

Wirkung von Luftverunreinigungen auf Kirchtürme der Stadt Erfurt

GERHARD WEISE & HANS-WERNER ZIER, Weimar

1. Einleitung

Im Rahmen der Aufstellung eines Teilkatasters über die Wirkung von Luftverunreinigungen auf Baulichkeiten der Stadt Erfurt im Auftrag der Thüringer Landesanstalt für Umwelt wurden geeignete Natursteinobjekte ausgewählt und untersucht.

Im folgenden sollen einige Ergebnisse dieser Untersuchungen mitgeteilt werden.

2. Auswahl der Untersuchungsstellen

An die zu untersuchenden Stellen sind folgende Anforderungen zu stellen:

- relativ hohe Umweltbelastung bei günstiger Exposition,
 - Materialvielfalt,
 - Zugänglichkeit und Möglichkeit zur Materialentnahme,
 - keine Renovierung bzw. Restaurierung der ausgewählten Gebäude in jüngerer Vergangenheit
- Die Umweltbelastung verstärkt die ohnehin stattfindende natürliche Verwitterung ebenso wie die durch Fehler in Materialauswahl, Bauplanung und Bauausführung bedingten Schäden an Materialien und Bauwerken.

Um eine deutliche Zuordnung der festzustellenden Schäden zu Luftverunreinigungen vornehmen zu können, sind möglichst stark umweltbelastete Punkte für die Untersuchung auszuwählen. Außerdem sind günstige Expositionsverhältnisse erforderlich. Besonders vorteilhaft sind erhöht liegende oder höhere Gebäude, deren Fassaden mindestens die Schornsteinhöhe benachbarter Häuser erreichen und die frei angeströmt werden können.

Aus der Literatur und aus eigenen Untersuchungen ist bekannt, daß Luftschadstoffe von spezifischer materialabhängiger Wirkung sind. Gegenüber Betonen, Klinkern und Natursteinen wie z. B. Graniten und Basalten werden Sedimentgesteine wie Sand- und Kalksteine wesentlich stärker durch Luftschadstoffe angegriffen. Entsprechend hoch ist der Kenntnisstand und die verfügbare Literatur für diese Gesteine. Zur Untersuchung sind deshalb möglichst Standorte mit verschiedenen Sedimentgesteinen auszuwählen.

Von der orographischen Lage her relativ günstig sind Hochlagen innerhalb der Stadt Erfurt wie Domhügel und Petersberg sowie Kirchtürme. Die Bebauung auf dem Petersberg ist in jüngster Zeit restauriert worden oder noch in Restaurierung befindlich. Materialuntersuchungen sind deshalb nicht möglich.

Besonders vorteilhaft für die durchzuführenden Untersuchungen sind Kirchtürme, da sie auf begrenztem Raum und unter verhältnismäßig einheitlichen Bedingungen eine Materialentnahme in Abhängigkeit von der Himmelsrichtung ermöglichen.

Profane Natursteinbauten innerhalb der Stadt (z. B. Rathaus, Gericht, Hauptpost, mittelalterliche Bürgerhäuser, Schulen, Villen und Geschäftshäuser) sind in der Mehrzahl bereits restauriert.

3. Erfassung und Zuordnung von Materialschäden

3.1 Untersuchungen an ausgewählten Kirchtürmen

Für die Materialuntersuchungen wurden die Türme der Gustav-Adolf-Kirche, Thomaskirche und Andreaskirche sowie der Johannesturm ausgewählt, im April 1994 bestiegen, die Natursteine nach ihrem Zustand beurteilt und Materialproben zur Untersuchung entnommen. Tabelle 1 orientiert über Entnahmestellen und Art der Proben.

Proben zur Charakterisierung des Ausgangsgesteins konnten nur aus lockeren bzw. bereits abgelösten Teilen am Johannesturmhelm und am Helm der Andreaskirche genommen werden.

Tabelle 1: Probenverzeichnis

Pr.-Nr.	Entnahmepunkt	Art der Probe
GAK 1	Fenster, E-Seite, Kapitell Mittelsäule	feine schwarze Kristalle auf Sandstein
GAK 2	Fenster, S-Seite, Mittelsäule	ca. 0,5 mm dünne Schale, leicht abzulösen
GAK 3	Fenster, S-Seite, Mittelsäule	Sandstein, schwache Abschal. u. stärkere Abspreng.
GAK 4	Fenster, W-Seite, Mittelsäule (Abb.1)	dünne schwarze Kruste auf Sandstein, z. T. stark abgewittert (Abb. 2)
TK 1	Verbindungsgalerie N-Seite, Tropfkante am S-lichen Türmchen	Kruste auf Schaumkalk, überlagernder Kalk durch Cu-Lösungen grün
TK 2	Verbindungsgalerie N-Seite, Fassade unterhalb S-Dach	z. T. geschwärtzte, ca. 0,1 cm dicke Kruste auf Kalkstein (? Schaumkalk)
TK 3	Verbindungsgalerie N-Seite, wie vor	pockenartige Aufbeulungen auf Schaumkalk
TK 4	Verbindungsgalerie N-Seite, 5. Vierpaß (von S) der Blendarkade	cm-dicke schwarze, stark abblätternde Kruste auf Schaumkalk
TK 5	Verbindungsgalerie N-Seite, N-Türsäule	traubige Kruste auf Kalkstein (? Schaumkalk) (Abb. 4)
TK 6	Kircheingang SW-Seite, N-Säule	traubige Kruste auf Kalkstein (? Schaumkalk)
JT 1	Helm, SW-Seite, 6. Quader von unten	schwarzer, überwiegend fester Belag auf Sandstein
JT 2	Helm, NW-Seite, 6. Quader von unten	schwarzer, überwiegend fester Belag auf Sandstein
JT 3	Helm, NE-Seite, 7. Quader von unten	schwarzer, überwieg. fester Belag auf Sandst. (Abb. 6)
JT 4	Helm, SE-Seite, 6. Quader von unten	schwarzer, dünner fester Belag auf Sandstein
JT 5	Fiale SW-Seite, Helmseite	dünnere weißer Belag auf geschwärtztem Sandstein
JT 6	Galerieausstieg oben, SW-Unterseite	leicht abzulös. blumenkohlart. Kruste auf Sandstein
AK 1	Helm, SE-Seite, 7. Quader von unten	geschwärtzte Sandsteinschale
AK 2	Helm, SE-Seite, 5. Quader von unten	schwarzer fester Belag auf Sandstein
AK 3	Helm, SW-Seite, 5. Quader von unten	schwarzer fester Belag auf Sandstein
AK 4	Helm, NW-Seite, 5. Quader von unten	schwarzer fester Belag auf Sandstein
AK 5	Helm, NE-Seite, 6. Quader von unten	schwarzer fester Belag auf Sandstein
AK 6	Galerieausstieg, Unterseite, NE-Seite	leicht abzulös. blumenkohlart. Kruste auf Sandst. (Abb. 8)

3.1.1 Gustav-Adolf-Kirche (GAK)

Die 1901 eingeweihte Gustav-Adolf-Kirche liegt im südöstlichen Teil Erfurts in exponierter Lage über dem fernbeheizten Neubaugebiet Herrenberg. Sie besteht im unteren Teil aus Kalkstein des Muschelkalks (Schaumkalk, Cycloidesbank) und aus einem gelben, z. T.



Abb. 1: Gustav-Adolf-Kirche, Turmfenster Westseite

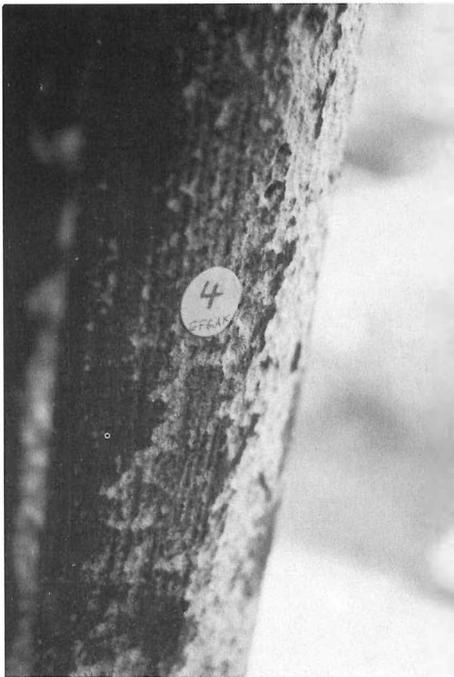


Abb. 2: Gustav-Adolf-Kirche, Turmfenster Westseite, dünne schwarze Kruste (Probe GAK 4)

rotbraune Schlieren bis rostfarbige Bereiche enthaltenden Sandstein (vermutlich Rätsandstein). Die Proben wurden von den zwischen den Turmfenstern der Ost-, Süd- und Westseite (Abb. 1) in ca. 25 m Höhe befindlichen Säulen aus einem gelben Sandstein entnommen. Eine Probenahme an der Nordseite war nicht möglich, da das Fenster nicht geöffnet werden konnte.

3.1.2 Thomaskirche (TK)

Die 1900/02 aus Kalkstein (überwiegend Schaumkalk) erbaute und nach der Teilerstörung 1944 bis 1950 wiederhergestellte Thomaskirche liegt zwischen der eigentlichen Innenstadt und dem Anstieg zum Steigerwald. Unmittelbar benachbart verlaufen die stark befahrenen Bundesstraßen 4 und 7, der Flutgraben und die Eisenbahnstrecke Erfurt-Neudietendorf mit bis 165 Personenzügen täglich. Der Hauptbahnhof Erfurt befindet sich knapp 1 km nordöstlich der Kirche. Bei der Turmbesteigung wurde festgestellt, daß, durch



Abb. 3: Thomaskirche von Norden,
Galerie zwischen den Türmchen

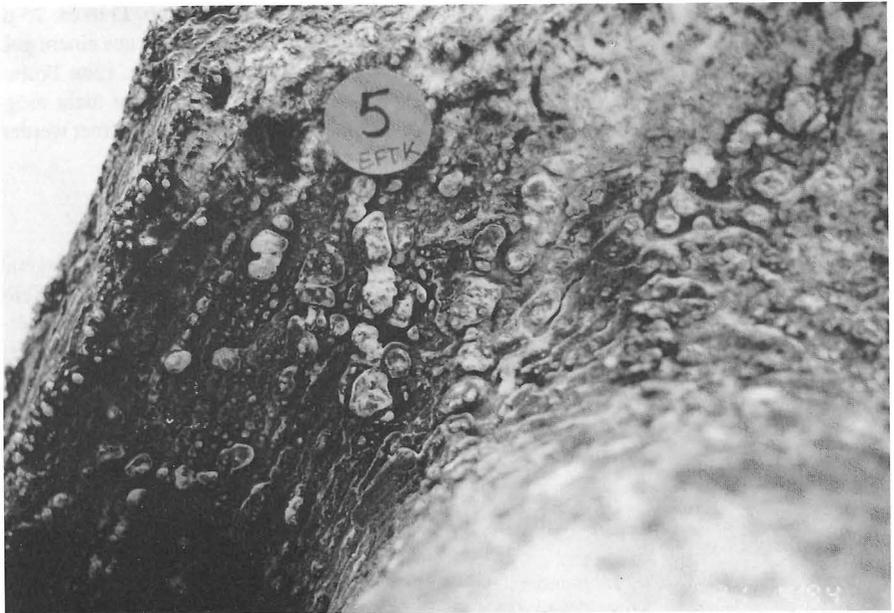


Abb. 4: Thomaskirche, Nordfassade,
Südende der Galerie

die Form des Turmhelmes bedingt, die Kalksteine der Turmgalerie durch Regenwasser abgespült werden und völlig frei von Krusten, Schalen oder oberflächlichen Ablagerungen sind. Eine Probenahme ist damit nicht möglich. Für die Entnahme von Proben kommt nur eine Galerie zwischen den beiden Türmchen an der Nordfassade in Betracht (Abb. 3).

3.1.3 Johannesturm (JT)

Der Turm der ehemaligen Johanneskirche (Abb. 5) befindet sich im nördlichen Teil der Innenstadt ca. 0,2 km westlich und südlich des stark befahrenen Juri-Gagarin-Ringes und je ca. 0,3 km westlich des Flutgrabens bzw. nordöstlich der Gera. Das Mauerwerk des Turms besteht aus lagerhaften Kalksteinen mit Eckquadern aus Sandstein. Helm und Blendarkaden der Maßwerkergalerie in ca. 25 m Höhe sind aus Sandsteinen gefertigt. Der Turm der Johanneskirche wurde unter Einbeziehung eines älteren Baues von 1291 zwischen 1469 und 1486 erbaut. Die ebenfalls 1469/86 erbaute Kirche kam 1819 zum Abbruch, der reparaturbedürftige Turm wurde 1883 wiederhergestellt, Helm und Fialen besserte der Erfurter Bildhauer Herda aus. Petrographisch lassen sich verschiedene Sandsteine unterscheiden. Bei Probe JT 1 handelt es sich um einen grauen Sandstein mit überwiegend zwischen 0,1 und 0,5 mm großen, z. T. undulös auslöschenden Quarzen. Durch Korngrößenwechsel ist eine schwache Schichtung erkennbar. Die Quarze sind z. T. im unmittelbaren Kontak mosaikartig verbunden, teilweise tritt ein sericitisches Bindemittel dazu. Die Feldspäte (überwiegend Mikroklin) sind nur grob verzwillingt und besonders an Korngrenzen und auf Spaltrissen sericitisiert. Akzessorisch ist Biotit vorhanden. Stratigraphisch ist das Gestein in den Buntsandstein einzustufen, wahrscheinlich gehört es zum Chirotheriensandstein.

Die Proben JT 2, JT 3 und JT 4 unterscheiden sich bei vergleichbarem Gefüge von der vorhergehenden Probe durch gröbere Quarze (durchschnittliche Korngröße 0,3 bis 0,8 mm), das Fehlen von Biotit und vor allem durch zahlreiche rostfarbige Partikel bis ca. 2 mm Größe. Durch diese Rostflecken entsteht der für den Chirotheriensandstein typische "Tiger-sandstein". Das Gestein ist mit Sicherheit dem



Abb. 5: Johannesturm von Augustinerstr. (Südwest)



Abb. 6: Johannesturm, Turmhelm Nordostseite, schwarzer Belag (Probe JT 3)

Chirotheriensandstein (Mittlerer Buntsandstein) zuzuordnen. Fialen und der Eingangsbereich der Tür bestehen aus einem gelben Sandstein (Proben JT 5 und JT 6). Er ist sehr feinkörnig, die mittlere Quarzkorngröße liegt zwischen 0,05 und 0,1 mm. Gelegentlich treten braune Maserungen auf. Die Quarze liegen in einem sericitischen Bindemittel, unmittelbarer Kornkontakt ist nur vereinzelt zu beobachten. Feldspäte sind seltener als in den anderen Sandsteinen. Stratigraphisch ist das Gestein dem Rätsandstein (Oberkeuper) zuzuordnen.

3.1.4 Andreaskirche (AK)

Die Andreaskirche (Abb. 7) liegt im nordwestlichen Teil der Innenstadt östlich des Petersberges ca. 0,3 km westlich der Gera und etwa 0,35 km südöstlich der stark befahrenen Straßenkreuzung Moritzwall/Blumenstr./Nordhäuser Str./Andreasstr. in einem Altbaugbiet. Sie ist aus lagerhaften Bruchsteinen (überwiegend Kalksteine des Oberen Muschelkalkes) mit Eckquadern aus Rätsandstein um 1200 erbaut und mehrfach, besonders 1325 und nach einem Brand 1416/18, umgebaut worden. 1633 rissen schwedische Truppen den Helm ab und errichteten eine Batterie auf dem Turm. Noch im 17. Jahrhundert wurden der achtseitige Turmhelm aus Sandsteinen und die Maßwerksbrüstung in ca. 31 m Höhe wiederhergestellt. Ebenso wie beim Johannesturm wurden für den Helm der Andreaskirche verschiedene Sandsteine verwendet. Zu Chirotheriensandstein, Rätsandstein und dem grauen Sandstein (? Chirotheriensandstein) tritt ein roter Sandstein dazu, der wahrscheinlich dem Bausandstein (Mittlerer Buntsandstein) entspricht. Der Sandstein der Probe AK 2 besteht aus überwiegend zwischen 0,2 und 1,0 mm großen, z. T. undulös auslöschenden Quarzen überwiegend in



Abb. 7: Turm der Andreaskirche von Südwesten

Bei den Angaben zum Klima Erfurts (Tabelle 2) wurde auf veröffentlichte Daten von ZINKE (1922) zurückgegriffen. Das Jahresmittel der Windstärke im Zeitraum 1883/1919 betrug 4,7 m/s (Maximum März 5,5 m/s, Minimum Juni und September 4,1 m/s) mit folgenden Schwankungen in den Jahreszeiten: Frühjahr 5,0 m/s, Sommer 4,2 m/s, Herbst 4,4 m/s und Winter 5,1 m/s.

Nach den Beobachtungen von KOCH (1877) und ZINKE (1922) herrschen im langjährigen Mittel Winde aus südwestlicher Richtung vor.

direktem Kornkontakt (Abb. 9), vereinzelt treten graphophyrische Verwachsungen zwischen Quarz und Feldspat (überwiegend Mikroklin) auf. Die Feldspäte sind besonders auf Spalt- rissen sericitisiert. Akzessorisch enthält das Gestein Biotit. Stratigraphisch handelt es sich wahrscheinlich um Chirotheriensandstein.

4. Korrelation Materialschäden- Luftverunreinigungen

4.1 Klimadaten

Erfurt liegt am Südrand des Thüringer Beckens am Durchbruch der Gera durch den Höhenzug Alacher Höhen-Steiger in einer von der Gera und ihren Abzweigungen (Flutgraben, Bergstrom, Schmale Gera) durchflossenen Talauen, die sich nach Norden zu ausweitend. Der Stadtkern liegt ca. 200 m hoch. Die überwiegend landwirtschaftlich genutzten Alacher Höhen (330 m) sind unbewaldet. Ihre Ausläufer Schwedenschanze (275 m) und Cyriaksburg (250 m) erreichen die Stadt. Die Alacher Höhen bieten Schutz nach Nordwesten und z. T. nach Westen.

Der Steigerwald (304 m) und seine südöstliche Fortsetzung Willrodaer Forst (405 m) sind teilweise bewaldet und schützen die Stadt nach Süden.

Im Osten und im Norden erstreckt sich ein flachwelliges, bebautes oder landwirtschaftlich genutztes Gelände mit einzelnen Erhebungen wie Herrenberg (266 m), Ringelberg (226 m), Katzenberge (230 m), Schwabenberg (234 m) und Roter Berg (234 m). Der ca. 17 km östlich des Stadtzentrums gelegene Ettersberg (476 m) wirkt ebenfalls schützend auf die Stadt.



Abb. 8: Andreaskirchturm, Galerieausstieg Nordostseite, blumenkohlartige Kruste (Probe AK 6)

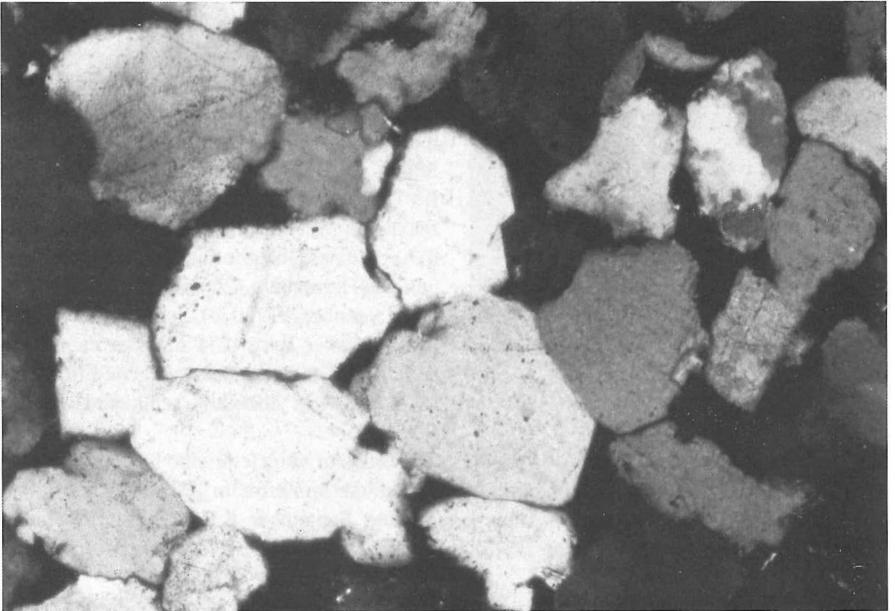


Abb. 9: Sandstein Andreaskirchturm, Probe AK 2, gekr. Pol., ca. 50fache Vergrößerung

Tabelle 2: Klimadaten Erfurt (ZINKE 1922), Windrichtungen nach Zinke umgerechnet
 Häufigkeit der Windrichtungen in % (1883 - 1919), rLF = relative Luftfeuchtigkeit (1883 - 1919),
 LT = Lufttemperatur (1848 - 1919), Nebeltage (1883 - 1919) und N = Niederschlagshöhe (1848 - 1919)

Monat	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	rLF %	LT (°C)	Nebel- tage	N (mm)
I	8,9	11,0	4,8	1,6	12,2	47,0	10,2	4,3	85	-1,74	7,7	26,2
II	8,8	11,6	5,4	2,3	12,2	43,0	11,1	5,6	83	-0,01	7,6	26,3
III	9,5	13,2	5,2	2,3	12,0	39,6	11,1	7,0	78	2,68	9,0	33,0
IV	10,4	15,7	7,9	3,4	10,1	32,2	11,5	8,8	72	7,53	5,0	39,7
V	12,8	17,4	7,4	3,0	9,1	28,6	12,4	9,2	70	12,24	3,5	53,0
VI	11,7	12,7	6,4	2,5	8,6	32,0	14,6	11,4	71	15,69	2,8	66,5
VII	8,1	7,6	3,8	1,8	10,1	41,8	16,5	10,3	74	17,11	3,4	72,7
VIII	6,2	7,0	3,7	1,6	11,0	47,7	14,9	7,8	74	16,48	4,1	55,4
IX	8,7	10,4	5,0	1,8	9,6	46,3	11,9	6,3	78	13,15	10,9	41,6
X	8,2	12,4	5,0	2,3	13,6	44,9	9,2	4,5	82	8,16	13,1	43,8
XI	8,2	12,2	5,9	2,3	15,2	43,4	8,7	4,2	83	2,84	11,5	36,6
XII	6,7	9,9	4,5	2,2	14,9	48,0	9,8	4,0	86	-0,10	7,7	31,4
Jahr	8,9	11,8	5,5	2,4	11,5	41,1	11,9	7,0	78	7,83	86,3	526,2

Großräumig ist das Gebiet um Erfurt charakterisiert durch relativ geringe Niederschläge und erhöhte mittlere Temperaturen infolge der leeseitigen Lage zum südwestlich vorgelagerten Thüringer Wald.

Das Stadtklima von Erfurt wird sowohl durch die orographische Lage als auch durch eine Vielzahl anthropogener Einflüsse bestimmt, welche Strahlungs- und Temperaturhaushalt sowie Wind- und Niederschlagsverhältnisse beeinflussen.

So ist die Frostperiode in der "Wärmeinsel" Erfurt kürzer als in der höher gelegenen und weniger belasteten Umgebung, und die Anzahl von Frost- und Eistagen ist geringer. Im Zeitraum 1887/1919 wurden in Erfurt 107,0 Frosttage und 29,5 Eistage pro Jahr registriert (ZINKE 1922). Von 1848 bis 1919 entfielen in der Stadt Erfurt 30,7 Tage pro Jahr auf Schneetage, in Hochheim dagegen 1883/1919 43,0 Tage pro Jahr. Im gleichen Zeitraum war die Wintertemperatur in Hochheim fast 1°C niedriger und im Jahresdurchschnitt 0,5°C niedriger als in der Stadt. Im Vergleich zum ländlichen Umland treten in der bodennahen Luftschicht durch anthropogene Wärmequellen und den Treibhauseffekt höhere Mitteltemperaturen auf, jedoch wird auch die Luftfeuchte erhöht und die direkte Sonneneinstrahlung durch Dunstbildung vermindert. Durch vermehrte Wolkenbildung aus Kondensationskeimen ist die Niederschlagshöhe größer als im Umland.

Die Erfurt umgebenden Höhen unterstützen die Bildung lokaler Windsysteme mit Düsen- und Verwirbelungseffekten in bebauten Gebieten. Im westlichen Teil der Stadt sind häufiger ausbildende Wirbel werden nach Beobachtungen von KOCH (1877) durch hohe Gebäude wesentlich in ihrer Ausbreitung gehindert.

Infolge der unterschiedlichen infrastrukturellen Gegebenheiten (Bebauung, Industrie, Verkehr) hat Erfurt wie jede größere Stadt ein spezielles Klima. Innerhalb der Stadt Erfurt ist eine Vielzahl von räumlich eng begrenzten Mikroklimaten ausgebildet durch Einflüsse der Bebauung, des Verkehrs, der Grünflächen und Parkanlagen sowie von Wasserflächen. Die zahlrei-

chen Geraarme und die offenen Wasserflächen der Kiesgewinnung im Norden und Nordosten der Stadt beeinflussen das Stadtklima wesentlich. So ist die von ZINKE (1922) für die Stadt angegebene Zahl von 11,5 Nebeltagen im November im langjährigen Mittel wesentlich höher als die Beobachtung von durchschnittlich 4 Nebeltagen im November der Jahre 1929/1933 (BIELICH 1934) für den Flughafen Erfurt.

Die Lage des Stadtkerns im Geratal begünstigt die Ausbildung eines Kaltluftsees, der bei austauscharmen schwachwindigen Wetterlagen über Tage hinweg Bestand haben kann und zu einer erheblichen Anreicherung von Luftschadstoffen führt. IGNATZI (1990) gibt für die Heizperiode der Jahre 1981 bis 1989 eine Staubniederschlagsbelastung zwischen 11,8 und 16,5 g/m²·30 d sowie eine SO₂-Belastung zwischen 0,22 und 0,80 mg/m³ an. Der Jahresmittelwert der Schwefeldioxidbelastung betrug im gleichen Zeitraum 296 µg/m³. In der Heizperiode 1989 wurden im Zentrum Erfurts 90 µg/m³ Stickoxide gemessen (IGNATZI 1990).

Unter Verwendung der Angaben von GRIMM (1990) kann für die Jahre 1980 bis 1989 eine Emission von ca. 150 000 t Staub und ca. 350 000 t Schwefeldioxid für den Stadtkreis Erfurt angenommen werden.

4.2 Luftbedingte Materialschäden

An nahezu allen Teilen von Fassadenflächen laufen die Niederschlagswässer zum großen Teil unmittelbar nach Auftreffen auf den vertikalen Flächen ab. Die ins Gestein eindringende Feuchtigkeit transportiert an der Oberfläche abgesetzte bzw. abgelagerte Substanzen in das Gesteinsinnere und wird zumeist nach kurzer Zeit wieder an die Luft abgegeben, wobei es zu typischen Schäden wie Salzverwitterung und Krustenbildung durch das Neuausscheiden der transportierten Substanzen kommen kann.

Die Natursteine der ausgewählten Kirchtürme sind durch Staub bzw. andere Absätze dunkel bis schwarz gefärbt. Nur an stark oder häufig beregneten Quadern ist die ursprüngliche Gesteinsfarbe sichtbar. Die Verschmutzung der Quaderoberflächen besteht z. T. auch aus Krusten. Dazu treten vereinzelt Ausblühungen von Salzen. Für die Sandsteine der Turmhelme sind ein dünner schwarzer, fest haftender Belag auf der Gesteinsoberfläche und ein Abschalen des Sandsteins charakteristisch. Ein Vergleich der unmittelbaren schwarzen Oberfläche der Probe JT 1.1 mit dem Probematerial aus ca. 1 cm Tiefe mittels DTA (Tabelle 3) ergibt, daß bereits in 1 cm Tiefe der Gipsgehalt stark reduziert ist. Mittels DTA läßt sich an der Oberfläche auch Calcit nachweisen. Dagegen ist der Gehalt an organischer Substanz relativ gering und vermutlich durch Ruß ohne zusätzliche biogene Beteiligung zu erklären. Im Gegensatz dazu beschreibt MÖSER (1993) vergleichbare schwarze Filme auf Sandsteinen des Erfurter Domes, die eisenreiche Flugascheteilchen in einer organischen Schleimschicht enthalten, aber nahezu gipsfrei sind. Ähnliche dauerfeuchte Schleimschichten, die sowohl Mikroben als Lebensraum dienen als auch feste, flüssige und gasförmige Umweltschadstoffe fixieren, wurden durch BLASCHKE (1989) vorwiegend auf Kalksteinen beobachtet.

Der gesamte Gipsgehalt aller Proben kann nicht aus der normalen Gesteinsverwitterung abgeleitet werden, da die Ausgangsgesteine praktisch schwefelfrei sind. Der Gips ist aus luftgetragenen Schwefeloxiden und Sulfaten entstanden, die gasförmig oder als Aerosol deponiert wurden. Durch nasse (Regen, Schnee) und besonders durch feuchte Deposition (Nebel, Reif) können relativ große Schwefel- und Stickstoffoxidgehalte auf die Natursteinoberflächen transportiert werden. Einen Überblick zur Deposition atmosphärischer Schadstoffe auf der Oberfläche von Natursteinen gibt DANNECKER (1989).

Tabelle 3: Vergleich Probenoberfläche mit Material aus ca. 1 cm Tiefe (Probe JT 1.1, M.-%), DTA

	Probenoberfläche	Probeninneres (ca. 1 cm)
Gips	5,2	1,4
organische Bestandteile	1,2	0,5
Calcit	1,6	0,5

Die an den untersuchten Kirchtürmen beobachteten Verwitterungserscheinungen sind überwiegend nicht auf die normale Gesteinsverwitterung zurückzuführen, sondern durch anthropogene Ursachen bedingt oder verstärkt.

Bei der visuellen Bemusterung der Türme wurden in Abhängigkeit von der Himmelsrichtung aus interessant erscheinenden Bereichen Proben entnommen (Tabelle 1) und analysiert.

Die Ergebnisse der chemischen Analysen sind in den Tabellen 4 bis 7 (wasserlösliche Bestandteile) und 8 bis 11 (HCl-lösliche Bestandteile) enthalten. Eine Übersicht geben die Abbildungen 10 bis 13. Die HCl-löslichen Anteile wurden aus dem wasserlöslichen Rückstand bestimmt.

Alle untersuchten Proben sind phosphatfrei. Die Chloridgehalte liegen in allen Proben unter 0,1 M.-%. Nitratgehalte lassen sich an allen untersuchten Objekten nachweisen, so in Einzelproben der Gustav-Adolf-Kirche und des Johannesturms, in der Mehrzahl der Proben der Thomaskirche und in allen Proben der Andreaskirche.

Von den wasserlöslichen Kationen ist Magnesium nur in geschützten Bereichen von Thomaskirche und Johannesturm nachweisbar. Die Turmhelme sind frei von wasserlöslichem Magnesium und Natrium, Kalium läßt sich am Johannesturmhelm und in einer Probe des Helms der Andreaskirche belegen. Ammonium fehlt in den Proben der Andreaskirche, ist jedoch in allen Proben von Gustav-Adolf- und Thomaskirche sowie des Johannesturms enthalten.

Tabelle 12 enthält eine Umrechnung der analysierten Proben auf den Gesamtgehalt an Gips und Calcit. Daraus wird deutlich, daß der schwarze Belag der Turmhelme im wesentlich aus

Tabelle 4: Wasserlösliche Bestandteile Gustav-Adolf-Kirche und Thomaskirche (M.-%)

Pr.-Nr.	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
GAK 1	13,29	*	0,01	0,01	0,22	0,06	*	27,24
GAK 2	1,41	*	0,45	0,52	0,09	*	0,18	8,65
GAK 3	*	*	0,01	0,02	0,03	0,02	*	*
GAK 4	0,40	*	0,12	0,16	0,05	*	*	4,19
TK 1.1	4,54	*	0,01	0,03	0,02	0,03	*	11,15
TK 1.2	12,77	*	*	*	0,04	0,04	*	5,83
TK 2.1	2,06	0,38	0,07	0,02	0,01	0,005	*	4,97
TK 3.1	1,64	*	0,04	0,01	0,01	*	*	4,23
TK 3.2	1,55	*	0,04	0,01	0,01	*	0,01	3,80
TK 4	1,51	*	0,04	0,04	0,01	0,06	0,37	3,51
TK 5.1	3,25	*	0,02	0,02	0,01	0,004	0,05	8,12
TK 5.2	6,33	0,16	0,03	0,01	0,02	0,01	*	15,35
TK 6.1	1,82	*	0,03	0,03	0,03	0,02	0,15	4,72
TK 6.2	1,86	*	0,05	0,02	0,01	0,004	0,04	4,61

* nicht nachweisbar

Tabelle 5: Wasserlösliche Bestandteile Johannesturm und Andreaskirche (M.-%)

Pr.-Nr.	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
JT 1.1	0,02	*	*	0,02	0,01	0,01	0,02	0,63
JT 2.1	0,02	*	*	0,02	0,02	0,02	*	0,57
JT 3.1	0,10	*	*	0,02	0,02	0,007	*	0,39
JT 4.1	0,13	*	*	0,02	0,02	0,009	*	0,45
JT 5	4,24	0,14	0,01	0,06	0,04	0,007	0,12	10,66
JT 6	4,40	0,06	*	0,02	0,04	0,007	0,14	10,63
AK 1.1	0,13	*	*	*	*	*	0,03	0,97
AK 2.1	0,12	*	*	*	*	0,02	0,09	0,75
AK 3.1	0,13	*	*	0,01	*	0,005	0,05	0,74
AK 4.1	0,15	*	*	*	*	0,01	0,10	0,67
AK 5.1	0,14	*	*	*	*	0,005	0,08	0,49
AK 6	4,58	*	*	0,06	*	0,04	0,42	11,15

* nicht nachweisbar

Quarz des Sandsteins besteht. Calcit ist praktisch nur in den auf Kalkstein befindlichen Proben der Thomaskirche vorhanden.

Sehr hohe Gipsgehalte sind an die aus wettergeschützten Bereichen genommenen Proben von Gustav-Adolf-Kirche, Johannesturm, Andreaskirche und besonders der Thomaskirche gebunden. Bleiben diese hohen Gehalte aus geschützten Bereichen unberücksichtigt, und werden die

Tabelle 6: HCl-lösliche Bestandteile Gustav-Adolf-Kirche und Thomaskirche (M.-%)

Pr.-Nr.	unlös. Rückstände	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₄ ²⁻
GAK 1	39,24	3,13	*	0,89	2,98	*	22,70
GAK 2	94,59	0,71	*	0,12	0,90	*	*
GAK 3	97,83	0,34	*	0,24	0,85	*	*
GAK 4	96,05	0,40	*	0,13	1,01	*	*
TK 1.1	5,00	18,97	*	0,12	0,13	*	34,33
TK 1.2	5,51	17,37	*	0,08	3,90	*	19,71
TK 2.1	4,88	25,46	0,08	0,25	0,35	0,27	23,01
TK 3.1	4,21	28,11	0,11	0,13	0,41	0,09	17,23
TK 3.2	2,93	30,60	0,05	0,13	0,62	0,08	14,38
TK 4	19,21	20,70	0,08	0,16	0,52	0,20	8,61
TK 5.1	7,05	19,27	*	0,28	0,31	0,24	32,72
TK 5.2	3,40	22,98	*	0,11	0,49	*	13,23
TK 6.1	37,97	9,32	*	0,08	0,29	0,18	22,97
TK 6.2	13,17	18,78	0,06	0,22	0,46	0,10	26,80

* nicht nachweisbar

Tabelle 7: HCl-lösliche Bestandteile Johannesturm und Andreaskirche (M.-%)

Pr.-Nr.	unlös. Rückstände	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₄ ²⁻
JT 1.1	96,79	0,10	*	0,47	0,20	0,04	0,49
JT 2.1	96,54	0,14	*	0,77	0,24	0,05	0,76
JT 3.1	96,57	0,10	0,04	1,03	0,25	0,04	0,45
JT 4.1	96,58	0,31	*	0,36	0,16	0,21	0,74
JT 5	77,22	0,39	*	0,40	0,17	0,11	0,95
JT 6	32,05	10,63	0,04	0,42	0,37	0,04	26,21
AK 1.1	96,49	0,25	*	0,07	*	0,25	*
AK 2.1	95,51	0,12	*	0,05	0,15	*	*
AK 3.1	96,82	0,06	*	0,04	0,16	*	*
AK 4.1	95,73	0,08	*	0,10	0,29	0,15	*
AK 5.1	97,10	0,07	*	0,13	0,17	*	*
AK 6	27,81	10,96	*	0,09	0,51	0,13	27,14

* nicht nachweisbar

einzelnen Objekte bis auf die durch den Materialunterschied nicht vergleichbare Thomaskirche zusammengefaßt, kann mit aller gebotenen Vorsicht folgende Tendenz abgeleitet werden (Tabelle 13): Alkalien, Ammonium, Gips und HCl-lösliches Aluminiumoxid nehmen von der Andreaskirche über den Johannesturm zur Gustav-Adolf Kirche zu, obwohl die "Expositionsdauer" in gleicher Richtung abnimmt. Eine mögliche Deutung dieser Tendenz ist eine richtungsabhängige Zunahme von Gips und den Alkalien einschließlich Ammonium von Nordwest nach Südost. Dabei ist jedoch die begrenzte Probenanzahl ebenso zu berücksichtigen wie der geringe Anteil von nordwestlichen und nördlichen Winden, der zudem zumeist auf die Monate April bis Juli bzw. Juni entfällt.

Bezüglich des Einflusses der Himmelsrichtung sind nur Johannesturm und Andreaskirche direkt vergleichbar. Eindeutige Abhängigkeiten lassen sich bei den Proben aus ungeschützten Bereichen nicht belegen, am deutlichsten sind die geringsten Gipsgehalte an die Nordost-richtung gebunden. Ebenso verhält es sich mit den Nitratgehalten. In der Tendenz sind erhöhte Chloridgehalte sowie die höchsten Al₂O₃-Gehalte an die Nordwestrichtung gebunden, die höchsten SiO₂-Gehalte an die Nordost-richtung und die höchsten Gehalte an Fe₂O₃ an die Südost-richtung. STOFFREGEN (1991) gibt für den Herbst 1990 bei vorwiegend westlichen Winden folgende relativ hohe 4-Wochen-Mittelwerte der Konzentration von Luftschadstoffen für eine Meßstelle am Erfurter Dom von 138,6 µg/m³ Staub, 177,4 µg/m³ SO₂, 6,74 µg/m³ NH₄⁺, 9,55 µg/m³ SO₄²⁻ und 2,42 µg/m³ Cl⁻ an. Für sichere Aussagen ist jedoch die Anzahl der untersuchten Proben zu gering.

In einigen Proben der Thomaskirche konnte röntgendiffraktometrisch Quarz und ein nicht näher identifizierbarer Feldspat nachgewiesen werden. Beide Minerale lassen sich nicht aus dem Kalkstein ableiten, sondern sind entweder aus dem Mörtel ausgewaschen und auf der Natursteinoberfläche abgesetzt oder sie stellen Bestandteile des aufgewehten Staubes dar. HCl-lösliches Al₂O₃ und SiO₂ müssen ebenfalls aus dem Schwebstaub abgeleitet werden und belegen damit die Bedeutung des Staubes als Materiallieferant.

Tabelle 8: Umrechnung der chemischen Analysen (M.-%)

Probe-Nr.	Gips	Calcit	HCl-unlös. Rückstände	HCl-lösl. Rest	Cl ⁻ NO ²⁻
GAK 1	71,6*	0,0	24,1*	3,9	0,07
GAK 2	6,8*	0,0	94,6	1,1	0,19
GAK 3	0,0	0,0	97,8	1,1	0,03
GAK 4	3,9*	0,0	96,1	1,2	0,01
TK 1.1	81,5	11,3	5,0	0,3	0,04
TK 1.2	45,8	48,7	5,5	4,7	0,05
TK 2.1	50,2	39,6	4,9	0,9	0,01
TK 3.1	38,5	51,9	4,2	0,7	0,01
TK 3.2	32,6	61,4	2,9	0,9	0,01
TK 4	21,7	42,8	19,2	1,0	0,43
TK 5.1	73,2	13,7	7,1	0,7	0,06
TK 5.2	51,2	43,4	3,4	0,6	0,02
TK 6.1	49,6	0,0	37,9	0,7	0,17
TK 6.2	56,3	18,8	13,2	0,8	0,04
JT 1.1	2,0	0,0	96,8	0,7	0,03
JT 2.1	2,4	0,0	96,5	1,1	0,02
JT 3.1	1,5	0,1	96,6	1,4	0,01
JT 4.1	2,1	0,0	96,6	0,7	0,01
JT 5	20,8	0,0	77,2	0,7	0,13
JT 6	66,0	0,0	32,1	0,9	0,15
AK 1.1	1,7	0,0	96,5	0,3	0,03
AK 2.1	1,3	0,0	95,5	0,2	0,11
AK 3.1	1,3	0,0	96,8	0,2	0,06
AK 4.1	1,2	0,0	95,7	0,5	0,11
AK 5.1	0,9	0,0	97,1	0,3	0,09
AK 6	68,6	0,0	27,8	0,7	0,46

* Ergebnisse geringfügig korrigiert infolge geringer Probenmenge

Tabelle 9: Zusammenfassung der Untersuchungsobjekte (Mittelwerte, M.-%)

Probe-Nr.	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Gips*	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
AK 1 bis AK 5	0	0	0	0,008	0,07	1,6	0,15	0,08
JT 1 bis JT 4	0	0,02	0,02	0,01	0,005	2,0	0,21	0,09
GAK 2 bis GAK 4	0,19	0,23	0,056	0,007	0,06***	3,6	0,92	0
TK 1 bis TK 6	0,03	0,02	0,017	0,017	0,06	50,0	0,75	0,11

* berechnet ** nicht gesichert

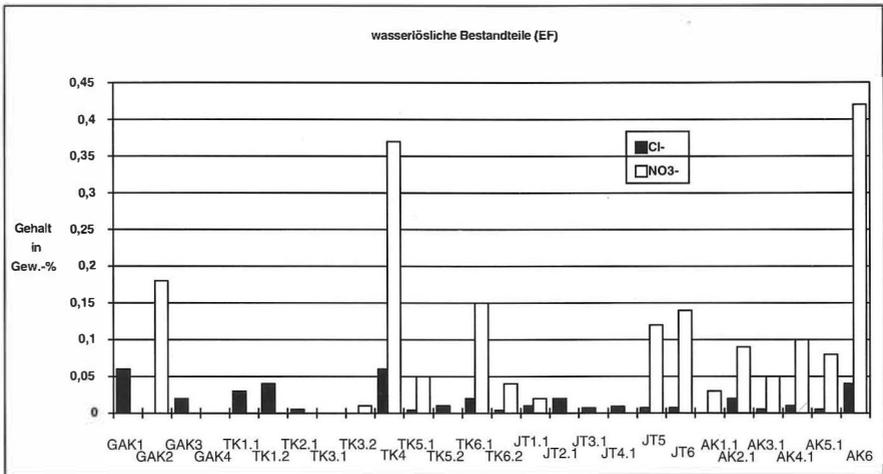


Abb. 10: Chlorid- und Nitratgehalte in den wasserlöslichen Auszügen

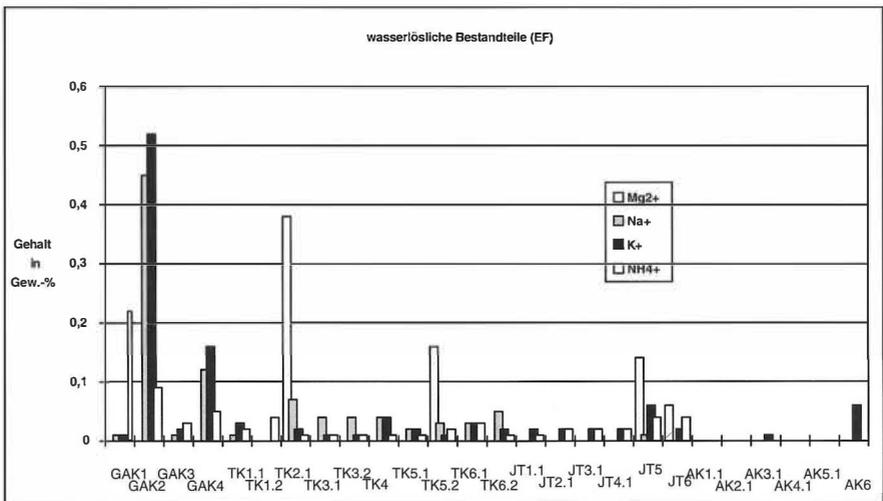


Abb. 11: Gehalte an Magnesium, Natrium, Kalium und Ammonium in den wasserlöslichen Auszügen

Dünnschliffproben der Sandsteine von Johannesturm und dem Turm der Andreaskirche zeigen im Oberflächenbereich eine Gefügauflockerung durch eine Einlagerung von hydroxidischen Eisenmineralen entlang der Korngrenzen der Quarze (Abb. 14), welche zu dem genannten schwarzen Belag führt. Das durch normale Verwitterung des sericitischen Bindemittels bedingte Absanden der Sandsteine wird dadurch wesentlich verstärkt. Vermut-

lich ist das Eisen überwiegend aus Aschepartikeln mobilisiert worden. Ähnliche dünne eisenreiche "Krusten" konnten BUTT (1983) und KATZSCHMANN (1989) vor allem auf Rätsandsteinen beobachten.

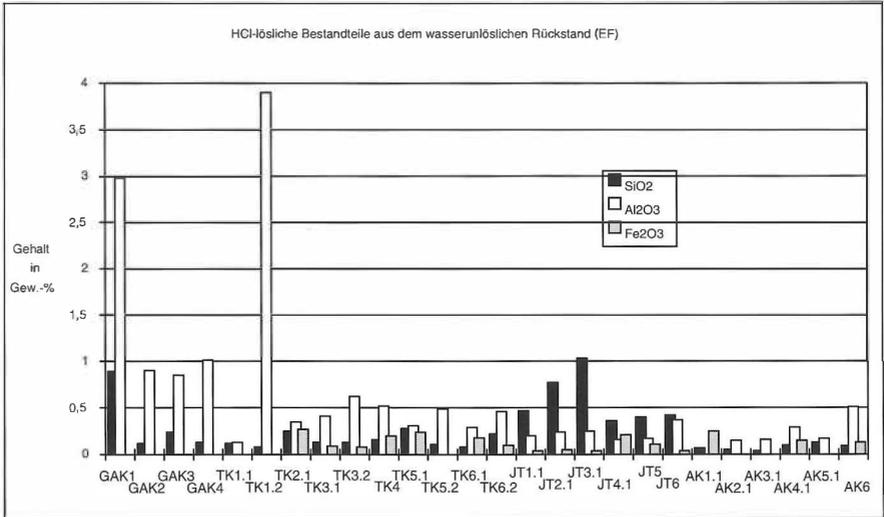


Abb. 12: Gehalte an SiO₂, Al₂O₃ und Fe₂O₃ in den HCl-löslichen Bestandteilen der Proben

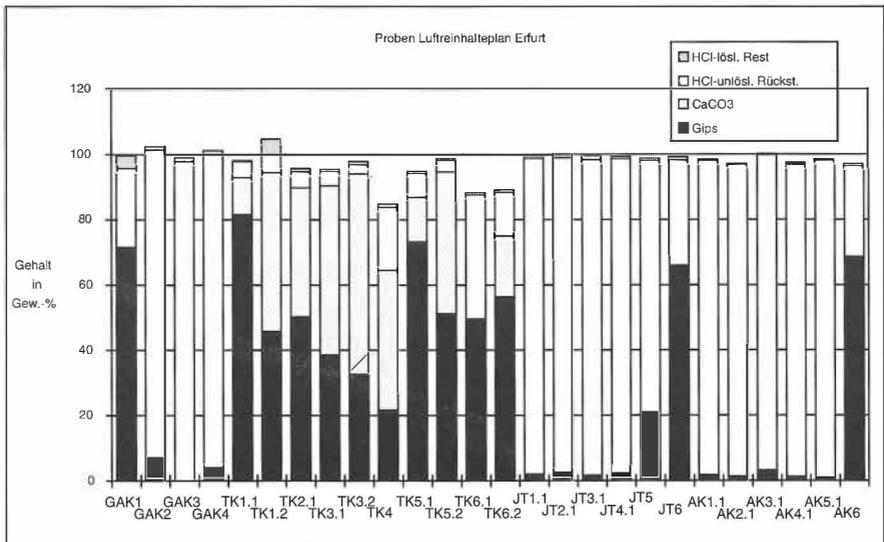


Abb. 13: Probenbestandteile aus den Ergebnissen der chemischen Untersuchungen bestimmt

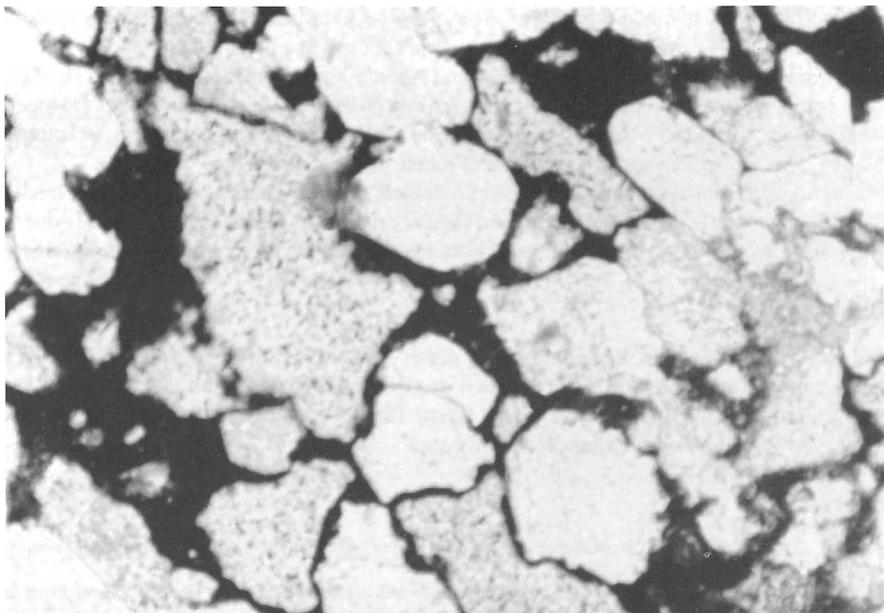


Abb. 14: Sandstein Andreaskirchturm, Probe AK 10, ungekr. Pol., ca. 50fache Vergrößerung

5. Ergebnisse

Die Kirchtürme der Gustav-Adolf Kirche und der Andreaskirche sowie Johannesturm und die Nordfassade der Thomaskirche wurden mittels chemischer Analysen und Gesteinsdünn-schliffen auf Schadwirkungen durch anthropogene Luftschadstoffe untersucht.

An allen untersuchten Kirchtürmen konnten Erscheinungen beobachtet werden, die nicht oder nicht nur auf die normale Gesteinsverwitterung zurückgeführt werden können, sondern durch anthropogene Ursachen bedingt oder zumindest verstärkt sind.

Auf dem Kalkstein der Nordfassade der Thomaskirche und in witterungsgeschützten Bereichen der drei anderen untersuchten Kirchen konnten Krusten bzw. Absätze gefunden werden, die überwiegend aus Gips bestehen. In ungeschützten Bereichen der Bauwerke wird der Gips überwiegend wieder gelöst und im unteren geschützten Bereich abgesetzt. Die Oberfläche der Turmhelme von Johannesturm und Andreaskirche enthält nur Gipsgehalte zwischen ca. 1 und ca. 2 Gew.-%. Für diese Helme ist ein dünner schwarzer, fest haftender Belag charakteristisch. Dieser Belag läßt sich auch mikroskopisch als dichter bis amorph, z. T. eisenhaltiger dünner Saum um die Quarzkörner des Sandsteins feststellen, welcher zu einer Gefügelockerung und zum Absanden des Sandsteins führt.

Blieben die Krusten aus den wettergeschützten Bereichen und die aus Kalkstein bestehende Thomaskirche unberücksichtigt, läßt sich für die übrigen untersuchten Sandsteinkirchtürme möglicherweise die Tendenz ableiten, daß Alkalien, Ammonium und Gips sowie HCl-lösliches Aluminiumoxid als Beleg für die Beteiligung von Staub von der Andreaskirche im

Nordwesten über den Johannesturm zur Gustav-Adolf-Kirche im Südosten zunehmen, obwohl Baualter und Hauptwindrichtung nicht mit dieser Tendenz übereinstimmen.

Beim direkten Vergleich von Johannesturm und Andreaskirche finden sich ebenfalls Hinweise, die auf einen Transport von Luftschadstoffen von Nordwest nach Südost deuten. Dagegen scheint in der Tendenz die Nordostseite der Türme relativ geringer belastet zu sein. Bei diesen Aussagen ist jedoch die geringe Anzahl an Proben zu berücksichtigen.

Aus den Untersuchungen kann der generelle Schluß gezogen werden, daß z. T. erhebliche Einwirkungen von Luftschadstoffen auf die Gebäudesubstanz nachweisbar sind, jedoch durch die Vielzahl von einwirkenden Einflüssen bisher kaum Vergleiche angestellt werden können.

Dank

Für die Genehmigung zur Veröffentlichung dieser Ergebnisse sei Herrn Anding, Thüringer Landesanstalt für Umwelt in Jena, herzlich gedankt. Besonderer Dank gilt weiterhin den Pfarrämtern der Kirchen und vor allem Herrn Richter von der Außenstelle Erfurt des Kirchlichen Bauamtes der Evangelischen Kirche.

Literatur

- BIELICH, F. (1934): Sicht und Nebelverhältnisse des Flughafens Erfurt.- Erfahrungsber. deutsch. Flugwetterdienstes, 8. Folge, Nr. 29, S.209-212.
- BLASCHKE, R. (1989): Schleimbildende Mikroorganismen und nitrifizierende Bakterien als Helfer der Gipsbildung in Naturstein.- Bautenschutz - Bausanierung, Sonderausg., S. 38-41.
- BUTT, P.(1983): Steinrestaurierungen an den Außenflächen des Erfurter Domes.- Sitzung AK "Naturwiss. Forsch. an Kunstgütern aus Stein", Hannover, S. 134-144.
- DANNECKER, W. (1989): Depositionsprozesse atmosphärischer Schadstoffe auf Oberflächen von Werksteinen.- VDI-Ber. Nr. 721, S. 237-264.
- GRIMM, C.(1990): Analyse der Situation auf dem Gebiet der Luftemission im Bezirk Erfurt.- Bezirksverwaltungsbehörde Erfurt.
- IGNATZI, E. (1990): Bericht zur Immissionsüberwachung der Luftschadstoffe im Zeitraum 1980-1989.- Bezirksverwaltungsbehörde Erfurt.
- KATZSCHMANN, L.(1989): Vorkommen, Verwitterung und Beständigkeit von Naturwerkstein in innerstädtischen Bereichen der Kreisstädte des Bezirkes Erfurt.- HAB Dissert. H. 17, Weimar, 160 S.
- KOCH (1877): Resultate 28jähriger Witterungs-Beobachtungen in Erfurt.- Jahrbücher Kgl. Akad. gemeinnütz. Wissensch. Erfurt, N.F., H. IX.
- MÖSER, B. (1993): REM- und EDS-Untersuchungen an mit Filmen bedeckten Gesteinsoberflächen.-Wiss. Z. Hochsch. Archit. Bauw. -A/B-Weimar 39, 3, S. 125-131.
- STOFFREGEN, J. (1991): Charakterisierung der Immissionssituationen von Kulturbauten und Gesteinsprüfkörpern in verschiedenen Orten Deutschlands mit Hilfe mobiler und stationärer Meßstationen.- Schriftenr. Angew. Analytik Nr. 13.
- ZINKE, H. (1922): Das Klima von Erfurt.- Diss. Univ. Marburg.

Anschrift der Verfasser:

Dr. Gerhard Weise & Dr. Hans-Werner Zier
Materialforschungs- und -prüfanstalt an der HAB Weimar
Amalienstr. 13
D-99423 Weimar

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Veröffentlichungen des Naturkundemuseums Erfurt \(in Folge VERNATE\)](#)

Jahr/Year: 1994

Band/Volume: [13](#)

Autor(en)/Author(s): Weise Gerhard, Zier Hans-Werner

Artikel/Article: [Wirkung von Luftverunreinigungen auf Kirchtürme der Stadt Erfurt 13-30](#)