

7 Zusammenfassung

Im Rahmen der Bauschadensforschung hat sich gezeigt, dass Verwitterungsprozesse an historisch wichtigen Bauwerken aus Naturstein durch den verstärkten Eintrag bestimmter Luftschadstoffe erheblich beschleunigt worden sind. Die Bewahrung des kulturhistorisch wichtigen Erbe vor dem raschen weiteren Zerfall durch die ständigen Verwitterungsprozesse kann nur durch kostspielige Instandhaltungs- und Sanierungsmaßnahmen erfolgen.

Die kontinuierlich auftretenden Verwitterungsprozesse an Naturwerksteinen sind unterschiedlichster Natur. Die Schadensmechanismen lassen sich im einzelnen physikalischen, chemischen und teilweise biologischen Prozessen zuordnen. Das Zusammenwirken dieser Prozesse über einen Zeitraum von mehreren Jahrhunderten führte zu komplexen Schadensbildern. Seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts haben die anthropogenen Schadstoffemissionen stark zugenommen. Die daraus resultierende Stoffdeposition sauer reagierender Komponenten führt zu einer deutlichen Beschleunigung der chemischen Prozesse, was u.a. am Beispiel des Kölner Doms erkennbar wurde. Die weitgehende Erhaltung der Originalsubstanz ist eine zentrale Forderung der Denkmalpflege. Ein Austausch des ursprünglichen Natursteins wird nur bei fehlender Festigkeit durchgeführt. Neuartige Gesteinsschutzstoffe sollen einen langfristigen Schutz bieten, indem die Geschwindigkeit des Gesteinszerfall deutlich reduziert und teilweise auch der Festigkeitsverlust des Natursteins kompensiert wird.

Eine wichtige Aufgabe bei der Entwicklung und Erprobung neuer Schutzstoffsysteme ist die Weiterentwicklung von Prüfverfahren, die eine Bewertung der Schutzstoffwirksamkeit unter realen Bedingungen ermöglicht. Spätschäden an Bauwerkspartien, die aus dem Einsatz von Schutzmitteln resultieren, können durch Qualitätskontrollen für die Langwirksamkeit neuartiger Gesteinsschutzstoffe vermieden werden. Dabei wird zusätzlich unter realen Bedingungen die Wirksamkeit und die Dauerhaftigkeit der Schutzstoffsysteme auf Naturgestein geprüft.

Eines der Ziele dieser Arbeit war die Weiterentwicklung und praktische Anwendung einer Methode zur zerstörungsfreien Prüfung von schutzstoffbehandelten Sandsteinen. Eine praxisnahe Untersuchungsmöglichkeit für die Schutzmittelwirksamkeit stellt die bilanzier-

ende Depositionsmessung von Schwefeldioxid dar, mit der die Aufnahme von Schadstoffen aus der Luft und aus Niederschlägen gemessen werden kann.

Im Rahmen eines Teilprojektes des vom BMBF geförderten FuE-Vorhaben-Komplexes „Neue Lösungen zur Restaurierung und Konservierung von Natursteinverbänden an Baudenkmäler“ kam diese neue Methode erstmals zum Einsatz. Das Probenmaterial stammte aus dem Westgiebel des Turms der 1875 im neogothischen Stil erbauten Kirche St. Lukas in Zwickau-Planitz. Cottaer Sandstein wurde in diesem Bauwerk zur Verblendung des Ziegelmauerwerks verwendet. Als Schutzstoffe wurden Polymere auf Polyurethanbasis verwendet. Das hydrophobe Schutzmittel 219 (SM 219) ist ein Oligodimethylsiloxan-modifiziertes Polyurethan. Für den hydrophilen Schutzstoff 288 (SM 288) standen aus patentrechtlichen Gründen keine genaueren Angaben zur Verfügung.

Für die Langzeitbewitterung konnten zwei Versuchsanlagen der Projektpartner genutzt werden, mit denen gezielt physikalische, chemische und biologische Verwitterungsfaktoren simuliert wurden. Die Proben wurden vor, während und nach den Simulationsexperimenten untersucht. Für diese Untersuchung kam die entwickelte Methode zur bilanzierenden Depositionsmessung von Schwefeldioxid auf Gesteinsoberflächen zum Einsatz. Zusätzlich wurden nach Abschluss der Simulationsexperimente Teile der Gesteinsprüfkörper parallel zur Oberfläche in Scheiben zersägt und gemahlen. Nach Elution des Gesteinsmehls mit Wasser, Zentrifugieren und Filtrieren des Eluats wurden die Kationen und Anionen mittels Ionenchromatographie und ICP-OES bestimmt.

Die Salzvorbeltung der Gesteinsprüfkörper wiesen eine hohe Streuung auf. Dabei unterschieden sich die Ionengehalte in den Proben nicht nur in der Gesamtkonzentration sondern ebenfalls in der Verteilung innerhalb des Gesteins. Das Aufbringen des Schutzmittels führte zu Minderbefunden bei den Gesamtkonzentrationen. Das Verteilungsmuster der Ionen in der Tiefe blieb aber ähnlich. Nach einem 52-wöchigen Simulationsexperiment in der Versuchsanlage zur Entwicklung naturnaher Umweltsimulationskonzepte (VENUS) zeigte sich bei Prüfkörpern, die mit SM 219 imprägniert waren, keine Veränderungen im Verteilungsmuster der Ionen. Selbst Ionen, die leicht lösliche Salze bilden (Na , Cl^- , NO_3^-) finden sich in den obersten Gesteinsscheiben. Die Prüfkörper, die SM 288 erhalten hatten, zeigten nach der VENUS-Simulation erhebliche Änderungen im Tiefenprofil der Salzverteilung. Die Gehalte an

Natrium-, Chlorid- und Nitrationen waren deutlich geringer als bei den Blindproben. Die Gehalte an Gips hatten sich in die tieferen Zonen des Prüfkörpers verlagert.

Die Salzverteilung der Prüfkörper nach einem 50-wöchigen Simulationsexperiment in der biologisch-chemischen Simulationsanlage (BCS) zeigt bei unbehandelten Proben eine starke Gipsanreicherung in der obersten Gesteinsscheibe. Während die mit SM 219 imprägnierten Prüfkörper nur im unbehandelten Bereich Veränderungen der Nitrat- und Chloridkonzentrationen aufwiesen, deuten die hohen Gipskonzentrationen an der Gesteinsoberfläche der mit SM 288 imprägnierten Proben auf eine Reaktion des Gesteins mit der Schadgasatmosphäre hin.

Die Tiefenprofile der Salzverteilung nach beiden Simulationsexperimenten zeigt bei den unbehandelten Proben eine hohe Gipskonzentration an der Gesteinsoberfläche, die auf neu-gebildeten Gips in der BCS-Kammer zurückzuführen ist. Eine erhöhte Nitratkonzentration in den obersten Gesteinsscheiben wurde durch Nitrifikanten aus Ammoniumionen erzeugt. Die Ionenkonzentrationen bei den mit SM 219 imprägnierten Prüfkörper haben sich nach den Simulationen kaum verändert. Dagegen entstanden bei den mit SM 288 imprägnierten Proben große Mengen an Gips.

Die SO₂-Depositionswerte der unbehandelten Proben zeigen eine beträchtliche Streuung. Nach der Imprägnierung der Proben mit SM 219 sinkt der Wert signifikant und belegt damit die Wirksamkeit des Schutzstoffes. Es konnte gezeigt werden, dass das Schutzmittel nicht mit dem Schwefeldioxid reagiert und außer dem Gestein selbst keine weiteren möglichen Reaktionspartner für das Schadgas zur Verfügung stehen. Eine Veränderung der Depositionsgeschwindigkeit deutet somit auch auf eine Veränderung der Schutzmittelwirkung hin. Die Schutzmittelwirkung des SM 288 ist vor den Simulationsversuchen mit der des SM 219 vergleichbar. Eine nach der Imprägnierung durchgeführte UV-Behandlung führte zu keinen eindeutigen Ergebnissen.

Nach der VENUS-Simulation kommt es bei den mit SM 219 imprägnierten Proben zu einer unwesentlichen Veränderung der Depositionsgeschwindigkeit. Beim SM 288 zeigt ein Probensatz eine merkliche Erhöhung des Depositionswertes, hier ist von einer Schädigung des Schutzstoffes auszugehen. Nach dem Experiment in der biologisch-chemischen Simulationskammer zeigten unbehandelte Proben wie auch schutzmittelimprägnierte Prüfkörper eine mehr oder weniger verminderte

Depositionsgeschwindigkeit. Die Ursachen liegen hier, wie durch Kryo-REM-Untersuchungen gezeigt wurde, in der Gipsneubildung an der Oberfläche. Während der Experimentdauer entstandene Biofilme senken ebenfalls die Depositionsgeschwindigkeiten. Dieses konnte in einem zusätzlichen Experiment an unbehandelten Gesteinsplättchen nachgewiesen werden. Mittels konfokaler Lasermikroskopie konnte der Biofilm gezeigt werden. Es ist bei diesem Experiment eine vollständige Bedeckung der Gesteinsoberfläche gelungen. Ein Biofilm senkt die Aufnahme von SO_2 je nach untersuchter Gesteinssorte zwischen 50 und 70 Prozent.

In Ergänzung zu den oben erwähnten Simulationsanlagen wurde für die Simulation zur Salzverwitterung eine zusätzliche Experimentierkammer realisiert. In bruchfrische Gesteinsproben wurden große Mengen von Natriumchlorid eingebracht. Es konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe dieser Kammer eine irreversible Schädigung des Gesteins eintritt. Die Prüfung der Dauerhaftigkeit der Schutzmittel (in diesem Fall nur SM 219) unter dem Aspekt der Gesteinsschädigung durch Salzkristallisation konnte erstmalig mit dieser Kammer und der damit verbundenen Depositionsmessung durchgeführt werden. Obwohl bei diesem Experiment starke Dehnungen im Gestein auftraten, konnte keine signifikante Veränderung der Depositionswerte ermittelt werden. Für eine abschließende Beurteilung müssen noch weitere Experimente unter Verwendung aller zu prüfenden Natursteinvarietäten und Schutzmitteln durchgeführt werden.