

Eberhard Wendler, Michaela Hestermann, Susanne Rother:

**Konservierung versalzter und feuchter Wallmauern aus Sandstein.
Fallstudie an der Maxtormauer in Nürnberg**

Abstract

Die meist hohe Salzbelastung alter Wallmauern ist auf die kumulative Wirkung verschiedener Quellen in jeweils unterschiedlichen Epochen zurückzuführen. Im Verlauf der gesamten Standzeit der Mauer ergibt sich so nach und nach ein bunter Cocktail aus Chloriden, Nitraten und Sulfaten, die sich durch Migrationsvorgänge in Zonen anreichern, welche durch Bauteilgeometrie, Wassertransportpfade, Exposition und mikroklimatische Faktoren vorbestimmt sind. Durch Kristallisations- und Hydratationswechsel kommt es bereichsweise zu starken Materialverlusten. Eine notwendige Konsolidierung über aushärtende Tränkungsstoffe ist jedoch häufig nicht möglich, da viele der Salze hygroskopisch reagieren und oft bereits mit relativ geringen Luftfeuchtegehalten Salzlösungen bilden, die den zugänglichen Porenraum blockieren. Eine vorausgehende Entsalzung ist notwendig, aber wegen der hohen Saugfähigkeit des Untergrunds oft nur eingeschränkt möglich.

Das vorliegende Beispiel zeigt, daß eine deutliche Salzmindering durch Kompressenanwendung zumindest soweit gelang, daß die Voraussetzung für die Aufnahme und Aushärtung von Festigern gegeben war. Da jedoch ein allmähliches Nachwandern von Restsalzmengen aus der Tiefe in die gefestigte Oberflächenzone befürchtet werden mußte, wurde auch die Beständigkeit des konsolidierten Materials gegenüber Kristallisationswechseln geprüft. Simulationsversuche künstlich versalzter und gefestigter Prüfkörper in der Klimakammer dokumentierten, daß die Dauerhaftigkeit im Fall des Nürnberger Burgsandsteins gegeben war. Die Fallstudie zeigt jedoch auch, daß keineswegs alle durchfeuchteten Bereiche ihre Ursache in der Anwesenheit hygroskopischer Salze hatten. Für eine erfolgreiche Maßnahmenplanung ist daher die gewissenhafte Zustandserfassung eine Grundvoraussetzung, um Fehlentscheidungen vorzubeugen.

1. Einleitung

Die aus lokalem Burgsandstein erbaute historische Stadtmauer aus dem 14. Jahrhundert wurde mehrfach, z. B. im 15. Jahrhundert durch die Erweiterung des Grabens verändert. Die mittelalterlichen Bereiche im Nordosten der Stadtmauer sowie der aus der Renaissance stammende Küblerzwinger am nordöstlichen Eckpunkt werden als Maxtormauer bezeichnet und haben, im Gegensatz zu vielen "Rundumsanierungen" von Teilen der Stadtmauer seit dem Kriegsende keine wesentlichen Veränderungen erfahren. Gerade darin liegt die Chance, diesen Bereich durch eine behutsame Restaurierung nach historischem Vorbild der Nachwelt weitgehend authentisch zu erhalten.

Die ursprüngliche Überdachung des Wehrgangs fehlt seit dem 2. Weltkrieg, was angesichts der hohen Kapillarwasseraufnahme des Gesteins und vielen Fehlstellen im (als Notbehelf gedachten) Estrichboden des Umgangs über Jahrzehnte hinweg zu beträchtlichem Wassereintrag geführt hat. Zudem ist das Erdniveau auf der Außenseite im Bereich der Geschützauffahrten des Zwingers angehoben und liegt teilweise mehrere Meter über dem Straßenniveau auf der Stadtinnenseite. Dadurch ist hier die Trocknung stark verlangsamt, möglicherweise kommt es zu permanenter Durchfeuchtung im Erdkontakt.

Intervallweise sind großflächig deutliche Salzausblühungen zu erkennen, welche sich bei feuchter Witterung rasch auflösen und als „Feuchteflecken“ sichtbar bleiben. Die Salzbelastung steht in ursächlichem Zusammenhang mit einem extremen Absanden großer Bereiche, teilweise betragen die Rückwitterungstiefen in alveolenartigen Vertiefungen mehr als 10 Zentimeter. Der Vorgang ist extrem schnell, frisch abgekehrte Oberseiten von Bossenquadern zeigen nach nur zwei Monaten bereits wieder mehrere

Zentimeter hohe Lockersandablagerungen. Dringender Handlungsbedarf ist gegeben, wenn man zumindest Reste wertvoller Befunde erhalten will.

Andere, insbesondere regengeschützte Bereiche, sind von einer dünnen, dunklen Gipskruste überzogen, welche sich beulenartig aufwölbt und dort die Steinoberfläche zerstört. Einzelne Quader zeigen hinter den Krusten etwa 1 – 2 Zentimeter starke Schalen, häufig sind Teilverluste bereits eingetreten. Das in einigen Teilen noch intakte Fugennetz ist an anderen Stellen durch Salzeinwirkung schadhaft, gleiches gilt dort für die Gesteinsflanken.

Ausgangspunkt der Restaurierungsplanung war eine wissenschaftlich aussagekräftige Zustandserfassung mit Kartierung von Materialarten und Schadensformen/-intensitäten, wobei neben Festigkeitsprofilen vor allem die komplizierte Salz- und Feuchteverteilung in repräsentativen Teilbereichen analysiert wurde. Nach Ermittlung der Gesteinsparameter sowie der gezielten Auswahl von Konsolidierungsstoffen im Labor wurden gemeinsam mit der ausführenden Firma und dem Restaurator Musterflächen angelegt und überprüft. Besonders hohen Aufwand erforderte die Untersuchung flankierender Schritte (Krustenausdünnung, Feuchtereduzierung, Salzreduzierung), welche die Voraussetzungen für eine wirksame und dauerhafte Konsolidierung darstellen.

2. Zustandserfassung

Abbildung 1 zeigt exemplarisch die Bestandskartierung der Materialien sowie bauhistorisch wichtiger Befunde wie Steinmetzzeichen in einem Teilbereich auf der Feldseite der Mauer (Einteilung in insgesamt 63 Bereiche). Die dahinter liegende Wehrgangfläche befindet sich unterhalb der fünften Quaderlage (v.o.). Ein Vergleich mit der Kartierebene der Schadensintensität (Abb. 2) zeigt, daß gerade unterhalb der Wehrgangfläche eine Zone besonders starker Schädigung liegt, offenbar verursacht durch Anreicherung hygroskopischer Salze (starkes Absanden). Die Häufigkeit der Steinmetzzeichen in diesem Bereich verbietet hier einen Steinaustausch, andererseits ist der Erfolg restauratorischer Konsolidierungsmaßnahmen durch die offenbar extreme Versalzung in Frage gestellt.

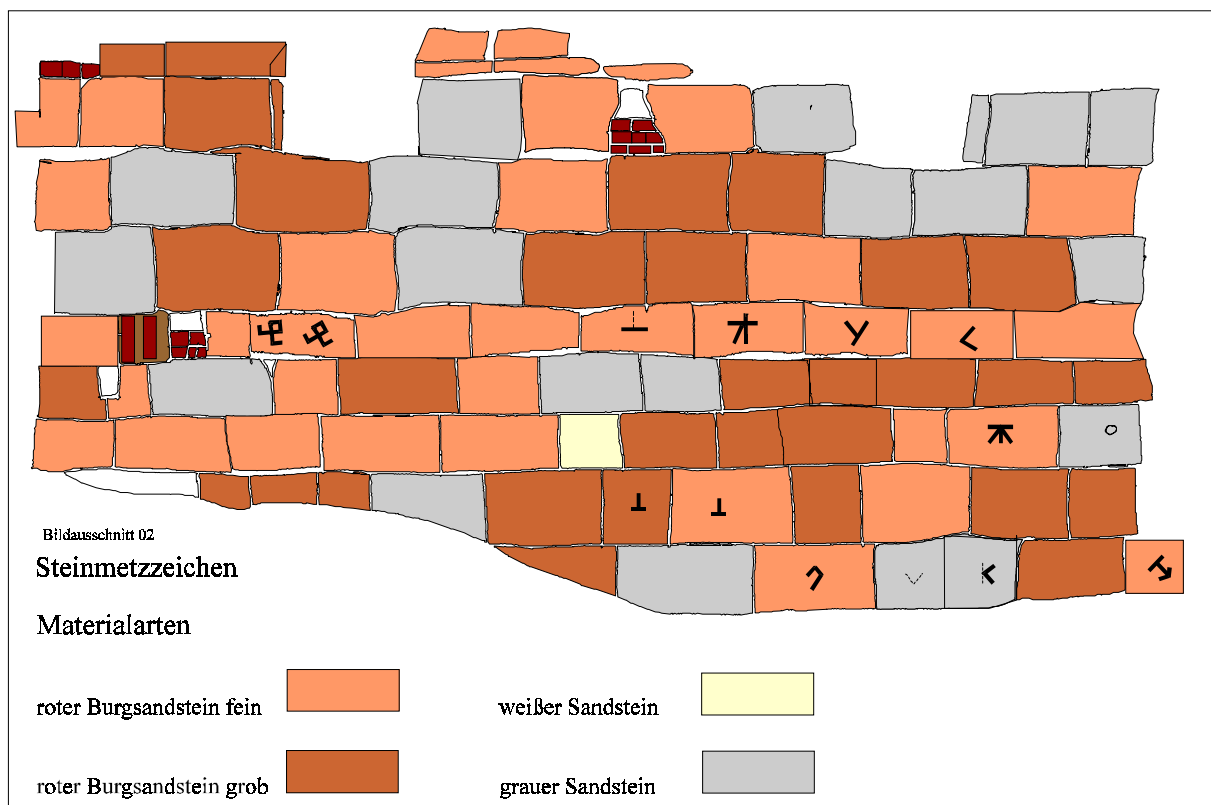


Abbildung 1: Nürnberg, Maxtormauer, mittelalterlicher Bereich, Außenseite. Kartierung der Materialien sowie bauhistorisch wichtiger Befunde.

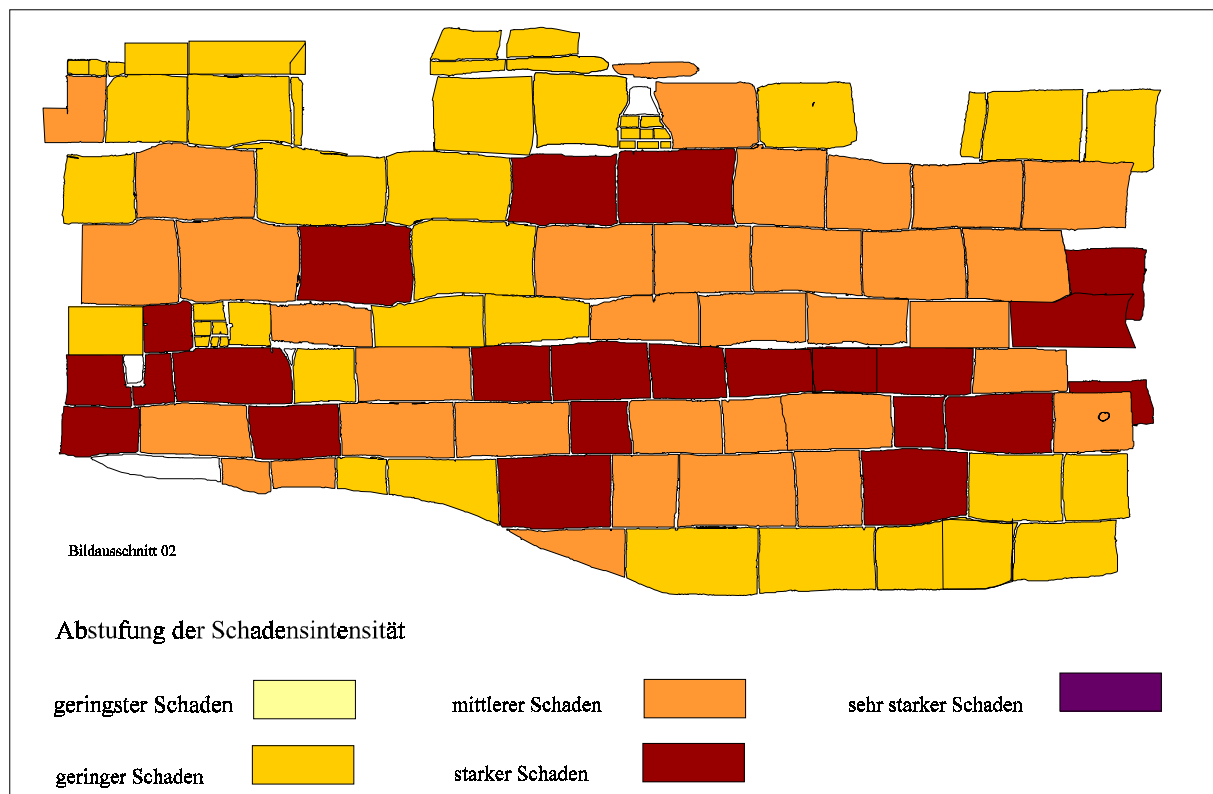


Abbildung 2: Nürnberg, Maxtormauer, mittelalterlicher Bereich, Außenseite. Fünfstufige Kartierung der Schadensintensität.

Qualitative Voruntersuchungen über einen größeren Mauerbereich hatten ergeben, daß die Salzbelastung keinesfalls einheitlich ist: während stadtseitig auf Höhe des Straßenniveaus erwartungsgemäß Natriumchlorid (Tausalz) dominierte, zeigte sich in stark durchfeuchteten Bereichen unterhalb des Wehrgangs häufig Magnesiumsulfat, welches sich aus dem fast allgegenwärtigen Gips mit dem teilweise dolomitischen Bindemittel des Burgsandsteins gebildet hat. Alle bodennahen Bereiche zeigen darüber hinaus starke Belastung mit dem stark hygroskopischen und extrem bauschädlichen Calciumnitrat, auch bekannt als Mauersalpeter. Dieses Salz geht bereits oberhalb von 55% r.h. in Lösung, was die Feuchteflecken bei regnerischer Witterung sowie auch in den frühen Morgenstunden erklärt. Die Häufigkeit der Kristallisationswechsel (häufiges Durchschreiten der 55%-Marke) bewirkt eine extreme Gefügebelastrung für den sehr weichen Sandstein, die Folge ist massives Absanden. Abbildung 3 zeigt eine typische Tiefenverteilung löslicher

Salze. Daraus wird erkennbar, daß zum Zeitpunkt der Probenentnahme (zeitliche Momentaufnahme) der „Löwenanteil“ der Salzlast in der Oberflächenzone sitzt. Ein starker Wassereintrag durch eine „Entsalzungskompressen“ würde also zunächst eine Verfrachtung der Salze in größere Tiefen bewirken, wobei fraglich wäre, ob diese in absehbarer Zeit wieder zur Umkehr zu bewegen wären.

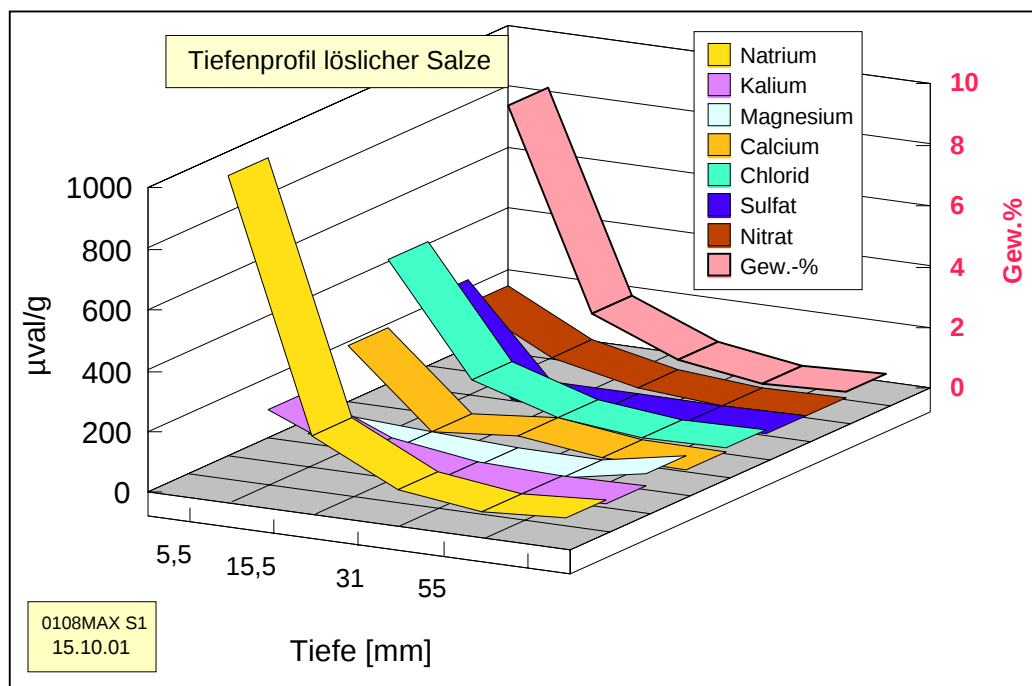


Abbildung 3: Nürnberg, Maxtormauer, Küblerzwinger (Renaissance), Stadtseite. Quantitative Tiefenverteilung der Ionen löslicher Salze in molaren Angaben. Rechte Ordinate: Gesamtbelastung in Gew.% (rot, schraffiert).

Eine Auslagerung von oberflächlich abgekehrtem Lockermaterial in unterschiedlichen Luftfeuchten bestätigte und verdeutlichte das Verhalten der „Salzcocktails“ im Klimawechsel (Abb. 4): oberhalb von ca. 60% r.h. nimmt das Material durch Sorption extrem hohe Feuchtemengen aus der Luft auf, die Salze (insbes. Calciumnitrat, oberhalb von ca. 75% r.h. auch Natriumchlorid und Natriumnitrat) gehen in Lösung. Der Porenraum der Oberflächenzone dürfte demnach häufig mit Salzlösung gefüllt sein, was etwa ein Einbringen flüssiger Restaurierungsstoffe wie z. B. von Steinfestigern verhindert. Aus diesem Grund,

aber letztlich auch zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit einer Festigungsmaßnahme, erschien, wenn auch schwer vorstellbar, eine deutliche Salzminderung auf jeden Fall erstrebenswert (von „Entsalzung“ wagte niemand zu sprechen).

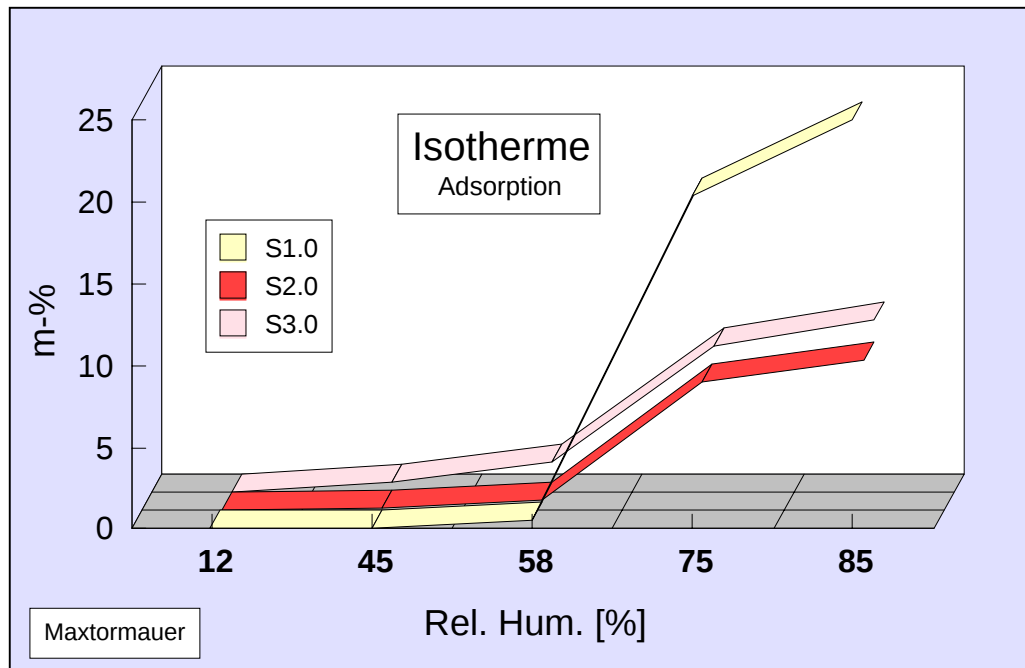


Abbildung 4: Nürnberg, Maxtormauer, Küblerzwinger (Renaissance), Stadtseite. Adsorptionsisothermen an absandendem Lockermaterial von den Oberflächen dreier unterschiedlicher Sandsteinvarietäten, ermittelt jeweils durch Auslagerung in aufsteigenden Luftfeuchten. S1: hell, feinkörnig. S2: hellrosa, grobkörnig. S3: tonig, intensiv rot, mittelkörnig.

3. Salzminderung

Erste Versuche zur Salzreduzierung an Musterflächen mit verdunstungsaktiven, d.h., durchtrocknenden Kompressen zeigten zwar großen Teils positive Resultate (Abb. 5), wenngleich zunächst noch kein Grund zur Euphorie bestand. Die Gesamtmengen an löslichen Bestandteilen konnten bei dreiwöchiger Einwirkdauer meist auf 30 – 50% ihres Ausgangswertes reduziert werden. Obwohl die einbrachte Wassermenge in Kenntnis des hohen Wasseraufnahmekoeffizienten des Sandsteins auf ein notwendiges Minimum beschränkt worden war, führte die Kompressenanwendung bisweilen jedoch auch zur Verfrachtung von Teilmengen der Salze in größere Tiefen.

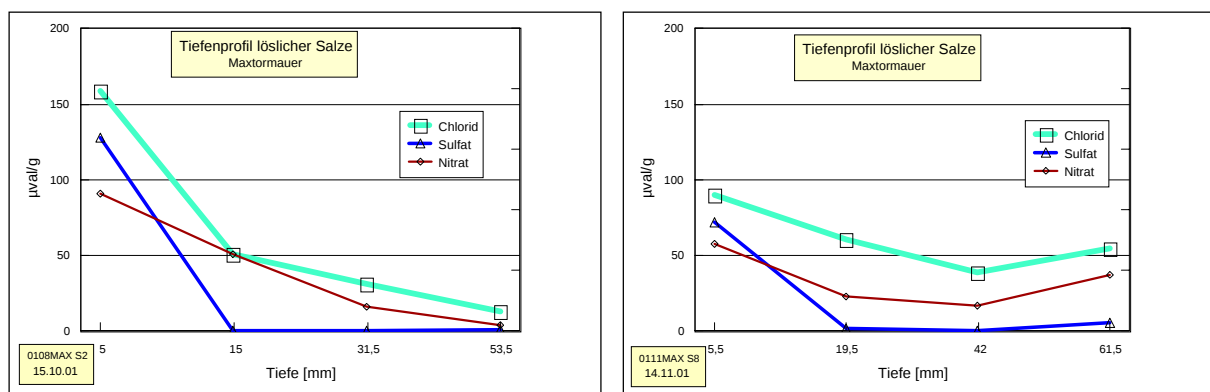


Abbildung 5: Nürnberg, Maxtormauer, Küblerzwinger (Renaissance), Stadtseite. Quantitative Tiefenverteilung löslicher Salze (nur Anionen dargestellt) vor (links) und nach dreiwöchiger Kompressenapplikation. Deutliche Reduktion aller Komponenten im Oberflächenbereich, geringe Verfrachtung von Chlorid und Nitrat in größere Tiefen.

Wegen der sehr hohen Versalzung der unteren Mauerabschnitte auf der Stadtseite wurde im Jahr 2002 die Salzminderung dort mit insgesamt drei Kompressenauflagen von jeweils ca. 3 Wochen Kontaktzeit durchgeführt. Der Erfolg wurde jeweils zu bestimmten Zeitpunkten nach gezielter Entnahme von Kompressenstücken mit definierter Fläche durch Messung der elektrischen Leitfähigkeit an den wässrigen Eluaten überprüft. Nach dem 2. Durchgang wurde zusätzlich eine dünne Zwischenlage aus reiner Cellulosefaser aufgebracht, um

die ansonsten sehr schwierige und zeitaufwendige Abnahme der Komprese zu erleichtern. Wie aus Abbildung 6 ersichtlich, zeigte dies offenbar keine Nachteile für den Entsalzungserfolg. Die Außenseite der Stadtmauer sowie die (auf "natürliche Weise" entsalzten) oberen Abschnitte der Stadtseite wurden wegen geringer Salzlast und entsprechend geringen Gehalten in den Kompressen nur einmal behandelt.

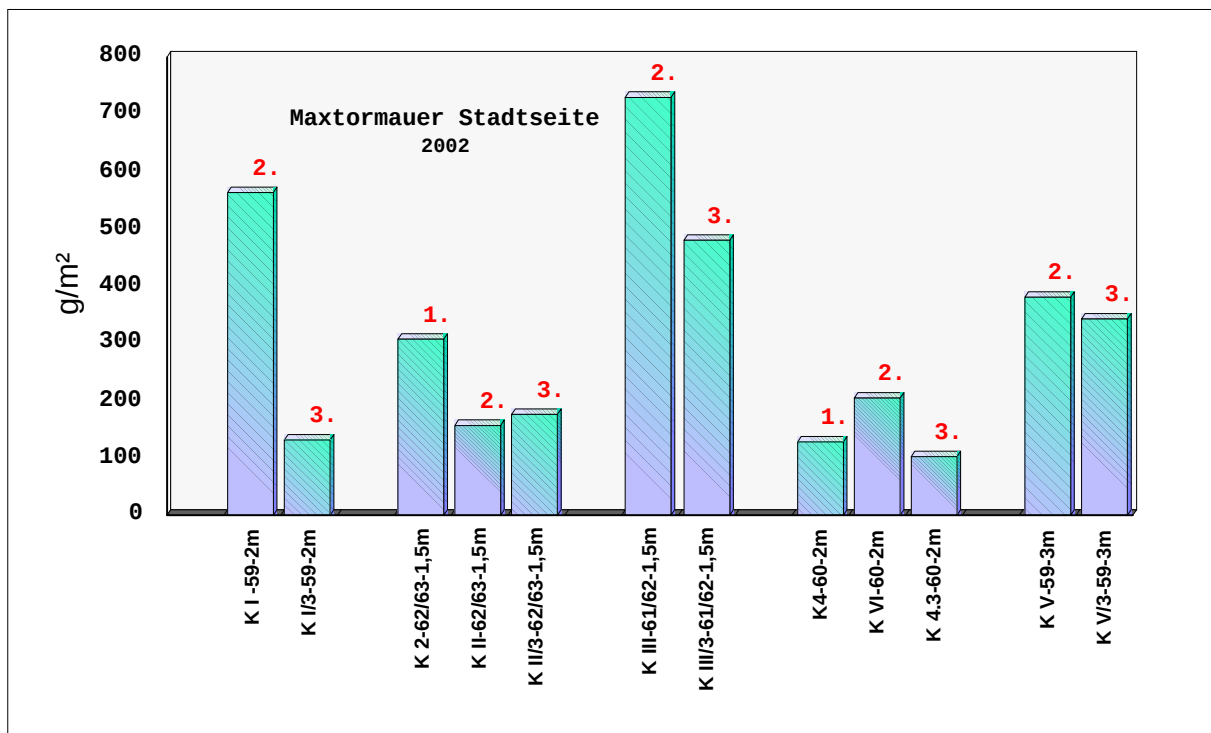


Abbildung 6: Nürnberg, Maxtormauer, 2.Bauabschnitt. Salzminderung über verdunstungsaktive durchtrocknende Kompressen. Flächenbezogene Salzgehalte, näherungsweise errechnet aus Messung der elektrischen Leitfähigkeit. Dreimalige Anwendung nach jeweils ca. dreiwöchiger Standzeit, 5 unterschiedliche Bereiche. Mai 2002. Angabe der Feld-Nummer sowie der ungefähren Höhe (Bezug: Straßenniveau).

Insgesamt wurden in den unteren Bereichen erhebliche Salzmenen aus dem Mauerwerk entfernt, zum Teil werden Mengen von 1000 g/m² und mehr mobilisiert. Der Trend der Salzminderung ist bei weiterer Anwendung eher rückläufig, zusätzliche Entsalzungszyklen wären vermutlich nur in Extremsituationen wie an den Lysenenpfeilern sinnvoll.

Die folgende Näherungsrechnung dokumentiert den Erfolg der Maßnahme:

Die an den im Jahr 2001 an Musterflächen ermittelten Tiefenprofile (s.o.) zeigen alle eine hohe Anreicherung der Salze im Oberflächenbereich, in die Tiefe nimmt der Gehalt jeweils deutlich ab. Für stark versalzte Bereiche kann daher folgende Vereinfachung getroffen werden:

0 - 1 cm Tiefe: 3 - 7 Gew.% Salzbelastung, dahinter null (vgl. Abb. 3). Bei einer Gesteinsrohddichte von 2.0 g/cm^3 ergibt sich daraus eine ursprüngliche Salzlast von $600 - 1400 \text{ g/m}^2$, ein Wertebereich der gleichen Größenordnung wie die in den Kompressen wiedergefundenen Salzgehalte.

4. Nicht-hygroskopische Feuchtebelastung

Breiter angelegte Analysen hatten gezeigt, daß die Salzbelastung stadtseitig unmittelbar unterhalb der offenliegenden, stark regenexponierten Wehrgangfläche eher gering ist, nach unten hin jedoch deutlich zunimmt. Hier findet offenbar (lokal begrenzt) ein natürlicher Entsalzungsprozeß statt, der allerdings zu Lasten der darunter liegenden Bereiche geht, in denen sich die Salze durch Verfrachtung und nachfolgende Verdunstung anreichern (Abb. 7). Dennoch wirken auch die salzärmeren (höheren) Bereiche optisch feucht.

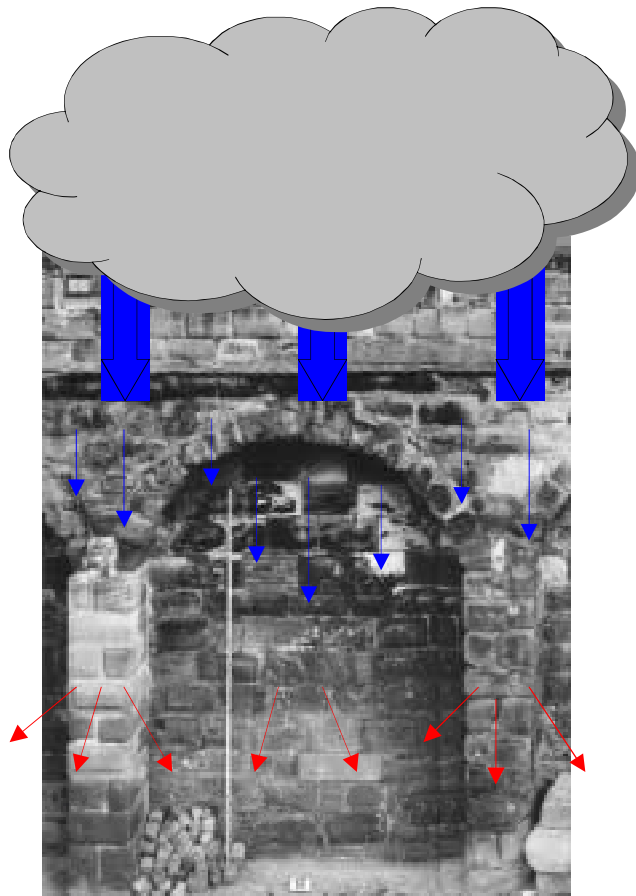


Abbildung 7: Nürnberg, Maxtormauer, Stadtseite. Von oben: Schildmauer, offene Wehrgangfläche, Lysenenbögen mit zurückgesetzten Wandfeldern. Schematische Darstellung der von der Wehrgangfläche ausgehenden Feuchteströme. Blau: Befeuchtung. Rot: Trocknung.

Messungen der Entnahmefeuchte an Bohrkernabschnitten zeigten im Profilverlauf eine tiefreichende und hohe Durchfeuchtung des Burgsandsteinmaterials. Die Porenraumfüllgrade (% Sättigung) lassen eine Konservierbarkeit durch Tränkungsstoffe fraglich erscheinen (Abb. 8). Weit höhere Materialfeuchten zeigen jedoch die innenliegenden Stoßfugen, welche somit als Transportschiene der auf die Wehrgangfläche auftreffenden Wassermengen anzusehen sind. Drückendes Wasser von der (hier weitgehend unter Erdniveau liegenden) Feldseite der Mauer scheidet als Hauptquelle auf Grund der festgestellten Profilverläufe aus, kann aber möglicherweise den notwendigen Trocknungsprozeß verzögern.

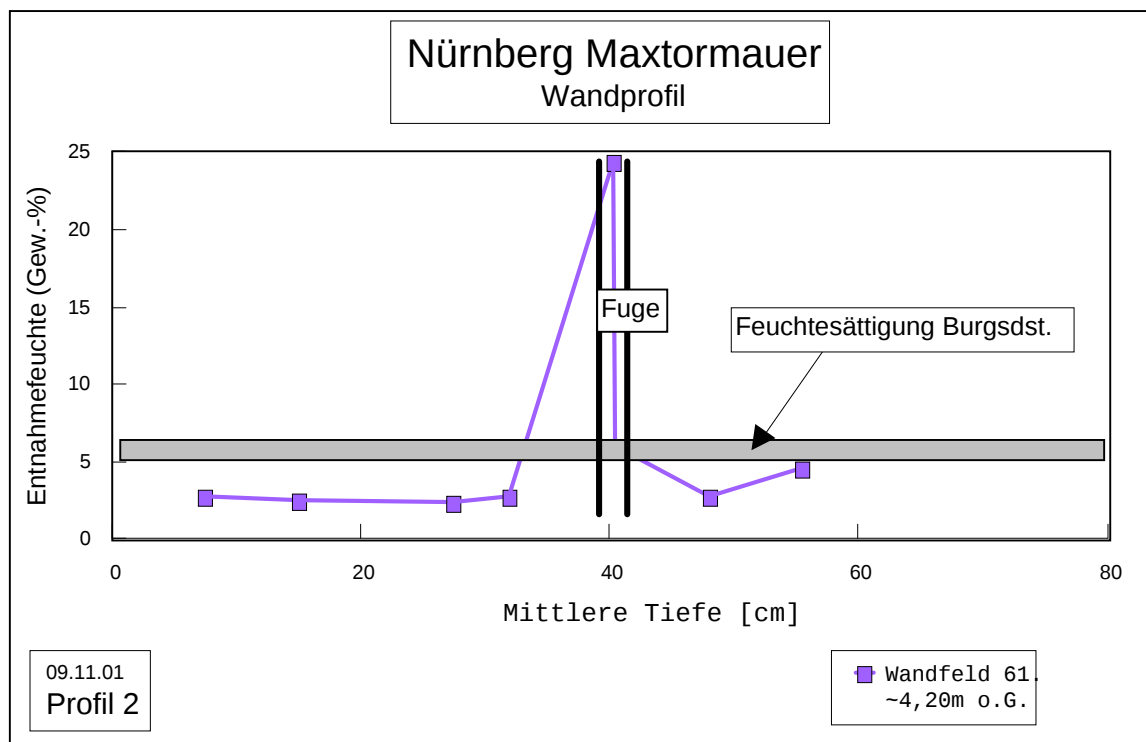


Abbildung 8: Nürnberg, Maxtormauer, mittelalterlicher Bereich , Stadtseite. Entnahmefeuchte an Bohrkernabschnitten im Tiefenprofil. Deutlich erkennbar wird die vom Fugennetz ausgehende Durchfeuchtung des Mauerwerks.

5. Trocknung

Zerstörungsfreie, halbquantitative Feuchtemessungen mit der GANN Hydromette im November 2001 bestätigten, daß aufsteigende Mauerfeuchte den Feuchtetransport zu vernachlässigen ist. Die vorstehenden Bögen im bereits abgeplanten Bereich sind erwartungsgemäß deutlich trockener als die zurückspringenden Bogenwandfelder (Abb. 9).

Durch eine Zweitmessung im November 2002 wurde die Geschwindigkeit des Trocknungsvorgangs unter der Abplanung ermittelt, um festzustellen, ab wann ist eine Festigung möglich ist. Es resultierte eine sehr ähnliche Verteilung der Feuchte wie im Vorjahr, wobei der Anteil der sehr feuchten Bereiche (violett) deutlich reduziert war. Als Prognose konnte daraus eine notwendige Gesamttrocknungsdauer von ca. 18 Monaten abgeleitet werden.

Maxtormauer Nürnberg
Mauerabschnitt 61
Messung 13.3.02

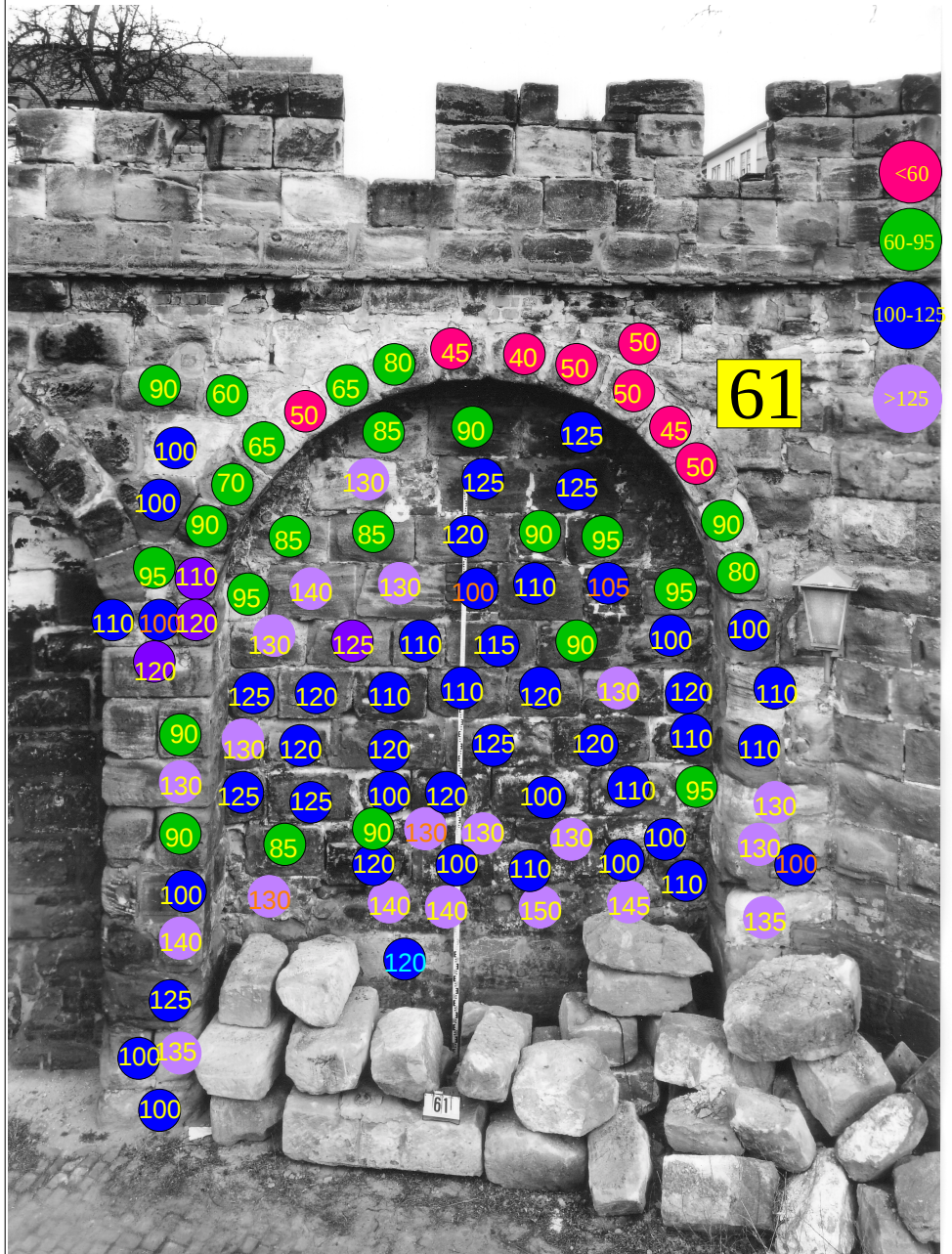


Abbildung 9: Nürnberg, Maxtormauer, mittelalterlicher Bereich , Stadtseite. Halbquantitative Erfassung der oberflächennahen Durchfeuchtung mit der GANN-Hydromette (Messung der Dielektrizitätskonstanten, 11/2001). Messung: November 2001, ca. 8 Wochen nach Abplanung. Rot: Sehr trocken. Grün: „normale“ Baustoffeuchte. Blau: feucht. Violett: Annähernd wassergesättigt.

6. Dauerhaftigkeit von Festigungsmaßnahmen

Zur Frage der Beständigkeit von Festigungsmaßnahmen in Gegenwart hygroskopischer Salze stand bruchfrischer lokaler Bursandstein zur Verfügung, aus welchem Würfel mit einer Kantenlänge von 3 cm geschnitten wurden. Ein Teil der Proben wurde gezielt mit einer Salzlösung kontaminiert, welche sich in ihrer Zusammensetzung und Konzentration an die vor Ort angetroffenen Belastungen anlehnte. Ein Teil der salzkontaminierten Proben wurde anschließend nach Trocknung mit Festigern auf Kieselsäureesterbasis behandelt [1].

Jeweils wiederum ein Teil aus jeder Prüfkörperserie sowie gänzlich unbehandeltes Material wurde anschließend einem zyklischen Luftfeuchtewechsel (20% r.h. - 90% r.h., jeweils 3.5 Tage) unterworfen. Nach Beendigung der Wechselbeanspruchung (15 Zyklen) wurde die Gesteinsfestigkeit mittels Bohrwiderstandsmessung ermittelt und ein Vergleich zu entsprechenden, unbeanspruchten Proben gezogen (Abb. 10).

Die salzbelastete und wechselbeanspruchte Probe (blau) zeigt eine meßbare Entfestigung der Oberflächenzone (bis ca. 8 mm) im Vergleich mit der unbelasteten Referenzprobe (grau). Die salzkontaminierte und anschließend gefestigte Probe (rot) zeigt wiederum ein ähnlich ausgeglichenes Profil wie die Referenzprobe, trotz anschließender Beanspruchung sind keinerlei Anzeichen einer strukturellen Gefügeschädigung erkennbar. Das Festigkeitsniveau ist als ausreichend hoch zu bezeichnen.

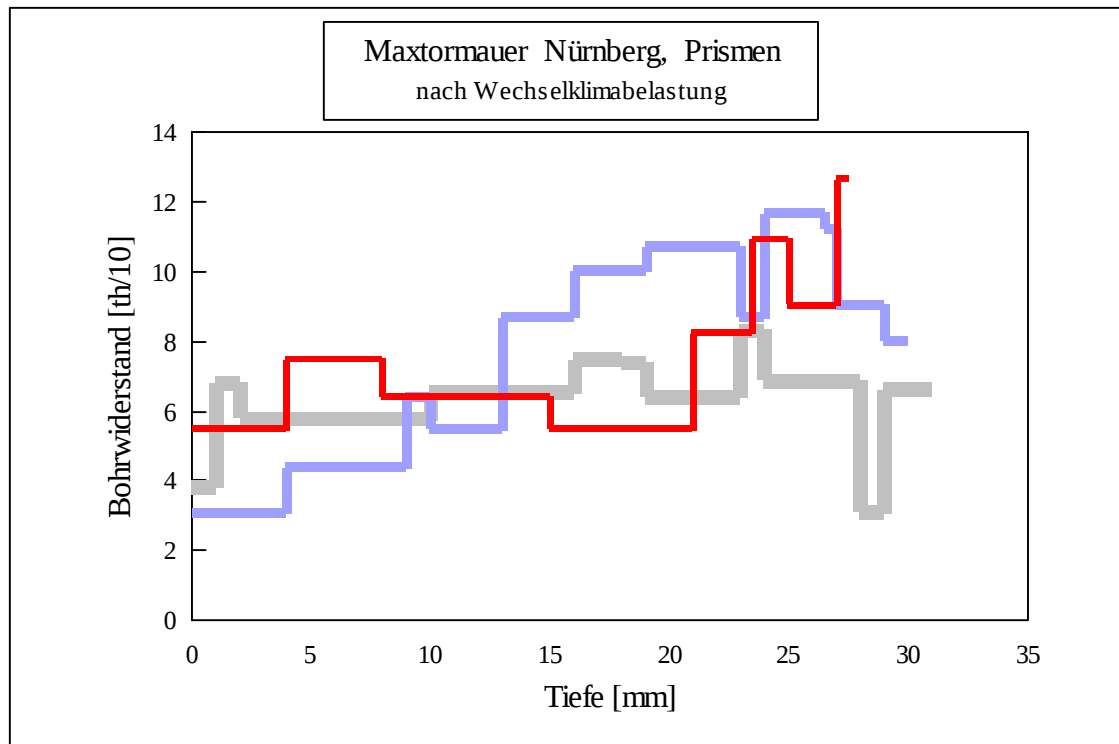


Abbildung 10: Nürnberg, Maxtormauer. Bohrhärtetiefenprofile an Sandsteinprismen (ursprünglich bruchfrisches Material) nach 3-monatiger Feucht-Trockenwechselbeanspruchung in Luft (20% r.h. – 90% r.h., Wechselintervall 84 h). Blau: salzkontaminiert. Rot: Zusätzlich anschließend gefestigt. Grau: nicht versalzte, ungefestigte Referenzprobe. Anm.: Die hohen Festigkeitsniveaus der salzkontaminierten Proben im inneren sind vermutlich auf die festigende Wirkung kristalliner Salzablagerungen im Porenraum zurückzuführen.

7. **Schlußfolgerungen**

Eine Blockade des Porenraums durch Salzlösungen oder Wasser kann die Aufnahme von Steinfestigern verhindern. Für ein wirksames Therapiekonzept (Trocknung oder Salzminderung?) ist die Kenntnis von Ursache und Transportpfad notwendig (aufsteigende Feuchte, drückende Feuchte, Sickerströmung, Kondensatbildung, hygroskopische Feuchte).

Kompressenanwendungen im massiven (mehrschaligen) Mauerwerk konnten eine überraschend effektive Salzminderung bewirken. Diese war ausreichend, um eine wirksame Festigung zu ermöglichen. Durchtrocknende Kompressen sind grundsätzlich effektiver zu bewerten als dauernasse Kompressen [2].

Neben stark mit hygroskopischen Salzen belasteten Zonen gibt es auch Bereiche mit geringer Salzbelastung, die dennoch sehr feucht sind. Durch Messung der Entnahmefeuchte wurde gezeigt, daß ein wichtiger Transportpfad die offene Wehrgangfläche darstellt. Eine längere Trocknung dieser Bereiche durch Abplanung ist zwingend notwendig, um eine Festigung durchführen zu können. Letztlich ist eine Abdeckung des Wehrgangs unerläßlich für den Bestand des Mauerwerks.

Es ist davon auszugehen, daß sich nach Jahren erneut Restsalzmengen in der gefestigten Oberflächenzone anreichern werden. Die Dauerhaftigkeit der Festigung konnte jedoch für den vorliegenden Fall im Simulationsversuch nachgewiesen werden.

Literatur

[1] Rolf Snethlage, Eberhard Wendler: Steinzerfall und Steinkonservierung-neueste Ergebnisse der Münchner Forschungen. In: Altermann, W. et al. (Hrsg): Münchner Geologische Hefte, A 23, Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr. Dietrich D. Klemm (1998), S. 177-201.

[2] WTA-Merkblatt E3-13-01/D: Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen (2003).

Danksagung

Diese Arbeit wurde durch Mittel der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert.