam, Hermannswerder (BB020)
DD Dresden-Mitte, Postplatz (SN014)
N Neuglobsow (UB030)
B Berlin-Mitte, Parochialstraße (BE044 MC71)

2.3.5 Mechanismen der Salzsprengung

Die physikalisch-chemischen Mechanismen der Gefügezerstörung durch die Wirkung von löslichen Salzen wurden von zahlreichen Autoren untersucht (u. a. SCHUH 1987, HOFFMANN & GRASSEGGER 1995). Eine Zusammenstellung der aus der Literatur bekannten Theorien wird von WEISS (1992) gegeben.

Tab. 3
Übergangstemperatur und Volumenexpansion einiger ausgewählter Salzsysteme (aus WEISS, 1992)

System	Übergangs-temperatur [°C]	Volumen-expansion [Vol.-%]
$NaCl$ / $NaCl \cdot 2\ H_2O$	0,2	-
$CaSO_4 \cdot ½\ H_2O$ / $CaSO_4 \cdot 2\ H_2O$	-	31,9
Na_2SO_4 / $Na_2SO_4 \cdot 10\ H_2O$	32,4	313,7
$Na_2CO_3 \cdot H_2O$ / $Na_2CO_3 \cdot 7\ H_2O$	35,4	93,7
$Na_2CO_3 \cdot H_2O$ / $Na_2CO_3 \cdot 10\ H_2O$	32,0	147,4
$MgSO_4 \cdot H_2O$ / $MgSO_4 \cdot 6\ H_2O$	67,5	145,0
$MgSO_4 \cdot H_2O$ / $MgSO_4 \cdot 7\ H_2O$	-	173,3

Für die normierte Beurteilung der Resistenz eines Baumaterials gegen Salzverwitterung im Rahmen der Materialprüfung werden in der BRD durch die DIN 52 111 und die VDI-Richtlinie 3 797 Kristallisationstests mit Natriumsulfat vorgeschrieben. Wie aus der Tabelle 3 ersichtlich ist, bewirkt der Hydratationsvorgang im System $Na_2[SO_4]$ (Thenardit) / $Na_2[SO_4] \cdot 10\ H_2O$ (Mirabilit) eine Volumenzunahme von über 300% und führt daher zu einer starken hygrischen Dehnung. Bei den Tests werden Prüfkörper definierter Form mit einer Natriumsulfat-Lösung (10%ig bis gesättigt) getränkt und anschließend bei 105 °C getrocknet. Dieser Zyklus wird bis zu 100 mal wiederholt. Nach jedem Zyklus erfolgt eine Sichtprüfung des Zustandes des Prüfkörpers sowie die Bestimmung diverser Parameter, wie des Masseverlusts, der Biegezugfestigkeit und des dynamischen Elastizitätsmoduls.

Das Salzsystem Thenardit/Mirabilit spielt zwar auch in der Natur eine große Rolle, aber die extremen Bedingungen bei diesem Prüfverfahren sind sicher nicht mit den realen Witterungverhältnissen zu vergleichen, denen Bauwerke ausgesetzt sind. Extreme Versuchsbedingungen im Labor sollen, wie oft nicht anders möglich, den Zeitfaktor natürlicher Prozesse ausgleichen. Die wissenschaftlichen Untersuchungen anhand von Kristallisationstests an verschiedenen Sandsteinen führten zu wichtigen grundsätzlichen Erkenntnissen:

- Bestimmend für die Salzsprengung ist der durch Hydratation löslicher Salze verursachte Druck auf die Kornkontakte. Kristallisationsvorgänge spielen eine untergeordnete Rolle.

- Das Schadensausmaß wird wesentlich durch die porenraumbezogenen Eigenschaften des Gesteins, wie Porenvolumen (bzw. innere Oberfläche) und Porengrößenverteilung beeinflußt. Sie bestimmen einerseits das Kapillarverhalten und damit die Eindringtiefe der Salzlösung, andererseits aber auch das Trocknungsverhalten. Bei grobporigen Gesteinen verläuft der Kapillartransport der Lösungen schneller und intensiver und zwar sowohl in das Gestein hinein (Durchfeuchtung) als auch in entgegengesetzter Richtung (Trocknung). Bei der Trocknung wird ein Großteil der Salze mit der Lösung wieder zurück in Richtung Oberfläche transportiert, bevor die Kristallisation aus der nun übersättigten Lösung einsetzt. Die Salze finden sich mehr oder weniger gleichmäßig über die gesamte relativ tiefgründige Durchfeuchtungszone verteilt. Die Durchfeuchtung feinporiger Gesteine bleibt auf wenige Millimeter beschränkt. Das Maximum der Salzanreicherung liegt jedoch wegen des erschwerten kapillaren Rücktransports im inneren Bereich dieser Zone. Festigkeitsuntersuchungen an Sandsteinen zeigten, dass Gesteine mit höherer Porosität und höheren Wasseraufnahmekoeffizienten zu oberflächlicher Absandung neigen, während es bei solchen mit einer niedrigen Wasseraufnahmefähigkeit eher zur Schalenbildung kommt (SCHUH 1987).

- Die Kristallisation des Salzes beim Trocknungsvorgang findet vorrangig in den kleineren intergranularen Poren sowie in den Mikrorissen des Gesteins statt, die vollständig ausgefüllt werden. In größeren Poren kommt es lediglich zur Ausbildung von 5 bis 10 µm dicken Schichten an der Porenwandung. Bei Wiederbefeuchtung durch erhöhte Luftfeuchtigkeit oder Niederschlag führt die einsetzende Hydratation nur in den kleinen Poren zur Schwächung der Kornbindungen und zu Gefügeaufweitungen (WEISS 1992).

- Natürliche Porenlösungen stellen in der Regel ein komplexes Multikomponentensystem aus diversen Salzen dar. Die Fällungsabfolge wird streng von den Löslichkeiten dieser Salze bestimmt (Tab. 1).

- Texturelle und mineralogische Besonderheiten, wie Schichtung und die damit meist in Zusammenhang stehende Anwesenheit von Tonmineralen führen zu einer Verstärkung der Salzverwitterung.

3. Methoden der Behandlung bauschädlicher Salze

Das umfangreiche Wissen um die Wirkung bauschädlicher Salze und die bisherigen Erfahrungen bei Sanierungsarbeiten machen das Erfordernis deutlich, vor Beginn von Restaurierungsmaßnahmen historischer Gebäude Untersuchungen zum Belastungsgrad an löslichen Salzen anzustellen. SNETHLAGE (1997) hebt die Notwendigkeit der Salzbestimmung anhand von Tiefenprofilen hervor, „um Aussagen über die räumliche Verteilung der Salze und damit über Erfolgsaussichten möglicher Entsalzungsmaßnahmen treffen zu können". Nur durch stoffliche Untersuchungen vor und nach der Sanierung kann eine erfolgreiche Entsalzung nachgewiesen werden. Problematisch ist dabei jedoch die zerstörende Probenahme durch die notwendigen Bohrarbeiten, die in vielen Fällen insbesondere bei figürlichen Objekten nicht in Frage kommt. Als Alternative schlägt FRIESE (1991) die Messung der Leitfähigkeit vor.

Erst eine nahezu vollständige („quantitative") Entsalzung von Natursteinen bietet die Gewähr für die gewünschte Wirk-

samkeit und Dauerhaftigkeit späterer restaurativer Maßnahmen, wie Festigung, Hydrophobierung oder Steinersatz.

Bei GRASSEGGER (1997) werden Richtwerte für Anionen zur Beurteilung der Schwere von Salzbelastungen in Mauerwerk angegeben (Tab. 4). Diese Werte sind sicher nicht einfach auf Gebäudeteile ohne direkten Kontakt zu den Bodenlösungen übertragbar, bieten aber einen Anhaltspunkt für die Einschätzung der gefundenen Konzentrationen. Wie die im Weiteren dargestellten Untersuchungen zeigen, ist die Salzbelastung der Pfingstberg-Säulen für Sulfat mit bis zu 1,8 Masse-% als hoch und für Chlorid und Nitrat als mittel einzustufen. Schadensrelevante Grenzwerte von löslichen Salzen in Natursteinen werden in dem noch in diesem Jahr als Gelbdruck erscheinenden Merkblatt der Wissenschaftlich-Technischen Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege (WTA) „Zerstörungsfreies Entsalzen von Natursteinen und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen" zu finden sein. Ein guter Überblick über die prinzipiellen Möglichkeiten, die Wirkung bauschädlicher Salze zu verhindern, wird von SIEDEL (in AURAS & SIEDEL 1997) gegeben. Die derzeit am häufigsten angewandte Methode ist die Entfernung der Salze mit Hilfe von Kompressen.

Tab. 4
Beurteilung der Schwere von Salzbelastungen im Mauerwerk, in Masse-% (aus GRASSEGGER, 1997)

Anion	Belastung		
	gering	mittel	hoch
Chlorid	<0,05	0,05 – 0,5	>0,5
Sulfat	<0,1	0,1 – 0,5	>0,5
Nitrat	<0,05	0,05 – 0,15	>0,15

Die Methode der Kompressenentsalzung beruht darauf, dass durch Auflegen von feuchten Kompressen aus saugfähigem Material die Verdunstungszone des im Gestein enthaltenen Porenwassers von der Steinoberfläche an die Oberfläche der Kompresse verlegt wird. Aus der feuchten Kompresse dringt zunächst Wasser in die oberflächennahen Bereiche des Gesteins und löst die dort befindlichen Salze. Bei nachlassender Wasserzufuhr aus der Kompresse migrieren die Salzionen mit den Porenlösungen in Richtung Verdunstungszone und kristallisieren bei Überschreitung der kritischen Konzentration (Löslichkeit) in der Kompresse bzw. an deren Oberfläche. Die Kompressen sind fest mit dem Werkstein verbunden und werden in der anfänglichen Durchnässungsphase feucht gehalten. In Abhängigkeit von der Salzbelastung werden die Kompressen periodisch gewechselt.

Für die Behandlung der Sandsteinsäulen auf dem Pfingstberg standen zwei Verfahren der Kompressenentsalzung zur Auswahl: das herkömmliche Verfahren mittels Zellulosekompressen sowie das Injektionskompressenverfahren nach FRIESE, das ursprünglich für die Entsalzung von Mauerwerk entwickelt und für diesen Einsatz entsprechend modifiziert wurde (FRIESE & HERMONEIT 1993, FRIESE & PROTZ 1994). Bei beiden Verfahren wurden die Sandsteinsäulen komplett mit saugfähigen Kompressen umwickelt. Die Zellulosekompressen wurden während der ca. 2-monatigen Behandlungszeit nach jeweils 3 Wochen gewechselt. Bei dem Injektionskompressenverfahren soll die Wirksamkeit der bis zu 3 Monate dauernden Entsalzung durch den Eintrag von destilliertem Wasser in den Säulenkörper über dünne Schrägbohrungen im Kopfbereich der Säule intensiviert werden. Als Kompressenmaterial finden Viskosematten Verwendung. In einer Testphase wurden beide Verfahren an je einer Säule eingesetzt. Beide Säulen wurden vor und nach der Entsalzung beprobt.

4. Durchgeführte Untersuchungen

4.1 Probenahme und -aufbereitung

Für die Untersuchungen wurden die Säulen mit den Bezeichnungen 9L und 10L ausgewählt und beide im März 2000 vor der Entsalzung beprobt. Säule 9L wurde anschließend mit Zellulosekompressen behandelt und Säule 10L mit Viskosekompressen nach dem Injektionskompressenverfahren. Nach der 2 bis 3-monatigen Behandlung erfolgte im September 2000 erneut eine Beprobung, um den Wirkungsgrad der Entsalzung festzustellen.

Die Gesteinsproben wurden mittels Schlagbohrmaschine aus jeweils drei unterschiedlichen horizontalen Tiefenbereichen (0-2 cm, 2-6 cm, 6-20 cm, bezogen auf die aktuelle Verwitterungsoberfläche) sowohl im unteren (1,0 m über dem Säulenfuß) als auch im oberen Säulenbereich (0,4 m unter Rundstab) entnommen[1]. Um die Säulen möglichst wenig zu beschädigen, erfolgte im mittleren Säulenbereich (2,0 m über Säulenfuß) lediglich die Entnahme von lockeren stückigen Proben aus dem Tiefenbereich 0 bis 2 cm. Die Probenahme nach der Entsalzung erfolgte nur wenige Zentimeter unter den Bohrlöchern der ersten Beprobung.

Zur mineralogischen Identifizierung der bauschädlichen Salze wurden zusätzlich eine Probe der weißen Salzkrusten von der Oberfläche der Säule 10L vor der Entsalzung sowie jeweils eine Sammelprobe von Salzausblühungen an den Kompressen der Säulen 14i, 16i und 16L während der Entsalzung entnommen.

Die Entnahme der Proben aus den Zellulosekompressen erfolgte durch Herrn Steinbildhauermeister Andreas Klein bei jedem Kompressenwechsel.

Die Entnahmepunkte der Gesteinsproben wurden nach folgendem Schema bezeichnet. Diese Bezeichnungen (z. B. 9L-U-2) werden in allen betreffenden Tabellen und Diagrammen verwendet.

Säule (9L; 10L) - **Höhe** (**U**nten, **M**itte, **O**ben) - **Tiefe** (**1** = 0-2 cm, **2** = 2-6 cm, **3** = 6-20 cm).

Für die geochemischen Untersuchungen wurden lediglich die stückigen Proben mittels einer Achat-Mörsermühle zerkleinert. Alle anderen Proben lagen als Bohrmehl vor und mussten nicht weiter aufgemahlen werden.

4.2 Analytische Methoden

Sämtliche analytischen Arbeiten wurden in den Laboratorien des LGRB durchgeführt. Die kompletten Untersuchungsergebnisse finden sich bei MÜLLER & LUCKERT (2000). Bei der

Datenauswertung wurden Befunde unterhalb der Bestimmungsgrenzen (BG) durch die halbe BG ersetzt.

Folgende Untersuchungsmethoden fanden Anwendung:
- Ionenchromatographie (IC),
- Titrimetrie,
- optische Emissionsspektrometrie mittels induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES),
- wellenlängendispersive Röntgenfluoreszenzanalyse (WDRFA),
- Röntgenbeugungsanalyse (RBA).

4.2.1 Wässrige Auszüge und lösliche Salze

Zur Bestimmung der Gehalte an leichtlöslichen Salzen wurden von den Sandsteinproben wässrige Auszüge hergestellt. 1 bis 4 g der als Bohrmehl vorliegenden Proben wurden mit 100 bis 200 ml Reinwasser (RO) versetzt und 60 Minuten bei 250 U/min auf einer horizontal rotierenden Schüttelmaschine geschüttelt. Der Verdünnungsfaktor lag zwischen 50 bis 100. Als optimal bezüglich der Konzentrationsbereiche der Analyten bei der anschließenden ionenchromatographischen Bestimmung erwies sich das Verhältnis 4 g Probe : 200 ml Reinwasser. In gleicher Weise wurden auch die wässrigen Auszüge der Zelluloseproben hergestellt.

An den Lösungen erfolgte die ionenchromatographische Bestimmung von Chlorid (Cl^-), Sulfat (SO_4^{2-}), Orthophosphat (oPO_4^{3-}), Nitrat (NO_3^-), Natrium (Na^+), Kalium (K^+), Calcium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}) und Ammonium (NH_4^+) an einem Gerät vom Typ DX500 (Firma Dionex) mit separaten Modulen zur Bestimmung von Anionen und Kationen. Hierbei wurden Trennsäulen vom Typ AS14 (4 mm) und CS12A (4 mm) verwendet.

Die Bestimmung der Säurekapazität $K_{S4,3}$ (m-Wert) erfolgte titrimetrisch mit elektrometrischer Endpunktbestimmung an einem Gerät der Firma Metrohm vom Typ 716DMS-Titrino. Aus der Säurekapazität wurde die Konzentration der Hydrogenkarbonat-Ionen (HCO_3^-) berechnet.

Die Bestimmung der Elemente Aluminium (Al), Eisen (Fe), Mangan (Mn), Cobalt (Co), Nickel (Ni), Cadmium (Cd), Blei (Pb) und Zink (Zn) in den wässrigen Auszügen erfolgte mittels ICP-OES an einem Gerät der Firma Fisons (jetzt Thermo Elemental) vom Typ Maxim III mit axial angeordneter Plasmafackel.

4.2.2 Totalgehalte

Die Totalgehalte von 36 Elementen in den Sandsteinproben wurden röntgenfluoreszenzanalytisch bestimmt. Dazu wurden die bei 1000 °C vorgeglühten Proben mit Lithiummetaborat als Schmelzmittel versetzt und bei 1150 °C aufgeschmolzen. Die Messung der Schmelztabletten erfolgte an einem wellenlängendispersiven RFA-Spektrometer der Fa. Philips vom Typ PW2400. Außer den Haupt- und Nebenelementen wurden auch zahlreiche Spurenelemente bestimmt. Die Glühverluste bei 1000 °C beziehen sich auf die bei 105 °C getrockneten Proben.

4.2.3 Mineralogische Untersuchungen

Die quantitativen Mineralbestimmungen wurden mittels Röntgenbeugungsanalyse durchgeführt. Nach der Trocknung bei 40 °C wurde das Bohrmehl für die Anfertigung der Analysenpräparate auf < 32 µm zerkleinert. Die quantitativen Mischungen wurden aus 1 g der Probensubstanz, 50 mg Nickelpulver (< 32 µm) als innerer Standard und 40 mg gereinigtem Korkmehl (< 200 µm) hergestellt. Diese Mischungen wurden in speziellen Langschlitzküvetten aus Glas texturarm präpariert und im Winkelbereich von 3-52 °2Θ geröntgt.

Die hier angewandte quantitative Mineralbestimmung wurde als Peakhöhenanalyse nach dem Verfahren mit innerem Standard durchgeführt. Für das Erkennen präparativ bedingter Ausreißer und zur Gewährleistung der Reproduzierbarkeit der Analysenwerte waren je Probe stets drei Aufnahmen notwendig, wobei vor jeder Aufnahme die Probe erneut homogenisiert sowie texturarm präpariert wurde. Die quantitative Bestimmung aller nachweisbaren kristallinen Phasen erfolgte auf der Basis einer Auswahl an probenspezifischen Eichkurven. Die Anteile an amorpher Phase können dabei nur indirekt als Differenz zu 100% kristalliner Phase bestimmt werden. Der relative Meßfehler liegt bei diesem Verfahren im Allgemeinen unter 5%. Die Nachweisgrenze der festgestellten Minerale liegt bei 0,5-1 Masse-%. Die Röntgenbeugungsaufnahmen wurden an den Analysegeräten HZG 4 und XRD 3000 TT unter laborspezifischen Standardbedingungen gewonnen.

Zusätzlich zu den Sandsteinproben wurden vier Proben der Salzausblühungen analysiert. Das Material wurde zwei Tage bei Raumtemperatur (25 °C) getrocknet, < 63 µm pulverisiert und danach im Winkelbereich von 3-70 °2Θ geröntgt. Die Auswertung der Übersichtsdiagramme erfolgte halbquantitativ.

5. Ergebnisse

5.1 Chemisch-mineralogische Zusammensetzung des unverwitterten Sandsteins

Bei dem aus dem Elbsandsteingebirge stammenden Werkstein handelt es sich um einen fein- bis mittelkörnigen quarzitisch gebundenen Quarzsandstein mit einem mittleren SiO_2-Gehalt von 97%. Die Quarzgehalte variieren zwischen 93 und 96%. An den analysierten Quarzen wurden im Vergleich zu einem idealkristallinen Bergkristall Kristallinitätsdefizite festgestellt, die neben ererbten Defekten vor allem in der transportbedingten Amorphisierung der Quarzkornoberflächen und durch die kryptokristalline Ausbildung der als Bindemittel auftretenden Kieselsäure begründet sein dürften.

Neben Quarz konnten in allen Proben 3-5% Kalifeldspat anhand seines Hauptreflexes bei 3,24 Å festgestellt werden. Aufgrund der geringen Gehalte war eine Zuordnung zu der Varietät Orthoklas bzw. Mikroklin nicht möglich. Das völlige Fehlen von Feldspäten der Plagioklasreihe dürfte auf die im Herkunftsgebiet der Sandsteine kreidezeitlich nachgewiesene intensive Gesteinsverwitterung (Kaolinisierung) zurückzuführen sein. In den meisten Sandsteinproben wurden 1-3% an amorpher Phase als defizitärer Rest zu 100% kristalli-

ner Substanz ausgehalten. Neben geringen Mengen an amorphen Eisenoxidhydraten sowie möglichen Kieselsäureresten sind hier auch Mineralspuren erfaßt, wie z. B. Schwerminerale, die unterhalb der röntgenographischen Nachweisgrenze liegen. Bezüglich der Zementation des Sandsteins kann aus den sehr niedrigen Calciumgehalten (< 0,01% CaO) auf eine weitgehende Karbonatfreiheit geschlossen werden.

Zwischen beiden Säulen bestehen bezüglich der lithogenen Haupt- und Spurenelemente keine signifikanten Unterschiede. In Tabelle 5 sind die gemittelten Totalgehalte (50er Perzentile P50 = Medianwerte) aller Proben aus dem Tiefenbereich 6 bis 20 cm im Vergleich mit den globalen Clarkewerten sowie den P50-Werten für die sächsischen Elbsandsteine zusammengestellt. Deutlich ist eine Anreicherung mit Zink erkennbar, die mit Sicherheit aus den verwitterten Zinkkapitellen stammt. Die hohen Wolfram-Gehalte sind als Kontamination durch das Bohrwerkzeug während der Probenahme zu erklären. Die anomal niedrigen Gehalte von Rubidium und Zirkonium deuten möglicherweise eine lithogeochemische Besonderheit dieses Sandsteintyps an.

Tab. 5 Chemismus der Sandsteine

	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Pfingstberg (P50, N=11)	97,25	0,11	1,29	0,24	0,004	<0,01	<0,01	0,05	0,5	0,015	0,38
Quarzsandsteine (N=26) [1]	95,4	-	1,1	0,4	-	0,1	1,6	0,1	0,2	-	-
Sandsteine Elbsandsteingebirge (P50) [2]	-	-	1,7	3	0,01	0,07	0,07	0,05	0,14	0,009	-

	Ba	Ce	Co	Cr	Cu	Ga	Hf	La	Mo	Nb	Ni
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Pfingstberg (P50, N=11)	88	11	<5	17	<10	<5	<5	14	<5	<3	2,5
Clarkwerte Sandsteine [3]	X0	92	0,3	35	X	12	3,9	30	0,2	0,0X	2
Sandsteine Elbsandsteingebirge (P50) [2]	(115)	-	(1,5)	(17)	(18)	-	-	-	-	-	(2,5)

	Pb	Rb	Sr	Ta	Th	U	V	W	Y	Zn	Zr
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Pfingstberg (P50, N=11)	14	<3	17	<5	18	<3	8	56	14	157	114
Clarkwerte Sandsteine [3]	7	60	20	0,0X	1,7	0,45	20	1,6	40	15	220
Sandsteine Elbsandsteingebirge (P50) [2]	(24)	-	-	-	9,6[4]	2,9[4]	-	-	-	(15)	-

P50 - 50er Perzentilwert, N - Anzahl der Werte, LOI - Glühverlust bei 1000 °C

[1] aus Füchtbauer (1988) S.103
[2] aus Kardel & Rank (1996); bei N < 10 Angaben in Klammern
[3] aus Rösler & Lange (1975)
[4] Mittelwert

Obwohl zur Problematik der bauschädlichen Salze bereits viele Untersuchungen durchgeführt wurden, finden sich in der Literatur wenige Daten zu ihren lithogenen Gehalten in unbeeinflussten Natursteinen, wie auch Weiss (1992) beklagt. Bei lithogeochemischen Untersuchungen interessieren in der Regel nur die Totalgehalte der Gesteine oder einzelner Minerale. Wie im Weiteren gezeigt wird, ist auch der Tiefenbereich von 6 bis 20 cm deutlich von den Versalzungsvorgängen betroffen. Somit kann man nicht von einem unbeeinflussten Gestein sprechen und die Gehalte an lithogenen löslichen Salzen lassen sich nicht quantifizieren. Sie liegen auf jeden Fall über den Werten der Proben aus dem Bereich 6 bis 20 cm der Säule 10L nach der Entsalzung (Tab. 6, Proben 10L-U-3 und 10L-O-3).

5.2 Gehalte an leichtlöslichen Salzen

Die mengenmäßig wichtigsten Komponenten in den Wasserauszügen sind Sulfat, Chlorid, Nitrat, Ammonium, Natrium, Kalium, Calcium, Magnesium und Zink. Einen deutlichen Effekt bei der Entsalzung zeigen daneben auch Kobalt, Mangan und teilweise Eisen. Hydrogenkarbonat-Ionen spielen wegen der niedrigen pH-Werte keine Rolle. Die Ergebnisse für die genannten Ionen wurden in Tabelle 6 zusammengestellt. Im Interesse einer besseren Vergleichbarkeit stehen die Konzentrationen vor und nach der Entsalzung (0 bzw. E) jeweils für einen Beprobungsbereich direkt untereinander. Exemplarisch wurden die Sulfat-Gehalte als Säulendiagramm dargestellt (Abb. 3). Wegen der großen Konzentrationsunterschiede musste eine logarithmische Skaleneinteilung gewählt werden.

Wie die angeführten Ionenbilanzen zeigen, wurden alle wichtigen Ionen bei der Analytik der wässrigen Auszüge erfasst. Nur bei Proben mit geringen Ionensummen (i. d. R. die Proben nach der Entsalzung) ist mit höheren analytischen Fehlern, die sich auch in höheren Ionenbilanzen (prozentuale Überbefunde an Kationen) ausdrücken, zu rechnen. Für alle Proben mit Ionensummen > 20 mmol(eq)/kg beträgt die mittlere absolute Ionenbilanz 13%.

Erwartungsgemäß finden sich die höchsten Salzgehalte vor der Behandlung im äußersten beprobten Tiefenbereich (0-2 cm). Die Salzsumme erreicht hier Werte bis zu 2,52 Masse-%. Friese & Protz (1994) geben für Mauerwerk einen Richtwert von 1 Masse-% Gesamtsalz an, oberhalb dessen mit Salzschäden zu rechnen ist. Zum Säulenkern hin nimmt die Salzbelastung ab. Besonders deutlich ist dies bei Sulfat, Calcium und Zink zu erkennen. Nachträglich wurde festgestellt, dass der dritte Tiefenbereich zu breit gewählt wurde, um exakt die

Probenahme-punkt [1]	Probenahme-zeitpunkt [2]	pH	HCO_3^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	NH_4^+	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Fe	Mn	Co	Zn	Salz-summe	Summe Anionen	Summe Kationen	Ionensumme	Ionen-bilanz
			mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	Masse-%	mmol(eq)/kg	mmol(eq)/kg	mmol(eq)/kg	%
Säule 9L																				
9L-U-1	0	4,3	<6	335	357	12800	616	159	232	147	1160	0,80	8,60	6,10	4900	2,07	283	267	550	-6
9L-U-1	E	<4,3	<3	62,3	15,9	1980	9,00	11,5	61,5	<5	870	1,15	0,50	6,80	29,7	0,30	43	47	90	8
9L-U-2	0	4,5	<6	488	459	1250	120	252	121	28,0	75,0	<0,6	8,60	4,10	629	0,34	50	46	96	-7
9L-U-2	E	<4,3	<3	64,0	8,01	202	9,00	7,50	84,5	<5	58,0	3,45	0,80	0,30	1,65	0,04	6	6	13	3
9L-U-3	0	<4,3	<6	463	509	451	87,0	216	108	21,0	30,0	1,50	3,70	2,70	210	0,21	34	27	60	-22
9L-U-3	E	<4,3	<3	74,7	12,7	193	29,0	17,5	112	<5	14,5	0,90	1,00	0,10	2,95	0,05	6	6	13	1
9L-M-1	0	4,3	<6	919	1110	6760	507	591	485	84,0	843	4,10	9,10	<0,2	2570	1,39	191	197	387	3
9L-M-1	E	<4,3	<3	130	87,5	3070	69,5	59,0	195	18,5	983	0,95	0,70	<0,1	534	0,51	69	79	148	13
9L-O-1	0	4,2	<6	698	1030	2450	182	553	383	80,0	589	2,20	8,10	8,20	530	0,65	94	98	191	4
9L-O-1	E	<4,3	<3	219	294	1010	43,0	180	153	28,0	313	2,30	3,20	4,55	191	0,24	34	39	73	14
9L-O-2	0	3,7	<6	464	622	620	74,0	339	231	41,0	60,0	5,70	4,50	3,50	125	0,26	40	36	75	-9
9L-O-2	E	3,7	<3	208	275	345	41,0	160	152	20,5	48,0	7,75	1,80	2,35	47,9	0,13	19	20	39	5
9L-O-3	0	4,3	<6	252	254	300	37,0	139	144	15,0	61,0	4,10	0,60	<0,2	8,90	0,12	19	16	35	-13
9L-O-3	E	3,4	<3	278	352	278	58,0	203	195	21,0	34,3	3,70	3,00	1,05	18,3	0,14	21	21	43	-0,2
Säule 10L																				
10L-U-1	0	3,7	<6	404	177	18200	884	112	79,7	211	1150	0,60	7,10	3,90	4000	2,52	394	253	648	-43
10L-U-1	E	4,4	<6	15,6	27,4	743	8,18	15,7	109	<10	334	3,60	1,10	<0,2	22,1	0,13	17	22	38	28
10L-U-2	0	2,9	<6	268	136	1540	81,0	75,0	54,0	29,0	66,0	0,60	6,50	4,60	750	0,30	43	38	81	-11
10L-U-2	E	4,7	<6	12,3	9,42	75,1	6,92	13,5	98,8	<10	69,1	<0,6	0,30	<0,2	3,30	0,03	2	7	10	112
10L-U-3	0	3,9	<6	143	10,0	335	28,0	15,0	49,0	<10	24,0	1,50	1,20	0,70	28,5	0,06	11	6	17	-66
10L-U-3	E	5,4	<3	9,59	5,68	42,8	2,59	8,19	60,6	<5	50,9	<0,3	0,25	<0,1	32,5	0,02	1	6	7	128
10L-M-1	0	3,6	<6	239	307	9250	634	83,0	310	52,0	1060	8,40	7,30	2,10	3110	1,51	206	203	408	-2
10L-M-1	E	4,3	<3	24,1	33,5	2420	36,2	21,2	130	8,11	720	3,55	1,10	<0,1	405	0,38	52	58	109	10
10L-O-1	0	3,2	<6	325	732	12700	102	162	304	69,0	4840	16,4	10,10	1,00	1990	2,13	289	335	624	15
10L-O-1	E	4,3	<3	11,3	20,6	1430	11,7	7,65	30,9	<5	622	1,00	0,40	<0,1	130	0,23	31	37	68	20
10L-O-2	0	3,4	<6	349	631	2100	220	145	183	62,0	237	4,40	8,20	8,40	723	0,47	67	63	130	-7
10L-O-2	E	4,8	<3	8,91	10,9	156	4,16	7,15	35,9	<5	88,6	14,6	1,00	<0,1	9,45	0,03	4	7	11	66
10L-O-3	0	2,7	<6	224	303	312	44,0	77,0	93,0	21,0	76,0	1,90	2,00	1,30	34,1	0,12	19	15	34	-26
10L-O-3	E	5,2	<3	10,1	10,9	23,9	<2,5	11,3	60,1	<5	31,4	7,05	0,25	<0,1	1,70	0,02	1	5	6	132
Salzausblühungen																				
10L-Salz	-	-	-	581	458	266000	24000	<500	422	2940	1190	<6	184	28,5	128000	42,38	5547	5563	11110	0,3
14i-Salz	-	-	-	331	<100	428000	8830	<500	531	10300	2080	<6	268	54,6	225000	67,54	8905	8327	17231	-7
16L-Salz	-	-	-	437	<100	435000	3800	<500	352	11000	3000	<6	202	11,8	238000	69,18	9055	8545	17599	-6
16i-Salz	-	-	-	461	<100	508000	2810	<500	114	10100	1710	<6	204	6,7	284000	80,74	10578	9771	20349	-8

[1] **Höhenbereiche**: U = unten , M = Mitte, O = oben; **Tiefenbereiche**: 1 = 0-2 cm, 2 = 2-6 cm, 3 = 6-20 cm

[2] 0 = Anfangszustand, d.h. vor der Entsalzung; E = Endzustand, d.h. nach der Entsalzung

Tab. 6 Ionenkonzentrationen im wässrigen Auszug der Sandsteinproben vor und nach der Entsalzung sowie der Salzausblühungen

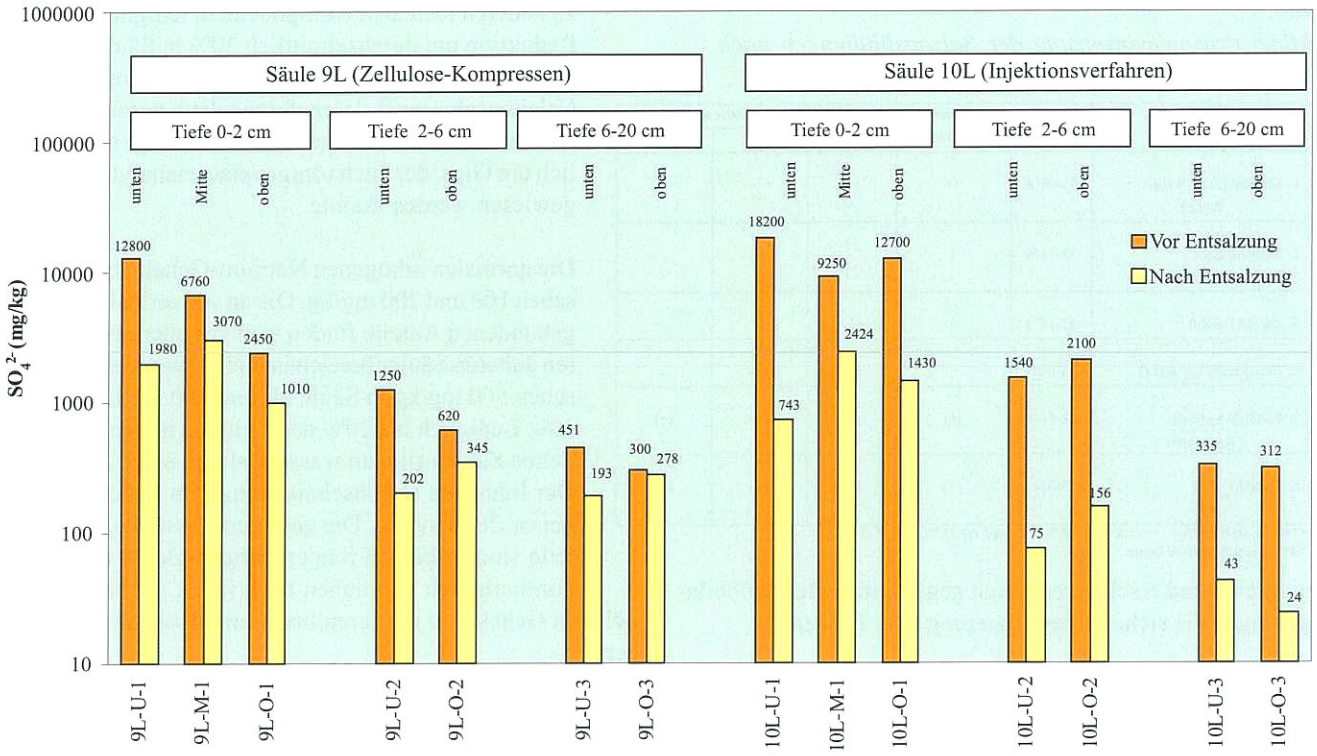

Abb. 4 Sulfatgehalte im Sandstein vor und nach der Entsalzung

Grenze zwischen belastetem und unbelastetem Gestein lokalisieren zu können.

Auffällig ist die sehr ungleichmäßige Verteilung der Salze über die Höhe. Die Gesamtsalzgehalte in der äußeren Zone schwanken zwischen 0,65 und 2,52 Masse-%. Auch die Unterschiede zwischen beiden Säulen, sowohl hinsichtlich der Salzsumme als auch bezüglich der Anteile der verschiedenen Ionen daran sind beträchtlich. Während die Säule 9L höhere Gehalte an Chlorid, Nitrat, Natrium und Kalium aufwies, konnten bei der Säule 10L höhere Konzentrationen an Sulfat, Ammonium, Eisen sowie teilweise Calcium und Zink nachgewiesen werden.

Die hohen Gehalte an Zink sind auf die Korrosion der Säulenkapitelle aus Zinkguss zurückzuführen. Zinksalze haben sich vor allem in den unteren Säulenbereichen und hier im Tiefenbereich 1 (0-2 cm) akkumuliert. Kobalt stammt vermutlich ebenfalls aus dem Metall der Kapitelle. Das Verteilungsmuster unterscheidet sich allerdings erheblich.

Eisen zeigt ein sehr differenziertes Bild ohne deutlichen Trend. Oft liegen die Endgehalte über den Anfangsgehalten. Das Konzentrationsniveau ist insgesamt sehr niedrig. Wie der Vergleich mit den Totalgehalten zeigt, geht nur ein geringer Anteil des Gesamteisens in Lösung. Der überwiegende Teil dürfte in gesteinstypischen Eisenoxidhydraten wie z. B. Limonit gebunden sein. Teilweise wurde Eisen möglicherweise auch durch den Bohrvorgang eingetragen.

Auch die Mangangehalte sind sehr niedrig und tragen wenig zur Gesamtionensumme bei. Im Unterschied zum Eisen können wir jedoch eine deutliche Abnahme der Gehalte infolge der Entsalzungsmaßnahmen und damit eine höhere Mobilität feststellen.

5.3 Mineralogische Analyse der löslichen Salze

Die Gehalte der in den Sandsteinen akkumulierten löslichen Salze liegen unterhalb der röntgenographischen Bestimmungsgrenzen. Zur Identifizierung dieser Verbindungen musste auf die Proben der Salzausblühungen zurückgegriffen werden. In den vier entnommenen Sammelproben konnten sechs verschiedene Sulfate festgestellt werden, die in unterschiedlicher Kombination und Menge auftraten. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 zusammengefaßt. Für jede kristalline Phase wurde ergänzend die Nummer der jeweiligen PDF-Datei (Powder Diffraction File) angegeben, die der röntgenographischen Identifizierung zugrunde liegt.

Als Hauptbestandteile in den Salzausblühungen wurden vier verschiedene Zinksulfathydrate festgestellt. Zwei von ihnen sind unter den Namen Boyleit und Gunningit auch als seltene Minerale in der Natur bekannt, für die anderen beiden Zinksulfathydrate existieren bisher keine eigenständigen Namen. Außerdem sind in allen vier Proben Gips und höchstwahrscheinlich auch Natroalunit in geringer Menge vorhanden. Bei der Entnahme der sehr dünnen Salzkrusten von der Oberfläche der unbehandelten Säule 10L gelangte außerdem Quarz in größerer Menge als unerwünschte Verunreinigung in die Probe.

Bis auf Natroalunit besitzen diese Sulfate monokline Kristallstruktur. Infolgedessen sind ihre Beugungsspektren sehr li-

Tab. 7
Mineralzusammensetzung der Salzausblühungen nach halbquantitativer Röntgenbeugungsanalyse

Sulfat Mineralname	PDF-Nr.	unbehandelte Säule 10L [1)]	Kompressenoberfläche der Säule		
			14i	16i	16L
1. $(Zn,Mg)[SO_4] \cdot 4 H_2O$ Boyleit	31-0818	++	++	+++	++
2. $Zn[SO_4] \cdot H_2O$ Gunningit	33-1476	+	-	++	-
3. $Zn[SO_4] \cdot 6 H_20$	32-1478	+	+++	-	+++
4. $[NH_4]_2Zn[SO_4]_2 \cdot 6 H_2O$	35-0767	+	(+)	(+)	-
5. $NaAl_3[SO_4]_2[OH]_6$ Natroalunit	41-1467	(+)	(+)	(+)	(+)
6. $Ca[SO_4] \cdot H_2O$ Gips	33-0311	(+)	(+)	(+)	(+)

+++ - ca. 40 bis 70 %, ++ - ca.15 bis 40 %, + - ca.5 bis 15 %, (+) - < 5 %
[1)] Probe enthält ≥ 50 % Quarz.

nienreich und erschweren durch gegenseitige Reflexüberlagerungen die sichere Identifizierung aller Phasen.

Die Ergebnisse der mineralogischen Untersuchungen finden ihre Bestätigung in der ermittelten chemischen Zusammensetzung der Salzausblühungen (Tab. 6). Als Hauptkomponenten wurden Sulfat, Zink und Ammonium mit einem Anteil von 98% an der Salzsumme festgestellt.

5.4 Gehalte an löslichen Salzen in den Zellulosekompressen

Stark schwankende Salzgehalte in den abgenommenen Kompressen widerspiegeln zum Einen die sehr ungleichmäßige Verteilung der Salze im Säulenkörper und zeigen zum Anderen, dass die Salze mit unterschiedlicher Intensität aus dem Gestein gelöst werden. Die Ursache dafür ist in erster Linie im schwankenden Feuchtigkeitsregime der Kompressen zu suchen.

Neben den bereits festgestellten vertikalen und tiefenbezogenen Unterschieden deuten die Ergebnisse der an drei Seiten der Säulen entnommenen Kompressenproben auch auf seiten- d. h. himmelsrichtungsbezogene Verteilungsunterschiede hin. Ein eindeutiger Trend ist dabei allerdings nicht erkennbar. Die höchsten Konzentrationen von Sulfat, Calcium und z. T. auch von Zink finden sich im unteren Säulenbereich aller drei entnommenen Vertikalprofile. Dies entspricht dem Befund, dass hier i. d. R. die höchste Salzkonzentration im Gestein vorhanden war und gleichzeitig auch der beste Entsalzungseffekt erzielt wurde.

5.5 Totalgehalte in den Sandsteinen

Auffällig ist, dass für Calcium zumindest in den Tiefenbereichen bis 6 cm die Werte der Ausschüttlungen sehr gut mit den Totalgehalten übereinstimmen (88 -100%). Nahezu das gesamte Calcium liegt demnach als einigermaßen wasserlösliches Salz vor. Die Entsalzung führt jedoch, im Unterschied zu anderen löslichen Komponenten, lediglich zu einer Reduktion um durchschnittlich 30% in Säule 9L bzw. 44% in Säule 10L. Die Löslichkeit der vorhandenen Calciumsalze muss demzufolge relativ gering sein. Aller Wahrscheinlichkeit nach handelt es sich hauptsächlich um Gips, der auch röntgenphasenanalytisch nachgewiesen werden konnte.

Die normalen lithogenen Natrium-Gehalte liegen zwischen 100 und 200 mg/kg. Die an wasserlösliche Salze gebundenen Anteile finden sich vor allem in den oberen äußeren Säulenbereichen und schwanken hier zwischen 500 mg/kg in Säule 9L und 150 mg/kg in Säule 10L. Lediglich bis 20% des Kaliums in den unbehandelten Säulen sind an wasserlösliche Salze gebunden. Der lithogene Durchschnittsgehalt im Sandstein liegt bei ca. 2000 mg/kg. Die geringen wasserlöslichen Anteile sind in beiden Säulen nahezu gleich und fallen kontinuierlich von außen nach innen, wobei sich die höheren Gehalte im mittleren bis oberen Höhenbereich finden.

Ein Vergleich der Totalgehalte von Zink mit den Wasserausschüttlungen zeigt, dass im Tiefenbereich 0-2 cm 80% von durchschnittlich 4000 mg/kg Gesamt-Zink an lösliche Salze gebunden sind. Dieser Anteil verringert sich nach erfolgter Entsalzung auf 65-70% bei einem Konzentrationsniveau von 500 mg/kg. Die weniger löslichen Zinksalze erfahren eine relative Anreicherung. Der Zinkgehalt im äußeren Tiefenbereich liegt auch nach der Entsalzung um das 6-fache über den mittleren Gehalten in den tieferen Bereichen.

5. 6 Effektivität des Entsalzungsprozesses und Methodenvergleich

Als Maß für die Effektivität bzw. Vollständigkeit der Entsalzung werden die **relativen Deltawerte** $\Delta_{\%}$ eingeführt. Sie berechnen sich nach folgender Formel:

$$\Delta_{\%} = (x_0 - x_E) \cdot 100 / x_0$$

wobei x_0 = Anfangsgehalt vor der Entsalzung
x_E = Endgehalt nach der Entsalzung.

Hohe Deltawerte stehen für einen starken Entsalzungseffekt. Die Deltawerte gestatten es, von den unterschiedlichen Anfangsgehalten an Salzen in den beiden Säulen bzw. an unterschiedlichen Probenahmepunkten zu abstrahieren. Dies ist angesichts der erwähnten ungleichmäßigen Salzverteilung besonders wichtig. Die Aussagekraft läßt allerdings in den unteren Konzentrationsbereichen nach, wo methodisch und lithogen bedingte Schwankungen (Analytik, Probenahme) einen größeren Einfluss haben und es dazu kommen kann, dass Endgehalte über den Anfangsgehalten liegen. Die sich daraus ergebenden negativen Deltawerte sind in diesem Falle nicht als Umkehr des Entsalzungsprozesses, sondern als Nulleffekt zu interpretieren. Niedrige bzw. negative Deltawerte müssen daher immer im Zusammenhang mit den Gehaltswerten betrachtet werden.

Die relativen Deltawerte wurden für ausgewählte Komponenten sowie die Summen der Anionen und der Kationen in den wässrigen Auszügen der Sandsteinproben berechnet und sind in Tabelle 8 zusammengestellt. Negative Deltawerte wurden in Klammern gesetzt und gehen mit 0% (kein Entsalzungseffekt) in die Mittelwertbildung ein. Folgendes konnte festgestellt werden:

- Die mittleren relativen Deltawerte für Chlorid, Nitrat, Sulfat, Ammonium, Natrium, Magnesium, Calcium, Eisen, Mangan, Kobalt und Zink liegen für die mit dem Injektionskompressenverfahren nach FRIESE behandelte Säule 10L deutlich über den Werten für die mit herkömmlichen Zellulosekompressen behandelte Säule 9L. Damit können die durch FRIESE & HERMONEIT (1993) dargestellten Vorteile einer Wasseraufgabe mittels Injektion in den Baukörper bestätigt werden.

- Neben dem vertikalen Gradienten fallen Unterschiede im horizontalen Profil (Tiefenbereiche 1, 2, 3) auf. Einen besonders deutlich ausgeprägten horizontalen Gradienten weist die Säule 9L auf. Von außen nach innen nehmen die Deltawerte von Chlorid, Nitrat, Natrium (alle nur im oberen Bereich), Sulfat, Ammonium, Magnesium und Kalium deutlich ab. Die negativen Deltawerte im Probenahmepunkt 9L-O-3 bei relativ hohen Gehalten deuten darauf hin, dass sich hier der Entsalzungsprozess umkehrt und Salze erneut akkumuliert werden.

- Die Deltawerte von Calcium sind weit geringer als bei den anderen betrachteten Komponenten (bis auf Eisen), was darauf zurückzuführen ist, dass Calcium hauptsächlich als Gips vorliegt, ein Salz mit relativ geringer Löslichkeit. Der höchste gefundene Deltawert (87% am Punkt 10L-O-1) ist nur dadurch begründet, dass in der Anfangsprobe erhöhte Mengen von Gips vorhanden waren, in der Endprobe jedoch nicht. Calcium erfährt eine relative Anreicherung im Gestein. Während vor der Entsalzung der Anteil der Calcium-Ionen durchschnittlich 21% der Kationen-Summe ausmachte, waren es nach der Entsalzung bereits 49%.

Tab. 8 Effektivität der Entsalzung (relative Deltawerte in %)

Probenahmepunkt	Tiefenbereich	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	NH_4^+	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Fe	Mn	Co	Zn	Summe Anionen	Summe Kationen	LOI
9L-U-1		81	96	85	99	93	73	98	25	0 (-44)	94	0 (-11)	99	85	82	84
9L-M-1	0-2cm	86	92	55	86	90	60	78	0 (-16)	77	92	0	79	64	60	33
9L-O-1		69	72	59	76	68	60	65	47	0 (-4,5)	60	45	64	64	60	43
9L-U-2	2-6cm	87	98	84	93	97	30	88	23	0 (-1050)	91	93	100	88	86	24
9L-O-2		55	56	44	45	53	34	50	20	0 (-36)	60	33	62	52	44	0(-10)
9L-U-3	6-20cm	84	98	57	67	92	0 (-4)	84	52	40	73	96	99	81	76	0(-19)
9L-O-3		0 (-10)	0 (-39)	7	0 (-57)	0 (-46)	0 (-35)	0 (-40)	44	10	0 (-400)	0 (-950)	0 (-106)	0 (-13)	0 (-29)	0(-5)
Mittelwert für Säule 9L		**66**	**73**	**56**	**66**	**70**	**37**	**66**	**30**	**18**	**67**	**38**	**72**	**62**	**58**	**26**
10L-U-1		96	84	96	99	72	0 (-36)	98	71	0 (-500)	85	97	99	96	91	n.b.
10L-M-1	0-2cm	90	89	74	94	74	58	84	32	58	85	98	87	75	72	44
10L-O-1		97	97	89	89	95	90	96	87	94	96	95	93	89	89	90
10L-U-2	2-6cm	95	93	95	91	82	0 (-83)	83	0 (-4,7)	50	95	98	100	95	80	43
10L-O-2		97	98	93	98	95	80	97	63	0 (-231)	88	99	99	94	88	43
10L-U-3	6-20cm	93	43	87	91	45	0 (-24)	50	0 (-112)	90	79	93	0 (-14)	89	0 (-4,9)	29
10L-O-3		95	96	92	97	85	35	88	59	0 (-271)	88	96	95	95	67	35
Mittelwert für Säule 10L		**95**	**86**	**89**	**94**	**79**	**38**	**85**	**44**	**42**	**88**	**97**	**82**	**90**	**70**	**47**

- Die Effektivität der Zellulosekompressen-Entsalzung (Säule 9L) weist einen deutlichen Gradienten im vertikalen Profil (Höhenbereiche Oben, Mitte, Unten) auf. Im unteren Säulenbereich ist der Prozess wesentlich intensiver und damit effektiver als im oberen Bereich. Dies wird besonders bei den Komponenten Sulfat, Ammonium, Nitrat, Natrium, Magnesium, Mangan und Zink deutlich, deren relative Deltawerte von unten nach oben kleiner werden. Auch die Summen der Kationen und der Anionen spiegeln den vertikalen Gradienten wider.

  Für die Säule 10L ist in abgeschwächter Weise eine andersgerichtete Tendenz erkennbar. Nitrat, Natrium und Kalium deuten mit höheren Deltawerten auf eine intensivere Entsalzung im oberen Säulenbereich hin. Möglicherweise tritt hier eine größere Wassermenge durch die Schrägbohrungen ein und bewirkt einen intensiveren Stofftransport. Die Ionensummen zeichnen diese Tendenz allerdings nicht nach.

- Der Glühverlust bei 1000 °C (LOI) als Maß für den summarischen Masseverlust an wasser- bzw. sauerstoffhaltigen Komponenten infolge der Entsalzung zeichnet zumindest für den Tiefenbereich 0-2 cm mit den höchsten Salzgehalten die Befunde der Ionensummen nach. Es ist daher denkbar, die einfach und sehr billig zu bestimmenden Glühverluste gezielt für die Bewertung der Effektivität von Entsalzungsprozessen zu nutzen.

Zusammenfassung

Im Rahmen der Restaurierungsarbeiten des Belvedere auf dem Pfingstberg in Potsdam bestand die Notwendigkeit, an

den Sandsteinsäulen der Arkaden die bauschädlichen Salze zu entfernen. Dazu wurden zwei Varianten der Kompressenentsalzung an je einer Säule getestet, das herkömmliche Verfahren mittels Zellulosekompressen sowie das Injektionskompressenverfahren nach FRIESE. Zur Bewertung der Effektivität und Vollständigkeit der Verfahren erfolgten chemische und mineralogische Untersuchungen am Werkstein vor und nach der Entsalzung.

Es wird auf die Problematik der Herkunft und schadensrelevanten Wirksamkeit bauschädlicher Salze in natürlichen Werksteinen und speziell in Sandsteinen eingegangen und dabei die besondere Bedeutung der Schadstoffimmissionen hervorgehoben.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Verteilung der Salze im Säulenkörper sehr ungleichmäßig ist, wobei die höchsten Salzkonzentrationen immer im äußeren Bereich bis 2 cm Tiefe gefunden wurden. Im Ergebnis der Arbeiten kann festgestellt werden, dass das Injektionskompressenverfahren nach FRIESE deutlich effektiver ist als die Entsalzung mit herkömmlichen Zellulosekompressen. Mit Hilfe des Injektionskompressenverfahrens wird eine nahezu komplette Entsalzung über den gesamten Säulenkörper erreicht, während die Entsalzung mit Zellulosekompressen insbesondere im oberen und inneren Säulenbereich unvollständig bleibt.

Nach den röntgenphasenanalytischen Untersuchungen der Salzkrusten konnten als bauschädliche Salze überwiegend leichtlösliche Zinksulfathydrate verschiedener Zusammensetzung festgestellt werden, die auf die Verwitterung der originalen Zinkguss-Kapitelle an den Säulen zurückzuführen sind.

Summary

This work is dealing with problems of freely water-soluble salts as principal agents of weathering and damaging of porous natural building stones. The sources of these salts and the mechanisms of sandstone decay effects are outlined.

Within the restauration works of the Belvedere on the „Pfingstberg" in Potsdam it was nessessary to remove the stone-damaging salts in the sandstone columns of the arcades. Two methods of desalting by compresses were tested, the common method by compresses of cellulose and the method after FRIESE, applying additional injection of water into the stone. For an comparative assessment of the effectivity and completeness of the two methods chemical and mineralogical analysis of stone material before and after the desalting were made.

The studies show that the distribution of salts in the columns is irregular. The highest concentration of salts are always to be found in the outer part till 2 cm of depth. In the result of the works it can be stated that the method after FRIESE is really more effective than the common desalting procedure by cellulose compresses. An almost complete extraction of soluble salts is achieved for the hole column. The desalination by compresses of cellulose, however remains uncomplete specially in the upper and inner part of the column.

Mainly soluble hydrates of zinc and ammonium sulphates of different composition could be detected by X-ray diffraction of salt crusts. The formation of these salts is caused by atmospheric corrosion of the original cast zinc capitals on the columns.

Literatur

ARNOLD, B. (1991): Über die Salzbelastung des Dresdner Zwingers. - In: Steinkonservierung - Berichte zu Forschung und Praxis der Denkmalpflege in Deutschland, Bd. 2, S. 36-37, Hannover

AURAS, M., SIEDEL, H. & H. WEBER (1997): Reinigung und Steinkonservierung. - In: Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege. - Berufsbildungswerk des Steinmetz- und Bildhauerhandwerks e.V., S. 683-716, Ulm (Ebner)

FÖRSTNER, U. (1984): Freisetzung schädlicher Metallverbindungen aus Sedimenten. - In: MERIAN, E. (Hrsg.): Metalle in der Umwelt - Verteilung, Analytik und biologische Relevanz, S. 171-180, Weinheim (Chemie)

FRANTZ, E. (1990): Untersuchungen zum Verwitterungsverhalten von Sandsteinen des Mittleren und Oberen Buntsandsteins. - Berichte Geol.-Paläont. Inst. Univ. Kiel, **37**, 182 S., Kiel

FRIESE, P. (1991): Die Anwendung von Leitfähigkeitsmessungen an salz- und feuchtegeschädigtem Mauerwerk. Teil I, Teil II. - Bautenschutz + Bausanierung **14**, S. 125-127, 134-135, Köln

FRIESE, P. & B. HERMONEIT (1993): Entsalzung von Ziegelmauerwerk mit dem Injektionskompressenverfahren. - Bautenschutz + Bausanierung **16**, 2, S. 26-27, Köln

FRIESE, P. & A. PROTZ (1994): Salzschäden an Ziegelmauerwerk und praktische Erfahrungen mit Entsalzungsverfahren. - Bautenschutz + Bausanierung **17**, 8, S. 39-45, Köln

FÜCHTBAUER, H. (1988) (Hrsg.): Sedimentpetrologie Teil II: Sedimente und Sedimentgesteine. - 1141 S., Stuttgart (Schweitzerbart)

GRASSEGGER, G. (1997): Die Verwitterung von Natursteinen an Bauten und Baudenkmälern. - In: Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege. - Berufsbildungswerk des Steinmetz- und Bildhauerhandwerks e.V., S. 433-490, Ulm (Ebner)

KARDEL, K., RANK, G. & W. PÄLCHEN (1996): Geochemischer Atlas des Freistaates Sachsen Teil I: Spurenelementgehalte in Gesteinen. - Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 37 S., Radebeul

LANGE'S (1992): Lange's Handbook of Chemistry, Dean A. J. (Hrsg.) - New York (Mc. Graw-Hill)

LUA (2000): Luftqualität in Brandenburg, Jahresbericht 1999. - Landesumweltamt Brandenburg, 76 S., Potsdam

MERCK (2001): Der Laborkatalog - Chemikalien und Reagenzien. - Merck Eurolab GmbH, 1360 S., Fulda (Parzeller)

MIRWALD, P.W. (1997): Physikalische Eigenschaften der Gesteine. - In: Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege. - Berufsbildungswerk des Steinmetz- und Bildhauerhandwerks e.V., S. 283-308, Ulm (Ebner)

MÜLLER, H. & J. LUCKERT (2000): Untersuchung von Sandstein- und Zellulosekompressenproben im Rahmen der Entsalzung von Sandsteinsäulen des Belvedere auf dem Pfingstberg in Potsdam. - LGRB Kleinmachnow, 34 S. (unveröff.)

PERRY'S (1999): Perry's Chemical Engineers' Handbook, R. H. Perry, D.W. Green - New York (McGraw-Hill)

RÖSLER, H. J. & H. LANGE (1975): Geochemische Tabellen. - 700 S., Leipzig (Deutscher Verl. für Grundstoffindustrie)

RÖSLER, H. J. (1979): Lehrbuch der Mineralogie. - 832 S., Leipzig (Deutscher Verl. für Grundstoffindustrie)

SCHUH, H. (1987): Physikalische Eigenschaften von Sandsteinen und ihren verwitterten Oberflächen. - Münchner Geowiss. Abh., R B, **6**, 66 S., München (Friedrich Pfeil)

SELLE, M. (1998): Baubeschreibung Belvedere auf dem Pfingstberg zur Generalinstandsetzung. - Architekturbüro Manfred Selle, 20 S., Berlin (unveröff.)

SENSTADTUM (2001): Luftverunreinigungen in Berlin im Jahre 2000. - Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz, 22 S., Berlin

SNETHLAGE, R. (1997): Leitfaden Steinkonservierung : Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein. - 198 S., Stuttgart (Fraunhofer-IRB)

TUREKIAN, K. K. & K. H. WEDEPOHL (1961): Distribution of the Elements in Some Mayor Units of the Earth´s Crust. - Bull. Geol. Geol. Soc. Amer. **72**, 172-202

WEISS, G. (1992): Die Eis- und Salzkristallisation im Porenraum von Sandsteinen und ihre Auswirkungen auf das Gefüge unter besonderer Berücksichtigung gesteinsspezifischer Parameter. - Münchner Geowissensch. Abh., Reihe B, **9**, 118 S., München (Friedrich Pfeil)

WEBER, H. u.a. (1986): Fassadenschutz und Bausanierung. Der Leitfaden für die Sanierung, Konservierung und Restaurierung von Gebäuden. - Kontakt & Studium, Bd. 40: Bauwesen, 505 S., Sindelfingen (Expert)

Mitteilung aus dem Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg No. 151

Manuskripteingang: 8.11.01

Bildnachweis:
(Titelfoto, Abb. 1 bis 3): Architekturbüro Manfred Selle, Berlin

Anschrift der Autoren:
Dipl.-Geol. Holger Müller
Dipl.-Geol. Joachim Luckert
Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg
Stahnsdorfer Damm 77
14532 Kleinmachnow

Dipl.-Ing. Detlef Röper
Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg
Lennéstr. 9
14471 Potsdam

[1] Für die Unterstützung bei der fachgerechten Beprobung der Sandsteinsäulen sei an dieser Stelle Herrn Steinmetzpolier Frank Ganski gedankt.