

Institut für Steinkonservierung e.V.

Gemeinsame Einrichtung der staatlichen Denkmalpflege
Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland und Thüringen



Baudenkmäler unter dem Einfluss verkehrsbedingter Immissionen

IFS-Bericht Nr. 49 – 2015

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Abschlussbericht zum Forschungsprojekt AZ 29728-45

„Die Auswirkungen verkehrsbedingter Emissionen an
Denkmälern in Innenstädten und Entwicklung geeigneter
Konzepte zu deren Minderung“

Projektlaufzeit:
12.06.2012 - 15.03.2015

Projektnehmer:

Institut für Steinkonservierung e. V.

Kooperationspartner:

Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Zentrallabor
Deutsches Bergbaumuseum, Fachbereich für Denkmalschutz/Materialkunde
Technische Universität Darmstadt, Institut für Angewandte Geowissenschaften
Universität Mainz, Institut für Physik der Atmosphäre
Professor Dr. Rolf Snethlage, Naturstein, Bauchemie und Bauphysik in der Denkmalpflege, Bamberg

Titelbild:

Oben: Würzburg, Residenz, Rennweg entlang des Nordflügels
Unten: Windfeld und bodennahe Feinstaubkonzentration an der Residenz (aus: Eichhorn et al.)

Baudenkmäler unter dem Einfluss verkehrsbedingter Immissionen

IFS-Bericht Nr. 49 - 2015
ISSN 0945-4748

Herausgeber

INSTITUT FÜR STEINKONSERVIERUNG E. V.
BAYERISCHES LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE

Vertrieb

Institut für Steinkonservierung e. V.
Große Langgasse 29
55116 Mainz
Telefon: 06131 2016-500
Telefax: 06131 2016-555
E-Mail: info@ifs-mainz.de
www.ifs-mainz.de

© IFS Mainz 2015

Inhalt

Einführung

| | | |
|---|---|---|
| <i>Silvia Beer</i> <i>Martin Mach</i> <i>Rolf Snethlage</i> | Zur Luftverunreinigung und Rolle des Verkehrs in Deutschland von 1970 bis heute..... | 1 |
|---|---|---|

Innerstädtische Schadstoffbelastung

| | | |
|---|---|----|
| <i>Petra Bundschuh</i> <i>Michael Auras</i> <i>Björn Seewald</i> <i>Rolf Snethlage</i> | Verkehrsbedingte Immissionen und Belastung des innerstädtischen Denkmalbestandes | 19 |
|---|---|----|

Belastung an Einzeldenkmälern und Schadenswirkung

| | | |
|---|---|----|
| <i>Joachim Eichhorn</i> <i>Anne Bittermann</i> <i>Natalie Duszynski</i> <i>Katharina Riffel</i> <i>Jonas von Schumann</i> <i>Christian Wrage</i> | Modellierung der Strömungsgeschwindigkeiten und Depositionsraten an Einzeldenkmälern | 35 |
|---|---|----|

| | | |
|--|--|----|
| <i>Petra Bundschuh</i> <i>Michael Auras</i> <i>Dirk Kirchner</i> <i>Dirk Scheuvens</i> <i>Klemens Seelos</i> | Expositionsprogramm zur Wirkung verkehrsbedingter Immissionen auf Natursteinoberflächen | 53 |
|--|--|----|

| | | |
|---|--|----|
| <i>Dirk Scheuvens</i> <i>Thomas Dirsch</i> <i>Angela Moissl</i> <i>Miriam Küpper</i> <i>Stephan Weinbruch</i> | Partikuläre Schadstoffe an Baudenkmalern | 79 |
|---|--|----|

| | | |
|----------------------|--|-----|
| <i>Björn Seewald</i> | Zur Schadenswirkung von Salzen und Stäuben | 101 |
|----------------------|--|-----|

Möglichkeiten der Schadensminderung

| | | |
|--|---|-----|
| <i>Dirk Scheuvens</i> <i>Konrad Kandler</i> <i>Stephan Weinbruch</i> | Feinstaub-Filterung durch Vegetation – Untersuchungen an der Luftmessstation Mainz-Zitadelle | 145 |
|--|---|-----|

| | | |
|---|---|-----|
| <i>Rolf Snethlage</i> <i>Michael Auras</i> | Denkmäler unter Verkehrseinfluss – Bewertung der aktuellen Situation und Möglichkeiten der Belastungsminderung | 155 |
|---|---|-----|

Autorinnen und Autoren

Dr. Michael Auras

Institut für Steinkonservierung e. V., Mainz

Silvia Beer

Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, München

Anne Bittermann B.Sc.

Institut für Physik der Atmosphäre
Universität Mainz

Dr. Petra Bundschuh

Institut für Steinkonservierung e. V., Mainz

Thomas Dirsch

Institut für Angewandte Geowissenschaften
Technische Universität Darmstadt

Natalie Duszynski B.Sc.

Institut für Physik der Atmosphäre
Universität Mainz

Dr. Joachim Eichhorn

Institut für Physik der Atmosphäre
Universität Mainz

Dr. Konrad Kandler

Institut für Angewandte Geowissenschaften
Technische Universität Darmstadt

Dipl.-Min. Dirk Kirchner

Deutsches Bergbau-Museum Bochum
Forschungsstelle Archäologie und Materialwissenschaft

Miriam Küpper

Institut für Angewandte Geowissenschaften
Technische Universität Darmstadt

Dipl.-Chem. Martin Mach

Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, München

Angela Moissl

Institut für Angewandte Geowissenschaften
Technische Universität Darmstadt

Katharina Riffel B.Sc.

Institut für Physik der Atmosphäre
Universität Mainz

Dr. Klemens Seelos

Institut für Geowissenschaften
Universität Mainz

Dr. Dirk Scheuven

Institut für Angewandte Geowissenschaften
Technische Universität Darmstadt

Dipl.-Met. Jonas von Schumann

Institut für Physik der Atmosphäre
Universität Mainz

Dipl.-Ing. Björn Seewald

Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, München

Prof. Dr. Rolf Snethlage

Naturstein, Bauphysik und Bauchemie in der
Denkmalpflege, Bamberg

Prof. Dr. Stephan Weinbruch

Institut für Angewandte Geowissenschaften
Technische Universität Darmstadt

Christian Wrage B.Sc.

Institut für Physik der Atmosphäre
Universität Mainz

Vorwort

Die Luftverschmutzung in Deutschland konnte in den letzten Dekaden stark reduziert werden. Maßnahmen zur Rauchgasentschwefelung von Kraftwerken und Industrieanlagen sowie zur Abgasreinigung von Automobilen haben Wirkung gezeigt. Insbesondere die Belastung durch Schwefeldioxid und seine Folgeprodukte sind gegenüber den 1970er und 80er Jahren auf einen Bruchteil der damaligen Werte gesunken. Der pH-Wert des ehemaligen „sauren Regens“ hat sich merklich erhöht, er liegt heute im natürlichen, durch die Sättigung mit Kohlensäure vorgegebenen Bereich. Dennoch können viele Städte die gesetzlichen Vorgaben zur Luftreinhaltung nicht einhalten. Feinstaub und Stickoxide sind diesbezüglich die problematischsten Schadstoffe, beide sind zu wesentlichen Anteilen verkehrsbedingt. Neben den gesundheitlichen Aspekten stellt sich die Frage nach den Auswirkungen der veränderten Schadstoffzusammensetzung auf Materialien.

Dies gilt insbesondere für den Bereich des Denkmalschutzes, da die Baudenkmäler diesen Schadstoffen langfristig ausgesetzt sind und heute noch unter den Folgen der früheren, durch hohe Schwefeldioxid-Konzentrationen verunreinigten Atmosphäre leiden. Die Erforschungen der Wirkungen von Luftschadstoffen auf Materialien konzentrierten sich bis etwa zur Jahrtausendwende auf Schwefeldioxid und seine Folgeprodukte. Seit dieser Zeit gibt es Ansätze, auch die anderen Schadstoffe stärker zu beachten, z.B. im Forschungsprojekt MULTI ASSESS im Rahmen des UN-ECE-Programms. In diesem Projekt konnten aus den Ergebnissen internationaler Expositionsprogramme mathematische Funktionen und Faktoren abgeleitet werden, die anhand von Luftschadstoffkonzentrationen und klimatischen Bedingungen die Berechnung von Rückwitterungs- und Verschmutzungsraten für bestimmte Referenzmaterialien ermöglichen.

Der vorliegende IFS-Bericht widmet sich dem Aspekt der Wirkung aktueller, zum wesentlichen Teil verkehrsverursachter Luftschadstoffbelastungen auf die Denkmalsubstanz in Innenstädten. Die Untersuchungen wurden im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung

Umwelt geförderten Forschungsprojektes mit dem Titel „Die Auswirkungen verkehrsbedingter Emissionen an Denkmälern in Innenstädten und Entwicklung geeigneter Konzepte zu deren Minderung“ durchgeführt. Antragsteller und Bewilligungsempfänger war das Institut für Steinkonservierung, als Kooperationspartner wirkten mit:

- Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Zentrallabor, Dipl.-Chem. Martin Mach und Dipl.-Ing. Björn Seewald
- Deutsches Bergbaumuseum, Forschungsstelle Archäologie und Materialwissenschaft Prof. Dr. Stefan Brüggerhoff und Dipl.-Min. Dirk Kirchner
- Prof. Dr. Rolf Snethlage, Naturstein, Bauchemie und Bauphysik in der Denkmalpflege, Bamberg
- Technische Universität Darmstadt, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Fachgebiet Umweltmineralogie, Prof. Dr. Stefan Weinbruch und Dr. Dirk Scheuven
- Universität Mainz, Institut für Physik der Atmosphäre, Dr. Joachim Eichhorn

Als wissenschaftliche Beiräte konnten gewonnen werden:

- Dr. Sabine Wurzler, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
- Dr. Heiner Siedel, Technische Universität Dresden, Institut für Geotechnik

Im Rahmen einer ebenfalls von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Pilotstudie konnten einige der im aktuellen Projekt eingesetzten Methoden erprobt werden. Während das Vorprojekt vor allem auf den Nachweis der verkehrsbedingten Zusatzbelastungen zielte, standen nun neben der Verdichtung der Datenbasis zum Schadstoffeintrag die Untersuchungen der Wirkungen auf Bauwerksoberflächen an Denkmälern im Vordergrund. Dies hatte auch Änderungen im methodischen Ansatz zur Folge. Das Arbeitsprogramm gliederte sich in drei sogenannte Work Packages.

Work Package 1, Belastung der Denkmalsubstanz ausgewählter deutscher Innenstädte durch verkehrsbedingte Immissionen | In diesem Teil des Projektes wurden vorhandene Daten wie die Immissionsmessungen der Landesumweltbehörden, Angaben der Landesdenkmalbehörden zum Denkmalbestand sowie Daten kommunaler und regionaler Institutionen zu Verkehrsaufkommen, Verkehrsemissionen, Klima und Bebauung von fünf deutschen Innenstädten ausgewertet. Es war zu ermitteln, welcher Anteil des Denkmalbestandes erhöhten Belastungen durch Verkehrsemissionen ausgesetzt ist. Bekannte Schadensfunktionen in Form von Dosis-Wirkungs-Beziehungen wurden berechnet, um das Schadenspotential zu erfassen.

Als Modellstädte wurden Bamberg, Würzburg, Mainz, Essen und München ausgewählt, um einerseits unterschiedliche Verkehrsaufkommen und Immissionssituationen zu erfassen und andererseits eine möglichst standortnahe Betreuung der Expositionsgestelle zu gewährleisten.

Work Package 2, Eintrag verkehrsbedingter Luftschadstoffe auf Oberflächen prominenter Einzeldenkmale | Aufgrund der oft komplexen Bauwerksgeometrie historischer Gebäude sowie der objektspezifisch unterschiedlichen Bedingungen (Verkehrsbelastung, Windrichtung und Windgeschwindigkeit in Straßenschluchten, Bebauung im Umfeld des Gebäudes etc.) ist eine individuelle Betrachtung ausgewählter Baudenkmale notwendig. Daher wurde in jeder der genannten Städte ein Baudenkmal in verkehrsbelasteter Lage modellhaft für die weitergehende Untersuchung und Bewertung ausgewählt:

- Mainz: Christuskirche
- München: Bayerisches Nationalmuseum
- Bamberg: Haus Nonnenbrücke 1
- Würzburg: Residenz, Fassade am Rennweg
- Essen: Wasserturm Steeler Straße

Zur Ermittlung der Luftströmungen und der dreidimensionalen Ausbreitung der Verkehrsemissionen sowie der resultierenden Schadstoffkonzentrationen und Depositionsraten wurden Modellrechnungen mit dem Programm MISKAM (Mikroskaliges Klima- und Ausbreitungsmodell) durchgeführt. Den Eigentümern verkehrsbelasteter Denkmale wird mit der Nahfeldbetrachtung einzelner Baudenkmale die Möglichkeit gegeben, die Belastungssituation für ihr Denkmal abzuschätzen und besonders stark belastete Bauteile zu erkennen.

An zwei Objekten wurde der Einfluss von Bepflanzungen im Umfeld der Denkmale auf die Depositionsgeschwindigkeit anhand von Vergleichsrechnungen bestimmt.

Ergänzend zu den Modellrechnungen wurden Messungen zur Immission von Feinstaub und Stickoxidverbindungen auf Bauwerksoberflächen durchgeführt, wozu

verschiedene Arten von Passivsammlern direkt an Denkmalfassaden ausgelagert wurden.

Work Package 3, Wirkung von Luftschadstoffen auf Denkmalbaustoffe | Die Schadenswirkungen auf Denkmalbaustoffe, insbesondere Natursteinen, bestehen zum einen in einer beschleunigten Verschmutzung mit nachfolgender Schadensdynamik, zum anderen in der Bildung bauschädlicher Salze, die durch alternierende Kristallisations- und Lösungsprozesse zu Schäden an den Baustoffoberflächen führen. Dementsprechend wurden Untersuchungen zur Verschmutzung infolge Partikeldeposition, zum Salzeintrag und zur Bestimmung von Rückwitterungsraten durchgeführt. Hierzu wurden Natursteinproben über einen Zeitraum von einem Jahr an ausgewählten Gebäuden exponiert.

Das Ziel der Untersuchungen zur Staubdeposition war, eine Beziehung zwischen der Staubbelastung in der Umgebungsluft der Denkmäler und den ausgelagerten Passivsammlern herzustellen. Dazu wurden verschiedene Methoden eingesetzt.

- Feinstaubmessungen (PM10 und PM2,5) mit Opticle Particle Counter (OPC) an der Würzburger Residenz in Abhängigkeit von der Höhenlage an der Nordfassade und an der Zitadelle Mainz zur Bestimmung des Einflusses von Vegetation (Feinstaubfilterung?)
- Verschmutzungsmessungen mit Farbmessgerät und mobiler Röntgenfluoreszenzanalyse
- Depositionsmessungen auf Glasplättchen und Borträgern mittels Licht- und Rasterelektronenmikroskopie und Auswertung mittels Bildanalyse

Anders als in gesundheitsrelevanten Studien wurden auch gröbere Kornfraktionen als PM10 untersucht, da sich in ihnen andere Arten verkehrsbedingter Schmutzpartikel wie Reifenabrieb finden. Gerade die gröberen Staubfraktionen als PM10 belegen größere Anteile der Bauwerksoberflächen als feinere Partikel und tragen damit entscheidend zur Fassadenverschmutzung bei.

Ergänzend wurden Untersuchungen der Wechselwirkungen zwischen Luftschadstoffen und verschiedenen Materialien im mikroskopischen und makroskopischen Maßstab vorgenommen. Das Ziel war die Charakterisierung der Einwirkung unterschiedlicher Staubtypen auf Substrate mit ebener und reaktiver Oberfläche. Im Unterschied zur gängigen gesetzlichen Partikelbewertung, die primär aufgrund der Massenanteile von PM10 und kleinerer Fraktionen hinsichtlich der gesundheitlichen Gefährdung vorgenommen wird, sollte das physikalisch-chemische Gefährdungspotential der Stäube für Materialien abgeschätzt werden. Zur Durchführung wurden als Substrate poliertes Kupfer und Marmor zusammen mit Normstäuben und verkehrsbedingten Stäuben einer Feuchtlagerung ausgesetzt. Die Auswertung erfolgte im Rasterelektronenmikroskop sowie quantitativ mittels Querschleiff und 3D-Rauigkeitsmessung.

Im Projekt konnte den Verkehrseinfluss auf Baudenkmale eindeutig belegen und erste Zahlenwerte zu Salzeintrag, Verschmutzung und Rückwitterung von Denkmaloberflächen geben. Da die Belastungen wesentlich geringer sind als zu früheren Zeiten stärkster Luftverschmutzung, hat sich der gewählte Beobachtungszeitraum von einem Jahr als sehr knapp erwiesen. Um dies zumindest teilweise auszugleichen, konzentrierten sich die Messungen zur Partikeldeposition auf horizontal ausgelagerte Proben, an denen sich die Verschmutzungseffekte sozusagen im Zeitraffer darstellen lassen.

Es wurde nachgewiesen, dass keineswegs nur wenige Denkmäler, sondern erhebliche Anteile der innerstädtischen Denkmalbestände von erhöhten, durch den Straßenverkehr verursachten Immissionen betroffen sind. Schon innerhalb der kurzen Beobachtungsdauer von einem Jahr konnten erneute Verschmutzungen und Salzeinträge an ausgelagerten Natursteinproben und teils auch am Objekt nachgewiesen werden.

Potentiale zur Minderung der Belastungen sind zum großen Teil bereits ausgeschöpft durch mehrfache Verschärfungen der zulässigen Abgaswerte, Einrichtung von Umweltzonen und andere verkehrsbeeinflussende Maßnahmen. Weitere Minderungen der Schadstoffbelastungen sind nur durch Kombinationen verschiedener Maßnahmen möglich. Erneute Verschärfungen der Emissionswerte, Stärkung des öffentlichen Nahverkehrs, Regelungen zur Verbesserung des Verkehrsflusses und andere Ansätze werden zurzeit in vielen Städten diskutiert und teilweise erprobt.

Es ist absehbar, dass die innerstädtischen Belastungen durch verkehrsbedingte Immissionen noch längere Zeit auf unsere Baudenkmäler einwirken werden. Daher sollte das Thema des Forschungsprojektes auch künftig verfolgt werden.

Im Namen des gesamten Projektteams sei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die Förderung des Projektes gedankt. Ebenso gilt unser Dank den vielen Landes-, Regional- und Kommunalverwaltungen, die das Projekt durch die Bereitstellung von Datenmaterial in vielfältiger und meist sehr unkomplizierter Weise unterstützt haben. Besonderer Dank gebührt den Eigentümern der fünf Modellobjekte und ihren Vertretern, die uns die Untersuchungen an ihren Baudenkmalern ermöglichten und oft tatkräftige Unterstützung leisteten. Ein herzliches Dankeschön all den ungenannten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in den beteiligten Instituten, die am Gelingen des Projektes wesentlichen Anteil hatten. Besonders zu hervorzuheben sind die Zuarbeiten von Annette Hornschuch, Inga Krafczyk, Wolfgang Mühlshwein und vor allem von Roger Thamm, dessen Kletter- und Handwerkskünste bei Montage und Abbau der Expositions racks äußerst wertvoll waren.

Mainz und Bamberg, im Februar 2015

Dr. Michael Auras

Prof. Dr. Rolf Snethlage