Luftschadstoffe und Beton

Autor(en): **Hermann, Kurt**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Cementbulletin**

Band (Jahr): **64 (1996)**

Heft 5

PDF erstellt am: **27.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-153815

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Luft-schadstoffe und Beton

3

Schwefel- und Stickoxide haben wahrscheinlich auch zu den Schäden an diesem Kunstwerk beigetragen.

Foto: K. Hermann, TFB

Beton wird in der Regel durch Luftschadstoffe nur wenig geschädigt.

Luftschadstoffe können die Ursache vieler negativer Erscheinungen sein. Allem voran ist sicher der «saure Regen» zu nennen, der zu trauriger Berühmtheit gelangt ist. Er wird unter anderem verantwortlich gemacht für

- die Ansäuerung von Seen, Flüssen und Grundwässern,
- die Ansäuerung und Entmineralisierung von Böden,
- die verminderte Produktivität von Wäldern,
- Ernteschäden sowie
- die Zerstörung von Baumaterialien verschiedenster Art [1].

Chemische Formeln von Schadstoffen

Im vorliegenden Text ist vor allem über die folgenden chemischen Verbindungen in der Luft sowie im Regen die Rede:

SO_2	Schwefeldioxid
SO_3	Schwefeltrioxid
NO	Stickstoffmonoxid
NO_2	Stickstoffdioxid
NO_x	Stickoxide (Summe von NO und NO_2)
H_2SO_3	schweflige Säure
H_2SO_4	Schwefelsäure
HNO_3	Salpetersäure

Augenfällige Beispiele für schädliche Einflüsse von Luftschadstoffen sind viele alte Bau- und Kunstwerke aus Sandstein, Marmor und anderen Baustoffen, die stark unter der Einwirkung von sauren Luftschadstoffen zu leiden haben. Weniger gravierend sind die Schäden an Betonbauten. Entsprechend dünn gesät sind denn auch die Artikel zu diesem Thema.

Schadstoffe in der Luft

Unter den Luftschadstoffen, die schädliche Wirkungen auf Beton ausüben können, sind – abgesehen von Staub- und Russteilchen – Schwefel- und Stickoxide sowie die daraus gebildeten Säuren am wichtigsten. Ihre chemischen Formeln sind im Kasten «Chemische Formeln von Schadstoffen» enthalten. In Spezialfällen wie bei Abgasen von Kehrichtverbrennungsanlagen sind auch grössere Konzentrationen an Chlorwasserstoff (HCl) bzw. Salzsäure (in Wasser gelöstes HCl) feststellbar. Kohlendioxid (CO_2), das ebenfalls mit Betonbestandteilen reagieren kann, ist kein Luftschadstoff.

Die in der Schweiz seit einiger Zeit unternommenen Anstrengungen zur Reduktion der Schadstoffemissionen (Schadstoffkonzentrationen an den Quellen) sind nicht ohne

4

Foto: K. Hermann, TFB

Der saure Regen hinterlässt Spuren, auch auf Statuen.

Auswirkungen geblieben. Dies lässt sich anhand der Veränderung der Immissionen (Schadstoffkonzentrationen oder Schadstoffdepositionen am Einwirkungsort) der typischen Luftschadstoffe Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Ozon (O_3) zeigen.

Diese sind in *Tabelle 1* zusammengefasst. Erwartungsgemäss ist die Luftverschmutzung in Städten und Agglomerationen (Basel-Binningen) grösser als in ländlichen Gegenden (Tänikon TG).

Im Ausland werden oft wesentlich grössere Konzentrationen an SO_2 und NO_2 (bzw. NO_x) in der Luft gemessen. So betrug beispielsweise 1991 die mittlere SO_2-Belastung der Stadt Weimar etwa 150 µg/m³ [3]; sie war also rund 10mal höher als bei Basel. Noch höhere Werte (> 500 µg/m³) wurden in Berlin registriert [4]. In Extremfällen sollen sogar bis zu 5000 µg SO_2/m³ (5 mg SO_2/m³) gemessen worden sein [5].

Mechanismen der Schadstoffwirkung

Schwefel- und Stickoxide bzw. die daraus entstehenden starken Säuren können auf verschiedene Arten mit Beton in Berührung kommen [6]:

- Bei der *feuchten Deposition* gelangen in Wassertröpfchen gelöste Gasmoleküle bzw. die daraus gebildeten Säuren in Regen, Nebel oder Schnee auf den Beton (wichtig vor allem auf Hauptbewitterungsseite).

Jahr	SO_2 µg/m³		NO_2 µg/m³		O_3 µg/m³	
	Tänikon	Binningen	Tänikon	Binningen	Tänikon	Binningen
1984	9	31	—	44	—	90
1985	12	36	21	47	140	207
1986	9	33	28	38	140	215
1987	6	16	19	36	137	164
1988	6	17	20	41	144	148
1989	4	18	22	45	156	164
1990	4	14	18	41	170	172
1991	5	13	22	36	159	168
1992	3	11	17	31	152	166
1993	3	9	15	31	151	159
1994	3	7	15	26	176	171
Grenzwerte	30	30	30	30	100	100

Tab. 1 Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftschadstoffe (Nabel): Immissionen (Jahresmittelwerte) von Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Ozon in Binningen-Basel und in Tänikon TG [2].

Versuchsbedingungen	SO_2-Belastung	Ergebnisse
Mörtelprismen aus PZ 35 F (entspricht ungefähr CEM I 42,5) Sulfatisierung nach 7 Tagen Vorlagerung *(Knöfel* und *Böttger* [8])	2x täglich 1,3 g SO_2/m^3, insgesamt 90 Zyklen	Sulfatisierungstiefe etwa 5 mm
Betonwürfel aus PZ 35 F (entspricht ungefähr CEM I 42,5) Sulfatisierung nach 28 Tagen Vorlagerung *(Engelfried* und *Tölle* [7])	dreimonatige Begasung mit Gasgemisch, bestehend aus – 2 Volumenteilen Luft – 1 Volumenteil CO_2 – 0,001 Volumenteil SO_2	Sulfatisierung maximal 1 mm, deutliche Carbonatisierung
Betonplatten aus PZ 35 F (entspricht ungefähr CEM I 42,5) Sulfatisierung nach 59 Tagen Vorlagerung *(Knöfel* und *Böttger* [9])	1x täglich 1,8 g SO_2/m^3 eingeleitet, insgesamt 100 Zyklen	Sulfatisierung in äussersten mm Neubildung von Ettringit und Gips, Festigkeitsverminderung
Mörtelprismen aus PZ 35 F (entspricht ungefähr CEM I 42,5) Sulfatisierung nach 7 Tagen Vorlagerung *(Knöfel* und *Böttger* [9])	2x täglich 1,3 g SO_2/m^3 eingeleitet, insgesamt 90 Zyklen	Sulfatisierung in äussersten mm Neubildung von Ettringit und Gips, Festigkeitsverminderung
Mörtelprismen aus PZ 45 F (entspricht ungefähr CEM I 42,5) Sulfatisierung nach 7 Tagen Vorlagerung *(Scholl* und *Knöfel* [10])	0,7 Vol.-% CO_2 und 0,06 Vol.-% SO_2, während 90 Tagen (r.F. 65%, 20 °C)	Gipsschicht von 0,5 mm Stärke Carbonatisierungstiefe 6 mm

Tab. 2 Laborversuche zur Sulfatisierung von Mörteln und Betonen [3].

- Bei der *trockenen Deposition* werden die Gasmoleküle direkt auf der Betonoberfäche adsorbiert.
- Ein Spezialfall der trockenen Deposition ist die *Aerosoldeposition,* bei der vorwiegend $(NH_4)_2SO_4$ (Ammoniumsulfat) und NH_4NO_3 (Ammoniumnitrat) auf der Bauteiloberfläche abgelagert werden.

Untersuchungen in stark belasteten Gebieten Deutschlands haben ergeben, dass bei Schwefeloxiden die trockene Deposition überwiegt. Dabei ist es theoretisch möglich, dass beispielsweise SO_2 relativ tief in nicht wassergefüllte Poren eindringt. Bei der nassen Deposition ist dagegen mit einer schnellen Reaktion an der Betonoberfläche zu rechnen [6].

Reaktionen von Schwefelverbindungen

Heute wird davon ausgegangen, dass unter den Luftschadstoffen die Schwefelverbindungen die grössten Schäden anrichten. Bei den folgenden Überlegungen müssten deshalb mindestens vier Verbindungen berücksichtigt werden: SO_2, SO_3, H_2SO_3 und H_2SO_4. Vereinfachend wird angenommen, dass bei der trockenen Deposition vor allem das bei der Verbrennung primär entstehende SO_2 eine Rolle spielt, während bei der nassen Deposition H_2SO_4 dominiert, da H_2SO_3 durch Oxidation (beispielsweise durch Staub) leicht in H_2SO_4 umgewandelt wird.

In Beton sind basische Verbindungen wie Calcium-, Kalium- und Natriumhydroxid sowie Calciumcarbonat die wichtigsten Reaktionspartner von Schwefeldioxid und Schwefelsäure. Die entstehenden Sulfate sind entweder gut (Natrium-, Kaliumsulfat) oder nur schwer wasserlöslich (Calciumsulfat, beispielsweise in der Form von Gips, $CaSO_4 \cdot 2\,H_2O$). Damit stehen die Schwefelverbindungen immer in Konkurrenz mit dem CO_2 in der Luft, dessen Konzentration etwa 5000- bis 7000mal höher ist [7].

Der niedrigen Konzentrationen der Luftschadstoffe wegen und selbstverständlich auch aus Zeitgründen werden Laboruntersuchungen mit wesentlich höheren SO_2-Konzentrationen ausgeführt, als dies den tatsächlichen Verhältnissen entsprechen würde. Eine Auswahl von Versuchen ist in *Tabelle 2* zusammengefasst [3]. Daraus lässt sich entnehmen:

- Reaktionen (Sulfatisierungen) finden nur an und unmittelbar unter der Oberfläche (bis maximal 5 mm) statt.
- Wenn CO_2 und SO_2 in ähnlichen Konzentrationsverhältnissen wie in Wirklichkeit gleichzeitig auf die Versuchskörper einwirken, ist die Sulfatisierung deutlich geringer als die Carbonatisierung.

Eindeutigere Ergebnisse sind aus Messungen an Beton von Bauwerken selbst zu erwarten. Davon gibt es allerdings nicht allzu viele. Eine Ausnahme bilden Untersuchungen von etwa 50 Jahre alten Bunkergebäuden mit guter sowie von etwa 20 Jahre alten Gebäuden mit vergleichsweise schlechter Betonqualität [6]. Die Gebäude stehen mehrheitlich in Bereichen mit erhöhter Schadstoffbelastung (Beispiel: Ruhrgebiet). Umfangreiche chemische und physikalische Untersuchungen an Bohrkernen lieferten

unter anderem folgende Resultate:

- In allen Proben wurden in der obersten Betonschicht (0–1 cm) erhöhte Sulfatkonzentrationen festgestellt.
- An der Oberfläche liess sich neugebildeter Gips nachweisen.
- Erhöhte Sulfatgehalte in grösseren Tiefen waren nur bei schlechter Betonqualität und extremer Umweltbelastung feststellbar.
- Das Mikroklima (Nähe der Emittenten, Überbauung in der Nachbarschaft) und die Porosität des Betons üben einen starken Einfluss auf die Sulfatisierung aus.
- Betonoberflächen, die dem Regen stark ausgesetzt sind, weisen geringere Sulfatgehalte auf als Betonoberflächen, die trockener sind (Auswaschen der neugebildeten Calciumsulfate durch den Regen!).
- Oberflächen auf der Wetterseite sanden ab, allerdings nur etwa 2 bis 3 mm nach 50 Jahren.

Alles in allem waren die festgestellten Wirkungen durch Schwefelverbindungen also relativ gering. Analoge Ergebnisse resultierten auch bei Untersuchungen eines 100 Jahre alten Eisenbahntunnels: Hier wurden lediglich in den obersten 2 cm erhöhte Sulfatkonzentrationen gefunden [3].

Reaktionen von Stickstoffverbindungen

Obwohl stickstoffhaltige Luftschadstoffe teilweise in höherer Konzentration als schwefelhaltige Luftschadstoffe vorliegen [1], wurden ihre Wirkungen auf Beton noch weniger untersucht. Dies mag daran liegen, dass die gebildeten Verbindungen, wie Calcium-, Kalium- oder Natriumnitrat, besser wasserlöslich sind als die entsprechenden Sulfate.

Bei Verbrennungsprozessen entsteht neben etwas NO_2 vorwiegend NO, das in der Atmosphäre innert weniger Stunden in NO_2 umgewandelt (oxidiert) wird. Wie bei Schwefelverbindungen kann auch hier zwischen trockener und feuchter Deposition unterschieden werden. Reaktionen in Anwesenheit von Wasser lassen sich mit Salpetersäure (HNO_3) formulieren.

Mögliche Schädigungen durch NO_x bzw. HNO_3 [11] sind:

- Umwandlung von Bestandteilen des Zementsteins und der Porenlösungen, wie Calcium-, Kalium- oder Natriumhydroxid, in Nitrate (lösender Angriff)
- Volumenvergrösserung durch Kristallisation von Nitraten im Porenraum (treibender Angriff, Rissbildung)
- kapillarer Transport bzw. Diffusion von Nitrationen zur Bewehrungsoberfläche (Stahlkorrosion)

Literatur

[1] *Webster, R. P.* und *Kukacka, L. E.*, «Effects of acid deposition on Portland cement concrete», Seiten 239–249 in *Baboian, R.* (ed.), «Materials degradation caused by acidic rain», ACS Symposium Series **318** (1986).

[2] «Immissionswerte 1994», Umwelt-Materialien Nr. 41, herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (1995).

[3] *Müller, A.*, «Einfluss des Luftschadstoffs SO_2 auf Beton», Betonwerk + Fertigteil-Technik **59** [11], 69–73 (1993).

[4] *Mehlmann, M.*, «Wechselwirkung von Putzsystemen mit sauren Luftinhaltstoffen (insbesondere SO_2)», Bautenschutz und Bausanierung **11**, 157–162 (1988).

[5] *Hensel, W.*, «Chemische Reaktionen von Atmosphärilien mit zementgebundenen Baustoffen», Betonwerk + Fertigteil-Technik **51** [11], 714–721 (1985).

[6] *Scholl, E.*, und *Knöfel, D.*, «Der Einfluss von Luftschadstoffen auf Betonbauwerke», Beton **41** [1], 17–21 (1991).

[7] Engelfried, R., und Tölle, A., «Einfluss der Feuchte und des Schwefeldioxidgehalts der Luft auf die Carbonatisation des Betons», Betonwerk + Fertigteil-Technik **51** [11], 722–729 (1985).

[8] *Knöfel, D.*, und *Böttger, K. G.*, «Zum Einfluss SO_2-reicher Atmosphäre auf Zementmörtel», Bautenschutz und Bausanierung **8**, 1–5 (1985).

[9] *Knöfel, D.*, und *Böttger, K. G.*, «Zum Verhalten von zementgebundenen Baustoffen in SO_2-angereicherter Atmosphäre», Betonwerk und Fertigteil-Technik **51** [2], 107–114 (1985).

[10] *Scholl, E.*, und *Knöfel, D.*, «On the effect of SO_2 and CO_2 on cement paste», Cement and Concrete Research **21** [1], 127–135 (1991).

[11] *Knöfel, D.*, und *Scholl, E.*, «Einfluss von NO_2-angereicherter Atmosphäre auf zementgebundene Baustoffe», Betonwerk + Fertigteil-Technik **57** [1], 53–60 (1991).

7

Foto: TFB-Archiv

Korrosions- und andere Schäden am Kamin einer Kehrichtverbrennungsanlage. Ursachen: ungenügende Überdeckung, Carbonisierung, Einwirkung von Salzsäure (Chloriden). Schwefel- und stickstoffhaltige Luftschadstoffe dürften nur am Rande für die Schäden verantwortlich sein.

Untersuchungen mit gegenüber Grossstadtatmosphären 1000fach erhöhter NO_2-Konzentration an Mörtelprismen ergaben folgende Resultate [11]:

- lösender Angriff an der Mörteloberfläche in Gegenwart von Feuchtigkeit durch Bildung von Calciumnitrat
- starkes Absanden der Mörteloberflächen bei regelmässiger Wässerung durch Auslaugung des Calciumnitrats
- Rissbildung und Abplatzungen als Folge von Kristallisation von Calciumnitrat im Porenraum unter trockenen Bedingungen

Putzschäden [4]

Unter den verschiedenen mineralischen Putzsystemen weisen die leichten Zement- bzw. Kalk-Zement-Putzmörtel die grössten Porenvolumen und damit auch die grössten Reaktionsoberflächen auf. Sowohl bei Laborversuchen als auch bei verwitterten Putzen wurden Produkte des Angriffs von Schwefelverbindungen aus der Luft beobachtet:

- Gips (Reaktion von Calciumhydroxid oder -carbonat mit SO_2 bzw. H_2SO_4)
- Ettringit ($C_3A \cdot 3\,CaSO_4 \cdot 31\,H_2O$), der aus Calciumaluminaten (vor allem C_3A) entstehen kann
- Monosulfat $C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 10\,H_2O$), das ebenfalls aus Calciumaluminaten (vor allem C_3A) gebildet werden kann

Allen drei Verbindungen gemeinsam ist, dass ihr Volumen grösser als das Volumen der Ausgangsstoffe ist. Die Folge ist eine Verdichtung des Mörtelgefüges im Oberflächennähe. Da die neugebildeten Phasen ein anderes temperaturabhängiges Ausdehnungsverhalten aufweisen als die Restbindemittelphasen, können Gefügespannungen auftreten.

Das Eindringen der Gase beschränkt sich auf eine Tiefe von 2 bis maximal 5 mm; die alkalischen Porenlösungen unterbinden ihren Transport in grössere Tiefen.

Wie gefährlich sind Luftschadstoffe wirklich?

Wenn an Stahlbetonbauten Schäden durch Luftbestandteile auftreten, dürften diese vor allem eine Folge der Carbonatisierung sein, da das «natürliche» CO_2 in der Luft in einer rund 5000mal höheren Konzentration vorliegt als die Schwefel- und Stickstoffoxide.

Ganz allgemein gilt, dass die Bestimmung der Ursachen von Schäden an Bauwerken nicht einfach ist, denn Luftschadstoffe sind nur ein Teil der auf diese einwirkenden negativen Einflüsse. Eine wichtige Rolle spielt beispielsweise auch das Klima, das sich unter anderem durch Temperaturschwankungen, Befeuchtung und Austrocknung sowie Windbeanspruchung des Betons manifestiert. Und selbst Mikroorganismen können unter Umständen schädlich wirken. Umgekehrt kann gerade der saure Regen einen positiven Einfluss auf die Betonoberfläche ausüben, indem er sie von trocken abgelagerten Verunreinigungen befreit.

Das Fazit aufgrund der spärlichen vorliegenden Untersuchungen lautet: In der Regel kann davon ausgegangen werden, dass Luftschadstoffe keine grosse Gefahr für fachgerecht hergestellten, eingebrachten und nachbehandelten dichten Beton darstellen. Nicht zu vernachlässigen sind Einflüsse der Schwefel- und Stickstoffverbindungen in stark verunreinigter industrieller Umgebung (Kamine). Hier kann ein Schutz der Betonoberfläche, beispielsweise durch organische, verseifungsbeständige Materialien wie Epoxidharze, helfen [5].

Kurt Hermann, TFB